

합동조사결과 보고서

천안함 피격사건

합동조사결과 보고서



천안함 피격사건



대한민국 국방부

머리말

2010년 3월 26일 천안함이 **북한** 잠수함정의 기습적인 어뢰 공격을 받아 침몰하고, 우리 해군 장병 46명이 산화하는 초유의 사태가 발생하였습니다.

국방부는 천안함의 침몰원인과 행위자를 명백하게 규명하기 위하여 3월 31일 민·군 합동조사단을 구성하였습니다. 민·군 합동조사단은 객관성과 신뢰성을 확보하기 위하여 민간 전문가와 함께 외국 전문가까지도 참여시켜 조사를 진행하였습니다.

민·군 합동조사단은 서해 사건현장에서 숙식을 함께 하면서 험난한 기상과 조류 등 악조건 속에서도 객관적이고 과학적인 조사 활동을 실시하여 천안함이 **북한**의 소형 잠수함정에서 발사된 어뢰에 의해 침몰되었음을 밝혀내고 5월 20일 이를 발표한 바 있습니다.

민·군 합동조사단은 6월 14일 유엔 안보리에 조사결과를 설명하였으며, 그 결과 '**북한**이 천안함을 공격했다는 사실을 인정하고 이를 규탄'하는 의장성명이 만장일치로 채택되었습니다.

그럼에도 불구하고 **북한**은 사실을 인정하지 않고 오히려 우리의 조작극이라고 비난하면서 대남위협을 수위를 높이고 있습니다. 우리 사회 일각에서도 민·군 합동조사단의 조사 결과에 대해 자신들의 입장에 따라 사실과 다른 의혹을 끊임없이 제기하고 유언비어를 유포하는 등 무책임한 언행을 하고 있는 것이 현실입니다.

따라서 국방부는 우리 국민과 국제사회에 천안함 피격사건의 진실을 올바르게 알려 불필요한 오해와 의혹이 해소될 수 있도록 민·군 합동조사단의 조사 결과와 입증 자료들을 수록한 《천안함 피격사건 합동조사결과 보고서》를 한글과 영문으로 발간하게 되었습니다.

보고서는 개요, 침몰요인 판단 결과, 분야별 세부분석 결과, 결론순으로 구성되어 있으며, 구체적인 조사 내용과 판단 결과는 부록에 수록하였습니다. 민·군 합동조사단은 침몰의 원인을 규명하는데 있어서 선입견을 배제하기 위해 모든 침몰 가능 요인을 망라하여 조사한 전 과정을 서술하였으며, 300개 이상의 각종 그림과 도표를 활용하여 쉽게 이해할 수 있도록 정리하였습니다.

특히 4개 국가와 국내 12개 민간연구기관 및 군의 총 73명의 전문가가 과학수사·함정구조·폭발물·정보 분석 등 다양한 분야의 조사 및 보고서 작성에 적극 참여하였고, 보고서 내용에 전원이 동의하여 국제적으로 검증된 자료가 되었습니다.

본 보고서는 어뢰 공격으로 침몰된 군함의 선체를 인양하여 조사한 세계 최초의 보고서로서, 결정적 증거물(Smoking gun)인 어뢰 추진체를 수거하고 폭약성분까지 검출한 것은 어떠한 은밀한 공격행위도 증거로 남는다는 사실을 **북한**과 국제사회에 널리 알리는 계기가 되었습니다. 무엇보다 **북한**이 도발을 자행하지 못하도록 엄중히 경고하는 의미를 지니고 있습니다.

본 보고서는 이번 천안함 사태를 거울삼아 다시는 **북한**의 기습적 도발을 허용하지 않겠다는 다짐과 함께 우리 국민의 확고한 안보의식과 안보문제에는 어떤 개인·집단적 이해도 개입될 수 없음을 일깨워 주는 데 기여할 것으로 확신합니다.

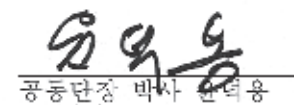
본 보고서는 군사비밀 내용이 제외되었고, 과학적·객관적으로 입증하는 것을 우선시해야 하기 때문에 전문용어들을 쉽게 표현하는 데는 한계가 있었다는 점에서 아쉬움이 있음을 이해하여 주시기 바랍니다.

아무쪼록 금번에 발간한 《천안함 피격사건 합동조사결과 보고서》가 천안함 피격사건의 진실을 정확히 이해하고 그 동안 제기되어 왔던 모든 오해와 의혹이 해소되는 계기가 되기를 바라며, 평소 이 분야에 관심 있는 일반 국민들과 국내외 학자 및 언론인 모두에게 유용한 자료가 되기를 소망합니다.

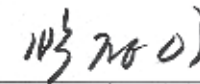
2010년 9월
민·군 합동조사단

다국적 민·군 합동조사단은 2010년 3월 26일 21:22경 대한민국 백령도 근해에서 발생한 천안함 피격사건의 원인을 조사하였다. 아래 서명자들은 조사에 참여한 각국 조사팀의 대표로서 이 보고서의 내용에 동의하며 아래와 같이 서명하다.

The multinational Civilian-Military Joint Investigation Group examined the cause of the attack against Republic of Korea Ship Cheonan occurred in vicinity of Baekryong Island at 2122, March 26, 2010. The undersigned are the chief representatives of each investigation team, concurring with the contents in this report.



공동단장 박사 윤덕용
Co-Chairman Dr. Yoon, Duk-Yong

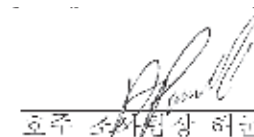


공동단장 육군대장 박정이
Co-Chairman ROK Army GEN Park, Jung-I



미국 조사팀장 해군소장(전) 토마스 에클스
US Investigation Team Leader RADM(S) Thomas J. Eccles, USN


As Senior US Representative to the Republic of Korea Joint Investigation Group, I concur with the finding and conclusions of this report.



호주 수사팀장 허킨중령 이브리 파워

Australian Investigation Team Leader CDR Anthony R. Powell, RAN

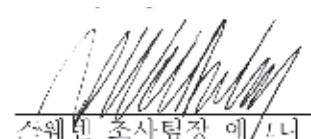
As Senior Australian Representative to the Republic of Korea Joint Investigation Group, I concur with the finding and conclusions of this report.



영국 조사팀장 데이비드 맨리

UK Investigation Team Leader Mr. David W. Manley, RCNC

As the Senior British Representative to the Republic of Korea Joint Investigation Group, I concur with the findings and conclusions of this report.



스웨덴 조사팀장 에그네 위드홀름

Swedish Investigation Team Leader Mr. Agne Widholm

As Senior Swedish Representative in support of the Republic of Korea Joint Investigation Group, I concur with the finding and conclusions of this report relevant to the Swedish team's participation.

머리말	4
요약	24
1장. 개요	32
1. 사건 개요	34
2. 상황 전개	35
3. 조사 활동	38
4. 천안함 구조 및 형태	45
2장. 침몰요인 판단 결과	46
1. 비(非)폭발	48
2. 내부 폭발	57
3. 외부 폭발	71
3장. 분야별 세부분석 결과	94
1. 형상 및 흔적 분석	96
2. 증거물 분석	104
3. 생존자 진술 분석	121
4. 생존자 환자 상태 및 시체검안 결과	128
5. 폭발유형 분석	132
6. 수중폭발 선체 충격 해석	141
7. 침몰 해역 분석	176
8. 어뢰 추진동력장치	190
4장. 결론	202
부록	
I. CCTV 복원 및 분석 결과	208
II. 수중폭발 현상	212
III. 폭발방향 및 위치 판단 결과	226
IV. 폭약량 및 폭발 수심 판단 결과	234
V. 흡착물질 분석 결과	240
VI. 복원성 분석 결과	266
VII. 선체 기본강도 해석 결과	282

표 목차


〈표 1장-3-1〉	합동조사단 편성 기구도	38
〈표 2장-1-1〉	선체 초음파검사 결과(‘10. 4. 30)	56
〈표 2장-2-1〉	엔진 폭발 가능성 확인 결과	64
〈표 2장-2-2〉	디젤엔진 운용 연도 및 계획정비 이행 실태	64
〈표 2장-2-3〉	최근 3년간 디젤엔진 정비 내역	64
〈표 2장-2-4〉	천안함 가스터빈 손상 원인 및 현상	67
〈표 2장-2-5〉	가스터빈에 의한 폭발여부 확인 결과	68
〈표 2장-2-6〉	최근 3년간(‘07~’09년) 정비 내역	68
〈표 2장-3-1〉	어뢰 탐지방식 및 특성	81
〈표 2장-3-2〉	신관 종류 및 작동원리	83
〈표 3장-2-1〉	증거물 현황	111
〈표 3장-2-2〉	증거물 감정 현황	112
〈표 3장-2-3〉	단계별 증거물 수거 및 채증·감정 현황	112
〈표 3장-2-4〉	폭약성분 분석 절차	113
〈표 3장-2-5〉	폭약 분자구조	116
〈표 3장-2-6〉	주요 해상무기 폭약성분	116
〈표 3장-2-7〉	아군 탄종별 폭약성분	117
〈표 3장-4-1〉	환자 현황	130
〈표 3장-4-2〉	시신 36구 검안 및 X선 판독 결과	131
〈표 3장-6-1〉	천안함 주요 제원	143
〈표 3장-6-2〉	만재 시 주선회의 상하방향 고유진동 해석 결과	146
〈표 3장-6-3〉	단면별 최종 굽힘모멘트	148
〈표 3장-7-1〉	백령도 근해 모든 해도	178
〈표 3장-7-2〉	해군 탐색구조단 사건 발생 해역 해저 접촉물 현황	179
〈표 3장-7-3〉	한국해양연구원 조사선 사건 발생 해역 해저 접촉물 현황	180
〈표 3장-8-1〉	특수그물 운용 수거물 및 채증 현황	193
〈표 3장-8-2〉	특수그물 운용 수거작전 실시 현황	194
〈표 부록 I-3-1〉	CCTV 복원 내용	210
〈표 부록 II-1-1〉	수중폭발된 탄두의 에너지 배분 : 알루미늄이 함유되지 않은 이상적인 화약	213
〈표 부록 II-1-2〉	화약에 대한 충격파 관계식의 상수	215
〈표 부록 II-1-3〉	충격파와 버블 전환계수(Conversion factors)	215
〈표 부록 II-1-4〉	특정 화약에 대한 버블 관련 상수	217
〈표 부록 IV-2-1〉	해석 조건(좌현 3m)	237
〈표 부록 IV-2-2〉	충격파 압력 비교	237
〈표 부록 IV-4-1〉	시뮬레이션 결과	239
〈표 부록 V-2-1〉	흡착물질의 채집 부위	242
〈표 부록 V-2-2〉	CHNS 원소 분석 결과	246
〈표 부록 V-2-3〉	흡착물질의 구성성분 및 함량비	248
〈표 부록 V-3-1〉	흡착물질(함수 및 연돌)의 채집 부위	248
〈표 부록 V-3-2〉	CHNS 원소 분석 결과	250
〈표 부록 V-3-3〉	흡착물질(함수 및 연돌)의 구성성분 및 함량비	252
〈표 부록 V-4-1〉	흡착물질의 채집 부위	252
〈표 부록 V-4-2〉	흡착물질(프로펠러 및 모터)의 구성성분 및 함량비	255
〈표 부록 V-6-1〉	온도 구간별 흡착물질의 산소/알루미늄 함량 변화	259
〈표 부록 VI-3-1〉	천안함의 손상 전 정적 복원성 평가 결과	269
〈표 부록 VI-3-2〉	천안함의 손상 전 동적 복원성 평가 결과	270
〈표 부록 VI-4-1〉	함중별 손상 복원성 기준	270
〈표 부록 VI-4-2〉	Case 1에 대한 복원성 평가 결과	272
〈표 부록 VI-4-3〉	Case 2에 대한 복원성 평가 결과	272

〈표 부록 VI-4-4〉	Case 3에 대한 복원성 평가 결과	273
〈표 부록 VI-4-5〉	Case 4에 대한 복원성 평가 결과	274
〈표 부록 VI-4-6〉	Case 5에 대한 복원성 평가 결과	275
〈표 부록 VI-4-7〉	Case 6에 대한 복원성 평가 결과	276
〈표 부록 VI-5-1〉	절단 후 초기의 함수·함미부 복원능력 판단	277
〈표 부록 VII-3-1〉	천안함 직접구조해석을 위한 설계파 산정 결과	284
〈표 부록 VII-4-1〉	주 선체구조 허용응력	285
〈표 부록 VII-4-2〉	상부구조 허용응력	285
〈표 부록 VII-4-3〉	구조 부재별 응력평가	287

그림 목차

〈그림 요약-1〉	함수와 함미 절단부위에 대한 3차원 레이저 스캔	27
〈그림 요약-2〉	충격파 및 버블효과에 의한 흔적	27
〈그림 요약-3〉	어뢰 설계도와 수거한 어뢰 추진동력장치	29
〈그림 요약-4〉	어뢰 추진동력장치의 추진후부	29
〈그림 요약-5〉	북한 시험용 어뢰의 표기	29
〈그림 요약-6〉	북한 소형 잠수함정의 침투경로 추정	30
〈그림 요약-7〉	북한산 CHT-02D 어뢰	30
〈그림 1장-1-1〉	천안함 침몰사건 발생 위치	34
〈그림 1장-1-2〉	천안함 구조	45
〈그림 2장-1-1〉	천안함 인양 시 소나돔	49
〈그림 2장-1-2〉	천안함 인양 후 프로펠러 모습	49
〈그림 2장-1-3〉	선저 외판 패널의 소성 처짐(디싱) 형상	49
〈그림 2장-1-4〉	함수와 함미 절단부위에 대한 3차원 레이저 스캔	50
〈그림 2장-1-5〉	가스터빈실 선저 외판	50
〈그림 2장-1-6〉	천안함 절단면 파괴특성 분석 결과	51
〈그림 2장-1-7〉	천안함 우현 프로펠러 형상	51
〈그림 2장-1-8〉	천안함 침몰 해역 해저지형 탐사 결과	52
〈그림 2장-1-9〉	천안함 절단면 형상	53
〈그림 2장-1-10〉	함수·함미 절단면 형상	55
〈그림 2장-2-1〉	천안함 절단 형상	58
〈그림 2장-2-2〉	함수 및 함미 선저 상태	58
〈그림 2장-2-3〉	인양 후 탄약고, 탄약상자 상태	59
〈그림 2장-2-4〉	천안함 탄약 저장 위치	59
〈그림 2장-2-5〉	천안함 연료탱크 위치	61
〈그림 2장-2-6〉	천안함 디젤엔진실 위치	63
〈그림 2장-2-7〉	천안함 가스터빈실 위치	67
〈그림 2장-2-8〉	천안함 가스터빈과 디젤엔진 및 추진축 위치	67
〈그림 2장-2-9〉	가스터빈 보호격실	69
〈그림 2장-2-10〉	가스터빈실과 디젤엔진실 간 격벽 상태	70
〈그림 2장-2-11〉	사건 발생 직전 가스터빈실 모습(CCTV 영상)	70
〈그림 2장-3-1〉	폭발 위치 및 접촉 여부에 따른 외부폭발 유형	71
〈그림 2장-3-2〉	함수 및 함미 절단부위	73
〈그림 2장-3-3〉	함미부분 좌현 선저 하에서 우현 상방향으로 절단된 모습	73
〈그림 2장-3-4〉	천안함 절단면 파괴 형태	73
〈그림 2장-3-5〉	기뢰 일반 구성도	75

〈그림 2장-3-6〉	부설 위치 및 방법에 따른 기뢰 종류	76
〈그림 2장-3-7〉	사건 지역 해저지형 및 수심	77
〈그림 2장-3-8〉	사건 당일 조류 및 조위도	78
〈그림 2장-3-9〉	조류 속도에 따른 계류기뢰 편류 현황	78
〈그림 2장-3-10〉	어뢰의 일반적인 구성	80
〈그림 2장-3-11〉	경어뢰 및 중어뢰 운용개념도	81
〈그림 2장-3-12〉	수상함 항적	82
〈그림 2장-3-13〉	항적추적어뢰의 수상함 항적추적원리	82
〈그림 2장-3-14〉	자기감응신관의 작동원리	83
〈그림 2장-3-15〉	음향감응신관의 작동원리	84
〈그림 2장-3-16〉	천안함 절단 3차원 레이저 스캔 형상	85
〈그림 2장-3-17〉	육상조종기뢰 설치 지역	89
〈그림 2장-3-18〉	육상조종기뢰 형상 및 재원	90
〈그림 2장-3-19〉	도전선 및 철제 지지대 형상	90
〈그림 2장-3-20〉	도전선 형상	91
〈그림 2장-3-21〉	MK-6 폭뢰 폭발 절차	91
〈그림 2장-3-22〉	육상조종기뢰 폭발 절차	92
〈그림 3장-1-1〉	천안함의 전체 모양	96
〈그림 3장-1-2〉	형상 분석	98
〈그림 3장-1-3〉	선체 우현 절단부위 및 옹골 변형 현황	99
〈그림 3장-1-4〉	선체 우현 절단부위 형상	99
〈그림 3장-1-5〉	선체 좌현 절단부위 형상	100
〈그림 3장-1-6〉	함미 절단면 변형형태	100
〈그림 3장-1-7〉	함수 절단면 변형형태	101
〈그림 3장-1-8〉	주갑판 변형형태	101
〈그림 3장-1-9〉	좌현 절단부위 하부 형상	102
〈그림 3장-1-10〉	흔적 분석	103
〈그림 3장-2-1〉	폭약성분이 검출된 폭발원점지역 토양 및 수거 위치	104
〈그림 3장-2-2〉	선체 인양 시 바지선 위 채증 활동	104
〈그림 3장-2-3〉	함미 채증 장면	105
〈그림 3장-2-4〉	함수 채증 장면	106
〈그림 3장-2-5〉	연돌 채증 장면	107
〈그림 3장-2-6〉	1구역 선체 식별 및 인양 현황	108
〈그림 3장-2-7〉	2구역 선체 식별 및 인양 현황	109
〈그림 3장-2-8〉	가스터빈실 및 가스터빈 형상	109
〈그림 3장-2-9〉	인양된 가스터빈실 선저 외판	110
〈그림 3장-2-10〉	인양된 가스터빈	111
〈그림 3장-2-11〉	함수부위 폭약 검출 결과	114
〈그림 3장-2-12〉	연돌부위 폭약 검출 결과	114
〈그림 3장-2-13〉	가스터빈실 폭약 검출 결과	115
〈그림 3장-2-14〉	해저 수거물 폭약 검출 결과	115
〈그림 3장-2-15〉	천안함 선체 재질	119
〈그림 3장-2-16〉	북한 시험용 경어뢰 시편 재질	119
〈그림 3장-2-17〉	채증 증거물 분석 결과	120
〈그림 3장-4-1〉	천안함 승조원 위치	129
〈그림 3장-5-1〉	선체 밑에 형성된 버블의 시간에 따른 물리적 현상	133
〈그림 3장-5-2〉	사건 당일 감지된 지진파 및 공중음파	134
〈그림 3장-5-3〉	버블 주기에 따른 폭약량 및 수심	134
〈그림 3장-5-4〉	천안함 선저 디싱 형태와 유사한 폭발유형	135
〈그림 3장-5-5〉	천안함 폭발유형 판단 결과	135
〈그림 3장-5-6〉	절단면의 시편 채취 위치	137
〈그림 3장-5-7〉	폭발 가능 위치	137

〈그림 3장-5-8〉	천안함의 피해 형태	138
〈그림 3장-5-9〉	비교 요소	138
〈그림 3장-5-10〉	흡착물질의 전자현미경 사진	139
〈그림 3장-5-11〉	흡착물질의 에너지 분광 분석 결과	139
〈그림 3장-5-12〉	흡착물질의 X선 회절 분석 결과	140
〈그림 3장-6-1〉	휘핑 해석을 위한 수중폭발 조건	143
〈그림 3장-6-2〉	보유추 휘핑 해석 모델	144
〈그림 3장-6-3〉	만재 시 선체 길이방향 중량 분포	144
〈그림 3장-6-4〉	폭약 중량별 폭발거리에 따른 천안함 중앙부에서의 휘핑 굽힘모멘트 시간이력	147
〈그림 3장-6-5〉	최종 굽힘모멘트 계산 대상 단면 위치	147
〈그림 3장-6-6〉	단면별 곡률-굽힘모멘트	148
〈그림 3장-6-7〉	폭약 중량별 휘핑 굽힘모멘트와 최종 굽힘모멘트 비교	149
〈그림 3장-6-8〉	근접 수중폭발 충격 해석을 위한 수중폭발 조건	150
〈그림 3장-6-9〉	전체 유한요소 해석 모델	151
〈그림 3장-6-10〉	선체에 대한 유한요소 해석 모델	152
〈그림 3장-6-11〉	프레임 50~프레임 106 사이의 선체에 대한 유한요소 해석 모델	152
〈그림 3장-6-12〉	가스터빈 및 발전기에 대한 해석 모델	153
〈그림 3장-6-13〉	폭약, 해수 및 공기에 대한 해석 모델	153
〈그림 3장-6-14〉	TNT 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : 가스터빈실 손상	155, 156
〈그림 3장-6-15〉	TNT 360kg이 수심 9m에서 폭발한 경우의 해석 결과(Side view) : 선체 응답 및 버블 거동	157, 158
〈그림 3장-6-16〉	TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Side view	159, 160
〈그림 3장-6-17〉	TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : 확대 Side view	161, 162
〈그림 3장-6-18〉	TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Section view	163, 164
〈그림 3장-6-19〉	TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal view	165, 166
〈그림 3장-6-20〉	TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal top view	167, 168
〈그림 3장-6-21〉	TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Internal side view	169, 170
〈그림 3장-6-22〉	TNT 360kg이 수심 7m에서 폭발한 경우의 해석 결과 : Deck view	171, 172
〈그림 3장-6-23〉	예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함수부(Side view)	173
〈그림 3장-6-24〉	예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함수부(Front view)	174
〈그림 3장-6-25〉	예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함수부(Bottom view)	174
〈그림 3장-6-26〉	예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함미부(Side view)	174
〈그림 3장-6-27〉	예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함미부(Front view)	175
〈그림 3장-6-28〉	예측된 손상 결과와 실제 손상상태 비교 : 함미부(Bottom view)	175
〈그림 3장-7-1〉	천안함 침몰 위치	177
〈그림 3장-7-2〉	북한 잠수함정 예상 침투로	177
〈그림 3장-7-3〉	한국해양연구원 조사선 사건 발생 해역 해저지형 탐색 구역	179
〈그림 3장-7-4〉	사건 발생 해역 해저지형 탐색 결과	180
〈그림 3장-7-5〉	미상침선 부근에서 발견된 철 구조물	181
〈그림 3장-7-6〉	미상침선 발견 해역 해저 지형	181
〈그림 3장-7-7〉	사건 발생 해역 인근 해저 특이지형(미상 웅덩이)	182
〈그림 3장-7-8〉	해도상 백령도 근해 수중암초(홍합여)	182
〈그림 3장-7-9〉	백령도 근해 국립해양조사원 기상관측 부이 설치 현황	183
〈그림 3장-7-10〉	'軍' 작전용 조석·조류 예보체계와 기상관측 부이 실측 유속자료 비교 결과	184
〈그림 3장-7-11〉	백령도 근해에서 낙조류 및 청조류 시 조류도	184
〈그림 3장-7-12〉	3월 중 조류 및 조위도(↖: 조류의 방향·유속,  : 고조·저조의 높이)	185
〈그림 3장-7-13〉	사건 당일(3. 26) 조류 및 조위도	185
〈그림 3장-7-14〉	사건 당일(3. 26) 천안함 침로 및 속도	186
〈그림 3장-7-15〉	사건 당일(3. 26) 조류 방향 및 속도	186
〈그림 3장-7-16〉	예상 침투기지 ↔ 백령도(3. 23~26. 21:20경) 조류 시뮬레이션 결과	187
〈그림 3장-7-17〉	예상 침투기지에서 잠수함정 외해 침투 시 예상 침투로 및 조류 속도	187
〈그림 3장-7-18〉	잠수함정 최단 침투 시 예상 침투로 및 조류 속도	188
〈그림 3장-7-19〉	사건 발생 시 조류 및 어뢰 운용 예상 해역	188

