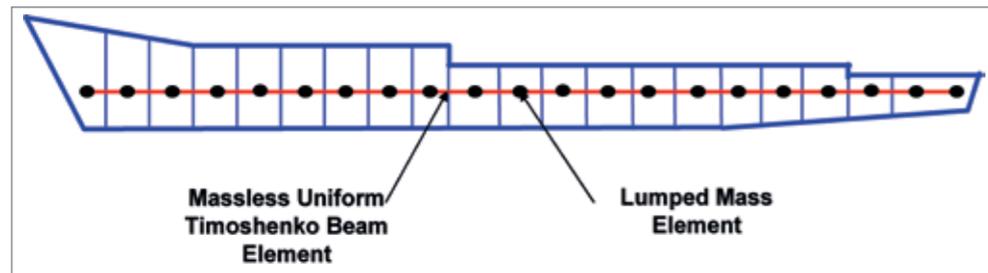


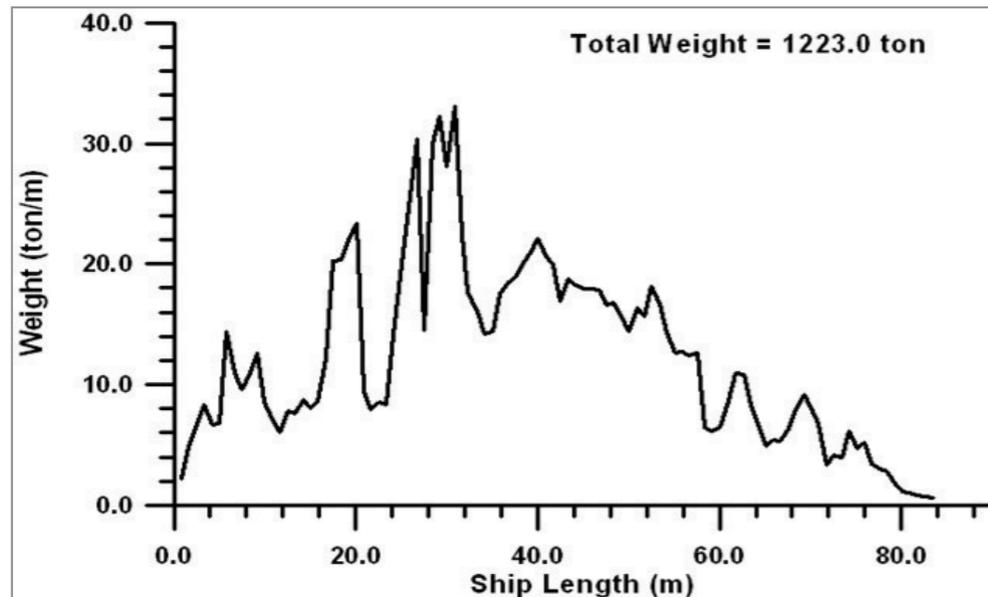
폭발 거리(Standoff distance, 폭약으로부터 선체 용골까지의 최단거리) 10m, 20m, 30m 및 40m의 4가지를 적용하였다.

(2) 해석 방법 및 가정

해석을 위해 주선체를 양단 자유의 경계조건을 갖는 변단면 Timoshenko 보(단순보 이론에 전단변형과 회전관성 효과를 추가한 이론)로 간주하고 <그림 3장-6-2>에 제시한 바와 같이 25개의 절점(Node)¹⁶⁾과 24개의 동일한 길이를 갖는 등가의 보요소로 유한요소 모델링하였다. 한



<그림 3장-6-2> 보유추 휘핑 해석 모델



<그림 3장-6-3> 만재 시 선체 길이방향 중량 분포

16) 구조물(해석 모델)의 요소와 요소를 연결시켜 주는 점.

편, 천안함의 중량(부가수 중량 포함)은 절점에 위치하는 집중중량으로 처리하였으며 이들 절점을 연결하는 보요소는 질량이 없는 것으로 간주하였다. 함의 적재 조건은 만재 하중을 고려하였으며, <그림 3장-6-3>에는 만재 시 선체 길이방향을 기준으로 중량분포를 도시하였다.

Timoshenko 보요소의 2차 단면모멘트, 유효전단계수, 진동차수별 굽힘강성 수정계수, 2차원 부가수 중량과 진동차수별 3차원 부가수 중량 수정계수는 한국기계연구원에서 개발한 선박의 주선체 보유추 진동해석 프로그램인 VIBHUL¹⁷⁾을 사용하여 계산하였다.

휘핑 해석 프로그램으로는 한국기계연구원에서 Hicks의 버블 거동 해석이론과 모드중첩법에 의거하여 개발한 UNDEX_WHIP을 사용하였다. 모드중첩법에 의한 휘핑 계산을 위해 주선체의 상하진동 1차~5차의 고유모드만을 고려하였다. 그 이유는 보유추 진동해석 방법은 일반적으로 1차~5차의 고유모드에 대해서만 비교적 정확한 결과를 나타내며, 주선체의 휘핑 응답은 이들 저차 고유모드들에 의해 지배되기 때문이다. 감쇠¹⁸⁾의 영향은 무시하였다.

또한 버블 펄스에 의해 선체에 작용하는 유체 충격력 계산에 있어서는 1차 버블 펄스에 의한 충격력만을 고려하였다. 그 이유는 Hicks의 버블 거동 해석이론이 버블 맥동운동 1차 주기 동안에 대해서만 비교적 정확한 결과를 보여주기 때문이다. 유체 충격력 계산에 있어서는 자유수면 효과와 버블의 수직상승을 고려하였다.

휘핑 시작 전에 천안함은 만재 시의 평균 흘수(2.88m)로 정수(Calm sea) 중에 떠 있다고 가정하였으며, 휘핑 시작 후에 이로 인한 흘수 변화는 무시하였다. 수중폭발 조건 각각에 대해 계산된 버블 맥동운동 1차 주기를 고려했을 때 2초 동안의 해석만으로도 천안함 주선체의 휘핑 응답 특성을 충분히 파악할 수 있다고 판단하여 2초 동안에 대해서만 휘핑 응답을 계산하였다.

최종 강도 관점에서 주선체의 종강도 안전성을 검토하기 위해 휘핑 해석을 통해 계산된 휘핑 굽힘모멘트(Whipping bending moment)와 최종 굽힘모멘트(Ultimate bending moment)를 비교 검토하였다. 최종 굽힘모멘트는 울산대학교에서 Smith 이론에 의거하여 개발한 프로그램인 ULSAN을 사용하였다.

17) VIBHUL(선체고유진동 추정 프로그램) : 한국과학기술정보연구원에서 개발, 선박 설계 및 생산 시 선박의 진동해석을 위한 전산프로그램 명칭.
18) 감쇠(Damping) : 휨이나 진동 등이 점차적으로 줄어들어 정상상태에 도달하는 것.

차수	진동모드	계산된 고유진동수(Hz)
		만재 하중 조건
1	2절 진동형	2.32
2	3절 진동형	4.74
3	4절 진동형	7.71
4	5절 진동형	10.41
5	6절 진동형	13.40

〈표 3장-6-2〉 만재 시 주선체의 상하방향 고유진동 해석 결과

(3) 해석 결과

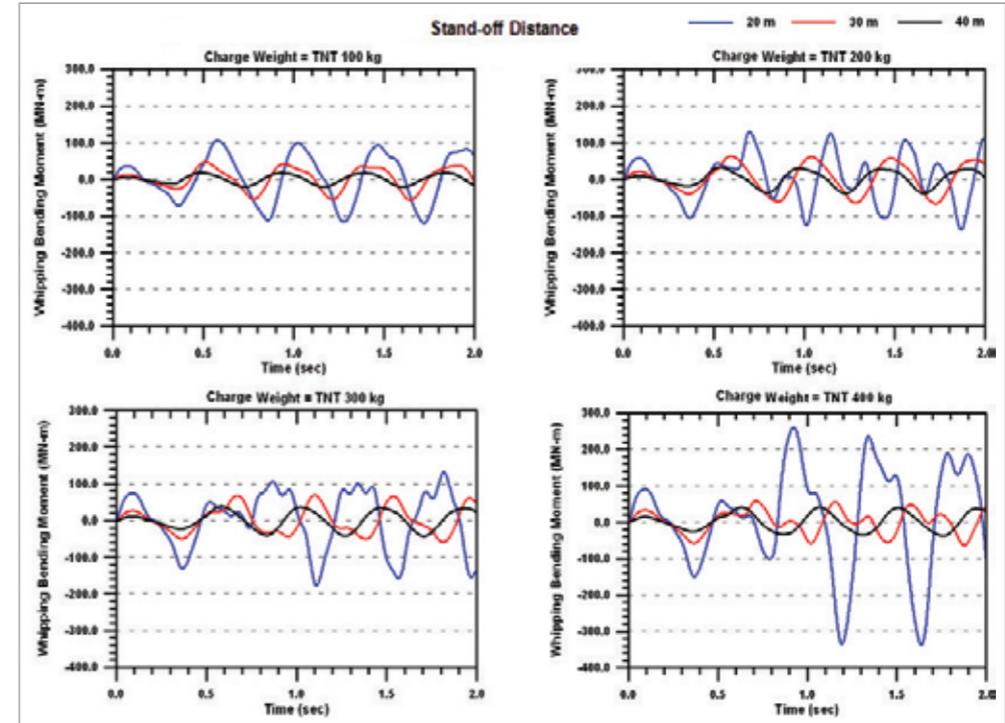
① 상하방향 고유진동 해석 결과

만재 하중 조건에 대한 천안함 주선체의 상하방향 고유진동 해석 결과는 〈표 3장-6-2〉에 정리하였다. 표에서 보듯이 주선체의 최저차 상하방향 고유진동수는 2.32Hz이며, 진동모드는 2절(Node) 진동형(Mode shape)이다.

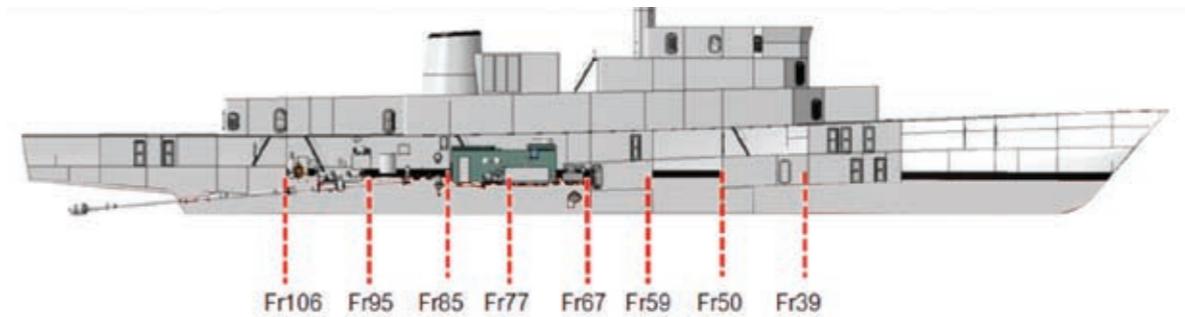
② 휘핑 굽힘모멘트 시간이력 계산 결과

고려한 수중폭발 조건들 중에서 폭발 거리가 10m인 경우는 휘핑 해석에서 제외시켰다. 그 이유는 Hicks의 버블 거동 해석 이론이 유효하려면 폭발 깊이가 대상 선박의 수선면에서의 최대 선폭보다 2.5배 이상이 되어야 하기 때문이다. 천안함의 수선면에서의 최대 선폭이 10m이므로 휘핑 해석 결과의 유효성을 보장하려면 폭발 깊이가 25m(폭발 거리는 22.12m) 이상이 되어야 한다. 따라서 원칙적으로는 폭발 거리가 20m인 경우도 제외시켜야 하지만, 해석제한의 한계선에 가까우며 분석이 필요한 수중폭발 조건이라고 판단하여 이에 대해서는 해석을 수행하였다.

〈그림 3장-6-4〉에는 폭약 중량 100kg, 200kg, 300kg, 400kg 각각에 대해 천안함 중앙부에서 계산된 휘핑 굽힘모멘트 시간이력을 도시하였다. 그림에서 보듯이 천안함 주선체의 휘핑 응답은 상하방향 2절 고유진동형이 지배하며, 폭약 중량이 동일한 경우 폭발 거리가 짧아질수록 휘핑 굽힘모멘트의 최대값이 커짐을 알 수 있다. 특히 폭약 중량이 400kg인 경우 폭발 거리가 20m일 때의 최대 휘핑 굽힘모멘트가 폭발 거리가 30m 및 40m일 때보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.



〈그림 3장-6-4〉 폭약 중량별 폭발 거리에 따른 천안함 중앙부에서의 휘핑 굽힘모멘트 시간이력

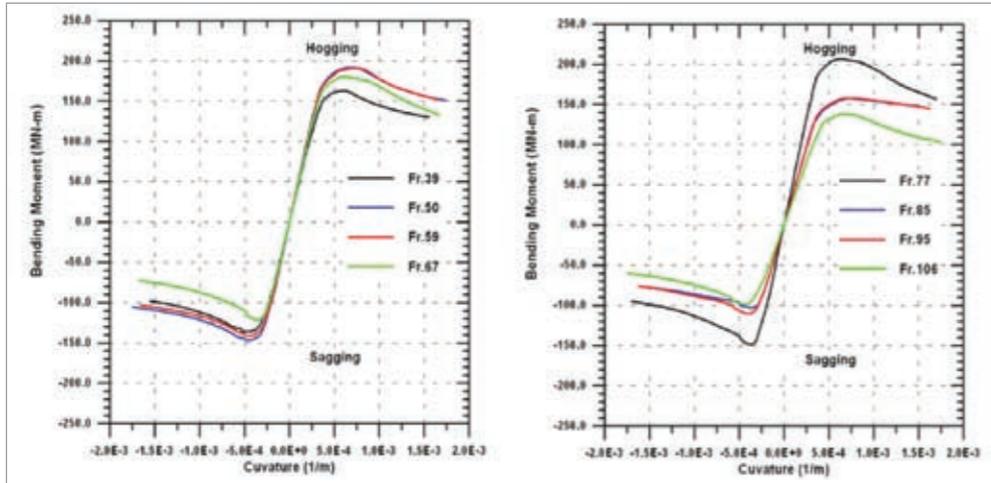


〈그림 3장-6-5〉 최종 굽힘모멘트 계산 대상 단면 위치

③ 최종 굽힘모멘트 계산 결과

〈그림 3장-6-5〉에 제시한 8개의 단면¹⁹⁾에 대해 ULSAN 프로그램을 사용하여 해당 단면에

19) 본 해석의 주 관심 부위인 프레임 67부터 프레임 85까지의 떨어져 나간 가스터빈실과 인접 격실들의 대표적 단면들을 선정.



〈그림 3장-6-6〉 단면별 곡률-굽힘모멘트

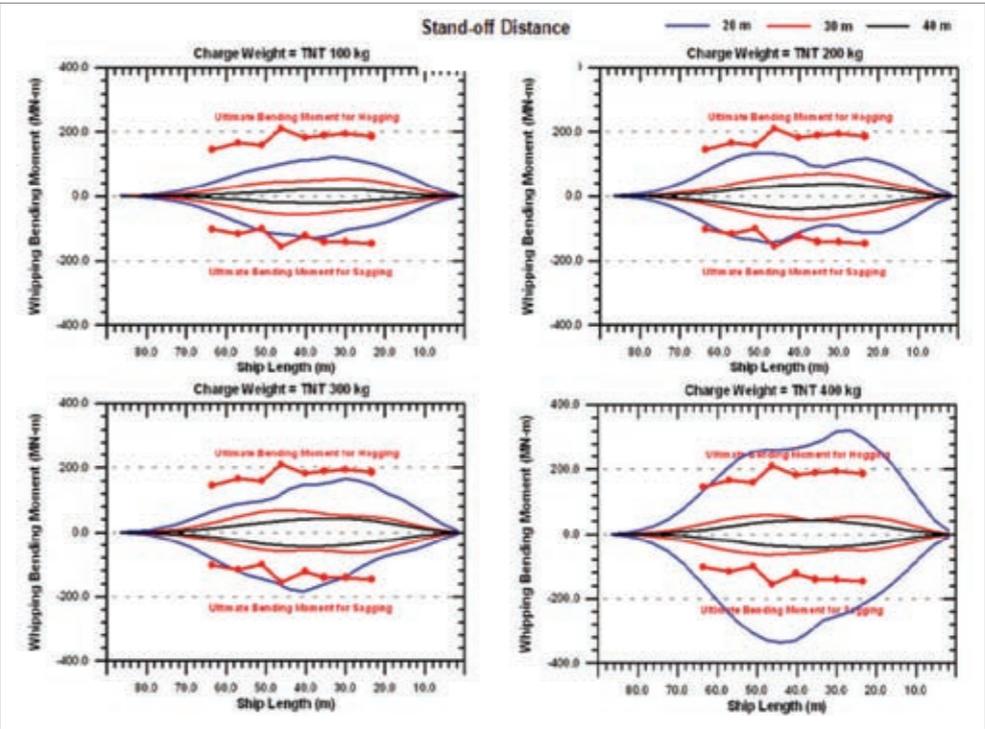
단면 위치	최종 굽힘모멘트(단위 : 10 ⁶ N-m)	
	호깅 상태	새깅 상태
프레임 39	185.7	147.4
프레임 50	194.4	141.3
프레임 59	188.5	141.0
프레임 67	182.0	122.7
프레임 77	210.7	156.0
프레임 85	159.3	100.4
프레임 95	165.8	116.2
프레임 106	144.9	103.2

〈표 3장-6-3〉 단면별 최종 굽힘모멘트

서의 최종 굽힘모멘트를 계산하였다. 〈그림 3장-6-6〉에는 단면별로 곡률(Curvature)-굽힘모멘트 선도를 도시하였으며, 이로부터 계산된 최종 굽힘모멘트를 〈표 3장-6-3〉에 정리하였다. 이들 그림과 표에서 보듯이 천안함은 호깅보다 새깅 시 굽힘 하중에 대해 취약함을 알 수 있다.

④ 종강도 안전성 검토 결과

최종강도 관점에서 천안함 주선체의 종강도 안전성을 검토하기 위해 폭약 중량 100kg, 200kg, 300kg, 400kg 각각에 대해 계산된 최대 휘핑 굽힘모멘트와 최종 굽힘모멘트를 비교



〈그림 3장-6-7〉 폭약 중량별 휘핑 굽힘모멘트와 최종 굽힘모멘트 비교

하였으며, 그 결과를 〈그림 3장-6-7〉에 도시하였다. 그림에서 보듯이 TNT 폭약 100kg, 200kg, 300kg에 대해서는 폭발 거리 20m까지는 호깅 시 최종 강도 관점에서 충분히 안전하지만, 새깅 시 TNT 폭약 100kg이 폭발 거리 20m에서 폭발해도 천안함 주선체의 종강도에 기여하는 길이방향 부재에 손상이 발생할 수 있음을 알 수 있다.

(4) 소결론

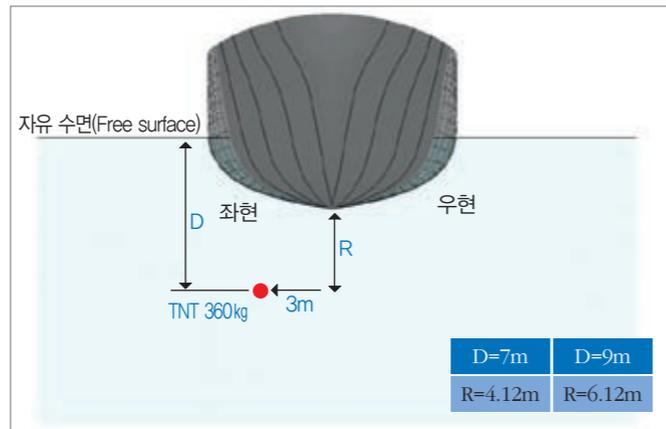
수중폭발 버블의 반복적 팽창, 수축의 맥동운동으로 인한 천안함 주선체의 1차원 보유추 휘핑 해석을 통해 TNT 폭약 100kg 이상이 천안함 중앙부 단면 중앙선 직하의 20m 거리 이내에서 폭발하면 천안함 일부 단면에서는 최종 굽힘모멘트보다 큰 휘핑 굽힘모멘트가 발생하고, 이로 인해 주선체 종강도에 기여하는 해당 단면의 길이방향 부재에 손상이 발생할 수 있음을 확인하였다.

3) 근접 수중폭발 충격 해석

폭발유형분석분과에서 최종적으로 제공한 근접 수중폭발 조건 2가지에 대해 유체-구조 상호작용을 고려한 3차원 탄소성 유한요소 해석을 수행하였다. 계산된 손상과 천안함이 실제로 입은 손상을 비교 검토하여 천안함을 침몰로 이끈 손상 경위를 유추하고자 하였다.

(1) 해석을 위한 수중폭발 조건

해석을 위한 근접 수중폭발 조건을 <그림 3장-6-8>에 도시하였다. 그림에서 보듯이 TNT 폭약 360kg이 수심 7m 및 9m²⁰⁾, 천안함의 프레임 78(떨어져 나간 가스터빈실의 선체 길이방향으로의 중앙부인 프레임 76에서 함미방향으로 2프레임(1.2m) 떨어진) 단면에서 단면 중앙선으로부터 좌현방향으로 3m 치우쳐 폭발하는 경우이다.



<그림 3장-6-8> 근접 수중폭발 충격 해석을 위한 수중폭발 조건

(2) 해석 방법 및 가정

수중폭발이 일어나기 전에 천안함은 만재 시의 평균 흘수로 정수 중에 떠 있다고 가정하였고 함의 적재 조건은 만재하중을 고려하였으며 매우 빠른 시간에 발생하는 구조응답을 계산하므로 감쇠의 영향은 무시하였다.

.....
20) 근접 수중폭발 충격 해석을 위한 시뮬레이션은 선체 변형과 가장 근사하다고 판단되는 TNT 360kg에 수심 7m와 9m의 경우에 대해 실시하였고, TNT 360kg은 고성능 폭약 250kg의 위력에 포함되는 폭발력임.

해석 프로그램으로는 상용 프로그램인 LS-DYNA Version 971²¹⁾을 사용하였다.

유체-구조 상호작용을 고려하기 위해 선체뿐만 아니라 폭약, 해수, 선체 내부 및 자유수면 위의 공기도 직접 유한요소로 모델링하였으며, 유체-구조 연성해석 기법(Multi-material arbitrary lagrangian eulerian)을 사용하였다. 폭약의 형상을 구(Sphere)로 가정하여 모델링하였다.

(3) 해석 모델

전체 유한요소 해석 모델 및 관련정보를 <그림 3장-6-9>에 도시하였다. 그림에서 보듯이 전체 해석 모델은 총 절점 및 요소 수가 모두 300만 개를 넘는 방대한 모델이기 때문에 Xeon E5430 2.66GHz CPU 16개를 이용한 병렬연산을 수행하였고 선체구조, 폭약 및 유체(해수 및 공기) 모델에 대해 상술하였다.

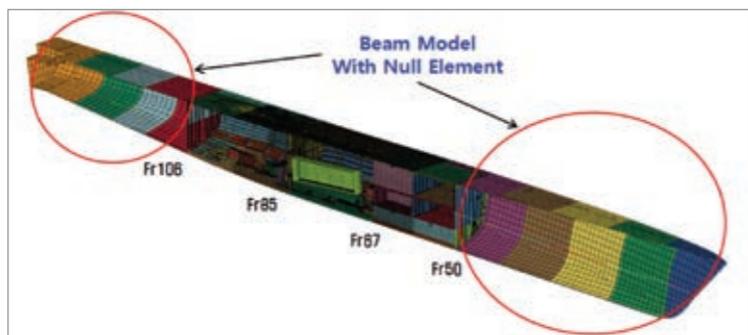


<그림 3장-6-9> 전체 유한요소 해석 모델

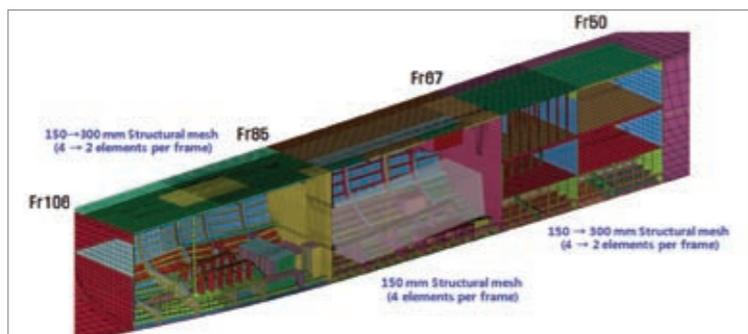
① 선체에 대한 해석 모델

선체에 대한 해석 모델을 <그림 3장-6-10>에 도시하였다. 본 해석의 주 목적이 절단된 천안함 가스터빈실의 손상을 시뮬레이션하고 손상 경위를 파악하는 것이기 때문에 그림에서

.....
21) 단시간에 진행되는 현상을 묘사 및 해석하는 프로그램 명칭, 주로 자동차 충돌시험 시 사용.



〈그림 3장-6-10〉 선체에 대한 유한요소 해석 모델



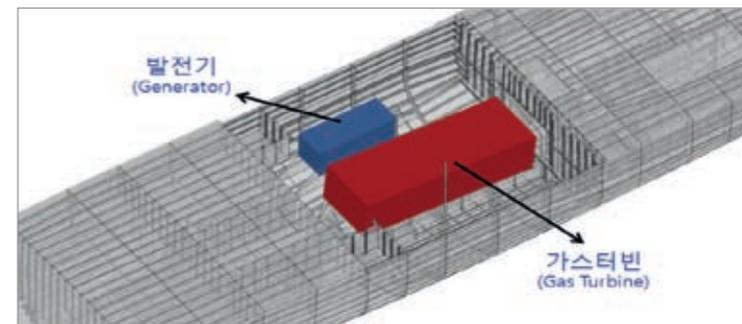
〈그림 3장-6-11〉 프레임 50~프레임 106 사이의 선체에 대한 유한요소 해석 모델

보듯이 가스터빈실을 포함한 인접 격실들(프레임 50~프레임 106 사이의 구조)은 가능한 상세히 모델링하였으며, 나머지 부분은 등가 보요소로 모델링하였다. 보요소로 모델링된 부분의 함 형상을 유지하기 위해 강성과 질량이 없는 Null 요소²²⁾를 사용하여 보요소들과 Rigid link 요소²³⁾를 사용하여 연결하였다. 또한 선체구조의 모델링에 있어서는 종강도에 기여하는 주갑판까지만을 고려하였다. 한편 가스터빈실 상부 주갑판상의 소프트패치와 같은 개구부들은 등가의 강성을 갖는 판으로 치환하여 개구부가 없도록 하였다.

〈그림 3장-6-11〉에는 본 해석의 주 관심 부위(프레임 50~프레임 106 사이의 구조)에 대한 유한요소 해석 모델을 도시하였다. 그림에서 보듯이 가스터빈실은 프레임 간격(600mm)당 4개의 요소로 모델링하였으며, 인접 격실은 가스터빈실로부터 멀어짐에 따라 프레임 간격당 4개의 요소에서 2개의 요소로 모델링하였다. 판 부재뿐만 아니라 보강재의 손상도 검토하기 위해 이 부위에 있는 모든 보강재들도 쉘(판) 요소로 모델링하였다. 또한 가스터빈, 발전기,

22) 함을 모델링할 경우 형상유지를 위해 사용하는 강성과 질량이 없는 요소.
23) 충격 시 변형 분석을 위해 Null 요소와 하중 요소를 연결시켜 주는 요소.

디젤엔진 및 감속기어의 받침대도 모델링하였으며, 〈그림 3장-6-12〉에 제시한 바와 같이 가스터빈 및 발전기는 실제 제원과 거의 유사한 3차원 강체 블록으로 모델링하였다.

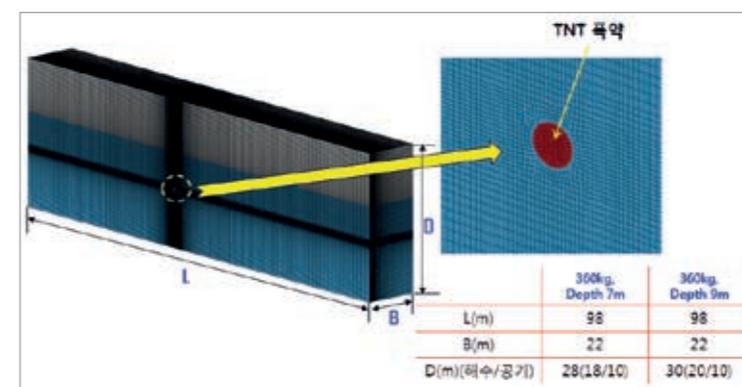


〈그림 3장-6-12〉 가스터빈 및 발전기에 대한 해석 모델

손상 해석을 위해 쉘 요소들의 재질은 Cowper-Symonds 모델로 표현되는 Strain rate 효과를 고려한 탄소성 재질, 즉 LS-DYNA의 Material No. 24인 'Piecewise linear plasticity material model'로 취급하였다.

② 폭약, 해수 및 공기에 대한 해석 모델

폭약, 해수 및 공기에 대한 해석 모델을 〈그림 3장-6-13〉에 도시하였다. 폭약은 Jones-Wilkins-Lee(JWL)의 상태방정식에 따라 거동하는 Euler 요소²⁴⁾로, 해수 및 공기는



〈그림 3장-6-13〉 폭약, 해수 및 공기에 대한 해석 모델

24) 수학자인 레온하르트 오일러(Leonhard Euler, 스위스, 1707~1783)가 만들어 낸 공식으로 점성이 없는 유체의 운동 상태를 파악할 때 사용됨.

Gruneisen 및 Polynominal의 상태방정식에 따라 거동하는 Euler 요소로 각각 모델링하였다. 모델링에 포함된 직육면체 형상의 유체 영역의 높이 및 폭은 수중폭발 조건 시 발생하는 버블의 최대반경을 고려하여 최대크기의 버블을 충분히 포함하도록 결정하였다. <그림 3장-6-13>에서 보듯이 유체 영역의 높이는 폭발 수심이 7m인 경우에는 28m(해수 부분 18m, 공기 부분 10m), 폭발 수심이 9m인 경우에는 30m(해수 부분 20m, 공기 부분 10m), 유체 영역의 폭은 2가지 경우 모두 22m로 결정하였다. 또한 유체 영역의 길이는 천안함 전체 길이보다 충분히 긴 98m로 결정하였다.

(4) 해석 결과

고려한 2가지 근접 수중폭발 조건, 즉 TNT 폭약 360kg이 수심 7m와 9m에서 각각 폭발한 경우의 버블 맥동운동 1차 주기를 고려하여 2가지 경우 모두 2초 동안의 해석을 수행하고자 하였다.

그러나 <그림 3장-6-14>에서 보듯이 TNT 폭약 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우에 대한 해석을 통해 예측된 가스터빈실의 손상 정도가 실제 천안함 손상상태와 비교했을 때 매우 미약하다고 판단되어 이 경우에 대해서는 0.9초까지만 해석을 수행하고 중단하였다.

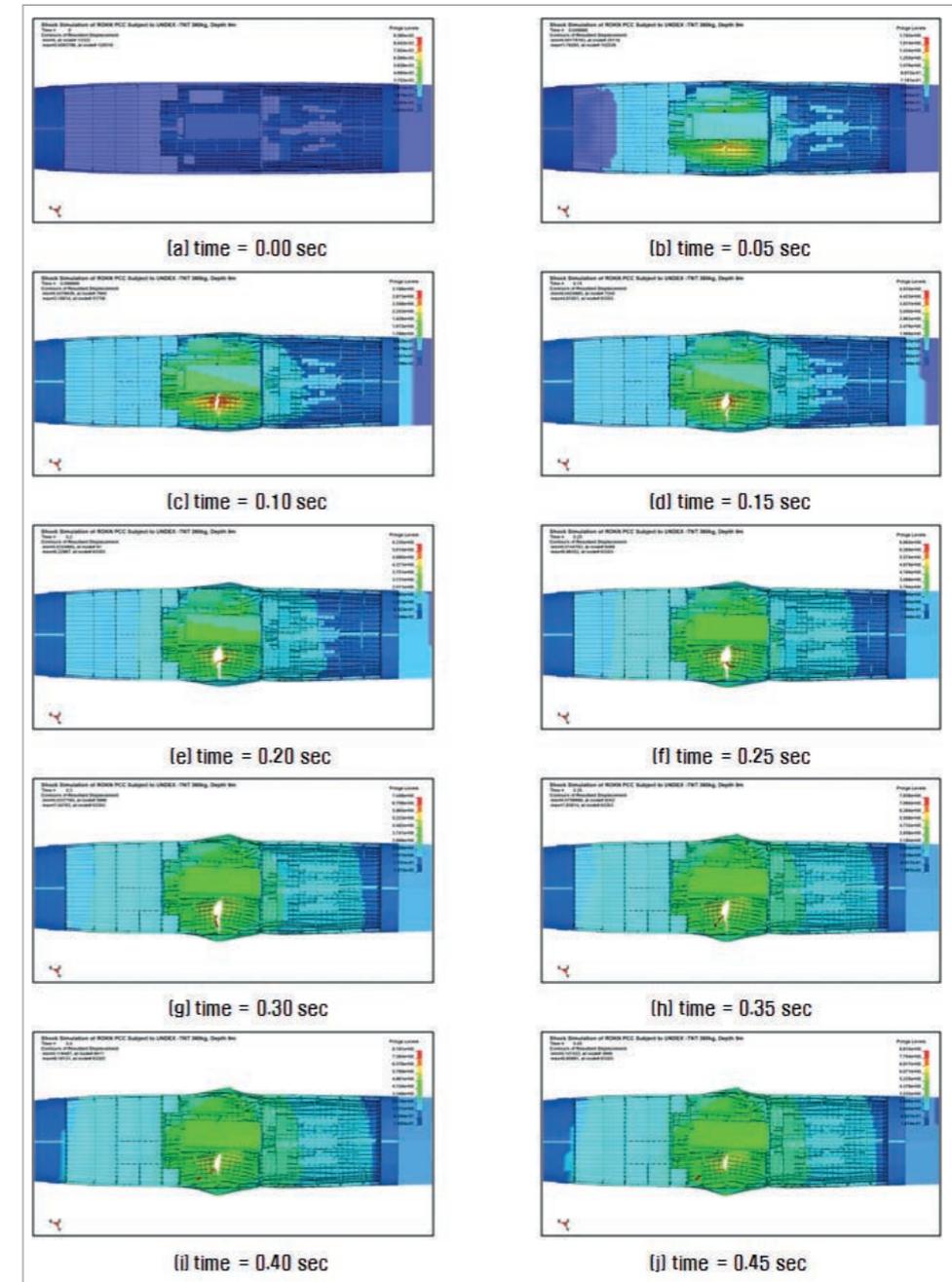
<그림 3장-6-15>에는 TNT 폭약 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우 선체 측면(Side)에서 본 선체의 응답과 버블 거동(움직임)을 대표적 시간대별로 함께 도시하였다. 그림에서 보듯이 근접 수중폭발 조건이기 때문에 충격파와 버블 거동에 의한 하중이 가스터빈실 및 이에 바로 인접한 격실에 집중하여 국부적으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 또한 버블의 팽창 및 수축과 이로 인한 선체의 호킹 및 새깅 거동이 잘 구현되고 있음을 알 수 있다.

이하에서는 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과와 이를 토대로 천안함 가스터빈실의 절단 및 유실과 이로 인한 침몰 경위에 대한 검토 결과를 상세히 기술하였다.

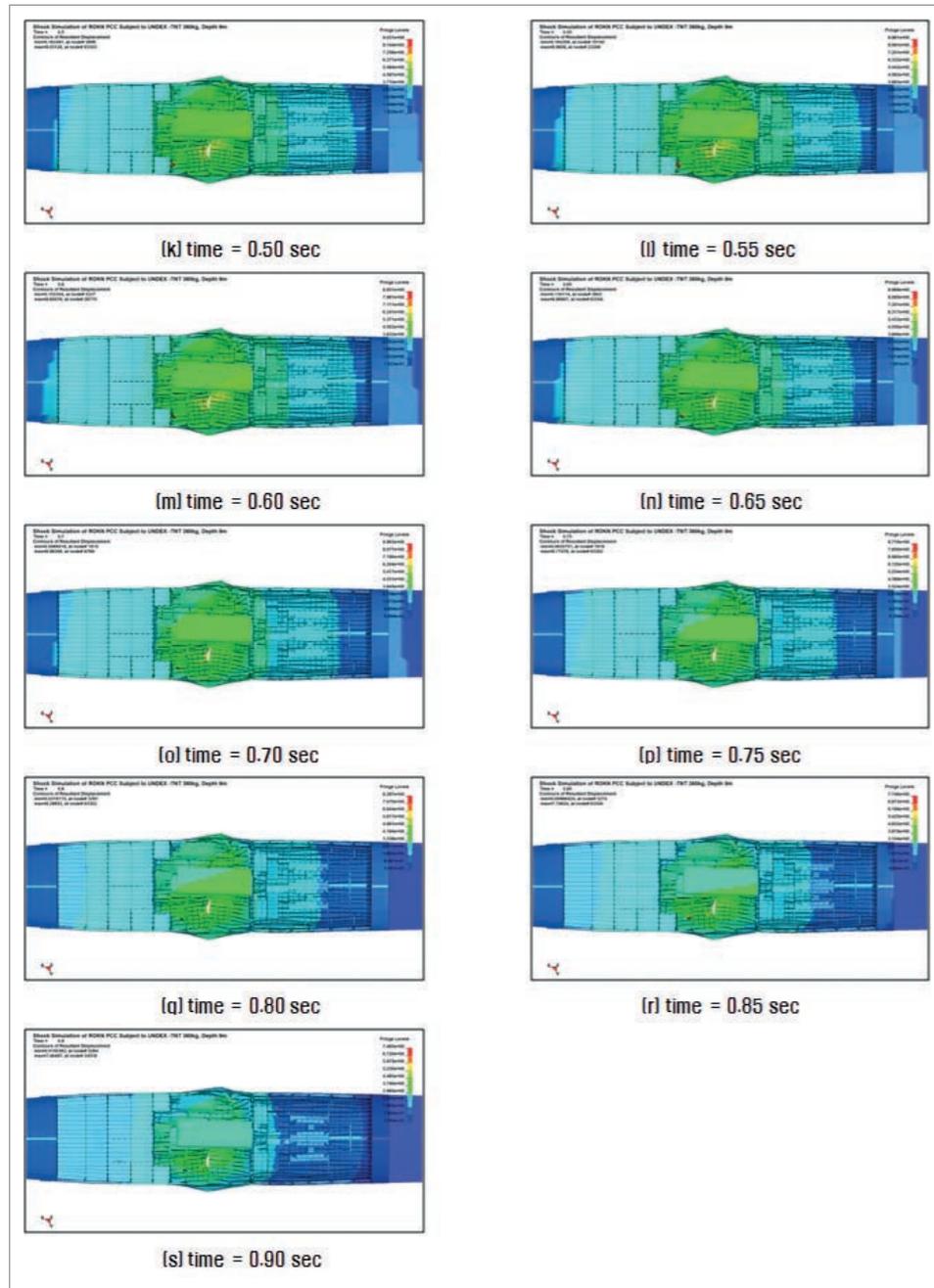
<그림 3장-6-16>~<그림 3장-6-22>에는 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과를 다양한 각도에서 대표적 시간대별로 도시하였다.

<그림 3장-6-16> 및 <그림 3장-6-17>에서 보듯이 이 경우에도 충격파와 버블 거동에 의한 하중이 가스터빈실 및 이에 바로 인접한 격실에 집중하여 국부적으로 작용하고 있으며, 버블의 팽창, 수축 및 재팽창과 이로 인한 선체의 호킹, 새깅 및 호킹 거동이 잘 구현되고 있음을 알 수 있다.

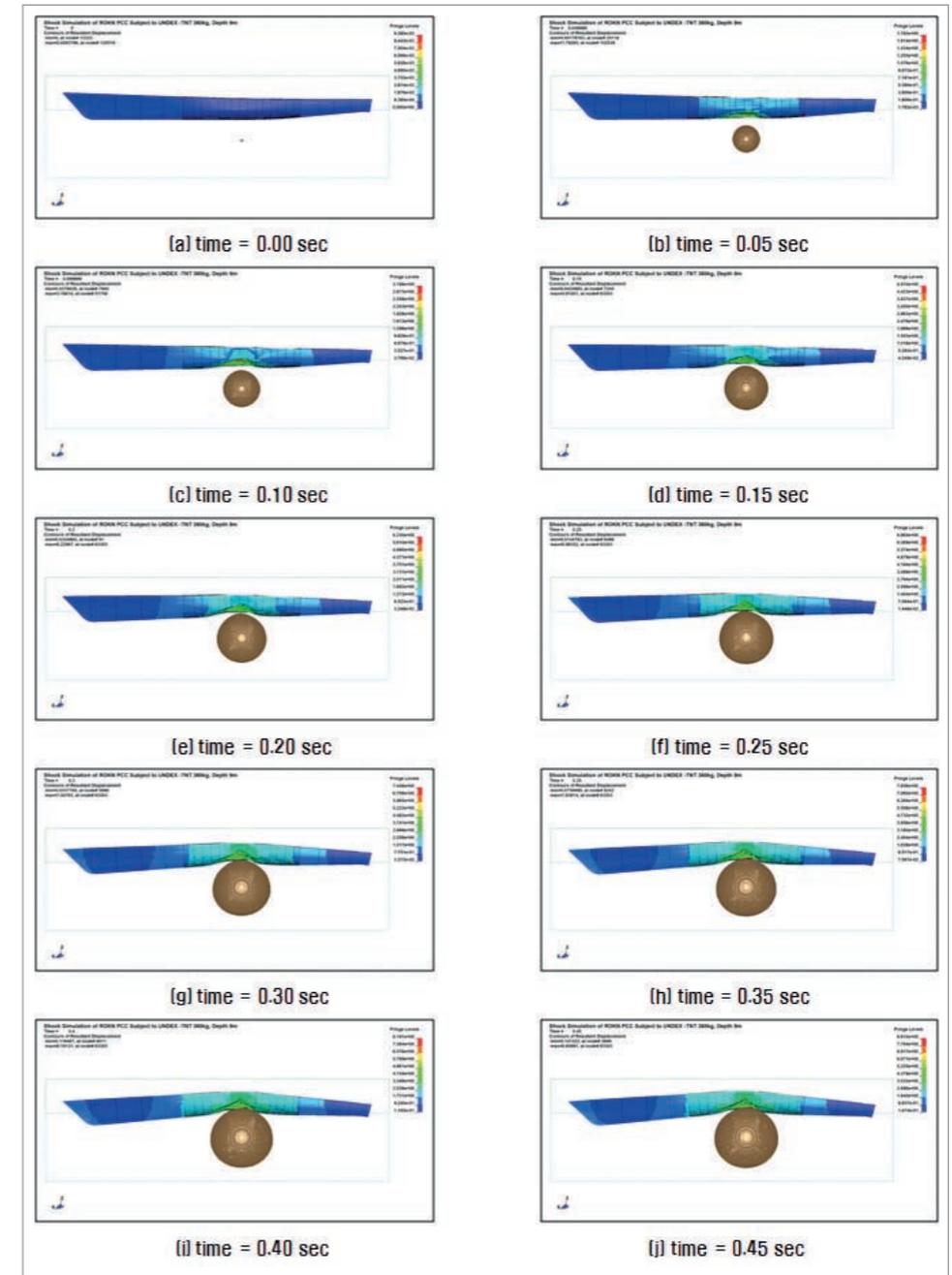
<그림 3장-6-18>~<그림 3장-6-22>로부터 천안함의 가스터빈실이 어떤 순서로 떨어져



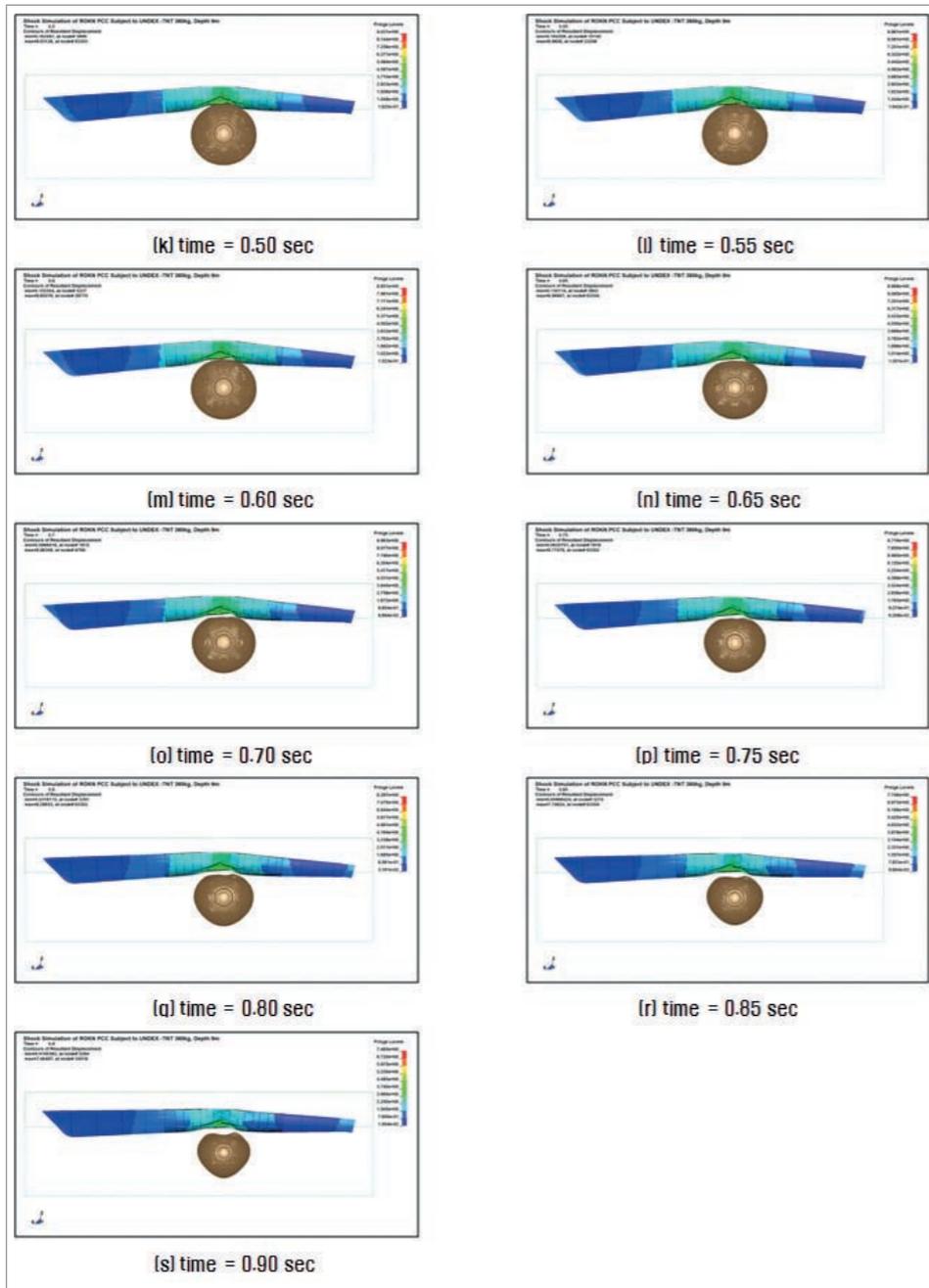
<그림 3장-6-14> TNT 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : 가스터빈실 손상



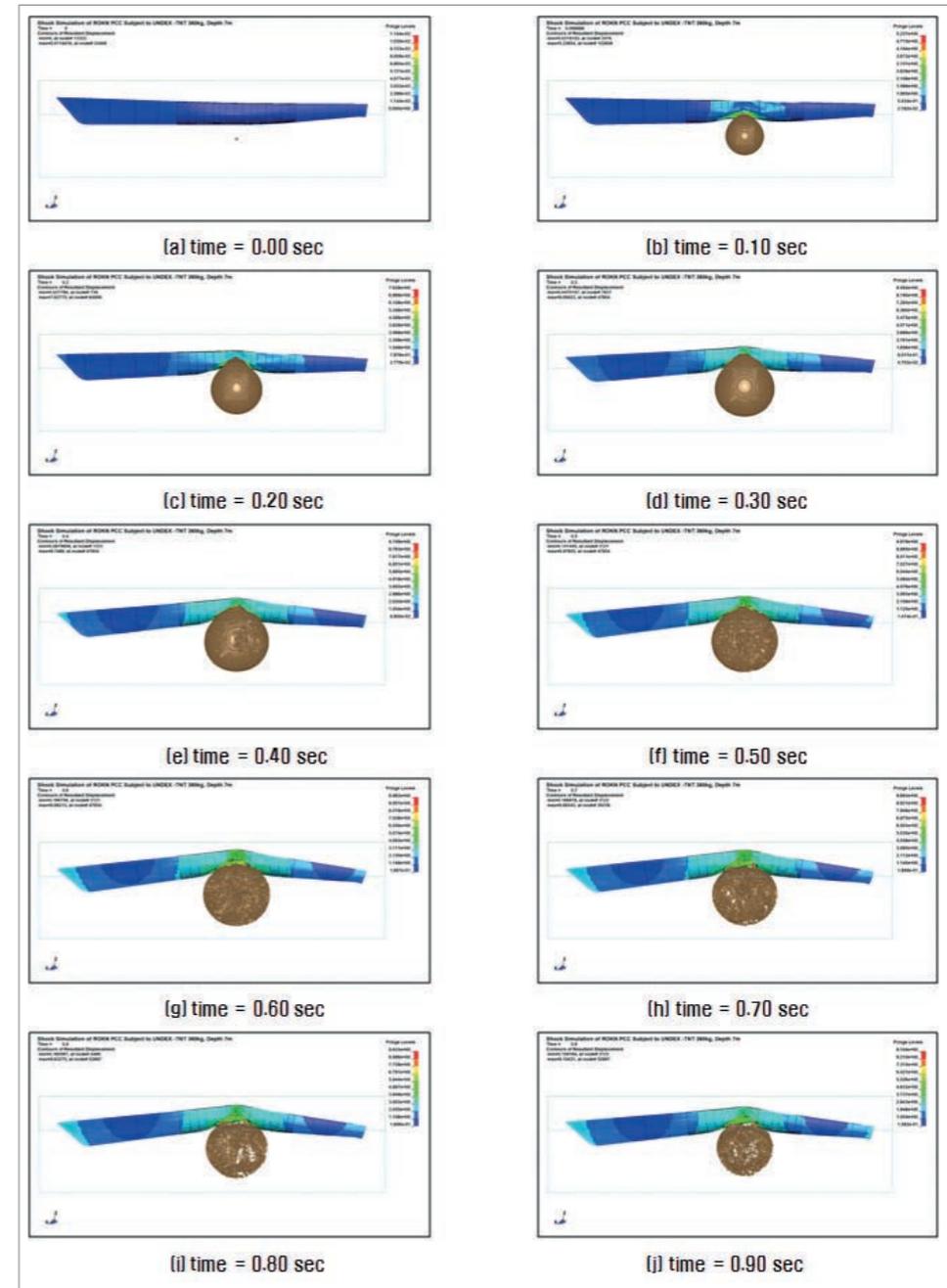
<그림 3장-6-14> TNT 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : 가스터빈실 손상 (계속)