〈그림 3장-7-20〉	북한 잠수함정 어뢰 공격 전술 및 사건 발생 시 수심별 조류 속도	189
〈그림 3장-7-21〉	3. 23~3. 26일간 정조 시 조류 방향 및 유속	190
〈그림 3장-8-1〉	특수그물 및 쌍끌이 어선 운용도	192
〈그림 3장-8-2〉	증거물 수거 지역	195
〈그림 3장-8-3〉	어뢰 추진동력장치 수거 및 채증	196
〈그림 3장-8-4〉	제원 축척에 맞춘 CHT-02D 어뢰의 이미지	197
〈그림 3장-8-5〉	CHT-02D 어뢰 설계도와 증거물 크기 비교	197
〈그림 3장-8-6〉	CHT-02D 어뢰 설계도와 증거물 모양 비교	198
〈그림 3장-8-7〉	어뢰 추진동력장치 및 북한 경어뢰 한글 표기	199
〈그림 3장-8-8〉	CHT-02D 실물사진 및 제원	200
〈그림 부록 I-1-1〉	천안함 CCTV 위치도	208
〈그림 부록 I-2-1〉	CCTV 복원 절차도	209
〈그림 부록 I-3-1〉	CCTV 녹화장면	211
〈그림 부록 II-1-1〉	충격파와 버블의 시간-압력 곡선	212
〈그림 부록 II-1-2〉	충격파 Parameters	214
〈그림 부록 II-1-3〉	화약(TNT)으로부터 거리 R만큼 떨어진 곳에서의 충격파 침투압력	216
〈그림 부록 II-1-4〉	몇몇 측정 위치에서의 시간에 따른 충격파 압력의 변화	216
〈그림 부록 II-1-5〉	몇몇 거리에서 폭발된 화약의 중량에 따른 θ 값의 변화	216
〈그림 부록 II-1-6〉	TNT 화약 중량에 따른 충격파의 충격량	216
〈그림 부록 II-1-7〉	수심별 화약의 폭발에 의한 기포의 진동주기(T)	217
〈그림 부록 II-1-8〉	수심별 화약의 폭발에 의한 기포의 최대반경(A_m)	218
〈그림 부록 II-1-9〉	Scaled depth에 따른 제트의 최대높이	219
〈그림 부록 II-1-10〉	Scaled depth에 따른 Column의 최대직경	219
〈그림 부록 II-1-11〉	화약의 수중폭발에 대한 알루미늄의 효과	220
〈그림 부록 II-2-1〉	버블 붕괴(Bubble collapse)	221
〈그림 부록 II-2-2〉	선체 밑에서 형성된 버블이 시간 경과에 따라 발생하는 물리적 현상	221
〈그림 부록 II-3-1〉	수중폭발 시험에 사용된 폭발 계열	222
〈그림 부록 II-3-2〉	수중폭발용 소형 수조	223
〈그림 부록 II-3-3〉	소형 수조 시험에서 고속촬영된 영상들(5,000 frames/sec)	224
〈그림 부록 II-3-4〉	소형 수조 수중폭발 시험으로부터 획득된 흰색 흡착물질	225
〈그림 부록 II-4-1〉	용골과 폭발 지점 사이의 거리(Slant distance) 변화에 따른 버블의 최대반경의 변화	225
〈그림 부록 III-1〉	전형적인 파괴형태	226
〈그림 부록 III-1-1〉	절단면의 시면 채취 위치	227
〈그림 부록 III-2-1〉	절단면 파면 형상 분석	227
〈그림 부록 III-2-2〉	함미 절단면의 파괴형태	228
〈그림 부록 III-2-3〉	함미 절단면의 파괴형태 및 압력방향	228
〈그림 부록 III-2-4〉	선체 절단면 형태	229
〈그림 부록 III-2-5〉	선체 상·하부의 절단형태 분석	230
〈그림 부록 III-3-1〉	채취 시편의 두께 측정 결과	230
〈그림 부록 III-3-2〉	채취 시편의 미세조직	231
〈그림 부록 III-3-3〉	열 영향에 의한 전형적인 미세조직 변화(예)	232
〈그림 부록 III-3-4〉	절단면 미세조직	232
〈그림 부록 III-4-1〉	어뢰 폭발 가능 위치	233
〈그림 부록 IV-1-1〉	폭발유형 분석을 위한 시뮬레이션 범위	235
〈그림 부록 IV-1-2〉	모델링 형상	235
〈그림 부록 IV-1-3〉	메쉬 형상	235
〈그림 부록 IV-1-4〉	초기 해석 형상	236
〈그림 부록 IV-2-1〉	버블 거동 현상 비교	237
〈그림 부록 IV-3-1〉	비교 요소	238
〈그림 부록 V-1-1〉	전자현미경 사진	241
〈그림 부록 V-1-2〉	에너지 분광기 분석	241
〈그림 부록 V-1-3〉	X선 회절 분석	241

〈그림 부록 V-2-1〉	흡착물질 채취 장소	243
〈그림 부록 V-2-2〉	흡착물질(함미)의 전자현미경 사진	243
〈그림 부록 V-2-3〉	흡착물질(함미)의 에너지 분광 분석	244
〈그림 부록 V-2-4〉	흡착물질(함미)의 X선 회절 분석	245
〈그림 부록 V-2-5〉	열분해 특성 분석 결과(함미)	247
〈그림 부록 V-3-1〉	흡착물질(함수 및 연돌)의 전자현미경 사진	249
〈그림 부록 V-3-2〉	흡착물질(함수 및 연돌)의 에너지 분광 분석	249
〈그림 부록 V-3-3〉	흡착물질(함수 및 연돌)의 X선 회절 분석	250
〈그림 부록 V-3-4〉	열분해 특성 분석 결과(함수 및 연돌)	252
〈그림 부록 V-4-1〉	흡착물질(프로펠러 및 모터)의 전자현미경 사진	253
〈그림 부록 V-4-2〉	흡착물질(프로펠러 및 모터)의 에너지 분광 분석	253
〈그림 부록 V-4-3〉	흡착물질(함수)의 X선 회절 분석	254
〈그림 부록 V-4-4〉	열분해 특성 분석 결과(프로펠러 및 모터)	255
〈그림 부록 V-5-1〉	폭발재의 전자현미경 사진	256
〈그림 부록 V-5-2〉	폭발재의 EDS 분석	256
〈그림 부록 V-5-3〉	폭발재의 XRD 분석	257
〈그림 부록 V-6-1〉	온도 구간별 분석 영역 내 흡착물질의 성분 함량 변화	258
〈그림 부록 V-6-2〉	온도 구간별 흡착물질 개체의 성분 함량 변화	259
〈그림 부록 V-6-3〉	흡착물질의 미세구조	260
〈그림 부록 V-7-1〉	알루미늄-산소 2성분계의 상평형도	261
〈그림 부록 V-7-2〉	비결정성 알루미늄 산화물의 함량 분석	263
〈그림 부록 V-7-3〉	열처리 전후의 흡착물질 XRD 분석	264
〈그림 부록 VI-2-1〉	함정 복원성 인자	266
〈그림 부록 VI-2-2〉	양(+)의 복원성을 갖는 상태	267
〈그림 부록 VI-2-3〉	음(-)의 복원성을 갖는 상태	267
〈그림 부록 VI-2-4〉	함정의 동적 복원력을 나타내는 복원 아암 대비 횡경사 아암 곡선	268
〈그림 부록 VI-3-1〉	천안함의 손상 전 복원 아암 곡선	268
〈그림 부록 VI-3-2〉	천안함의 복원 아암 대비 횡경사 아암 곡선	269
〈그림 부록 VI-4-1〉	2구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 1)	271
〈그림 부록 VI-4-2〉	천안함의 손상 시 동적 복원력 곡선	271
〈그림 부록 VI-4-3〉	2구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 2)	272
〈그림 부록 VI-4-4〉	3구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 3)	273
〈그림 부록 VI-4-5〉	3구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 4)	274
〈그림 부록 VI-4-6〉	4구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 5)	275
〈그림 부록 VI-4-7〉	4구획 침수 시 부양상태 계산 결과(Case 6)	276
〈그림 부록 VI-5-1〉	함수·함미 분리 직후 함수의 부양상태 계산 결과	278
〈그림 부록 VI-5-2〉	함수·함미 분리 직후 함미의 부양상태 계산 결과	278
〈그림 부록 VI-5-3〉	디젤기관실 침수 진전에 따른 함미의 부양상태 계산 결과	279
〈그림 부록 VI-5-4〉	함미 절단면 파공부위 및 주갑판 개구부	280
〈그림 부록 VI-5-5〉	함미부 침몰시간 분석 결과	280
〈그림 부록 VII-2-1〉	직접구조해석 절차	283
〈그림 부록 VII-3-1〉	3D 유체력 계산 모델 및 하중조건	283
〈그림 부록 VII-4-1〉	3D 구조해석 모델	285
〈그림 부록 VII-4-2〉	외판(Shell plate) 구조해석 결과	286
〈그림 부록 VII-4-3〉	주갑판(Main deck) 구조해석 결과	286
〈그림 부록 VII-4-4〉	좌굴강도 평가 결과 : 프레임 27~프레임 67	287
〈그림 부록 VII-4-5〉	좌굴강도 평가 결과 : 프레임 106~프레임 130	288
〈그림 부록 VII-4-6〉	부분 충격벽의 위치 및 형태(예)	288

1. 개요

국방부는 2010년 3월 26일 천안함 침몰 이후 민·군 합동조사단을 구성하여 침몰원인 규명을 위한 조사 활동에 착수하였다.

조사 과정의 투명성과 신뢰성을 제고하기 위하여 국내 12개 민간기관의 전문가 25명과 군(軍) 전문가 22명, 국회추천 위원 3명, 미국·호주·영국·스웨덴 4개국 전문가 24명으로 조사단을 편성하고, 과학수사·함정구조 및 관리·폭발유형분석·정보분석 등 4개 분과로 나누어 과학적이고 체계적인 조사를 진행하였다.

민·군 합동조사단은 선체 인양을 기준으로 단계별로 조사를 실시하여 5월 20일 최종 조사 결과를 발표하였다.

이울러 국방부는 5월 4일부터 미국·호주·캐나다·영국 등의 정보전문가가 참여한 '다국적 연합정보분석 TF'를 운영하여 행위자를 규명하였다.

2. 침몰원인 조사 결과

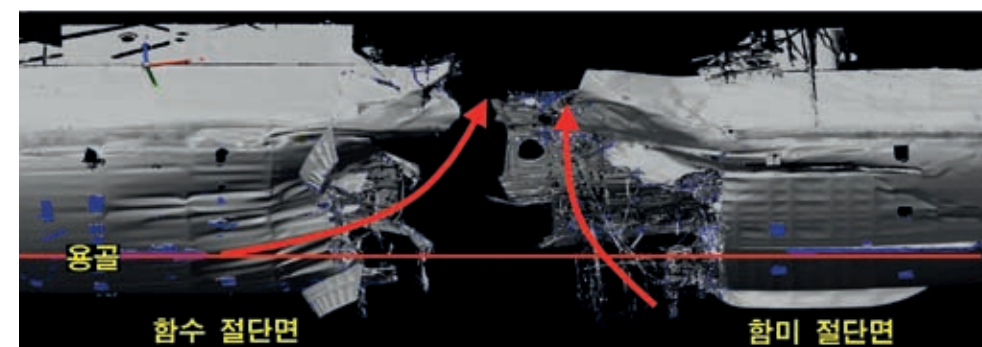
민·군 합동조사단은 인양한 함수, 함미 선체의 변형형태와 사고 해역에서 수거한 증거물들을 조사한 결과, 천안함은 **북한**에서 제조한 감응어뢰의 강력한 수중폭발에 의해 선체가 절단되어 침몰한 것으로 판단하였다.

침몰원인을 어뢰 피격으로 판단한 이유는 다음과 같다.

첫째, 선체 손상 부위를 정밀계측하여 분석한 결과 충격파와 버블효과로 인하여 선체의 용골이 함정 건조 당시와 비교하여 위쪽으로 크게 변형되었고, 외판은 급격하게 꺾이고 선체에는 파단(破斷)된 부분이 있었다. 주갑판은 가스터빈실 내 장비의 정비를 위한 대형 개구부 주위를 중심으로 파단되었고, 좌현 측이 위쪽으로 크게 변형되었으며, 절단된 가스터빈실 격벽은 크게 훼손되고 변형되었다.

〈그림 요약-1〉에서 볼 수 있듯이 함수, 함미의 선저가 아래쪽에서 위쪽으로 꺾인 것은 수중폭발이 있었다는 것을 입증한다.

둘째, 함정 내·외부의 표면을 면밀히 조사한 결과 〈그림 요약-2〉에서 볼 수 있듯이 함정이 좌우로 심하게 흔들리는 것을 방지해 주는 함안정기(艦安定器)에 나타난 강력한 압력흔적,



〈그림 요약-1〉 함수와 함미 절단부위에 대한 3차원 레이저 스캔



〈그림 요약-2〉 충격파 및 버블효과에 의한 흔적

선저 부분의 수압 및 버블흔적, 열(熱)흔적이 없는 전선의 절단, 가스터빈실 선체에 나타난 구형압력흔적 등은 수중폭발에 의한 강력한 충격파와 버블효과가 함정의 절단 및 침몰의 원인을 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 일치

하였다. 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 1.5규모로 감지되었으며, 공중음파는 11개소에서 1.1초 간격으로 2회 감지되었다. 지진파와 공중음파 분석 결과 폭발원은 동일하였으며, 이것은 수중폭발에 의한 충격파와 버블효과의 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·함수절단면 등 28개소에서, RDX는 연돌·해저 토양 등 6개소에서, TNT는 함안정기 등 2개소에서 각각 검출됨으로써 HMX, RDX, TNT가 혼합된 폭약성분임을 확인하였다.

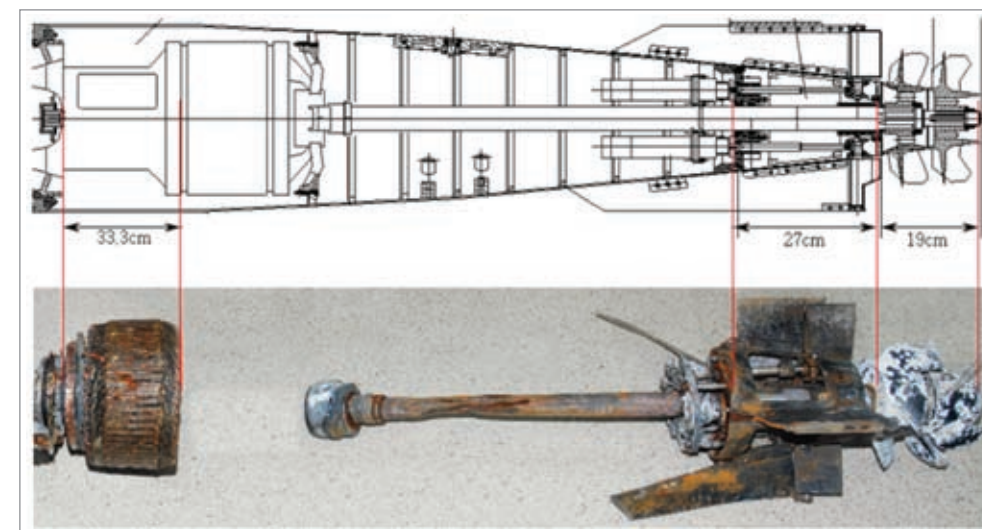
마지막으로 민·군 합동조사단은 특수그물망을 이용하여 침몰 해역에 대한 정밀탐색을 실시해 오던 중 5월 15일 침몰 해역에서 어뢰로 확증할 수 있는 결정적인 증거물로 어뢰의 추진동력장치인 프로펠러를 포함한 추진모터와 조종장치 등을 수거하였다. 이 증거물은 <그림 요약-3>과 같이 **북한**이 해외로 수출할 목적으로 배포한 어뢰 소개자료의 설계도와 크기, 모양 등이 일치하였다.

또한 천안함 선체에서 발견된 흡착물질과 어뢰 추진동력장치에서 발견된 흡착물질의 성분을 분석한 결과 동일한 성분인 것으로 확인되었다.

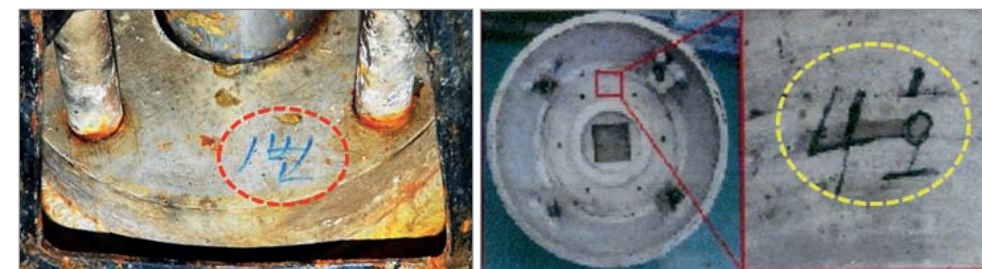
<그림 요약-4>와 <그림 요약-5>에서 보듯이 추진후부 안쪽에 '1번'이라는 한글표기는 우리가 2003년에 습득한 **북한**의 시험용 어뢰 표기방법과도 유사하였다.

이러한 모든 증거는 수거한 어뢰부품이 **북한**에서 제조되었다는 것을 확인해 주었다.

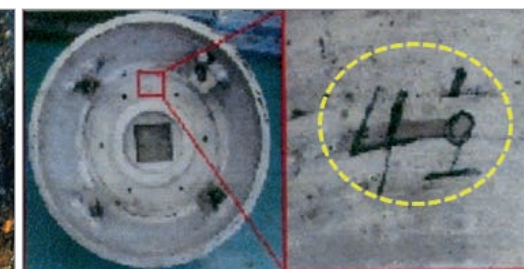
결론적으로 침몰 해역에서 수거된 어뢰 추진동력장치와 선체의 변형형태, 관련자들의 진술내용, 부상자 상태 및 시체검안, 지진파 및 공중음파 분석, 수중폭발의 시뮬레이션, 백령도 근해 조류 분석, 폭약성분 분석, 수거된 어뢰부품들의 분석 결과에 대한 국내·외 전문가들의 의견을 종합해 보면,



<그림 요약-3> 어뢰 설계도와 수거한 어뢰 추진동력장치



<그림 요약-4> 어뢰 추진동력장치의 추진후부



<그림 요약-5> 북한 시험용 어뢰의 표기

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

3. 행위자 규명 결과

한국, 미국, 호주, 캐나다, 영국 5개국의 '다국적 연합정보분석 TF'는 관련 정보를 분석하여 다음과 같은 결론을 내렸다.

북한군은 로미오급 잠수함 20여 척, 상어급 잠수함 40여 척과 연어급을 포함한 소형 잠수



〈그림 요약-6〉 북한 소형 잠수함정의 침투경로 추정



〈그림 요약-7〉 북한산 CHT-02D 어뢰

정 10여 척 등 총 70여 척의 잠수함정과 직주어뢰, 음향 및 항적유도어뢰 등 다양한 성능의 어뢰를 보유하고 있다.

또한, 서해의 북한 해군기지에서 운용되던 일부 소형 잠수함정이 천안함 공격 2~3일 전에 서해 북한 해군기지를 이탈하였다가 천안함 공격 2~3일 후에 기지로 복귀한 것이 확인되었다. 한편 다른 주변국의 잠수함정은 모두 자국의 모기지 또는 그 주변에서 활동하고 있었던 것이 확인되었다.

5월 15일 폭발 해역 인근에서 쌍끌이 어선의 특수그물망으로 수거된 어뢰의 부품들, 즉 각각 5개의 날개가 있는 순회전 및 역회전 프로펠러, 추진모터와 조종장치는 북한이 해외로 무기를 수출하기 위해 배포한 어뢰 소개자료에 제시되어 있는 CHT-02D 어뢰의 설계도면과 정확히 일치하였다.

북한산 CHT-02D 어뢰는 음향항적 및 음향수동 추적방식을 사용하며, 직경이 21인치이

고 무게가 1.7톤으로 폭발장약이 250kg에 달하는 중(重)어뢰이다.

이러한 모든 관련 사실과 비밀자료 분석에 근거하여, 천안함은 북한에서 제조·사용 중인 CHT-02D 어뢰에 의한 수중폭발의 결과로 침몰되었다는 결론에 도달하였다. 또한 이상의 증거들을 종합한 결과 이 어뢰는 북한의 소형 잠수함정으로부터 발사되었다는 것 이외에 달리 설명할 수가 없었다.

1. 사건 개요

2010년 3월 26일(금) 21:22경 백령도 인근 해상에서 정상적인 임무수행 중이던 해군 2함대 소속 천안함(초계함)이 북한의 어뢰 공격에 의해 침몰되었으며, 승조원 총 104명 중 46명이 전사하고 58명은 생존하였다.



〈그림 1장-1-1〉 천안함 침몰사건 발생 위치

- 천안함 임무수행
 - 3. 16(화) 평택항 출항, 백령도 서방 경비구역 배치
 - 3. 25(목) 서해 풍랑주의보 발효, 백령도 서방 경비구역 이탈, 대청도 동남방에서 피항
 - 3. 26(금) 06:00경 기상 호전으로 경비구역 복귀를 위한 항해 개시
 - 08:30경 경비구역에 도착하여 정상적인 작전임무 실시
 - 20:00경 당직근무 교대(29명), 기타 인원은 휴식 및 정비

2. 상황 전개

1) 사건 발생 전

천안함의 함교에 당직사관 등 7명, 전투상황실 7명, 통신실 2명, 함수포 상비 탄약고 3명, 기관조종실 7명, 유도조종실 1명, 디젤기관실 2명 등 총 29명이 당직근무 중이었고, 기타 인원은 식당, 침실 등에서 휴식 및 취침하고 있었다. 함장은 21:05경 함내 순찰을 마치고 함장실로 들어와 컴퓨터 e메일·게시판과 KNTDS²⁾ 화면을 확인 중이었다.

천안함의 당시 상황은 21:22경 근무상황에 비추어 볼 때 정상적으로 임무수행 중에 있었다.

2) 사건 발생 후

천안함의 생존자 58명은 후미의 충격과 함께 ‘팡! 팡~아양’(1~2초간) 소리를 들었고 정전과 동시에 일부 격실에 해수가 유입되면서 갑자기 우현으로 90° 기울어졌다고 진술하였다. 함장

- 21:22 천안함 침몰(발생 시간)
- 21:28 2함대사, 천안함 침몰 상황 접수
- 21:30 2함대사, 대청도 고속정편대(5척) 긴급출항 지시
- 21:31 2함대사, 속초함에 사건현장으로 전속력 항해 지시
- 21:32 2함대사, 인천해경(해경 501함, 1002함), 관공선 긴급지원 요청
- 21:34 2함대사, 긴급조치반 소집
- 21:40 2함대사, 위기조치반 소집, 전 작전요소 전투배치
- 21:47 2함대사, 덕적도 LYNX 헬기 백령도 전개 지시
- 21:56 고속정편대(3척) 현장 도착 및 인명구조 시작
- 21:57 2함대사, 대잠경계태세 발령
- 21:59 2함대사, 공군 탐색 및 구조전력 지원 요청
- 22:07 2함대사, 인천해경에 501함, 1002함 RIB³⁾ 지원 요청
- 22:10 고속정편대(2척) 현장 추가 도착 및 인명구조 시작
- 22:28 고속정편대(참수리 322호) 1명 구조(천안함 작전관 대위)
- 22:41 해경 501함, RIB 2척 현장 도착 및 인명구조 시작
- 22:50 관공선(214, 227) 인명구조 시작
- 23:13 생존자 58명 이함 및 구조 완료
- 23:13~3. 27 04:35 천안함 침몰 해역 야간 수색, 환자 후송

.....

2) KNTDS : Korea naval tactical data system(한국 해군 전술자료처리체계).

3) RIB(Rigid-hulled inflatable boat) : 고속단정, 선체 하부는 유리섬유 강화 플라스틱, 선체 상부는 팽창식 튜브로 구성, 가볍고 견고해 작은 선체에 비해 장거리 항해와 높은 파도에서도 임무수행 가능.

.....

1) NLL(Northern limit line) : 1953년 정전 직후 유엔군에서 설정한 남·북한 간 해상 경계선.

은 사건 발생 시의 충격으로 함장실에 갇혀 있다가 통신장 등 4~5명의 승조원이 내려준 소화호스를 허리에 묶고 외부 좌현갑판으로 탈출하였으며, 이때 천안함의 생존자 중 20여 명이 갑판에 모여 있었다.

함장이 함미쪽을 확인한 결과, 연돌 이후 부분이 보이지 않았고, 약한 기름냄새를 맡았으며, 승조원이 모여 있는 함수 부분은 우현으로 90° 기울어져 있는 것을 보고 필요한 조치를 하였다. 함장은 먼저 부장에게 함정 내부에 갇힌 승조원 구출을 지시하고 작전관에게 인원을 파악하고 구조함 접근 시 함에서 내릴 수 있는 곳을 확인하도록 지시하였다. 또한 중위 등 6명에게 부상을 당해 움직일 수 없는 하사(요추골절), 하사(대퇴부골절), 상사(대퇴좌상), 상사(어깨손상), 상사(늑골골절)를 부축하거나 등에 업어 구조하도록 조치하였다. 함장은 함수에 있는 생존자를 구조한 후 인원을 점검한 결과 총 58명이었으며, 고속정이 올 때까지 대기할 것을 지시하였다.

함장은 22:32~22:42경 2함대사 22전대장과 전화통화를 하였고 주요 내용은 다음과 같다 : “뒤에 맞은 것 같습니다.” “뭔거 같애?” “어뢰 같은데요, 함미가 아예 안 보입니다.” “함미? 함미 어디부터?” “연돌이 안 보여요, 고속정이나 RIB 빨리 조치해 주십시오.” “생존자는?” “58명이고 다수가 피를 흘리며, 못 일어서는 중상자가 2명입니다.”

3) 상황 보고 및 전파

21:28경 천안함 포술장은 정전으로 함내 유·무선을 이용한 통신이 제한되어 휴대전화를 사용하여 2함대 상황장교에게 구조를 요청하였다. 2함대 상황반장이 통화내용을 듣고 상황장교의 휴대전화를 넘겨받아 “배가 우측으로 넘어갔고 구조가 필요하다.”는 내용을 확인한 후 21:30경 문자정보망을 이용하여 대청도에 있던 고속정편대에 긴급출항을 지시하였다.

21:30경 2함대 당직사관은 지휘통제실에서 천안함 전투정보관으로부터 “천안함이 백령도 근해에서 ‘좌초’되어 함정이 침몰되고 있으니 빨리 지원병력을 보내 달라”는 전화를 받고, 지휘통제실장에게 보고한 후 직통전화로 인천해양경찰서 부실장에게 전화하여 “현재 백령도 서방 우리 함정에서 ‘좌초되었다’는 연락이 왔는데 일단 급한 상황이니 인근에 있는 해경 501함, 1002함을 백령도 서방으로 빨리 보내 달라”고 요청하였다.⁴⁾

.....

4) 상황 발생 초기 경황이 없어 생존자 일부가 ‘좌초’ 등 정확한 용어 사용이 되지 않은 상태로 보고.

인천해양경찰서 부실장은 즉시 대청도 남방 해역에 있던 501함과 소청도 남방 해역에 있던 해경 1002함에 출동할 것을 지시하였다.