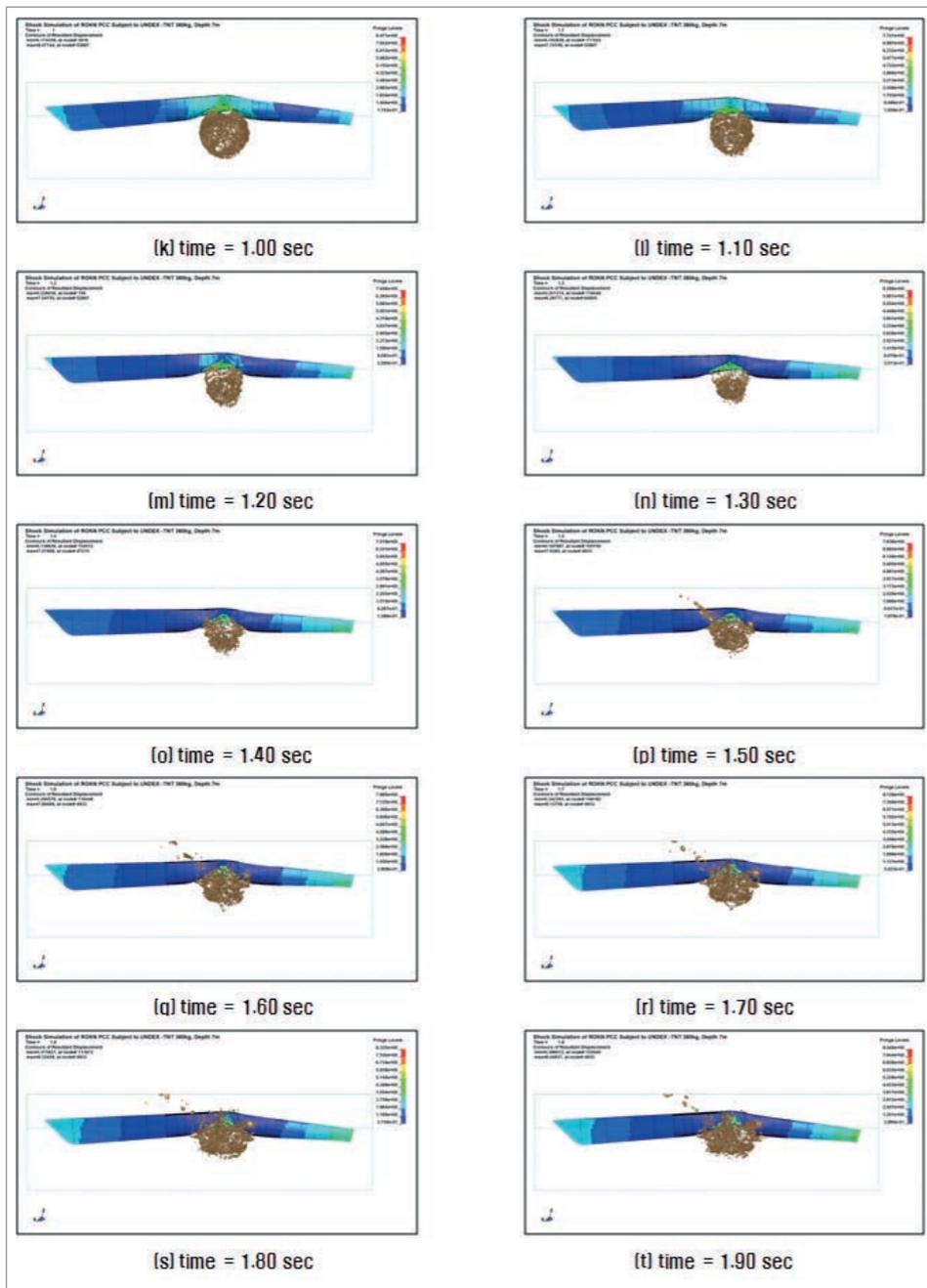
<그림 3장-6-15> TNT 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우의 해석 결과(Side view) : 선체 응답 및 버블 거동



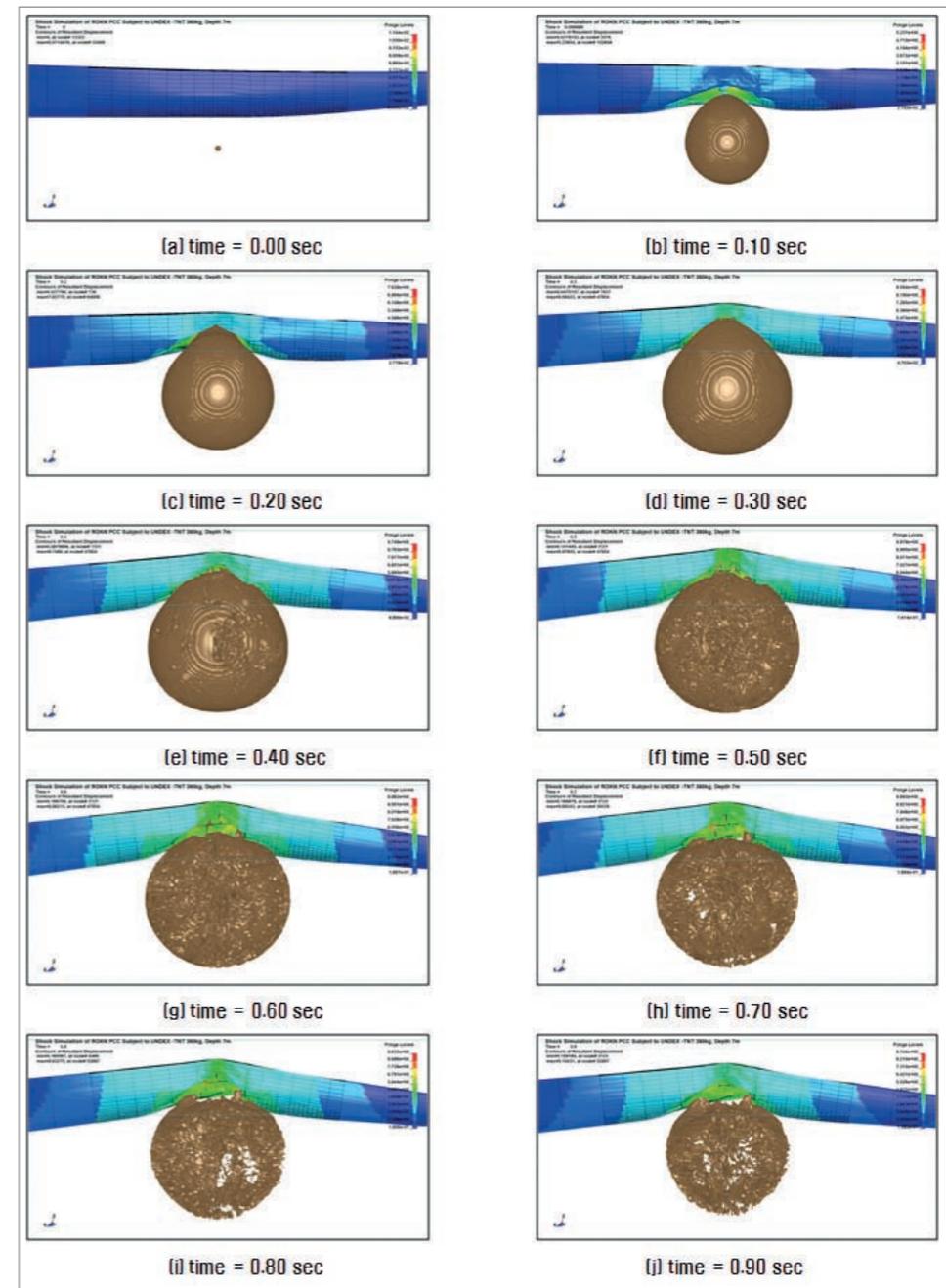
〈그림 3장-6-15〉 TNT 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우의 해석 결과(Side view) : 선체 응답 및 버블 거동 (계속)



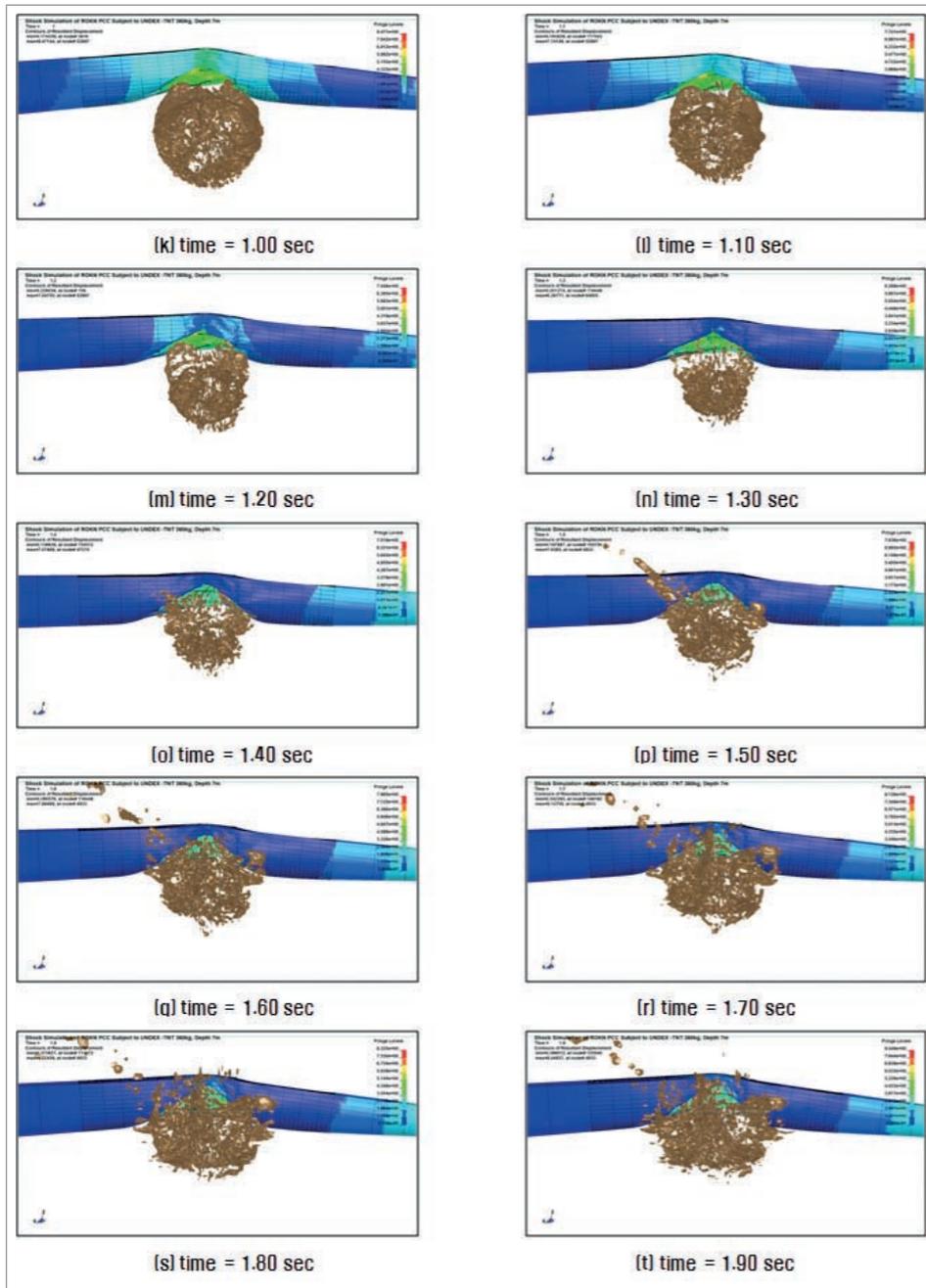
〈그림 3장-6-16〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Side view



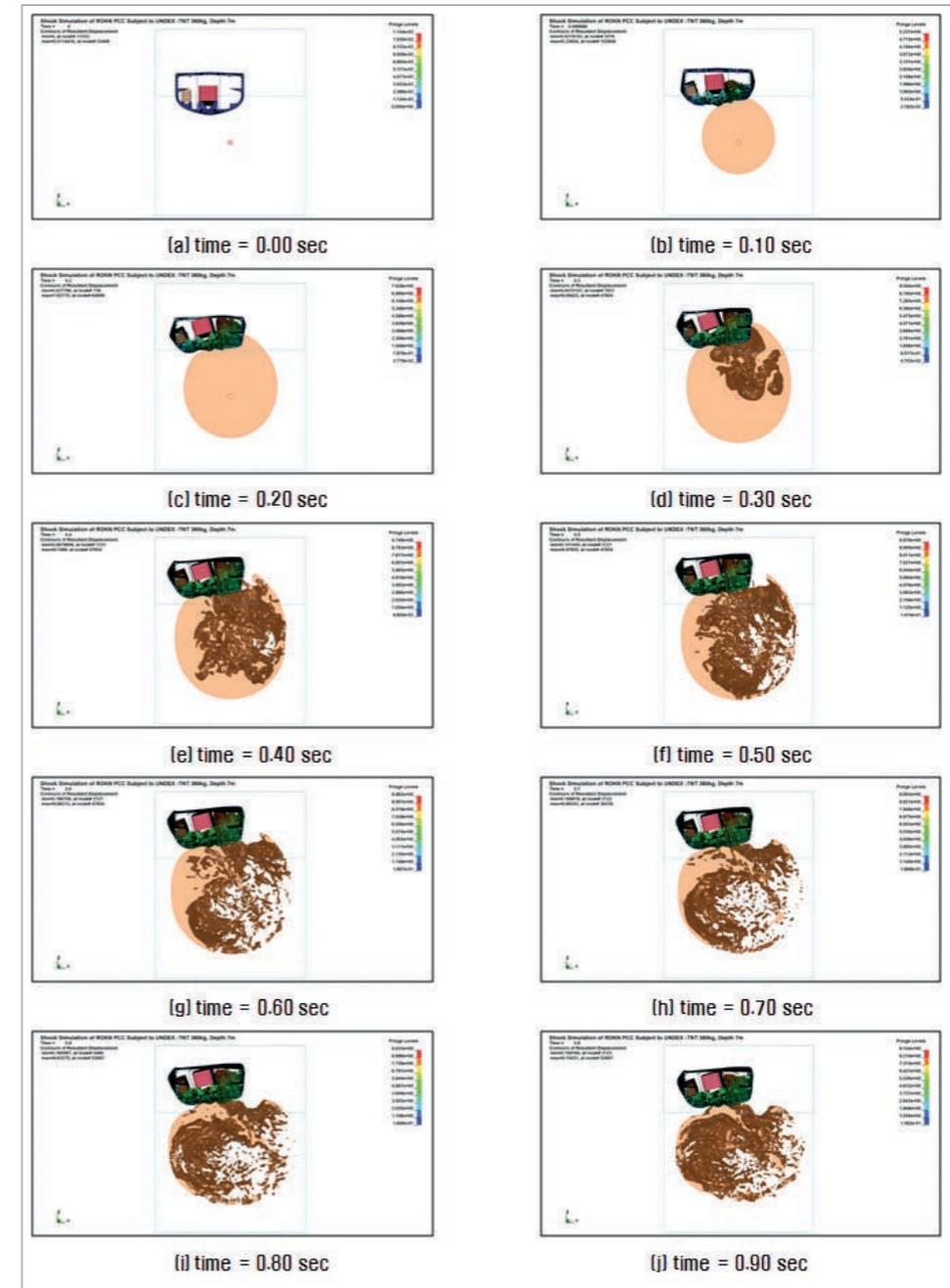
〈그림 3장-6-16〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Side view (계속)



〈그림 3장-6-17〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : 확대 Side view



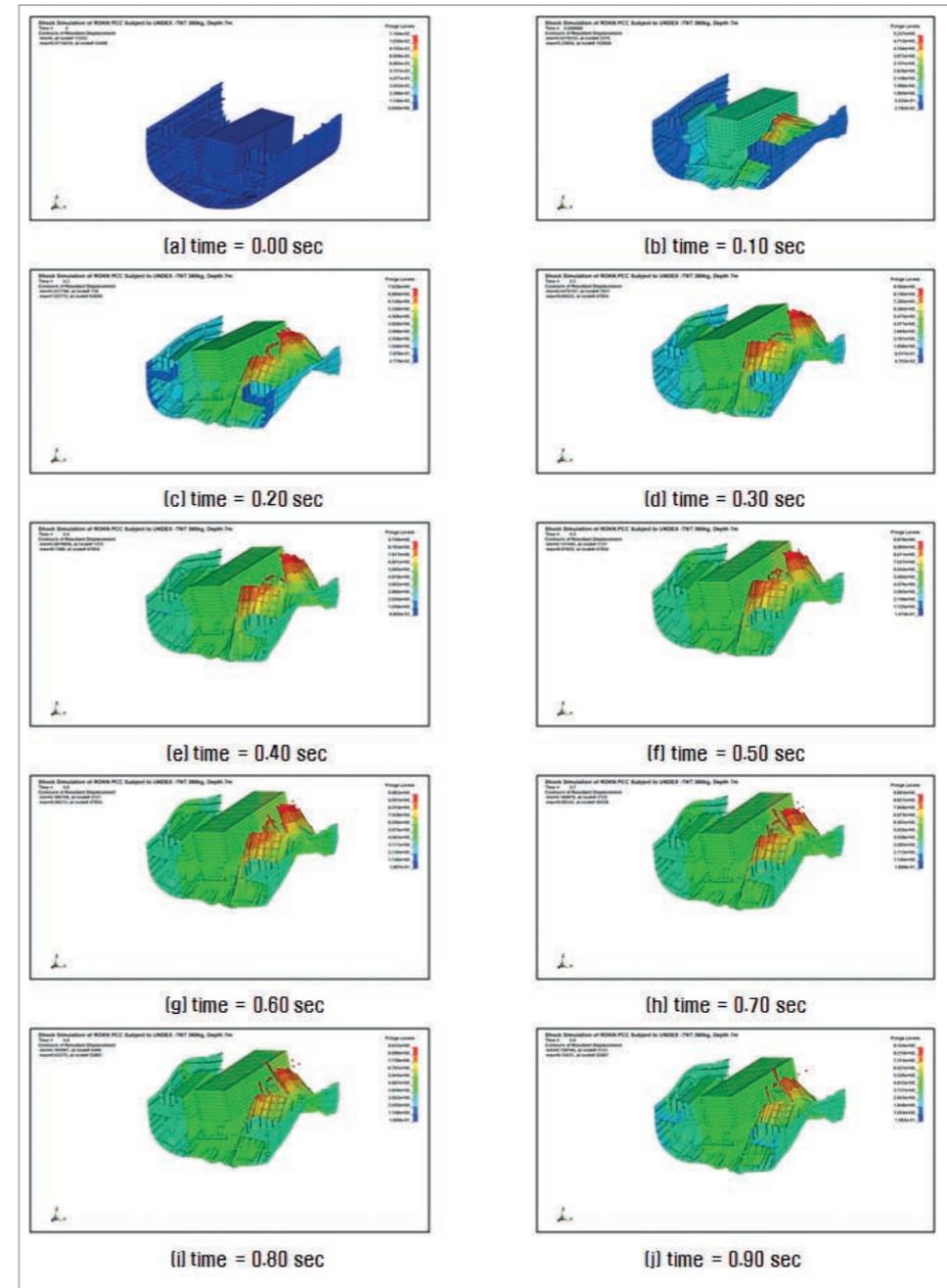
〈그림 3장-6-17〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : 확대 Side view (계속)



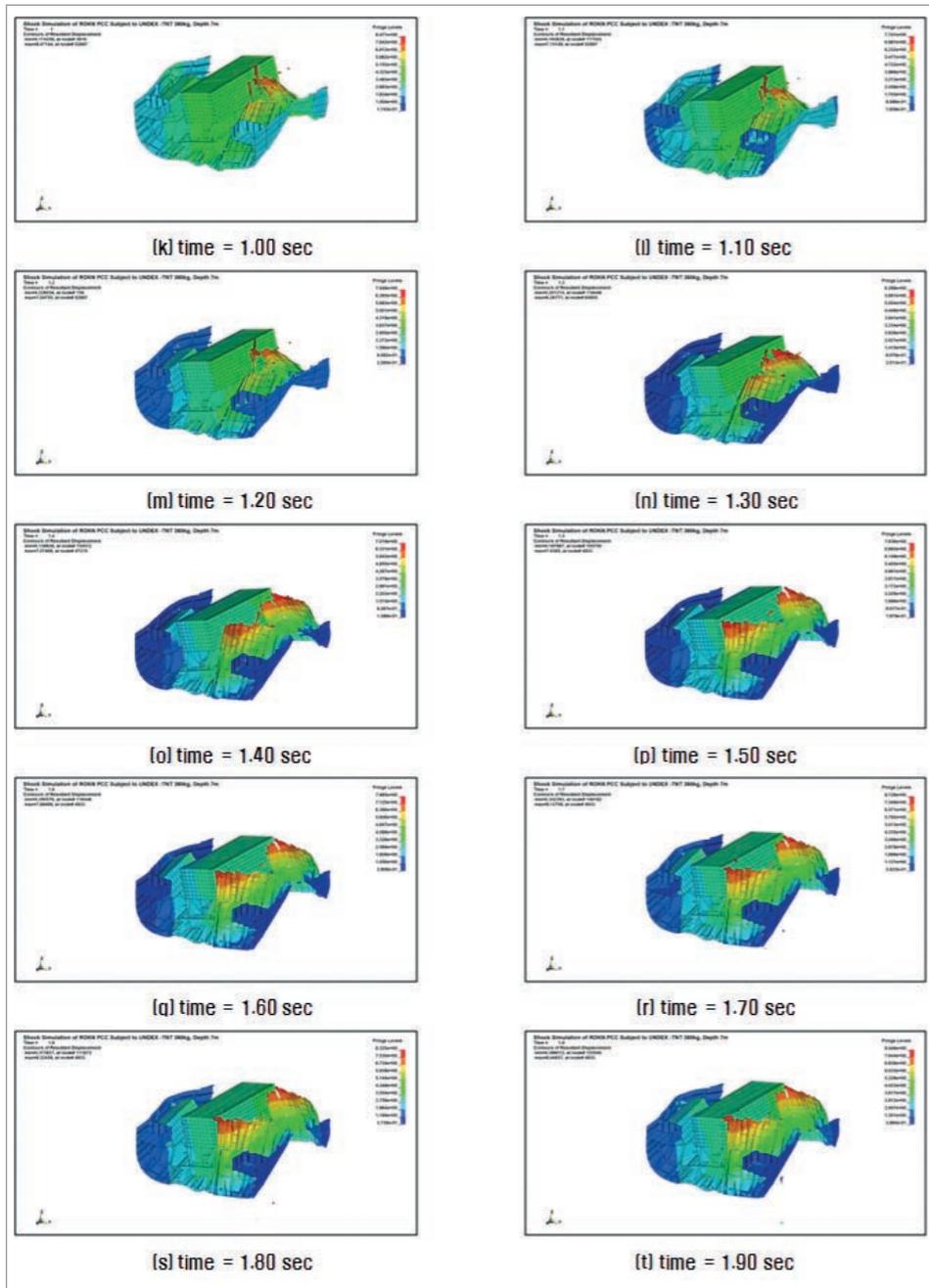
〈그림 3장-6-18〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Section view



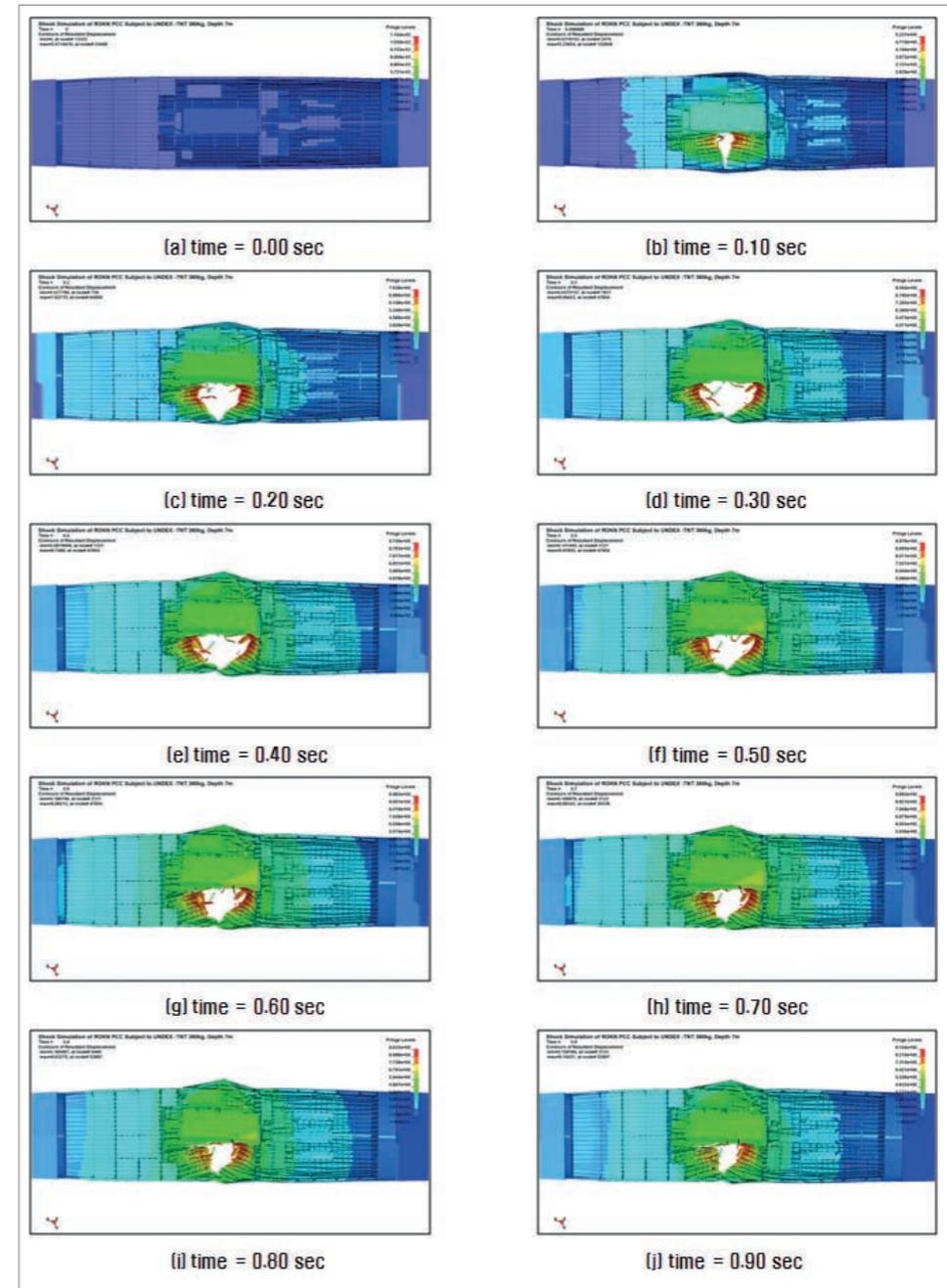
〈그림 3장-6-18〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Section view (계속)



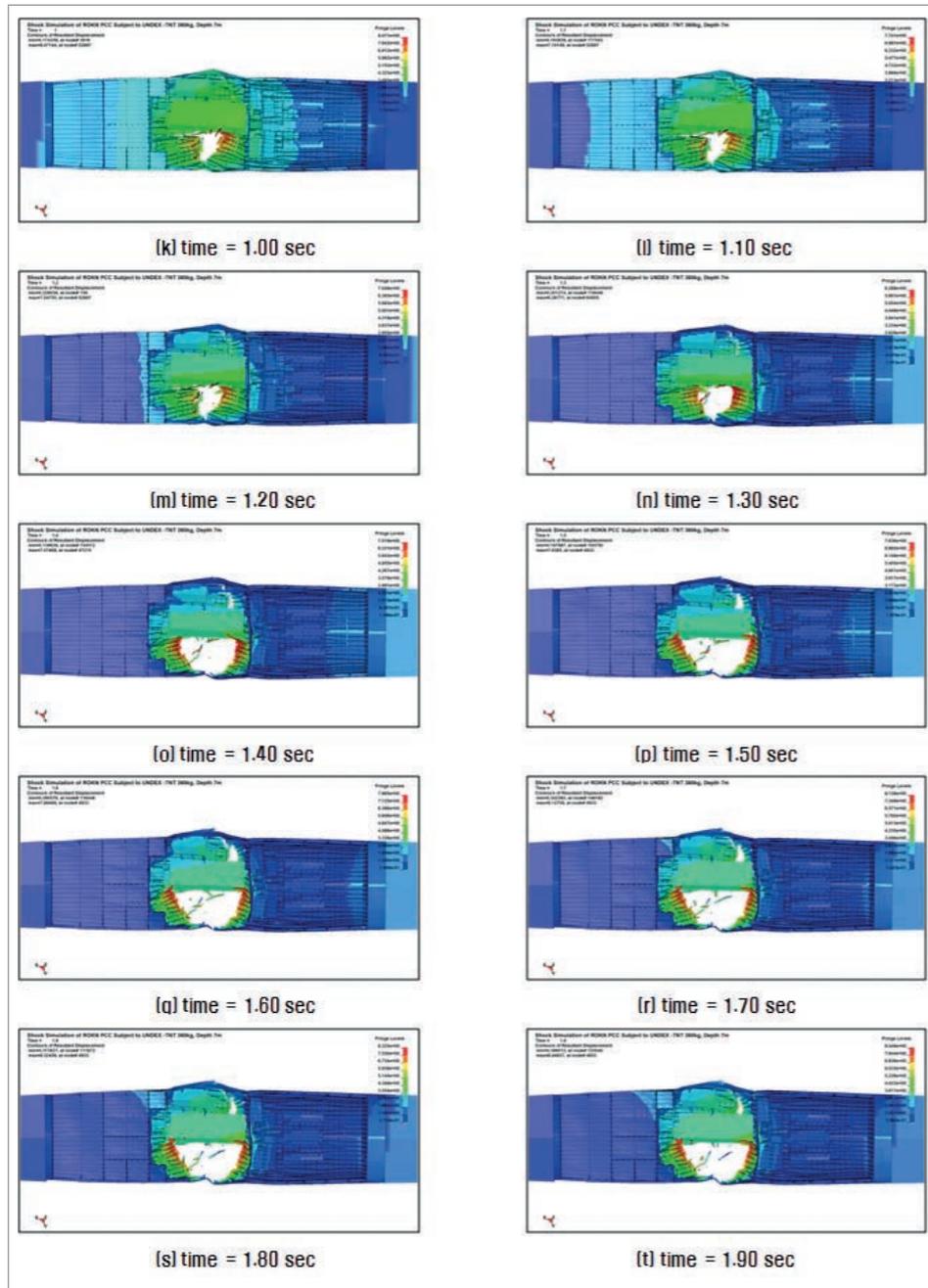
〈그림 3장-6-19〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal view



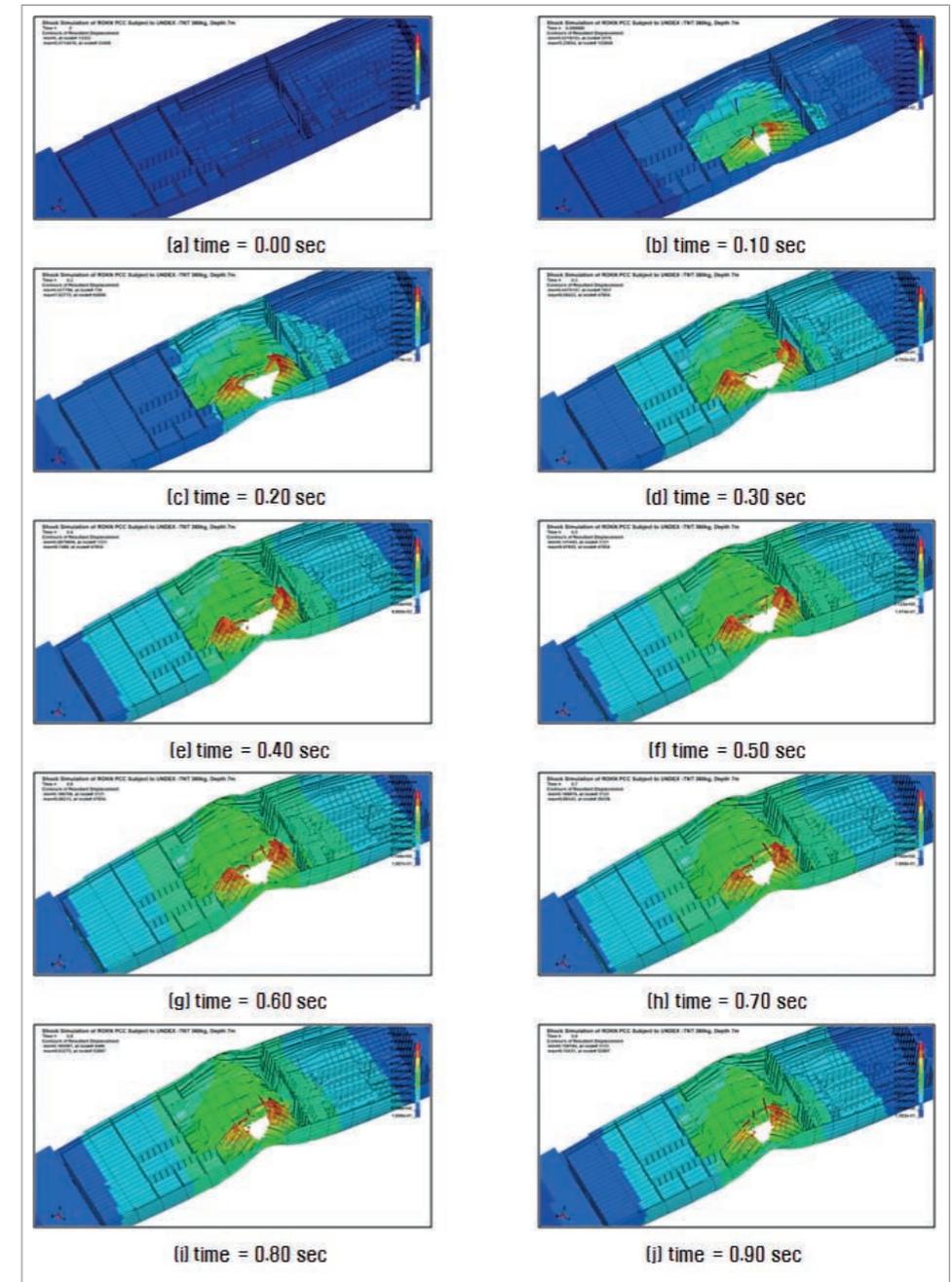
〈그림 3장-6-19〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal view (계속)



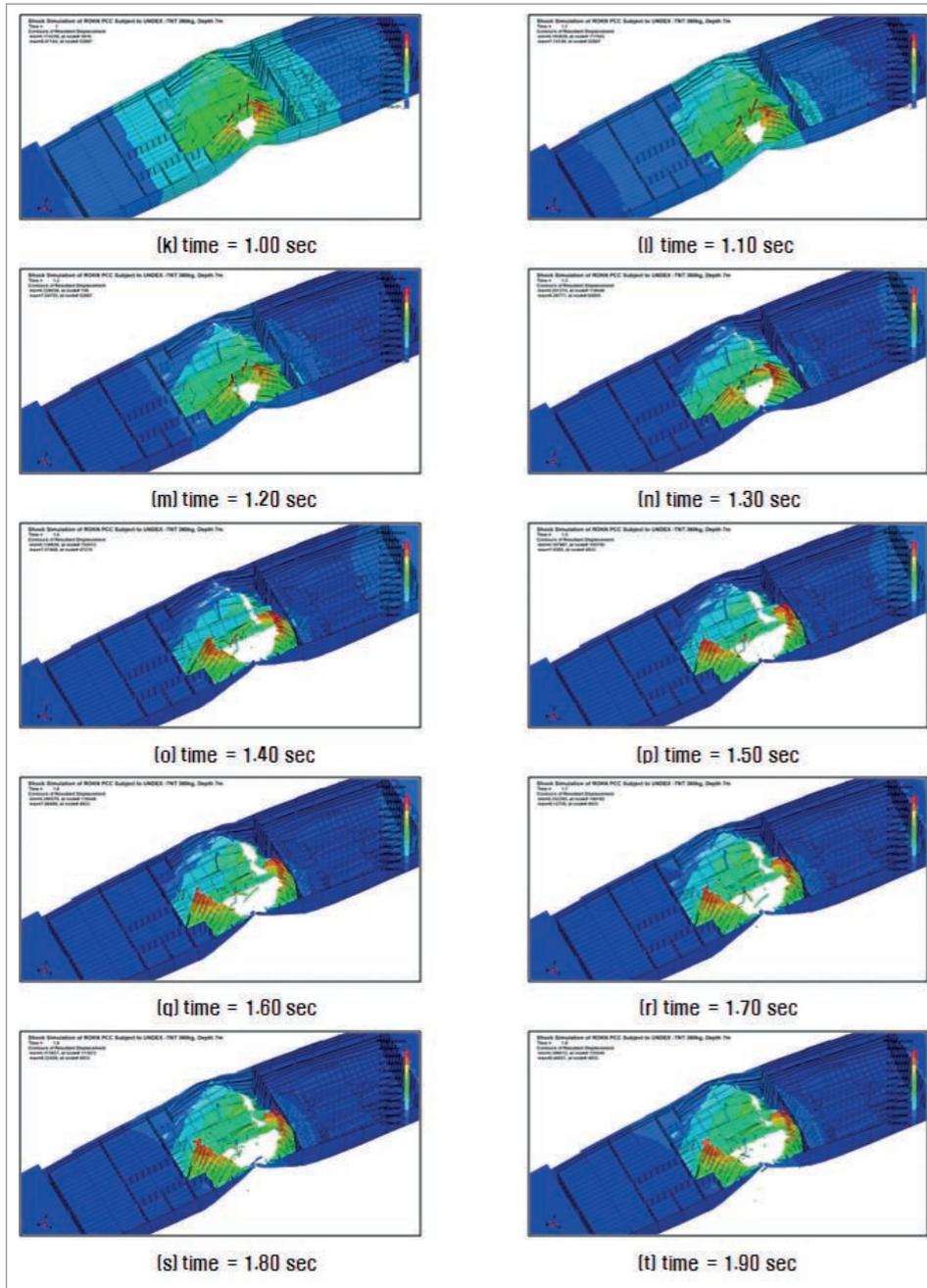
〈그림 3장-6-20〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal top view



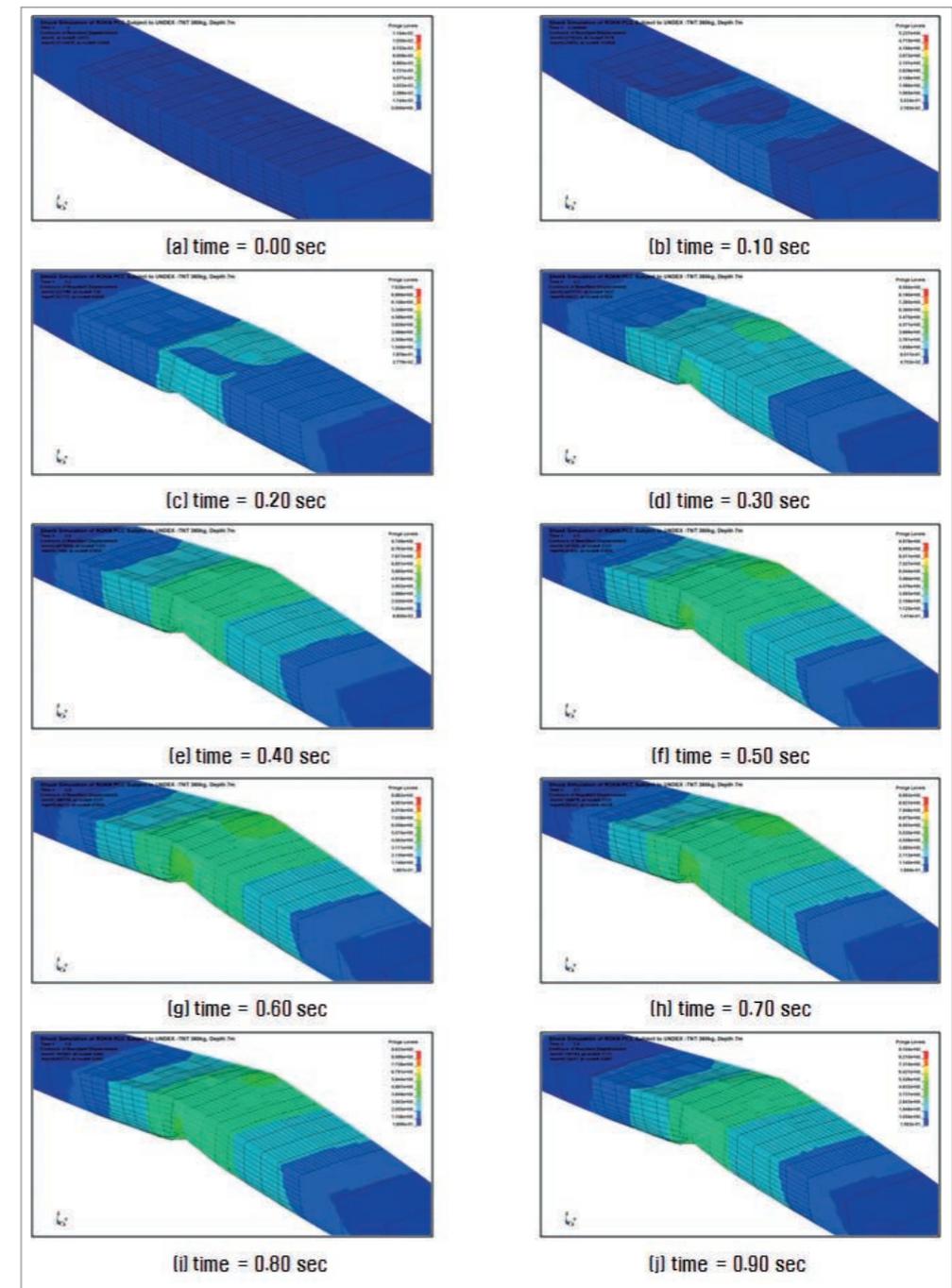
〈그림 3장-6-20〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal top view (계속)



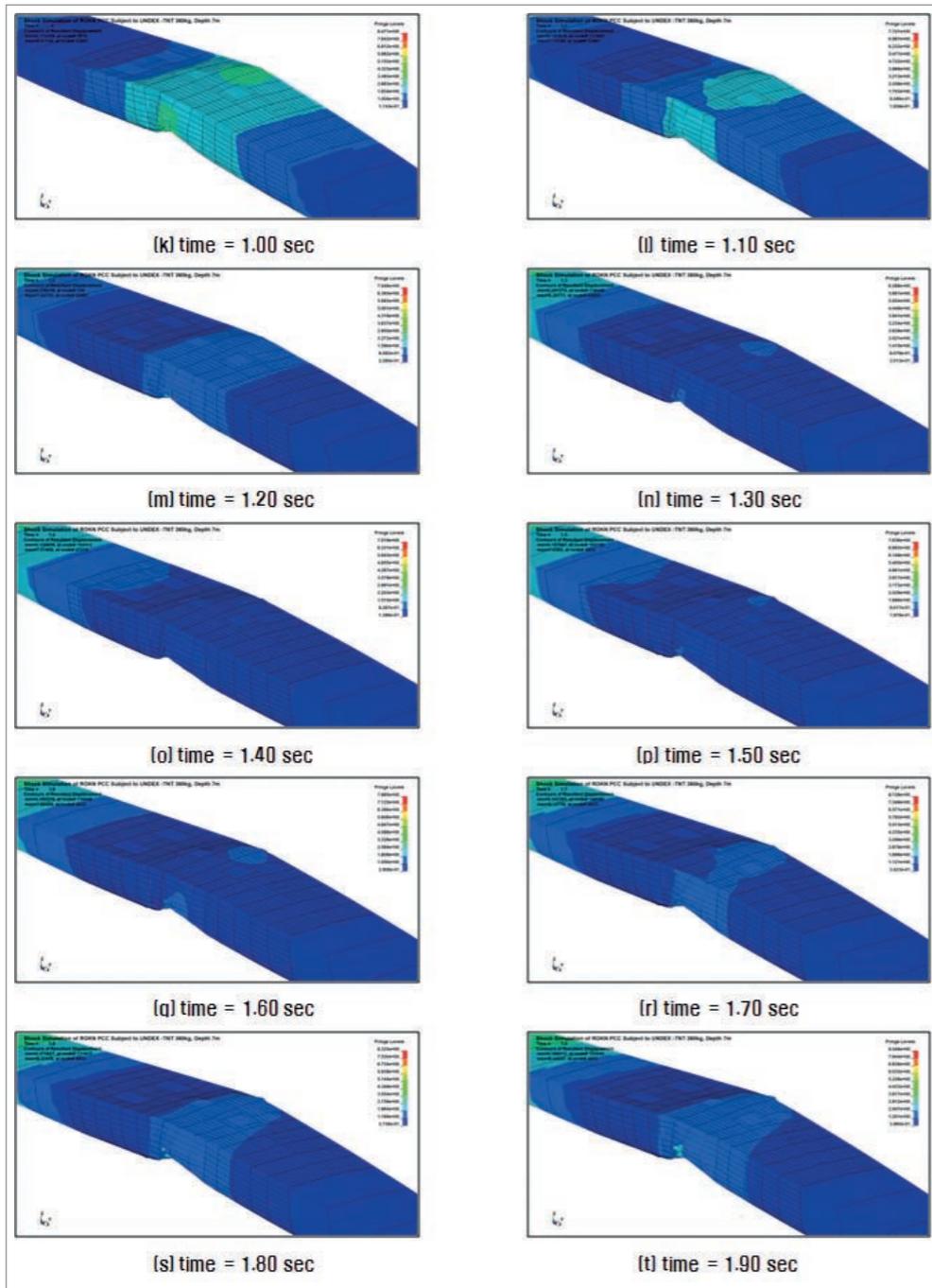
〈그림 3장-6-21〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal side view



〈그림 3장-6-21〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal side view (계속)



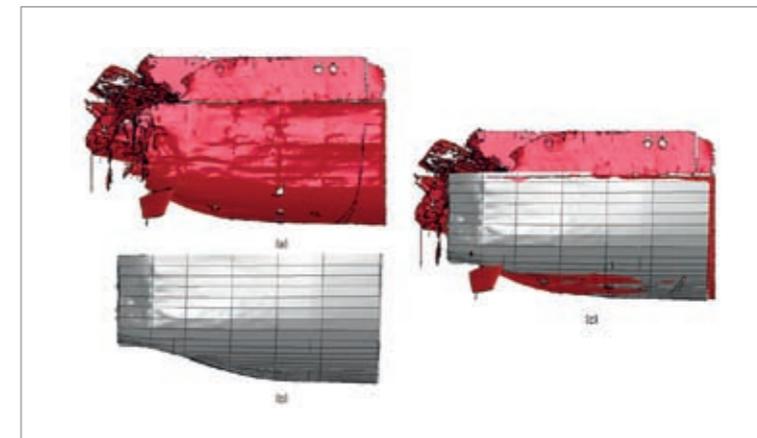
〈그림 3장-6-22〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Deck view



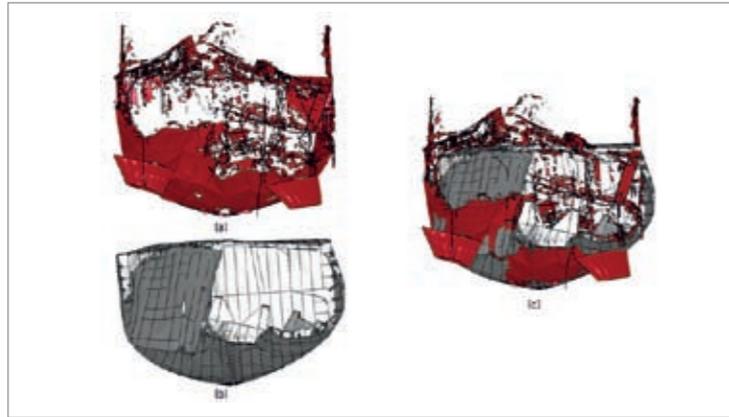
〈그림 3장-6-22〉 TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Deck view (계속)

나갔는지를 확실히 유추할 수 있다. 즉, 먼저 충격파가 도달하여 ‘Punching shear’라고 불리는 전단현상(판재에 수직방향으로 작용하는 급격한 압력에 의해 판재가 두께방향으로 전단, 즉 사선으로 절단되는 현상)에 의해 가스터빈실 좌현 선저 외판의 가장 취약한 부위가 먼저 찢겨져 나가고 계속해서 버블의 팽창, 수축 및 재팽창으로 인해 위쪽, 아래쪽, 이어서 다시 위쪽으로 극심하게 변형되면서 점점 더 크게 찢겨져 나간다. 가스터빈실 중앙 및 우현쪽에 있는 가스터빈 및 발전기와 이들 받침대는 충격파와 버블의 팽창으로 인해 우현쪽으로 급격하게 경사되어 선체 외판쪽으로 향하며, 함미쪽 받침대 부재 및 선저 외판도 버블의 팽창, 수축 및 재팽창으로 인해 극심한 변형이 발생되면서 찢겨져 나간다. 그러나 함수쪽 받침대 부재 및 선저 외판은 다른 부위에 비해 변형이 작고 여전히 충분한 강도를 유지하고 있다. 또한 우현 선체 외판도 변형은 발생하지만 파손은 일어나지 않고 있다. 이를 통해 가스터빈 받침대 및 발전기 받침대와 이들을 지지하고 있는 선저 외판 및 우현 외판이 분리되지 않고 함께 떨어져 나간 것으로 유추할 수 있다.

한편 〈그림 3장-6-23〉~〈그림 3장-6-28〉에서는 해석을 통해 예측된 손상 결과와 인양 후 천안함을 3D 레이저 스캐닝하여 얻은 실제 손상 자료를 비교하였다. 이들 그림에서 서브캡션 (a)는 실제 손상상태, (b)는 해석을 통해 예측된 손상 결과를 보여주고 있으며, (c)는 이 둘을 오버랩시킨 것이다. 이들 그림에서 보듯이 해석을 통해 예측된 손상 결과와 실제 손상상태가 정성적으로 매우 유사함을 알 수 있다.



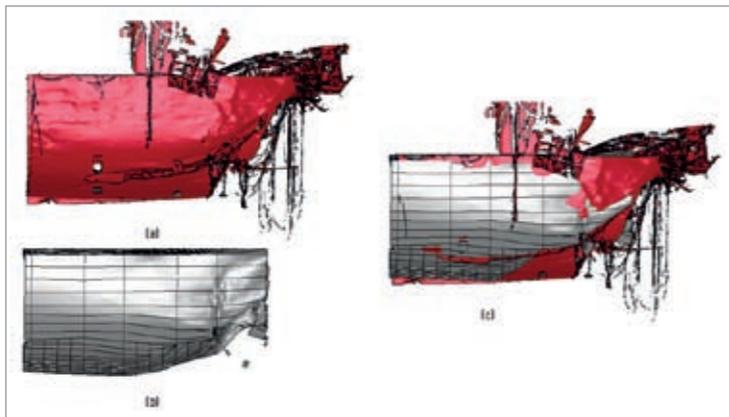
〈그림 3장-6-23〉 예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함수부(Side view)



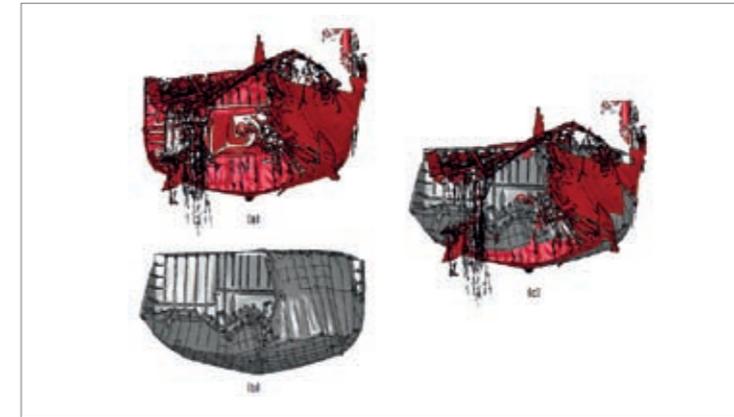
〈그림 3장-6-24〉 예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함수부(Front view)



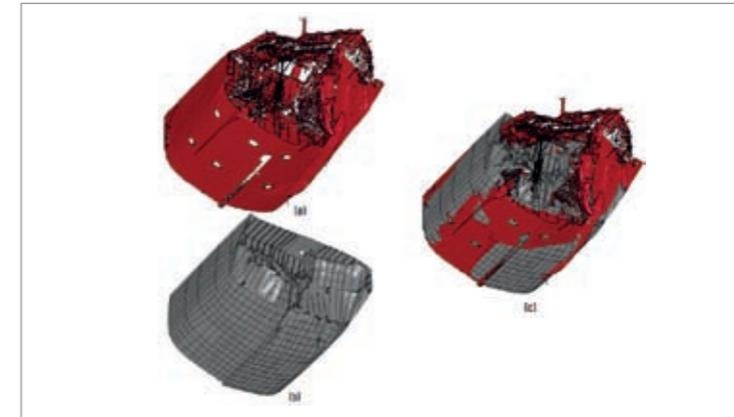
〈그림 3장-6-25〉 예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함수부(Bottom view)



〈그림 3장-6-26〉 예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함미부(Side view)



〈그림 3장-6-27〉 예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함미부(Front view)



〈그림 3장-6-28〉 예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함미부(Bottom view)

(5) 소결론

폭발유형분석분과에서 최종적으로 제시한 2가지 근접 수중폭발 조건, 즉 TNT 폭약 360kg이 수심 7m 및 9m에서 각각 폭발한 경우에 대해 유체-구조 상호작용을 고려한 3차원 탄소성 유한요소 해석을 수행하여 TNT 폭약 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우 천안함의 실제 손상상태와 정성적으로 매우 유사한 손상 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러나 TNT 폭약 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우에 대한 해석에서는 실제 손상보다는 훨씬 작은 손상 결과를 얻었다.

또한 TNT 폭약 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우에 대한 해석을 통해 어떠한 순서로 천안함이 절단되고 침몰했는지에 대해 공학적으로 신뢰할 수 있는 결과를 유추할 수 있었다. 즉, 최초 충격파가 도달하여 'Punching shear'라고 불리는 전단현상에 의해 가스터빈실

좌현 선저 외판의 가장 취약한 부위가 먼저 찢겨져 나가고 이어서 버블의 팽창, 수축 및 재팽창으로 인해 위쪽과 아래쪽, 그리고 다시 위쪽으로 극심하게 변형되면서 점점 더 크게 찢겨져 나갔으며, 해석을 통해 예측된 좌현 쪽의 손상 결과는 3D 레이저 스캐닝하여 얻은 실제 손상상태와 정성적으로 매우 유사함을 확인하였다. 또한 실제 가스터빈 받침대와 발전기 받침대, 이들을 지지하고 있는 선저 외판 및 우현 외판이 분리되지 않고 붙은 채로 떨어져 나간 것도 해석의 파괴양상과 일치했다.

7. 침몰 해역 분석

1) 개요

백령도 근해 천안함 침몰 해역의 해저지형과 조류에 대한 정밀조사를 통하여 해저지형과 조류가 천안함의 침몰원인 및 북한 잠수함정의 침투 시 미치는 영향을 분석하였다.

2) 사건 발생 시 상황

천안함은 3월 26일 21:22경 백령도 서남방 2.5km(37° 55' 45"N - 124° 36' 02"E) 위치(수심 47m)에서 침몰하였으며, 당시 해상상태는 남서풍 20kts, 파고 2.5m, 조류²⁵⁾ 161°-2.89kts, 시정 2.5NM이었으며²⁶⁾, 조석²⁷⁾은 고조(만조)가 02:25(2.3m)/15:15(2.7m), 저조(간조)가 08:43(0.7m)/21:47(0.8m)이었다.

3) 조사 중점

(1) 백령도 근해 해저지형

천안함 항로(침몰 당시 경비구역)를 중심으로 해저 장애물의 유무를 식별하였고, 국립해양조

25) 조류(Tidal current)는 조석에 의하여 일어나는 해수의 주기적 수평운동.

26) '10. 3. 26(금) 16:25에 백령도 근해에는 황천 5급(파고 2.6~3.0m, 풍속 26~30kts)이 설정.

27) 조석(Tide)은 해면의 완만한 주기적 승강운동.



〈그림 3장-7-1〉 천안함 침몰 위치



〈그림 3장-7-2〉 북한 잠수함정 예상 침투로

사원(국토해양부), 한국해양연구원(교육과학기술부) 소속 자문위원²⁸⁾과 공동으로 체계적이고 과학적으로 조사하고 검증하였다.

(2) 백령도 근해 조류

천안함 침몰 당시 백령도 근해의 조석 및 조류가 천안함의 항해에 미치는 영향, 북한 예상 침투기지에서 백령도 간 조류가 북한 잠수함정 기동에 미치는 영향과 북한 잠수함정의 무장운용(어뢰발사, 기뢰부설)에 미치는 영향을 조사하고 분석하였다.

4) 백령도 근해 해저지형 분석

(1) 조사 방법

먼저 백령도 근해의 모든 해도를 확보하여 해도상에서 해저 장애물을 확인하고 사건 해역을 해군 탐색구조단 함정(3. 28~4. 17)과 한국해양연구원 조사선(4. 4~5. 8)이 탐색하여 확인하였다. 또한 현지(백령도)를 방문하여 어촌계, 관공선, 어민 등 관계자를 대상으로 사건 해역 근해에 해도상 미표기된 해저 장애물이 있는지 여부를 추가 확인하였다.

28) 정보분석팀 자문위원으로는 국립해양조사원 해양과장, 한국해양연구원 책임연구원이 참여.

(2) 조사 결과

① 백령도 근해 모든 해도 확보 및 해도상 확인

국립해양조사원²⁹⁾과 협조하여 <표 3장-7-1>에서와 같이 해저 지형도를 포함하여 총 6종의 관련 해도를 확보한 후 수심, 해저장애물(암초, 침선, 어장 등)을 상호 비교하였으며, 그 결과 천안함이 실제 기동한 항로상에는 해저장애물이 없다는 것을 확인하였다.

구분	해도번호	축척	발행기관	용도
해도	① No.360	1:30,000	국립해양조사원(05)	군용(해경)/상업용/어업용
	② No.360	1:30,000	국립해양조사원(08)	국립해양조사원 연구용 자체 해도
	③ No.315	1:75,000	국립해양조사원(04)	군용(해경)/상업용/어업용
	④ No.323	1:250,000	국립해양조사원(06)	군용(해경)/상업용/어업용
해저지형도	⑤ No.4534	1:200,000	국립해양조사원(90)	군용
해구도	⑥ No.101	1:2,000,000	수협중앙회 (국립해양조사원)	어업용

<표 3장-7-1> 백령도 근해 모든 해도^{30) 31)}

또한 자문위원인 국립해양조사원 해양과장은 국립해양조사원이 1992년 이후 백령도 근해가 접적해역인 관계로 수심측정 등 직접 해양조사를 하지 않았으나, 각종 함선의 안전항해에 영향을 미치는 어장 등 장애물은 식별 즉시 해도 개정을 통해 반영 조치하고 있어, 해도상 천안함 항해(경비구역 내 천안함 기동항로)에 영향을 줄 수 있는 해저 장애물이 없음을 확인했다.³²⁾

② 해군 탐색구조단 함정 사건 해역 탐색

3월 28일~4월 17일간 소해함 4척이 천안함 경비구역을 중심으로 Side scan sonar³³⁾를 이용하여 탐색한 결과, <표 3장-7-2>와 같이 미상침선(75×15×10m)을 제외한 18개의 접촉물은 대부분 게통발, 철물, 암반 등이었으며 천안함 기동항로상에는 해저 장애물이 없음을 확인할 수 있었다.

29) 국립해양조사원은 국내의 전 해도를 전담하여 발간하는 기관.

30) 국립해양조사원에서 발행한 ①, ③, ④번 해도는 민·군이 공통으로 사용하고 있으며, ②번 해도는 국립해양조사원만 자체 보유 중인 최신 해도.

31) 국립해양조사원에서 발행한 ⑤번 해저 지형도는 군(軍)에서만 사용하고 있으며, 수협중앙회에서 발행한 ⑥번 해구도는 수심 및 암초 등이 표시되어 있지 않음.

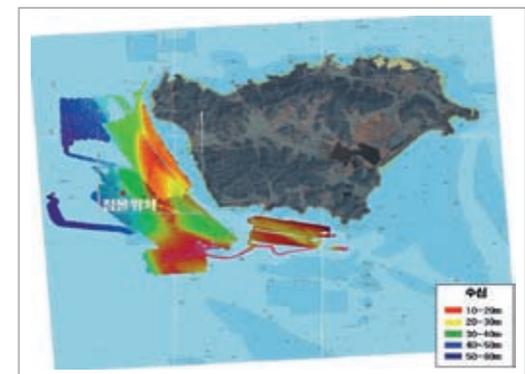
32) '10. 3. 30 국립해양조사원은 천안함 침몰 사건 해역에 수중 암초가 존재하지 않는다고 공식 발표.

33) Side scan sonar(해저면탐사소나): 초음파 송수신기가 탑재된 소나로 해저면의 요철을 계속하여 해저 지형도를 획득.

구분	접촉 일시	접촉 위치	크기(m)	수심(m)	식별 결과
1	3. 28(일) 22:31	37° 55' 40"N, 124° 36' 06"E	33X10	47	함미
2	3. 29(월) 14:27	37° 55' 48"N, 124° 36' 00"E	75X15X10	42	미상침선
3	3. 30(화) 15:50	37° 55' 22"N, 124° 34' 03"E	-	50	암반
4	3. 31(수) 09:24	37° 55' 41"N, 124° 36' 06"E	3.7X10.1	44	암반
5	3. 31(수) 09:33	37° 55' 42"N, 124° 36' 06"E	3.4X 1.3	44	철물
6	4. 2(금) 13:15	37° 54' 12"N, 124° 37' 57"E	2X3	18	콘크리트 구조물
7	4. 2(금) 13:45	37° 54' 52"N, 124° 37' 07"E	2X2	25	콘크리트 구조물
8	4. 2(금) 14:35	37° 54' 45"N, 124° 37' 12"E	2X2	27	콘크리트 구조물
9	4. 2(금) 15:15	37° 54' 46"N, 124° 37' 52"E	-	34	암반
10	4. 2(금) 18:58	37° 55' 42"N, 124° 36' 22"E	-	17	암반
11	4. 14(수) 13:50	37° 55' 41"N, 124° 36' 05"E	6.6X3.8	42	연돌
12	4. 14(수) 14:05	37° 55' 42"N, 124° 36' 04"E	1.5X28	44	동파이프
13	4. 14(수) 14:13	37° 55' 42"N, 124° 36' 03"E	1.2X0.6	43	단정 엔진커버
14	4. 14(수) 14:15	37° 55' 43"N, 124° 36' 03"E	2.4X2.3	44	게 통발
15	4. 14(수) 14:20	37° 55' 44"N, 124° 36' 03"E	2.1X0.7	43	천안함 발전기
16	4. 14(수) 14:30	37° 55' 41"N, 124° 36' 03"E	2.2X0.8	42	천안함 Harpoon
17	4. 14(수) 17:00	37° 55' 43"N, 124° 36' 02"E	5X0.1	43	외부배관
18	4. 14(수) 17:03	37° 55' 43"N, 124° 36' 03"E	1.8X0.5	43	삼각형 알루미늄
19	4. 17(토) 20:30	37° 55' 10"N, 124° 37' 37"E	2X2X1.1	31	암반

<표 3장-7-2> 해군 탐색구조단 사건 발생 해역 해저 접촉물 현황

③ 한국해양연구원 조사선 사건 해역 탐색
4월 4일~5월 8일간 조사선 2척(이어도호, 장목호)이 천안함 침몰 해역(함미)을 중심으로 천안함 항로를 따라 Multi-beam echo sounder³⁴⁾와 Side scan sonar를 이용하여 탐색하였으나, <표 3장-7-3>과 같이 미상침선(75×15×10m)을 제외하고 0.4~4m 크기의 소형 접촉물 11개만이 식별되었으며 천안함 기동항로상에

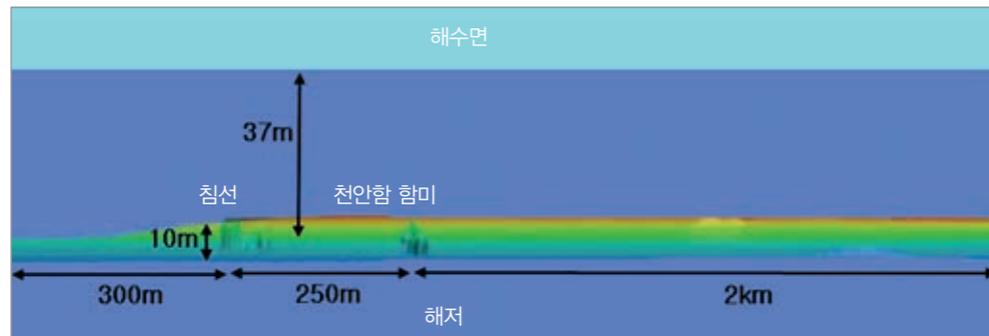


<그림 3장-7-3> 한국해양연구원 조사선 사건 발생 해역 해저지형 탐색 구역

34) Multi-beam echo sounder(다중빔 정밀 음향측심기) : 배가 이동하면서 다중음향신호를 발사하고 이를 다시 수신함으로써 수심과 해저지형을 동시에 관측 기록하는 측심기로서 해저 횡단면 전체를 측정할 수 있으며, 실시간 등심도 또는 지형도가 컬러 그래픽으로 작성.

구분	접촉 일시	접촉 위치	크기(m)	수심(m)
1	4. 18(일) 02:14	37° 55' 40"N, 124° 36' 03"E	1.7×0.6	47
2	4. 18(일) 02:14	37° 55' 41"N, 124° 36' 04"E	0.8×0.6	46
3	4. 18(일) 02:14	37° 55' 40"N, 124° 36' 04"E	0.7×1.1	46
4	4. 18(일) 02:14	37° 55' 40"N, 124° 36' 04"E	4.0×0.7	47
5	4. 18(일) 02:14	37° 55' 38"N, 124° 36' 03"E	0.6×1.6	47
6	4. 18(일) 02:18	37° 55' 32"N, 124° 36' 13"E	0.7×1.2	46
7	4. 18(일) 02:39	37° 55' 36"N, 124° 36' 08"E	0.5×0.4	47
8	4. 18(일) 02:40	37° 55' 39"N, 124° 36' 05"E	0.4×0.7	46
9	4. 18(일) 02:40	37° 55' 40"N, 124° 36' 05"E	2.5×0.5	46
10	4. 18(일) 02:41	37° 55' 40"N, 124° 36' 03"E	2.5×0.5	47
11	4. 18(일) 02:43	37° 55' 44"N, 124° 36' 02"E	1.3×0.5	48

〈표 3장-7-3〉 한국해양연구원 조사선 사건 발생 해역 해저 접촉물 현황



〈그림 3장-7-4〉 사건 발생 해역 해저지형 탐색 결과

는 해저장애물이 없는 것으로 최종적으로 확인할 수 있었다.

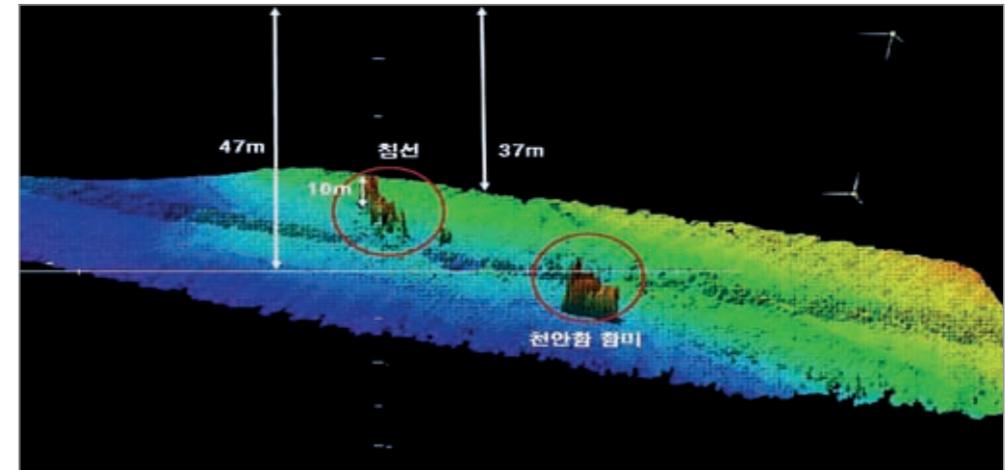
사건 발생 해역 인근에서 발견된 미상침선은 해도상 표기되어 있지 않은 침선으로 침몰 시기 및 종류는 미상이지만 해군 탐색구조단의 잠수부 등이 수 차례에 걸쳐 상태를 확인하였다. 미상침선을 Side scan sonar를 이용하여 음향영상 촬영한 결과 상선의 형태이며(선미쪽에 조타실 위치 및 중갑판 쪽에 다수의 기동 식별), 침선 부근에서 수거한 철 구조물에 다수의 리베팅이 있다는 점은 수십 년 전에 침몰한 상선일 가능성을 뒷받침해 주고 있다.

한편, 미상침선이 위치한 수심(47m)과 미상침선의 높이(10m) 및 천안함 흘수(2.88m) 등을 고려 시 미상침선이 천안함의 안전항해에 문제가 되지 않았다는 것을 확인할 수 있었다.

또한, 한국해양연구원 조사선은 미상침선과 천안함 함미 사이에서 특이한 해저지형인 미



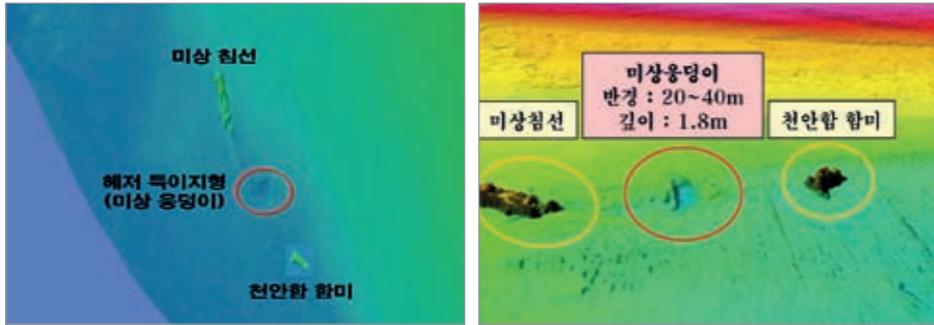
〈그림 3장-7-5〉 미상침선 부근에서 발견된 철 구조물



〈그림 3장-7-6〉 미상침선 발견 해역 해저지형

상의 웅덩이(반경 20~40m, 깊이 1.8m)를 발견하였다. 이 웅덩이의 생성 원인 규명을 위하여 1개월간 퇴적 및 침식 작용을 3차원 Multi-beam echo sounder를 이용하여 관찰하였고 잠수부 등을 이용한 현장 탐색 결과 해저 바닥이 딱딱한 진흙과 자갈로 형성되어 있음을 확인하였다. 이러한 사실을 바탕으로 전문가 토의를 실시한 결과³⁵⁾ 인위적으로 형성된 것이 아니라 미상침선으로 인한 조류 흐름의 영향에 의하여 형성된 것으로 추정되며, 천안함 사건과 무관한 것으로 결론을 내렸다.

35) 미상 웅덩이와 관련하여 전문가 토의 시 민간 합동조사단장, KAIST 교수, 국방과학연구소 책임연구원, 한국해양연구원 책임연구원, 국회추천 조사위원 등이 참여.



〈그림 3장-7-7〉 사건 발생 해역 인근 해저 특이지형(이상 웅덩이)

④ 현지 관계자 대상 사건 해역 근해 해저 장애물 여부 확인

백령도의 어촌계, 관공선, 어민 등 관계자를 직접 방문하여 사건 해역 근해의 해도상 표기되지 않은 해저 장애물 여부를 확인하였다. 미상침선과 관련해서는 백령 어민이 부친으로부터 일제시대 때 침몰되었다는 것을 들은바 있다고 진술하였고, 3월 30일 KBS에서 침몰원인으로 제기한 수중암초인 홍합어는 〈그림 3장-7-8〉의 해도상에 표기된 바와 같이 침몰 해역에서 동남쪽으로 10km나 떨어진 것으로 확인되는 등 새롭게 확인할 수 있는 장애물은 없었다.

(3) 소결론

해군 탐색구조단 함정 및 한국해양연구원 조사선이 천안함 침몰사건 발생 해역에서 수중 접촉물 총 30개를 확인하였으며, 확인된 접촉물은 대부분 천안함 선체 잔해물, 암반, 폐어망 등으로 천안함 침몰에 영향을 미치는 장애물은 아닌 것으로 확인되었다.



〈그림 3장-7-8〉 해도상 백령도 근해 수중암초(홍합어)

또한, 천안함 기동로상에서 한국해양연구원이 확인한 해저지형과 침선, 인공어초 등과 같은 장애물에 대한 조사 결과 및 국립해양조사원의 해도측량 자료 확인 결과 모두 천안함 침몰에 영향을 미치는 요소는 없는 것으로 최종 확인하였다.

5) 백령도 근해 조류 분석

(1) 조사 방법

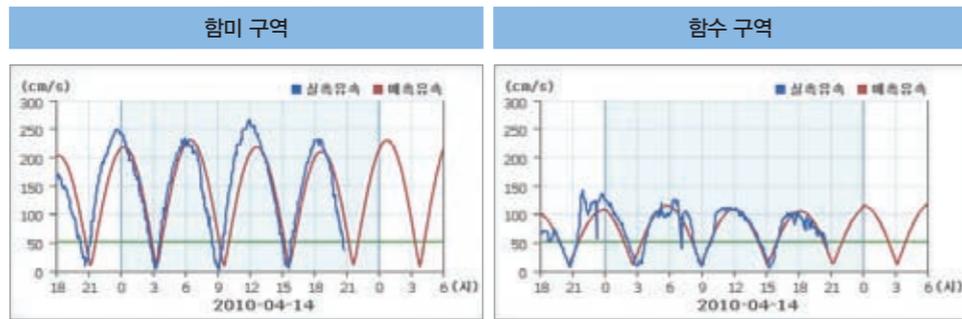
해군 해양전술정보단과 국립해양조사원이 공동개발한 ‘軍 작전용 조석·조류 예보체계³⁶⁾를 이용하여 백령도 근해의 조류를 분석하였으며, 천안함 침몰사건 이후 탐색 및 구조작전 지원을 위해 국립해양조사원에서 사건 발생 해역 내에 설치한 2개의 기상관측 부이의 실측자료를 이용하여 상기 예보체계를 검증하였다.



〈그림 3장-7-9〉 백령도 근해 국립해양조사원 기상관측 부이 설치 현황

‘軍 작전용 조석·조류 예보체계’와 국립해양조사원의 부이 실측자료를 비교·검증해 본 결과 ‘軍 작전용 조석·조류 예보체계’가 신뢰성 있는 수치 모델임을 입증할 수 있었다.

36) ‘軍 작전용 조석·조류 예보체계’는 밀물·썰물과 바닷물의 흐름을 정확하게 예보할 수 있는 디지털 방식 예보 프로그램으로 2008년에 개발해서 전력화하였으며, 유속(조류 속도), 일자별 고·저조 시간, 높이 등을 예보하는 것이 가능.



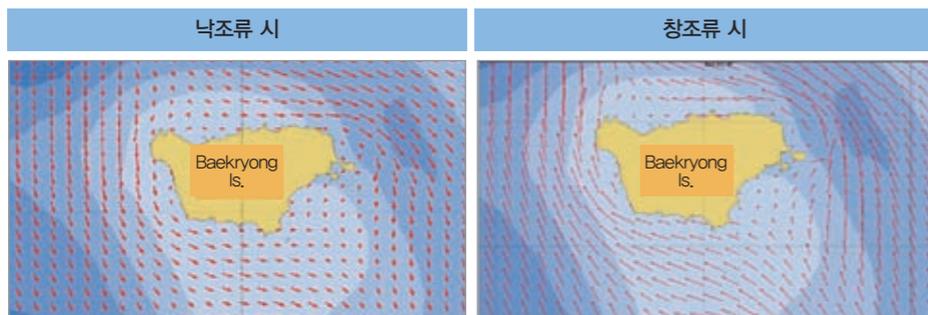
〈그림 3장-7-10〉 ‘軍 작전용 조석·조류 예보체계’와 기상관측 부이 실측 유속자료 비교 결과

(2) 조사 결과

① 백령도 근해 조석·조류 분석

㉠ 특징

조석은 1일 2회(고조, 저조)³⁷⁾ 반복되며, 조류는 일반적으로 해안선에 평행하여 창조류(밀물)는 북향, 낙조류(썰물)는 남향으로 흐르고 최고유속은 5.3kts(최저유속 0.3kts)이고, 약 6시간 간격으로 창조류(밀물)와 낙조류(썰물)가 교대로 발생한다.

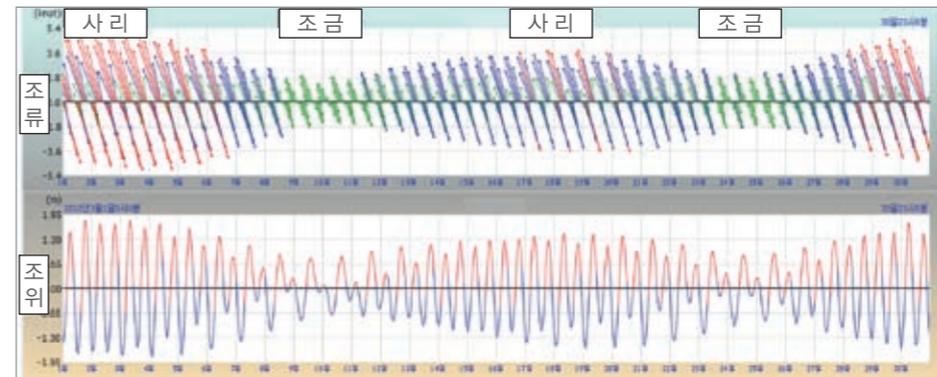


〈그림 3장-7-11〉 백령도 근해에서 낙조류 및 창조류 시 조류도

㉡ 3월 중 조류 및 조석

통상 3월 중 유속은 0.3 ~ 5.3kts로 조금³⁸⁾ 시에 느리게, 사리³⁹⁾ 시에 빠르게 흐르고, 조차⁴⁰⁾는 조금 시에 0.3m, 사리 시에 3.6m이다.

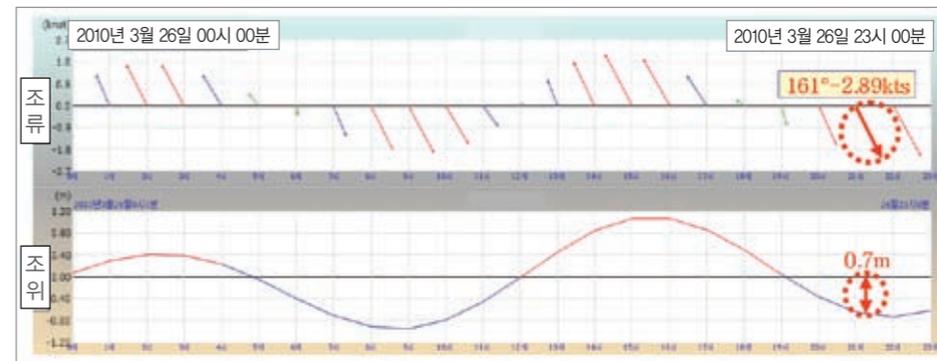
37) 고조는 해면이 가장 높아진 상태이며, 저조는 해면이 가장 낮아진 상태이다.
 38) 조금 : 조석간만의 차가 가장 작을 때이다.
 39) 사리 : 조석간만의 차가 가장 클 때이다.
 40) 조차 : 고조와 저조의 높이 차이이다.



〈그림 3장-7-12〉 3월 중 조류 및 조위도(↖: 조류의 방향·유속, ⤴: 고조·저조의 높이)

㉢ 사건 당일(3. 26) 조류(방향, 속도) 및 조석

사건 당일에 대한 시뮬레이션 실시 결과는 침몰시간(21:22경)의 조류 방향 및 속도가 161° - 2.89kts, 조위는 0.7m로 최저조(0.8m)에 가깝게 산출되었다.



〈그림 3장-7-13〉 사건 당일(3. 26) 조류 및 조위도

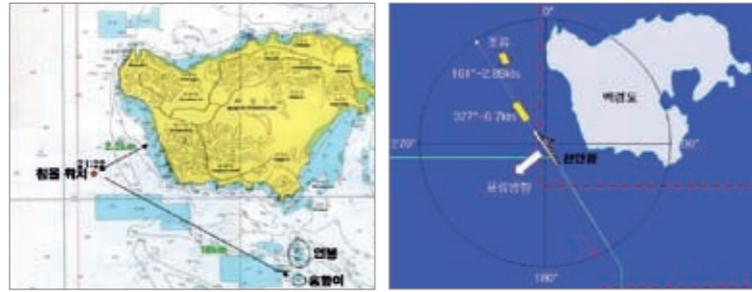
㉣ 조류가 천안함 경비구역 내에서 항해에 미치는 영향

㉠ 고려요소

사건 당시(26일 21:22) 기상은 남서풍 20kts, 파고 2.5m, 시정 2.5NM이었으며, 천안함의 침로 및 속도는 327° - 6.7kts이었다.

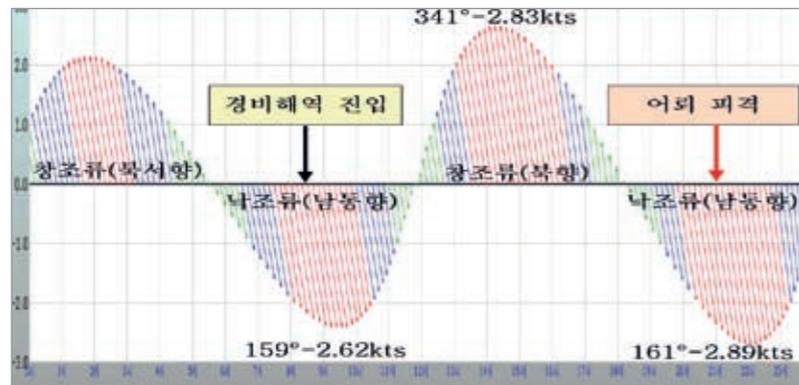
㉡ 시뮬레이션 결과

낙조류(161° - 2.89kts) 시 강한 조류 속도에 의해 백령도 외해 방향으로 다소 밀리는 현상이 나타날 수 있으나, 당시 천안함 속도(6.7kts)가 조류 속도보다 빨랐기 때문에 항해에 제한은



〈그림 3장-7-14〉 사건 당일(3. 26) 천안함 침로 및 속도

최대 창조류 / 낙조류			천안함 침로
시간	방향	속도	
08:40	159° (셀물)	2.62kts	345°(역조류 향해 영향)
15:00	341° (밀물)	2.83kts	135°(역조류 향해 영향)
21:22	161° (셀물)	2.89kts	327°(역조류 향해 영향)

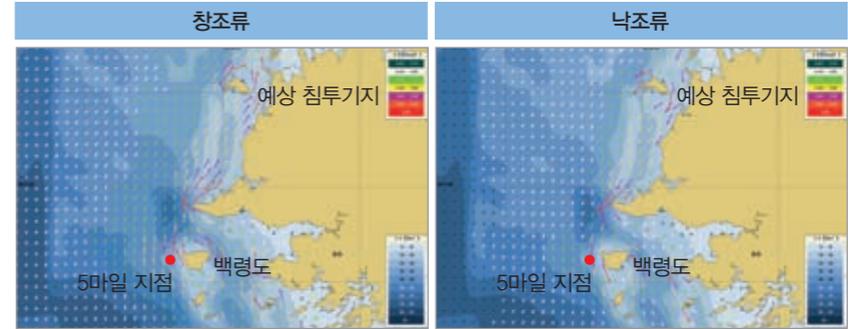


〈그림 3장-7-15〉 사건 당일(3. 26) 조류 방향 및 속도

없었던 것으로 판단된다.

③ 북한 잠수함정 예상 침투기지~백령도 간 조류 분석

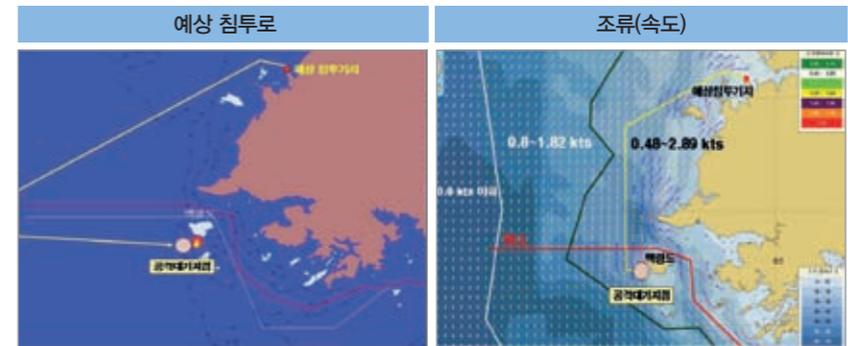
동(同) 구간의 연안에서는 조류가 빠른(0.48~2.89kts) 반면 외해로 갈수록 약해(0.83kts 이하) 진다. 공격 대기지점으로 추정되는 백령도 서방 5마일에서의 조류 속도는 0.22~4.66kts이었다. 따라서 잠수함정의 침투 및 모기지 복귀 시에는 연안보다 조류의 영향을 덜 받는 외해로 우회침투하는 것이 유리했을 것으로 분석된다.



〈그림 3장-7-16〉 예상 침투기지~백령도(3. 23~3. 26, 21:20경) 조류 시뮬레이션 결과

④ 조류가 북한 잠수함정 기동에 미치는 영향

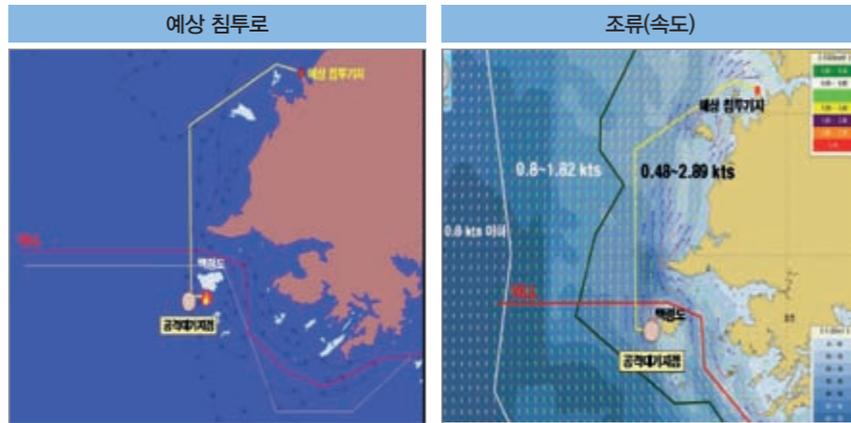
㉠ 외해로 침투(예상 침투기지 → 외해 변침점 → 백령도 근해 공격 대기지점)할 경우에는 조류로 인한 영향을 상대적으로 덜 받기 때문에(연안 조류 속도 0.48~2.89kts, 외해 조류 속도 0.23~1.82kts) 총 침투거리(000마일) 및 침투시간(00시간)을 고려 시 항해 형태(스노클⁴¹), 잠항상태)별로 속도를 조정하게 되면 조류로 인한 영향을 극복 가능한 것으로 판단된다.



〈그림 3장-7-17〉 예상 침투기지에서 잠수함정 외해 침투 시 예상 침투로 및 조류 속도

㉡ 최단경로로 침투(예상 침투기지 → NLL → 백령도 근해 공격 대기지점)할 경우는 외해 침투 시보다 상대적으로 조류의 영향을 더 받기 때문에(조류 속도 0.48~2.89kts / 평균 조류 속도 2.4kts) 총 침투거리(00마일) 및 침투시간(0시간) 고려 시 6시간 간격의 강한 역조류 영향으로 수중 은밀침투가 제한될 것으로 분석된다.

41) 스노클은 잠수함정이 축전지 충전을 위하여 스노클 마스트만 수면으로 노출한 상태로 항해하는 형태.



〈그림 3장-7-18〉 잠수함정 최단 침투 시 예상 침투로 및 조류 속도

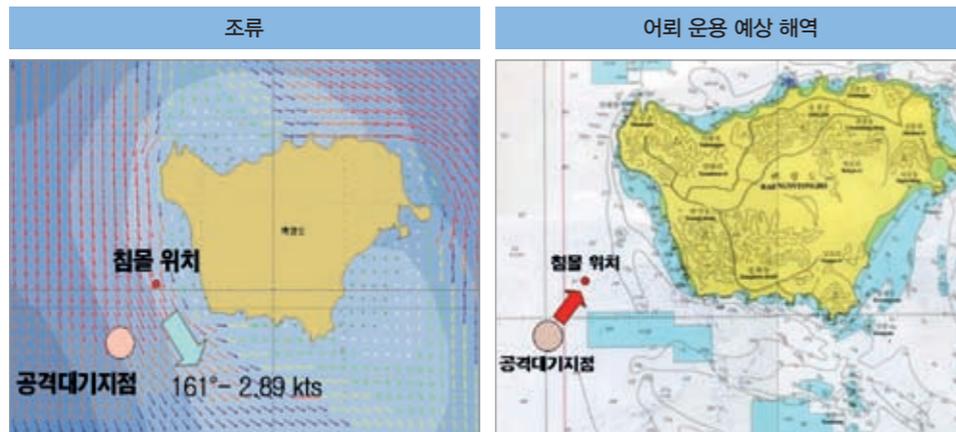
⑤ 조류가 북한 잠수함정 무장 운용에 미치는 영향

㉠ 가정사항

북한 잠수함정이 천안함 침몰 해역인 백령도 서남방 2.5km 해역에서 보유하고 있는 무장을 운용할 경우를 가정하였다.

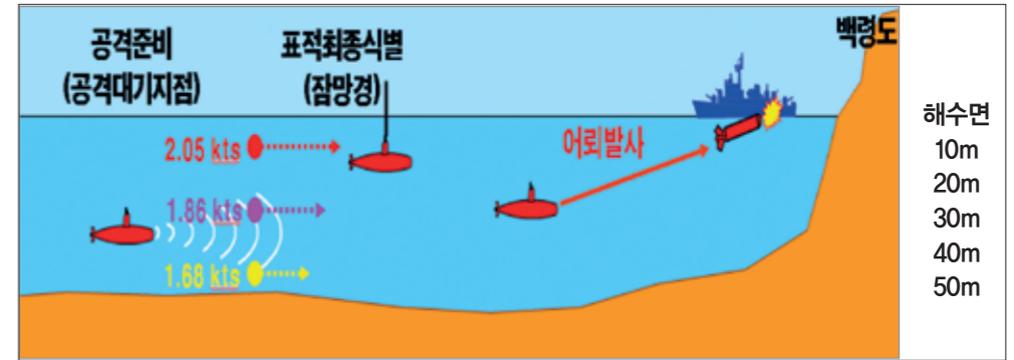
㉡ 조류가 어뢰 발사에 미치는 영향

북한 잠수함정이 어뢰를 발사할 경우에는 표적 운동 분석(TMA⁴²⁾ 기동을 위해서 6kts 이상의



〈그림 3장-7-19〉 사건 발생 시 조류 및 어뢰 운용 예상 해역

42) TMA(Target motion analysis) : 잠수함이 어뢰 발사를 위하여 표적의 움직임(방위-거리, 침로-속력 등)을 분석하는 것.



〈그림 3장-7-20〉 북한 잠수함정 어뢰 공격 전술 및 사건 발생 시 수심별 조류 속도

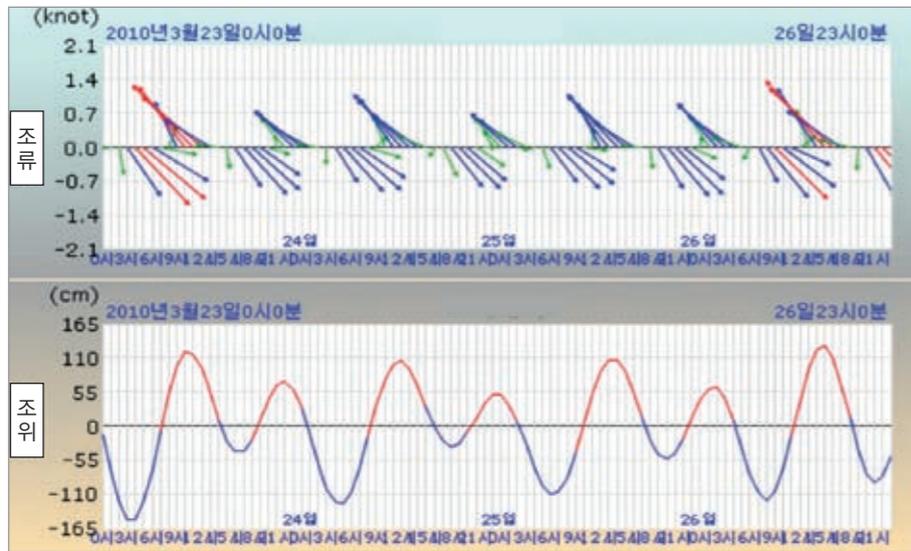
속도로 기동해야 하고, 발사침로 유지를 위해서 5kts 이상 속도를 유지해야 하며, 조류 속도의 영향을 덜 받기 위해서 수면 근처보다는 수심이 깊은 곳에서 어뢰를 발사해야 한다. 그러나 이러한 점을 고려하더라도 어뢰 운용 시 어뢰 속도(최소 30kts) 및 유도방식(음향)을 고려할 때 조류의 영향은 미약한 것으로 판단된다.

㉢ 조류가 기뢰 부설에 미치는 영향

북한 잠수함정이 기뢰의 정밀부설을 위해서는 조류의 영향이 가장 적게 미치는 시기를 선택해야 하므로, 정조 시나 순조류를 이용하여 부설할 가능성이 가장 높다. 잠수함정의 백령도 근해 예상 도착 일자(3월 26일 이전) 및 3월 26일 정조 시와 사건 발생 시간대(21:22) 조류 방향·속도⁴³⁾를 고려할 때 예상 부설침로는 161°~253°인 것으로 판단된다. 그러나 기뢰 부설 시에는 정밀부설을 위해 저속항해(3kts)가 불가피하기 때문에 조류의 영향을 크게 받았을 것으로 분석된다.

구분	3. 23일	3. 24일	3. 25일	3. 26일
유향·유속 (시간)	220°-0.10kts (01:00)	222°-0.10kts (02:20)	217°-0.12kts (04:00)	260°-0.14kts (05:20)
	225°-0.11kts (14:00)	231°-0.17kts (15:30)	219°-0.18kts (17:00)	253°-0.19kts (18:00)

43) 3. 26일 침몰사건 발생 시간대의 조류는 161°-2.89kts.



〈그림 3장-7-21〉 3. 23~3. 26일간 정조 시 조류 방향 및 유속

(3) 소결론

백령도 근해 조류는 최대 5.3kts로 강한 편이나 사건 발생 시간(3. 26. 21:22) 조류는 정밀 시물 레이선 결과 161°-2.89kts로 규명(해도상 조류 142°-2kts)되었다. 조류가 천안함 기동 및 북한 잠수함정에 미치는 영향은 해역별로 차이가 있으나 속도 및 항해 형태(스노클/수중) 조정을 통해 극복 가능한 것으로 판단된다. 또한 북한 잠수함정의 어뢰 운용 시에는 어뢰 속도(최소 30kts 이상) 및 유도방식(음향)을 고려할 때 조류의 영향이 미약한 것으로 판단되며, 기뢰 부설 시에는 정밀부설을 위해 저속운항이 불가피하기 때문에 조류의 영향을 크게 받았을 것으로 판단된다.

8. 어뢰 추진동력장치

과학수사분과는 사건 발생 초기부터 사건원인과 관련된 폭약, 금속 등에 대한 증거물 분석을 진행하면서 보다 명확한 원인규명을 위해 결정적 증거물을 찾기 위한 방안을 지속적으로 모색하였다. 해군 탐색구조단을 중심으로 해저 증거물 수거활동을 하였으며 한국 측에서 기뢰 탐색함, 구조함 등 8척, 미국 측에서는 구조함인 살보(Salvor)함을 투입하였고, 해양연구원의 장목호, 이어도호를 투입하였다. 또한 106명의 잠수사(SSU 73명, EOD 33명)와 로봇 해미래

까지 이용하여 증거물을 찾으려 노력하였으나 침몰사건 현장인 백령도 해역의 경우 안개가 잦아 시계가 100~2,000yds(91m~1,828m) 정도이고, 평균 3~5kts의 강한 조류가 흐르며, 수심이 40~50m로 많은 제한이 있었다.

이에 침몰 해역의 기상과 지형 여건 하에서 해저 증거물을 수거하는 방법을 찾기 위해 민간·군 관계자뿐 아니라 외국 전문가와 여러 차례 토의를 가졌다. 이 과정에서 자성체 잔해 및 파편을 수거하기 위한 특수자석 활용방안, 수중펌프로 해저의 펄과 모래를 흡입하여 분리하는 준설선 활용방안, 꼬막잡이용 어구를 이용하는 형망어선 활용방안 등이 제시되었다.

그러나 특수자석은 비자성체의 잔해 및 파편 수거가 불가하고, 준설선은 사고 지역 수심이 깊어 제한되는데다가 활용할 수 있는 준설선이 사건 현장까지 오는 데만 1개월 이상 소요되며, 형망어선은 해저면이 평평하고 펄과 모래지형에서만 활용 가능하여 3가지 방안 모두 운용 및 성과면에서 제한된다는 결론을 내렸다.

다른 효과적인 해저 증거물 수거방안을 찾던 중 과거 공군에서 전투기 추락사고 시 특수그물을 이용하여 전투기 잔해를 수거한 사례를 확인하고, 4월 17일 공군 안전실 조사관 등 3명, 당시 수거작업 업체(대평수산) 대표와 검토회의를 가졌다.

이 자리에서 공군 안전실 조사관으로부터 '06년 6월 7일 공군 F-15 전투기가 동해상 수심 372m에 추락했을 때와 '07년 7월 20일 공군 F-16 전투기가 서해상 수심 45m에 추락했을 때 대평수산에서 특수그물을 제작하여 3주간의 작업 끝에 90% 이상의 전투기 잔해를 수거한 사실을 알게 되어 타당성이 있다고 판단하였다. 이에 따라 합동조사단은 특수그물을 활용한 해저 증거물 수거방안을 본격적으로 검토하였고, 4월 18일 국방부 장관의 합동조사단 방문 시 승인을 받음으로써 특수그물을 활용한 해저 증거물 수거작전에 착수하게 되었다.

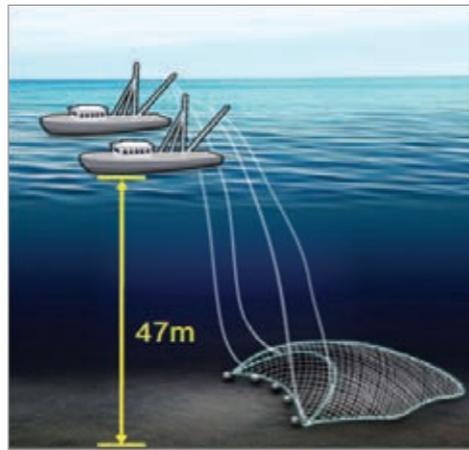
1) 추진 경위

4월 19일 해군본부 및 합동조사단 관계자가 업체 대표와 협의를 통해 기간은 4월 27일부터 5월 24일까지 하고, 수거구역은 최초 500×500yds로 하되 필요시 구역 확대를 검토하여 재계약을 실시하기로 하였다. 합동조사단은 그물 요구사항과 제작기간 단축(업체 예상기간 10일, 합동조사단 요구기간 7일 이내)을 요구하면서 투입인원에 대한 보안조치를 실시하기로 하고, 계약을 체결(해군공사계약-1327)하였다.

업체(대평수산)는 합동조사단의 요구대로 4월 21일 특수그물 제작을 시작하여 예정보다 1

일 빠른 26일에 완료하였다. 작업선박은 그물을 선적 후 4월 27일에 부산항을 출항, 4월 30일 새벽 대청도에 도착하여 해저지형 및 조류 파악 등의 작업준비를 하였다.

5월 1일 CH-47을 이용하여 백령도에 전개한 합동조사단 해저 증거물 채증팀 13명과 함께 5월 3일 핵심구역 외곽지역에서 특수그물을 2회 시험 운용한 결과 300kg 정도의 큰 돌 3개, 자갈 70kg, 어패류 30kg, 사냥(모래) 4개 분량을 수거하였다. 그러나 해저지형이 예상과 달리 자갈과 암반으로 이루어져 특수그물이 많이 손상되어, 5월 4일 평택항에 입항하여 찢긴 그물을 꿰매고 14mm줄로 특수그물을 보강하였고 예비용으로 제작한 특수그물 2set를 탑재 후 5월 6일 평택항을 출항하여 5월 7일 백령도 현지에 도착하였다.



〈그림 3장-8-1〉 특수그물 및 쌍끌이 어선 운용도

이후 “핵심구역 내 가스터빈 등 대형 물체를 먼저 인양한 이후 특수그물을 투입하라.”는 합참의 지시에 의거 작업준비 중 5월 9일 해군 광양함이 가스터빈실 인양에 실패하였다. 이에 해군에서 민간업체⁴⁴⁾ 용역을 통한 인양을 합참에 건의하였다. 그러나 민간업체가 준비 및 이동 소요시간으로 인해 5월 17일 현장에 도착할 것으로 판단되어 수거작전 지연이 예상됨에 따라 탐색구조단에서 합참에 특수그물을 이용한 수거작업의 조기시행을 건의, 승인을 받아 5월 10일 18:00부로 특수그물을 이용한 본격적인 해저 증거물 수거작업을 시작하게 되었다.