21:32경 2함대 연락장교는 자신의 휴대전화로 웅진군청 소속 어업지도선 214호 선장에게 전화하여 “해군 천안함이 백령도 서방에서 침몰 중이니 구조하는 데 지원해 달라”고 요청하였으며, 어업지도선 선장은 웅진군청 담당공무원에게 사건 접수를 통보하고 21:50경에 출항하였다.

4) 승조원 구조

해군 고속정과 해경함, 관공선 등 모든 작전요소가 동원되어 총 58명을 구조하였다. 21:56에 고속정 3척이, 22:10에는 고속정 2척이 천안함에 도착하여 인명구조를 시작하였다. 고속정 편대는 천안함에 핫줄(3인치)을 결속하였고 천안함 작전관이 고속정으로 건너뛰던 중 바다로 추락하여 고속정에 의해 구조되었다.

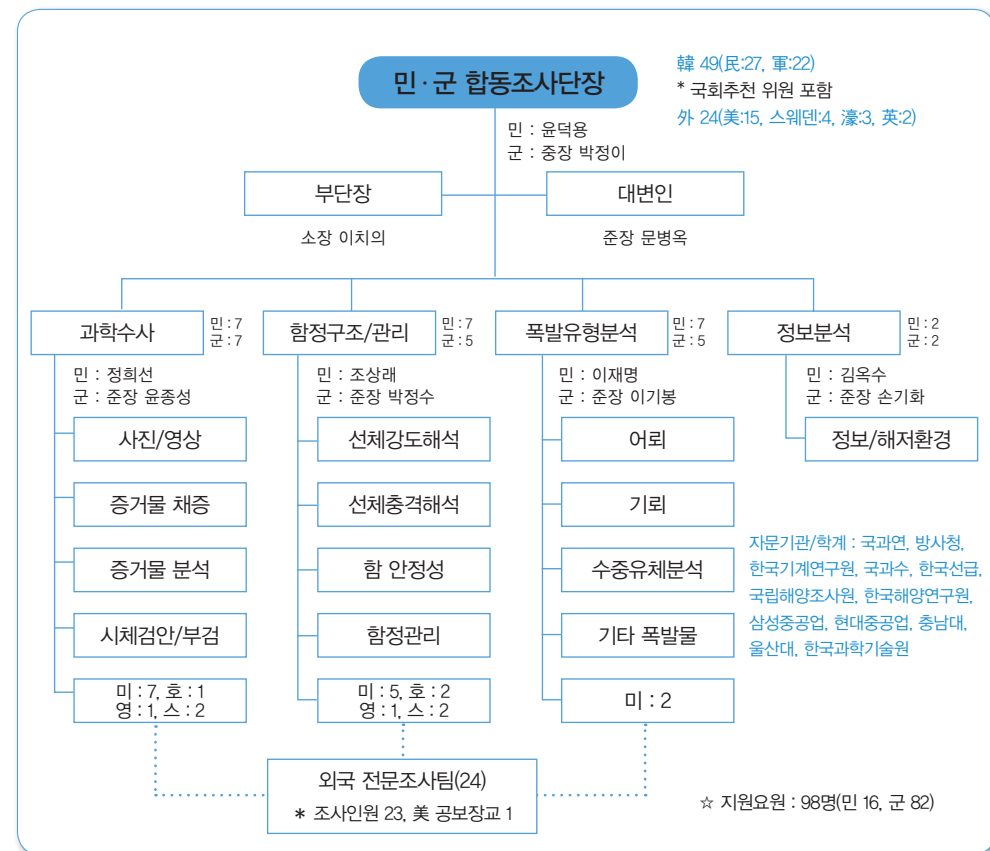
함장은 고속정을 이용할 경우에 함정이 흔들려 실족의 위험이 있다고 판단하여 해경정의 RIB 이용을 결심하였다. 22:38경 너울로 인해 천안함 함수에 있는 승조원의 추락 위험이 우려되어 고속정과 천안함 간 핫줄을 풀었고, 22:41경 해경 501함(500톤)의 2척의 RIB이 도착, 천안함에 접근하여 19명을 구조하였다. 23:08경 어업지도선 인천 227호는 환자 2명을 구조한 후 백령도로 후송하였고 잔류인원 36명은 해경 501함에 의해 구조되었다.

함장은 RIB이 도착한 후 함수 포대에 모여 있는 인원을 먼저 이송하도록 조치하면서 “환자부터 밑으로 내려가고, 중상자는 잘 부축하라.”고 지시하였다. 생존자들은 함장의 지시에 따라 환자와 이병 등이 먼저 구명정과 RIB을 이용하여 해경 501함으로 이동한 후 함장, 부장, 통신장이 마지막으로 이함하였다. 3월 26일 23:13~27일 04:35까지 천안함 침몰 지역 부근을 수색하였고 해경 501함에 탑승 중인 51명은 고속정편대로 환승하였다가, 다시 초계함으로 재환승하여 3월 27일 14:00경 평택항에 도착하였다.

3. 조사 활동

1) 민·군 합동조사단 운용

3월 31일 국방부는 최초 민·군 합동조사단을 82명(현역 59명, 관 17명, 민 6명)으로 편성하였으며, 4월 12일 73명(한국 49명, 외국 24명)으로 재편성하여 조사 활동을 실시하였다.



〈표 1장-3-1〉 합동조사단 편성 기구도

민·군 합동조사단은 6월 30일까지 약 92일간 운용되었고, 이 기간 동안 4차례(4.7, 4.15, 4.25, 5.20)에 걸쳐 조사 활동에 대한 언론발표를 하였으며, 6월 9일부터 17일(9일간)까지 유엔 안보리에 참석하여 조사 결과를 설명하였다.

민·군 합동조사단은 과학적이고 객관적인 정밀조사를 통해 침몰원인을 명확히 규명하는데 목표를 두었다. 편성 및 운영 중점은 첫째, 조사 과정의 투명성 및 신뢰성 제고를 위해

민·군 공동으로 조사단을 편성하고 둘째, 미국 등 각국의 전문가 참여로 국제적인 공신력을 확보하며 셋째, 선체 인양 전과 후로 구분하여 단계적인 조사를 실시하고 넷째, 과학적이고 체계적인 조사 활동을 실시하는 데 두었다.

2) 분과별 활동

(1) 과학수사분과

과학수사분과는 국방부조사본부, 육군수사단, 국립과학수사연구소, 국방홍보원, 외국 전문가 등 25명⁵⁾(군 7명, 민간 7명, 외국 11명)의 조사요원으로 편성하였으며 사진 및 영상 분석팀, 증거물채증팀, 증거물분석팀, 시체검안 및 부검팀 등 4개 팀으로 구분하여 백령도, 함상(독도함, 청해진함, 성인봉함 등), 2함대, 국방부조사본부, 국립과학수사연구소 등에서 활동하였다.

사건 발생 후부터 함미 인양 전까지 생존자 58명의 진술을 4차(1차 3. 27, 2차 3. 28, 3차 3. 31, 4차 4. 1)에 걸쳐 청취하였고, 이를 기초로 개인별 위치를 식별, 요도에 표시하여 천안함의 세부 배치도를 작성하고, 위치별로 환자상태를 확인하여 사건 발생 원인규명에 반영하였다.

4월 2일부터 5일까지 TOD⁶⁾ 녹화영상(DVR)의 시간대별 상황과 천안함 승조원 104명 중 휴대전화 미소유자 8명을 제외한 96명의 3월 26일 17:00부터 24:00까지의 휴대전화 통화사실 확인 등을 통하여 천안함이 정상적인 임무수행 중이었고, 21시 22분에 사건이 발생하였다는 사실을 밝혀내는 등 사건 발생 당시 상황을 명확히 규명하였다.

이후 함수·함미 침몰 지역을 1구역(함미), 2구역(함수)으로 구분하여 사진 및 영상 분석팀은 선체 수면 인양 시부터 전 인양과정을 촬영하고, 현장채증팀과 함께 절단면, 내·외부 흔적 등 증거 사진을 촬영, 선체 형상 및 흔적을 분석하여 비폭발, 내·외부 폭발 등 침몰요인을 판단하였으며, CCTV 등에 대한 디지털 포렌식⁷⁾을 실시하였다.

증거물채증팀은 크게 해역 수거물, 함수와 함미 등에서의 채증물, 해저 수거물 등 3가지로 구분하여, 해역 수거물의 경우 탐색·구조활동간 수거된 수거물 중 폭발원점 지역에서 채취한 토양을 비롯하여 파편으로 의심되는 금속조각, 그리고 폭발성분이 흡착될 가능성이 있는

5) 국내 조사요원들은 편성인원 14명, 지원인원 69명으로 총 83명이 조사 활동에 참여.

6) TOD(Thermal observation device) : 생물과 물체의 적외선을 감지하여 영상정보로 변환하는 장비, 감시·정찰 등의 목적으로 사용.

7) 디지털 포렌식(Digital forensic) : 휴대전화, PDA(Personal digital assistants), PC, 서버 등 전자증거물에서 데이터를 수집 분석하는 디지털 수사과정.

물질 등을 채증하였다. 선체 채증물의 경우, 함미 및 함수와 연돌을 인양할 때마다 바지선에서 긴급 채증물 위주의 현장감식을 실시하였으며, 선체를 평택 2함대 사령부로 이동한 후에는 함미는 3차, 함수는 2차에 걸친 정밀감식을 통하여 폭약성분을 검출하고 금속성분 분석에 필요한 증거물을 중심으로 채증하였다. 해저 수거물의 경우, 폭발로 유실되었던 가스터빈 보호덮개, 발전기 아마추어(Armature), 원동기에서 뿜, 섬유, 금속조각 등을 채증하였으며 특히, 폭발압력을 직접적으로 받았던 가스터빈실에서는 선저와 절단면 전면을 거즈를 이용하여 폭약성분, 금속조각 등을 채취하였다.

또한 특수그물을 활용하여 해저로부터 수거한 물자들은 갑판에서 1차 분류 후, 해병 6여단 예하 대대 연병장의 분리수거장으로 이동시켜, 직접적인 수작업과 지뢰(금속)탐지기를 통해 세부적으로 분리하여 증거물을 채증하였다.

증거물분석팀은 채증 위치와 채증물의 특성을 고려, 우선순위를 정하여 증거물을 분석하였으며, 화학 분석의 경우에는 액체크로마토그래피-질량분석법⁸⁾을 이용하여 HMX, RDX, TNT 등 폭약성분을 검출하였다.

물리분석의 경우에는 대조물에 의한 비교 분석을 위해 북한 시험용 어뢰 시편 3점, 천안함 선체부위별 재질과 폭발부위인 가스터빈실 부품별 성분비 등을 확인하였다.

이후 채증된 금속조각들의 재질을 주사 전자현미경 에너지 분산형 X선 분석법⁹⁾을 통해 분석하여 확보된 시편 성분과 비교하였으며, 이에 따라 관련성이 없는 금속은 배제되었고, 어뢰에 사용되는 알루미늄 및 알루미늄 합금 성분으로 판단되는 금속은 계속 검토되었다.

시체검안 및 부검팀은 민·군 법의학요원이 합동으로 바지선 및 독도함에 위치하여 시신 상태의 확인 및 수습을 지도하고 신원확인, 시체검안 및 사인규명과 함께 침몰원인에 대한 연관성을 분석하였다.

(2) 함정구조/관리분과

함정구조/관리분과는 합참, 해군본부, 방위사업청, 학계(울산대, 충남대), 조선소(현대중공업, 삼성중공업), 연구소(국방과학연구소, 한국기계연구원, 한국선급), 외국 전문가 등 22명(민 7명, 군

8) 액체크로마토그래피-질량분석법(LC-MS, Liquid chromatography-Mass spectrometry) : 이온교환, 고속액체화 등 여러 가지 방법을 통해 기체를 제외한 물질들을 분리 후 '질량분석기'를 이용, 분리된 물질의 성분을 확인하는 분석법.

9) 주사 전자현미경 에너지 분산형 X선 분석법(SEM-EDX, Scanning electron microscope-Energy dispersive x-ray) : 대상 시료에 전자를 주사 후 방출되는 전자의 파장을 분석, 그 결과물을 형상으로 만드는 현미경을 이용, 시료에 함유된 원소성분 및 함량을 측정하는 분석법.

5명, 외국 10명)의 조사요원과 지원요원 3명으로 편성하였으며 함정관리, 선체 기본강도 해석, 함 안정성, 수중폭발 선체 충격 해석 분야로 구분하여 활동하였다.

함정관리 분야는 함정 정비내역 및 선체 손상상태를 근거로 선체 노후화로 인한 피로파괴, 좌초, 충돌 등 비폭발 원인으로 인한 천안함 침몰 가능성을 분석하였다.

선체 기본강도 해석 분야는 최신 구조해석 기법을 활용하여 25~30년간 함 운용기간 중 발생할 수 있는 극한 해상상태(파고 10.06m)에서 천안함 선체구조 강도의 안정성을 분석하였다.

함 안정성 분야에서는 천안함의 복원성 설계기준과 복원성능을 분석하여 천안함이 손상되지 않은 정상상태에서는 복원성에 문제가 없음을 확인하였고, 선체 절단 후 함수·함미 각각에 대한 복원성을 분석하였다.

수중폭발 선체 충격 해석 분야는 수중폭발 해석에 앞서 국방기술품질원의 전문인력 및 계측기를 활용하여 함수·함미 선체 파손 및 변형형태를 정밀 계측, 분석하였다. 폭발유형(폭약 크기, 폭발위치)을 판단할 수 있도록 선체구조에 대한 1차원 휘핑¹⁰⁾ 해석을 실시하였으며, 폭발유형분석분과에서 도출한 폭발유형으로 3차원 수중폭발 선체 충격 해석을 수행하여 천안함 파괴경위를 공학적 시뮬레이션으로 구현하였다.

(3) 폭발유형분석분과

폭발유형분석분과는 합참, 국방과학연구소, 민간 전문가, 외국 전문가 등 14명(민 7명, 군 5명, 외국 전문가 2명)의 조사요원으로 편성하였으며 어뢰, 기뢰, 유체 분석, 기타 폭발물 등 4개 분야로 구분하여 활동하였다.

침몰원인 분석을 위해 선체 인양 전에는 내부폭발 가능성, 즉 탄약고 폭발, 연료탱크 폭발, 디젤엔진 및 가스터빈 폭발 가능성을 정밀분석하였다. 선체 인양 후에는 순항(대함)미사일 및 탄도미사일에 의한 수면/수상폭발 가능성, 어뢰, 기뢰, 육상조종기뢰에 의한 수중폭발 가능성 및 기타 급조 폭발물에 의한 침몰 가능성 등을 분석하고, 현장확인 및 조사를 병행하였다.

이러한 과정을 통해 사용 가능한 무기체계를 어뢰와 기뢰로 압축하였으며, 선체 인양 후 파단면 분석, 흡착물질 분석, 선체절단 시뮬레이션 등을 통해 직접적 수중폭발에 의해 천안함이 침몰하였다는 것을 과학적으로 증명하였다. 또한 폭약량과 수심 변화에 따른 다양한 형태의 시뮬레이션을 통해 가장 가능성 있는 폭약량과 폭발 위치를 도출하였다.

10) 휘핑(Whipping) : 보(Beam)로 유추된 선체가 버블의 팽창, 수축에 영향을 받아 급격한 힘이 생기는 현상.

(4) 정보분석분과

정보분석분과는 정보본부, 국립해양조사원, 한국해양연구원 등 4명(민 2명, 군 2명)의 조사요원과 12명의 지원요원으로 편성하였으며 해양환경 분석, 북한 도발형태 분석, 기술정보 분석, TOD 영상 분석 등 4개 분야로 구분하여 활동하였다.

침몰원인 분석을 위해 정보분석분과는 먼저 백령도 근해 해저 장애물(암초) 및 조류의 특성을 분석하였다. 해저지형은 5단계로 구분하여 순차적으로 검증하였고, 조류는 군 작전용 조류 예보체계를 이용하여 분석 및 검증하였다. TOD 영상은 사건 전·후로 구분하여 정밀분석하였고, 유형별 북한 도발 가능성은 침투자산 및 무장별로 구분하였으며, 기술정보 분석은 천안함 침몰원인 규명을 위한 채증 활동을 통해 과학수사분과를 지원하였다.

3) 조사 활동

(1) 선체 인양 전 : 3. 31~4. 14

합동조사단은 분과별 선체 인양 전 조사 활동으로 천안함의 작전경과 및 조치과정에 대해 정밀분석을 하였으며, 민간 전문가에 대한 섭외와 병행하여 관련 분야 전문가 토의를 실시하였다. 선체 인양 전 침몰요인별 판단은 내부적 요인과 외부적 요인으로 구분하였다. 내부적 침몰요인 중 선체 피로파괴의 가능성은 국방과학연구소의 분석 결과 희박하고, 정비실적으로 볼 때 정비문제의 가능성도 희박한 것으로 판단하였으며, 또한 연료탱크 폭발 가능성은 선체의 절단조건에 충족되지 않아 희박한 것으로 판단하였다.

외부적 침몰 가능요인으로 전문가의 의견 및 자체 판단한 결과 아군이 설치한 기뢰는 가능성이 희박하고, 북한의 어뢰 및 기뢰에 의한 폭발은 가능성이 있는 것으로 판단하였다. 침몰 해역의 해도를 확인한 결과 암초는 없었으며, 전문가의 의견을 고려할 때 삼각파도의 가능성도 희박하고, 인근 R/D 및 TOD 영상을 확인한 결과 선박이 없었으므로 충돌 가능성도 희박하였다.

주요 감정물(피복류, 수거물) 감정 결과 생존자의 피복류(근무복 등 9점)에서는 화약류가 검출되지 않았고, 해상 및 백령도 해안 수거물(기관실 바닥 플레이트 등 3점)에서도 화재흔이 검출되지 않았다.

(2) 함미 인양 후 : 4. 15~4. 23

합동조사단은 천안함 함미 인양 전에 현장조사팀을 57명으로 편성하여 4월 14일 독도함 현

장으로 전개하였고, 4월 15일에 함미를 인양하였으며, 4월 16일에는 함미 인양에 따른 현장 조사 결과를 발표하였다.

1차 현장조사 결과 내부폭발 가능성은 희박한 것으로 판단하였다. 그 이유는 화재로 인한 내장재의 열손상 흔적이 없었고, 전선의 피복상태가 양호하였으며, 선저의 철판이 상부로 휘어져 있었다.

좌초의 가능성도 희박한 것으로 판단하였다. 그 이유는 선저상태가 양호하였고, 함미 좌현 선저부의 절단면이 위로 휘어져 있었다.

피로파괴의 가능성도 희박하였다. 그 이유는 선저의 절단면이 위로 80도 휘어져 있었고, 가스터빈실의 후미 격벽 보강재가 위쪽으로 말려 있었다.

따라서 외부폭발의 가능성이 높은 것으로 판단하였다. 그 이유는 선체 절단면의 흔적이 선저 좌측에서 우측 위쪽으로 밀려서 절단되었으며, 절단면에 파편흔적이 없었고, 외부압력에 의해 휘어져 있었으며, 전선이 열에 녹은 것이 없었고 절단된 상태였다. 현장 채증물 중 절단부위 내장재 등 10점에 대해 화약류 및 알루미늄 성분의 검출 여부를 감정하였다.

4월 18일 함미 선체에 대한 정밀감식을 실시하여 29종 147점을 채증하였고, 4월 21일 함미 절단면에 대한 3차원 레이저 스캐닝을 실시하였다. 국방기술품질원에서 함미 선체의 손상부위에 대한 정밀측정을 실시하여 손상 위치를 계측하고 변형 형상을 조사하였다. 4월 15일부터 25일까지 함미 인양간 현장조사 및 인양 후 정밀조사를 통해 내부폭발보다는 외부폭발의 가능성이 높은 것으로 판단하였다.

(3) 함수 인양 후 : 4. 24~5. 19

합동조사단은 4월 23일 함수 인양에 따른 현장조사팀을 50명으로 편성, 백령도로 전개하였다. 4월 24일 함수를 인양하였으며, 4월 25일 함수 인양에 따른 조사 결과를 발표하였다.

2차 현장조사 결과 내부폭발의 가능성은 희박한 것으로 판단하였다. 그 이유는 탄약고 및 연료탱크의 상태가 양호하였고 절단면의 선체구조가 바깥에서 안으로 휘어져 있었으며 용골부위가 상부방향으로 휘어져 있고 늑골은 위로 말려 있었다.

좌초 가능성도 희박한 것으로 확인하였다. 그 이유는 선저상태가 양호하였고 함수선저에 위치한 소나돔¹¹⁾의 파손 흔적이 없었다.

피로파괴의 가능성도 희박한 것으로 확인하였다. 그 이유는 절단면이 외부압력에 의해 크

11) 소나돔(Sonar dome) : 음향탐지기(Sonar) 덮개, 수중탐색을 위한 음파를 통과시키기 위해 특수한 재질로 제작.

게 변형되었으며 손상상태가 매우 복잡하였다.

외부폭발 요인 중 접촉폭발의 가능성은 낮은 것으로 판단하였다. 그 이유는 선체 내·외부에 그을음 흔적이 없고, 파공된 부분도 없었으며 절단면의 전선 및 내장재가 열에 녹은 흔적이 없었다.

또한 수중폭발의 충격파와 버블효과에 의해 선체가 안으로 심하게 휘어져 있고 절단되어 있어 비접촉 외부폭발의 가능성이 높은 것으로 판단하였다.

현장조사 결과 가스터빈실 좌현 선저에서 폭발하여 우현 위쪽으로 압력이 진행된 것으로 판단하였으며 폭발 위력은 선체의 손상된 크기 및 형태를 고려하여 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

함수 절단면에 대한 3차원 레이저 스캐닝을 실시하였고, 4월 26일 미국탐의 수중폭발 내충격 해석 결과를 토의하였다. 4월 23일부터 5월 19일까지 함수 인양간 현장조사 및 인양 후 정밀조사를 통하여 수중폭발로 판단하였고, 접촉폭발보다는 비접촉폭발 가능성이 높은 것으로 판단하였다.

(4) 어뢰 추진동력장치 수거 : 5. 15

5월 10일부터 특수그물망을 이용하여 해저 정밀탐색을 실시하던 중 5월 15일에 어뢰 추진동력장치인 어뢰의 추진모터와 프로펠러 등을 수거하였다.

어뢰 추진동력장치 분석 결과 북한이 보유한 어뢰의 설계도면상의 증거물의 크기와 모양이 일치하였고, 어뢰 추진동력장치와 천안함 선체의 흡착물질 성분을 분석한 결과도 일치하였다. 또한 추진후부의 내부에 '1번'이라는 한글표기가 포항 근해에서 '03년 습득한 북한 어뢰에 '4호'라고 쓰여진 한글표기 방법과 유사하였다.

(5) 조사 결과 발표 : 5. 20

5월 20일 국방부 대회의실에서 내·외신 기자를 대상으로 민(民) 단장(윤석용 교수)이 합동조사 결과를 발표하였다.

침몰 해역에서 수거된 어뢰 추진동력장치 분석, 선체 변형형태, 관련자 진술내용, 부상자 상태 및 시체검안 결과, 지진파와 공중음파 분석 결과, 수중폭발 시뮬레이션 결과, 백령도 근해 조류 및 폭약성분 분석 결과 등에 대한 국내·외 전문가들의 의견을 종합한 결과 천안함은 어뢰에 의한 수중폭발로 인해 발생한 충격파 및 버블효과에 의해 절단되어 침몰되었고, 폭발 위치는 가스터빈실 중앙으로부터 좌현 3m, 수심 6~9m 정도 이격되었으며, 무기체계는 고성능 폭약 250kg 규모의 북한에서 제조하여 사용 중인 어뢰로 확인되었다.

4. 천안함 구조 및 형태

천안함은 (주)코리아타코마 조선공업주식회사(1999년 한진중공업 홀딩스에 합병)에서 건조되어, 1988년 해군에서 인수, 사건 발생 전까지 약 22년간 운용된 함정이다.

천안함 구조 및 형태를 살펴보면 주갑판을 중심으로 위로는 O-1 deck, O-2 deck 아래로는 1st Platform, 2nd Platform으로 구분되며, 주갑판에는 함수에서 함미쪽으로 사관실과 사관침실, 상사식당, 기관조종실, 승조원식당이 있고, O-1 deck에는 함장실, 전투상황실, 통신실, 디미스트¹²⁾, 연돌¹³⁾이 있으며, O-2 deck에는 함교와 마스트¹⁴⁾가 있다.

1st Platform에는 함수에 갑판 행정실, 항해·포술부·작전부·상사 침실이 있으며, 함미쪽에는 기관부 침실, 중사휴게실, 후부화장실, 제독소, 기관창고, 함미포 R/S, 후타실이 있고, 2nd Platform에는 함수에 병기행정실, 전자정비실, 자이로실, 함미쪽에 가스터빈실, 디젤기관실 등이 있으며, 선저에는 소나돔(Sonar dome)과 함안정기(Fin stabilizer), 빌지킬(Bilge keel)¹⁵⁾이 있다.