합조단에 편성된 각국 조사요원들(미국 4명, 스웨덴 1명, 영국 2명)은 5월 14일 13시부터 18시까지 특수그물을 이용한 해저 증거물 채증 현장을 방문하였다. 먼저 헬기를 이용하여 쌍끌이 작업 해역에 대해 항공정찰을 실시한 후 백령도 해병대대에 설치된 분리수거장으로 이동하여 해저 수거물을 분류하고 증거물을 채증하는 현장을 참관하였으며, 이후 장춘부두에서 RIB을 이용, 직접 쌍끌이 어선에 탑승하여 해저 증거물 수거현장을 참관함으로써 특수그물을 이용한 해저 증거물 채증에 대한 절차와 방법을 확인하였다.

44) 유성수중개발, 함미 선체를 인양한 업체로 업체 소유 유성호에서 150t까지 인양, 탑재 가능.

2) 수거 및 채증 절차

특수제작된 그물은 그물코 격자 크기가 가로, 세로 각각 5mm⁴⁵⁾이고 가로 60m, 폭 25m, 높이 15m, 무게 5t이며 1mm 이상의 물건, 모래, 뽕 등에 대해 수거가 가능하였고, 운용 선박은 135t 2척(대평 11, 12호)이었다. 운용 지역은 폭발원점을 중심으로 가로·세로 500yds를 25개 격자(20×20yds)로 세분화하여 1일 작업지역을 명확히 설정, 누락되는 장소가 없도록 하였다. 특히 선박 자체의 어군탐지기로는 강조류 해저 속의 특수그물 위치파악이 어려워 해군 소해함의 지원을 받아 정확한 위치에서 수거작전이 실시되도록 하였다.

일자	작전 횟수 (오전 / 오후)	수거물	채증물
5. 10(월)	· / 3회	돌덩이 등	의자커버 속 토양 등 2점
5. 11(화)	3회 / 2회	유도기만체 등 7점	알루미늄 조각 등 7점
5. 12(수)	3회 / 4회	철 구조물 1점	석면조각 등 4점
5. 13(목)	3회 / 5회	전기레인지 등 24점	기관실 바닥 금속조각 1점
5. 14(금)	3회 / 3회	코팅된 도면 등 17점	기관실 계기판 금속조각 등 2점
5. 15(토)	1회 / 4회	사무용 PC본체 등 35점	여뢰 추진동력장치 등 7점
5. 16(일)	5회 / ·	관 개폐기 등 14점	·
5. 19(수)	4회 / ·	군용 망원경 등 3점	·

〈표 3장-8-1〉 특수그물 운용 수거물 및 채증 현황

수거 및 채증 절차는 두 선박이 2~4kts 속력으로 이동하며 해저에 그물을 내려 해저 바닥의 증거물들을 수거 후 기계로 그물을 감판으로 끌어올리면 합조단 채증팀과 UDT 통제인원, 선원 등이 갑판상에서 1차 분류하고 RIB을 이용하여 항구(장춘리 포구)로 이동시켜 차량(군용 5/4t)을 이용, 백령도에 주둔하고 있는 해병 6여단 예하 대대 연병장에 설치된 분리수거장으로 이동시켰다. 분리수거장에서는 직접적인 수작업과 지뢰(금속)탐지기를 통해 세부 분리작업을 실시한 후 합조단 채증팀에서 증거물로 판단되는 물체에 대해 채증하는 절차로 이루어졌다.⁴⁶⁾

45) 특수그물은 자루형 모양으로 제작되었으며 그물 전체의 코가 5mm로 이루어진 것이 아니라, 가장 촘촘해야 하는 내부 그물 끝부분의 그물코가 5mm로 제작되어 투망 시 그물 장력으로 그물코의 크기는 1mm가 됨.
46) RIB으로 이송이 제한되는 대형 증거물의 경우 해군 함정을 이용, 2함대 사령부로 직접 이송하여 채증 실시.

3) 어뢰 추진동력장치 수거

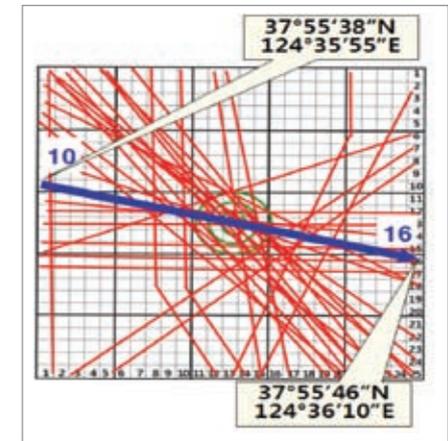
해상 기상이 파고 2m 이상이거나 풍속 20kts 이상 또는 시정 확보가 제한될 때는 수거작전이 제한되었으나, 다소간의 위험을 감수하더라도 조기에 성과를 거두기 위해 5월 10일 폭발원점 X축 8번, 10번, 11번에서 개시한 수거작전은 기상에 따라 매일 적게는 3회, 많게는 8회까지 전개되었다.

해저 증거물 수거팀은 5월 15일 07:50경 백령도 장춘부두 부근 해상에 정박해 있던 쌍끌이

일자	기상	작업 여부	비고
4.30(금)	파고 1.5m, 시정 3NM	현장 도착	협조회의(14:00)
5. 1(토)	파고 1.5m, 시정 3NM	X	현지 지형정찰, 작업준비
5. 2(일)	파고 2m, 시정 3NM	O	주변 지역 시험운용(2회)
5. 3(월)	파고 2m, 풍속 25kts, 시정 3NM	O	시험운용(그물 파손)
5. 4(화)	파고 1.5m, 시정 100y	X	그물 보수차 평택항 이동
5. 5(수)	파고 2m, 풍속 30kts, 시정 50y	X	그물 보수
5. 6(목)	파고 3m, 풍속 30kts, 시정 1NM	X	그물 추가적재, 출항(18:00)
5. 7(금)	파고 2m, 풍속 30kts, 시정 3NM	X	백령도 현장복귀(08:00)
5. 8(토)	파고 1.5m, 시정 5NM	X	가스터빈실 인양으로 대기
5. 9(일)	파고 1m, 시정 7NM	X	가스터빈실 인양 실패
5. 10(월)	파고 1.5m, 시정 3NM	O(3회)	작업개시(합참 지시)
5. 11(화)	파고 1.5m, 시정 5NM	O(5회)	
5. 12(수)	파고 1.5m, 시정 3NM	O(7회)	
5. 13(목)	파고 1.5m, 시정 4NM	O(8회)	
5. 14(금)	파고 1.5m, 시정 5NM	O(6회)	
5. 15(토)	파고 1m, 시정 5NM	O(5회)	어뢰 추진동력장치 인양
5. 16(일)	파고 1m, 시정 5NM	O(5회)	
5. 17(월)	파고 1m, 시정 5NM	X	가스터빈실 인양으로 대기
5. 18(화)	파고 1.5m, 시정 1NM	X	기상악화
5. 19(수)	파고 1.5m, 시정 100y	O(4회)	
5. 20(목)	파고 1~1.5m, 시정 3NM	현장 철수	
일 자	시험운용 2일간 3회, 작업 8일간 43회		

〈표 3장-8-2〉 특수그물 운용 수거작전 실시 현황

어선에 탑승⁴⁷⁾하여 출항, 08:30경 <그림 3장-8-2>와 같이 Y축 10번 격자에서 출발, 16번 격자방향으로 이동하는 30번째 수거작전을 시작하여 09:23경 수거작전이 종료되었고, 대평 11호로 증거물 인양을 시작하였다. 09:25경 대평 11호 선원이 “그물 속에 이상한 물체가 들어 있다.”고 합조단 수사관⁴⁸⁾에게 말하여 수사관과 선원이 확인 시 프로펠러 2개가 달려 있는 물체를 확인하였다. 09:30경 어선에 함께 승선했던 탐색인양 전단장, UDT 대대장이 2차로 확인하였으며, 09:31경 합조단 수사관의 현장감식을 통해 전장, 프로펠러 폭, 날개 길이 등 부분별 실측을 하고 사진촬영을 한 후 09:36경 합동조사단 본부에 보고하였다. 이후 09:38경 추가로 모터로 추정되는 물체를 발견하여 어뢰와 연관이 있을 것으로 판단, 실측(직경, 길이 등)과 사진촬영을 하였고 09:40경 탐색구조단장 및 수행인원 5명이 현장에 도착하여 증거물을 확인하였다.



〈그림 3장-8-2〉 증거물 수거 지역

09:50경 합조단 증거물 채증팀장 등 3명이 현장에 도착하여 09:55경 현장에서 정밀채증을 실시하였다.⁴⁹⁾ 10:05경 성인봉함에 증거물 포장용 모포 지원을 요청하고 10:15경 모포를 이용, 증거물을 1차 포장 후 배에 있던 비닐천막으로 2차 포장, 로프로 결속하였으며, 10:23경 합조단 채증팀장 등 2명과 포장한 선원 4명이 RIB을 이용하여 백령도 장춘항으로 운송 및 하역하였다.

11:20경 해병 6여단 헬기장에서 공군헬기를 이용, 평택으로 출발하였으며, 13:20경 평택 2함대 헬기장에 도착하였고, 13:40경 평택 2함대 합동조사단 사무실로 운송한 후 출입통제 등 보호조치를 하고 14:00경 합동조사단장과 과학수사분과장이 증거물을 확인한 후 15:00~16:30까지 정밀감식을 실시하였다.

5월 17일 09:00~10:00까지 합동조사단장 주관하에 외국 조사인원 대표 4명(미국 해군대령 마크 토마스, 호주 해군중령 파월, 스웨덴 에그니 위드홀름, 영국 데이비드 맨리), 다국적 연합정보

47) 대평 11호 17명 : 해군 탐색인양전단장, UDT 대대장, 조타상사, 합조단 수사관 2명, 선장, 선원 11명.
 대평 12호 15명 : UDT 소령, 조타상사, 합조단 수사관 2명, 선장, 선원 10명.
 48) 과거 구미 방산업체(LIG넥스원) 견학 당시 어뢰를 본 경험이 있어 어뢰 파편으로 판단.
 49) 채증팀 중사가 어뢰 추진동력장치 및 주변 동영상 및 사진 촬영, 재실측.

TF의 어뢰전문가(알렉산더 케이시), 국방과학연구소 어뢰전문가(이재명 박사), 과학수사분과장, 총괄팀장 등이 참여하여 수거된 어뢰 추진동력장치에 대해 합동토의를 실시하였다.

어뢰 추진동력장치 수거 및 채증 과정은 <그림 3장-8-3>에서 보는 바와 같다.



① 특수그물 투망

② 해저 수거물 인양



③ 증거물 식별

④ 현장감식



⑤ 증거물 포장

⑥ 육상이동



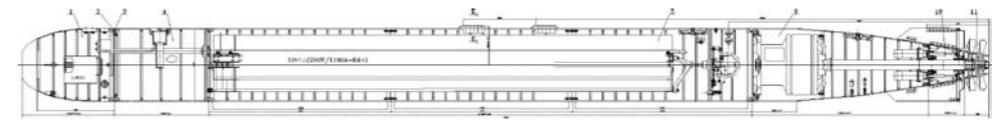
⑦ 헬기 이송

⑧ 정밀감식

<그림 3장-8-3> 어뢰 추진동력장치 수거 및 채증

4) 분석 결과

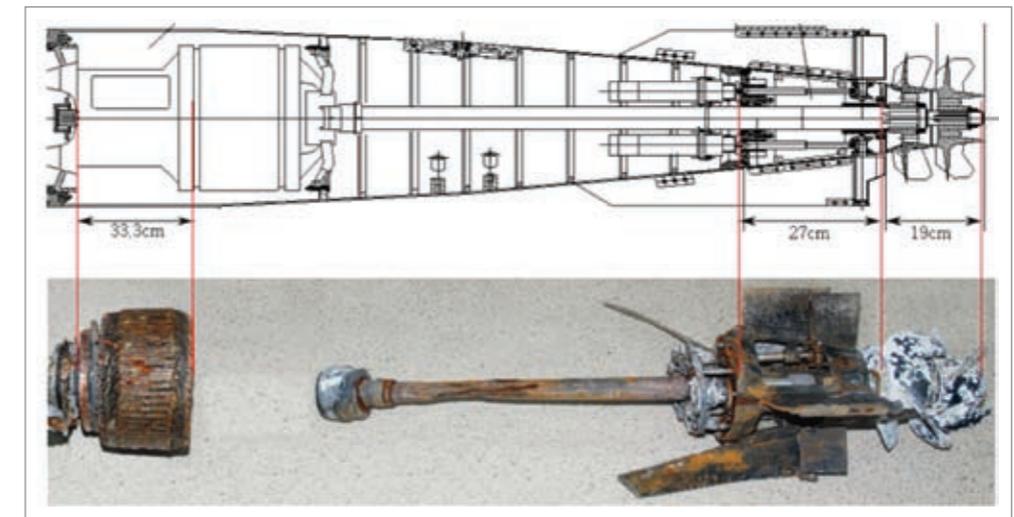
수거한 어뢰 추진동력장치는 조종장치(71.1kg)와 추진모터(81.85kg)였으며 조종장치는 프로펠러, 추진후부, 샤프트로 구성되어 있고 이 중 추진후부에는 4개의 날개가 있고 각 날개 앞부분은 고정타, 뒤에는 방향타가 있었다. 이 증거물이 어떠한 어뢰의 추진동력장치인가를 확인하기 위해 각국의 어뢰 제원 및 특성에 대해 조사한 결과 북한에서 해외에 수출하기 위해 제작한 CHT-02D 어뢰와 유사하다는 사실을 확인하여 설계도면을 확보, 비교 분석하였다.



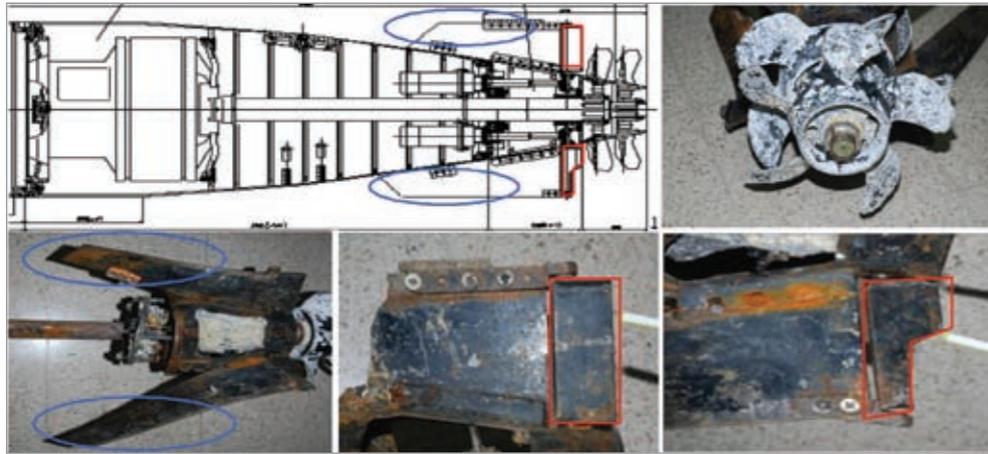
<그림 3장-8-4> 제원 축척에 맞춘 CHT-02D 어뢰의 이미지

정보분석분과로부터 CHT-02D 어뢰의 이미지를 제공받아 10배 이상 확대하여 이미지에 기재된 어뢰 각 부분별 길이를 확인, 증거물과의 일치 여부를 확인하였다. 또한 설계도면의 일본어처럼 보이는 표기를 확인한 결과 일본어가 아니었으며, 북한식 컴퓨터 글꼴을 국내 컴퓨터로 읽고 프린터로 출력하는 과정에서 나타난 것으로 확인하였다.

<그림 3장-8-5>에서 보는 바와 같이 길이는 프로펠러에서 샤프트까지 112cm, 프로펠러



<그림 3장-8-5> CHT-02D 어뢰 설계도와 증거물 크기 비교



〈그림 3장-8-6〉 CHT-02D 어뢰 설계도와 증거물 모양 비교

19cm, 추진후부 27cm, 추진모터 33.3cm이고, 상부 고정타 33cm, 하부 고정타 45cm로 설계도면과 증거물의 길이가 정확히 일치하였다.

모양면에서 프로펠러는 2중 5엽이고 고정타는 사선형이었으며, 상부 방향타는 직사각형, 하부 방향타는 P자형으로 설계도면과 증거물의 모양이 동일하였고, 하부 고정타 지지홀 9개, 하부 방향타 지지홀 2개로 설계도면과 일치한다는 점을 확인하였다.

또한, 프로펠러 부분의 백색 흡착물질을 분석한 결과 알루미늄 산화물, 탄소(일부 흑연), 알루미늄 분말 등이 검출되었고, 이는 천안함 선체 및 연돌부분의 흡착물질과 동일한 것으로 확인되었다.

이와 함께 5월 15일 09:25경 어뢰 인양 시 어선에서는 세부적인 관찰을 실시하지 않아 발견하지 못하였으나, 같은 날 헬기를 이용, 증거물을 민·군 합동조사단이 위치한 평택 2함대로 운송하여 과학수사팀이 관찰 중에 추진후부 내부에 '1번'이라 표기되어 있는 한글을 발견하였다.

이렇게 발견된 '1번'이라는 한글표기는 '03년 포항 근해에서 습득하여 보관 중인 북한 경어뢰 헤드캡 안쪽에도 '4호'라고 표기되어 있다는 점에서 표기방법이 동일하다⁵⁰⁾는 사실을 확

50) 북한 《조선국어대사전》 확인 결과, 북한은 '호', '번' 모두를 쓰고 있는 것으로 확인되었고, 탈북자 증언에 따르면 북한은 순서를 표기할 때 '번' 자를 사용하고 사물의 종류를 구별할 때 '호' 자를 사용하는데 배급소나 버스 정류장 등 줄을 서거나 순서가 필요한 곳에서는 '번'을 활용하고, 사용자가 누구인지, 또는 대상이 무엇인지에 따라 '1호 별장', '15호 관리소' (수용소), '10호 대상' 식으로 표기하며, 공장에서 미사일을 생산할 때 미사일의 종류가 다르면 '1호'나 '2호' 미사일 등으로 구분하고, 같은 종류끼리는 '1번', '2번' 식으로 구별하고 있다 함.



〈그림 3장-8-7〉 어뢰 추진동력장치 및 북한 경어뢰 한글 표기

인하여 우선적으로 필적감정을 고려해 보았으나 글자(자·모음)가 달라 제한되었으며, '1번' 표기의 잉크 분석과 표면 분석을 실시한 결과 글씨 위에 염분이 침착되어 있고, 내부철재의 부식이 진행되어 잉크 위로 솟아오른 것이 관찰되어 '1번' 표기가 철재 부식 이전에 기재된 사실을 확인하였다.

어뢰 추진동력장치에 대한 폭약성분 검출여부 확인 결과 폭약성분은 검출되지 않았으며 금속성분을 분석한 결과 프로펠러는 알루미늄 합금(Al 86%, Si 14%)이고, 고정타 날개는 철(Fe)이 주성분인 것으로 확인되었다.

아울러 어뢰 추진동력장치와 선체의 부식 정도에 대한 비교 분석을 위해 함수 및 함미의 파단면과 증거물에서 시료를 채취하여 서울대학교(권동일 교수), 강릉원주대학교(최병학 교수), 국립과학수사연구소(김의수 박사)에서 합동으로 육안검사 결과 어뢰 추진동력장치 철부분(고정타)과 선체 철부분의 부식 정도는 유사한 것으로 확인하였다.

또한, '1번' 글씨가 어뢰의 폭발로 150℃ 이상의 고열이 발생했음에도 잉크가 증발하거나 변색되지 않고 파란색의 형태로 남아 있는 이유를 확인하기 위해 분광분석기를 이용, 표기가 있는 추진후부 부분을 정밀분석한 결과 철 위에 스테인레스강 색상과 유사한 금속 부식방지용 페인트(폴리비닐부티랄 polyvinylbutyral)⁵¹⁾ 위에 표기되어 있는 것을 확인하였다. 이번 사건이 수중(수온 3℃)에서의 비접촉성 폭발이며 어뢰가 표적탐지부(70cm), 탄두부(72cm), 전지부

51) 폴리비닐부티랄은 고분자 물질로 금속, 유리, 세라믹 등의 녹을 방지하기 위한 페인트이고, 무기물 성분인 알루미늄, 마그네슘, 규소, 티타늄, 인, 아연이 포함됨.

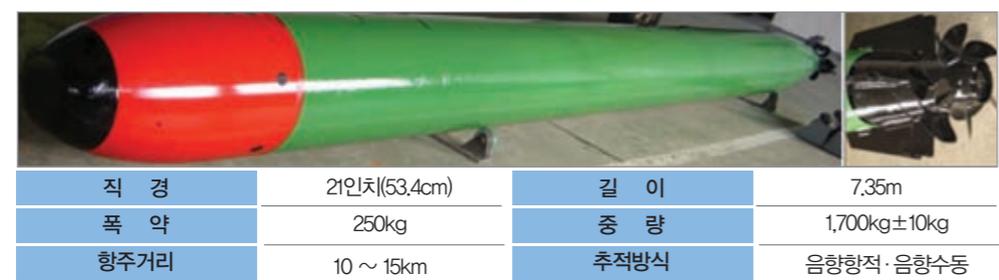
(4.125m), 추진동력장치부(1.805m) 등으로 구성되어 있어, 탄두부(72cm)에서 폭발이 이루어 지더라도 4.125m에 달하는 전지부가 완충역할을 하고, '1번'이 표기된 부분은 추진후부 내부에 쓰여져 정비구 덮개로 보호를 받고 있으며, 발사 시부터는 물이 채워져 있는 상태이고 폭약 250kg 폭발 시 가스버블은 6m 내외로 가스버블이 팽창하면서 추진동력장치가 30~40m 후방으로 이동한다는 사실을 종합적으로 고려해 볼 때, 폭발 시 추진후부 페인트 칠한 면이 열에 의해 손상되지 않아 잉크가 손상되지 않고 선명하게 남아 있는 것으로 판단하였다.

이와 관련 KAIST 열역학전문가 송태호 교수는 어뢰 폭발 시 온도 변화 연구를 통하여 폭발 시 생기는 3,000℃의 화염은 단열 팽창하면서 0.1초 만에 상온(28℃)까지 냉각되고, 이 과정에서 화염이 디스크 온도를 바닷물의 수온(3℃)보다 2~3℃도 올릴 수 있으나 '1번' 글씨가 쓰여진 후면은 미처 열 전도가 되지 않아 온도 변화가 거의 없다는 연구 결과를 발표하였다. 또한 더 가혹한 조건에서도 추진부 어느 부분도 20℃ 이상의 온도가 오르지 않으므로 추진 후부의 페인트 및 글씨는 열 손상을 입을 수 없다는 연구 결과를 제시하여 '1번' 글씨가 남아 있는 이유를 과학적으로 증명하였다.

'1번' 표기의 잉크 재질 분석을 위해 중국산 유성매직 5점을 분리분석, 비교 시험하였고, 페인트 원료에 대해서는 KIST 특성분석센터에 의뢰하여 페인트 원료 정밀분석을 실시하였으나 대부분 국가에서 유사한 원료를 사용하여 제조국 식별은 제한되었다.

5) 소결론

증거물 어뢰 추진동력장치는 북한 CHT-02D 어뢰 설계도면과 크기와 모양이 일치하며 '1



〈그림 3장-8-8〉 CHT-02D 실물사진 및 제원

번' 한글표기가 되어 있다는 점, 우리나라의 수중무기에 대한 재물조사를 실시한 결과 이상이 없는 것으로 확인된 점 등을 고려, 폭발원점 지역에서 수거한 어뢰 추진동력장치는 북한에서 제조하여 사용 중인 CHT-02D 어뢰의 잔해물로 천안함이 북한 CHT-02D 어뢰에 피격되어 침몰하였다는 사실을 확인하였다.

4장

결론



2010년 3월 26일 21시 22분경 백령도 인근 해상에서 임무수행 중이던 천안함이 **북한**의 어뢰 공격에 의해 침몰되었다. 침몰 직후 군(軍)은 인명구조를 위해 해상·해안·수중 탐색 활동을 4월 3일까지 실시하였으며, 4월 4일부로 인명구조작전에서 선체인양작전으로 전환하였다.

절단된 함수 및 함미 선체 인양과 이송은 4월 25일에 완료하였으며, 인양간 40구의 시신을 수습하였다. 인양 후에는 탐색작전 위주로 전환하여 잔해물 발견 확률이 높은 구역 위주로 정밀탐색을 실시하였으며, 5월 10일부터 특수그물망을 이용하여 해저에 대한 정밀탐색을 실시하던 중 5월 15일에 어뢰 추진동력장치인 추진모터와 프로펠러 등을 수거하였다.

침몰요인은 비폭발, 내부폭발, 외부폭발로 구분하여 모든 가능성을 상정하여 분석하였으며, 선체 인양 후 정밀조사 결과, 비폭발과 내부폭발의 가능성은 배제되었고 외부폭발 중 수중폭발로 판단하였다. 수중폭발 중 비접촉 어뢰의 가능성을 가장 높게 판단하였으며 또한 계류기뢰의 가능성은 희박하지만 배제하지 않았다.

천안함의 파손상태만 고려 시 비접촉 계류기뢰의 폭발 가능성은 있으나, 해양 환경과 부설 수단 등을 고려 시 가능성이 희박하였다. 따라서 침몰요인 중 비접촉 어뢰의 가능성을 가장 높게 판단하였다.

침몰원인을 어뢰 피격으로 판단한 근거는 다음과 같다.

첫째, 선체 손상부위를 정밀계측하여 분석한 결과, 충격파와 버블효과로 인하여 선체의 용골이 함정 건조 당시와 비교하여 위쪽으로 크게 변형되었고, 외판은 급격하게 꺾이고 선체에는 파단된 부분이 있었다. 주갑판은 가스터빈실 내 장비의 정비를 위한 대형 개구부 주위로 파단되었고, 좌현 측이 위쪽으로 크게 변형되었으며, 절단된 가스터빈실 격벽은 크게 훼손되고 변형되었다. 함수, 함미의 선저가 아래쪽에서 위쪽으로 꺾인 것은 수중폭발이 있었다는 것을 입증한다.

둘째, 함정 내·외부의 표면을 면밀히 조사한 결과, 함정이 좌우로 심하게 흔들리는 것을 방지해 주는 함안정기에 나타난 강력한 압력흔적, 선저부분의 수압 및 버블흔적, 열흔적이 없는 전선의 절단, 가스터빈실 선체에 나타난 구형 압력흔적 등은 수중폭발에 의한 강력한 충격파와 버블효과가 함정의 절단 및 침몰의 원인임을 알려주고 있다.

셋째, 생존자들은 거의 동시에 폭발음을 1~2회 청취하였으며, 충격으로 쓰러진 좌현 견시병의 얼굴에 물이 튀었다는 진술, 백령도 해안 초병이 2~3초 동안 높이 약 100m의 백색 섬광불빛을 관측했다는 진술 등을 분석한 결과, 이는 수중폭발로 발생한 물기둥 현상과 일치하였다. 또한 부상자 상태와 시체검안 결과 파편상과 화상의 흔적은 발견되지 않았고, 골절과

열창 등이 관찰되어 충격파 및 버블효과로 나타날 수 있는 현상과 일치하였다.

넷째, 한국지질자원연구원의 지진파와 공중음파를 분석한 결과, 지진파는 4개소에서 진도 1.5 규모로 감지되었으며, 공중음파는 11개소에서 1.1초 간격으로 2회 감지되었다. 지진파와 공중음파는 동일 폭발원이었으며, 이것은 수중폭발에 의한 충격파와 버블효과 현상과 일치하였다.

다섯째, 1차 미국 측의 선체 변형 현상 분석 결과 수심 약 6~9m, 가스터빈실 중앙으로부터 좌현 3m 위치에서 총 폭약량 TNT 200~300kg 규모의 폭발이 있었던 것으로 판단되었고, 2차 한국 측의 시뮬레이션 결과는 동일 지점에서 총 폭약량 TNT 250~360kg 규모의 폭발이 있었던 것으로 분석되었으며, 영국 측도 함께 참여하였다.

여섯째, 백령도 근해 조류를 분석해 본 결과, 강한 조류로 인해 기뢰부설은 제한되는 반면, 어뢰 발사에는 영향이 미약한 것으로 판단하였다.

일곱째, 폭약성분 분석 결과, HMX는 연돌, 함수 절단면 등 28개소에서 검출되었으며, RDX는 연돌, 해저토양 등 6개소에서 검출되었고, TNT는 함안정기 등 2개소에서 검출됨으로써 HMX, RDX, TNT가 혼합된 폭약성분임을 확인하였다.

마지막으로 민·군 합동조사단은 특수그물망을 이용하여 침몰 해역에 대한 정밀탐색을 실시해 오던 중 5월 15일 침몰 해역에서 어뢰로 확증할 수 있는 결정적인 증거물로 어뢰의 추진동력장치인 프로펠러를 포함한 추진모터와 조종장치 등을 수거하였다. 이 증거물은 **북한**이 해외로 수출할 목적으로 배포한 어뢰 소개자료의 설계도와 크기, 모양 등이 일치하였다.

또한, 천안함 선체에서 발견된 흡착물질과 어뢰 추진동력장치에서 발견된 흡착물질의 성분을 분석한 결과, 동일한 성분인 것으로 확인되었다. 추진후부 안쪽에 '1번'이라는 한글 표기는 우리가 2003년에 습득한 **북한**의 시험용 어뢰 표기방법과도 유사하였다. 이러한 모든 증거는 수거한 어뢰부품이 **북한**에서 제조되었다는 것을 확인해 주었다.

결론적으로 침몰 해역에서 수거된 어뢰 추진동력장치와 선체의 변형형태, 관련자들의 진술내용, 부상자 상태 및 시체검안, 지진파 및 공중음파 분석, 수중폭발 시뮬레이션, 백령도 근해 조류 분석, 폭약성분 분석, 수거된 어뢰부품들의 분석 결과에 대한 민·군 합동조사단과 다국적 연합정보분석 TF의 의견을 종합해 보면,

천안함은 어뢰에 의한 수중폭발로 발생한 충격파와 버블효과에 의해 절단되어 침몰되었고, 폭발 위치는 가스터빈실 중앙으로부터 좌현 3m, 수심 6~9m 정도이며, 무기체계는 **북한**에서 제조, 사용 중인 고성능폭약 250kg 규모의 CHT-02D 어뢰로 확인되었다.

부록

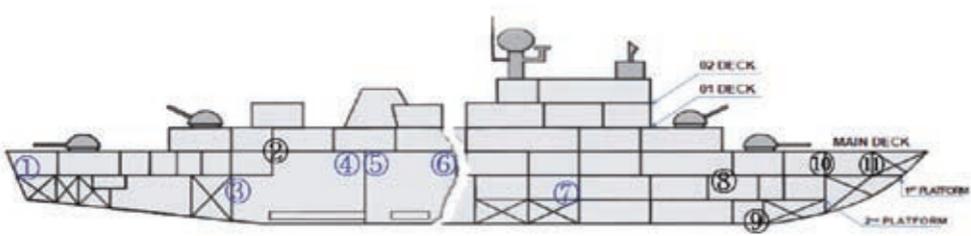
- I. CCTV 복원 및 분석 결과
- II. 수중폭발 현상
- III. 폭발방향 및 위치 판단 결과
- IV. 폭약량 및 폭발 수심 판단 결과
- V. 흡착물질 분석 결과
- VI. 복원성 분석 결과
- VII. 선체 기본강도 해석 결과



부록 I_CCTV 복원 및 분석 결과

1. 개요

CCTV 분석을 위해 먼저 통제 컴퓨터 위치(사관실), 카메라 내·외부 설치 위치와 수량, CCTV 특성 등의 현황을 설치업체와 협조하여 확인하였다. 또한 침몰원인 파악에 도움이 될 것으로 예상되는 현문과 가스터빈실 녹화자료 중 사건 당일 21:00 이후의 CCTV 영상을 우선적으로 복원한다는 계획을 수립하고, 4월 24일 함수 인양 시 CCTV 통제 컴퓨터를 최우선적으로 채



■ CCTV 위치(11개소)

순번	카메라 위치
1	후타실
2	현문(외부)
3	디젤기관실 후부
4	디젤기관실 전부
5	가스터빈실 후부
6	가스터빈실 전부
7	냉동기실
8	보급행정실
9	소병기고
10	갑판창고
11	함수창고

※ 6개소(청색)만 촬영

■ CCTV 설치

1. 업체 : (주)미드텍스(09. 9. 16~17)
2. 저장환경
 - 가. 컴퓨터 시간오차 존재(일반적 현상)
 - 나. 촬영구역 내 움직임 감지 시 촬영
 - 다. 촬영된 장면은 1분 후 저장
3. 통제 컴퓨터 : 사관실 설치

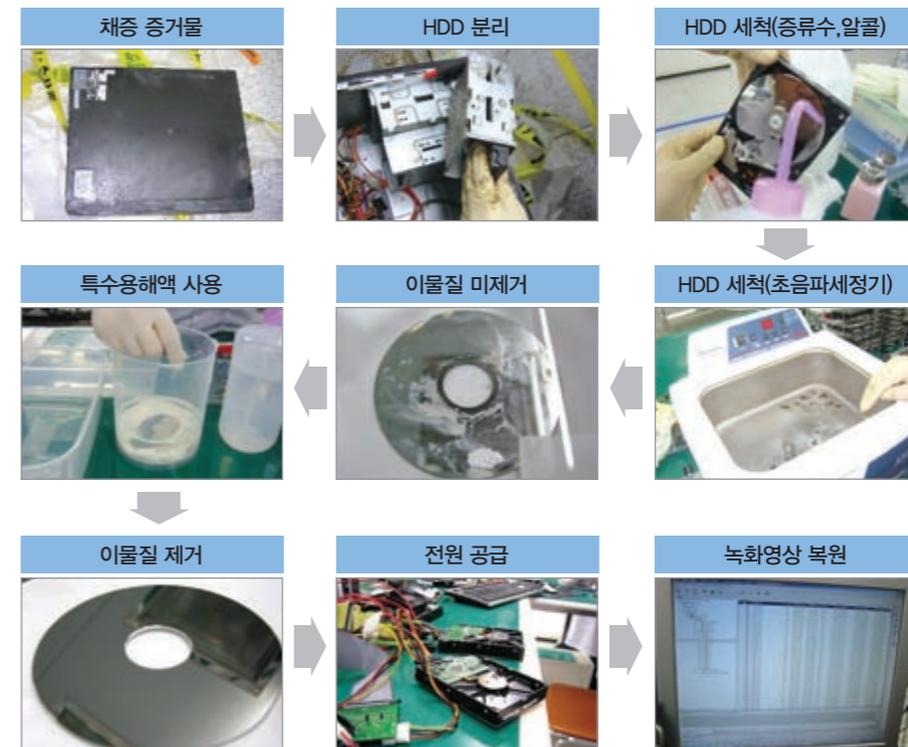
<그림 부록 I-1-1> 천안함 CCTV 위치도

증하여 하드디스크 복원 전문업체인 (주)명 정보기술(충북 청원군 오창읍 소재)에 복원을 의뢰 하였다.

2. 복원 절차

CCTV 복원작업은 하드디스크가 약 1개월여 동안 해저에 있었던 관계로 기름, 땀 등의 이물질이 하드디스크 표면에 침착되어 있어 복원 자체가 불투명하였다. 6일 동안 가장 성공률이 높은 고순도 알콜과 증류수, 유화제 등을 이용, 분무 및 초음파 세척 과정을 반복하여 이물질 제거를 시도하였으나 완전히 세정되지 않았다.

이에 따라 전문가 회의를 소집, 민간업체에서 제시한 '하드디스크 표면을 부분적으로 깎아 내는 방법'과 합조단 분석팀에서 제시한 '이물질을 용해시키는 방법'을 놓고 토의한 결과, 최초의 시도이나 이물질 용해방법이 성공확률이 높다고 판단하여 이를 신중하게 시도하는 것



<그림 부록 I-2-1> CCTV 복원 절차도

으로 결정하였다.

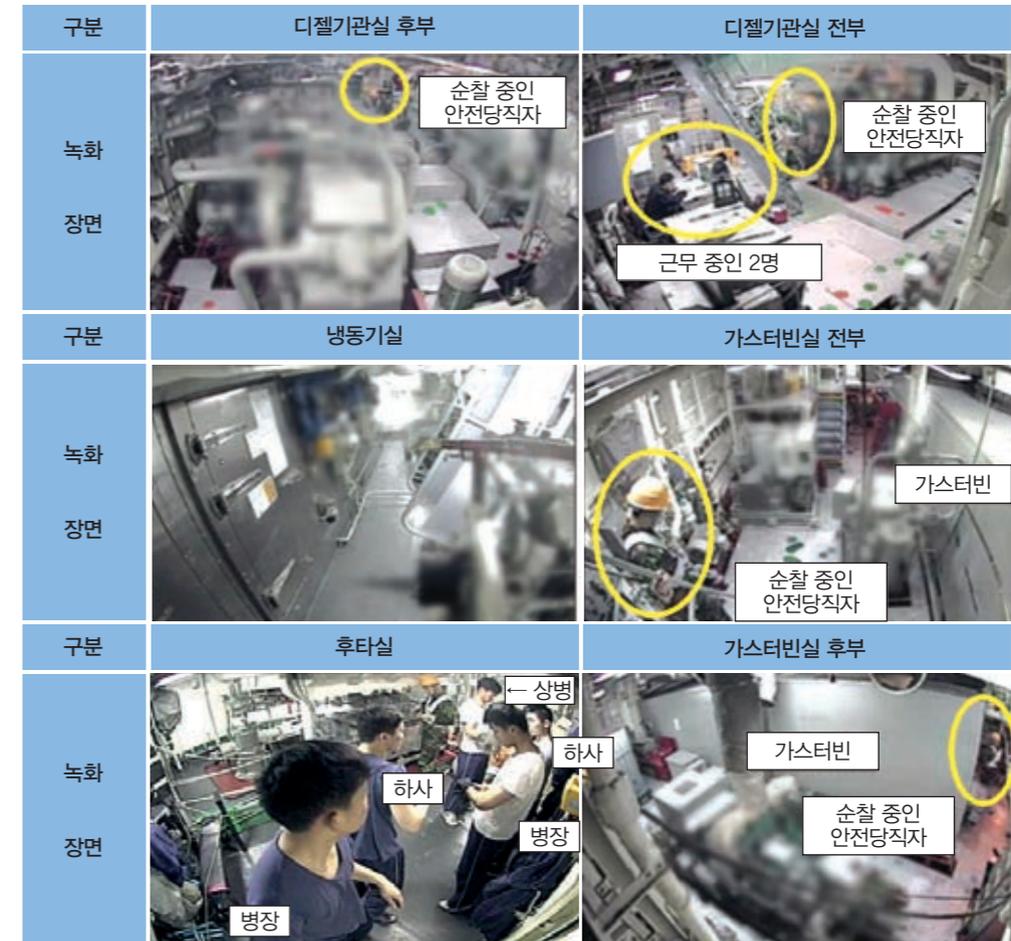
국방부조사본부 과학수사연구소에 이물질에 대한 성분 분석을 의뢰한 결과 이물질은 알루미늄 성분이고, 이를 제거할 수 있는 용해액은 수산화나트륨이라는 사실을 확인한 후 디스크 손상방지를 위해 용해액의 온도와 농도를 극소량으로 시작해 점차 늘려가며 2일간 수습여회에 걸친 시도 끝에 침착된 알루미늄을 제거하는 데 성공하였다. 이로써 총 11개의 CCTV 카메라 중 동체 움직임이 없어 촬영되지 않은 5개소의 영상을 제외한 6개 카메라에서 찍은 영상을 부분적으로 복원하였다.

3. 복원 결과

천안함 CCTV는 11개소 카메라 각각의 시계와 통제 컴퓨터상의 시계에서 발생하는 일반적인 시간 오차가 있고 촬영범위 내 움직임을 감지할 경우에만 촬영되며, 촬영영상은 1분 후 저장되는 특성과 생존자 진술을 토대로 분석한 결과 최종 촬영된 CCTV는 가스터빈실 CCTV로 21:21경(CCTV상 21:17:03) 작동을 멈춘 것으로 추정하였다.

순번	설치장소	영상 내용	화면 표시 시각		
			시작	종료	분량
1	디젤기관실 후부(함미)	안전당직자 순찰 모습	21:12:23	21:13:06	43초
2	디젤기관실 전부(함미)	① 2명 근무 모습 ② 안전당직자 순찰 모습	21:02:21	21:13:16	10분 55초
3	냉동기실(함수)	파일손상으로 유동인원 확인 불가	21:02:40	21:15:50	13분 10초
4	가스터빈실 전부(함미)	안전당직자 순찰 모습	21:15:20	21:16:12	52초
5	후타실(함미)	① 3명 체력단련 모습 ② 2명 출입 모습 ③ 안전당직자 순찰 모습	21:02:20	21:17:01	14분 41초
6	가스터빈실 후부(함미)	안전당직자 순찰 모습	21:02:20	21:17:03	14분 43초
계	6개소	유동인원 8명	21:02:20	21:17:03	계: 55분 04초

〈표 부록 I-3-1〉 CCTV 복원 내용



〈그림 부록 I-3-1〉 CCTV 녹화장면

4. 분석 결과

천안함 CCTV를 복원한 결과 가스터빈실과 디젤기관실의 모습, 안전당직자 순찰 모습, 후타실에서 체력단련 중인 모습이 확인되었으며, 관찰된 격실의 정상적인 모습과 승조원들의 복장과 표정, 함정의 안정적 운항상태 등을 볼 때 천안함은 사건 발생 직전까지 좌초 등 비상상황 없이 정상적으로 임무를 수행하다가 갑작스런 폭발로 선체가 절단되어 침몰하였다는 사실을 확인하였다.

부록 II_수중폭발 현상

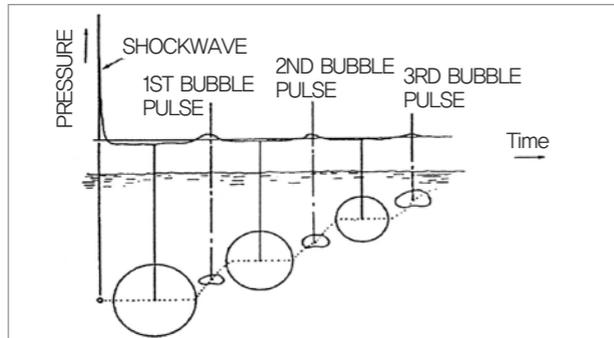
1. 수중폭발의 물리적 현상¹⁾

화약이 수중에서 폭발하면 매우 높은 압력의 충격파가 수중으로 전파되고, 이어서 고온(2,000~6,000K), 고압(150~400Kbar)의 폭발 생성물(Detonation products)에 의해 구형 버블이 형성된다. <그림 부록 II-1-1>은 충격파와 버블펄스 압력, 그리고 버블의 성장과정들을 시간진행에 따라 보여준다. 수중폭발에 의해 발생된 충격파의 초기 속도(~7km/s)는 매우 빠르게 구면파(Spherical wave)로 전파되지만, 폭발 지점으로부터 점점 멀어짐에 따라 속도는 급속히 감소되어 음속(~1.5km/s)으로 낮아지게 된다. 또한, 충격파가 전파되어 감에 따라 첨두압력(Peak overpressure)의 크기(P_m)는 감소하고 파형은 늘어지게 된다. 따라서 수중 충격파의 압력은 화약의 종류, 중량(W), 측정거리(R) 그리고 시간(t)에 의존하며 아래 (1)식과 같이 표현된다.

$$P(R, W, t) = P_m(R, W) \exp\left[-\frac{(t-t_0)}{\theta(R, W)}\right]$$

$$P_m(R, W) = K \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^\alpha, \quad \theta(R, W) = W^{1/3} K' \left(\frac{W^{1/3}}{R}\right)^{\alpha'} \quad (1)$$

여기서, $K, \alpha; K', \alpha'$ 은 화약의 종류에 따라 다른 상수 값들을 갖는다.



<그림 부록 II-1-1> 충격파와 버블의 시간-압력 곡선

1) Michael M. Swisdak, "Explosion Effect sand Properties : Part II-Explosion Effects in Water," NSWC/WOL TR 76-116, 1978.

<그림 부록 II-1-1>의 충격파 뒤에 따라오는 버블 펄스들은 가스 생성물(Gaseous products)에 의해 형성된 버블이 팽창하는 순간에 방출되는 압력 파형들로 충격파에 비해 압력이 매우 낮고 시간적으로 매우 느린 현상들이다. 버블의 높은 초기 압력과 온도로 인해 버블은 구면 바깥쪽으로 물을 밀어내며 팽창하고, 그 관성에 의해 압력 평형점(폭발지점에서의 수압)을 지나서야 멈추게 되며, 최대로 팽창된 버블의 내부 압력은 약 0.01기압 이하로 매우 낮게 된다. 따라서 버블 주위의 수압이 버블 내부의 압력보다 상대적으로 높아지게 되어 버블은 수축하게 된다. 수축하는 버블은 압력 평형점을 지나서까지 수축하게 되므로 버블 내부의 압력은 수백 기압까지 증가하게 되고, 이때 버블은 다시 팽창하여 펄스 압력을 방출하게 된다. 이러한 버블의 팽창과 수축이 반복되면서 버블은 진동하게 된다. 이러한 버블의 맥동(Pulsation)현상은 충격파 전파현상에 비해 시간적으로 매우 느린 현상이므로 중력이 작용하여 그 부피가 최소로 줄어들고 동시에 갑자기 수면 쪽으로 이동(Jump)하게 된다.

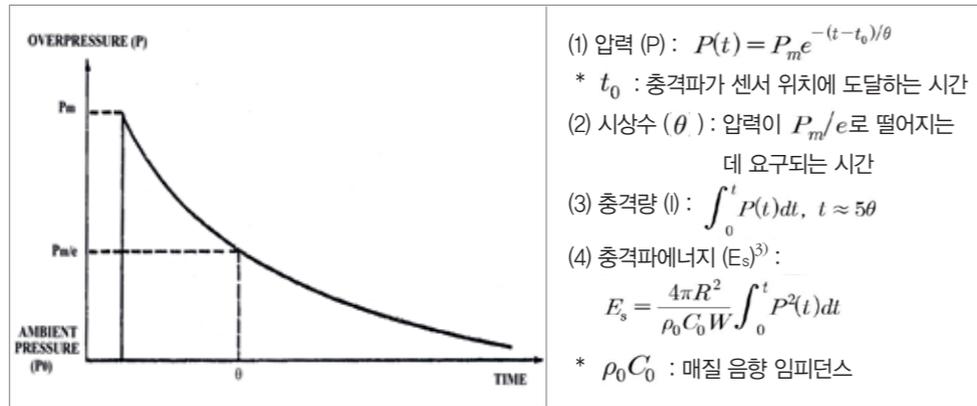
이러한 충격파의 발생과 전파, 버블의 팽창과 수축에 소요되는 에너지의 배분은 <표 부록 II-1-1>과 같이 분류되는 것으로 알려져 있다.²⁾ 즉, 충격파 에너지는 화약의 폭발과 동시에 수중으로 전파하는 구면 충격파의 방사 에너지와 전파에 따른 에너지 손실로 소모되며, 버블 에너지는 물과의 상호작용에 의한 에너지, 방사에너지 및 기포펄스 에너지 등으로 소모된다. 또한, 천해 수중폭발(Shallow depth UNDEX)의 경우에는 기포펄스 에너지의 대부분이 1차 버블 주기 이내에 소모되는 것으로 알려져 있다.

총 방출 에너지 (100%)	초기 충격파 에너지 (53~54%)
	1차 버블진동 에너지 (46~47%)

<표 부록 II-1-1> 수중폭발된 탄두의 에너지 배분 : 알루미늄이 함유되지 않은 이상적인 화약

<그림 부록 II-1-2>는 <그림 부록 II-1-1>의 일부분을 확대한 것으로 수중 충격파 전파 현상 이해에 매우 중요한 몇몇 변수들을 보여준다.

2) Warren C. Strahle, "Conventional Weapons Underwater Explosions," AD-A201 814, December 1988.



〈그림 부록 II-1-2〉 충격파 Parameters

또한, TNT 이외의 화약들에 대한 수증폭발 성능 비교를 위해서는 아래와 같은 새로운 용어들을 정의할 필요성이 있다.

(1) 동일중량 출력비 Equal weight ratio(D_{wd})	동일한 거리에서 동일한 무게의 두 화약에 대한 특정변수(침투압력, 시상수, 충격량, 에너지)들의 출력 비.
(2) 동일체적 출력비 Equal volume ratio(D_{vd})	동일한 거리에서 동일한 부피의 두 화약에 대한 특정변수(침투압력, 시상수, 충격량, 에너지)들의 출력 비.
(3) 등가 무게비 Equivalent weight ratio(W_{bd})	동일한 거리에서 동일한 크기의 특정변수를 가져올 두 화약의 무게 비.
(4) 상대적 기포 에너지 Relative bubble energy(RBE)	첫 번째 기포주기 상수(K)의 3제곱. $RBE = \left(\frac{K_{experimental}}{K_{reference}}\right)^3$
(5) 상대적 잠재 기포 에너지 Relative potential bubble Energy (RPBE)	최대 기포반경 상수(J)의 3제곱. $RPBE = \left(\frac{J_{experimental}}{J_{reference}}\right)^3$

1) 수중 충격파 특성

고성능 화약의 수증폭발에 의해 발생된 수중 충격파의 특성을 나타내는 변수인 P_m, θ, I, E_s 등은 화약의 중량과 화약으로부터 측정 위치까지의 거리(R)에 의존하며, 다음과 같은 충격파 상사관계식⁴⁾(Similitude relation)을 보여준다.

3) Robert H. Cole, "Underwater Explosions," Princeton University Press, 1948.
 4) 상사관계식(Similitude relation) : 압력, 충격량 및 에너지 등 충격파 변수들을 계산하는 데 적용되는 방식.

$$\text{Shock Parameter} = K \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (2)$$

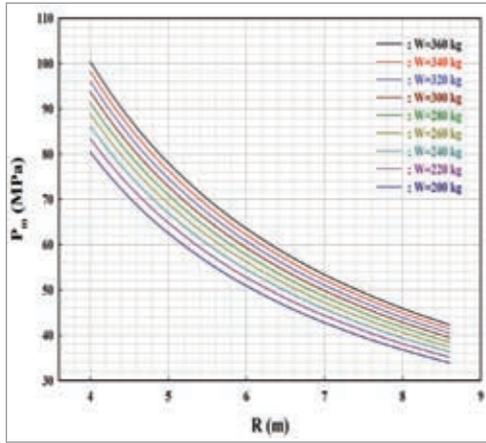
여기서, K와 α 는 특정 화약에 대한 상수, R은 화약과 측정지점 사이의 거리(m), W는 화약 중량(kg)을 나타낸다. 또한, 〈표 부록 II-1-2〉는 몇몇 화약들에 대한 충격파 상사관계식의 상수들을 나타낸 것이고, 〈표 부록 II-1-3〉은 20kg 이상의 화약에 적용되는 몇몇 화약들에 대한 동일중량 출력비(Equal weight ratio)를 나타낸다. 〈그림 부록 II-1-3〉은 TNT 중량(kg)에 따른 측정위치(R)별 침투압력(P_m)을 나타낸다.