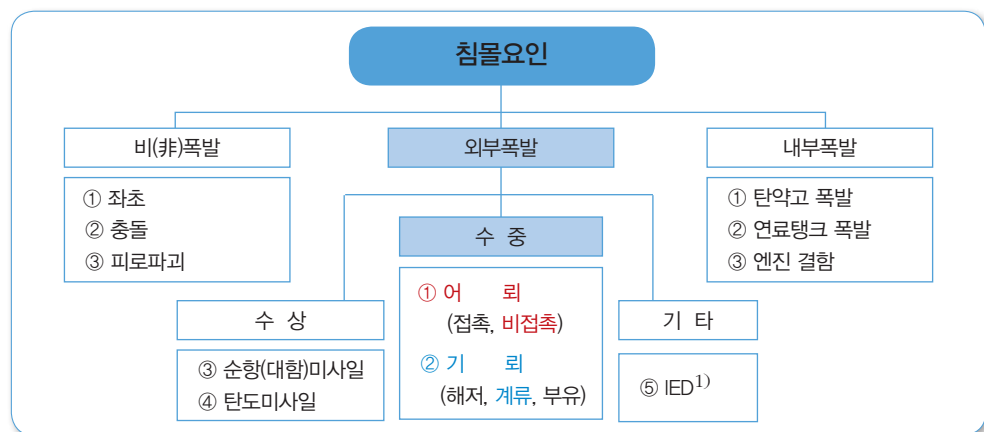


〈그림 1장-4-1〉 천안함 구조

-
- 12) 엔진이 필요로 하는 공기를 빨아 들이는 곳이며 습기와 먼지를 제거해 주는 장비.
- 13) 굴뚝으로 엔진의 배기통 역할을 수행.
- 14) 배의 중앙에 위치, 돛대를 의미.
- 15) 배의 바닥 좌우에 위치, 배의 좌우 흔들림을 감소시키는 장비.

2장

침몰요인 판단 결과



침몰요인 분석은 비폭발, 외부폭발, 내부폭발로 구분하여 분석하였으며 국제 해사기구(International maritime organization) 분석틀을 기준으로 요인별 발생 가능성을 판단하였다.

1. 비(非)폭발

1) 좌초

함정이 좌초로 손상을 입게 되면 통상 선저부에 길이방향으로의 찢김(Cutting) 현상이 발생한다. 특히 천안함과 같이 함수 선저부에 소나돔이 있는 함정이 항해 중에 좌초하게 되면 소나돔이 먼저 손상되는 것이 일반적인 현상이다.

(1) 손상 지표

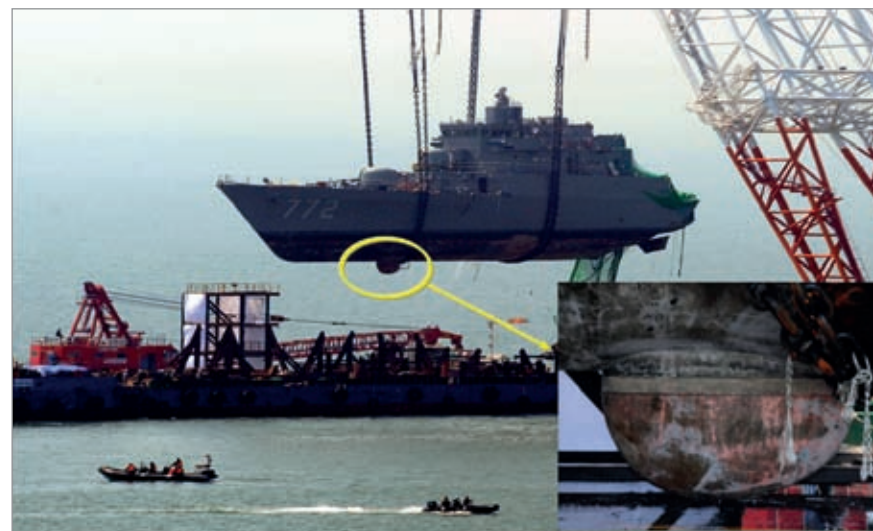
손상 현상	조사 결과
• 선저부 길이방향 찢김(Cutting) 현상	없음
• 길이방향으로 선체 굽힘 자국	없음
• 선저 최하부 부가물(소나돔, 프로펠러) 손상 여부	없음
• 좌초로 볼 수 있는 파괴 양식(큰 소성변형 ²⁾ 에 의한 파괴)	없음
• 수심 및 압초에 따른 좌초 가능성	없음
• 징후, 경보, 증언	없음

1) IED : Improvised explosive device, 급조폭발물.
2) 소성변형(塑性變形) : 재료의 탄성한계를 초과하여 발생하는 영구변형.

(2) 육안 검사

천안함 선체 인양 후 선저에 대한 조사 결과 좌초로 인해 침몰되었다고 추정할 만한 선체 길이방향의 굽힘이나 찢김이 없었다. 또한 선저 최하부에 위치한 소나돔 및 프로펠러도 <그림 2장-1-1>, <그림 2장-1-2>에서 보는 바와 같이 좌초에 따른 손상이 없는 것으로 확인되었다. 오히려 좌초로는 발생하기 어려운 두 가지 선체 변형 양상이 파손 부위에 나타났다.

첫째, 떨어져 나간 가스터빈실 절단부위 전·후부 격실의 선저부 외판에는 <그림 2장-1-3>에서 볼 수 있듯이 보강재 사이의 외판 패널에 심한 소성 처짐 변형(Dishing)이 발생하였음을 알 수 있다. 이는 과도한 압력이 광범위하게 작용한 결과로서 좌초로는 발생할 수 없으며 충격파와 버블효과 작용의 근거로 보아야 한다.



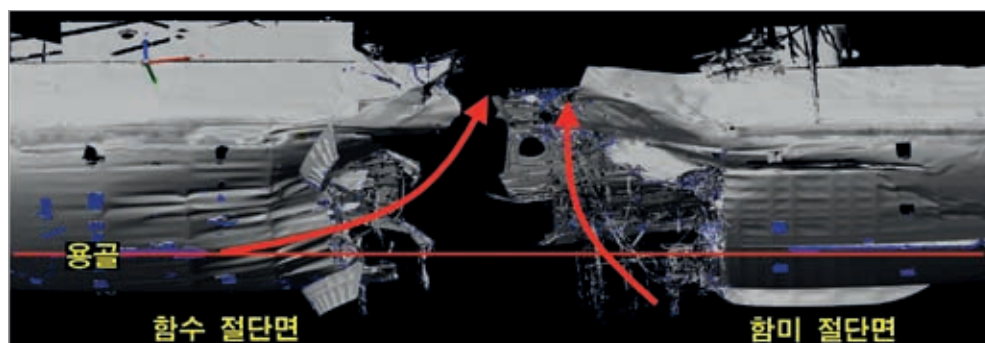
<그림 2장-1-1> 천안함 인양 시 소나돔



<그림 2장-1-2> 천안함 인양 후 프로펠러 모습



<그림 2장-1-3> 선저 외판 패널의 소성 처짐(디싱) 형상



〈그림 2장-1-4〉 함수와 함미 절단부위에 대한 3차원 레이저 스캔

둘째, 중앙부 절단구역 선저 외판구조에서 함 내부로 큰 휨 현상이 발생하였다. 〈그림 2장-1-4〉와 같이 함미 절단부는 선저 외판이 주갑판 높이까지, 함수 절단부 역시 이에 상응하는 정도로 함 내부방향으로 변형되었다.

함수 절단부 좌현 측 선저 외판은 함 외부에 원점을 둔 구면의 형태로 손상되었으며 〈그림 2장-1-5〉와 같이 가스터빈실 선체의 용골도 구형의 압력을 받아 활모양으로 심하게 변형되었다. 이러한 현상은 좌초로는 발생할 수 없다.

한편 절단면 파괴특성 분석 결과 좌초되었을 경우에는 종강도³⁾ 손실로 발생할 수 있는 소성 변형에 의한 파괴양상은 없었으며 선체 외판에 순간적으로 큰 압력이 작용한 결과로 볼 수 있는 외판 두께방향의 전단파괴(Shear fracture)⁴⁾와 고속 변형에 의한 취성파괴(Brittle



〈그림 2장-1-5〉 가스터빈실 선저 외판

3) 종강도(Longitudinal strength) : 선체의 길이방향으로 하중 또는 충격으로부터 부러지지 않고 견딜 수 있는 힘.
4) 전단파괴(剪斷破壞) : 물체의 단면에 전단(shear) 방향으로 큰 힘이 급격하게 작용하여 물체가 절단되는 현상.



〈그림 2장-1-6〉 천안함 절단면 파괴특성 분석 결과

fracture)⁵⁾ 양상이 나타났다(〈그림 2장-1-6〉 참조).

또한 우현 프로펠러 변형 분석 결과 좌초되었을 경우에는 프로펠러 날개가 파손되거나 전체에 걸쳐 굽힌 흔적이 있어야 하나 그러한 손상 없이 5개 날개가 함수방향으로 동일하게 굽어지는 변형이 발생하였다(〈그림 2장-1-7〉 참조). 스웨덴 조사팀은 이와 같은 변형은 좌초로는 발생할 수 없고, 프로펠러의 급작스런 정지와 추진축의 밀림 등에 따른 관성력에 의해 발생될 수 있는 것으로 분석하였다.

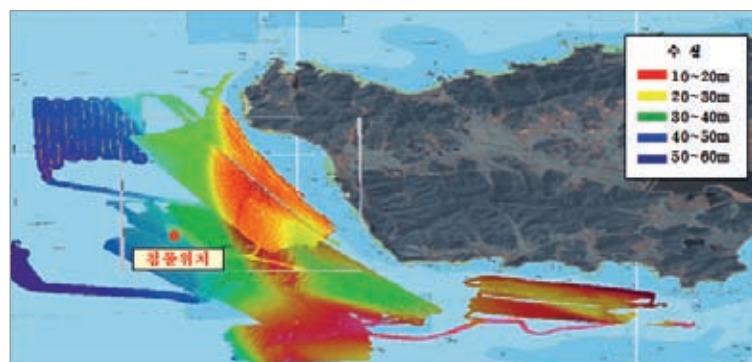


〈그림 2장-1-7〉 천안함 우현 프로펠러 형상

5) 취성파괴(脆性破壞) : 외부에서 힘을 받았을 때 물체가 거의 늘어남이 없이 파괴되는 현상.

(3) 환경적 조건

천안함의 도면상 흘수는 2.88m이며 선체에 남아 있는 해조류의 흔적으로 볼 때 운용상 흘수는 평균 3.1m 이내로 판단된다. 침몰지점의 수심은 47m이며, 당시 작전구역의 최저수심은 8.6m로 확인되었으므로 천안함이 해저에 접촉할 가능성은 없었다. 또한 3월 28일부터 5월 8일까지 해군 소해함(4척)과 한국해양연구원 조사선(이어도호, 장목호)의 사고 해역 정밀탐사 결과 해당 해역에는 항해에 영향을 미치는 해저 장애물이 없음을 확인하였고, 주변의 인공어초는 수심 17~34m 해역에 설치되어 있어 함정과 접촉할 가능성이 없었다. 이러한 사실은 조사에 참여한 호주팀에 의해 검증되었다(〈그림 2장-1-8〉 참조).



〈그림 2장-1-8〉 천안함 침몰 해역 해저지형 탐사 결과

(4) 모델링 및 시뮬레이션

좌초 가능성이 없으므로 모델링 및 시뮬레이션은 무의미하여 실시하지 않았다.

(5) 징후 및 경보

천안함 침몰을 좌초로 볼 수 있는 특이 징후 및 경보는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

생존자 진술내용을 분석한 결과 좌초로 판단할 만한 증언은 없었다.

(7) 결론 : 가능성 없음

손상양상이 좌초와 연관되는 선저부 길이방향 찢김이나 선체 굽힘, 선저부에 설치된 소나돔 및 프로펠러의 손상 등이 없었으며, 인근 해역에 암초도 없는 것으로 확인되었다. 또한 비접

촉 수중폭발 시 발생하는 선저 외판 패널의 소성 처짐(Dishing) 현상이 관찰되어 암초 또는 다른 좌초 원인에 의한 손상 가능성은 배제하였다.

2) 충돌

일반적으로 선박이 항해 중 충돌하면 피충돌선의 현측 외판이 찢어지고, 충돌선이 피충돌선 내로 진입하게 되면 파단부의 형상은 충돌선의 선수부 형상과 거의 같게 된다. 또한 피충돌선에는 충돌선의 페인트 등 잔류물이 남게 된다.

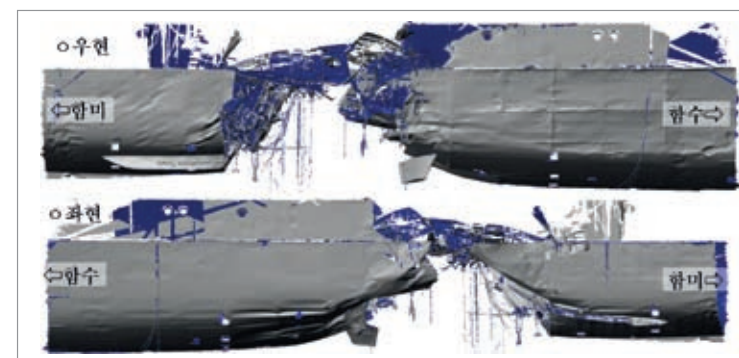
(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 충돌로 볼 수 있는 파괴 양식(충돌선의 선수부 형상)	없음
• 충돌 선박이 피충돌선에 남긴 접촉 흔적 및 잔류물	없음
• 인근 해역에서 사고 당시 활동한 선박	없음
• 징후, 경보, 증언	없음

(2) 육안 검사

천안함 현측부의 손상형태에는(〈그림 2장-1-9〉 참조) 충돌선의 선수 형상이라고 볼 수 있는 파손형태나 잔해물이 없었다. 오히려 전체적인 손상형태는 선체 하부로부터 큰 힘이 상방향으로 작용한 모양이었다.

〈그림 2장-1-3〉과 같은 선저부 외판 패널의 소성 처짐은 충돌로는 발생할 수 없는 변형으로서 수면하에서 큰 충격압력을 받았다는 것을 보여 주는 증거이다.



〈그림 2장-1-9〉 천안함 절단면 형상

(3) 환경적 조건

천안함 사건 발생 시간에 한국해군전술자료처리체계(KNTDS) 및 선박위치자동식별체계(AIS) 확인 결과 5.5마일 이내에는 항해 중인 선박이 없었으며, 사건 발생 이후 TOD상에도 천안함 주변에 항해하던 선박이 없는 것으로 확인되어 충돌 가능성은 없었다.

(4) 모델링 및 시뮬레이션

충돌 가능성이 없으므로 모델링 및 시뮬레이션은 무의미하여 실시하지 않았다.

(5) 징후 및 경보

천안함 사건 발생 당시 충돌과 관련한 특이 징후 및 경보는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

생존자 및 구조 당시 참여자들의 증언에 충돌과 관련된 내용은 없었으며 구조 당시 촬영된 영상에도 충돌을 일으킬 만한 가해 선박은 식별되지 않았다.

(7) 결론 : 가능성 없음

충돌선과의 충돌형상, 접촉흔적 및 잔류물, 사건 당시 인근 해역에서 활동한 선박은 없었으며, 생존자 증언에도 충돌을 의심할 만한 내용은 없었다. 또한 비접촉 수중폭발 시 발생할 수 있는 선저 파손형태와 선저 보강판 패널의 디싱 현상이 관찰되어 충돌로 인한 손상 가능성은 배제하였다.

3) 피로파괴

피로파괴(Fatigue fracture)는 하중이 반복적으로 작용할 때 항복응력(Yield stress: 탄성변형이 일어나는 한계응력)보다 낮은 응력⁶⁾에서 파단이 발생하는 현상으로서 균열이 점진적으로 확대되다가 어느 정도 이상의 크기가 되면 불안정 급속파괴로 발전할 수 있다. 균열은 구조물의 내부보다 표면에서 시작되며 이 단계에서 함정 구조 전체가 파괴될 가능성은 거의 없다.

균열이 시작된 상태에서 반복하중을 받게 되면 균열은 확대되어 전파된다. 일반적으로 이

6) 응력(Stress) : 물체가 외부의 힘에 의해 변형이 생겼을 때 물체 내부에서 발생하는 단위면적당 저항력.

단계도 급속히 진행되는 것이 아니므로 선체에 대한 정기검사 등을 통하여 확인되고 보수된다. 이러한 균열들은 국부적으로 부재⁷⁾를 손상시키는 단계에 머물고 있어 선박 전체가 파단되는 대형사고로 연결되는 사례는 극히 드물다.

피로파괴로 인한 절단면에는 물결모양의 흔적(Beach mark)이 있고 파단면은 깨끗하게 절단되어 양쪽을 맞춰 보면 빈틈없이 일치한다.

(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 선체 구조의 균열	없음
• 피로파괴로 볼 수 있는 파괴양식(절단면의 Beach mark, 전체적으로 깨끗한 절단면)	없음
• 선체 노후화	경미함
• 징후, 경보, 증언	없음

(2) 육안 검사

천안함의 절단면을 살펴보면 함수의 선저면이 전반적으로 상방향으로 많이 휘어 있는 현상이 관찰되고 좌현 선저가 형체를 알아볼 수 없을 만큼 변형되어 상갑판에 올라붙어 있으며(<그림 2장-1-10> 참조), 함미의 선저면은 횡격벽 바로 앞에서 매끈하게 잘려 나갔다.

<그림 2장-1-6>의 천안함 함미 절단면 파괴특성 분석 결과에서 보듯이 파단 시 선저 하



〈그림 2장-1-10〉 함수·함미 절단면 형상

7) 부재(Structural member) : 선체를 구성하는 구조물.

부에서 상방향으로 작용한 엄청난 힘에 의해 격벽 인접부에서는 순간적인 전단파괴가 발생하였고, 선저 전방에 걸쳐 막대한 소성변형을 동반한 파괴가 발생한 것을 확인하였다. 또한 가스터빈이 장착된 강력받침대 구조와 우현 선측 구조가 완전히 떨어져 나갔고, 함수 선저부의 우측 부분은 인장력에 의해 뜯겨져 나갔다.

(3) 환경적 조건

천안함은 함정 인수 후 22년 동안 운용되어 아직 내구연한(25년)이 도래하지 않았으며, 최근 5년간(05~09년)의 정비 실적을 확인한 결과 총 14회 69주 동안 정비를 실시하였다. 상가정비는 야전/창정비 기간에 병행하여 총 5회 9주 동안 선체 도장 및 선체 상태검사(초음파검사) 등 선체 안전관련 정비를 실시하여 선체 상태는 양호한 것으로 확인되었다. 특히, 선체에는 피로파괴로 볼 수 있는 크랙(Crack) 등 사전 징후는 발견되지 않았다.

또한 선체 인양 후 선체 노후도를 확인하기 위해 실시한 초음파검사(10. 4. 30) 결과 <표 2장-1-1>과 같이 평균 선체 부식률은 3.22%로 제한 부식률 20%를 고려할 때 설계 조건을 충족하기에 충분한 두께를 가진 것으로 확인되어 선체 피로에 의한 손상 가능성은 없는 것으로 확인되었다.

구분	좌현(평균두께 : mm)			우현(평균두께 : mm)			선체 평균부식률 (%)
	건조 시 선체두께	초음파 측정두께	평균 부식률(%)	건조 시 선체두께	초음파 측정두께	평균 부식률(%)	
디젤 기관실	9	8.75	2.77	9	8.67	3.66	3.215
	11	10.59	3.72	11	10.63	3.36	3.54
	11	10.68	2.90	11	10.55	4.09	3.495
	15	14.59	2.73	15	14.61	2.60	2.665
			3.03			3.42	3.22

<표 2장-1-1> 선체 초음파검사 결과(10. 4. 30)

(4) 모델링 및 시뮬레이션

피로파괴 가능성이 없으므로 모델링 및 시뮬레이션은 무의미하여 실시하지 않았다.

(5) 징후 및 경보

피로파괴와 연관되는 선체 균열 등의 관련 징후 및 정보는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

천안함 생존자 중 선체 운영 및 유지관련 직별장인 보수선임부사관에게 확인한 결과 선체 구조물에 균열 등은 없었던 것으로 확인되었으며, 기타 생존자의 피로파괴와 관련된 증언은 없었다.

(7) 결론 : 가능성 없음

천안함은 선체에 균열 현상이 없고, 피로파괴 시 절단면에서 관찰되는 물결무늬 모양의 흔적(Beach mark)이 없으며 평균 선체 부식률은 3.22%로 매우 양호한 상태였다. 또한 피로파괴와 연관된 징후 및 증언도 없었다. 오히려 비접촉 수중폭발에서 발생할 수 있는 선체 손상형태와 선저 보강판 패널의 디싱 현상이 관찰되어 피로파괴로 인한 손상 가능성은 배제하였다.

2. 내부 폭발

1) 탄약고 폭발

천안함은 초계임무를 주로 수행하는 함정으로 40mm 및 76mm 함포를 비롯하여 대함용 하퐁미사일, 대잠수함용 폭뢰 등 다양한 형태의 폭발물을 탑재하고 있다.

(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 폭발 중심으로부터 탄약고 격벽 및 상부 갑판이 날아감 또는 손상	없음
• 탄약고 갑판 및 측면이 바깥 방향으로 휘어짐	없음
• 화재 흔적 / 그을음	없음
• 탄약고 격벽 및 상부 갑판에 파편으로 인한 구멍 및 파편흔	없음
• 상비탄약고 폭발에 의한 함포 손상	없음
• 탄약고 내부 손상 및 적재된 탄약 손상	없음
• 부상자들 중 열에 의한 화상환자 및 청각장애자 다수 발생	없음

(2) 육안 검사

TOD 영상 확인 결과 천안함은 두 동강난 상태에서 침몰하였고, 선체 인양 후 확인 결과 선체 중앙부위가 절단되어 있었다.

40mm 및 76mm 탄약고가 위치한 함미와 함수를 외부에서 보았을 때 흘수선 아래 탄약고 부위 철판의 휘어짐도 발견되지 않았으며, 탄약고 내부에는 훼손흔적, 즉 탄약고 격벽의 바깥방향으로 찌그러짐과 파편에 의한 파공 및 잔존 파편이 존재하지 않았다.

또한 인양된 선체에서 발견된 탄약상자들은 수압에 의해 다소 찌그러진 상태이나 폭발한 흔적은 없었다.



〈그림 2장-2-1〉 천안함 절단 형상



〈그림 2장-2-2〉 함수 및 함미 선저 상태



76mm 탄약고



하역하여 정리한 76mm 탄약상자



40mm 탄약고

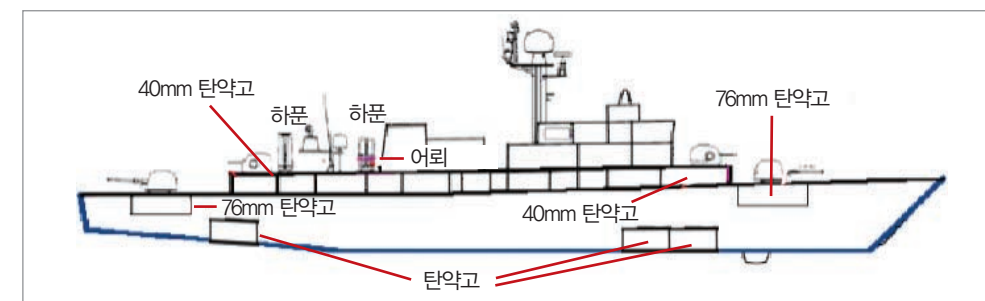


하역하여 정리한 40mm 탄약상자

〈그림 2장-2-3〉 인양 후 탄약고, 탄약상자 상태

(3) 환경적 조건

탄약(기타 탄약 제외)은 〈그림 2장-2-4〉와 같이 함상에 하푼유도탄, 미스트랄유도탄, 어뢰, 폭뢰, 소형폭뢰, 함내에 76mm 및 40mm 함포탄이 저장되어 있다.



〈그림 2장-2-4〉 천안함 탄약 저장 위치

(4) 모델링 및 시뮬레이션

탄약고가 폭발하지 않았기 때문에 모델링 및 시뮬레이션은 무의미하여 실시하지 않았다.

(5) 징후 및 경보

사건 발생 전 탄약고 폭발과 관련한 특이 징후 및 정보는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

대부분의 생존자는 폭발음을 1회 청취하였으며, 그 중 1명은 ‘쿵’ 소리 후 ‘뽕’ 소리를, 1명은 ‘뽕’ 소리 후 ‘파~양’ 소리를 청취하였다. 폭발 순간 선체와 승조원의 몸이 30~100cm 떴다가 떨어졌으며, 생존자 전원이 화재가 발생한 것을 보지 못했고 화약냄새도 맡지 못하였다고 진술하였다.

(7) 결론 : 가능성 없음

선체 인양 후 천안함 탑재 탄약을 하역하여 실험한 결과 유실된 탄약은 5.56mm 탄약, 소형 폭뢰 신관, R-BOC⁸⁾이었다. 상부갑판에 위치한 탄약들은 각각 충분한 안전성을 고려하여 탑재되어 있고 작동원리 고려 시 자폭 가능성이 없으며, 자폭하더라도 노출 부분에 국부적인 피해를 줄 수는 있으나 선체 파괴는 불가능하다. 함내 선저 부분에 위치한 함포탄은 총 폭약량 고려 시 선체를 파괴할 수 있으나 함수 또는 함미에 저장되어 있으므로 선체 중양을 절단할 가능성은 없다.

또한 선저부 및 탄약고에 폭발흔적이 없었고, 인양된 탄약을 실험한 결과 76mm 및 40mm 탄약 전량이 회수된 사실로 볼 때 탄약고 폭발은 발생하지 않았다.

2) 연료탱크 폭발

(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 폭발 중심으로부터 연료탱크 격벽/갑판이 날아감 또는 찢어져 분리됨	없음
• 연료탱크 측면외판이 바깥으로 굴곡됨	없음
• 유증기 생성으로 인해 화재 발생 흔적이나 그늘음이 있음	없음
• 연료 파이프가 파괴됨	없음
• 폭발로 인해 연료탱크 재질상태가 악화됨	없음
• 선체 외판이 바깥방향으로 휘어짐	없음
• 함수 및 함미 연료탱크가 손상됨	없음

.....

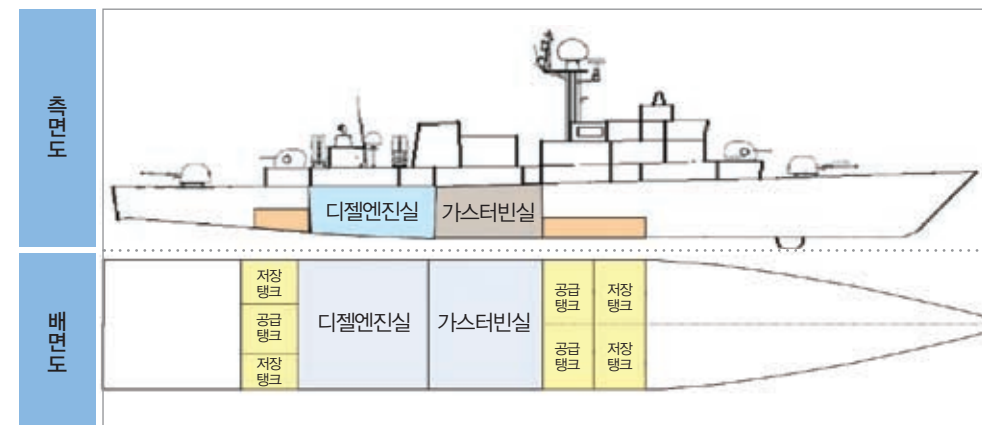
8) R-BOC(Rapid bloom offboard chaff) : 대유도탄 기만체계, 알루미늄 조각을 살포하여 적 미사일의 표적추적을 기만하는 장비.

(2) 육안 검사

선체 손상부위와 연료탱크의 위치가 일치하지 않으며, 천안함에서 나타난 현상은 연료탱크 폭발 시 나타날 수 있는 현상에 부합되지 않았다. 또한 선체 인양 후 연료탱크를 조사한 결과 디젤엔진실 뒤에 있는 연료탱크와 가스터빈실 앞에 있는 연료탱크가 파손되지 않았음을 확인하였으며, 연료가 바닷물에 섞여 있는 상태로 온전하게 남아 있어 폐처리하였고 연료탱크 측면 및 선저 외부 선체에는 손상이 없었다. 즉 연료탱크 폭발로 인한 흔적은 발견되지 않았다.

(3) 환경적 조건

〈그림 2장-2-5〉는 천안함의 연료탱크 위치를 보여 준다. 모든 연료탱크들에 대한 검사 결과 아무런 손상도 발견되지 않았고, 잔여 연료가 보존되어 있었으며 폭발 또는 화재의 징후는 없었다.



〈그림 2장-2-5〉 천안함 연료탱크 위치

(4) 모델링 및 시뮬레이션

연료탱크 폭발은 발생하지 않았기 때문에 모델링 및 시뮬레이션은 무의미하여 실시하지 않았다.

(5) 징후 및 경보

사건 발생 전 연료탱크 폭발과 관련한 특이 징후 및 경보는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

침몰이 연료탱크 폭발에 의한 것임을 뒷받침할 만한 증언은 없었다.

(7) 결론 : 가능성 없음

승조원들의 증언이 다소 불분명하다는 점을 감안하더라도 연료탱크 폭발 시 나타나는 기본적인 현상인 화재나 불기둥을 보았다는 인원은 없었다.

천안함 인양 후 조사 결과 화재에 따른 그을음 흔적이나 연료탱크가 내부에서 외부로 폭발한 흔적이 없고 함미 탱크는 온전한 상태였으며 함수 공급탱크 2개가 위쪽으로 솟아오른 것을 제외하고는 선체구조 변형이 없었으므로 연료탱크 폭발이 아닌 것으로 판단하였다.

천안함 인양 후 연료탱크를 조사한 결과 함수 저장탱크 2개는 훼손이 없었고, 가스터빈실 옆 공급탱크 2개는 가스터빈실 폭발로 탱크격벽이 위쪽으로 밀려 치솟은 상태이며, 함미 탱크 3개는 온전한 상태였다. 결론적으로 천안함 침몰은 연료탱크 폭발로 인한 것이 아님을 확인하였다.

3) 디젤엔진 결함

천안함에는 MTU 12V 956 TB 82 디젤엔진 2대가 설치되어 있으며, 각 엔진은 좌·우 추진축과 연결되어 있고 항해 중에는 통상 2대의 엔진을 동시에 사용한다.

(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 폭발 중심으로부터 디젤엔진실 격벽이 날아감 또는 찢어져 분리됨	없음
• 흡수선 위 디젤엔진실 측면 외판이 바깥 방향으로 휘어짐	없음
• 화재 발생 흔적이나 그을음이 있음	없음
• 폭발 시 파쇄현상으로 인해 파공이 발생함	없음
• 디젤엔진실이 손상됨	없음
• 선체 외판이 바깥방향으로 휘어짐	없음

(2) 육안 검사

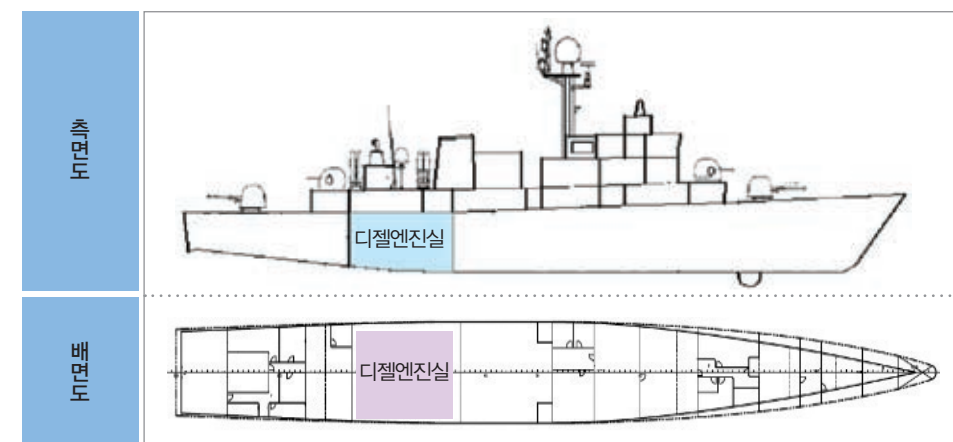
디젤엔진실의 앞쪽 격벽은 선미방향으로 손상을 입었고 기어박스과 샤프트들이 우현방향 위

쪽으로 굽어 있으며 우현샤프트가 좌현샤프트보다 더 많이 굽어 있었다. 디젤엔진 2개 모두 내부폭발로 인한 손상 현상은 발견되지 않았고, 비교적 온전하게 남아 있었다.

(3) 환경적 조건

① 디젤엔진 위치

디젤엔진은 <그림 2장-2-6>과 같이 주갑판을 기준으로 함 중앙에서 함미부 선저방향에 위치하고 있다.



<그림 2장-2-6> 천안함 디젤엔진실 위치

② 디젤엔진 폭발 가능성 및 확인사항

현재까지 조사 분석한 일반사항과 천안함 정비 및 운용 관련 서류, 생존자 증언, 선체 인양 후 확인 결과는 <표 2장-2-1>과 같다.

폭발 전 천안함 디젤엔진 상태를 확인하기 위해 2함대 군수부서를 통하여 해군장비 정비정보체계상의 정비 및 운용기록을 확인한 결과, 천안함의 디젤엔진은 1988년에 도입된 장비로 내구연한(2008년)은 초과되었으나 정상적인 군직 및 외주 창정비를 실시하였다. 사건 당시 최종은행시간은 <표 2장-2-2>에서 보는 바와 같이 군직 및 외주 창정비 모두 정비주기가 도래되지 않은 상태였다.

해군장비정비정보체계에 저장된 최근 3년간('07~'09) 정비내역을 조사한 결과는 <표 2장-2-3>에서 보는 바와 같다(세부 내역은 해군장비 정비정보체계에서 조회 가능).

또한 디젤엔진의 기술적 특성을 파악하기 위하여 디젤엔진 관련 국가기관 및 제조회사, 그

구분		확인 사항	확인 결과
관련 서류		<ul style="list-style-type: none"> 장비이력부를 통한 운행기록(수명주기 등) 장비 운용간 발생한 특이사항 정비이력을 통한 주기적인 계획정비 이행실태 	장비수명은 지났으나 정상적인 정비로 운용상 문제 없음
생존자 증언	폭발 소리	• 엔진 출력소음 과다 발생	미청취
		• 금속성 파열음 및 내부 충격소음 발생	미청취
		• 기관실 및 기관조종실 화재 경보기 작동	미작동
선체 인양 시 상태	엔진	• 엔진 실린더 등 연소부위 파손	파손되지 않았으며
		• 게이지패널상 각종 게이지(압력·온도) 파손	폭발 흔적 없음
	기관실	• 엔진실 내부에 연료유·윤활유 등 누출	엔진실 내 화재 등
		• 엔진 폭발에 의한 인근 보조장비 파손	그을음 현상은 없으며,
		• 엔진 주위 화재 그을음 현상 발생	엔진이 정상적으로
		• 엔진 고정대 볼트 이완 등 파손	고정되어 있음
	기관실 격벽	• 현측 격벽 굽힘 또는 부분적 파공 현상	엔진실 격벽 굽힘이나
		• 기관실 천장 및 좌·우현 격벽 그을음 현상	파공현상 없음

〈표 2장-2-1〉 엔진 폭발 가능성 확인 결과

구분	운용 연도	정비 실적		정비 후 운전시간(시간)	
		W-5 정비	W-6 정비	W-5 정비	W-6 정비
No.1 D/E	'88. 12. 29	'07. 4. 30 '09. 5. 13	'08. 2. 22	2,288	5,434
No.2 D/E	'88. 12. 29	'07. 4. 30 '09. 5. 13	'08. 2. 22	2,288	5,434
정비주기	• 내구연한(년) : 20년, W-5 정비(군직 창정비) : 운전 3,000시간 • W-6 정비(외주 창정비) : 운전 9,000시간				

〈표 2장-2-2〉 디젤엔진 운용 연도 및 계획정비 이행 실태

연도	정비 내역
2007년	• 실린더 헤드 검사 수리 등 28건
2008년	• 청수순환펌프 모터 수리 등 15건
2009년	• 급속공기 차단장치 수리 등 50건

〈표 2장-2-3〉 최근 3년간 디젤엔진 정비 내역

리고 실제 운용자인 해군의 엔진 전문가와 기술교범 등 기술자료를 통하여 확인한 결과 디젤 엔진은 특성상 폭발할 가능성이 희박하며, 폭발되더라도 엔진 구성품의 파손에 한정되고, 기관실 내부공간(약 10m×10m) 고려 시 선체의 파손(절단)으로 연계될 가능성은 없는 것으로

확인되었다. 디젤엔진이 폭발할 경우에는 화재가 발생하게 되나 기관실 내 화재감지기, 경보기, 원격 소화장치 등에 의해 즉시 진압 가능하므로 화재가 폭발로 연계될 가능성은 극히 희박하며, 선체 인양 후 확인 결과 화재가 발생한 흔적은 없었다.

엔진 과부하에 의한 폭발 가능성도 없으며, 엔진 과부하 발생 시 연료 및 연소공기 공급라인 자동 차단, 오일팬 유증기 과다 시 자동배출장치 작동 등 안전장치가 설치되어 있어 화재가 발생할 가능성은 희박하였다.

사건 당시의 엔진상태 확인을 위하여 생존자 증언을 청취한 결과, 사건 당시 천안함은 속력 6.7kts의 저속으로 항해 중이었으므로 엔진이 과열되거나 결함이 발생할 수 없었으며, 엔진실 폭발 시 발생하는 화재도 없었고, 엔진폭발 시 발생하게 되는 금속성에 가까운 폭발음도 청취되지 않았다.

(4) 모델링 및 시뮬레이션

디젤엔진 폭발은 발생하지 않았기 때문에 모델링 및 시뮬레이션은 무의미하여 실시하지 않았다.

(5) 징후 및 경보

사건 발생 전 디젤엔진 폭발과 관련한 특이 징후 및 경보는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

침몰이 디젤엔진 폭발에 의한 것임을 뒷받침할 만한 관련 인원의 증언은 없었다.

(7) 결론 : 가능성 없음

천안함 디젤엔진은 내구연한이 경과되었으나, 정상적인 창정비(W-5 및 W-6) 지원으로 운항상 문제점은 식별되지 않았다. 디젤엔진은 근본적으로 폭발할 가능성이 희박하며, 과부하 시 구성품 파손에 의한 파편 비산은 가능하나, 엔진실 내부에 국한되므로 폭발로 이어질 수 없다. 특히 사건 당시 천안함은 저속으로 기동하고 있어서 엔진의 과부하 위험성은 없었으므로 침몰사건과 디젤엔진 폭발은 무관한 것으로 판단하였다.

4) 가스터빈 결함

천안함은 LM-2500 가스터빈 1대가 장착되어 있으며, 주로 고속 항해 시 사용된다.

(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 폭발 중심으로부터 가스터빈실 격벽이 날아감 또는 찢어져 분리됨	있음
• 흡수선 위 가스터빈실 측면 외판이 바깥방향으로 휘어짐	있음
• 화재 발생 흔적 및 그을음이 있음	없음
• 폭발 시 파쇄 현상으로 인해 파공이 발생	없음
• 가스터빈실이 손상됨	있음
• 선체 외판이 바깥방향으로 휘어짐	없음

(2) 육안 검사

우현격벽 및 상갑판이 폭발로 인해 가스터빈실을 기준으로 바깥방향으로 뜯겨져 나갔고 선체 안쪽 방향으로 변형이 일어났으며, 화재흔적이나 그을음, 파쇄 현상으로 인한 파공 등은 발견되지 않았다.

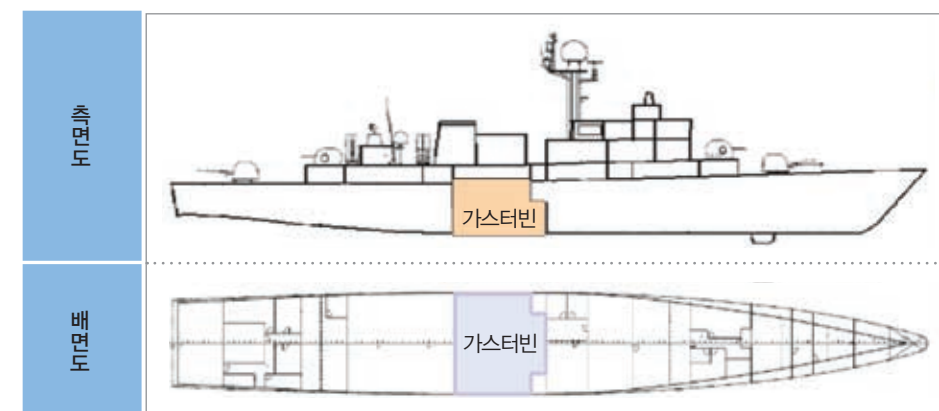
(3) 환경적 조건

① 가스터빈 위치

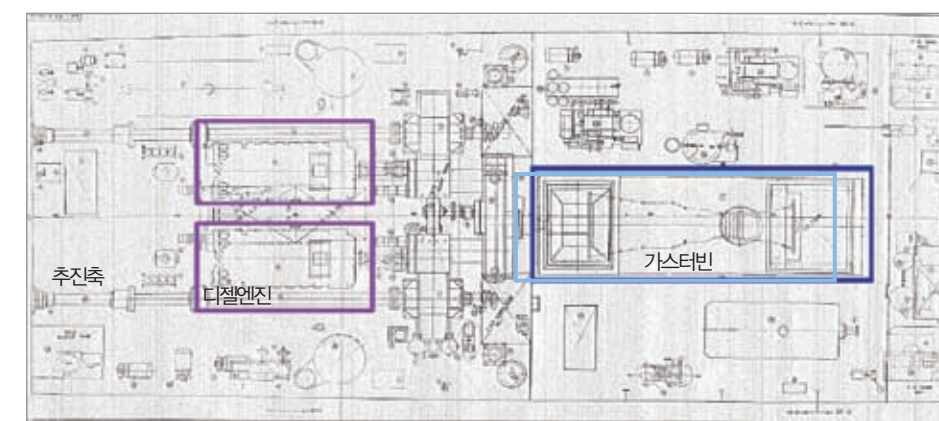
가스터빈의 위치는 <그림 2장-2-7>과 같이 주갑판을 기준으로 함 중앙에서 후미쪽 디젤엔진실 바로 앞에 위치하고 있으며, 가스터빈과 추진축, 그리고 스크루와의 연계상태를 도면화 하면 <그림 2장-2-8>과 같다.

② 가스터빈 폭발 현상 및 확인사항

가스터빈은 압축기에서 고압으로 압축된 흡입공기와 분사된 디젤연료가스를 연소실에서 연소시킨 후 가스발생기에서 배기가스를 생성하여 파워터빈을 회전시킴으로써 추진동력을 발생시키는 장치로 화재 발생은 가능하나 폭발 가능성이 낮고 내화력이 뛰어난 벽으로 보호되어 있어 화재가 확산될 가능성은 극히 희박한 것으로 판단되었다. 가스터빈의 손상 원인과 현상을 도출하면 <표 2장-2-4>와 같다.



<그림 2장-2-7> 천안함 가스터빈실 위치



<그림 2장-2-8> 천안함 가스터빈과 디젤엔진 및 추진축 위치

손상 원인	현상
• 가스터빈 구성품 재질 불량 - 가스터빈 고속가요성카플링(HSFC)과 감속기어 연결부위의 절손	• 가스터빈 주요 구성품 파손 • 보호격실 내 화재 발생

<표 2장-2-4> 천안함 가스터빈 손상 원인 및 현상

가스터빈이 폭발(손상) 시는 가스터빈 주요 구성품은 파손될 수 있으나, 구성품이 파손되더라도 장비가 보호격실 내에 위치하고 있어 선체 파손 등 2차 피해로 확산될 가능성은 매우 낮다. 또한 구성품이 파손되어 보호격실 내에서 화재가 발생하더라도 경보 및 원격 소화장치가 작동되어 즉시 진화될 수 있다.

천안함의 가스터빈 폭발 가능성에 대하여 정비 및 운용 관련 서류, 생존자 증언, 선체 인양

후 확인 결과 등을 통하여 판단한 결과는 다음 <표 2장-2-5>와 같다.

구분		확인 사항	확인 결과
관련 서류 확인		<ul style="list-style-type: none"> 장비이력부를 통한 운행기록(수명주기 등) 장비 운용간 발생한 특이사항 정비이력을 통한 주기적 계획정비 이행실태 	내구연한은 지났으나 정기정비 등으로 운용에 이상 없음
생존자 증언	소리	<ul style="list-style-type: none"> 가스터빈 출력소음 과다 발생 금속성 파열음 및 내부 충격소음 발생 	미청취
선체 인양 시 상태 확인	가스터빈	가스터빈 연소실, 압축기, 터빈 파손 ⁹⁾	인양 결과 일부 손상
		가스터빈 보호격실 파손 및 표면상 화재 그을음 현상 발생	함수쪽 유실, 함미쪽 이상 없음
		가스터빈 연결장비(감속기어) 물리적 손상 발생	일부 손상
		가스터빈실 및 기관조종실 화재 경보기 작동	미작동
		연소실 등 주요 구성품 파손	인양 결과 미파손
	보호격실	<ul style="list-style-type: none"> 보호격실 격벽 화재 그을음 현상 발생 가스터빈 고정대 볼트 이완 등 파손 	유실 후 인양

<표 2장-2-5> 가스터빈에 의한 폭발여부 확인 결과

침몰 전 천안함 가스터빈의 상태를 확인하기 위해 2함대 군수부서를 통하여 해군장비정비 정보체계상의 정비 및 운용기록을 확인한 결과, 천안함의 가스터빈엔진은 '88년부터 운용되어 내구연한 20년은 경과되었으나, 최종운행시간은 5,213시간으로 분해정비주기 고려 시는 약 25% 운항상태로 정비지원상 문제점은 발견되지 않았다. 최근 3년간 정비지원 실적은 <표 2장-2-6>에서 보는 바와 같다.

연도	정비 내역
2007년	터빈 후부 프레임 동력터빈날개 및 변류기 검사 등 17건
2008년	진동감지기 회로 검사 등 15건
2009년	고정자 가변날개 조작계통 검사수리 등 36건

<표 2장-2-6> 최근 3년간('07~'09년) 정비 내역

가스터빈의 기술적 특성을 파악하기 위해 엔진 관련 국가기관 및 제조회사, 그리고 실제

9) 가스터빈은 함미 인양 시 유실된 상태였으나, 차후(5월 9일) 일부 손상된 상태로 인양되었음.



<그림 2장-2-9> 가스터빈 보호격실

운용자인 해군의 엔진 전문가와 기술교범 등 기술자료를 통하여 확인한 결과 경유를 연료로 사용하는 함정의 가스터빈은 폭발 가능성이 희박하며, 화재 가능성은 일부 있으나 가스터빈 자체가 기관실 내 특수 보호격실로 보호되어 있어 화재가 연소실 외부로 확산될 가능성은 없었다. 또한 가스터빈의 보호격실 내에는 화재 감지기, 경보기 및 원격 소화장치가 설치되어 있어 화재가 발생하더라도 즉각 자동소화가 가능하고 자동제어시스템에 의해 정지되므로 화재에 의한 폭발 가능성은 없었다.

특히 천안함 함미 및 함수 인양 후 육안확인 결과 가스터빈실은 유실된 상태였으나 차후 구성품이 인양되었으며, 디젤엔진실과의 격벽에 엔진 파손 등에 의한 파공흔적(가스터빈 파손 시 터빈날개 등의 비산으로 주위 격벽 등에 파공이 발생하게 됨)이 발견되지 않았고, 침몰사고 직전까지 녹화된 CCTV 영상 확인 결과 화재 발생의 징후는 보이지 않았다. 그리고 천안함 생존자 및 각종 상황일지 등을 확인한 결과, 사건 당시 천안함은 6.7kts의 속도로 저속운항 중이었으며 가스터빈은 운용되지 않은 상태였다.

(4) 모델링 및 시뮬레이션

가스터빈실 폭발이 발생하지 않았기 때문에 모델링 및 시뮬레이션은 무의미하여 실시하지 않았다.

(5) 징후 및 경보

사건 발생 전 가스터빈 폭발과 관련한 특이 징후 및 경보는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

침몰이 가스터빈 폭발에 의한 것임을 뒷받침할 만한 관련 인원의 증언은 없었다.

(7) 결론 : 가능성 없음

천안함의 가스터빈은 내구연한이 경과되었으나 분해정비주기 대비 25% 운행으로 양호한 상태를 유지하고 있었으며, 가스터빈의 구조적 특성상 폭발 가능성이 희박하고, 화재 발생의 개연성은 있으나 안전장치가 강화되어 있어 화재가 발생하여도 선체 절단으로까지 확대될 가능성은 없는 것으로 확인되었다. 특히, 당시 가스터빈은 가동하지 않은 상태였으므로 천안함 침몰과 관련성이 없는 것으로 판단하였다.



〈그림 2장-2-10〉 가스터빈실과 디젤엔진실 간 격벽 상태



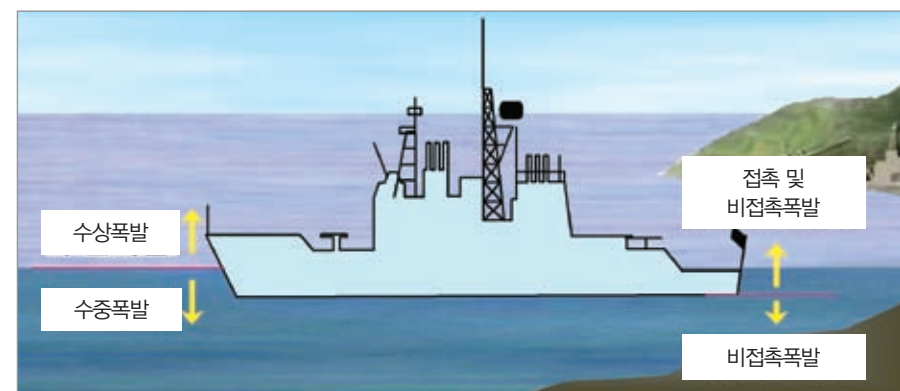
〈그림 2장-2-11〉 사건 발생 직전 가스터빈실 모습(CCTV 영상)

3. 외부 폭발

‘외부폭발’이란 천안함이 내부가 아닌 외부폭발에 따른 힘의 작용에 의하여 침몰된 경우를 의미하는 것으로, 본 조사에서는 외부폭발의 유형을 폭발 위치에 따라 수상폭발, 수중폭발로 분류하였고, 폭발 시 접촉 여부에 따라 접촉폭발과 비접촉폭발로 구분하였다.

수상폭발 수단으로는 순항(대함)미사일, 탄도미사일 및 함포·해안포 등을 들 수 있으며, 수중폭발 수단으로는 주로 수면 아래 선체에 접촉하여 기폭되는(접촉폭발 방식) 직주어뢰 및 부유기뢰가 있고, 함정 밑의 해저에서 음향 및 자기감응 기폭방식(비접촉폭발 방식)을 적용하는 계류기뢰 및 해저기뢰와 주로 잠수함 또는 잠수정에서 발사하는 자기 및 음향감응 어뢰를 들 수 있다.

본 조사에서는 조사의 신속성과 효율성 및 효과성을 높이기 위해 선체 파괴 형상을 통하여 식별이 가능한 접촉폭발과 비접촉폭발 여부를 우선적으로 판단하고, 그 결과에 따라 가능성이 희박한 접촉폭발 방식은 배제하고 비접촉폭발 유형을 집중적으로 분석하였다. 또한 함포 및 해안포에 의한 공격은 실질적인 가능성이 없으므로 제외하고 순항(대함)미사일 및 탄도미사일 접촉과 비접촉폭발을 포함하여 어뢰 및 기뢰, 그리고 과거 우리나라에서 설치했던 육상 조종기뢰(MK-6 폭뢰 개조형)순으로 정리하였다.