Explosive	Shock parameter		$\theta/W^{1/3}$		$1/W^{1/3}$		$E/W^{1/3}$		Range of validity (MPa)
	K	α	K	α	K	α	K	α	
TNT	52.4	1.13	0.084	-0.23	5.75	0.89	84.4	2.04	3.4-138
PENTOLITE	56.5	1.14	0.084	-0.23	5.73	0.91	92.0	2.04	3.4-138
H-6	59.2	1.19	0.088	-0.28	6.58	0.91	115.3	2.08	10.3-138
HBX-1	56.7	1.15	0.083	-0.29	6.42	0.85	106.2	2.00	3.4-60
HBX-1	56.1	1.37	0.088	-0.36	6.15	0.95	107.2	2.26	60-500
HBX-3	50.3	1.14	0.091	-0.218	6.33	0.90	90.9	2.02	3.4-60
HBX-3	54.3	1.18	0.091	-0.218	6.70	0.80	114.4	1.97	60-350

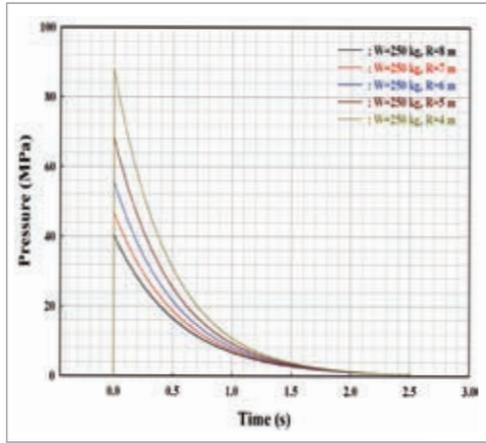
〈표 부록 II-1-2〉 화약에 대한 충격파 관계식의 상수

Explosive	Equal weight ratio				Equal weight ratio				(RBE) _{TNT}	(RPBE) _{TNT}
	D _{wd} (relative to HBX-1)				D _{wd} (relative to TNT)					
	P _m	θ	I	E	P _m	θ	I	E		
HBX-1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.08	0.99	1.12	1.26	1.48	1.44
TNT	0.92	1.01	0.90	0.79	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
HBX-3	0.89	1.10	0.99	0.86	0.96	1.08	1.10	1.08	1.93	1.82
H-6	1.04	1.06	1.02	1.09	1.13	1.05	1.14	1.37	1.69	1.59
PENTOLITE	1.00	1.01	0.89	0.87	1.08	1.00	1.00	1.09	1.00	1.02

〈표 부록 II-1-3〉 충격파와 버블 전환계수(Conversion factors)



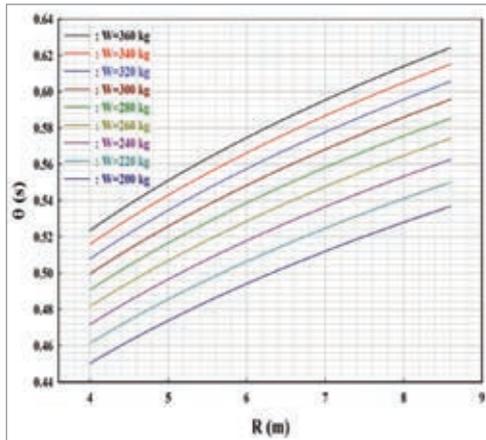
〈그림 부록 II-1-3〉 화약(TNT)으로부터 거리 R만큼 떨어진 곳에서의 충격파 첨두압력



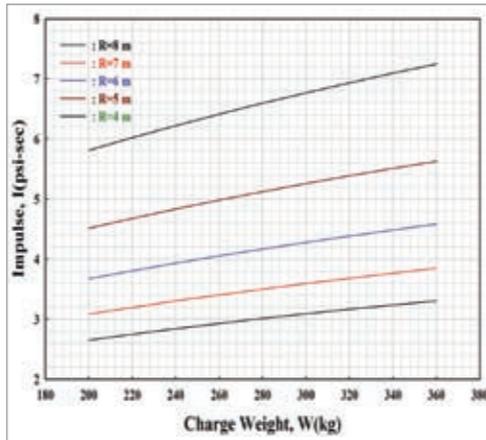
〈그림 부록 II-1-4〉 몇몇 측정 위치에서의 시간에 따른 충격파 압력의 변화

또한, 〈그림 부록 II-1-4〉는 TNT 250kg이 수중폭발하였을 때, 각 측정 위치(R)에서의 시간에 따른 충격파의 압력 변화를 보여주며, 〈그림 부록 II-1-5〉는 충격파의 첨두압력 P_m 이 P_m/c 로 떨어지는 데 걸리는 시간(θ)에 대한 변화를 보여준다. 이러한 $P(t)$ 와 θ 의 정보는 충격파에 의한 충격량 ($I = \int_0^{\theta} P(t)dt$)를 계산하는 데 매우 유용한 정보가 된다.

TNT 화약으로부터 R만큼 떨어져 있는 곳에서의 충격파 충격량은 〈그림 부록 II-1-6〉과 같이 계산할 수 있게 된다.



〈그림 부록 II-1-5〉 몇몇 거리에서 폭발된 화약의 중량에 따른 θ 값의 변화



〈그림 부록 II-1-6〉 TNT 화약 중량에 따른 충격파의 충격량

2) 수중버블 특성

수중버블의 특성은 〈그림 부록 II-1-1〉에서 자세히 설명되었으며, Willis P. M.은 실험을 통하여 버블의 진동주기(T)와 최대반경(A_m)을 다음과 같은 식으로 제시하였다. 여기서, 특정 화약에 대한 버블 상수들인 K, J는 〈표 부록 II-1-4〉와 같이 알려져 있다.

$$T = K \frac{W^{1/3}}{Z^{5/6}} \quad (3)$$

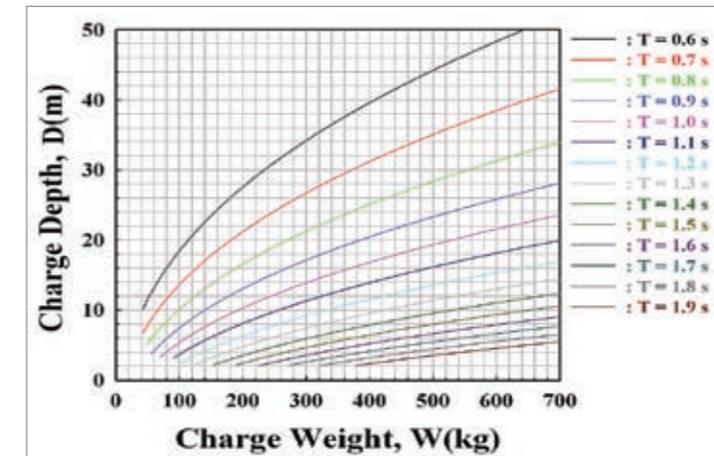
$$A_m = J \frac{W^{1/3}}{Z^{1/3}} \quad (4)$$

$$Z = 10.1 + D(m)$$

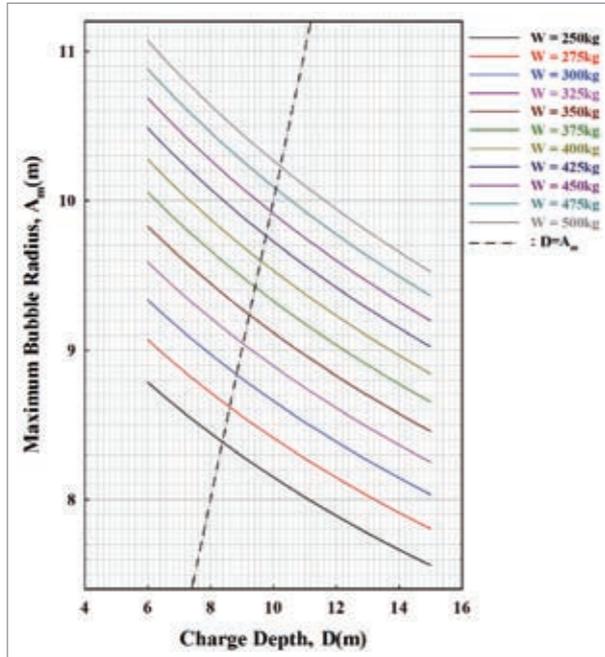
EXPLOSIVE	J	K
TNT	3.50	2.11
PENTOLITE	3.52	2.11
HBX-1	3.95	2.41
HBX-3	4.27	2.63
H-6	4.09	2.52

〈표 부록 II-1-4〉 특정 화약에 대한 버블 관련 상수

〈그림 부록 II-1-7〉과 〈그림 부록 II-1-8〉은 해수면으로부터 깊이 D의 거리에 설치된 화약(TNT)이 폭발했을 때의 버블주기(T)와 최대반경(A_m)의 크기를 나타내는 그래프이다.



〈그림 부록 II-1-7〉 수심별 화약의 폭발에 의한 기포의 진동주기(T)

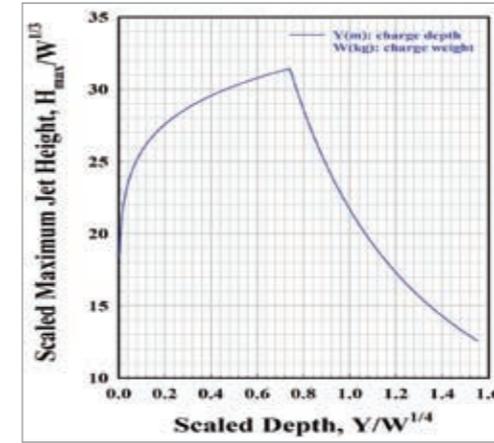


〈그림 부록 II-1-8〉 수심별 화약의 폭발에 의한 기포의 최대반경(A_m)

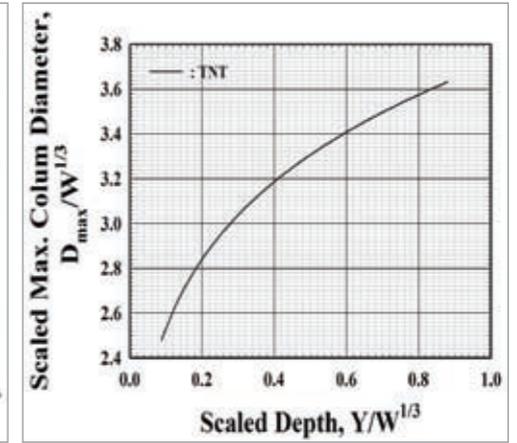
3) 수중폭발에 의한 물기둥(Column)과 제트(Jet)의 형성

TNT 화약이 해저에 놓여 있고, 상대적으로 수심이 낮은 수중폭발에 의해 형성된 물기둥(Column)과 버섯모양의 물기둥(Smoke plume)의 최대직경, 제트의 최대높이를 예측하는 식들은 아래와 같다. 〈그림 부록 II-1-9〉와 〈그림 부록 II-1-10〉은 축적된 폭약 수심(Scaled charge depth)에 따른 제트의 최대높이와 물기둥(Column)의 최대직경을 도시한 그래프들이다.

$$\begin{aligned}
 H_{\max}/W^{1/3} &= 32.4(Y/W^{1/4})^{0.1}, & 0.0037 < Y/W^{1/4} < 0.74 \\
 H_{\max}/W^{1/3} &= 21.7(Y/W^{1/4})^{-1.24}, & 0.74 < Y/W^{1/4} < 1.56 \\
 D_{\max}/W^{1/3} &= 3.71(Y/W^{1/4})^{0.166}, & 0.08 < Y/W^{1/4} < 0.88 \\
 S_{\max}/W^{1/3} &= 9.00 \\
 H_{\max}/W^{1/3} &= \text{scaled maximum jet height (m/kg}^{1/3}\text{)} \\
 D_{\max}/W^{1/3} &= \text{scaled maximum column diameter (m/kg}^{1/3}\text{)} \\
 S_{\max}/W^{1/3} &= \text{scaled maximum smoke crown diameter (m/kg}^{1/3}\text{)} \\
 Y &= \text{Charge Depth (m)}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$



〈그림 부록 II-1-9〉 Scaled depth에 따른 제트의 최대높이



〈그림 부록 II-1-10〉 Scaled depth에 따른 Column의 최대직경

〈그림 부록 II-1-9〉 그래프를 적용하여 TNT 250kg이 수심 6m에서 폭발하였을 때, 최대 제트 높이를 구하는 절차는 아래 (1)~(4)와 같다.

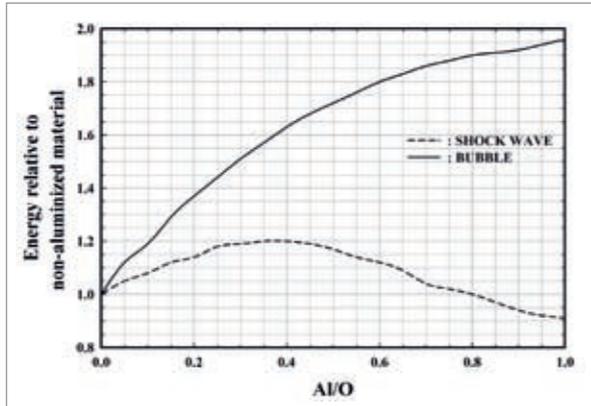
- (1) $W=250\text{kg}$, $W^{1/4}=3.98$, $W^{1/3}=6.30$
- (2) $Y=6\text{m}$, $Y/W^{1/4}=6/3.98=1.51$, $Y/W^{1/3}=6/6.30=0.95$
- (3) 〈그림 부록 II-1-9〉로부터 $Y/W^{1/4}=1.51$ 에서 $H_{\max}/W^{1/3}=13$ 을 얻는다.
- (4) $H_{\max}=13 \times W^{1/3}=13 \times 6.30=82\text{meters}$ 를 얻는다.

〈그림 부록 II-1-10〉의 해석도 위와 같은 절차가 적용된다.

4) 알루미늄 함유 화약의 수중폭발 성능⁵⁾

재래식 고성능 화약에 알루미늄이 함유된 비이상적인 화약(Non-ideal explosives)들은 알루미늄 함량이 증가함에 따라 〈그림 부록 II-1-11〉에서와 같이 상대적으로 버블 에너지가 현저히 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 화약의 사용 목적에 맞게 알루미늄 함량을 변경시킴으로써 충격파 에너지와 버블 에너지의 상대적인 비율을 조절하는 것이 일반적이다. 즉,

5) J. E. Shepherd, "Interface Effects in Underwater Explosions," AD-A201 814, December 1988.



〈그림 부록 II-1-11〉 화약의 수중폭발에 대한 알루미늄의 효과

충격파 에너지보다 버블 에너지가 더 유용한 수중무기체계의 탄두에 사용되는 화약들은 대부분 알루미늄 함유 화약(Aluminized explosives)들이다.

알루미늄이 함유된 CHNO 고성능 화약이 수중폭발하면 거의 순간적으로 C, H, N, O, Al의 성분들로 분해(Dissociation)되고, 이어서 수 Micro-second 내

에 알루미늄 산화물(Al_2O_3), H_2O , H_2 , CO , CO_2 , C(Graphite) 등을 생성하기 위한 발열반응(Exothermic chemical reaction)을 거치게 된다.

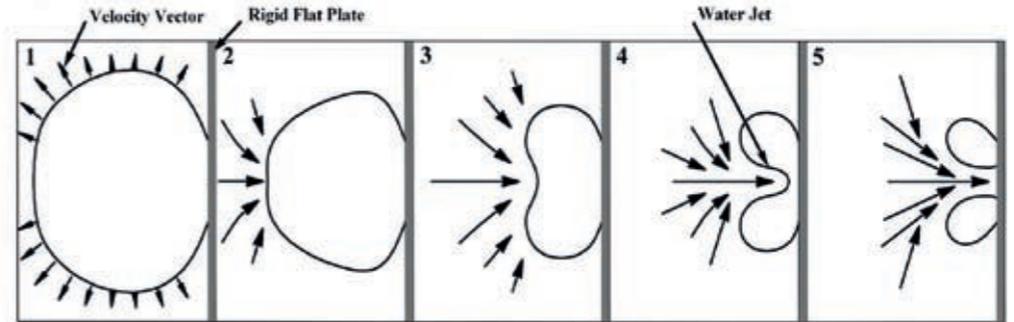
이들 고온·고압의 폭발 생성물들(Gaseous products)은 주위의 물을 방사방향으로 밀어내면서 버블을 형성하게 되고, 시간이 지남에 따라 버블은 팽창과 수축을 반복하게 된다.

2. 단단한 벽(Rigid wall)과 버블의 상호작용⁶⁾

수중폭발로 발생한 버블에 대한 상기 설명들은 경계조건(Boundary condition)이 무시되는 심해 수중폭발(Deep underwater explosion)에 대한 설명들이다. 만일 수중폭발 원점 근처에 해수면(Free surface), 해저면(Seabed surface) 또는 단단한 벽 등이 설치되어 있다면 버블의 거동(Behavior)은 달라진다. 〈그림 부록 II-2-1〉에서 볼 수 있듯이 단단한 벽 주위에 형성된 버블이 수축할 때, 벽이 물의 흐름을 방해하므로 물의 속도는 벽과 반대쪽에서 가장 크고 벽에 가까워짐에 따라 작아지게 된다. 그러므로 버블이 수축하면서 버블모양은 붕괴되고 벽쪽으로 강한 인력(Attraction)을 받게 되어 워터제트 현상이 벽 반대쪽에서 형성된다. 워터제트는 점점 발달하여 벽에 강한 제트 충격(Jet impact)을 가하게 된다. 워터제트 이후 수중에 남아 있는 버블은 도너츠 형태(Toroidal)로 변형된 후 점차 소멸하게 된다. 이러한 버블의 붕괴과

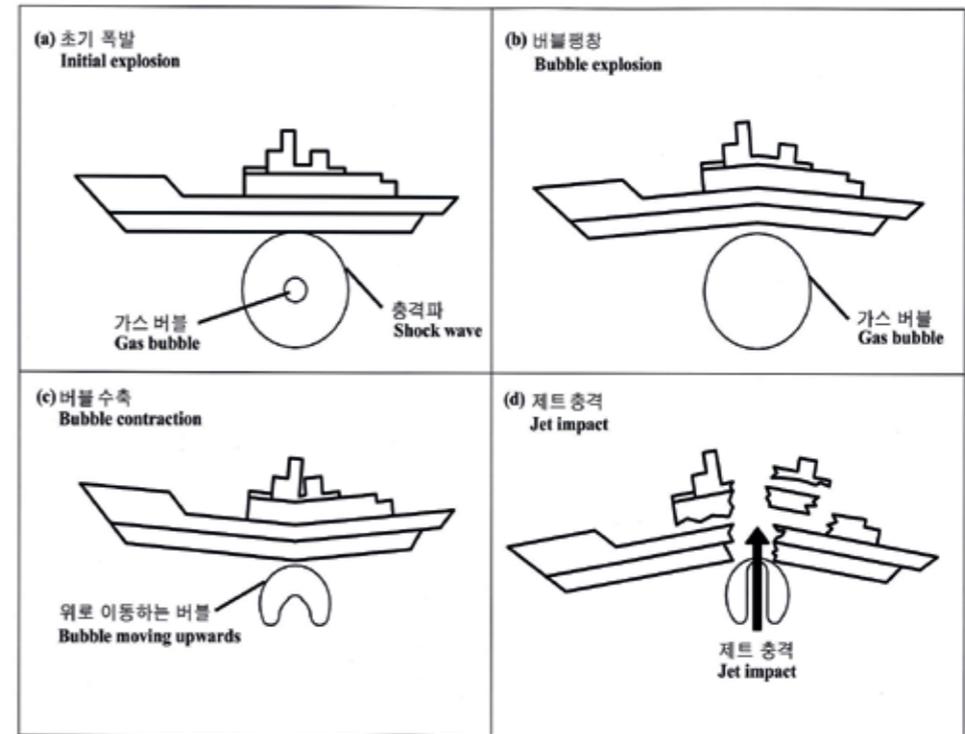
6) Julius W. Enig, "Underwater Explosion Bubble Dynamics," AD-A201 814, December 1988.

정은 버블의 크기, 버블주기, 벽과의 거리(Standoff from wall), 중력(Gravity) 그리고 벽과 버블의 상대적인 굴곡도(Relative curvature of plate and bubble) 등에 의해 큰 영향을 받게 된다.



〈그림 부록 II-2-1〉 버블 붕괴(Bubble collapse)

천안함 침몰에 대한 이해를 돕기 위해 선체 밑에서 화약이 폭발했을 때 발생된 버블의 파괴 효과를 〈그림 부록 II-2-2〉로 설명하고자 한다.



〈그림 부록 II-2-2〉 선체 밑에서 형성된 버블이 시간 경과에 따라 발생하는 물리적 현상

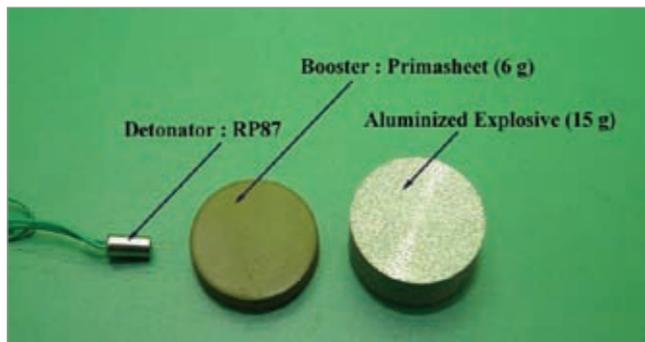
선체 밑에서 고성능 화약이 폭발함과 동시에 충격파는 매우 빠른 속도로 전파되어 선체에 충격을 주게 된다. 이러한 충격파의 초기 압력은 높지만 시간과 거리의 증가에 따라 매우 빨리 소멸되고, 구면파로 전파되기 때문에 실제적으로 선체에 가해지는 충격은 크지 않다. 이러한 전파특성 때문에 충격파가 선체에 주는 손상은 대부분 선체 내부의 전기 및 통신 시설의 오작동이나 가벼운 파손 정도로 알려져 있다.

충격과 발생 이후에 형성되는 버블은 충격파에 비해 상대적으로 압력이 작고 느리게 형성된다. 버블의 팽창으로 선체는 위쪽으로 힘을 받아 역V자 형태로 변형된다. 최대로 팽창된 버블은 다시 수축하면서 선체를 아래로 잡아당김으로써 선체에 V자 형태의 변형을 가하게 된다. 점점 버블이 수축하면서 그 형태가 붕괴되어 버블 하부에서 고속의 워터제트가 형성되기 시작한다.

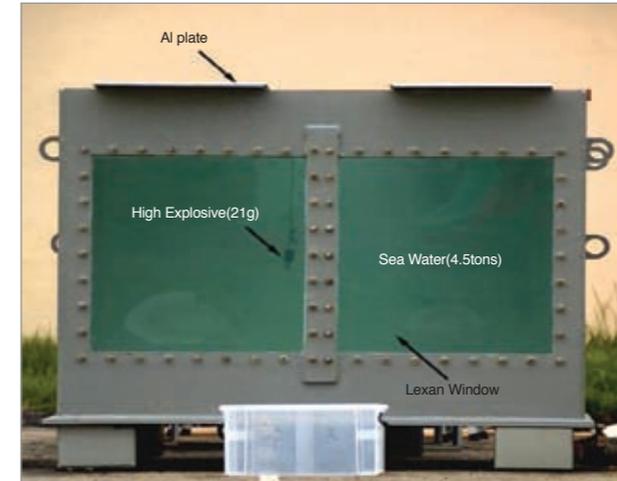
워터제트가 점점 성장하면서 선체는 강한 워터제트의 충격(Impact)을 받게 되어 결국 절단된다. 이와 같은 워터제트 충격은 충격파에 비해 매우 크기 때문에 오늘날 대부분의 국가들은 비접촉식 수중 무기체계에 알루미늄 함유 화약(Aluminized explosive)을 사용하고 있다.

3. 소형 수중폭발 시험

수중폭발의 이해를 용이하게 하고 천안함 절단부위 및 연돌 내부에 다량으로 흡착된 흰색 흡착물질의 성분을 분석하기 위해 소형 수조(2×1.5×1.5m)에 해수(4.5톤)를 충전한 후, <그림 부록 II-3-1>과 같은 알루미늄 함유 고성능 화약 15g, Booster 6g, RP87 기폭관(Detonator)을 결합하여 수중폭발 시험을 수행하였다. 흡착물질 획득을 위해 수조 상단에 알루미늄 판재를



<그림 부록 II-3-1> 수중폭발 시험에 사용된 폭발 계열



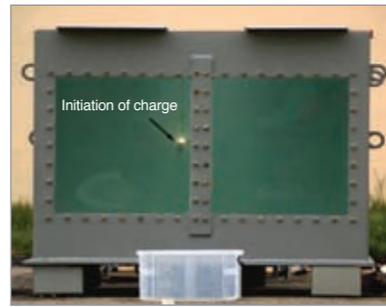
<그림 부록 II-3-2> 수중폭발용 소형 수조

를 이중으로 4장 설치하였으며, 워터제트에 의한 비산 방지를 위해 볼트로 알루미늄 판을 수조(Water tank)에 단단히 고정시켰다. 또한, 수중폭발 현상에 의한 버블의 거동을 고속 촬영하기 위해 2장의 투명한 광학창(Polycarbonate)을 <그림 부록 II-3-2>와 같이 설치하였고 고속 카메라의 촬영속도(Writing rate)를 5,000fps(Frames per second)로 설정하였다.

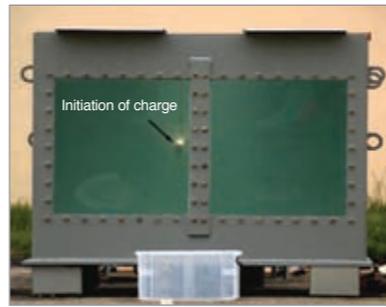
<그림 부록 II-3-3>은 수중폭발로 발생된 버블들의 시간에 따른 변화과정을 촬영한 영상들로 중요한 순간에 대한 몇몇 영상들만 선별하였다.

<그림 부록 II-3-3>의 (a)는 기폭 후 0.2ms에서 화약 폭발에 의해 발생된 발광을 보여주고 있으며, (b)는 기폭 후 1ms 지난 후에 충격파가 광학 창에 충격을 가해 시야가 방해받는 것을 보여 준다. (c)와 (d)는 고온·고압의 버블 내부에서의 열의 방출을 보여 주고 있다. 버블은 점점 팽창하여 광학 창에 압력을 가하게 되고, (e)에서와 같이 광학창의 파단이 시작된다. 우측 광학창의 파단현상은 버블이 최대로 팽창할 때까지 지속되며, 그 이후에는 (f)에서와 같이 버블수축이 시작된다.

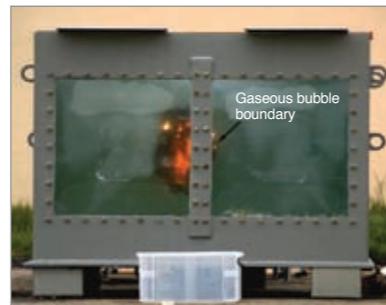
버블 수축이 진행됨에 따라 (g)에서와 같이 좌측창은 수축하는 버블 쪽으로 강한 인력을 받게 되어 (h)에서와 같이 완전히 파단된다. 이러한 소형 수조 시험으로부터 알루미늄 판재에 흡착된 흰색 흡착물질 <그림 부록 II-3-4>를 얻을 수 있었으며, 이들 물질들을 정밀분석하고 비교함으로써 천안함 침몰에 대한 중요한 단서를 찾게 되었다.



(a) 기폭 (Initiation of charge) : 0.2ms



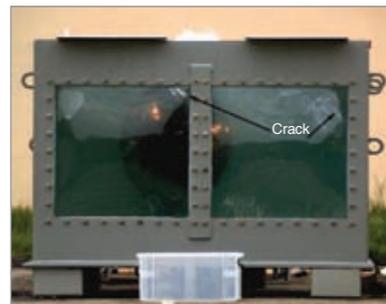
(b) 충격파 도달(Shockwave arrival) : 1.0ms



(c) 5.2ms



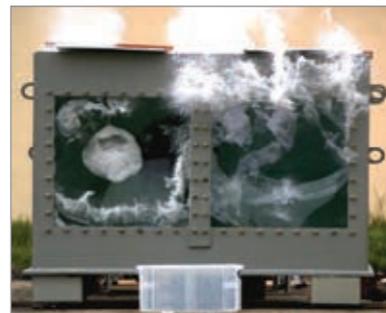
(d) 6.2ms



(e) 16.0ms



(f) 버블 수축(Bubble contraction) : 39.6ms

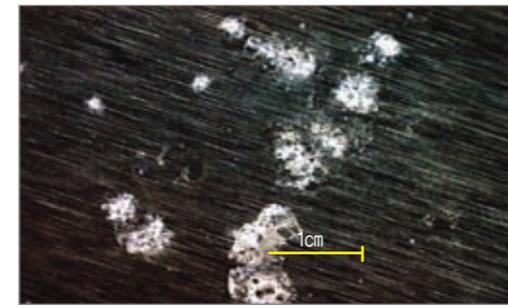


(g) 57.8ms



(h) 140.8ms

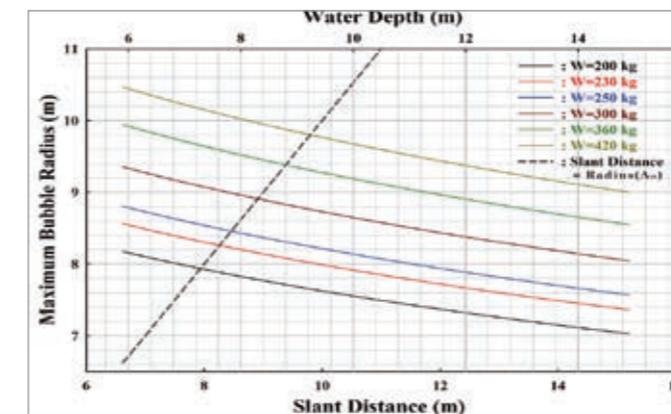
〈그림 부록 II-3-3〉 소형 수조 시험에서 고속촬영된 영상들(5,000 frames/sec)



〈그림 부록 II-3-4〉 소형 수조 수중폭발 시험으로부터 획득된 흰색 흡착물질

4. 최대의 버블효과를 보이는 조건

인양된 천안함 함수·함미의 절단부위를 정밀분석하고 어떤 무기체계가 수심 몇 미터에서 TNT 환산 몇 kg의 화약이 폭발하여 천안함을 침몰시켰는지를 알아내기 위해 수중폭발 현상 이론과 경험식들을 적용하였다. 〈그림 부록 II-4-1〉은 천안함이 버블 제트의 압력을 받아 절단되었다는 가정하에 선정된 폭발조건들이다. 버블 제트의 발생은 폭발지점 주위에 구조물이 존재할 때 발생되므로 버블의 최대반경(A_m)과 폭발 위치에서 용골까지의 거리가 거의 동일한 부근에서 강력한 버블 제트의 효과를 얻을 수 있게 된다. 따라서 화약량(200~360kg)과 수심(6~9m) 범위의 점선 부근에서 최대의 워터제트 효과를 얻게 된다.

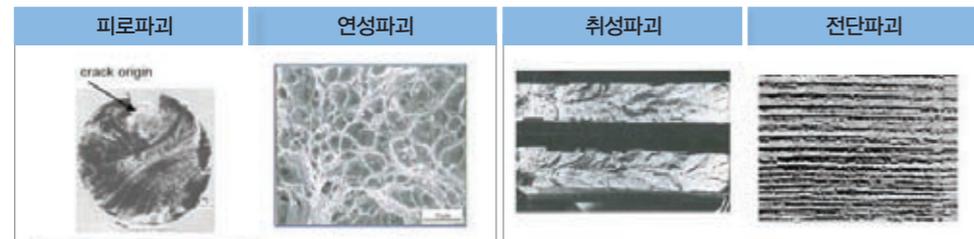


〈그림 부록 II-4-1〉 용골과 폭발 지점 사이의 거리(Slant distance) 변화에 따른 버블의 최대반경의 변화

예를 들면, 자유 해수면(Free sea surface)에 적용되는 (5)식에 TNT 250kg과 수심 6m를 적용하면 제트의 최대높이에 대한 예측치는 약 82m로 계산된다.

부록 Ⅲ_폭발방향 및 위치 판단 결과

폭발량에 따른 위력 분석을 위하여 우선적으로 힘의 작용점과 지향방향이 결정되어야 한다. 폭발 위치와 방향 설정을 위한 방법으로 가장 확실한 증거물인 선체의 절단면을 분석하였다. 절단면 분석은 절단면의 파괴형태를 관찰하여 표면 파형을 분석하고, 이로부터 절단면이 피로파괴, 연성파괴, 취성파괴 또는 전단파괴 중 어떤 형태를 취하고 있는가를 판단하며, 이를 근거로 힘의 작용점과 지향방향을 분석하게 된다.



〈그림 부록 Ⅲ-1〉 전형적인 파괴형태

피로파괴는 오랜 시간 반복적인 응력에 의해 생기는 변형으로 발생하며, 균열 시작점으로부터 해안선 형상(Beach mark)이 존재한다. 연성파괴는 응력이 비교적 천천히 작용하는 경우 큰 소성변형을 동반하여 발생하고, 절단면이 비교적 거칠고 많은 덩플이 존재한다. 취성파괴는 응력이 빨리 작용하는 경우 작은 소성변형 상태로 발생되며, 절단면은 비교적 매끄럽고, 갈매기 형상(Chevron mark)이 존재한다. 전단파괴는 매우 높은 응력상태가 전단(shear) 방향으로 급격히 작용하는 경우 발생하며, 갈매기 형상, 덩플, 해안선 형상 등의 특징이 없으며, 응력방향으로 파괴현상을 보인다.

1. 현장조사 및 시편 채집

4월 30일 1차 현장조사를 실시하여 함미 하부 절단면을 관찰하였고, 〈그림 부록 Ⅲ-1-1〉과

같이 함미 절단면 3군데 위치에서 약 15cm×15cm 크기로 시편을 채취하였다. 5월 4일에는 2차 현장조사를 실시하여 함미 하부 절단부위의 절단방향을 확인하고 함미 측면 절단부위의 절단면과 함수 하부 및 측면의 절단면을 관찰하였다. 그리고 5월 10일 3차 현장조사를 실시하여 함수 하부 및 측면의 절단방향을 확인하고, 함수 및 함미 주갑판의 절단면을 관찰하였다.

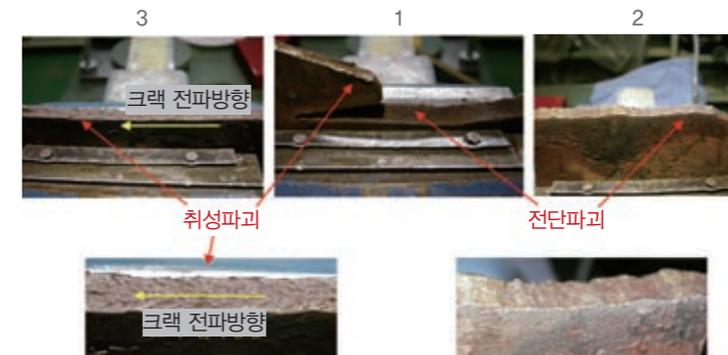


〈그림 부록 Ⅲ-1-1〉 절단면의 시편 채취 위치

2. 선체 절단부위 분석 결과

1) 절단면 파면형상 분석

채취한 시편의 절단면은 아래 〈그림 부록 Ⅲ-2-1〉에서 보는 바와 같이 모두 전단파괴와 취성파괴의 형상인 것으로 밝혀졌으며, 연성파괴와 피로파괴의 형상은 관찰되지 않았다. 2번 시편은 전단파괴의 형상을 보이고 있고, 3번 시편은 그림에서 보는 바와 같은 전형적인 취성파괴의 형상을 보인다. 반면 1번 시편은 전단파괴와 취성파괴가 혼재하고 있음을 확인할 수 있었다.



〈그림 부록 Ⅲ-2-1〉 절단면 파면 형상 분석

2) 파면 형상에 따른 절단방향 추정

5월 4일에 절단면에 대해 추가적으로 육안관찰을 하였으며, 그 결과 1번 시편과 2번 시편 사이의 절단면은 전부 전단파괴가 발생하였고, 1번 시편과 3번 시편 사이는 모두 취성파괴가 일어난 것을 확인할 수 있었다(〈그림 부록 III-2-2〉 참조).



〈그림 부록 III-2-2〉 함미 절단면의 파괴형태

따라서 함미 절단면 좌현 약 1/3 부분은 순간적인 외력에 의해서 일시에 전단파괴된 것으로 추정되며, 함미 절단면 하부 나머지 부분은 인장력에 의한 취성파괴가 발생하였고 균열 원점의 위치는 1번 시편 부위로 확인되었다.

결과적으로 〈그림 부록 III-2-3〉에서 보는 바와 같이 함미 절단면 중에서 충격이 가해진 것으로 추정되는 위치에 전단파괴(붉은색 표시)가 발생하였고, 전단파괴가 끝나는 부위부터



〈그림 부록 III-2-3〉 함미 절단면의 파괴형태 및 압력방향

우현방향으로 취성파괴(파란색 표시)가 발생했음을 확인할 수 있었다. 또한, 좌현 하부의 'ㄷ'자 형상으로 절단되어 위로 말려 올라간 부위도 관찰 결과 절단면의 3곳 모두 전단파괴의 형태를 보였다.

함수 절단면에 대해서도 육안관찰을 실시하였으며, 전반적인 형상은 함미 절단면과 유사하나 좌현의 충격 추정위치 부근에서 전단파괴와 취성파괴가 일부 혼재하였으며, 이는 내부 구조물들이 파괴형태에 복잡하게 작용한 결과로 추정된다.

3) 함수와 함미의 전체 절단방향 관찰 결과

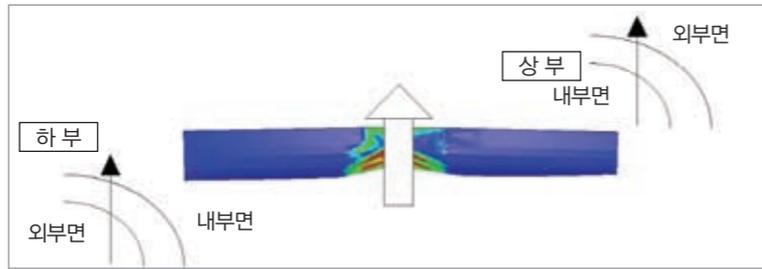
함수와 함미 모두 용골 하부에서 취성파괴의 형상을 보였으며 이를 제외한 나머지 부분은 전부 전단파괴 파면형상으로 관찰되었다. 취성파괴의 원점은 좌현 하부(시편 1의 위치) 부근으로 판단된다. 전단파괴가 일어난 함수와 함미 하부의 좌·우현 모두에서 절단면은 전반적으로 수직면 대비 경사각도를 보이고 있으며 방향은 모든 위치에서 〈그림 부록 III-2-4〉의 (좌)와 같이 선체의 내부면이 높고 외부면이 낮은 형상으로 관찰되었다.

전단파괴가 일어난 함수와 함미 상부의 주갑판 좌·우현 모두에서도 절단면은 전반적으로 수직면 대비 경사각도를 보이고 있으나 방향은 하부와는 반대로 모든 위치에서 〈그림 부록 III-2-4〉의 (우)와 같이 선체의 내부면이 낮고 외부면이 높은 형상으로 관찰되었다.

앞에서 설명한 경사 파단면 분포를 만들어낼 수 있는 상황은 〈그림 부록 III-2-5〉와 같이 절단부위가 상당한 곡면을 만들 정도로 소성변형이 일어난 후 외부로부터 한 방향의 강력한 힘(워터제트로 추정)에 의해 전단파괴가 발생한 것으로 분석할 수 있다.



〈그림 부록 III-2-4〉 선체 절단면 형태



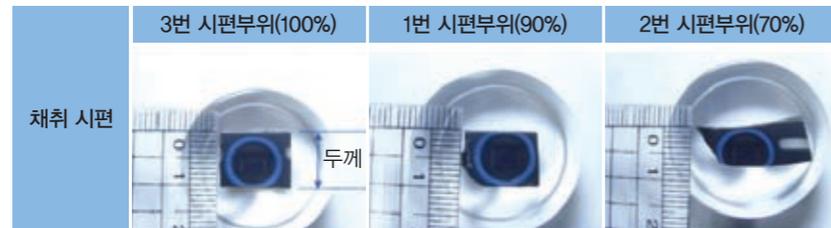
〈그림 부록 Ⅲ-2-5〉 선체 상·하부의 절단형태 분석

3. 채취 시편 미세조직 분석 결과

1) 두께 비교

채취한 각 시편의 두께를 측정한 결과, 아래 〈그림 부록 Ⅲ-3-1〉에서 보는 바와 같이 폭발원점에서 가까운 곳으로 추정되는 좌현의 2번 시편의 두께가 우현의 3번 시편보다 약 30% 정도 감소하였으며, 1번 시편은 3번 시편보다 약 10%의 두께 감소가 일어난 것으로 계측되었다.

이는 앞절에서 언급한 바와 같이 좌현 하부에서 절단이 일어나기 전에 상당히 큰 곡면의 소성변형이 발생하였다는 것을 확인시켜 준다.



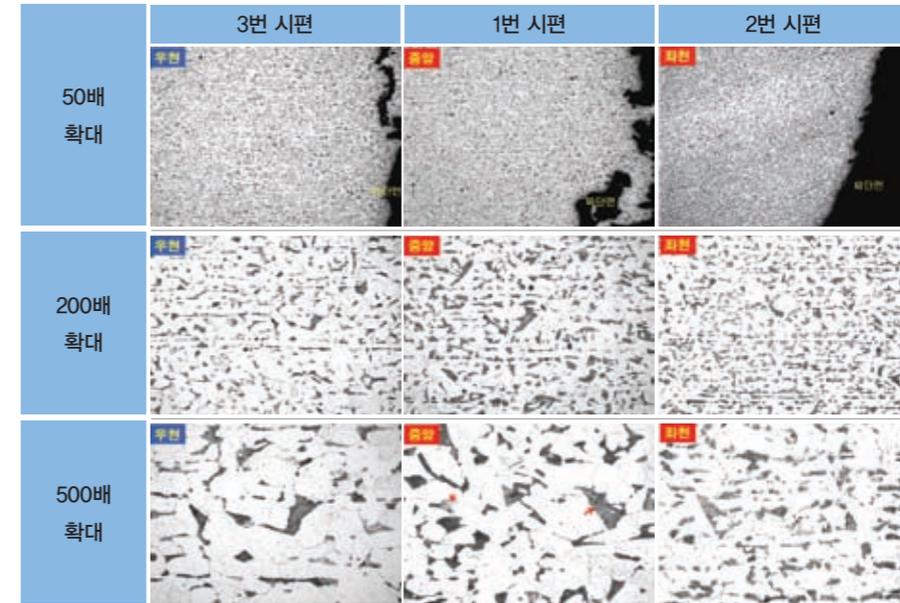
〈그림 부록 Ⅲ-3-1〉 채취 시편의 두께 측정 결과

2) 미세조직 비교

각 시편의 미세조직을 확대하여 관찰한 결과는 아래 〈그림 부록 Ⅲ-3-2〉에서 보는 바와 같다.

50배 확대 결과에서 모든 시편의 미세조직은 수평줄무늬의 압연조직⁷⁾을 가지나, 좌현

7) 회전하는 두 개의 롤러(roller) 사이에 금속재료를 넣어 압력에 의해 기존보다 결정입자가 치밀하게 형성된 금속조직.



〈그림 부록 Ⅲ-3-2〉 채취 시편의 미세조직

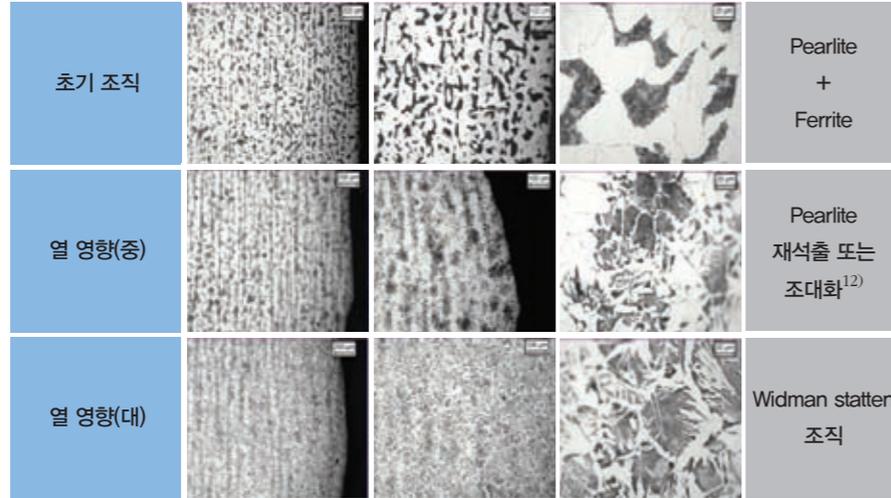
의 2번 시편의 미세조직은 약 30%의 두께 감소 및 길이방향의 늘어짐으로 인해 초기 압연조직보다 상대적으로 줄무늬 밀도가 높아짐을 확인할 수 있다.

200배 확대 결과에서도 좌현 2번 시편의 미세조직은 우현 3번 시편의 미세조직에 비해 초기 압연줄무늬⁸⁾가 서로 가까워지며 얇게 늘어짐을 보였으며, 전형적인 펄라이트-페라이트(Pearlite+Ferrite)⁹⁾ 미세조직임을 알 수 있다. 여기서 검은 부분이 Pearlite 조직이다. 만약 좌현에서 열변형이 있었을 경우 〈그림 부록 Ⅲ-3-3〉에서 보는 바와 같이 Pearlite 조대화로 인한 압연줄무늬합체가 관찰되어야 하나 이곳에서 이 현상은 관찰되지 않았다. 따라서 723℃ 이상의 열이력은 없었음을 확인할 수 있다. 이는 비접촉 외부폭발에 의한 파괴를 입증하는 근거가 될 수 있다.

500배 확대 결과에서도 좌현 2번 시편 위치 미세조직은 두께 감소 및 길이방향의 늘어짐으로 초기 미세조직보다 상대적으로 많은 소성변형을 받아 생긴 결정립 미세화¹⁰⁾가 관찰된다.

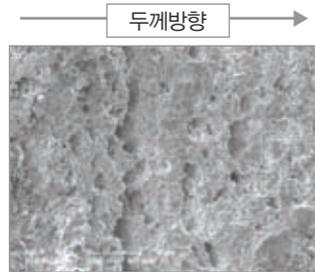
8) 압연과정에서 발생한 층상으로 배열된 무늬.
 9) 전형적인 펄라이트-페라이트(Pearlite-Ferrite) : 탄소함량이 약 0.25% 정도로 낮은 강철이 높은 온도에서 용융되었다가 냉각되어 고체화되는 과정에서 이루어진 미세구조의 형상.
 10) 결정립 미세화 : 특정 물체의 결정입자 크기가 외부적 압력 또는 열처리 등에 의해 작아지는 현상.

2번과 3번 시편의 마이크로 경도를 측정하여 비교한 결과 좌현의 2번 시편에서는 Hv=163, 우현의 3번 시편에서는 Hv=146의 경도가 나타났으며, 이는 좌현에서의 큰 변형경화(Strain hardening)¹¹⁾에 따라 경도값이 상승된 것으로 판단된다.



〈그림 부록 Ⅲ-3-3〉 열 영향에 의한 전형적인 미세조직 변화(예)

3) 절단면 미세조직 분석



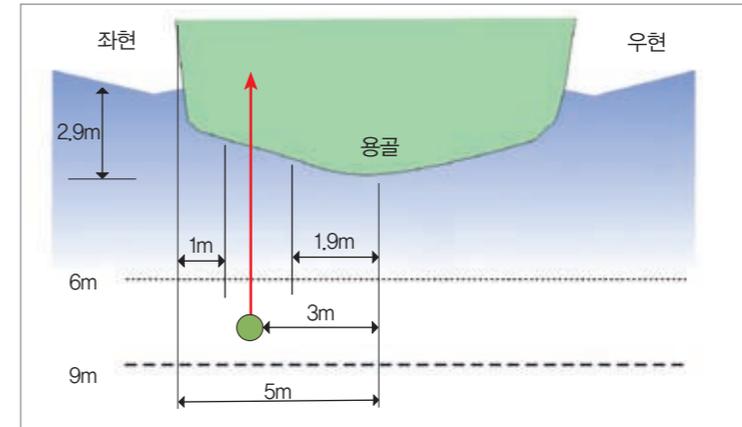
〈그림 부록 Ⅲ-3-4〉 절단면 미세조직

좌현 2번 시편의 미세조직을 확대하여 관찰한 결과, 〈그림 부록 Ⅲ-3-4〉에서 보는 바와 같이 두께에 수직방향으로 성장한 캐비티(Cavity)들이 다수 관찰되었으며, 이는 시편의 두께방향으로 강한 인장력이 작용하였다는 것을 말해 준다. 이 인장력은 두께방향으로 강한 충격이 작용할 경우 충격파와 충격 반대편 자유면에서의 희박파(Rarefaction wave)¹³⁾ 간의 상호작용으로 생기는 인장파의 영향으로 판단된다. 따라서 이는 좌현 하부에서의 강력한 충격작용을 입증하는 또 하나의 근거가 될 수 있다.

- 11) 금속을 가공·변형시켜 금속의 경도를 증가시키는 방법 또는 현상.
- 12) 재석출 : 특정 결정입자가 다시 생기는 현상, 조대화 : 기존 결정입자의 크기가 커지는 현상.
- 13) 충격파가 진행하다가 자유경계면을 만나 급격히 감소하면서 반대편으로 전파되는 현상.

4. 폭발 위치 및 방향 판단 결과

천안함의 절단면 분석 결과 좌현 하부로부터 큰 폭발력에 의해 먼저 상부 방향으로 큰 곡면의 합체 소성변형이 일어났으며(호킹 현상), 이후 워터제트로 추정되는 강력한 외력에 의해 전단파괴가 일어난 것으로 판단되었고, 절단이 시작된 위치는 용골의 좌현 1.9m 지점인 것으로 확인되었다. 따라서 좌현의 선폭 5m를 고려 시, 폭발은 용골 좌현 1.9~5m 사이에서 발생한 것으로 판단하였고, 선저 중 어뢰 피격 가능 범위는 용골 기준 1.9~4m의 중앙인 3m 지점으로 판단하였다(〈그림 부록 Ⅲ-4-1〉 참조).



〈그림 부록 Ⅲ-4-1〉 어뢰 폭발 가능 위치

부록 IV__폭약량 및 폭발 수심 판단 결과

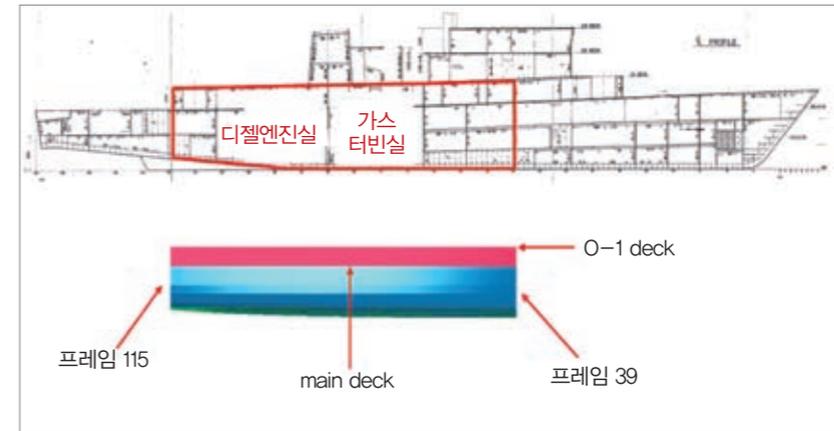
앞에서 실시한 절단면 분석에 따른 폭발 위치와 힘의 방향을 근거로 천안함 피격사건과 유사한 폭약량과 폭발 수심을 판단하기 위하여 시뮬레이션 분석을 하였다. 이 시뮬레이션 분석은 폭발유형분석분과에서 단순화된 모델(국소부위, 단순화된 선체 적용)을 활용하여 짧은 시간내에 가능한 폭발 유형의 범위를 도출하였고, 이 결과를 토대로 선체구조 분석팀에서는 함 전체를 대상으로 상세한 분석을 하였으며, 여기서는 단순화된 분석 결과를 제시하였다.

1. 해석 영역

정확한 분석을 위해서는 천안함 전체를 해석 영역으로 하여야 하나, 가능한 빠른 시간내에 폭발 유형 범위에 대한 예측을 해야 했고, 천안함에 작용한 모든 하중(충격파, 버블 압력, 워터 제트, 휘핑 효과 등)을 고려한 시뮬레이션은 선체 구조 분야의 연구 내용에 포함되어 있었기 때문에 본 시뮬레이션에서는 천안함 유실 부분인 가스터빈실을 중심으로 일부 영역에 대한 국소파괴(Local damage) 현상을 분석하여 파괴 가능한 폭발유형범위(화약량, 폭발 위치 및 범위)를 도출하였다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 정밀한 휘핑 효과(Whipping effect)는 고려되지 않았고, 형상 모델링도 가스터빈실 및 디젤엔진실을 포함한 천안함의 프레임 39부터 프레임 115까지(45.6m)의 영역으로 한정하였다(〈그림 부록 IV-1-1〉 참조).

해석에 사용된 코드는 미국에서 개발된 상용코드인 LS-DYNA™ 코드로서, 현재 국내를 비롯하여 미국, 일본, 중국 및 EU 국가의 많은 정부 산하 연구소와 민간 연구소에서 충돌, 폭발 등 고압유체 현상 해석에 널리 사용하고 있으며, 해석 결과의 신뢰성이 입증된 코드이다. 국내 연구소에서도 다양한 탄두·탄약 설계 및 성능 예측을 위하여 LS-DYNA™ 코드를 사용하고 있다.

시뮬레이션 분석을 위해서는 해석 영역에 대한 형상 모델링 작업이 우선되어야 한다. 이러한 형상 모델링 작업은 많은 시간이 요구되는데 이는 작업 자체가 시간이 많이 소요되는 작

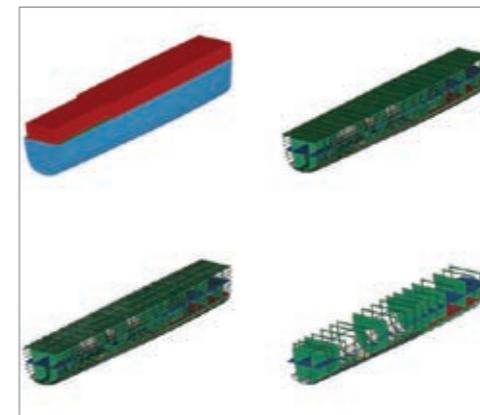


〈그림 부록 IV-1-1〉 폭발유형 분석을 위한 시뮬레이션 범위

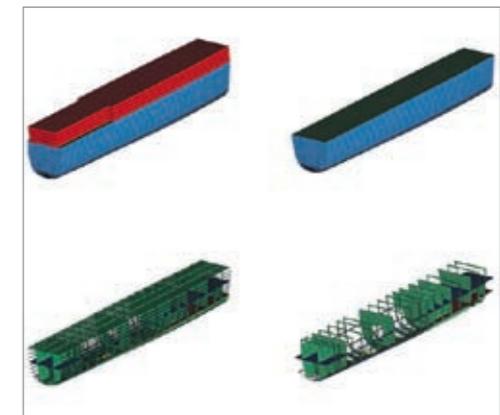
업일 뿐만 아니라, 계산과정에서 오차나 결과의 부정확성 등으로 인하여 중간에 수차례의 형상 모델링 수정작업을 하여야 하기 때문이다.

〈그림 부록 IV-1-2〉는 천안함의 프레임 39부터 프레임 115까지(45.6m)의 영역에 대한 모델링 형상이며, 〈그림 부록 IV-1-3〉은 수치해석이 가능하도록 모델링 형상에 선체 형상과 위치에 따라 300×300mm 기준으로 메쉬(격자)를 입힌 형상이고 적용 모델러(Modeller)는 널리 이용되고 있는 I-DEAS™ 코드를 사용하였다.

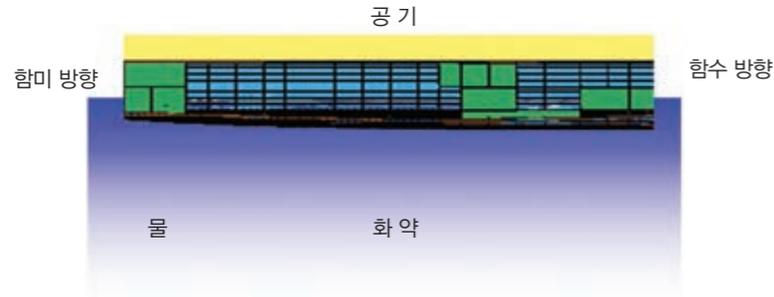
천안함에 대한 형상을 모델링한 후, 여기에 물, 공기, 화약을 추가하여 시뮬레이션이 가능한 초기 해석 형상을 완성하였다. 〈그림 부록 IV-1-4〉의 완성된 해석 형상은 약 120만 개의 계산 요소들로 구성되었다.



〈그림 부록 IV-1-2〉 모델링 형상



〈그림 부록 IV-1-3〉 메쉬 형상



〈그림 부록 IV-1-4〉 초기 해석 형상

2. 해석 조건

천안함 피격사건에 사용된 폭발유형 도출을 위하여 미국팀의 시뮬레이션 결과와 절단면 분석 결과, 그리고 사용되었을 개연성이 높은 적성 무기체계 분석 등을 통하여 해석 조건을 산출하였다. 이 결과 폭약량은 TNT 기준 45~500kg으로 설정하였고, 수심은 무기체계의 감지능력과 비접촉폭발을 고려하여 6~13m로 설정하였으며, 폭발지점의 횡(좌우) 위치는 절단면 분석 결과를 통하여 가스터빈실 중앙에서 좌현 3m로 설정하였다. 폭발지점의 종(전후) 위치는 가스터빈의 정중앙에서 함수쪽으로 2.4m 치우친 프레임 71과 가스터빈의 정중앙인 프레임 75를 선정하였다. 프레임 71을 선정한 이유는 실제 가스터빈실의 함수부 절단면 격벽과 용골부위 변형이 함미부보다 크게 발생하였기 때문이다. 프레임 75를 선정한 이유는 가스터빈실 변형을 가장 크게 일으키는 위치에서 계산함으로써 실제 현상보다 변형을 덜 일으키는 낮은 폭약량의 폭발유형을 배제시켜야 하기 때문이다. 해석은 프레임 75의 위치부터 수행하여 가능한 폭발유형을 도출한 뒤, 이를 프레임 71 위치에서 추가 계산하였으며 두 결과를 비교 분석하여 최종 폭발유형 범위를 도출하였다. 〈표 부록 IV-2-1〉은 선정된 해석 조건을 나타낸다.

시뮬레이션 결과의 검증을 위하여 첫째, 모델별 시뮬레이션을 수행하기 이전에 수중폭발 시 폭발원점으로부터의 거리별 충격파 압력을 시뮬레이션하여 이미 알려진 경험식과 비교하였으며 〈표 부록 IV-2-2〉는 그 결과값을 나타낸다. 표에서 보는 바와 같이 계산값과 경험식 값이 5% 이하 오차로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

둘째, 시뮬레이션 결과에서 나타나는 버블 거동 현상을 〈그림 부록 II-1-1〉에 나타난 실제 현상과 비교하여 결과의 신뢰성을 확보하였다. 〈그림 부록 IV-2-1〉은 두 현상을 비교한 것이다.

폭약량(Kg, TNT 기준)	프레임 위치	수심(m)
45	75	6
200	75	6, 7, 8
250	75	6, 7, 8, 9, 12
300	75, 71	6, 7, 8, 9, 11
360	75, 71	6, 7, 8, 9, 11
420	75, 71	6, 9, 12
500	75, 71	10, 11, 12, 13

〈표 부록 IV-2-1〉 해석 조건(좌현 3m)

폭약량(kg, TNT)	계측반경(m)	경험값(Mpa)	계산값(MPa)	오차(%)
250	3	130.14	135.39	4.0
	6	50.25	52.97	5.4
	9	31.66	33.20	4.9

〈표 부록 IV-2-2〉 충격파 압력 비교

버블 거동	실제 현상	시뮬레이션
초기폭발	 가스 버블 Gas bubble 충격파 Shock wave	
버블 팽창	 가스 버블 Gas bubble	
버블 수축	 위로 이동하는 버블 Bubble moving upwards	
제트 충격	 제트 충격 Jet impact	

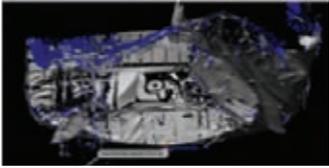
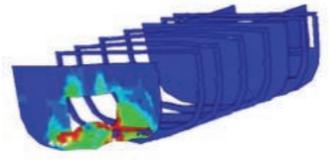
〈그림 부록 IV-2-1〉 버블 거동 현상 비교

3. 비교 요소 선정

시뮬레이션 결과 중에서 3가지 기준을 선정하고 이를 모두 만족하는 폭발유형을 후보군으로 선정하였다.

가스터빈실 선체 하부의 파괴범위가 선저 좌우에 모두 나타나고, 선저 좌우의 파괴범위 양 쪽이 서로 연결되는 결과를 기준으로 선정하였다. 이는 실물에서 가스터빈실이 모두 유실되었기 때문이다.

본 시뮬레이션 모델은 선체 전부가 모델링된 것이 아닐 뿐더러, 내부 중량물도 모델링되지 않았기 때문에 실물보다 변형이 더 크게 계산될 것이다. 따라서 선체의 측면방향으로 구조물이 많이 배치되어 있는 함미부에서의 용골의 변형을 기준값으로 선정하였다. 실제로 함미 절단면 격벽에서 함미쪽 방향으로 위치한 용골변형은 함수부에 비해서 크지 않았다. 용골변형 기준값으로는 용골변형 길이(실 변형치 : 3,580mm)를 선정하였다. 용골변형 길이는 <그림 부록 IV-3-1>의 ③과 같이 선정했으며, 각 폭발유형에 대한 시뮬레이션 결과에서 실물대비 1~1.2배를 선정조건으로 정하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 모델링 단순화로 인하여 실물보다 변형이 더 크게 계산되는 것을 고려한 것이다.

요소	실물	시뮬레이션 '예'
① 선체 하부 파괴범위		
② 함미 절단면 격벽의 변형과 파단형상		
③ 함미 절단면 격벽의 용골변형 길이	 함미 용골변형 길이 : 함미 절단면 격벽 용골로부터 함미부 용골 최저점까지의 거리(3,580mm)	

<그림 부록 IV-3-1> 비교 요소

마지막으로 함미 절단면 격벽의 변형과 파단형상을 기준으로 선정하였다. <그림 부록 IV-3-1>은 3가지 기준요소를 나타낸다.

4. 해석 결과

시뮬레이션 결과와 실물파손을 비교 분석한 결과 프레임 75, 좌현 3m에서 폭발이 발생하는 경우, TNT 폭약량 230kg 이하의 폭발유형은 가능성이 희박한 것으로 판단되었다. 250kg TNT 폭약량에 대한 해석 결과 수심 6m인 경우를 제한적으로 가능한 폭발유형으로 선정하였으며, 300kg TNT 폭약량에 대한 해석 결과 수심 7m인 경우를 가능한 폭발유형으로 선정하였다. 프레임 71과 프레임 75 위치에 대해서 좌현 3m, 360kg TNT 폭약량에 대한 해석 결과 프레임 75에서 수심 7~9m인 경우 가능 폭발유형으로 선정하였다.

따라서 절단면 분석에서 결정된 폭발 위치 범위인 좌현 3m를 적용하고, 다양한 폭약량과 수심(6~13m)을 적용한 시뮬레이션 해석과 천안함 파괴현상을 비교 분석한 결과 실제 현상과 유사한 파단현상을 일으키는 폭발유형은 <표 부록 IV-4-1>과 같이 도출되었다.

폭약량(TNT, kg)	수심(m)
250	6
300	7
360	7
	8
	9

<표 부록 IV-4-1> 시뮬레이션 결과

부록 V_흡착물질 분석 결과

지금까지는 폭발유형 분석을 위해 가능한 폭약량과 폭발 위치를 판단하였으며, 여기서는 이러한 폭발에 사용된 무기체계를 확인하기 위하여 천안함 선체에 다량 흡착된 물질의 성분을 분석하였다.

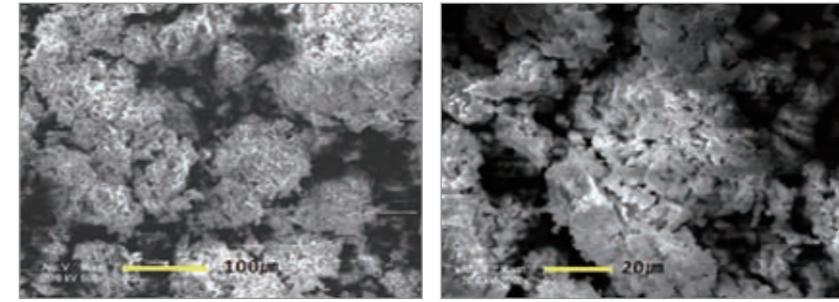
인양된 천안함 함미가 해군 2함대 사령부(평택)에 도착 후 4월 18일 최초로 육안관찰을 하였고, 함미의 절단부분을 관찰하다가 좌현 상부 갑판 위치의 구겨진 알루미늄 판재에 하얀 분말 덩어리가 가득 붙어 있는 것을 발견하였다. 또한 파단면의 상부 갑판에는 파단부위를 중심으로 다량의 흰색 분말이 흡착되어 있었으며, 함미 외부 벽면에도 흡착물이 관찰되었다. 이러한 흡착물은 알루미늄 판재뿐만 아니라 비알루미늄 성분인 전원 케이블에서도 발견되었다. 흡착물질에 대한 분석은 5차례에 걸쳐 실시되었는데 1차는 최초 육안관찰 시 발견된 흰색 분말의 특성을 개략적으로 파악하기 위한 것이었으며, 2차 및 3차는 함미 및 함수 흡착물에 대한 정밀분석, 4차는 인양된 어뢰 추진동력장치(결정적 증거물) 흡착물의 성분이 함미 및 함수 흡착물과 동일한지를 확인하기 위한 정밀분석, 그리고 최종 5차는 천안함에서 발견된 흡착물이 알루미늄 첨가 수중폭약의 폭발재임을 확인하기 위하여 소규모 수중폭약의 폭발시험 후 얻은 흡착물을 분석하는 방식으로 진행하였다.

1. 1차 분석

성분 분석에는 SEM(Scanning electron microscope ; 주사 전자현미경, Philips사의 모델 XL30), EDS(Energy dispersive spectroscope ; 에너지 분광기, Philips사의 모델 EDAX) 및 XRD(X-ray diffraction ; X선 회절기, Brukers사의 모델 D8 Discover)을 사용하였다.

전자현미경을 통한 SEM 분석 결과 관찰된 흡착물질의 형상은 <그림 부록 V-1-1>과 같으며, 미세입자들이 마치 용융되어 뭉쳐져 있는 모습이다.

EDS 분석 시 전자 빔(Beam)을 쬐면 원자의 전자가 튀어 나가면서 전자의 궤도위치 변환이

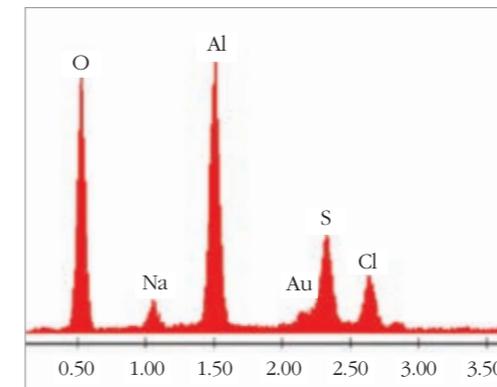


<그림 부록 V-1-1> 전자현미경 사진

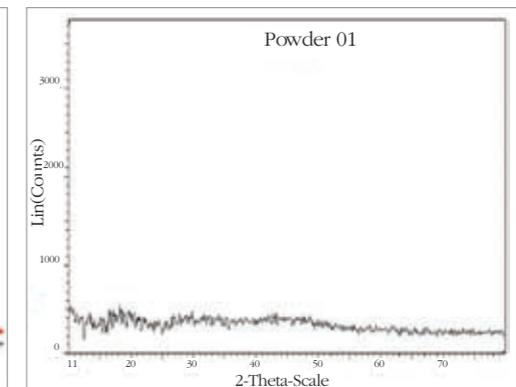
일어나게 되는데 이때 에너지가 방출된다. 방출 에너지는 각 원자마다 다르게 나타나기 때문에 이러한 원리를 이용하여 물질을 구성하는 원자를 판별할 수 있다. <그림 부록 V-1-2>에 제시한 바와 같이 에너지 분광기 분석을 통하여 흡착물질은 산소, 나트륨, 알루미늄, 황, 염소 등의 원소성분으로 구성되어 있음을 알 수 있었다(시료에 금을 도금하여 분석하기 때문에 금 성분도 함께 검출됨). 이들 원소성분을 고려하면, 흡착물질을 구성하는 물질은 알루미늄 산화물(Al_2O_3)과 소금($NaCl$) 그리고 황 또는 황 화합물 등인 것으로 분석된다.

XRD 회절 분석 시 결정에 X선을 조사하면 결정 중 각각의 원자에 의하여 산란된 X선이 서로 간섭하여 X선이 단색일 경우 특정방향에 강한 회절 X선이 생긴다. X선 회절피크¹⁴⁾는 결정격자의 면간 거리, 즉 단위 cell의 크기에 의존한다. 따라서 각 결정마다 각자 고유한 X선 회절피크를 가지며 비결정은 X선 회절피크를 갖지 않는다.

흡착물질의 X선 회절피크를 나타낸 <그림 부록 V-1-3>을 보면, X선 회절피크가 관찰되



<그림 부록 V-1-2> 에너지 분광기 분석



<그림 부록 V-1-3> X선 회절 분석

14) X선이 특정 물체에 투사 후 그 결정에 의해 산란될 때 공간의 여러 특정 각도에서 보강간섭을 나타내는 현상.

지 않으므로 흡착물질에는 결정질이 존재하지 않음을 알 수 있다.

전자현미경, 에너지 분광, X선 회절 등의 분석 결과를 종합하면, 흡착물질은 미세입자가 응집되어 있는 상태이며, 주성분은 비결정성의 알루미늄 산화물이고, 그 외 소량의 황 또는 황화합물과 소금으로 구성되어 있다.

일반적으로 순수한 알루미늄은 매우 짧은 시간내에 산화되어 표면이 매우 얇은 두께(수 nm)의 비결정성 산화알루미늄의 막으로 덮이게 된다. 이 비결정성 산화알루미늄 막은 매우 치밀하여 산소가 투과하지 못하므로 더 이상의 산화반응이 진행되기 어렵다. 그러나 오랜 시간 동안 수분, 염기, 산 등에 노출되면 산화반응이 진행되어 백화현상을 보이게 되는데 이 부식물의 주성분은 수산화알루미늄($Al(OH)_3$, Bayerite)을 비롯하여 보에마이트($AlO(OH)$, Boehmite), 산화알루미늄(Al_2O_3) 등으로 구성되며, 이들은 비결정성이기보다는 결정성을 나타낸다. 그러나 천안함 함미에서 발견된 백색의 흡착물질은 비결정 알루미늄 산화물로서 자연 상태에서 부식되어 생성된 백색의 알루미늄 산화물이 아닌 것으로 분석되었다.

2. 2차 분석(함미 흡착물)

1차 분석 결과를 토대로 흡착물질에 대한 상세한 성분을 분석하기 위하여 4월 22일 함미 5개소에서 흡착물질을 채집하였다. 채집부위는 흡착물질이 많이 발견된 중앙 파단부위를 중심으로 흡착물질이 붙어 있는 표면의 재질(알루미늄과 비알루미늄)을 구분하여 선택하였으며, 중앙 파단부위에서 멀리 떨어져 있는 76mm 함포의 포신도 포함하였다.

시료번호	채취 장소	표면 재질
1	사병식당 주방 알루미늄 앵글	알루미늄 합금
2	사병식당 주방 정수기 벽면	알루미늄 합금
3	사병식당 주방 배전반 망사케이블	비알루미늄 합금
4	사병식당 주방 상부 망사케이블	비알루미늄 합금
5	76mm 함포 포신	철

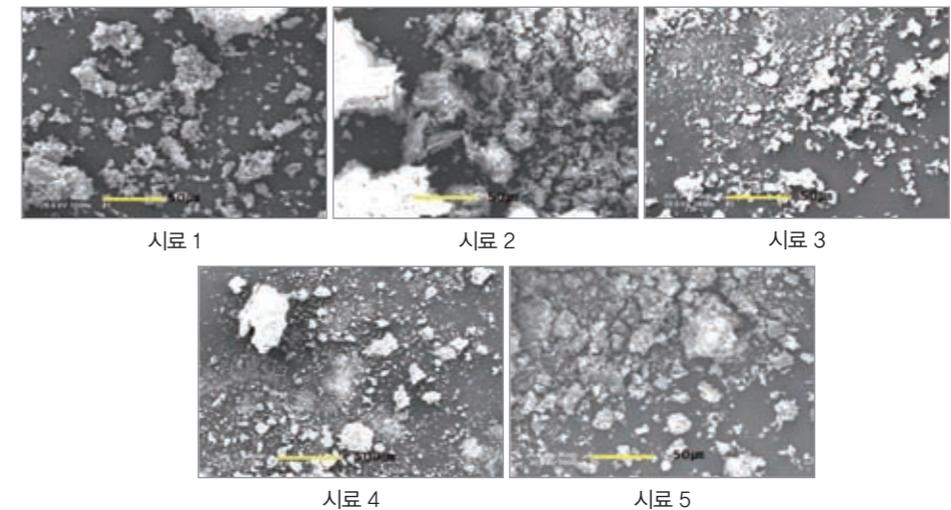
〈표 부록 V-2-1〉 흡착물질의 채집 부위

성분 분석에는 예비실험에 사용되었던 분석장비 외에 CHNS-EA(CHNS¹⁵⁾-Elemental analyzer, 원소분석기, Thermo사의 모델 EA1112)와 TGA(Thermal gravity analyzer, 열분해 특성 분석기, Mettler사의 모델 TA30)를 추가로 사용하였다.

SEM 분석 결과 채집된 흡착물질의 형상은 1차 분석에서 관찰된 바와 같이 미세입자들이 뭉쳐져 있는 모습(〈그림 부록 V-2-2〉 참조)이었으며, EDS 정밀분석 시 낮은 원자량의 원소를 검출하기 위하여 검출영역을 넓혀 본 결과 탄소성분까지 검출되었다.



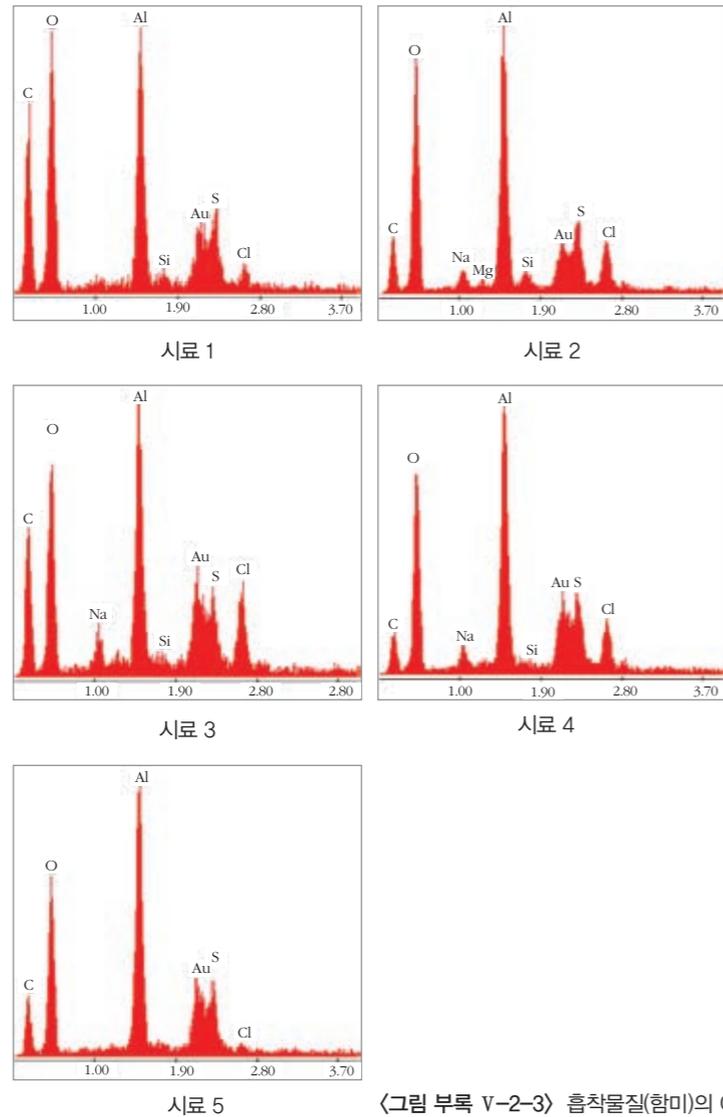
〈그림 부록 V-2-1〉 흡착물질 채취 장소



〈그림 부록 V-2-2〉 흡착물질(함미)의 전자현미경 사진

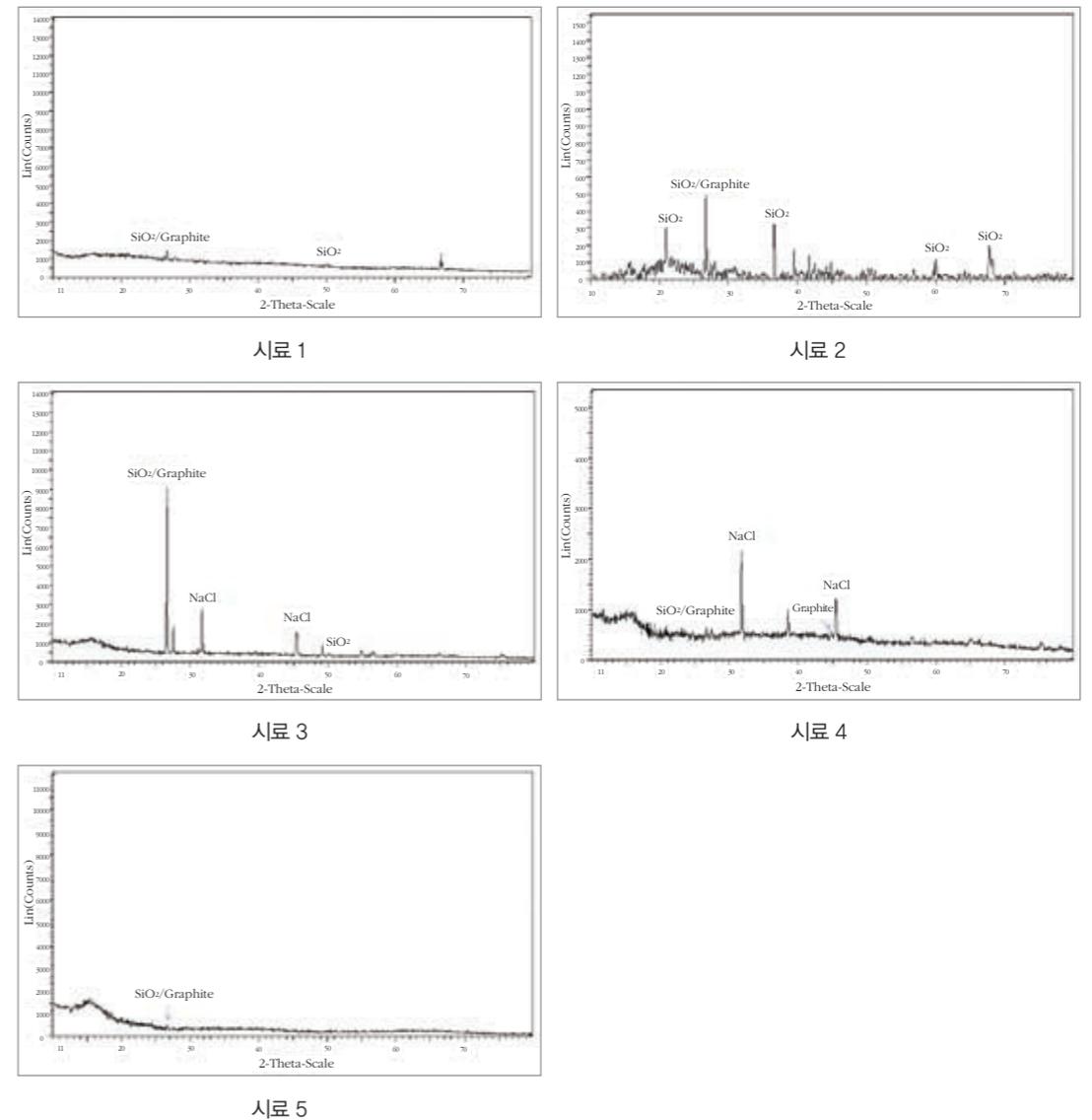
15) CHNS : Carbon Hydrogen Nitrogen Sulfur(탄소, 수소, 질소, 황).

〈그림 부록 V-2-3〉에서 보는 바와 같이 모든 시료는 탄소, 산소, 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 규소, 황, 염소 등의 원소성분으로 구성되어 있음을 알 수 있었고, 이 결과는 1차 분석 결과와 동일하였다. 이들 원소성분을 고려하면, 흡착물질은 알루미늄 산화물(Al_xO_y)과 염 ($NaCl$, $MgCl_2$ 등) 그리고 황 또는 황화합물 등으로 구성되어 있다.



〈그림 부록 V-2-3〉 흡착물질(함미)의 에너지 분광 분석

XRD 분석 결과에서는 규소(SiO_2), 흑연, 소금($NaCl$) 등의 결정이 검출되었으며, 규소와 흑연은 피크위치가 동일하게 겹쳐져 구분하기 어려우나 44.5° 회절각도에서는 흑연 피크가



〈그림 부록 V-2-4〉 흡착물질(함미)의 X선 회절 분석

독립적으로 미약하게 나타나므로 이를 검출하여 흑연의 존재를 확인할 수 있었다(〈그림 부록 V-2-4〉 4번 참조).

EDS 분석 결과에 따르면, 흡착물질의 주성분은 알루미늄 산화물이나, XRD 분석 결과 알루미늄 산화물은 비결정성 물질인 것으로 확인되었다.

CHNS 원소 분석(흡착물질 내의 가연성 원소를 분석) 결과 질소는 검출되지 않았고 탄소, 수

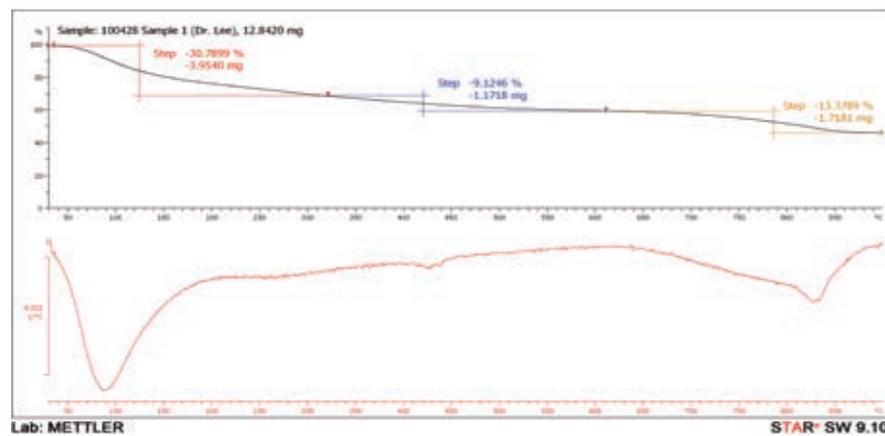
소, 황 등이 각각 0.64~3.00wt.%¹⁶⁾, 3.42~5.25wt.%, 4.40~8.63wt.%의 범위 내에서 검출되었다(〈표 부록 V-2-2〉 참조). EDS 분석 결과와 비교하면 흡착물질은 비가연성 원소인 알루미늄과 가연성 원소인 탄소, 수소, 황으로 구성된 물질이며, 그 중 수소는 수분에서 유래된 것으로 보여진다.

Sample name	Nitrogen(%)	Carbon(%)	Hydrogen(%)	Sulfur(%)
흡착물(1차) 1	0.01 이하	0.64	4.45	5.21
흡착물(1차) 2	0.01 이하	1.15	3.42	4.40
흡착물(1차) 3	0.01 이하	3.00	4.56	4.87
흡착물(1차) 4	0.01 이하	1.69	5.25	8.63

〈표 부록 V-2-2〉 CHNS 원소 분석 결과

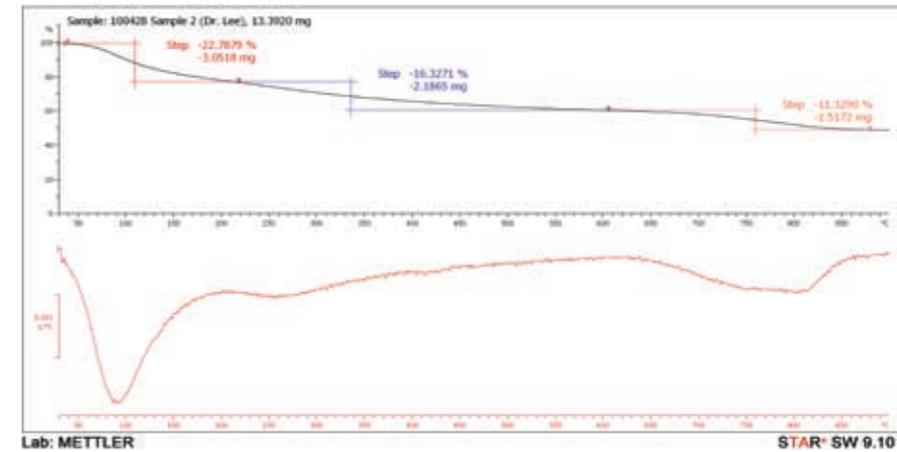
TGA 열분해 특성 분석 시 흡착물질의 분석 조건은 온도 범위를 30~900℃, 승온속도를 10℃/min로 하였다. 시료 5번의 경우 시료 양이 부족하여 열분해 실험을 실시하지 못하였다.

열분해 특성 분석 결과 초기 100℃를 중심으로 30~200℃ 부근에서 20% 정도의 수분이 증발하고 200~600℃의 온도 구간에서 20% 정도의 수분이 서서히 증발되며 이후 탄소 및 황 성분이 산화되어 사라지는 것으로 확인되었다(〈그림 부록 V-2-5〉 참조). 열분해 특성에 대한 자세한 분석 결과는 뒷부분에서 언급하였다.

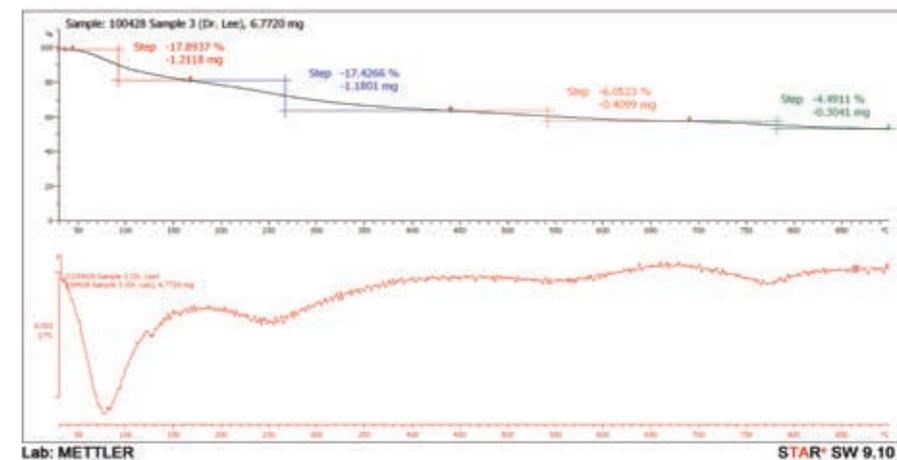


시료 1

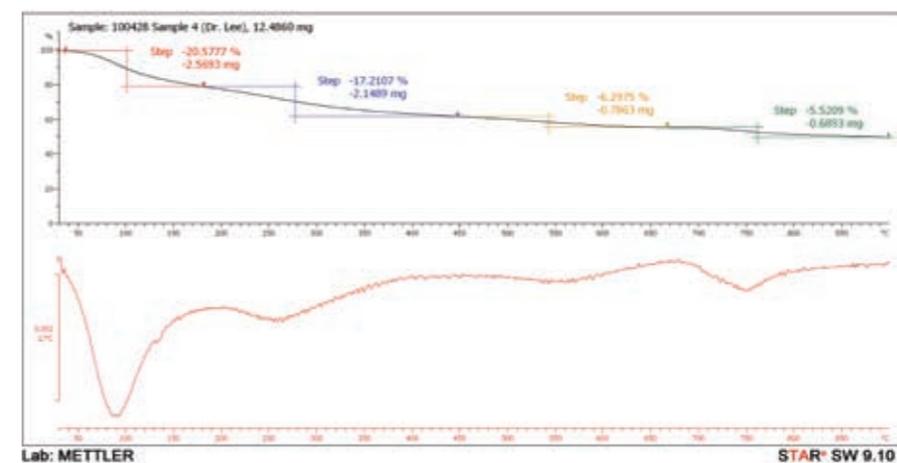
16) wt.% : weight%(무게 %).



시료 2



시료 3



시료 4

〈그림 부록 V-2-5〉 열분해 특성 분석 결과(함미)

함미에서 발견된 흰색 분말의 흡착물질을 분석한 결과, 1차 분석 결과와 동일하게 흡착물질은 미세입자가 응집되어 있는 상태이며, 주성분 물질은 비결정성의 알루미늄 산화물이고, 그 외 소량의 황 또는 황화합물과 소금과 규사로 구성되어 있는 혼합물질로 분석되었다. 이들 각 성분의 혼합비는 <표 부록 V-2-3>과 같다. 여기서 수분함량은 CHNS 원소 분석 결과로부터 얻은 수소함량을 이용하여 산출하였다.

구성성분	함량(무게비%)	비고
Al ₂ O ₃	36.4~55.1	소량의 규사 포함
수분	30.8~47.3	
황	4.4~8.6	
탄소	0.6~3.0	일부 흑연
소금	3.7~10.3	

<표 부록 V-2-3> 흡착물질의 구성성분 및 함량비

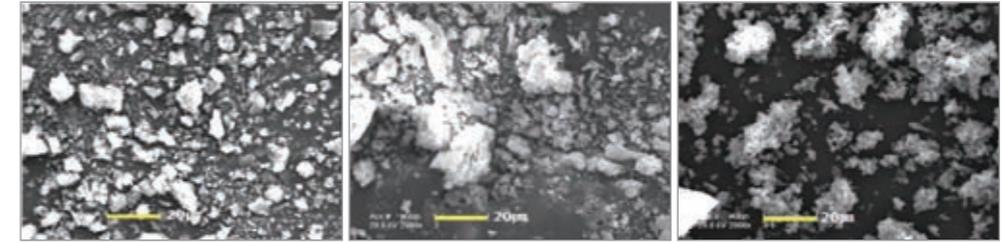
3. 3차 분석(함수 및 연돌 흡착물)

4월 30일 함수 육안검사 결과 동일한 유형의 흡착물질을 발견하였으며, 특히 연돌의 내벽 및 외벽에도 엄청난 양의 흰색 분말이 흡착되어 있었다. 이 흡착물질을 함미의 흡착물질과 성분을 비교하기 위하여 <표 부록 V-3-1>과 같이 함수 2곳(감판 좌현 출입문 내측 및 76mm 함포 포신)과 연돌 1곳에서 시료를 채집하였다.

시료번호	채취 장소	표면 재질
1	76mm 함포 포신	철
2	좌현 출입구 입구	알루미늄 합금
3	연돌	알루미늄 합금

<표 부록 V-3-1> 흡착물질(함수 및 연돌)의 채집 부위

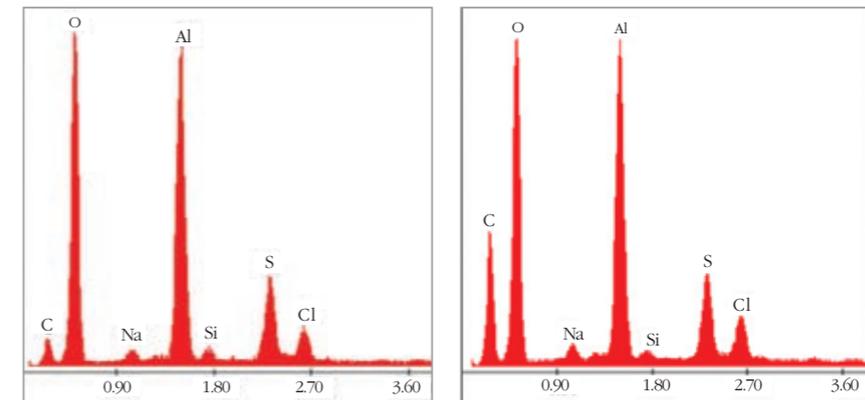
성분 분석에는 1차 분석에 사용되었던 분석장비를 동일하게 사용하였으며, SEM 분석 결과 채집된 흡착물질의 형상은 앞서 분석된 함미의 흡착물질과 유사하였다(<그림 부록 V-3-1>참조).



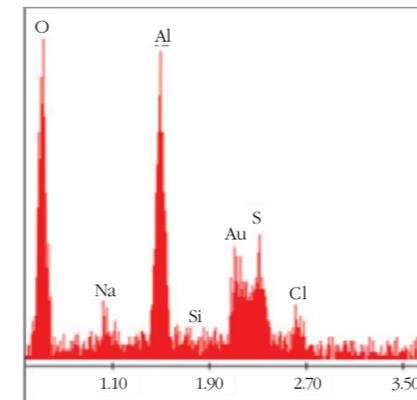
시료 1 시료 2 시료 3

<그림 부록 V-3-1> 흡착물질(함수 및 연돌)의 전자현미경 사진

EDS 분석 결과 <그림 부록 V-3-2>에서 보는 바와 같이 함수 및 연돌의 흡착물질은 탄소, 산소, 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 규소, 황, 염소 등의 원소성분으로 구성되어 있음을 알 수 있었고, 이 결과는 함미 흡착물질의 분석 결과와 동일하였다.



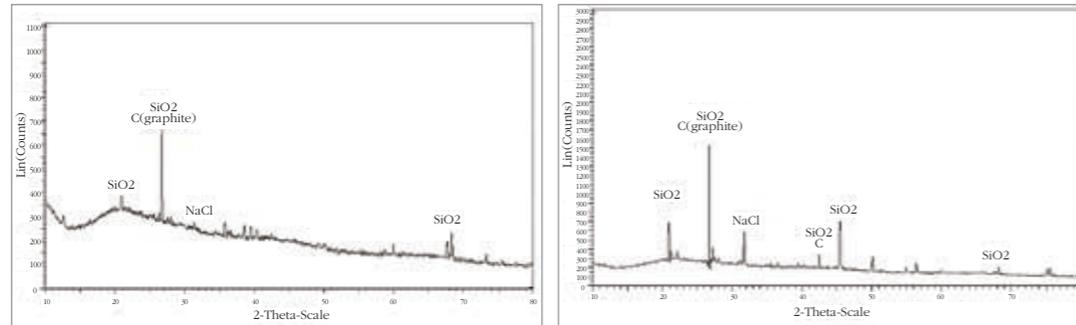
시료 1 시료 2



시료 3

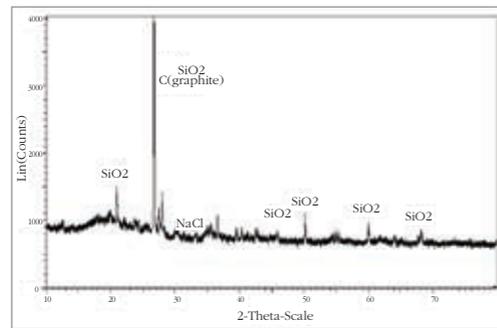
<그림 부록 V-3-2> 흡착물질(함수 및 연돌)의 에너지 분광 분석

XRD 회절 분석 결과 흡착물질에서는 규소(SiO₂), 흑연, 소금(NaCl) 등의 결정이 검출되었으며, 흡착물질의 주성분은 알루미늄 산화물인 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 함미 흡착물질의 실험 결과와 동일하였다(그림 부록 V-3-3 참조).



시료 1

시료 2



시료 3

〈그림 부록 V-3-3〉 흡착물질(함수 및 연돌)의 X선 회절 분석

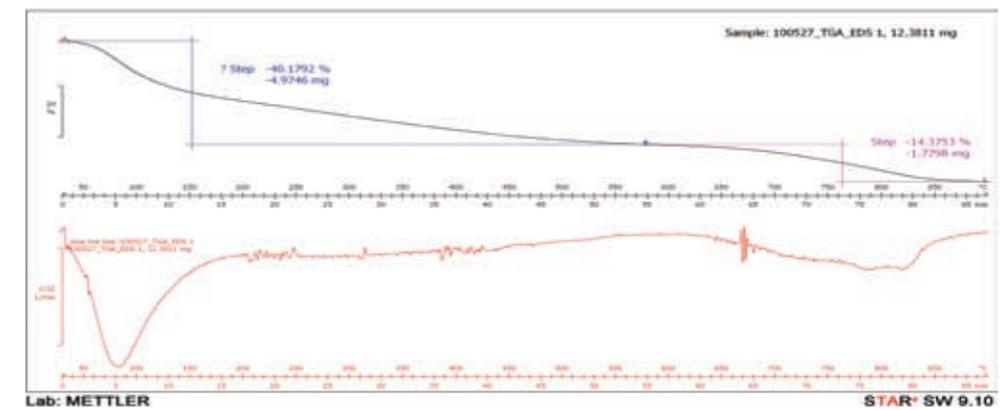
CHNS 원소 분석 결과 탄소, 수소, 황 등이 각각 0.76~1.12wt.%, 3.62~3.93wt.%, 2.43~3.58wt.%의 범위 내에서 검출되었다(표 부록 V-3-2 참조). 이러한 결과는 함미 흡착물질의 분석 결과와 유사하였다.

Sample name	Nitrogen (%)	Carbon (%)	Hydrogen (%)	Sulfur (%)
흡착물(1차) 1	0.01 이하	0.76	3.93	3.50
흡착물(1차) 2	0.01 이하	1.12	3.62	2.43
흡착물(1차) 3	0.01 이하	0.84	3.63	3.58

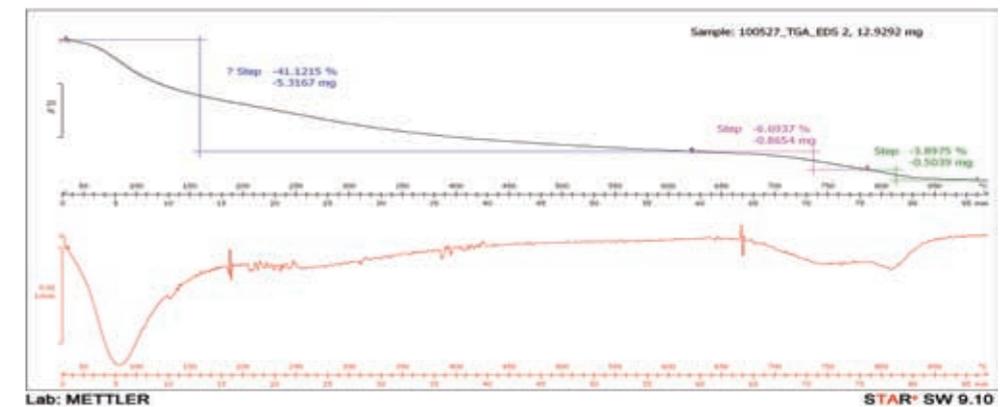
〈표 부록 V-3-2〉 CHNS 원소 분석 결과

TGA 열분해 특성 분석 시 흡착물질의 분석조건은 함미 흡착물질 분석조건과 같이 온도 범위를 30~900℃로 승온속도를 10℃/min로 조절하였다. 함수 및 연돌의 흡착물질의 열분해 특성 분석 결과는 함미 흡착물질의 분석 결과와 유사하였다(그림 부록 V-3-4 참조).

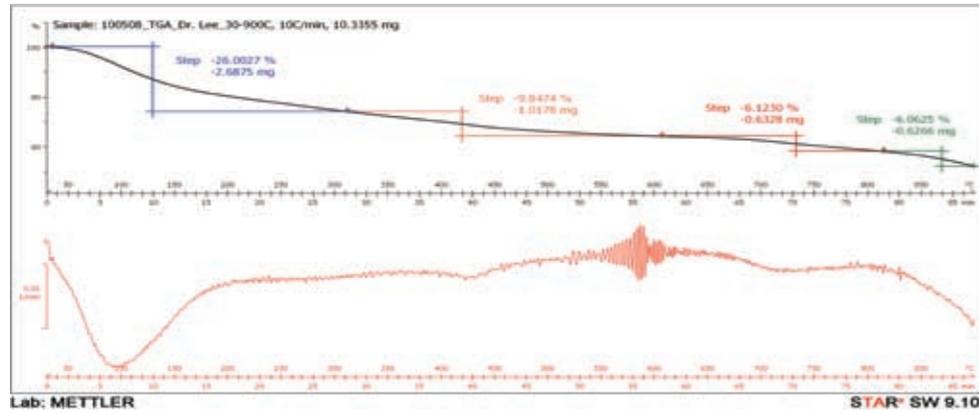
함수 및 연돌에서 채집한 흡착물질 분석 결과를 종합해 보면, 함미의 흡착물질과 동일한 물질로서 주성분은 비결정성의 알루미늄 산화물이고, 그 외 소량의 황 또는 황화합물과 소금과 규사로 구성되어 있는 혼합물질로 확인되었다. 이들 각 성분의 혼합비는 〈표 부록 V-3-3〉과 같다.