〈그림 2장-3-1〉 폭발 위치 및 접촉 여부에 따른 외부폭발 유형

1) 수상 폭발(순항 및 탄도미사일)

수상폭발이란 외부의 공격에 의한 폭발이 해수면상에서 일어난 현상을 의미하는 것으로 공

격 수단으로는 수상함에 의한 함포 사격, 지상의 해안포 사격, 순항(대함)미사일 및 탄도미사일 등을 들 수 있다.

북한은 90년대 이후 신형 미사일을 모방생산하거나 개량 또는 자체 개발을 통해 이미 보유하고 있는 미사일보다 사거리가 신장된 미사일을 지속적으로 시험 발사하고 있는 점을 고려할 때 원거리 해상목표 타격능력이 과거에 비해 월등히 향상되었을 것으로 판단하였다.

(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 폭발위치에 꽃무늬 모양의 파공 형성	없음
• 국소적인 외판의 휨 현상	있음
• 폭발에 의한 전선 및 각종 케이블과 구조물 등에 열 또는 화염 흔적 / 그을음	없음
• 외부 격벽 또는 상부 갑판에 파편으로 인한 구멍 및 파편	없음
• 충격파와 폭발소리에 의해 청각장애 및 화상환자 다수 발생	없음
• 상부 구조물에 (툽니모양의) 원형 파공 형성	없음

(2) 육안 검사

천안함을 인양하여 확인한 결과 선체는 <그림 2장-3-2>에서 보는 바와 같이 가스터빈실을 중심으로 절단되었으며 우현은 약 7.8m가 유실되었고 좌현은 선저 일부를 제외하고는 유실 부분 없이 찢어져 절단되었고, 선체 중앙부의 용골은 가스터빈실을 중심으로 함미 부위와 함수 부위는 각각 680mm, 1,475mm씩 위쪽으로 휘어져 있었다.

절단면 파괴 현상은 <그림 2장-3-3>에서 보는 바와 같이 좌현 하단부는 순간적인 충격에 의해 절단되었고(전단파괴), 선저 부위는 짧은 시간에 강한 힘에 의해 찢겨졌으며(취성파괴), 기타 부위는 큰 인장력에 의해 뜯겨진 현상을 보였다. 따라서 천안함은 가스터빈실 좌현 선저 아래 수중에서 발생한 폭발력이 우현 상방향으로 지향되면서 선체가 절단된 형태로서 전형적인 버블효과에 의한 파손형태를 보였다.

또한 인양된 천안함 함체 상부에 수상폭발에 의한 파공이 발견되지 않았고, 절단면에 열손상이 없었으며, 함체 전 부위에 화재의 흔적이 발견되지 않았다. 특히 전선 등 각종 케이블은 열에 의해 녹거나 손상된 흔적이 없고, 강력한 힘에 의해 순간적으로 절단된 모습을 보였다. 그리고 수상폭발 시 발생할 수 있는 내부 탄약고 또는 연료탱크에서의 연쇄폭발 흔적이 없었고, 유실 부위를 제외한 선체 전 부위에 폭발 흔적이 발견되지 않았다.



<그림 2장-3-2> 함수 및 함미 절단부위



<그림 2장-3-3> 함미부분 좌현 선저 하에서 우현 상방향으로 절단된 모습



<그림 2장-3-4> 천안함 절단면 파괴 형태

(3) 환경적 조건

수상폭발은 폭발물이 수상 및 공중에서 함체에 직접 접촉하거나 근접폭발 시 나타나는 현상으로 폭발 위치에 꽃무늬 모양의 파공이 형성되고, 국소적 외판의 휨 현상이 발생하며 충격 손상 및 공격 무기의 잔해가 남아 있어야 한다. 특히 폭발력이 클 경우에는 수면상 피격지점 주변이 폭발 압력에 의해 파쇄되거나 유실될 수도 있다. 또한 피격 시 파손 부위에 열손상이 나타나고, 화재가 동반되며 전선 및 각종 케이블과 구조물 등에 열 또는 화염 흔적이 남게 된다.

이 경우에는 외부폭발이 내부폭발로 이어질 가능성이 높고 내부폭발에 의한 충격파와 폭발소리에 의해 청각장애 및 화상환자가 많이 발생하게 된다. 특히 수상폭발의 경우에는 수중 폭발의 경우와 달리 함정의 선체 상부가 피해를 받게 되며, 폭발 에너지의 상당 부분이 대기 중으로 분산되므로 함정의 복원력을 고려하면 순식간에 침몰될 가능성이 희박한 것으로 판단하였다.

(4) 모델링 및 시뮬레이션

수상폭발의 가능성은 없는 것으로 확인되어 모델링 및 시뮬레이션은 무의미하여 실시하지 않았다.

(5) 징후 및 경보

수상폭발을 일으킬 만한 미사일 공격 징후나 경보는 없었으며, 사건 발생 현장 부근에 설치된 레이더에 탐지된 비행물체는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

생존자들은 폭발음을 청취하였으나, 화약냄새를 맡았거나 화재를 목격한 생존자는 없었고, 해병 6여단 초병은 하얀색 섬광불빛을 관측했다고 진술하였다.

(7) 결론 : 가능성 없음

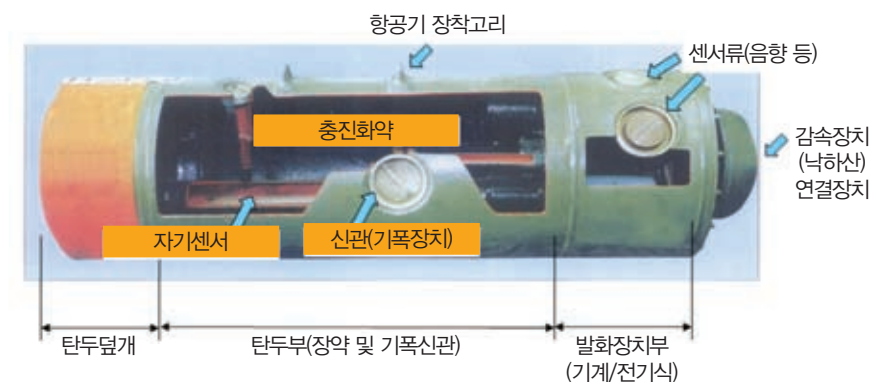
천안함 선체 검사 결과 휘어짐에 의한 손상은 비접촉 수중폭발 현상을 보여 주고 있으며, 흘수선 상부의 폭발 시 나타나는 파공이나 파쇄 현상이 발견되지 않았고, 화재 흔적이나 공격 무기의 파편이 발견되지 않았다. 또한 수상폭발 가능성을 뒷받침할 만한 어떠한 증언이나 증거물이 발견되지 않은 사실로 볼 때 수상폭발 가능성은 없었다.

2) 기뢰(부유, 계류, 해저)

기뢰는 항만이나 해역에 대한 봉쇄 또는 방어수단으로 가장 효과적인 해군 무기체계 중의 하나로 '적 함선의 흘수선 아래 또는 근처에서 폭발하여 함선에 손상을 주는 무기'라고 정의할 수 있다.

기뢰는 함정에서 가장 취약한 수면 아랫부분을 공격하는 무기로서 여타 일반 무기처럼 타격목표를 추적하는 것이 아니라 타격목표가 접근하도록 기다린다는 점에서 차이가 있다. 탐지나 위치 확인이 쉽지 않으므로 일단 부설되어 기뢰원(Mine field)이 형성되면 해상세력에 대한 직접적인 공격위협은 물론 적의 전진이나 해상을 통한 병력과 물자의 이동을 어렵게 하고, 이를 시도할 경우 심각한 손실과 위협을 감수하도록 한다.

기뢰의 구성은 <그림 2장-3-5>에서 보는 바와 같이 탄두덮개, 탄두부, 발화장치부 등으로 이루어져 있다.



<그림 2장-3-5> 기뢰 일반 구성도

탄두덮개는 항공기에서 투하 시 저항력을 감소시키고 바닷물에 입수 시 탄두에 전해지는 충격력을 완화시키며 해저면에 착지 시 안전성을 높여 주는 기능을 한다.

탄두부는 탄두와 신관으로 구성된다. 탄두는 주장약이 충전되어 있고 신관은 안전장전장치와 기폭장치로 구성되며 일정 압력 이상의 정수압에 의해 작동되며 제어부에 있는 발화장치로부터 오는 기폭신호를 받아 기뢰를 폭발시키는 기능을 한다. 육상에서 저장 및 취급 시는 안전핀과 막대에 의해 작동이 억지된다. 신관의 기폭전원은 수압스위치에 부착되며 기폭신호는 케이블을 통해 신관에 전달된다. 폭발계열은 기뢰 신관 내부에서 전기 기폭관의 점화에 따

른 기폭에너지를 단계적으로 전달·증폭하여 최종적으로 주장약을 기폭시키는 폭약 화공부품의 배열로서 전기기폭관, 연결관, 보조전폭약, 전폭관, 주장약의 여러 단계로 이루어진다.

발화장치부는 발화장치, 센서, 수압스위치, 전지로 구성된다. 발화장치는 기뢰의 무장을 제어하고 표적탐지 알고리즘에 따라 표적을 선별하여 기뢰를 발화시키는 중추적인 두뇌역할을 수행하며 신호증폭기, 신호처리기 및 기능제어기로 구성되어 있다. 수압스witch는 부설 후 기뢰의 작동전원 및 기폭전원을 연결해 주는 기능을 수행한다.

기뢰는 항공기, 잠수함 또는 수상함 등 부설수단에 따라 항공기 부설용 기뢰, 수상함 부설용 기뢰 및 잠수함 부설용 기뢰로 구분되며, 그 운용법은 천해에서부터 심해에 이르기까지 매우 광범위하다. 또한 <그림 2장-3-6>에서 보는 바와 같이 부설된 위치에 따라 해저기뢰, 계류기뢰 및 부유기뢰로 구분되며, 폭발방식에 따라 접촉 시의 충격 또는 화학반응에 의해 기폭되는 접촉식 기뢰, 함정에서 발생하는 자장이나 수중음향 또는 압력 등 제반 물리적 변화를 감지하여 표적을 파괴하는 감응기뢰, 그리고 인위적인 판단에 의해 기폭 여부를 결정하는 조종기뢰 등으로 구분될 수 있다. 최근에 개발되는 기뢰는 통과하는 표적의 자기나 음향 및 압력 변화에 의해 작동하는 해저 부설용 복합기뢰가 주류를 이루고 있다.



<그림 2장-3-6> 부설 위치 및 방법에 따른 기뢰 종류

(1) 손상 지표

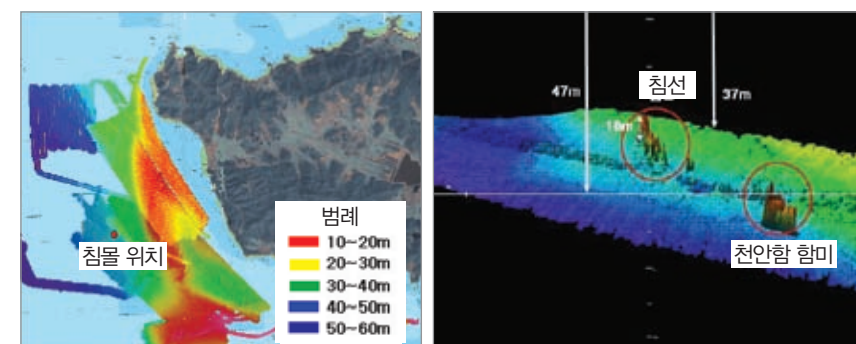
손상 현상	조사 결과
• 선체 외판에 파공 형성	없음
• 파쇄현상으로 인한 손상	없음
• 폭발지점의 선체가 외부에서 내부로 휨	있음
• 파손부위에 열손상이 발생하거나 부분적인 화재 발생	없음
• 함수방향에서 접촉이 이루어져 폭발	없음
• 근접폭발이 일어날 경우에는 다수의 파편이 선체 내에 존재	없음
• 수중폭발에 의한 충격파와 버블효과 발생	있음
• 폭발에 의한 충격파로 선체가 급격히 기울어지거나 들림 현상이 발생	있음

(2) 육안 검사

수상폭발 조사 및 분석 결과에서 제시한 바와 같이 천안함의 폭발현상은 수중폭발에 의한 충격파와 버블효과로 인해 함정이 절단된 전형적인 현상을 보여 주고 있다. 따라서 부유기뢰 및 계류기뢰로 인한 접촉폭발이 발생하였을 가능성은 없으며, 비접촉 계류기뢰에 의한 수중폭발은 천안함 파괴형상과 유사하므로 그 가능성을 배제할 수 없으나 계류기뢰의 경우는 운용환경이 매우 제한적이고 해양환경에 따라 지대한 영향을 받으므로 사용 가능성이 희박하다고 판단하였다.

(3) 환경적 조건

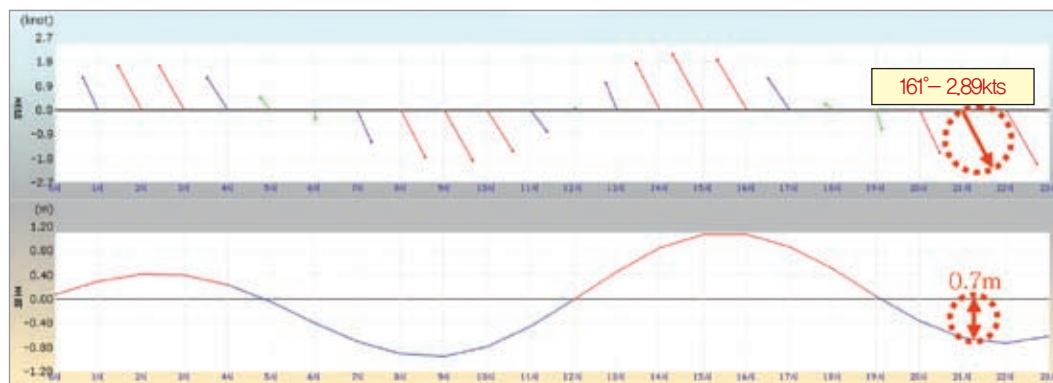
천안함 사건 발생 위치는 백령도 서남방 2.5km(37° 55' 45"N, 124° 36' 02"E) 지점이며, 수심은 47m이고 해저지형은 <그림 2장-3-7>에서 보는 바와 같다.



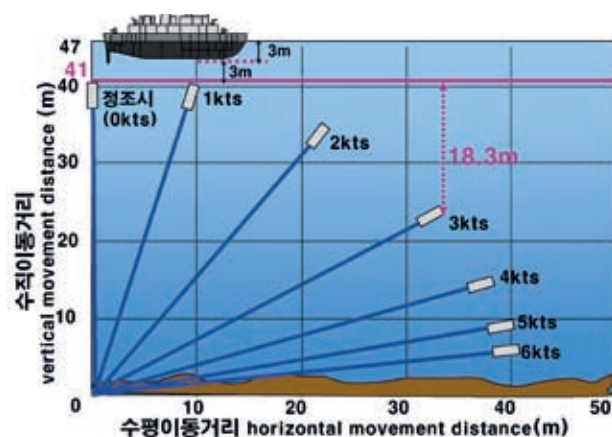
<그림 2장-3-7> 사건 지역 해저지형 및 수심

〈그림 2장-3-8〉에서 보듯이 사건 발생 시 백령도 지역 해양기상은 남서풍이 20kts로 비교적 강하게 불고 있었고, 파고는 2.5m, 조류 161°-2.89kts, 시정은 2.5NM이었다. 특히 사건 당일 고조(만조)는 02:25(2.3m) / 15:15(2.7m), 저조(간조)는 08:43(0.7m) / 21:47(0.8m)이었으며, 이 지역의 평균 조류는 3~5kts, 조수간만의 차는 최대 4m로 계류기뢰의 부설 및 고정에는 매우 제한적인 상황이었다.

백령도 근해의 강한 조류(3~5kts)와 수심(47m), 높은 조수간만의 차(최대 4m) 및 파고(2.5m) 등은 계류기뢰의 위치 고정이나 적정수심 유지를 어렵게 하므로 계류기뢰에 의한 공격 가능성은 지극히 낮았다. 유속에 따른 계류기뢰의 편류 현상은 〈그림 2장-3-9〉와 같으며 유속 3kts 시 계류기뢰의 위치는 기준보다 18.3m 아래로 이동되므로 감응 및 폭발 시 선체에 미치는 영향은 급속히 감소된다.



〈그림 2장-3-8〉 사건 당일 조류 및 조위도



〈그림 2장-3-9〉 조류 속도에 따른 계류기뢰 편류 현황

(4) 모델링 및 시뮬레이션

중어뢰 폭발 가능성에 대한 모델링 및 시뮬레이션에서는 폭약량과 폭발 수심을 변화시켜 가며 내충격(Hull whipping) 분석과 침단 수학적 분석을 실시하였다. 여기서 사용된 폭발 수심과 폭약량은 기뢰에도 동일하게 적용할 수 있다.

(5) 징후 및 경보

백령도 근해는 8~10월에는 꽃게잡이, 4~6월에는 꽃게잡이와 까나리 조업을 위한 어선들의 집중적인 활동이 있으며, 비수기인 11월에서 3월어간에도 1일 평균 40~50여 척의 어선이 조업하고 있다.

사건 당일 천안함의 항적을 살펴보면 3월 26일 06:00에 대청도 기지를 출항하여 08:30 경비 구역에 진입한 후 시간당 1~2회 동일 지역에서 지그재그로 불규칙하게 초계활동을 하면서 최소한 침몰지점 인근을 10회 이상 운항하였다는 점은(사건 당시 천안함은 327° 방향으로 6.7kts로 운항 중이었음) 계류기뢰의 부설이 사전에 이루어지지 않았음을 반증하는 것이라 할 수 있다.

또한 기뢰는 전술적 측면에서 단발로 부설하면 작전성공률이 희박하여 여러 발을 동시에 부설하나 현재까지 발견된 기뢰는 없으며, 백령도 근해에는 어선·상선 등 다양한 표적물이 활동하고 있어 우리 군함만을 표적으로 한 작전을 성공시킬 가능성은 매우 낮다.

(6) 관련 인원 증언

생존자 증언에 의하면 충격파와 버블효과에 의한 들림 현상을 느꼈고 폭발음을 1~2회 청취하였다고 진술하였다.

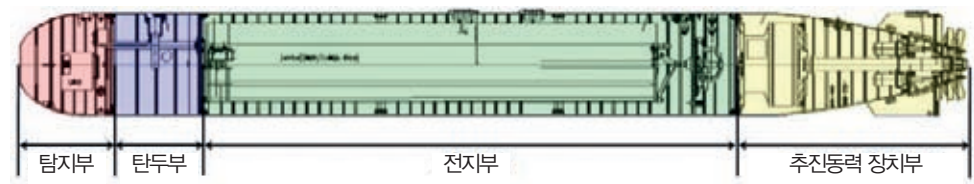
(7) 결론 : 가능성 없음

계류기뢰 운용 시 3~5kts의 빠른 유속, 4m 이상의 조수간만의 차, 47m의 깊은 수심 등은 큰 장애요인으로 작용하며, 또한 사건 당일 천안함이 불규칙 항로를 유지하면서 사건 발생 이전까지 동일지점을 10회 이상 항해했음에도 이상이 없었던 점, 계류기뢰 폭발 후 남게 되는 앵카 및 계류색이 발견되지 않은 점 등을 고려하면 비접촉식 계류기뢰에 의한 폭발 가능성은 없는 것으로 판단하였다.

3) 어뢰

어뢰는 함정, 항공기 및 잠수함에 탑재하여 적 잠수함 및 수상함을 공격하기 위하여 운용되며 중어뢰와 경어뢰로 구분된다.

어뢰는 탐지부, 탄두부, 전지부(또는 연료부), 추진동력장치부로 구성되어 있다.



〈그림 2장-3-10〉 어뢰의 일반적인 구성

탐지부는 수중에서 음향신호를 이용하여 표적을 탐지하는 장치로 표적으로부터 발생하는 소음을 추적하는 수동방식과, 어뢰에서 음향을 발생하여 표적으로부터 반사되어 오는 신호를 감지하여 표적을 탐지하는 능동방식이 있다.

탄두부는 실제 목표물을 폭파시키는 부분으로 주폭약이 내장되어 있고, 기폭을 위해서는 자기센서 및 음향센서를 이용한 근접신관과 표적 충돌에 의한 충격신관이 사용된다.

전지부(또는 연료부)와 추진동력장치부는 어뢰의 추진동력을 제공하는 부분으로 전기 추진 방식과 엔진 추진방식이 주로 사용되며, 어뢰의 운용개념과 음향 특성에 따라 기술적인 측면을 고려하여 적용한다. 엔진 추진방식은 고속추진이 가능하나 어뢰의 자체 소음이 높아 적으로부터 피탐될 가능성이 높으며, 심도에 따라 출력이 줄어드는 문제가 발생하나 최근에는 폐회로 엔진¹⁰⁾의 개발로 이러한 문제를 해결하였다.

수상함과 잠수함에서는 함정에 장착된 소나(Sonar)나 선배열 예인소나¹¹⁾ 또는 디핑소나(Dipping sonar)¹²⁾나 소노부이(Sonobuoy)¹³⁾에 의해 표적을 탐지하여 어뢰를 운용한다. 어뢰의

10) 폐회로 엔진(Closed-cycle engine) : 일반 디젤엔진과 달리 외부공기의 도움 없이 내부 저장하고 있는 산소와 재생 처리된 배기가스를 연소시켜 작동하는 엔진, 함정 및 잠수함에 사용.
 11) 선배열 예인소나(IASS, Towed array sonar system) : 수상함 등에서 음향탐지기가 달린 케이블을 수중에서 넣고 예인하는 방식으로 수중표적을 탐지하는 장비, 장거리 표적탐색에 주로 사용.
 12) 디핑소나 : 수상함 또는 헬기에서 음향탐지기를 케이블에 매달아 심도를 조절해 가며 수중표적을 탐지하는 장비.
 13) 소노부이 : 부표에 음향탐지기를 매달아 해수면으로 띄워 놓고 수중표적 또는 해저의 지형을 탐지하는 장비.

일반적인 운용개념은 〈그림 2장-3-11〉과 같다.

수중에서 운용되는 어뢰는 전면에 장착된 음향센서로 표적함의 음향특성을 분석하여 표적을 탐지하고 표적정보(방위각, 거리, 속도 등)를 추정한다. 〈표 2장-3-1〉에서 보는 바와 같이 직주방식과 어뢰의 소나로 탐지하는 음향탐지방식 및 항적탐지방식이 있으며 탐지원리는 다음과 같다.

직주방식은 탐지기능이 없는 충격신관을 주로 사용하며, 직진 또는 지그재그 궤적으로 주행한다. 1차 주행거리와 회전각도, 2차 주행거리를 어뢰에 설정하여 발사하면 어뢰는 일정거리(1차 주행거리)를 주행한 후 설정된 회전각도에 따라 회전한 후 2차 주행거리만큼 주행하면서 표적 명중 시 기폭된다.



〈그림 2장-3-11〉 경어뢰 및 중어뢰 운용개념도

탐지방식		특성
직주방식		<ul style="list-style-type: none"> • 탐지기능이 없음 • 직진 및 지그재그 궤적으로 주행
음향탐지방식	수동탐지	<ul style="list-style-type: none"> • 표적함의 추진계통에서 발생하는 소음을 분석하여 탐지 • 수상함 탐지에 주로 사용
	능동탐지	<ul style="list-style-type: none"> • 어뢰에서 신호를 송신하고 표적함 몸체에서 반향되는 신호를 분석하여 탐지 • 잠수함 탐지에 주로 사용
항적탐지방식		<ul style="list-style-type: none"> • 표적함의 기동에 의해 발생하는 항적을 탐지 • 어뢰의 상부에 항적센서를 장착하고 음향신호를 송수신하여 항적에서 산란되는 음향신호를 분석하여 탐지 • 수상함의 항적탐지에 사용

〈표 2장-3-1〉 어뢰 탐지방식 및 특성



〈그림 2장-3-12〉 수상함 항적



〈그림 2장-3-13〉 항적추적어뢰의 수상함 항적추적원리

수동 음향탐지방식은 표적함의 추진계통에서 발생하는 소음을 분석하여 탐지하며, 수상함 탐지에 주로 사용하고 표적의 방위각을 계산하여 추적한다. 능동 음향탐지방식은 어뢰에서 신호를 송신하고 표적함 선체에서 반향되는 신호를 분석하여 탐지하는 방식으로 잠수함 탐지에 주로 사용된다.

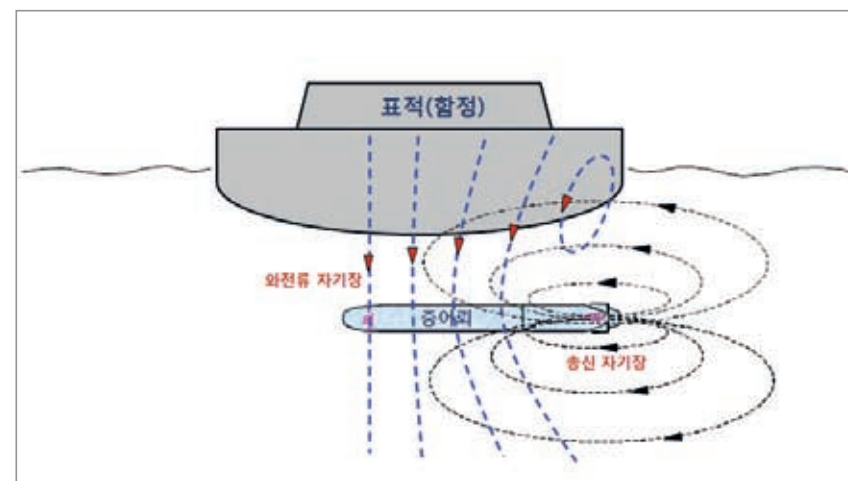
항적탐지방식은 수상함의 프로펠러 및 선체에서 발생된 항적을 추적하는 방식으로 항적은 선체 형상 및 기동속도에 따라 다양한 형태로 발생되고, 크기가 작은(수십 μm) 기포는 수중에 10분 이상 존재한다. 이를 탐지하기 위해 어뢰의 상부에 항적센서를 장착하고 음향신호를 송수신하여 항적에서 산란되는 음향신호를 분석하여 탐지한다. 추적은 항적의 경계면을 따라가는 방식을 사용한다.

신관은 표적으로 유도된 어뢰의 탄두를 기폭시키기 위한 감응장치로 어뢰에서 사용되는 신관 종류 및 작동원리는 〈표 2장-3-2〉와 같다.

충격식 신관은 충돌 시 발생하는 충격력을 관성스위치가 감지하여 기폭하며 관성스위치는 모든 방향에서 낮은 가속도의 충격에 작동한다. 이러한 방식은 함정의 선체 옆면에서 폭

신관 종류		작동원리
충격식 신관		<ul style="list-style-type: none"> 선체에 부딪히는 충격을 감지하여 기폭 ⇒ 함정의 측면에서 폭발
근접식 신관	자기감응신관	<ul style="list-style-type: none"> 선체의 하부를 통과하면서 선체 와전류 자기장 반사신호를 감지하여 기폭 ⇒ 함정의 선저에서 폭발
	음향감응신관	<ul style="list-style-type: none"> 선체의 하부를 통과하면서 선체의 음향반사를 감지하여 기폭 ⇒ 함정의 선저에서 폭발

〈표 2장-3-2〉 신관 종류 및 작동원리

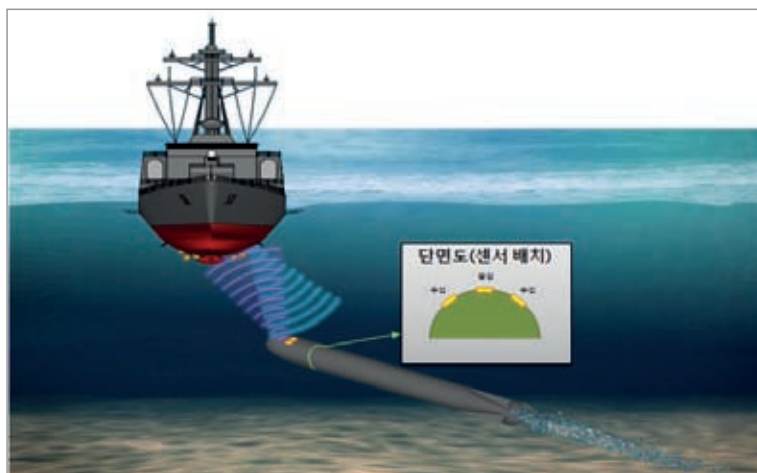


〈그림 2장-3-14〉 자기감응신관의 작동원리

발을 일으킨다.

자기감응신관은 특정 주파수의 송신 자기장을 발생시켜 표적(함정) 표면에 형성되는 와전류(Eddy current) 자기장의 변화를 감지하여 기폭되는 방식으로, 대략 함정의 중앙 부위에서 기폭된다.

음향감응신관은 어뢰 상부 중앙에 장착된 고주파(수백 kHz 대역) 송신센서에서 음향신호를 방사하며, 어뢰 상부 좌우에 장착된 2개의 고주파 수신센서에 수신되는 신호를 감지하고 근접거리 내 표적의 존재 여부를 판단하여 기폭한다. 이 방식도 대략 함정의 중앙 부위에서 기폭된다.



〈그림 2장-3-15〉 음향감응신관의 작동원리

(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 선체 외판에 파공 형성	없음
• 국지적인 선체 외판 휨 현상	있음
• 폭발지점의 선체가 외부에서 내부로 휨	있음
• 파손부위에 열손상이 발생하거나 부분적인 화재가 발생	없음
• 근접폭발이 일어날 경우에는 다수의 파편이 선체 내 존재	없음
• 수중폭발에 의한 충격파와 버블에 의한 손상 증거	있음
• 폭발에 의한 충격파로 선체가 급격히 기울어지거나 들림 현상이 발생	있음
• 파공 및 잔해	없음
• 어뢰 잔해	있음

어뢰는 접촉 및 비접촉 폭발이 가능한 무기체계로 접촉 또는 비접촉폭발 현상은 기뢰의 접촉 및 비접촉폭발 현상과 동일하다.

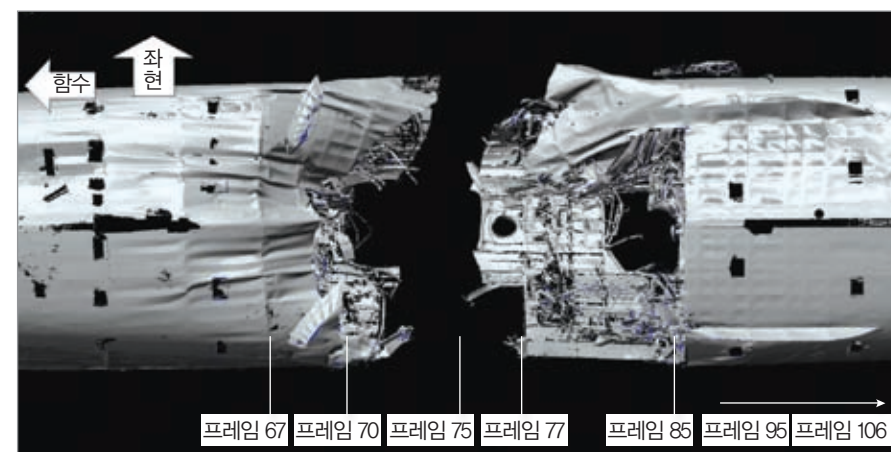
(2) 육안 검사

천안함은 가스터빈실 좌현 선저 아래 수중에서 우현 상방향으로 압력이 지향되면서 절단되었고, 용골과 파단면이 상방향으로 꼬이면서 찢어져 올라갔다. 가스터빈이 장착된 용골 부분과 선저 부분이 떨어졌고, 늑골과 보강재가 압력에 의해 움푹 패었으며 우현쪽으로 겹쳐서

찌그러졌다. 좌현 측 전선은 단순하게 절단된 반면 우현 측은 장력에 의해 찢어졌고, 선체 내부에서는 화염, 화재, 열상 흔적이 발견되지 않았다. 또한 선저 부분에서는 광범위하게 국부적으로 페인트가 벗겨진 현상이 발견되었다.

프레임 106 이후로는 충격으로 인한 손상이 관측되지 않았으며, 국지적인 외판 휘어짐 현상은 좌현 측면 외판의 경우 절단된 부분부터 프레임 95까지, 우현 측면의 경우 절단된 부분부터 프레임 90까지 관찰되었다. 또한 프레임 67에서 70까지 윗방향으로 심하게 굽은 것이 관찰되었다.

함미 프레임 75에서 85 사이 좌현의 선체 외판과 함수 프레임 70에서 71 사이의 선체 외판이 안쪽으로 오목한 모양으로 심하게 휘어졌다. 절단된 함미 용골도 함미의 좌현 갑판방향(수직방향)으로 변형되었다. 마지막으로 프레임 70과 85의 절단된 용골에서 휘어짐이 심하게 일어났으며, 이러한 현상은 장력에 의해 발생하는 초기 선체의 V자형 휨 현상(Sagging) 과정에서 발생하였을 가능성이 매우 높다.



〈그림 2장-3-16〉 천안함 절단 3차원 레이저 스캔 형상

(3) 환경적 조건

사건 발생 당시의 해상상태 및 해양조건은 '2' 기뢰' 항목에서 기술한 내용과 동일하며 이러한 해양환경은 어뢰가 천안함을 탐지 및 추적하는 데 제한사항으로 작용되지 않는 것으로 판단되었다.

그리고 기뢰 운용의 제한사항이었던 사건 발생 수역의 수심, 조수간만의 차와 유속·파고 등은 중·소형 잠수함의 기동과 잠수함에 의한 어뢰 공격에는 제한요소로 작용하지 않는 것

으로 판단되었다.

(4) 모델링 및 시뮬레이션

미국 조사팀은 4월 26일 ‘미합중국 해군 천안함 모델링’ 결과를 제시하면서 선체 용골 밑에서 어뢰가 폭발했을 가능성이 가장 높다고 판단하였으며, 가장 가능성 있는 폭발유형으로는 250kg의 고성능 폭약이 선체 프레임 75번 선체 중심선에서 좌현쪽으로 3m, 깊이 6~9m에 서의 폭발을 제시하였다. 또한 국방과학연구소 조사팀도 절단부위 재질변형상태 검사 결과 강력한 힘에 의해 좌현쪽이 순식간에 절단되고 취성파괴 현상이 우현으로 전파되어 함수, 함미가 절단된 것으로 판단하였다. 절단 부위를 중심으로 일부 선체를 구현하여 다양한 수심과 폭약량으로 시뮬레이션한 결과 미국팀과 유사한 결과를 얻었다. 영국 조사팀의 시뮬레이션 결과도 한국·미국팀 결과와 유사하였다.

(5) 징후 및 경보

사건 발생 해역의 수심은 대함 어뢰 운용에 제한이 없는 충분한 수심이며, 음향유도방식의 어뢰는 정확히 함정의 중앙부분으로 유도가 가능하므로 잠수함이 사고 발생 지역 북서쪽에 서 천안함을 공격했을 가능성이 높다. 또한 어뢰의 폭발력을 검토·판단해 보면 경어뢰(TNT 45kg 이하)로는 선체를 절단할 수 없고, 직주어뢰(충격관성 방식)는 흔적이 많이 남으므로 가능성이 희박하다.

(6) 관련 인원 증언

천안함 생존자들은 폭발음을 1~2회 청취하였으며, 천안함의 함수 부분이 우측으로 기울어졌을 때 넘어진 좌현 견시병의 얼굴에 물방울이 튀었고, 해병 6여단의 해안경계 초병은 흰색 섬광불빛¹⁴⁾(폭 20~30m, 높이 100m)을 관측했다고 진술하였다.

(7) 결론 : 가능성 높음

미국과 영국, 한국 국방과학연구소 조사팀의 의견을 종합해 보면 폭발물은 정확히 함 중앙에 유도되어 가스터빈실 좌현 3m 아래에서 근접폭발하였고, 폭발 시 발생한 충격파와 버블효과에 의해 선체가 절단되는 현상이 발생하였다.

.....

14) 조사 완료 후 폭발 시 발생한 워터제트에 의한 물기둥으로 판단.

따라서 어뢰에 의한 피격 가능성은 매우 높으며, 가능성 있는 어뢰는 잠수함에 의해 발사된 음향유도어뢰로 판단하였다.

4) 육상조종기뢰(MK-6) 폭발

천안함 침몰사건에 대한 원인 조사가 진행되면서 언론에 의해 다양한 가능성이 끊임없이 제기되었고, 이러한 가능성 있는 원인 중의 하나가 과거 우리 해군에 의해 1970년대 후반 백령도 인근에 설치되었다가 철거된 육상조종기뢰(MK-6)였다.

육상조종기뢰에 대한 조사는 3월 말 합동조사단이 구성된 직후 '70년대 말 당시 백령도 연화리 해안에서 육상조종기뢰 설치에 참여했던 기술자의 증언을 기초로 구체적인 조사가 시작되었다.

기술자는 육상조종기뢰 설치 당시 경남 창원에 소재한 제일정밀공업에서의 초기 연구와 연화리 앞바다에서의 기뢰 설치에 참여하였다. 기술자는 육상조종기뢰(LCM¹⁵⁾)의 형태와 도전선의 구조를 설명하면서 도전선 내부 다중 피복 중 한 개의 층이 아연(Zn)으로 도금된 그물망식 금속선으로 구성되어 있었고 전원을 공급하는 중앙의 전선은 구리로 되어 있으며, 단선되어 바닷물에 노출될 시에는 불타전지의 원리¹⁶⁾에 의해 전압이 발생하여 전기뇌관이 기폭될 가능성이 있다고 주장하였다.¹⁷⁾

이에 따라 4월 3일 육상조종기뢰 기술자와 국방과학연구소의 폭발물 전문가를 초청하여 합동토론회를 개최하였다. 기술자는 불타전지의 이론과, 본인이 1970년대 뇌관의 전류를 측정하려고 계측기를 작동 시 뇌관이 폭발할 정도로 민감했다는 점을 들어 충분한 가능성이 있음을 강조하였고 개략적인 기폭 전압 및 전류값(1V, 5~10mA)을 제시하였다. 그러나 국방과학연구소 폭발물 전문가들은 바닷물 속에서 전원이 발생하더라도 대부분은 바다로 방전되며, 피복에 도금된 아연과 구리선에 의해 기폭에 필요한 충분한 전기가 발생할지 의문스럽기 때문에 그러한 가능성은 낮다고 판단하였다.

4월 19일에는 약 50cm 길이의 도전선을 확보하여 4월 21일에 평택항에서 바닷물 속에 도전선을 담근 상태에서 전원 발생 여부를 시험한 결과 전압은 0.47V가 발생하였으나 전류는

.....

15) LCM : Land control mine.

16) 묶은 황산과 같은 전해질 수용액에 이온화 경향이 다른 2가지의 금속판(구리, 아연)을 넣고 도선을 연결하여 만든 전지.

17) 이 시기에 언론매체에서도 연화리 앞바다 미회수 기뢰에 의한 폭발 가능성을 제기하였음.

발생하지 않았다. 바닷물 속 기폭전원 발생에 대한 전문기관의 자문을 구하기 위해 4월 23일 (주)한국화약에 ‘군용 전기뇌관 해수 중 기폭 가능성’을 검토의뢰¹⁸⁾한 결과 4월 26일에 “군용 표준전기뇌관인 KM6 전기뇌관의 경우 전류는 최소 0.45A가 공급되어야 화약을 기폭시킬 수 있으며, 해수 중 이중 금속간 전해작용(Galvanic action)에 의한 전원차로 발생한 전류 및 전압은 특정부분에서 국부적으로 발생하는 Local 전류(부식반응)로 통상 μA 또는 mA 수준 이므로 기폭은 불가능할 것으로 판단된다.”는 내용의 회신을 접수하였다.

(1) 손상 지표

손상 현상	조사 결과
• 미약한 충격 손상	없음
• 전반적인 외판 디싱 현상	있음
• 광범위한 선체 변형	없음
• 기뢰 잔해	없음

(2) 육안 검사

가스터빈실 주변의 국지적인 충격 손상은 있으나, 선체 전반에 걸친 휨 현상은 없었다. 또한 함미 스크루 및 탄약고 주변 선저에도 외판의 휘어짐 현상이 발견되지 않았다.

(3) 환경적 조건

① 육상조종기뢰 설치 경과

육상조종기뢰 설치의 백령 도서군에 대한 북한의 상륙세력을 해상에서 저지하기 위한 목적으로 해군본부에서 추진한 것으로 MK-6 폭뢰(수상함의 대잠수함용 무기)에 안전핀, 안전커버, 뇌홍(기폭화약), 피스톨을 제거하고 전기식 뇌관(미군 전원공급식 뇌관¹⁹⁾, M6 계열²⁰⁾)과 도전선을 연결하여 서북도서지역에 설치하였다.

’75년 11월 14일 사업집행이 결정되어 ’76년 7월까지 국방과학연구소의 기술검토와 시험 완료 후 12월에 케이블을 납품하는 금성전선과 개조사업을 주관하는 제일정밀공업으로 구

18) 국회추천 조사위원 (예/대령) 주관.

19) 육상조종기뢰 설치 사업에 참여했던 (구)제일정밀공업 기술자의 증언.

20) 70년대 주로 사용되었던 미국의 배터리 전원공급식 뇌관.

분하여 계약하였다. ’77년 4월에 육상조종기뢰를 조립하여 6월에 서북도서로 수송하고 7월에서 10월까지 설치 및 시사를 완료하였다.

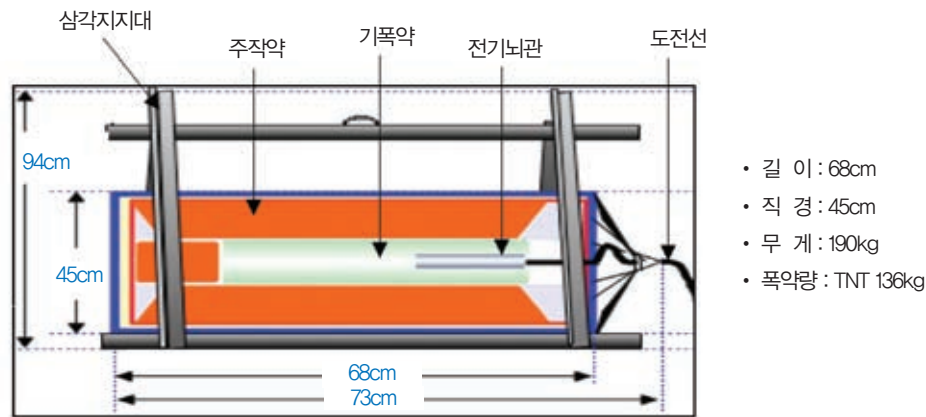
이후 육상조종기뢰의 ‘불필요 판단’에 따라 ’85년 말 도전선(육상 통제대에서 해안까지)과 조종상자(Control box, 각각의 기뢰에 도전선 연결)를 제거²¹⁾하여 불능화하였으나, 기뢰 본체는 해저에 잔류하였다. 약 16년이 경과된 ’01년 6월 백령도 어민 간담회 시 잠수조업 어민들이 수중에 잔류한 기뢰 본체의 제거를 건의하여 같은 해 11월에 합참에서 검토한 결과 제거가 불필요한 것으로 결정하였으나, ’08년 7월에 다시 검토한 결과 이를 제거하는 것으로 결정, ’08년 8월 11일~9월 26일까지 해군 특수전전대, 해병 수색대 및 장비(고무보트 등)를 투입하여 00발을 회수하였다. 기뢰제거 작전구역의 평균 수심은 약 6m였으며, 해안으로부터 200~400m 거리였다.

회수된 육상조종기뢰의 뇌관과 부스터는 분리하여 ’08년 9월 22일부터 24일까지 해병 6여단 폭파훈련장에서 폭파처리하였고, 기뢰 본체는 정기 수송함을 이용하여 해군 군수사 병기 탄약창으로 이관하여 보관하다가 ’09년 7월에 폭파처리하였다. 설치 지역은 <그림 2장-3-17>과 같다.



<그림 2장-3-17> 육상조종기뢰 설치 지역

21) 당시 작업에 참여한 군무원의 증언.



〈그림 2장-3-18〉 육상조종기뢰 형상 및 제원

② 육상조종기뢰 구성 및 작동원리

육상조종기뢰는 수압식 MK-6 폭뢰를 전기식 조종기뢰로 개조한 것으로 제원과 형상은 〈그림 2장-3-18〉과 같다.

육상조종기뢰는 기뢰 고정용 철제 삼각받침대에 의해 고정된 상태에서 해안으로부터



기뢰 연결 도전선

철제 삼각지지대 용접 후

〈그림 2장-3-19〉 도전선 및 철제 지지대 형상

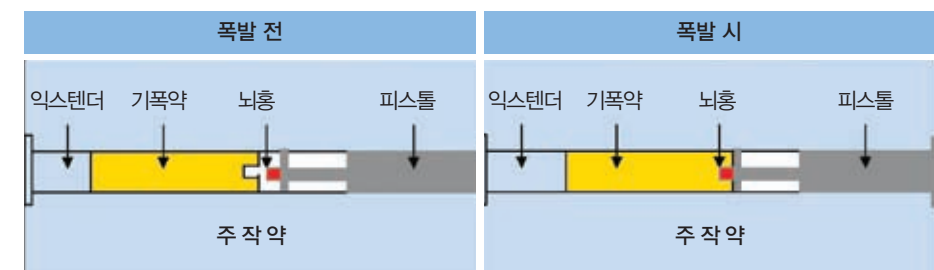
400~450m(수심 7~10m)에 설치되었고, 육상통제용 조종판넬에서 각각의 기뢰를 따로 폭발할 수 있도록 도전선이 연결되었다(〈그림 2장-3-19〉 참조). 또한 기폭전원을 공급하기 위해 전원공급용 발전기가 별도로 설치되었다.

금성전선에서 납품한 도전선은 직경 약 1.6cm이며 합성수지로 피복되어 있었고, 장력을 강화시킨 강철선 8가닥과 합성수지로 피복된 구리선 2가닥으로 구성되어 있어 쉽게 구부러



- 구리선 1 : 7가닥의 구리선을 2중 합성수지로 피복/중앙에 위치
- 구리선 2 : 1가닥의 구리선을 단층 합성수지로 피복/바깥쪽에 위치

〈그림 2장-3-20〉 도전선 형상



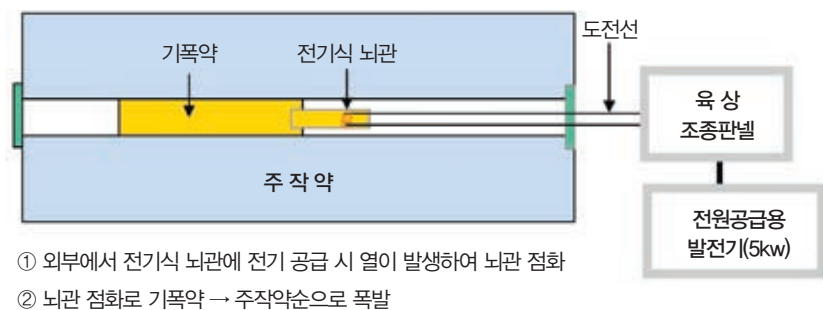
- ① 수중 투하 시 수압에 의해 익스텐더와 피스톨 무장
 - 익스텐더 : 11~22cm 침강 시 수압에 의해 기폭약을 뇌홍쪽으로 밀어 기폭준비 상태를 만드는 기능
 - 피스톨 : 설정된 수심 도달 시 수압에 의해 공기로 뇌홍을 타격하여 기폭시키는 기능
- ② 뇌홍(화약) 기폭에 의해 기폭약 → 주작약순으로 폭발

〈그림 2장-3-21〉 MK-6 폭뢰 폭발 절차

질 수 없으며, 중량(10m 기준 6kg)으로 인해 해저에 가라앉게 되어 있었다. 도전선의 세부 형상은 〈그림 2장-3-20〉과 같다.

육상조종기뢰는 개조 전에는 〈그림 2장-3-21〉과 같이 수압식으로 작동하는 폭뢰였으며, MK-6 폭뢰의 익스텐더, 피스톨 및 뇌홍을 제거하고 전기뇌관을 설치한 후 실리콘으로 밀봉하고, 육상 조종반에서 원격으로 폭발 가능하도록 도전선을 연결하는 방식으로 개조되었다.

개조 후에는 전기식으로 작동하는 육군의 크레모아 작동원리와 유사하며, 폭발 절차는 〈그림 2장-3-22〉와 같다.



〈그림 2장-3-22〉 육상조종기뢰 폭발 절차

사건 발생 당시 천안함이 위치한 해역의 수심은 47m이고 육상조종기뢰는 약 30여 년간 해저에 잔류하고 있어 기폭기능이 거의 상실된 상태였으며, 설치 시 해저에서 이동되지 않도록 설계된 점을 고려하면 사건 발생 해역까지 이동할 가능성은 없다고 판단되었다.

(4) 모델링 및 시뮬레이션

해저폭발의 경우는 어뢰의 시뮬레이션 결과를 적용했으며, 폭약량과 수심 고려 시 선체 절단은 불가한 것으로 판단되었다. 영국 조사팀의 분석결과 육상조종기뢰(MK-6)보다 20배의 폭약이 있어야 천안함과 같은 손상이 발생하는 것으로 확인되었다.

(5) 징후 및 경보

육상조종기뢰 폭발과 관련한 특이 징후 및 경보는 없었다.

(6) 관련 인원 증언

육상조종기뢰 폭발로 판단할 만한 증언은 없었다.

(7) 결론 : 가능성 없음

미국 조사팀과 선체구조관리팀에서 실시한 수중폭발 관련 내충격(Hull whipping)에 대한 모델링 및 시뮬레이션 결과에 의하면 사건 발생 지점의 수심 47m에 있는 폭약량 136kg의 육상조종기뢰로는 선체 절단이 불가능하다고 판단하였다.

또 다른 가능성으로 제기된 해저에 잔류하고 있던 전원공급용 도전선이 함정 스크루에 끌려와 폭발했을 경우는 도전선이 강철과 구리선으로 구성되어 쉽게 감길 수 없고 중량(10m 기

준 6kg)이 무거워 수중 40m에서 해수면 부근까지 부상이 곤란하며, 폭발되더라도 스크루 부분에서 폭발이 일어나야 하므로 함미 부분이 정상상태임을 고려할 때 가능성이 없다고 판단하였다.

결론적으로 육상조종기뢰(MK-6)는 바닷물 속에 설치된 후 30년이 지난 사건 발생 시점에서 자연 기폭될 가능성이 없으며, 설사 폭발되더라도 폭약량이 작아(136kg) 47m의 깊은 수심에서는 선체를 절단시킬 수 있는 폭발력이 없고, 도전선의 무게를 고려할 때 부상하여 스크루에 감길 가능성도 없어 육상조종기뢰에 의한 폭발 가능성은 없는 것으로 판단하였다.

분야별 세부분석 결과



1. 형상 및 흔적 분석

천안함의 선체 형상 및 흔적 분석은 첫째 인양된 함수와 함미의 전체 모양, 둘째 선체 구조가 변형된 형상 및 절단면의 형태, 셋째 밀리고 눌리고 잘리고 굽힌 것과 같은 미세한 흔적 등 3가지 관점에서 실시되었으며, 이를 통하여 폭발이 일어난 위치, 폭발의 크기와 방향, 선체에 미친 영향 등을 판단하였다.