시료 1



시료 2



시료 3

〈그림 부록 V-3-4〉 열분해 특성 분석 결과(함수 및 연돌)

구성성분	함량(무게비%)	비고
Al _x O _y	53.5~54.6	소량의 규사 포함
수분	32.6~35.4	
황	2.4~3.6	
탄소	0.8~1.1	일부 흑연
소금	6.9~9.3	

〈표 부록 V-3-3〉 흡착물질(함수 및 연돌)의 구성성분 및 함량비

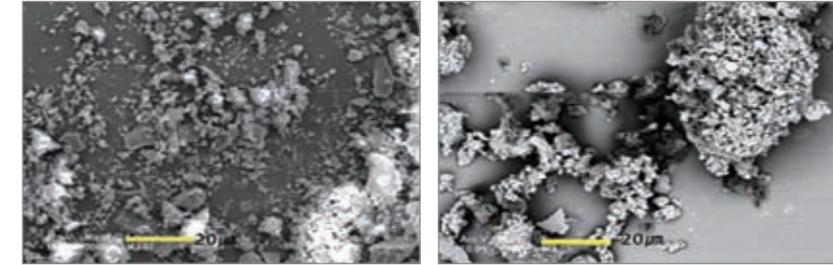
4. 4차 분석(어뢰 추진동력장치 흡착물)

어뢰의 추진동력장치가 수거된 5월 15일에 육안조사 결과, 선체에서 발견된 흰색 분말과 동일한 유형의 흡착물질이 프로펠러의 표면 및 모터의 내부에서도 발견되었다. 따라서 이 흡착물질이 선체의 흡착물질과 동일한지 여부를 비교 분석하기 위하여 〈표 부록 V-4-1〉과 같이 각각의 부위에서 시료를 채집하였다.

시료번호	채취 장소	표면 재질
1	인양된 어뢰 프로펠러	알루미늄 합금
2	인양된 어뢰 모터	철

〈표 부록 V-4-1〉 흡착물질의 채집 부위

성분분석에는 1, 2차 분석에 사용되었던 분석장비를 사용하였다. 단, 원소분석기는 CE Instruments사의 모델 EA1110을 사용하였으며, SEM 분석 결과 2개소에서 채집된 흡착물질의 형상은 앞서 분석된 선체의 흡착물질과 유사한 형상임을 알 수 있다.

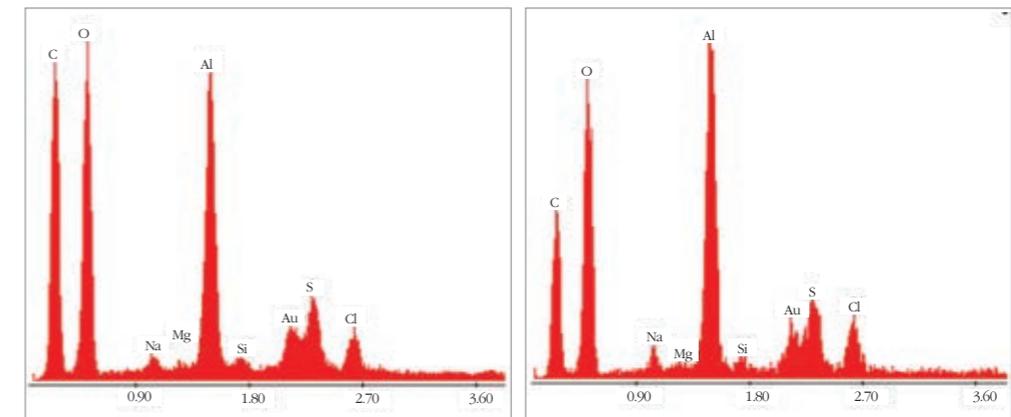


시료 1

시료 2

〈그림 부록 V-4-1〉 흡착물질(프로펠러 및 모터)의 전자현미경 사진

EDS 분석 결과는 〈그림 부록 V-4-2〉에서 보여주는 바와 같이 탄소, 산소, 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 규소, 황, 염소 등의 원소성분으로 구성되어 있음을 알 수 있었고 이 결과는 선체 흡착물질의 분석 결과와 동일하였다.

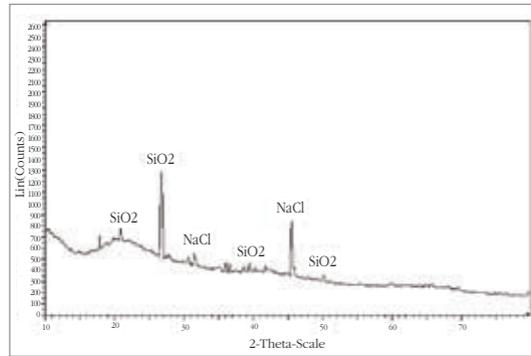


시료 1

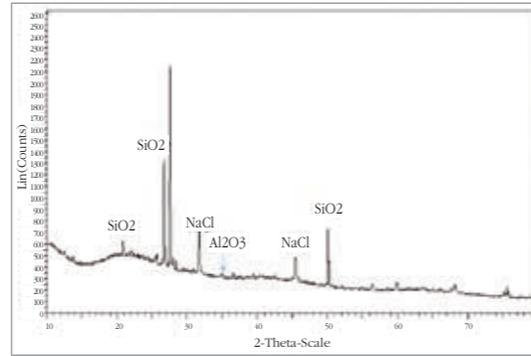
시료 2

〈그림 부록 V-4-2〉 흡착물질(프로펠러 및 모터)의 에너지 분광 분석

X선 회절 분석 결과 흡착물질에서는 규소(SiO₂), 소금(NaCl) 등의 결정이 검출되었고, 결정물질의 피크위치가 대체로 유사하며 산화알루미늄의 결정 피크가 매우 미약하게 관찰되었다(〈그림 부록 V-4-3〉 참조).



시료 1

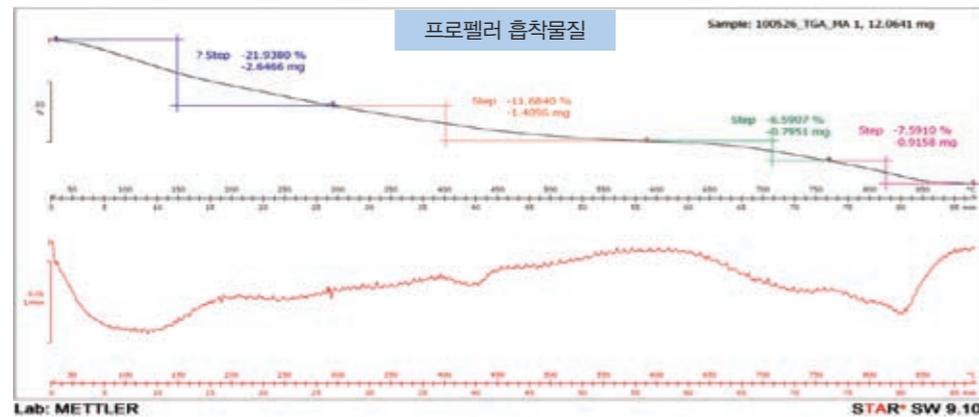


시료 2

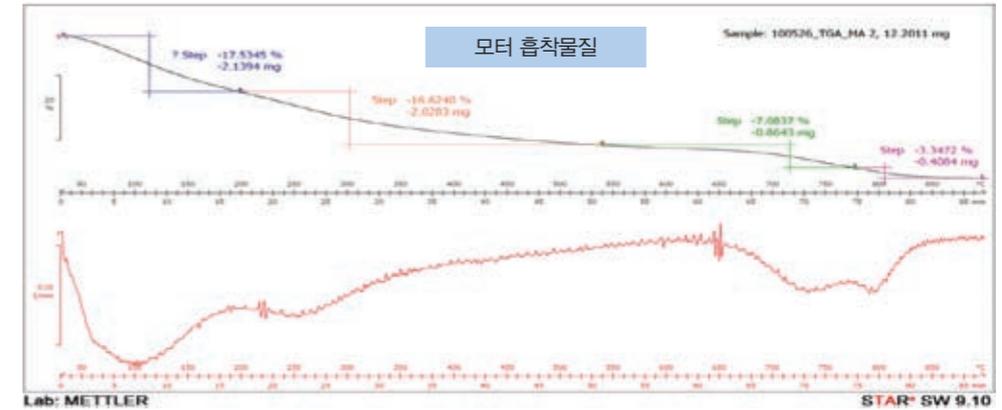
〈그림 부록 V-4-3〉 흡착물질(함수)의 X선 회절 분석

EDS와 X선 회절 분석 결과를 종합하면 어뢰 부품 흡착물질의 주성분은 알루미늄 산화물이며 대부분 비결정성 물질인 것으로 확인되었다. 이러한 결과는 선체 흡착물질의 분석 결과와 동일하였다.

CHNS 원소 분석을 통해 흡착물질 내의 가연성 원소를 분석한 결과 질소는 거의 검출되지 않았고, 탄소, 수소, 황 등이 각각 0.40~0.86wt.%, 3.29~3.34wt.%, 5.60~6.61wt.%의 범위 내에서 검출되었다. 이는 선체 흡착물질의 분석 결과와 유사하며, TGA 열분해 특성 분석 시 흡착물질의 분석 조건은 선체의 흡착물질 분석 조건과 동일하게 적용하였고, 분석 결과를 비교하면 어뢰의 흡착물질은 선체 흡착물질의 열분해 특성과 유사하다(〈그림 부록 V-4-4〉 참조).



시료 1



시료 2

〈그림 부록 V-4-4〉 열분해 특성 분석 결과(프로펠러 및 모터)

결과를 종합적으로 정리해 보면, 어뢰의 프로펠러와 모터의 흡착물질은 동일한 물질로서 주성분은 비결정성 알루미늄 산화물이고, 그 외 소량의 황 또는 황화합물과 소금과 규사로 구성되어 있는 혼합물질로 분석되었다. 이들 각 성분의 혼합비는 〈표 부록 V-4-2〉와 같다.

결론에서 언급하겠지만 이 흡착물질은 여러 분석 결과를 토대로 하여 알루미늄이 첨가된 수중폭약의 폭발재로 분석되었다.

구성 성분	함량(무게비%)	비고
AlxOy	53.9~54.3	소량의 규사 포함
수분	29.6~30.1	
황	5.6~6.6	
탄소	0.4~0.9	
소금	8.6~10.1	

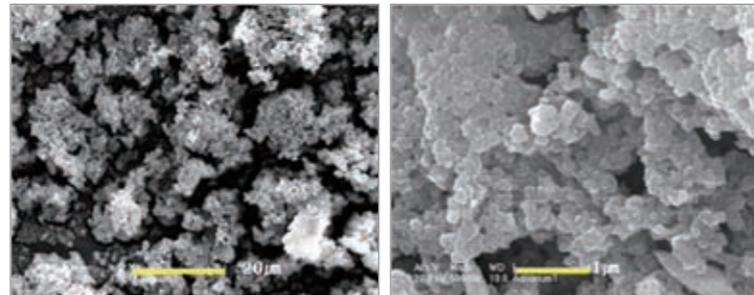
〈표 부록 V-4-2〉 흡착물질(프로펠러 및 모터)의 구성성분 및 함량비

5. 5차 분석(수중폭발 실험 흡착물)

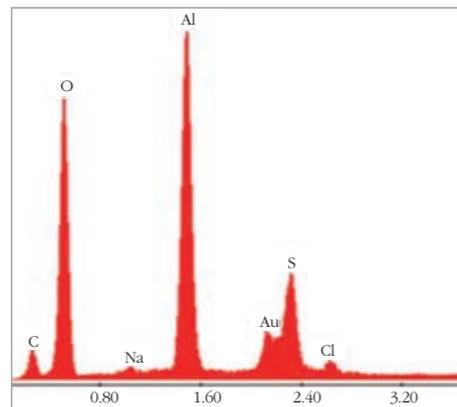
선체 및 어뢰의 흡착물질이 알루미늄 첨가 수중폭약의 폭발재임을 확인하기 위하여 수중폭발 실험을 통하여 획득한 폭발재 성분을 흡착물질의 성분과 비교 분석하였다.

소규모 수중폭발 실험에 사용된 수조의 제원은 길이 2m, 폭 1.5m, 높이 1.5m이었고 앞면에 폴리카보네이트 투명창을 설치하였다. 수조에는 4.5톤의 해수를 채웠고, 수조 상단에는 폭발재가 흡착될 수 있도록 알루미늄 판재를 거치하였으며, HBX-3(TNT 29%, RDX 36%, Al 35%) 화약 15g을 수조 중앙에 위치시켜 기폭시켰다. 폭발과정을 고속카메라로 촬영하여 충격파의 전파과정과 기포의 성장-수축-상승과정을 살펴볼 수 있었으며, 폭발실험 후 상부 알루미늄 판에 미량(수 mg)의 폭발재가 흡착되어 이를 분석하였다. 흡착된 폭발재가 미량이었기 때문에 많은 시료량이 소요되는 X선 회절 분석 시에는 알루미늄 판재에 흡착되어 있는 상태로 분석하였으며, EDS 분석 시에는 소량의 흡착물질은 별도로 채집하여 분석하였다.

폭발재는 미세한 입자들이 응집되어 있는 형상이며 미세입자의 크기는 마이크로미터 이하로 분석되었다(〈그림 부록 V-5-1〉참조). EDS 분석을 통해 소규모 수중폭발 실험으로 얻은 폭발재의 원소성분을 분석한 결과, 폭발재는 탄소, 산소, 나트륨, 마그네슘, 알루미늄, 황, 염소 등의 원소성분으로 구성되어 있음을 알 수 있었고, 이 결과는 〈그림 부록 V-5-2〉와 같으



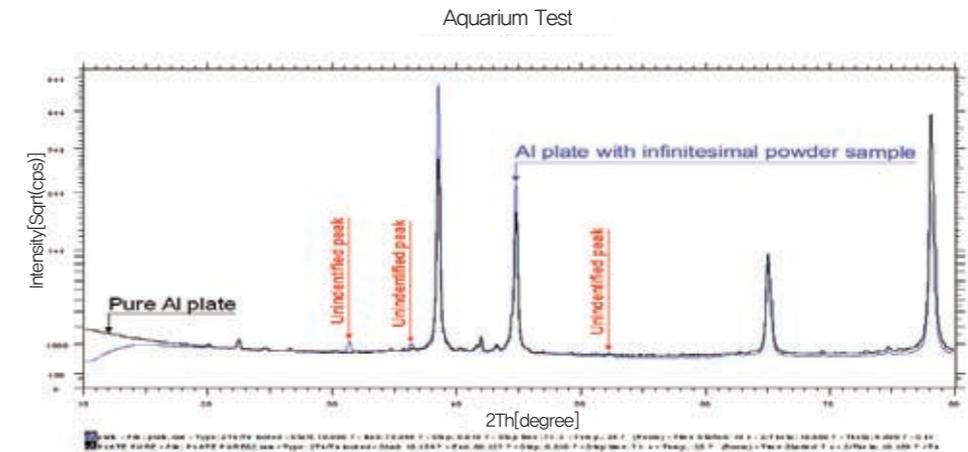
〈그림 부록 V-5-1〉 폭발재의 전자현미경 사진



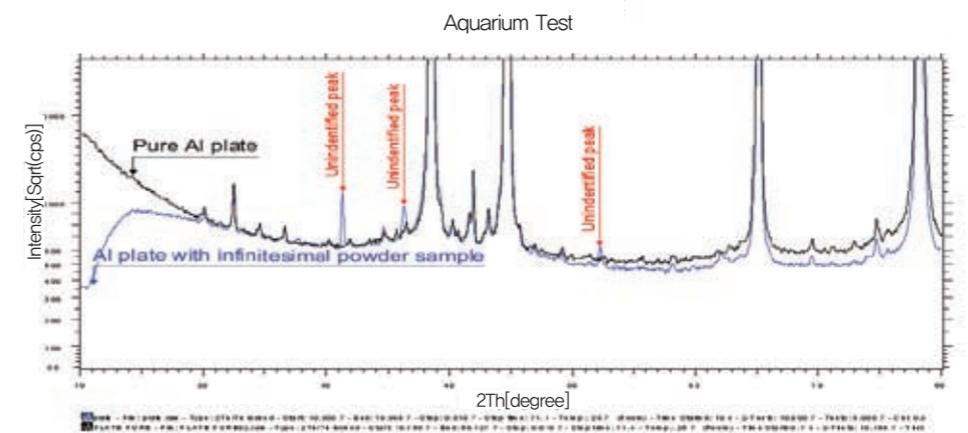
〈그림 부록 V-5-2〉 폭발재의 EDS 분석

며 선체 및 어뢰의 흡착물질 성분과 동일하였다.

XRD 분석 시 소량의 폭발재가 알루미늄 판재에 흡착된 상태로 분석되었기 때문에 알루미늄 결정피크만 크게 나타나고 다른 성분들은 미약하게 나타났다. 〈그림 부록 V-5-3〉에는 알루미늄판재에 흡착된 폭발재의 XRD 분석 데이터와 알루미늄 판재만의 XRD 분석 데이터를 비교하였다. XRD 분석 데이터의 결정피크를 확대하여 보아도 알루미늄 산화물의 결정은 거의 보이지 않았다. 이는 대부분의 알루미늄 산화물이 X선 회절분석에는 나타나지 않는 비결정성이기 때문이다. 그외 약한 피크들은 알루미늄 산화물이 아닌 기타 물질로 분석되었다. 이러한 분석을 통하여 폭발재의 성분이 천안함 선체와 어뢰의 흡착물질의 성분과 같은 비결



(확대 전)



(확대 후)

〈그림 부록 V-5-3〉 폭발재의 XRD 분석

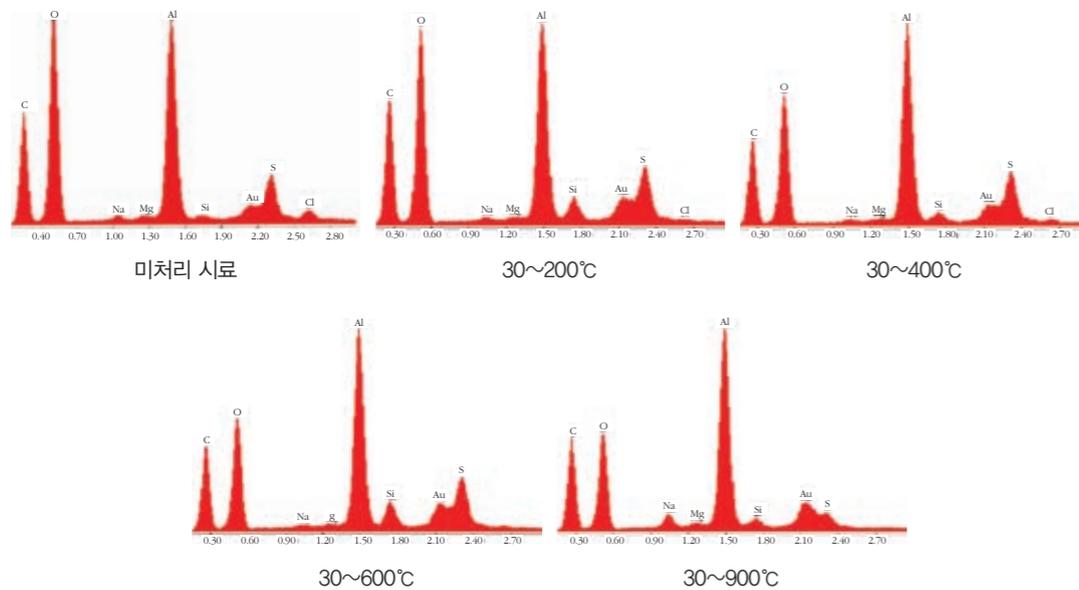
정성 알루미늄 산화물임을 알 수 있다. 단, 폭발재의 구성 성분비는 수중폭약의 성분비, 화약량, 폭발조건 등에 따라 다소 다를 수 있다.

6. 흡착물질의 열분해 특성 및 미세구조

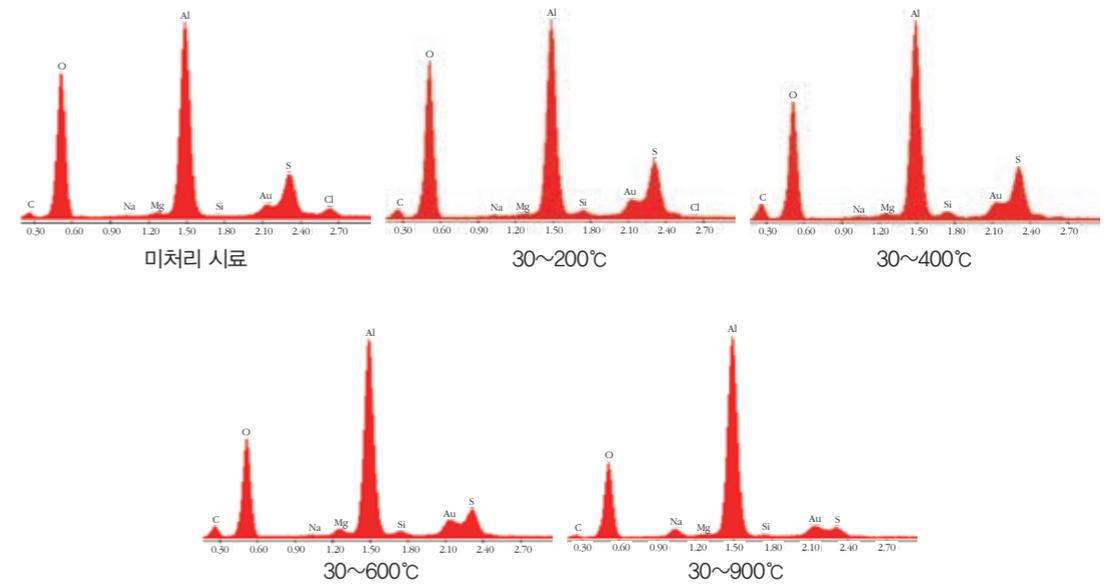
흡착물질의 열분해 특성에 대한 자세한 분석을 위해 흡착물질을 각각의 온도 구간별(30~200℃, 30~400℃, 30~600℃, 30~900℃)로 질소 분위기하에서 열분해시켰으며, 이 시험 후 얻은 시료에 대해 EDS 분석을 수행하였다. EDS 분석은 분석 영역을 0.25×0.20mm 또는 0.50×0.40mm 정도의 크기로 하였으며(〈그림 부록 V-6-1〉 참조), 또한 입자 자체에 대한 EDS 분석도 실시하였다(〈그림 부록 V-6-2〉 참조).

영역 분석과 입자 분석의 EDS 데이터에 나타난 탄소 함량의 차이는 시료를 부착시키기 위하여 사용된 접착 테이프에 기인한 것이며, 이외에도 산소 원자비율에도 미약하게 영향을 주는 것으로 보인다.

두 그림에서 보여주는 바와 같이 30~600℃ 구간에서는 주로 산소가 감소하며 그 이후 온



〈그림 부록 V-6-1〉 온도 구간별 분석 영역 내 흡착물질의 성분 함량 변화



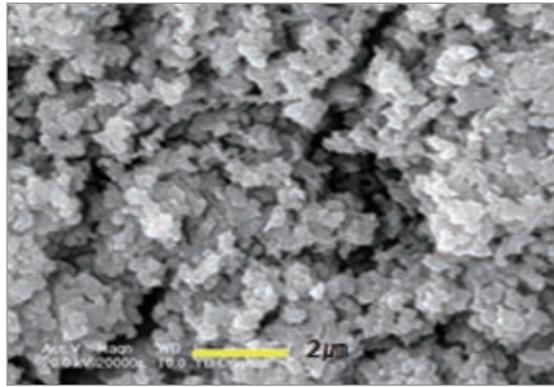
〈그림 부록 V-6-2〉 온도 구간별 흡착물질 개체의 성분 함량 변화

도가 증가하면 탄소 및 황이 사라지는 현상이 나타난다.

〈표 부록 V-6-1〉에는 온도 구간별 영역 분석과 입자 분석의 EDS 데이터 중에서 산소와 알루미늄의 원자비율(%)을 수록하였다. 원자비율은 규사(SiO₂)의 산소를 고려하여 계산되었다. 원시료와 30~200℃ 열처리 시료의 산소/알루미늄 성분비가 거의 변화가 없는 것으로 나타나는데 이는 원시료의 EDS 분석 시 시료처리 과정 및 시험 중 진공상태에서 수분이 증발되었음을 의미한다. TGA 분석상으로는 30~200℃ 온도 구간에서 흡착물질의 전체 수분 중에 50% 정도가 증발되는 것으로 알 수 있다. 이후 열처리 온도가 높을수록 산소량이 감소하

Sample Name	영역 분석		입자 분석	
	산소(원자비율)	알루미늄(원자비율)	산소(원자비율)	알루미늄(원자비율)
원시료	72.90	27.10	68.24	31.76
30~200℃	71.29	28.71	69.31	30.69
30~400℃	65.93	34.07	64.42	35.58
30~600℃	61.05	39.95	61.39	39.61
30~900℃	60.57	39.43	56.80	43.20

〈표 부록 V-6-1〉 온도 구간별 흡착물질의 산소/알루미늄 함량 변화



〈그림 부록 V-6-3〉 흡착물질의 미세구조

는데 이때는 미세기공(〈그림 부록 V-6-3〉 참조)에 갇혀 있는 수분이나 흡착물질과 강력하게 결합되어 있는 수분이 증발하기 때문인 것으로 판단된다.

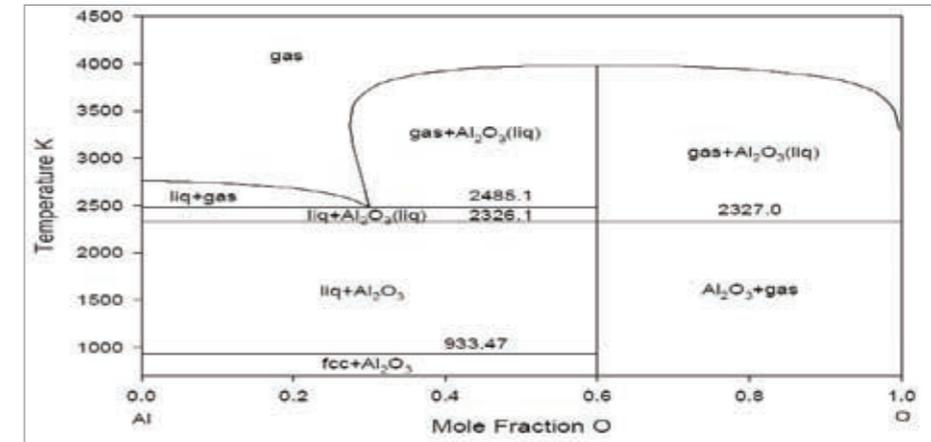
일반적으로, 불균일한 입도를 갖는 미세입자들의 혼합물에 대한 EDS 분석으로는 정량적인 원소 성분비 분석이 불가능한 것으로 알려져 있다. 따라서 〈표 부록 V-6-1〉은 온도 변화에 따른 산소와 알루미늄의 성분비 변화에 대한 정성적 분석 결과를 나타낸 것이다.

7. 비결정성 알루미늄 산화물

앞에서 언급한 바와 같이 일반적으로 순수한 알루미늄은 생산과 동시에 매우 짧은 시간 내에 산화되어 표면은 매우 얇은 두께(수 nm)의 비결정성 산화알루미늄의 막으로 덮이게 된다. 이 비결정성 산화알루미늄의 막은 매우 치밀하여 산소가 투과하지 못하므로 더 이상의 산화반응이 진행되기 어렵다. 그러나 오랜 시간 동안 수분, 염기, 산 등에 노출되면 산화반응이 진행되어 백화현상을 보이게 되는데 이 부식물의 주성분은 수산화알루미늄($\text{Al}(\text{OH})_3$, Bayerite)을 비롯하여 보에마이트($\text{AlO}(\text{OH})$, Boehmite), 산화알루미늄(Al_2O_3) 등으로 구성되며, 이들은 비결정성이기보다는 결정성을 나타낸다. 실제로 해수 또는 바닷가의 염분 등에 의하여 알루미늄이 부식되는 경우에도 상기의 결정성 알루미늄 산화물이 생성되는 것으로 많은 문헌에 보고되어 있다.

비결정질의 알루미늄 산화물(Al_xO_y)이 생성되기 위해서는, 우선 생성된 알루미늄 산화물

이 액체로 존재하여야 하고 이를 급히 냉각하는 조건이어야만 한다. 고체에서 고체로 급냉하는 조건에서는 비결정성이 생성되지 않는다. 〈그림 부록 V-7-1〉은 알루미늄과 산소의 성분비 변화에 따른 알루미늄 산화물의 상평형도를 나타낸 것으로 2, 325.1°C 이상이어야 Al_2O_3 가 액체로 존재하며 그 이하의 온도에서는 고체로 존재함을 알 수 있다. 따라서 Al_2O_3 를 비결정성으로 만들기 위해서는 최소 2,325.1°C 이상의 온도에서 액체화하고 이를 급냉시켜야만 한다.



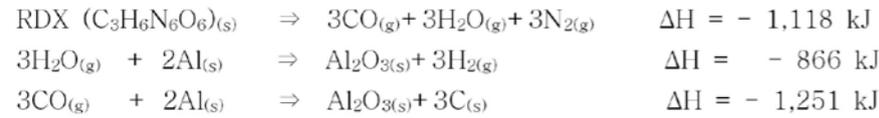
〈그림 부록 V-7-1〉 알루미늄-산소 2성분계의 상평형도¹⁷⁾

또 다른 조건은 알루미늄 산화물의 알루미늄과 산소가 정량적으로 화학결합을 하지 못하여 결정격자를 갖추지 못하는 경우이다.

따라서 비결정질의 알루미늄 산화물(Al_xO_y) 제조는 폭발 또는 플라즈마와 같은 급격한 산화반응 및 고온-급냉과정을 거치는 조건에서 가능하다.

일반적으로 수중폭약에는 알루미늄 분말이 첨가되는데 그 이유는 알루미늄의 높은 연소열을 이용하여 수중폭약의 버블 에너지를 증대시키기 위함이다. 폭발반응은 3,000°C 이상, 20만 기압 이상의 조건에서 수십만분의 1초 이내 일어나는 반응으로서 다음의 화학반응과 같이 알루미늄 분말은 폭발가스 성분 중의 산소와 반응하여 높은 열을 발생시키면서 알루미늄 산화물로 변하게 된다. 이 알루미늄 산화물은 수중에서 수십 밀리초 내에 버블의 표면에서 초당 수만~수십만 도의 속도로 급냉하게 된다.

17) Yajun Liu, "The Kinetics of Incongruent Reduction Between Sapphire and Mg-Al Melts," Phd Thesis, Georgia Institute of Technology, 2006.

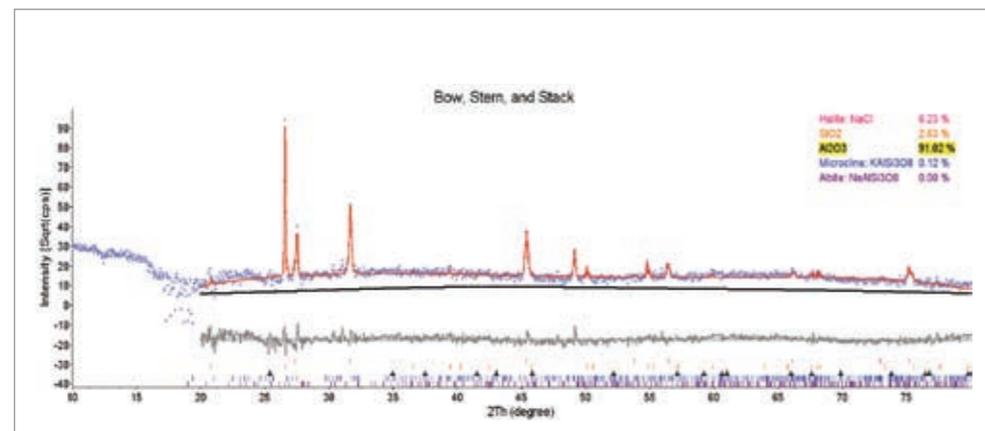


알루미늄 첨가 화약의 폭발재로 생성되는 알루미늄 산화물은 비결정성으로 알려져 있으며 이는 앞에서 설명한 바와 같이 너무 빠른 산화과정(폭발과정)에서 산소와 알루미늄 원자가 정량적으로 화학적인 결합을 하지 못하거나 액체상태에서 고체로의 급격한 냉각속도에 의해 결정격자가 미처 만들어지지 못하기 때문인 것으로 판단된다.

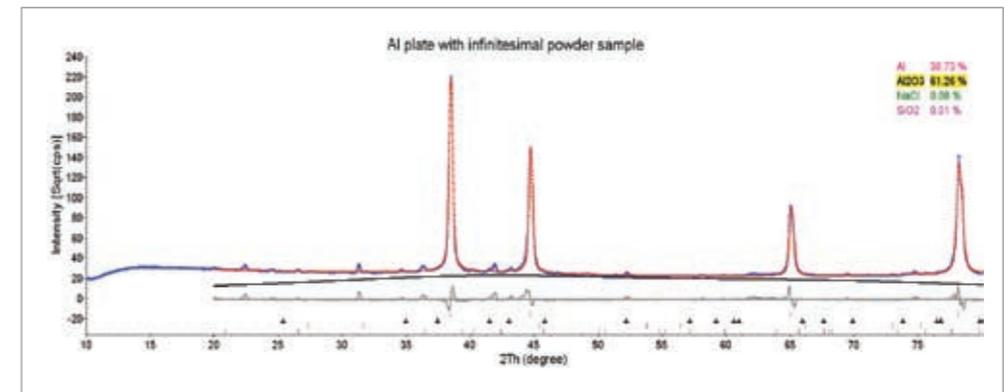
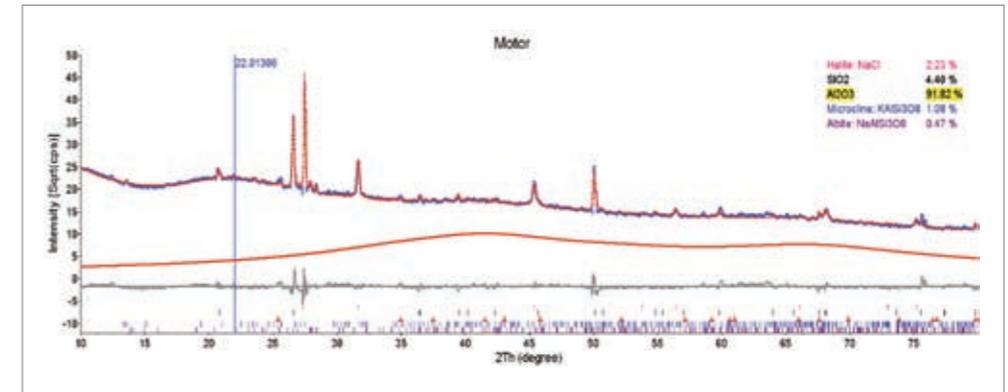
흡착물질의 알루미늄 산화물이 비결정성인지 확인하기 위하여 TOPAS 프로그램¹⁸⁾을 이용하여 XRD 데이터를 정밀분석하는 방안과 흡착물질을 열처리하는 방안을 수행하였다.

먼저 천안함 선체 및 어뢰의 추진동력장치의 흡착물질과 수중폭발실험 폭발재의 XRD 데이터를 TOPAS 프로그램으로 분석한 결과, 천안함 선체 및 어뢰의 추진동력장치의 흡착물질은 각각 90% 이상의 비결정성 알루미늄 산화물을 함유하고 있는 것으로 확인되었다. 또한, 수중폭발 실험 폭발재의 경우에도 함께 측정된 알루미늄 판재의 알루미늄 결정성을 제외하면 대부분이 비결정성 알루미늄 산화물을 함유하고 있는 것으로 분석되었다(그림 부록 V-7-2) 참조).

일반적으로 비결정성 물질은 용융점 이하의 고온에서 열처리할 경우 결정성으로 바뀌게 된다. 따라서 어떤 결정질이 없는 물질을 열처리하여 결정성 알루미늄 산화물이 생성된다면



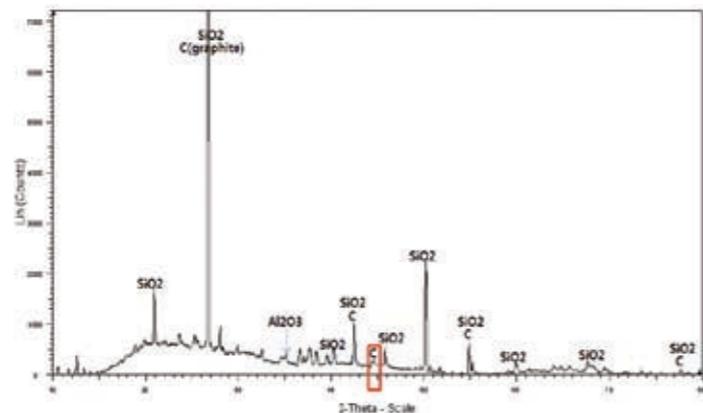
18) TOPAS(Total pattern analysis solution) : X선 회절 데이터를 분석하는 프로그램 명칭.



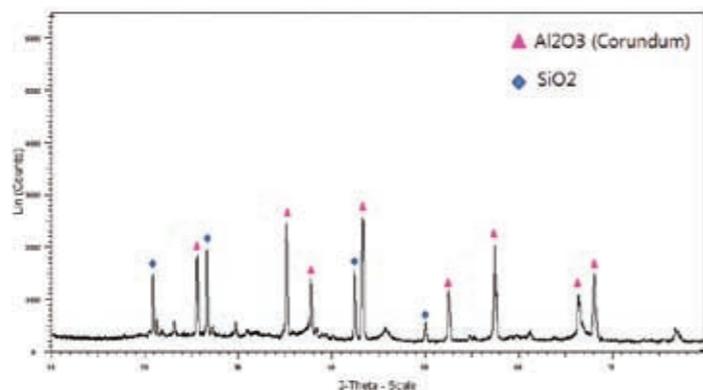
〈그림 부록 V-7-2〉 비결정성 알루미늄 산화물의 함량 분석

물질 자체가 비결정성의 알루미늄 산화물이라는 증거가 된다. 이를 입증하기 위하여 연돌에서 채집한 흡착물질을 1,200℃에서 30분간 가열하여 자연 상태로 서서히 냉각시킨 후 열처리 전후의 결정성분을 비교하였다.

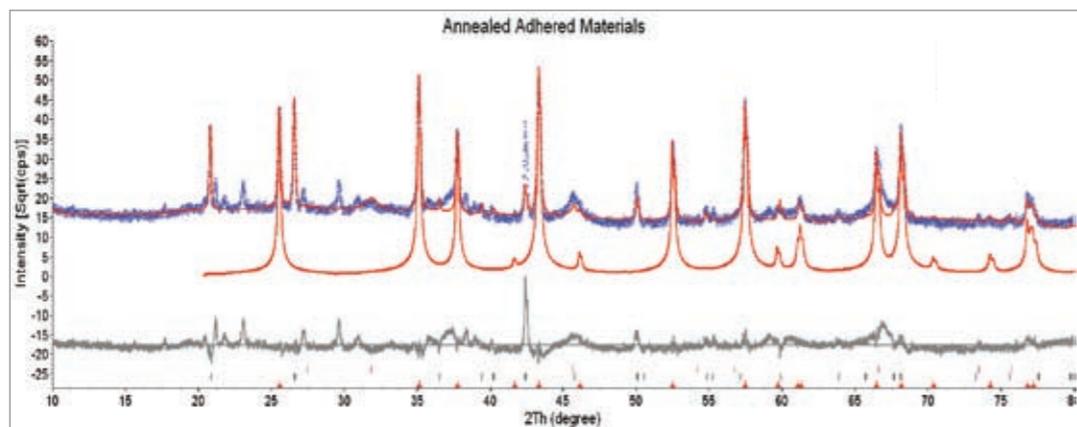
〈그림 부록 V-7-3〉의 X선 회절 분석 결과는 열처리 전에는 흡착물질 중의 주요 결정성분이 규사로 나타나지만(미량의 흑연 포함), 열처리 후에는 다량의 결정성 산화알루미늄(Al₂O₃)이 생성되고 흑연이 소멸되었음을 보여준다. 이로써 흡착물질은 매우 빠른 산화반응 또는 급격한 냉각 등의 이유로 생성된 물질인 것으로 입증되었다.



(열처리 전)



(열처리 후)



(열처리 시료의 결정성분 분석)

〈그림 부록 V-7-3〉 열처리 전후의 흡착물질 XRD 분석

8. 분석 결과

선체 및 어뢰의 부품에 흡착되어 있는 흰색의 분말은 알루미늄 소재의 부식물이 아니라 알루미늄이 첨가된 수중폭약의 폭발재인 것으로 분석되었다.

흡착물질이 천안함 선체 및 어뢰 부품의 알루미늄 소재가 부식되어 생성된 물질이 아닌 이유는 다음과 같다.

- 비알루미늄 소재에도 다량 흡착되어 있음.
- 흡착물질이 표면에 치밀하게 밀착되지 못하고 쉽게 분리됨.
- 흡착물질 자체가 단단히 결합되어 있지 않고 푸석함.
- 비결정성의 알루미늄 산화물이 주성분 물질임.
- 알루미늄이 부식되면 대부분 결정성 알루미늄 산화물이 생성됨.

또한 흡착물질이 폭발재라는 근거는 다음과 같다.

- 외부로부터 유입된 흡착물질의 주성분이 비결정성 알루미늄 산화물임.
- 수중에서 비결정성 알루미늄 산화물이 생성될 어떠한 요인도 없음.
- 흡착물질 중에 흑연이 일부 검출됨.
- 알루미늄 첨가 화약의 폭발 시 비결정성 산화알루미늄이 생성됨.¹⁹⁾
- 일반 화약의 폭발 시 비결정성(amorphous) 탄소, 흑연, 다이아몬드 등이 생성됨.

19) R. R. McGuire, et. al., 'Detonation Chemistry : An Investigation of Fluorine as an Oxidizing Moiety in Explosives,' Lawrence Livermore Laboratory, AD A11 9092, N00014-77-F-0053, July 7, 1982.

부록 VI_복원성 분석 결과

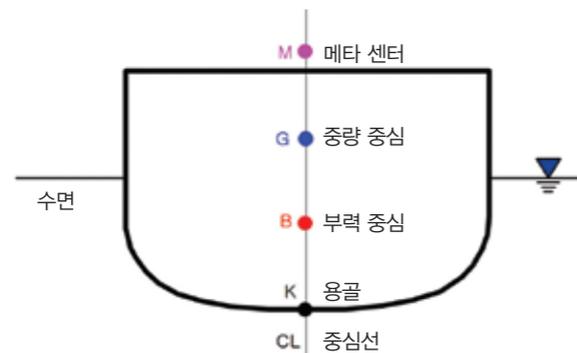
1. 목적

복원성 분석은 천안함급 함정 복원성 설계의 건전성 여부를 평가하고 절단된 함수·함미 각각에 대한 침몰 경위를 기술적으로 밝히기 위하여 수행하였다.

복원성 설계의 건전성 평가는 손상이 발생하지 않은 정상 운항상태와 손상 후 2, 3, 4개의 연속 구획에 침수가 발생하는 상태를 구분하여 수행하였다. 이때의 손상은 선체 종강도는 유지되는 상태에서 손상된 구역에 단지 침수가 발생하는 손상을 의미한다. 함정뿐만 아니라 일반 상선의 경우에도 손상 후 복원성을 평가할 때 침수상태만을 고려하고 함정의 절단상태를 고려하지는 않는다.

한편, 천안함은 가스터빈실에서 절단 분리되어 함미는 짧은 시간에 침몰하였으며, 함수는 우현으로 90도 전복된 후 침몰하였다. 이와 같은 침몰상황이 발생할 수 있는 경위를 기술적으로 밝히기 위하여 절단 이후의 함수와 함미 각 부분에 대한 복원성을 평가하였다.

2. 함정의 복원성 개요

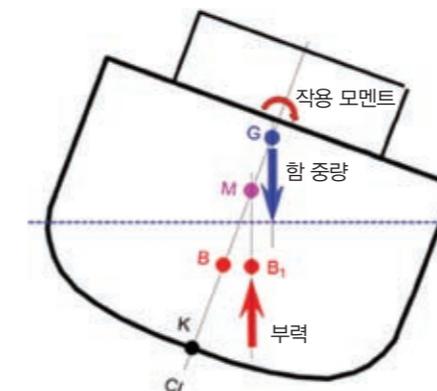


〈그림 부록 VI-2-1〉 함정 복원성 인자

함정의 복원성 평가에 영향을 미치는 주요 인자는 〈그림 부록 VI-2-1〉에 보인 바와 같이 중량의 중심(G), 부력의 중심(B), 메타 센터(M)가 있다. G와 B가 연직선 상에 놓일 때, 함정은 동요하지 않고 평형을 이루게 된다. 함정은 일반적으로 중량과 기하학적 형상이 좌·우 대칭을



〈그림 부록 VI-2-2〉 양(+)의 복원성을 갖는 상태



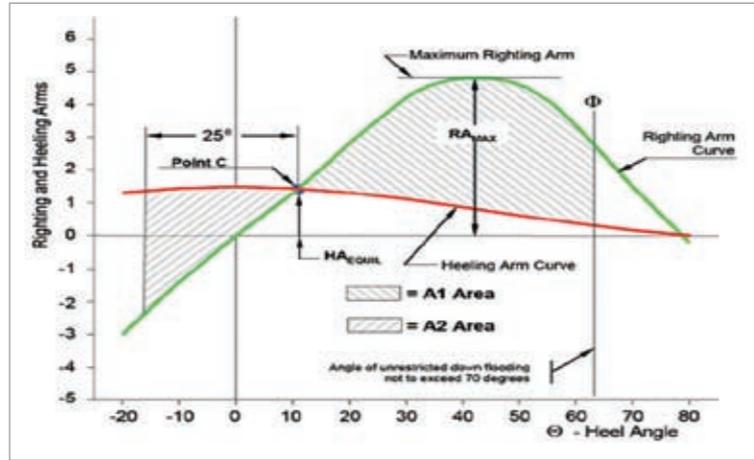
〈그림 부록 VI-2-3〉 음(-)의 복원성을 갖는 상태

이루므로, G와 B는 용골(Keel)선을 통과하는 연직선상에 놓이게 된다.

〈그림 부록 VI-2-2〉와 같이 함정이 횡으로 경사하면 부력의 중심이 B1으로 이동하게 되고, 경사 전의 연직선(K-B-G의 연장선)과 경사 후의 부력 중심 B1을 통과하는 연직선은 한 점에서 만나며 이를 메타 센터(Meta center, 〈그림 부록 VI-2-1〉과 〈그림 부록 VI-2-2〉의 점 M)라 한다. 〈그림 부록 VI-2-2〉에서와 같이 M이 G 보다 높은 곳에 있으면, 경사상태에서 중력과 부력이 발생시키는 모멘트는 경사방향과 반대 방향으로 작용하게 되어 함정은 안정화된다. 이를 양(+)의 복원성을 갖는다고 한다($GM > 0$). 한편, 〈그림 부록 VI-2-3〉과 같이 M이 G 보다 낮은 곳에 있으면, 경사상태에서 중력과 부력이 발생시키는 모멘트는 경사방향과 동일한 방향으로 작용하게 되어 함정은 전복하게 된다. 이를 불안정하다고 하며 음(-)의 복원성을 갖는다고 한다($GM < 0$). 따라서 G와 M의 연직

선상 위치와 거리는 함정의 정적 복원성을 나타내는 대표적 인자가 된다. 함정을 바로 세우려는 모멘트의 크기는 〈그림 부록 VI-2-2〉의 GZ의 길이로 표현되며, 이를 복원 아암(Righting arm)이라 하고, 함의 경사각도에 따라 곡선으로 나타낼 수 있다.

한편, 함정은 바람과 파도의 영향으로 횡경사된다. 풍압과 파도에 의한 횡경사 모멘트(횡경사 모멘트를 배의 배수량으로 나누어 횡경사 아암(Heeling arm)으로 표현)을 경사각에 대해 계산하고 이를 앞에 기술한 복원 아암 곡선에 겹쳐 그리면 〈그림 부록 VI-2-4〉와 같은 곡선이 얻어진다. 〈그림 부록 VI-2-4〉의 면적 A1은 복원 에너지를 나타내고, A2는 전복 에너지를 나타내는데 A1/A2가 1보다 크면 동적 복원성이 안정적이라고 말한다.



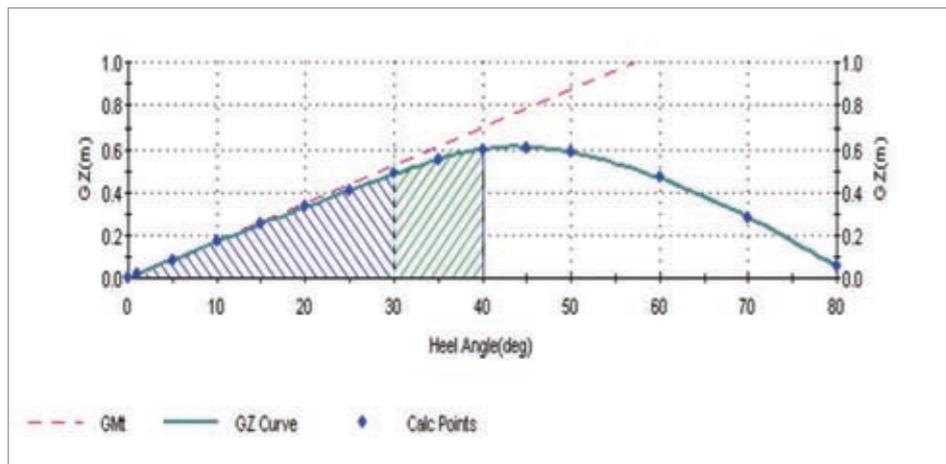
〈그림 부록 VI-2-4〉 함정의 동적 복원력을 나타내는 복원 아암 대비 횡경사 아암 곡선

3. 천안함의 손상 전 복원성 평가

1) 정적 복원성

천안함의 정적 복원성을 나타내는 복원 아암 곡선은 〈그림 VI-3-1〉과 같이 계산되었다.

천안함의 손상 전 정적 복원성을 영국 해군 기준과 일반 상선의 기준에 따라 비교하고 평



〈그림 부록 VI-3-1〉 천안함의 손상 전 복원 아암 곡선

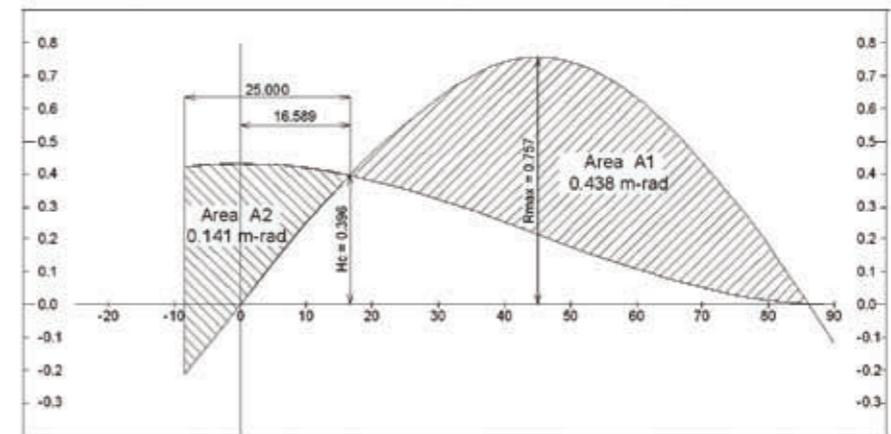
항목	미국 해군	영국 해군	일반 상선	천안함
복원 아암	0도-30도	없음	$\geq 0.080\text{m} \cdot \text{rad}$	$\geq 0.055\text{m} \cdot \text{rad}$
곡선 하부 면적	0도-40도	없음	$\geq 0.133\text{m} \cdot \text{rad}$	$\geq 0.090\text{m} \cdot \text{rad}$
최대 복원 아암 발생 각도	없음	30도 이상	25도 이상	45도
GM(횡메타 센터 높이)	없음	0.3m	0.15m	약 1.0m

〈표 부록 VI-3-1〉 천안함의 손상 전 정적 복원성 평가 결과

가하면 〈표 부록 VI-3-1〉과 같이 요약할 수 있다(참고로 미국 해군에는 정적 복원성에 대한 기준이 없다). 이 결과를 통해 볼 때 천안함의 손상 전 정적 복원성은 일반 상선에 비해 매우 엄격히 적용되었으며, 영국 해군 기준에 비교해도 기준 대비 약 2배 이상의 복원력을 보유했다고 평가할 수 있다. 손상 전의 천안함은 횡경사각 45도에서 최대 복원력을 보유했으며, 80도까지의 횡경사에도 안정성을 유지할 수 있다.

2) 동적 복원성

천안함의 동적 복원성을 나타내는 복원 아암 대비 횡경사 아암 곡선은 〈그림 부록 VI-3-2〉와 같이 계산되었다.



〈그림 부록 VI-3-2〉 천안함의 복원 아암 대비 횡경사 아암 곡선

항목	미국 해군 설계기준	영국 해군 설계기준	일반상선 설계기준	천안함 분석 결과
적용 풍속 (Knots)	90 knots	90 knots	50 knots	90 knots
전복력 대비 복원력 비율 (A1/A2)	1.4 이상	1.4 이상	1.0 이상	3.1

〈표 부록 VI-3-2〉 천안함의 손상 전 동적 복원성 평가 결과

천안함의 손상 전 동적 복원성을 미국과 영국의 해군 기준과 일반 상선의 기준에 따라 비교하면 〈표 부록 VI-3-2〉와 같이 요약할 수 있다. 즉, 천안함의 손상 전 동적 복원성은 일반 상선에 비해서 매우 엄격히 적용되었으며, 미국과 영국 해군 기준에 비교해도 기준 대비 충분한 복원력을 보유했다고 평가할 수 있다.

4. 천안함의 손상 복원성 평가

1) 손상 복원성 기준

〈표 부록 VI-4-1〉에 천안함에 적용된 손상 복원성(Damage stability) 기준을 상선과 대비하여 나타내었다. 천안함은 2구획 침수 시 30노트의 횡풍(Beam wind)을 받아도 생존하도록 설계되었다. 본 평가에서 2구획 침수의 기준은 충분히 만족하는 것으로 나타났으나 복원성 능력의 한계를 도출하기 위해 기준을 초과하는 3구획 및 4구획 침수의 경우도 분석하였다.

천안함의 침수 시 손상 복원성 평가를 위하여 여러 가지 손상 경우를 고려하였으며, 2구

함정의 종류	형식	동적 복원력 기준	손상 구획의 수(기준)
여객선	-	풍속 25 knots	2구획
액체 화약품 운반선	-	-	2구획
가스 운반선	LNG	-	2구획
	LPG	-	1구획
유조선	길이 150m 이상	-	2구획
	길이 150m 미만	-	1구획
천안함급 적용기준	-	풍속 30 knots	2구획

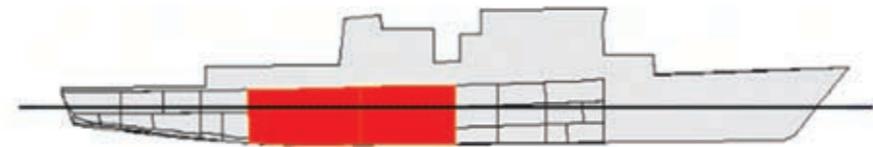
〈표 부록 VI-4-1〉 함종별 손상 복원성 기준

획 손상에 대하여는 함 복원성 측면에서 가장 위험한 상태인 디젤엔진실 및 가스터빈실 2구획이 침수되는 경우(Case 1)와 디젤엔진실 및 이에 인접한 후방 1구획이 동시 침수되는 경우(Case 2)를 고려하였다. 3구획 손상의 경우, 디젤엔진실 및 이에 인접한 후방 2구획이 동시 침수되는 경우(Case 3), 디젤엔진실과 가스터빈실 및 가스터빈실 전방 1구획이 동시 침수되는 경우(Case 4)를 고려하였다. 극한의 경우로서 4구획 침수의 경우에는 디젤엔진실 포함 후방 4구획이 침수되는 경우를 고려하였으며, 이 중 타기실은 침수되지 않는 경우(Case 5)와 타기실까지 침수되는 경우(Case 6)로 분석하였다.

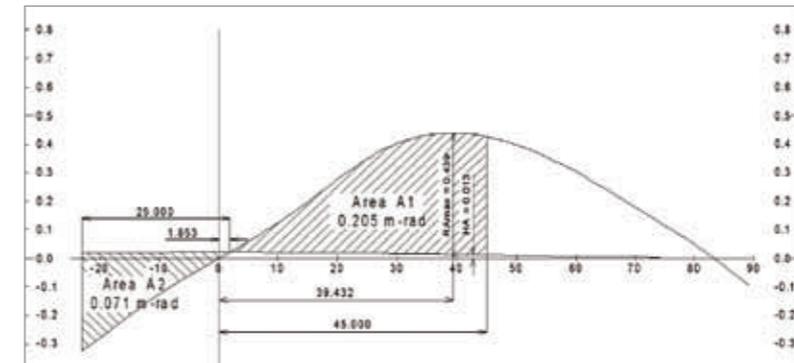
2) 2구획 침수 시 손상 복원성 평가

(1) Case 1: 2구획 손상(디젤엔진실, 가스터빈실 침수)

디젤엔진실과 가스터빈실에 침수가 발생한 경우 부양상태 계산 결과는 〈그림 부록 VI-4-1〉과 같으며 부양 가능하다. 이 경우의 복원력 곡선은 〈그림 부록 VI-4-2〉와 같으며 이 결과는 〈표 부록 VI-4-2〉와 같이 요약할 수 있다. 손상 후 초기 경사각, 전복력 대비 복원력 비율(A1/A2), 복원력(A1), 최대 잔류복원 아암(RA_{max}-HA), 한계선(Margin line) 기준을 모두 만족하므로 디젤엔진실과 가스터빈실 침수 시 복원성은 기준을 충분히 만족시키고 있다.



〈그림 부록 VI-4-1〉 2구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 1)



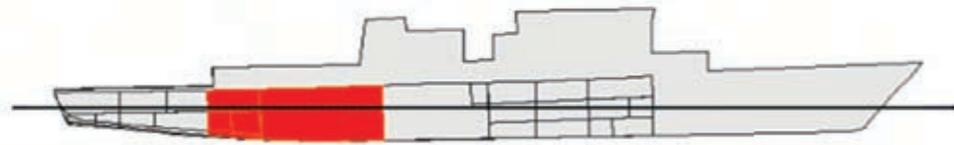
〈그림 부록 VI-4-2〉 천안함의 손상 시 동적 복원력 곡선

항목	설계기준	천안함	검토 결과
손상 후 초기 경사각	15도 이하	0도	만족
전복력 대비 복원력 비율 (A1/A2)	1.4 이상	2.887	만족
복원력(A1)	0.024m · rad 이상	0.205m · rad	만족
최대 잔류복원 아암(RAmax-HA)	0.075m 이상	0.192m	만족
한계선(Margin line) ²⁰⁾	흘수선 상방에 위치할 것	1.545m	만족

〈표 부록 VI-4-2〉 Case 1에 대한 복원성 평가 결과

(2) Case 2 : 2구획 손상(디젤엔진실 및 인접한 후방 1구획 침수)

디젤엔진실 및 인접한 후방 1구획에 침수가 발생한 경우 부양상태 계산 결과는 〈그림 부록 VI-4-3〉과 같으며 부양 가능하다. 이 경우의 복원력 계산 결과는 〈표 부록 VI-4-3〉과 같이 요약할 수 있다. 손상 후 초기 경사각, 전복력 대비 복원력 비율(A1/A2), 복원력(A1), 최대 잔류복원 아암(RAmax-HA), 한계선(Margin line) 기준을 모두 만족하므로 디젤엔진실 및 인접한 후방 1구획 침수 시 복원성은 기준을 충분히 만족시키고 있다.



〈그림 부록 VI-4-3〉 2구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 2)

항목	설계기준	천안함	검토 결과
손상 후 초기 경사각	15도 이하	0도	만족
전복력 대비 복원력 비율 (A1/A2)	1.4 이상	2.913	만족
복원력(A1)	0.024m · rad 이상	0.201m · rad	만족
최대 잔류복원 아암 (RAmax-HA)	0.075m 이상	0.424m	만족
한계선(Margin line)	흘수선 상방에 위치할 것	1.689m	만족

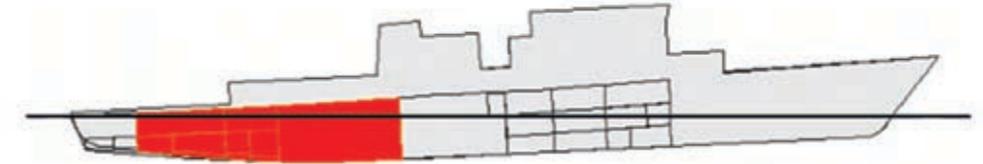
〈표 부록 VI-4-3〉 Case 2에 대한 복원성 평가 결과

20) 주갑판 현측에서 하방 76mm의 선이며 한계선은 흘수선 상방에 있어야 함.

3) 3구획 침수 시 손상 복원성 평가

(1) Case 3 : 3구획 손상(디젤엔진실 및 인접한 후방 2구획 침수)

천안함의 경우 설계기준(2구획 침수 시 복원가능)을 충분히 만족하므로 추가로 3구획이 침수 되는 경우 중 하나로서 디젤엔진실 및 인접한 후방 2구획에 침수가 발생한 경우에 대하여 부양성능과 복원성을 평가하였다. 부양상태 계산 결과는 〈그림 부록 VI-4-4〉와 같으며 주갑판의 개구부가 폐쇄되어 있을 경우 부양 가능하다. 복원력 계산 결과는 〈표 부록 VI-4-4〉와 같이 요약할 수 있다. 손상 후 초기 경사각, 전복력 대비 복원력 비율(A1/A2), 복원력(A1), 최대 잔류복원 아암(RAmax-HA) 기준을 만족한다. 한계선(Margin line) 기준은 불만족으로 평가되었으나, 이는 〈그림 부록 VI-4-4〉에 보이는 함미 끝부분이 물에 잠길 수 있음을 나타내고 이곳에 위치한 주갑판 상의 개구부가 개방되어 있을 경우 점진적 침수로 침몰되나, 개구부가 폐쇄되어 있을 경우 더 이상 침수 없이 부양 가능함을 나타낸다. 즉, 함미부 일부가 물에 잠기며, 이 경우에도 복원성을 보유하므로 상당한 시간 동안 안정적인 부양 유지가 가능하다고 평가할 수 있다.



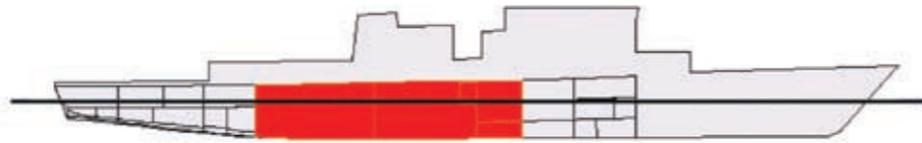
〈그림 부록 VI-4-4〉 3구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 3)

항목	설계기준	천안함	검토 결과
손상 후 초기 경사각	15도 이하	0도	만족
전복력 대비 복원력 비율 (A1/A2)	1.4 이상	3.040	만족
복원력(A1)	0.024m · rad 이상	0.076m · rad	만족
최대 잔류복원 아암 (RAmax-HA)	0.075m 이상	0.163m	만족
한계선(Margin line)	흘수선 상방에 위치할 것	-0.627m	불만족

〈표 부록 VI-4-4〉 Case 3에 대한 복원성 평가 결과

(2) Case 4 : 3구획 손상(디젤엔진실, 가스터빈실, 가스터빈실 전방 1구획)

설계기준(2구획 침수)을 초과하여 3구획이 침수되는 경우 중 하나로서, 디젤엔진실, 가스터빈실 및 가스터빈실 전방 1구획에 침수가 발생한 경우에 대하여 부양성능과 복원성을 평가하였다. 부양상태 계산 결과는 <그림 부록 VI-4-5>와 같으며 부양 가능하다. 이 경우의 복원력 계산 결과는 <표 부록 VI-4-5>와 같이 요약할 수 있다. 손상 후 초기 경사각, 전복력 대비 복원력 비율(A1/A2), 복원력(A1), 최대 잔류복원 아암(RAmax-HA), 한계선(Margin line) 기준을 모두 만족하므로 디젤엔진실, 가스터빈실 및 가스터빈실 전방 1구획, 총 3구획 침수 시 복원성은 충분한 것으로 평가되었다.



<그림 부록 VI-4-5> 3구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 4)

항목	설계기준	천안함	검토 결과
손상 후 초기 경사각	15도 이하	0도	만족
전복력 대비 복원력 비율 (A1/A2)	1.4 이상	2.724	만족
복원력(A1)	0.024m · rad 이상	0.158m · rad	만족
최대 잔류복원 아암 (RAmax-HA)	0.075m 이상	0.318m	만족
한계선(Margin line)	흘수선 상방에 위치할 것	1.048m	만족

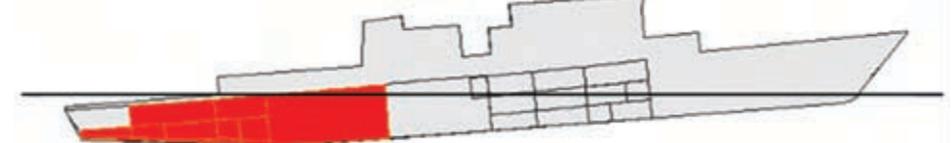
<표 부록 VI-4-5> Case 4에 대한 복원성 평가 결과

4) 4구획 침수 시 손상 복원성 평가

(1) Case 5 : 4구획 손상(디젤엔진실 포함 후방 4구획 침수, 타기실 제외)

설계기준(2구획 침수)을 매우 초과하여 4구획이 침수되는 경우 중 하나로서, 디젤엔진실을 포함한 후방 4구획(타기실 제외)에 침수가 발생한 경우에 대하여 부양성능과 복원성을 평가하였

다. 부양상태 계산 결과는 <그림 부록 VI-4-6>과 같으므로 주 갑판의 개구부가 폐쇄되어 있을 경우 부양 가능하다. 복원력 계산 결과는 <표 부록 VI-4-6>과 같이 요약할 수 있다. 손상 후 초기 경사각, 전복력 대비 복원력 비율(A1/A2), 복원력(A1), 최대 잔류복원 아암(RAmax-HA) 기준을 만족하며 복원력은 유지된다. 한계선(Margin line) 기준은 불만족으로 평가되었으나, 이는 <그림 부록 VI-4-6>에 보이는 함미 부분이 물에 잠길 수 있음을 나타내고 이곳에 위치한 주갑판 상의 개구부가 개방되어 있을 경우 점진적 침수로 침몰되나, 개구부가 폐쇄되어 있을 경우 부양 가능성을 나타낸다. 즉, 함미부 일부가 물에 잠기며, 이 경우에도 복원성을 보유하므로 상당한 시간 동안 안정적으로 부양을 유지할 수 있다고 평가할 수 있다.



<그림 부록 VI-4-6> 4구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 5)

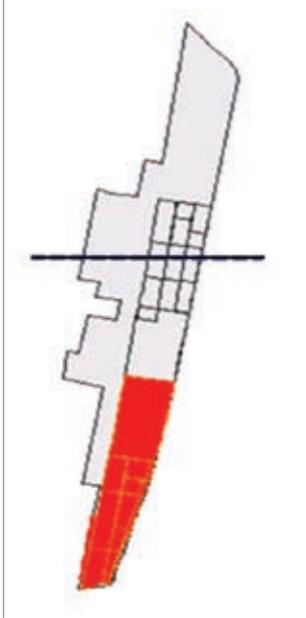
항목	설계기준	천안함	검토 결과
손상 후 초기 경사각	15도 이하	0도	만족
전복력 대비 복원력 비율 (A1/A2)	1.4 이상	2.871	만족
복원력(A1)	0.024m · rad 이상	0.089m · rad	만족
최대 잔류복원 아암 (RAmax-HA)	0.075m 이상	0.187m	만족
한계선(Margin line)	흘수선 상방에 위치할 것	-0.758m	불만족

<표 부록 VI-4-6> Case 5에 대한 복원성 평가 결과

(2) Case 6 : 4구획 손상(디젤엔진실 포함 후방 4구획 침수, 타기실 포함)

설계기준(2구획 침수)을 매우 초과하여 4구획이 침수되는 경우 중 하나로서, 디젤엔진실을 포함한 후방 4구획(타기실 포함)에 침수가 발생한 경우에 대하여 부양성능과 복원성을 평가하였다. 복원력 계산 결과는 <표 부록 VI-4-7>과 같이 요약할 수 있다. 손상 후 초기 경사각은 기준을 만족하나, 전복력 대비 복원력 비율(A1/A2), 복원력(A1), 최대 잔류복원 아암

(RAmax-HA), 한계선(Margin line) 기준 모두 불만족하며, 선체는 시간이 지남에 따라 부력을 상실하여 완전히 침몰하게 된다.



항목	설계기준	천안함	검토 결과
손상 후 초기 경사각	15도 이하	0도	만족
전복력 대비 복원력 비율 (A1/A2)	1.4 이상	-	불만족
복원력(A1)	0.024m · rad 이상	-	불만족
최대 잔류복원 아암 (RAmax-HA)	0.075m 이상	-	불만족
한계선 (Margin line)	흘수선 상방에 위치할 것	-7.821m	불만족

〈그림 부록 VI-4-7〉 4구획 침수 시 〈표 부록 VI-4-7〉 Case 6에 대한 복원성 평가 결과 부양상태 계산 결과(Case 6)

5. 천안함의 함수·함미 분리 후 복원성

일반적인 함정 복원성 설계에서 손상 전 복원성과 손상 후 복원성을 분석하지만 이때의 손상은 절단이 아니라 단지 침수가 발생하는 손상을 의미한다. 한편, 천안함은 가스터빈실에서 절단 분리되어 함미는 짧은 시간에 침몰하였으며, 함수는 우현으로 90도 전복된 후 침몰하였다. 이와 같은 침몰상황이 발생할 수 있는 경위를 기술적으로 밝히기 위하여 절단 이후의 함수와 함미 각 부분에 대한 복원성을 평가하였다.

1) 절단 직후 함수·함미 각각의 복원성 평가

함미 절단된 후 함수·함미의 복원성 관련 특성은 〈표 부록 VI-5-1〉과 같다. 표에서 G'은 원

래의 중심 G가 탑재 유체(유류 등)의 체적 형상 변화로 이동되어 설정되는 새로운 중심을 뜻한다. 즉, 복원성 평가 지표 $G'M = KM - KG - GG'$ 가 된다.

〈표 부록 VI-5-1〉에서 함수부만의 G'M은 -0.02m로 음의 값을 갖는 것으로 평가되었다. 따라서 절단 후 함수부는 경미한 바람 또는 파도 등의 작은 외력에도 복원력을 상실하고 전복하게 된다. 전복방향은 외력의 방향일 것이다. 즉, 함수와 함미가 분리되면 함수부는 무게 중심이 높아져서 복원력이 없는 상태가 된다.

함미부의 G'M은 2.35m로 평가되었다. 즉, 절단 직후에 함미부는 전복되지 않았을 것으로 판단된다.

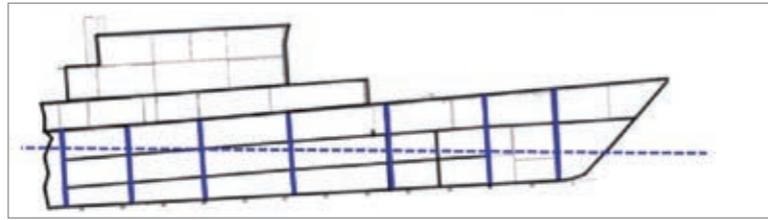
항목	함수부	함미부
배수량	664 톤	559 톤
KG	4,347 m	3,515 m
KM	4,425 m	5,903 m
KB	2,420 m	2,346 m
GG'	0.098 m	0.036 m
G'M	-0.020 m	2.35 m

〈표 부록 VI-5-1〉 절단 후 초기의 함수·함미부 복원능력 판단

2) 절단 후 함수·함미 각각의 부양성 평가

(1) 함수부 부양성 평가

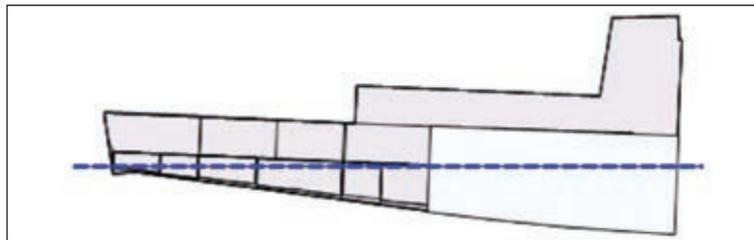
절단 직후 함수부 전복 전 부양상태는 〈그림 부록 VI-5-1〉과 같이 계산되었다. 함수부의 복원력이 없으므로($GM = -0.02m$) 좌현 하부에서 폭발력이 작용함에 따라 우현으로 전복된 것으로 판단된다. 분리된 함수는 7개의 구획으로 나누어져 있어 점진적인 침수가 발생하는 것으로 분석되었다. 즉, 전복된 상태로 상당시간 부양상태를 유지하다가 출입문 또는 통풍구 등을 통하여 해수가 지속적으로 유입되어 결국 침몰하였다.



〈그림 부록 VI-5-1〉 함수·함미 분리 직후 함수의 부양상태 계산 결과

(2) 함미부 부양성 평가

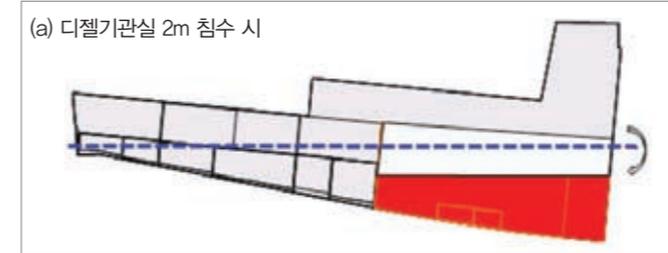
절단 직후 함미부의 부양상태는 〈그림 부록 VI-5-2〉와 같이 계산되었다. GM값이 2.35m로 복원력이 있어 전복은 발생하지 않았을 것으로 판단된다.



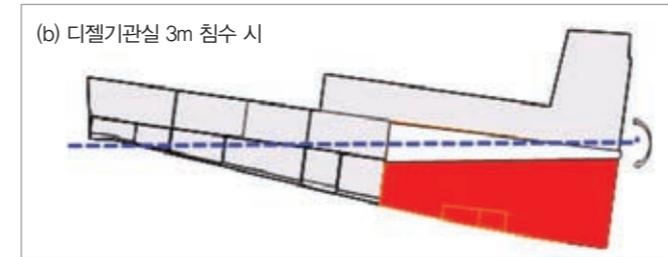
〈그림 부록 VI-5-2〉 함수·함미 분리 직후 함미의 부양상태 계산 결과

분리된 함미는 4개의 수밀구획으로 나누어져 있으며, 특히 디젤엔진실은 함미부 용적의 40%를 차지하고 있어 이 구획의 침수가 함미부 부양 여부에 미치는 영향이 매우 크다. 먼저 함미부 침몰형태를 확인하기 위해 단순하게 디젤기관실의 침수 정도에 따른 부양성 및 함 자세를 분석하였다. 파손된 디젤엔진실을 제외하고 완전히 밀폐되어 있다면 디젤엔진실이 4m 침수될 때까지는 부상유지가 가능하나 디젤엔진실이 완전 침수될 때에는 침몰하게 된다. 디젤엔진실 침수수위에 따른 분석 결과는 〈그림 부록 VI-5-3〉과 같다.

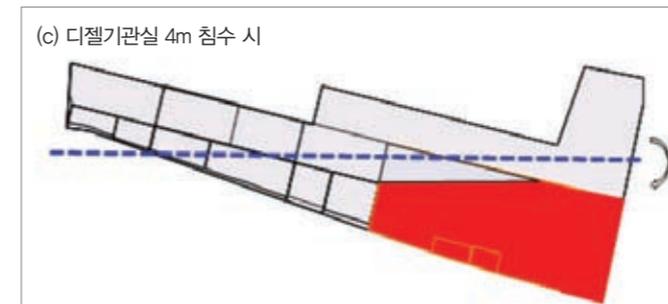
다음으로 함미 침몰시간 및 자세를 상세히 분석하였다. 분석 시 실제 함미부 선체 파손상태를 반영하여 분석한 결과 해수 유입부위는 1차적으로 〈그림 부록 VI-5-4〉와 같이 디젤엔진실과 가스터빈실 사이의 수밀격벽에 가스터빈과 감속기어 간 연결축 절단에 의해 발생한 파공과 디젤엔진실 상부 주갑판에 위치한 디젤엔진 및 발전기 연돌설치를 위한 개구부를 통하여 디젤엔진실로 해수가 유입되었고, 2차적으로는 함정이 평시 작전 중이어서 주통로 수밀 도어는 개방된 상태이므로 디젤엔진실에서 넘친 해수가 후부 격실로 전파된 것으로 분석



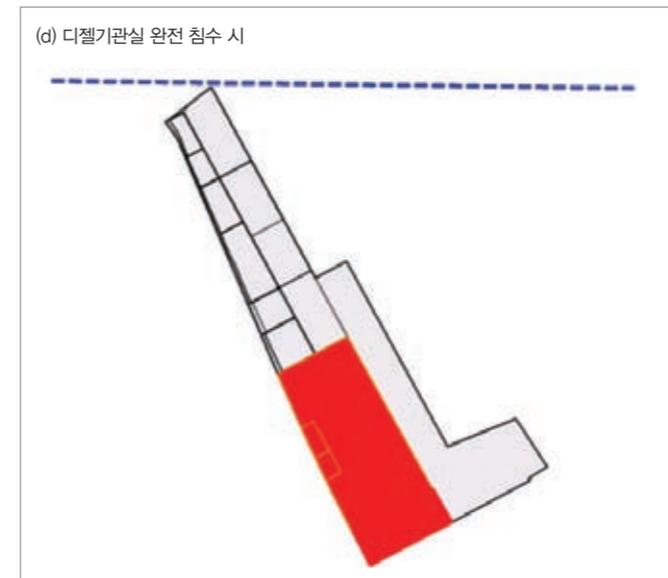
(a) 디젤기관실 2m 침수 시



(b) 디젤기관실 3m 침수 시



(c) 디젤기관실 4m 침수 시



(d) 디젤기관실 완전 침수 시

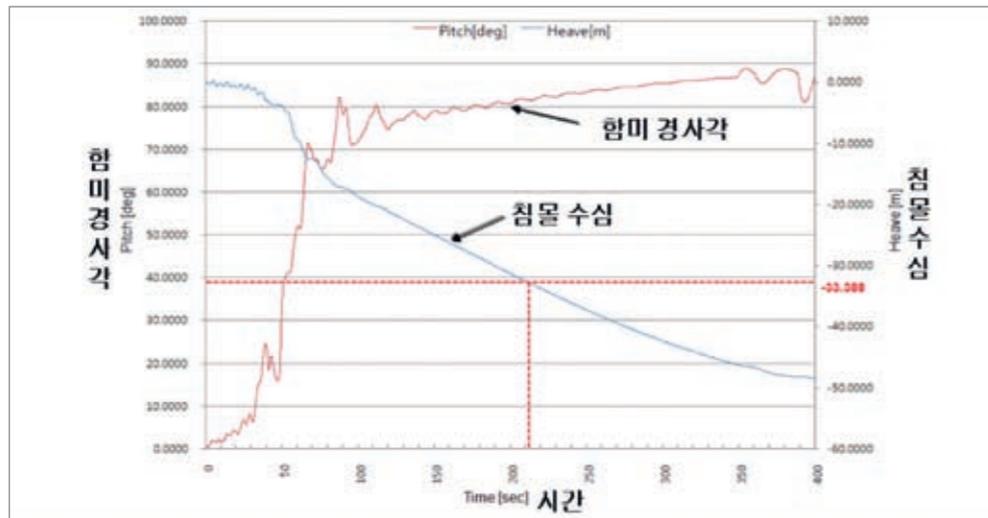
〈그림 부록 VI-5-3〉 디젤기관실 침수 진전에 따른 함미의 부양상태 계산 결과



〈그림 부록 VI-5-4〉 함미 절단면 파괴부위 및 주갑판 개구부

하였다.

함미부 침몰시간 분석 결과는 〈그림 부록 VI-5-5〉와 같다. 선체 절단 90초 이후부터 디젤 엔진실 침수에 의해 80도 이상이 경사가 지며, 약 210초 이후가 되면 함미부 길이인 33.4m 이상 침하되는 것으로 분석되었다. 기관실 탑재장비에 따른 침수용적에 차이가 발생할 수 있으나, 침수용적 차이를 고려하더라도 약 200~250초 후 완전 침몰하는 것으로 분석되었다.



〈그림 부록 VI-5-5〉 함미부 침몰시간 분석 결과

6. 분석 결과

천안함의 손상 전 복원성 설계기준은 설계 당시 일반 상선의 복원성 기준보다 엄격하게 적용되었으며, 기준 대비 2배 이상의 기본 복원력을 갖고 있는 것으로 평가되었다. 손상 시 복원성은 2개 인접구획의 침수에 안전하도록 설계되었으며, 3구획 손상 및 타기실을 제외한 디젤 엔진 후부 4구획의 침수 시에도 부상유지가 가능한 것으로 분석되었다.

가스터빈실을 기준하여 함수와 함미가 분리된 경우, 함미는 가스터빈실과 기관실 사이 격벽이 온전한 채로 절단되고 수밀이 유지되었다면 부상을 유지할 수 있는 것으로 분석되었으나, 사건 발생 당시 디젤엔진실과 가스터빈실 사이의 수밀격벽에 발생한 파공과 디젤엔진실 상부 주갑판의 연돌부위로 급격한 침수가 발생하여 선체가 절단되고 200~250초 후에는 완전 침몰되는 것으로 분석되었다.

절단된 함수는 음의 복원력(GM<0)이 작용하여 분리 즉시 복원력을 상실하게 되며, 경미한 바람 또는 파도 등 작은 외력에도 전복하게 된다. 우현으로의 전복은 좌현측으로부터 외력이 작용한 결과로 볼 수 있다. 다만, 함수는 7개의 수밀구획으로 나누어져 있으므로 분리 및 전도 후 급속히 침몰되지 않고 상당 시간 동안 떠 있을 수 있었을 것으로 보이나, 전복된 상태에서 출입문 또는 통풍구 등을 통하여 해수가 지속적으로 유입되어 결국 침몰된 것으로 판단된다.

부록 VII_선체 기본강도 해석 결과

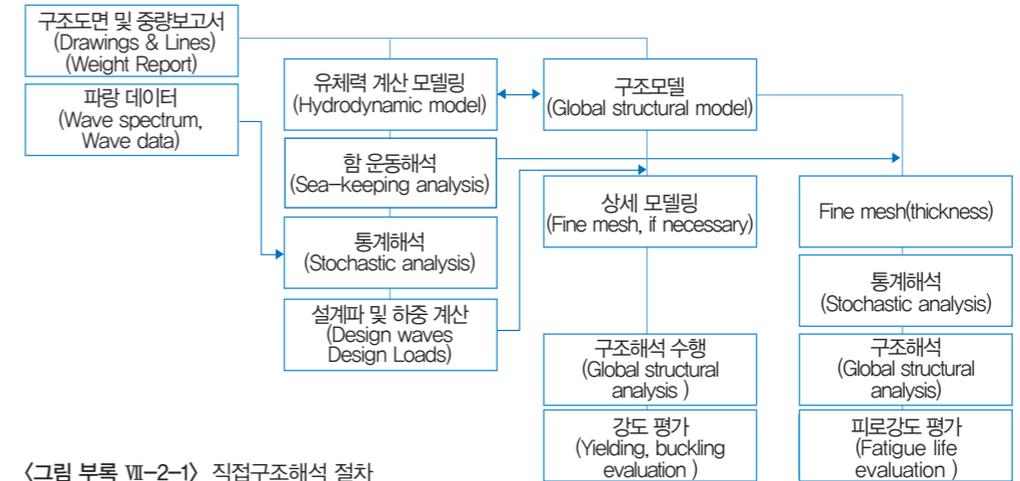
1. 목적

천안함은 설계 당시 미(美) 해군(U. S Navy)의 구조설계기준(Structural design manual for naval surface ship, 1974)에 의해 설계되었으나, 현재 한국 해군 함정은 국내에서 보유하고 있는 세계최고의 조선설계 기술력을 바탕으로 직접구조해석(Direct strength analysis) 기법을 통하여 구조 안전성을 검증하고 있다. 따라서, 천안함급 구조에 대한 직접구조해석을 실시함으로써, 1974년 미(美) 해군 구조설계기준으로 설계된 천안함 선체구조를 현재의 기준에 따라 평가하여 기본구조 안전성을 검증하고자 실시하였다. 기본구조 안전성 검증은 파괴요인 분석을 위한 기본강도 평가가 목적이며, 파괴해석 결과에 앞선 기본 절차이다.

2. 직접구조해석 절차 (Flow chart of direct strength analysis)

직접구조해석은 함정의 파랑 중 운동 및 하중을 계산하고, 함 수명(25~30년) 기간 동안 겪을 수 있는 최대 극한하중(Most probable extreme load)을 확률 통계적으로 구하여 이 하중을 발생시키는 설계파(Design wave for extreme load)를 결정한 후, 3차원 전선 구조모델에 하중을 가하여 구조해석을 수행하고 구조 안전성을 평가하는 것을 말한다(〈그림 부록 VII-2-1〉 참조).

〈그림 부록 VII-2-1〉에서 보듯이 최신의 직접구조해석 절차에는 피로강도 평가가 포함되지만, 본 천안함 직접구조해석은 설계를 위해서가 아니라 파괴요인 분석을 위한 기본강도 평가가 목적이며 피로파괴는 천안함의 파괴요인이 아닌 것으로 이미 분석되었으므로 이를 제외하였다.



〈그림 부록 VII-2-1〉 직접구조해석 절차

3. 유체력 계산(Hydrodynamic analysis)

1) 유체력 계산 모델링

천안함의 파랑하중 계산을 위한 해석모델은 함정의 형상과 압력분포를 잘 표현할 수 있도록 수선면 하부의 선체를 세밀하게 모델링하였으며, 〈그림 부록 VII-3-1〉은 파랑하중 계산에 사용된 선체의 3차원 모델과 하중조건을 보여주고 있다. 또한, 중량은 만재상태의 자료를 토대로 함정에 분포시켰다.



〈그림 부록 VII-3-1〉 3D 유체력 계산 모델 및 하중조건

2) 설계파(Design wave) 선정

기본강도 해석을 위한 설계파는 <표 부록 VII-3-1>과 같이 선정하였으며, 이 설계파들은 세계에서 가장 거친 바다인 북대서양에서 함정이 25~30년간 운용하며 10^{-8} 의 확률로 만날 가능성이 있는 가장 극심한 하중으로 아래 조건을 고려하여 선정하였다.

- ㉠ 함 중앙 위치에 작용하는 파랑 수직굽힘모멘트가 최대가 되는 설계파
- ㉡ 함 중앙 위치에 작용하는 파랑 수평굽힘모멘트가 최대로 되는 설계파
- ㉢ 함 중앙에 작용하는 비틀림 모멘트가 최대로 되는 설계파
- ㉣ 선수에서의 수직 가속도가 최대로 되는 설계파
- ㉤ 함 중앙 수선면(Water Plane)에서의 압력이 최대로 되는 설계파

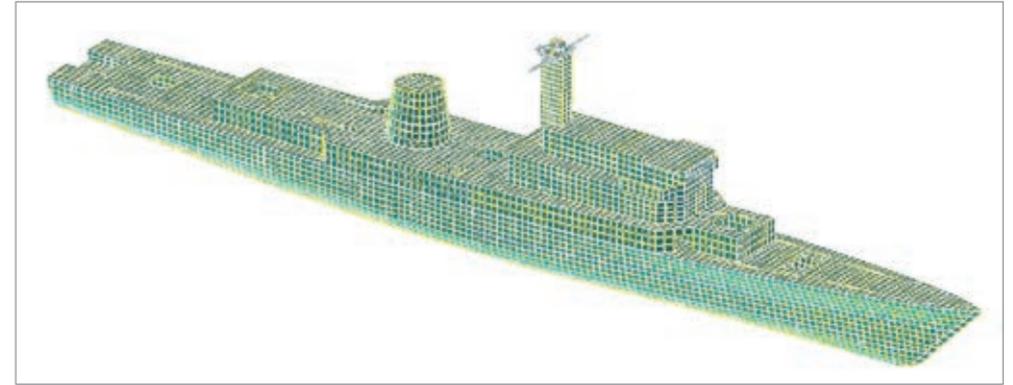
설계하중 (Design load)	입사각도 (Heading angle)	파장 (Wave length)	설계값 (Design value)	설계파고 (Design wave height)
수직굽힘모멘트 (Vertical bending moment)	180°	65.37m	83,824 kN-m	10.60m
수평굽힘모멘트 (Horizontal bending moment)	120°	43.81m	18,722 kN-m	4.53m
비틀림모멘트 (Torsion moment)	60°	65.37m	13,757 kN-m	8.55m
수직가속도 (Vertical acceleration)	120°	48.75m	14.71 m/sec ²	6.92m
압력 (Pressure)	90°	34.24m	75.92 kPa	6.67m

<표 부록 VII-3-1> 천안함 직접구조해석을 위한 설계파 선정 결과

4. 구조해석

1) 구조해석 모델 및 허용응력 기준

천안함의 구조해석을 위한 유한요소 모델의 범위는 함의 전폭과 전장에 대하여 상부 구조물



<그림 부록 VII-4-1> 3D 구조해석 모델

Mild steel	항복응력 (σ_Y)	허용응력 (σ_e)	AL 5083, H116	Yield Stress (σ_Y)	Allowable stress (σ_e)
중강도부재 (Longi. Member)	235 MPa	200 MPa	중강도부재 (Longi. Member)	215 MPa	127 MPa
횡강도부재 (Trans. Member)	235 MPa	177 MPa	횡강도부재 (Trans. Member)	215 MPa	

<표 부록 VII-4-1> 주 선체구조 허용응력

<표 부록 VII-4-2> 상부구조 허용응력

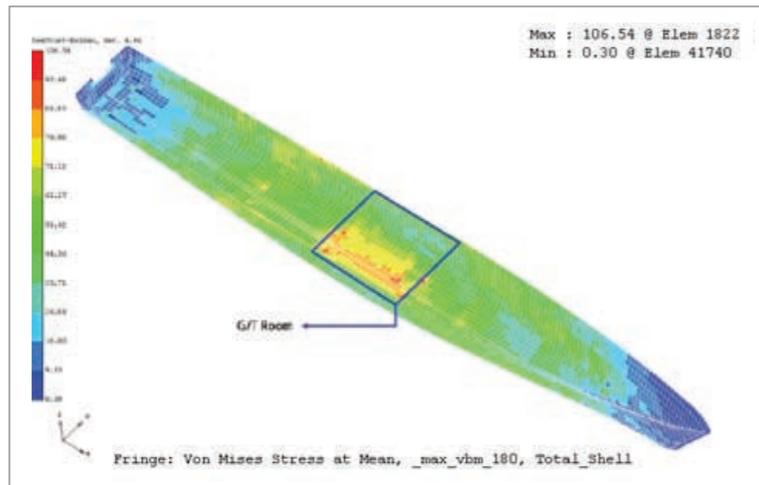
과 연돌 및 마스트를 포함한 모든 선체 구조물로 구성하였으며, 연강(Mild steel) 재질인 주 선체구조에 대한 구조해석 결과는 한국 해군의 함정 설계/건조 기준에 따른 허용응력 기준에 따르고, 알루미늄 재질인 상부구조에 대한 구조해석 결과는 한국선급 고속경구조선 규칙에 따른 허용응력 기준에 따라 평가하였다.

2) 구조해석 결과 및 평가

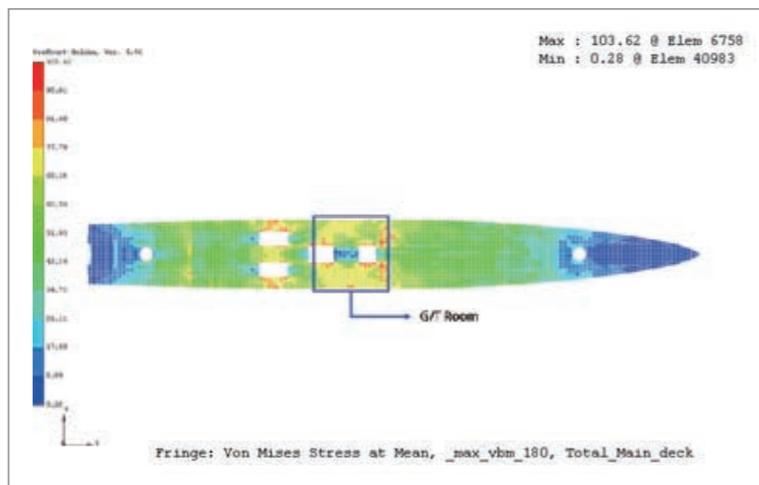
직접구조해석은 최대하중을 발생시키는 각각의 설계파(수직굽힘모멘트, 수평굽힘모멘트, 비틀림모멘트, 수직가속도, 파랑압력이 최대로 되는 경우의 설계파를 각각 선정한 것)에 대하여 수행하였고, 각 구조 부재별 허용응력의 최대값을 기준으로 평가하였다. 모든 설계파에 대해 직접 구조해석한 결과 천안함의 경우 수직굽힘모멘트가 지배적인 하중성분인 것으로 분석되었다. 따라서 이하의 결과는 수직굽힘모멘트에 대한 것만 수록하였다.

(1) 항복강도 평가(Yield strength assessment)

주요 구조인 외판과 주갑판에서의 해석 결과를 <그림 부록 VII-4-2>와 <그림 부록 VII-4-3>에 나타내었다. <표 부록 VII-4-3>에는 주갑판, 외판 등 주요 종강도 부재와 격벽, 웹 프레임, 상부구조에서의 최대 발생응력을 허용응력과 대비하여 나타내었다. <표 부록 VII-4-3>에 볼 수 있듯이 모든 구조 부재에서 허용응력 이내의 응력이 발생했으며, 특히 외판과 주갑판 등 주요 구조부재는 기준치 대비 최대 약 50% 정도 수준으로 항복강도 평가 기준을 충분히 만족했다.



<그림 부록 VII-4-2> 외판(Shell plate) 구조해석 결과



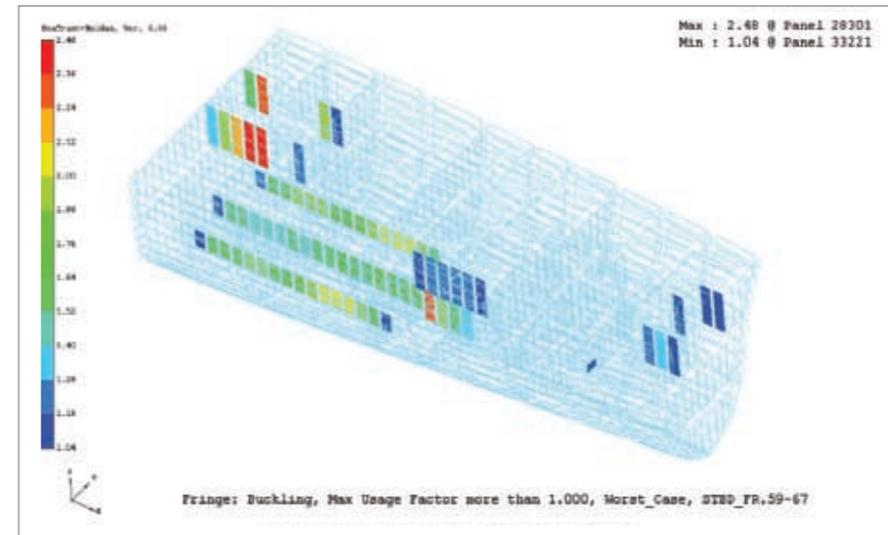
<그림 부록 VII-4-3> 주갑판(Main deck) 구조해석 결과

대상 부재	재질	허용응력 (MPa)	발생 최대 응력(MPa)	비고
O-2 Deck	AL ²¹⁾	127	20.0	16% 만족
O-1 Deck	AL	127	77.6	61% 만족
Main deck	MS ²²⁾	200	103.62	52% 만족
1st Platform deck	MS	200	42.14	21% 만족
2nd Platform deck	MS	200	44.84	22% 만족
Shell	MS	200	106.54	53% 만족
FR.39 BHD	MS	177	52.8	30% 만족
FR. 77 Web frame	MS	177	152	86% 만족

<표 부록 VII-4-3> 구조 부재별 응력평가

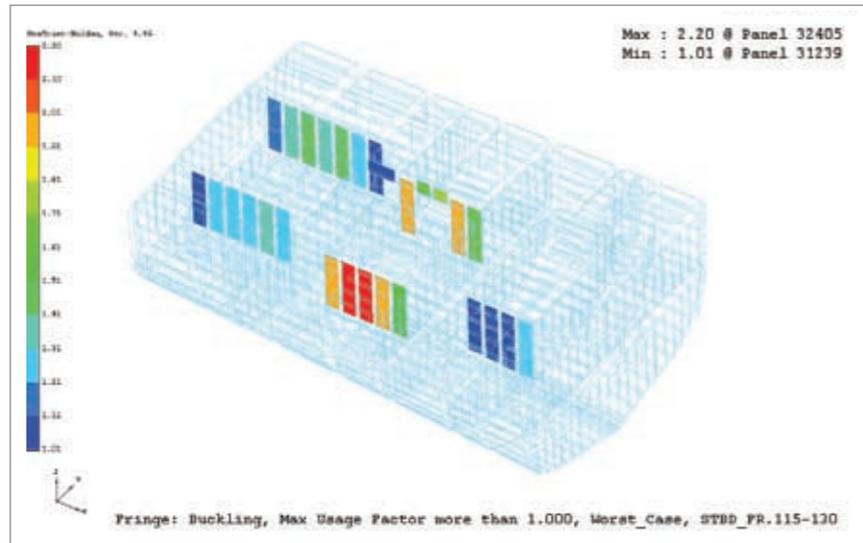
(2) 좌굴강도 평가(Buckling strength assessment)

천안함의 좌굴강도 평가는 함정설계/건조 기준(Steel)에 의한 평가 방법을 적용하였다. 전선 구조해석을 통해 얻은 응력을 이용하여 주요 구조 부재의 평판에 작용하는 압축응력과 전단 응력에 대한 대표적인 좌굴강도 평가 결과를 <그림 부록 VII-4-4>, <그림 부록 VII-4-5> 및 <그림 부록 VII-4-6>에 나타내었다. 평가 결과 함정 중앙부 부분에는 좌굴 발생의 가능성이



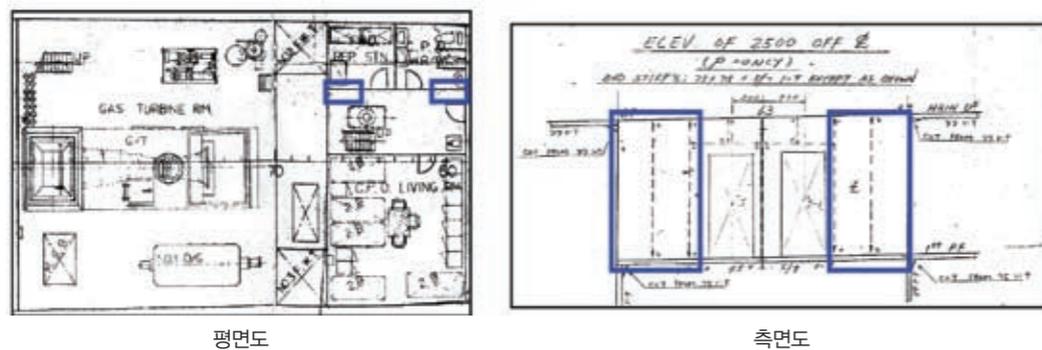
<그림 부록 VII-4-4> 좌굴강도 평가 결과 : 프레임 27~프레임 67

21) AL : Aluminum(알루미늄 합금).
22) MS : MildSteel(연강).



〈그림 부록 VII-4-5〉 좌굴강도 평가 결과 : 프레임 106~프레임 130

없는 것으로 판단되며, 함수 및 함미의 부분 종격벽(Partial longitudinal bulkhead)에 일부 좌굴이 발생할 가능성이 있는 것으로 나타났다. 해당 구조 부재는 격실의 구획을 나누기 위한 비내력 격벽이므로 함 전체의 종강도(Hull girder strength)에는 영향을 주지 않는다. 격실구획을 나누기 위한 부분 종격벽의 예를 〈그림 부록 VII-4-6〉에 나타내었다.



〈그림 부록 VII-4-6〉 부분 종격벽의 위치 및 형태(예)

5. 해석 결과

함정 수명 25~30년 기준으로 극한하중을 발생시키는 최대 설계파(파고 10.6m)에 대하여 천안함의 직접구조해석을 수행한 결과 항복강도(Yield strength) 기준을 충분히 만족했다. 함수 및 함미의 부분 종격벽에 일부 좌굴이 발생할 가능성이 있는 것으로 평가되었으나, 좌굴 발생 가능성이 있다고 평가된 종격벽은 구획구조로서 비내력 격벽이므로 함 강도에 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었다.

따라서 천안함 선체구조는 피격 등 비정상적인 요인이 없는 한 구조적으로 충분한 강도를 보유하고 있었다.

천안함 피격사건

합동조사결과 보고서

1판 1쇄 발행 | 2010년 9월 10일

발행인 | 대한민국 국방부

편집제작판매 대행처 | 명진출판(주)

판매관련 문의 | 명진출판(주) (02)326-0026(대)

ISBN 978-89-7677-711-9 03300

책값은 뒷표지에 있습니다. 파본은 바꾸어 드립니다.