1) 전체 모양

천안함의 전장은 88.32m로 절단된 함수와 함미에 대해 3D 사진 촬영을 통하여 정밀계측하고, 선체 조사를 통하여 실측한 결과 선체는 가스터빈실 중간 부분인 좌현 47.6m, 우현 45.4m 지점이 절단된 상태였다.

절단된 함수와 함미를 선체 원형대로 맞추었을 때 좌현의 경우 함미 선저 일부를 제외한 외판부의 길이가 함수 50.32m, 함미 38m로 떨어져 나간 부분 없이 절단된 형태였으나, 우현



〈그림 3장-1-1〉 천안함의 전체 모양

의 경우에는 함수 47.2m, 함미 33.32m로 약 7.8m가 떨어져 나간 것을 확인하였다. 떨어져 나간 부분은 주갑판의 소자정비실, 상사식당, 기관조종실, 건조물창고, 승조원식당 조리실 및 O-1 deck의 연돌과 디미스트, 하푼유도탄 등으로 가스터빈실을 중심으로 상·하단 부분에 국한되어 떨어져 나갔음이 확인되었다.

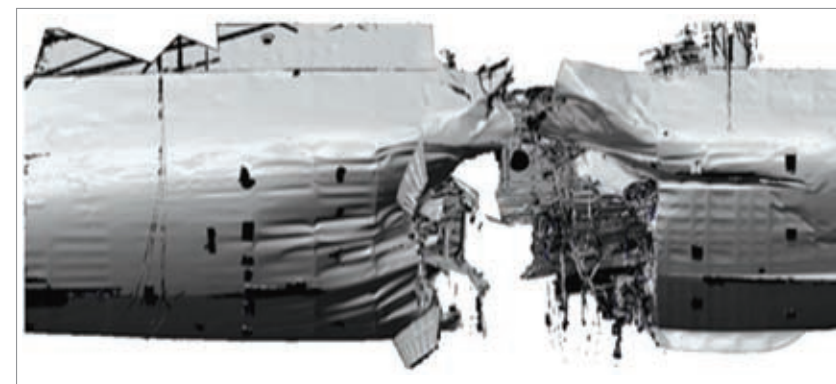
2) 형상 분석

형상 분석은 선체 구조적인 측면에서의 변형상태, 절단면의 모습, 떨어져 나간 부위와 파손된 형태 등을 파악하여 분석함으로써 천안함에 미쳤던 폭발 또는 충격 등 외력의 위치와 진행방향을 판단할 수 있었다.

〈그림 3장-1-2〉에서 보는 바와 같이 함수와 함미의 선저 부분이 압력에 의해 아래쪽에서 위쪽으로 꺾여 올라갔으며 좌현 절단부위는 상단쪽으로 꺾이고 밀려 올라갔고, 우현 절단부위는 가스터빈실 전·후방 격벽을 기준으로 뜯긴 형태로 떨어져 나갔다.

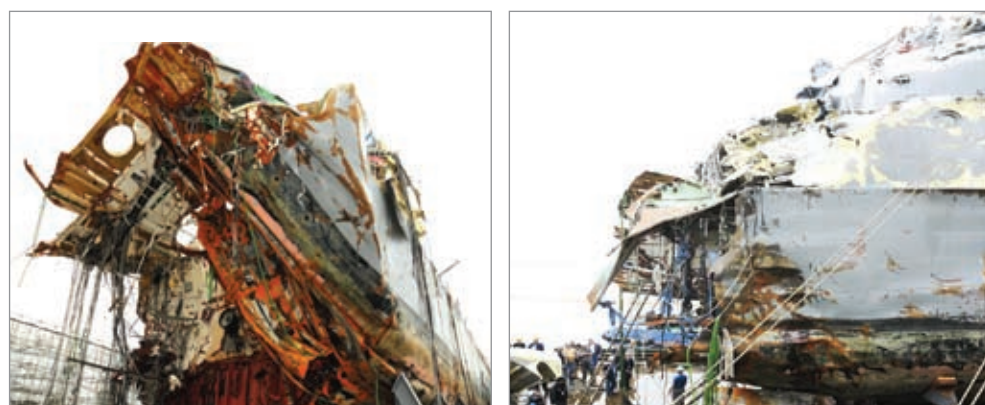
가스터빈실 천장은 좌측이 위로 솟아오르면서 폐기관 부분이 압력에 의해 떨어져 나갔고, 함수쪽 용골은 위쪽으로 급격히 말려 올라가면서 우측방향으로 뒤틀려 있는 것을 확인하였다.

함수와 함미 선저가 아래쪽에서 위쪽으로 꺾였다는 것은 선저 밑에서 수중폭발이 있었다는 것을 의미한다. 좌현 절단부위가 위쪽으로 꺾이고 우현 절단부위가 뜯겨 나간 것, 그리고 용골이 좌에서 우로 뒤틀린 것은 폭발방향이 좌현 하단부에서 우현 위쪽방향으로 진행되었고, 가스터빈실이 떨어져 나갔다는 점은 선체 진행방향을 고려할 때 폭발원점이 함수쪽 가스터빈실 좌측 하단부였다는 사실을 확인하였다.



함수

함미



좌현 절단부위

우현 절단부위



가스터빈실

용골

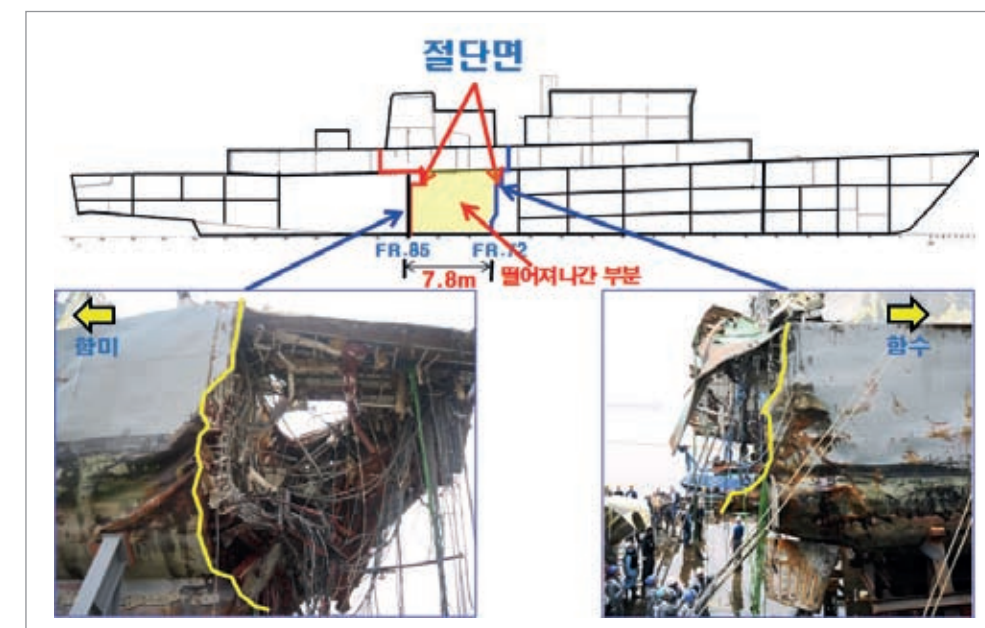
〈그림 3장-1-2〉 형상 분석

3) 선체 변형형태

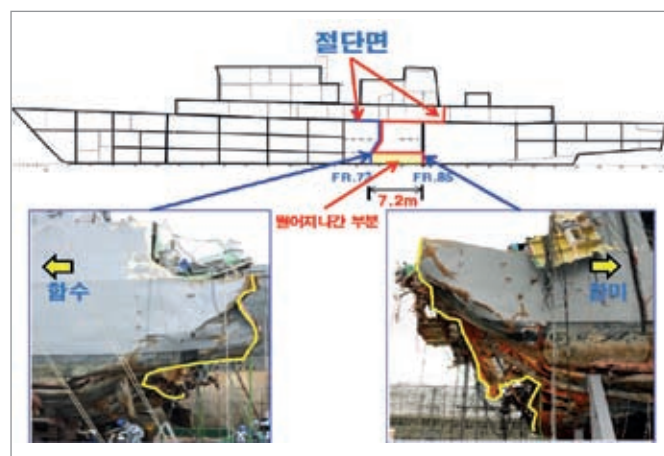
선체 변형형태는 국방기술품질원에 의뢰하여 전문인력 3명이 선체 절단부위, 절단면의 변형 형태를 정밀측정하여 분석하였다. 우현 절단면은 〈그림 3장-1-3〉, 〈그림 3장-1-4〉에서 보는 바와 같이 프레임 72부터 프레임 85까지 절단되어 7.8m가 떨어져 나갔다. 함수부 선저 용골은 프레임 55에서부터 변형이 시작되어 프레임 72에서는 1,367mm가 위쪽으로 변형되었으며, 함미부 선저 용골은 프레임 100부터 변형이 시작되어 프레임 85에서 510mm가 위쪽으로 변형되었다.



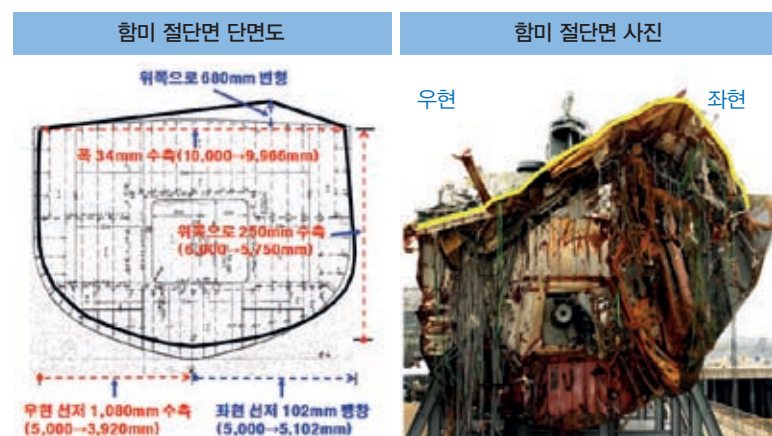
〈그림 3장-1-3〉 선체 우현 절단부위 및 용골 변형 현황



〈그림 3장-1-4〉 선체 우현 절단부위 형상



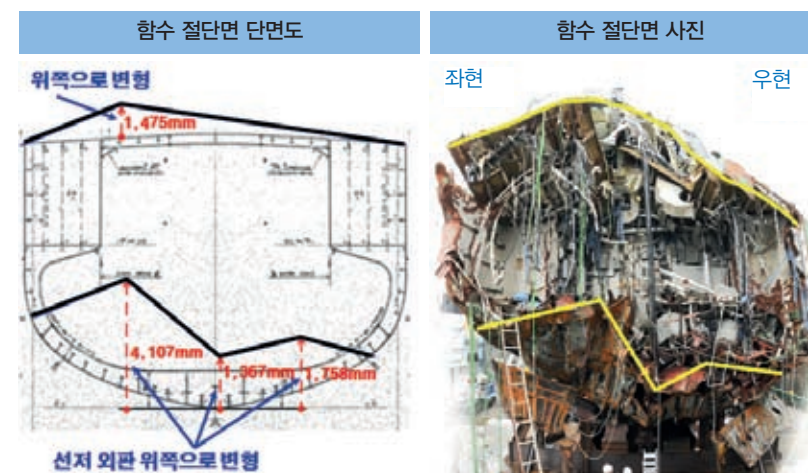
〈그림 3장-1-5〉 선체 좌현 절단부위 형상



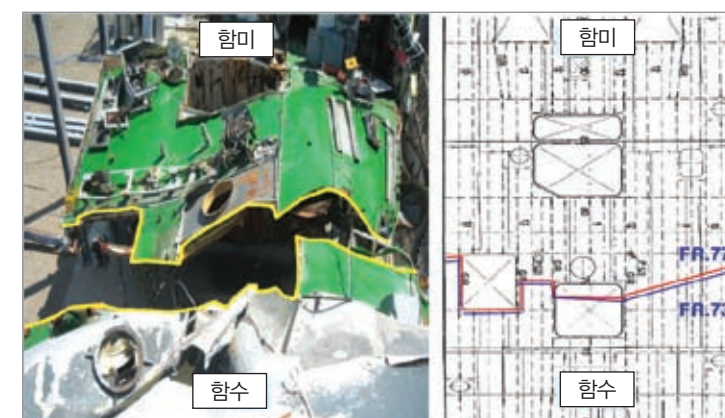
〈그림 3장-1-6〉 함미 절단면 변형형태

좌현은 〈그림 3장-1-5〉에서 보는 바와 같이 프레임 73에서 균일한 형태로 파단되었으며, 떨어져 나간 부위는 선저 약 7.2m이다. 함미는 프레임 85~73(7.2m) 파단면 끝단에서 함 내부 위쪽으로 꺾여 있으며, 함수도 프레임 70~73(1.8m)에서 함 내부 위쪽으로 꺾여 있다. 이러한 선체 변형형태로 볼 때 함 내부폭발, 피로파괴 및 좌초 등에 의해 발생할 수 있는 선체 손상은 아니며, 좌현 하부에서 강력한 비접촉 수중폭발에 의해 발생한 강한 힘이 함 내부 우현쪽으로 전달되어 선체가 손상된 것으로 판단하였다.

함미 절단면인 프레임 85 격벽은 〈그림 3장-1-6〉에서 보는 바와 같이 함 중심선(Center line)을 기준으로 수직방향으로 250mm가 수축되었다. 좌현 선저는 폭방향으로 102mm가



〈그림 3장-1-7〉 함수 절단면 변형형태

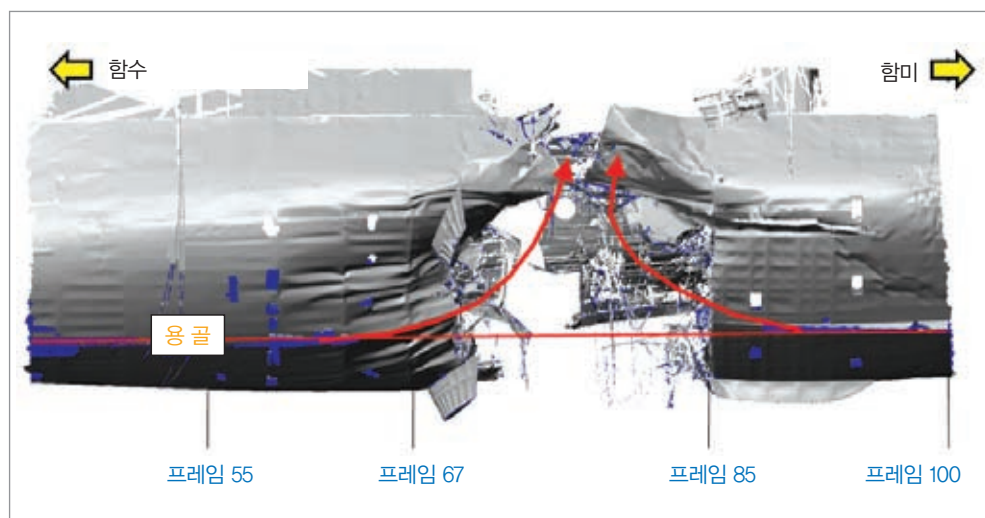


〈그림 3장-1-8〉 주갑판 변형형태

팽창되었으며, 우현 선저는 1,080mm가 수축되었다. 주갑판은 폭이 34mm 수축되었으며 중심선을 기준으로 좌현 3,600mm 지점에서 위쪽으로 680mm 변형되었다.

함수 절단면은 〈그림 3장-1-7〉에서 보는 바와 같이 선저부는 중심선을 기준으로 최대 변형은 좌현 2,400mm 지점에서 기준선(Base line) 대비 4,107mm가 위쪽으로 변형되었으며, 용골부위는 1,367mm, 우현 선저는 중심선 기준 1,800mm 지점에서 1,758mm가 위쪽으로 크게 변형되었다. 주갑판은 중심선을 기준으로 좌현 2,400mm 지점에서 위쪽으로 1,475mm가 변형되었다.

주갑판은 〈그림 3장-1-8〉에서 보는 바와 같이 절단면은 프레임 73~77 구간에 위치하며,



〈그림 3장-1-9〉 좌현 절단부위 하부 형상

절단에 의해 떨어져 나간 부분은 없다. 외력에 의한 응력 집중으로 갑판의 개구부(Opening) 주위로 절단되었으며, 우현부에 비해 좌현부가 크게 위쪽으로 변형되어 있다.

선체 변형형태를 정밀측정하여 분석한 결과 〈그림 3장-1-9〉에서 보는 바와 같이 좌현 가스터빈실 하부에서 강력한 비접촉 수중폭발이 발생하여 우현쪽으로 힘이 전달되면서 선체가 손상된 것으로 분석하였다.

4) 흔적 분석

흔적 분석은 형상 분석과 달리 선체에 나타난 밀리고 눌리고 잘리고 긁힌 것과 같은 미세한 흔적을 통하여 선체를 파괴한 원인을 규명하는 것으로 흔적의 모양을 통해 폭발, 충격 등 외력의 종류를 판단하고 흔적의 위치를 통하여 외력의 발생원점을 파악하였다.

〈그림 3장-1-10〉에서 보는 바와 같이 좌현 함안정기는 아랫면과 좌·우 측면이 찌그러지면서 찢어진 압력흔이 있었고, 함수 절단면 용골 우측 선저면에서 강력한 수중 압력파에 의해 발생한 것으로 보이는 압력흔이 발견되었다.

또한 함수 절단면 주변 선저부분이 강한 수압에 의해 ‘골’ 형태로 페인트가 긁혀 벗겨진 버블흔이 발견되었으며, 절단면의 단락된 전선들은 열에 의해 녹는 등의 흔적 없이 강력한 힘에 의해 절단되었고, 함미 절단면인 가스터빈실 후방 격벽보강재가 우상단으로 밀린 흔적과



〈그림 3장-1-10〉 흔적 분석

뜯긴 흔적을 확인하였다.

이러한 압력흔, 수압흔, 버블흔, 절단흔, 밀리고 뜯긴 흔적들은 수중폭발에 의한 충격파 및 버블효과에 의해 나타난 현상으로 판단하였다.

5) 소결론

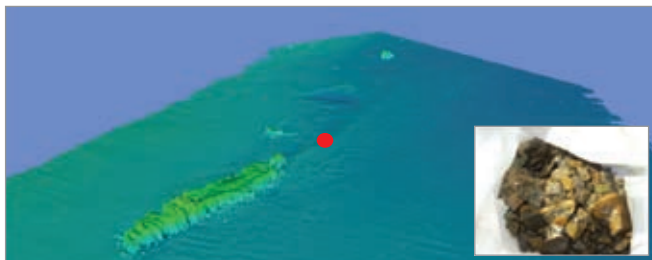
형상 및 흔적 분석 결과 선체에 미친 외력의 형태는 수중폭발에 의한 충격파 및 버블효과에

의한 현상이고, 폭발원점은 함수쪽 가스터빈실 좌현 하단부이며 폭발력은 좌현 하단부에서 우현 상단부로 작용하여 함수와 함미로 절단되었다는 사실을 확인하였다.

2. 증거물 분석

1) 증거물 채증

증거물 채증은 크게 해역 수거물, 함수와 함미 등에서의 채증물 및 해저 수거물로 구분하여 채증하였다. 먼저 해역 수거물 채증을 위해 군함 12척(제주함, 여수함, 양양함, 평택함, 진해함, 청해진함, 성인봉함, 웅진함, 김포함, 고령함, 독도함, 미군 살보함) 그리고 초기 생존자 구조 활동에 참여한 해경정 5척이 투입되었다. 또한 대청도 기지, 백령도 기지, 소청도 R/S, 해병 6여단 병력으로 해안수색조를 편성하고, RIB을 이용한 침몰지역 정밀수색을 통해 잔해물 수거에 총력을 기울여 총 431점을 수거하였다. 그 중 폭발원점 지역에서 채취한 토양을 비롯하여 파편으로 의심되는 금속조각 그리고 폭약성분이 흡착될 가능성이 있는 수거물 29점을 선별



〈그림 3장-2-1〉 폭약성분이 검출된 폭발원점지역 토양 및 수거 위치



함미

함수

〈그림 3장-2-2〉 선체 인양 시 바지선 위 채증 활동

하여 감정하였다.

채증물의 경우 전시병과 중환자 등 생존자 피복 10점을 우선적으로 채증하여 감정하였고, 선체에 대해서는 함미 및 함수 그리고 연돌 인양 시 바지선에서 긴급 채증물 위주의 현장감식을 실시하였다. 선체가 평택 2함대 사령부로 이동된 후에는 선체 전반에 대한 정밀감식을 통하여 폭약성분 검출 및 금속성분 분석에 필요한 증거물을 중심으로 채취하여 분석하였다.

함미 인양 시인 4월 15일에는 14:30~23:30경 바지선 위에서 절단면을 중심으로 거즈로 닦아 채취하고, 절단부위에 산재한 섬유와 스펀지 등과 디젤기관실의 뿔을 2kg 채취하는 등 11점을 채증하였다. 함미가 평택 2함대로 이동한 4월 18일에는 08:00~17:00경 1차 정밀감식을 하면서 절단부 및 절단부에 근접한 O-1 deck와 승조원식당을 면밀하게 관찰하여 틈



취사장 배식대 벽면 틈 금속조각



함미 좌현 발지킬 부근 금속조각



승조원식당 뿔 속 금속조각



승조원식당 외부벽면 채증(거즈)



절단면(거즈)



우현 절단면 상단 내장재

〈그림 3장-2-3〉 함미 채증 장면

새에 끼어 있거나 뿔 속에 있는 금속조각과 함께 절단부위의 석면 및 섬유류 등을 채취하였고, 디젤기관실 및 승조원식당 바닥에서 뿔 25마대를 채취하는 등 총 147점을 채증하였다. 4월 21일 08:00~18:00경 2차 정밀감식을 통하여 이전에 발견하지 못한 금속조각과 함께 절단부위 전체를 거즈로 닦아내다시피 하여 추가로 60점을 채증하였다.

함수 인양 시인 4월 24일에는 12:20~16:20경 바지선 위에서 현장감식을 하면서 함수 절단부 우현에서 금속조각을 수집하였고, 선체 및 안정기 등에 형성된 압력흔 및 절개 부분에



함안정기 부근 부착물질



용골 부근 의류조각



절단면 중앙 배수관 부근 천조각



함수 외판 흡수부 부착물질



선저 부착물질(거즈)



절단면 부근 금속조각

〈그림 3장-2-4〉 함수 채증 장면

묻어 있는 이물질들을 거즈로 닦아 채취하였다. 함수 절단부에 산재한 섬유 및 보온재 등을 채취하였고, 함께 인양된 연돌에서는 파단면 아래쪽에서 스펀지 및 유리섬유 등 6점을 수집하는 등 총 46점을 채증하였다.

함수 및 연돌을 평택 2함대로 이동한 4월 26일에는 08:00~16:00경 함수와 연돌부위를 정밀감식하면서 함수 절단부 굴곡 부분 등에 산재된 금속조각을 수집하였다. 절단부 곳곳에 노출된 석면 및 스펀지, 중앙배관에 얹혀 있는 섬유와 함께 연돌 하단부에서 석면과 섬유를 수



연돌 상부 섬유



연돌 내부 그늘음



연돌 내부 부착물질



연돌 옆 승조원식당 천장 하단 섬유



연돌 하부 스펀지



연돌 하단 내장재(석면)

〈그림 3장-2-5〉 연돌 채증 장면



〈그림 3장-2-6〉 1구역 선체 식별 및 인양 현황

집하였으며, 연돌 연통 내부의 그을음을 거즈로 닦아 채취하는 등 33점을 채증하였다. 5월 1일부터 5월 8일까지 4차례의 연돌 정밀감식을 통해 연돌 내·외부 표면과 구조물 표면에 붙어 있는 흰색가루, 스펀지와 섬유류 등 19점을 추가하여 총 316점의 증거물을 인양된 선체에서 채증하였다.

해저 수거물의 경우 한국 측에서는 기뢰탐색함, 구조함 등 8척¹⁾과 해양연구원의 장목호, 이어도호²⁾를, 미국 측에서는 구조함인 살보함(Salvor)을 투입하였으며, 106명의 잠수사와 로봇 해미래를 이용하는 등 다각적인 방법으로 탐색작전을 전개하였다. 그러나 평균 3~5kts의 조류와 47m의 수심, 30cm 이내의 수중 시계라는 작전환경은 수거작전에 큰 제한사항으로 작용하였다. 4월 3일까지는 인명구조 활동에 전념하였고 함수가 인양된 4월 24일까지는 함수, 함미 인양에 역점을 둬으로써 실제 폭발로 유실된 선체 잔해물 등 해저 수거물에 대한 본격적인 수집활동은 4월 25일부터 실시되었다.

탐색작전은 〈그림 3장-2-6〉, 〈그림 3장-2-7〉에서와 같이 폭발원점 지역을 포함한 1구역과 함수 침몰지점을 포함한 2구역으로 구분하여 실시하였고 확장탐색(김포함, 고령함, 웅진함)은 1, 2구역 외곽 위주로 실시하였다. 1구역 정밀탐색을 위해 양양함과 해미래호가 4월 14~16일까지 폭발원점 근해(1NM×1NM)에 투입되어 접촉물을 식별하고 동파이프 등 일부

1) 고령함, 김포함, 웅진함, 광양함, 성인봉함, 평택함, 청해진함, 양양함.

2) 장목호, 이어도호는 Side scan sonar를 보유하고 있고 탐색능력은 길이 1m 물체 식별이 가능.



〈그림 3장-2-7〉 2구역 선체 식별 및 인양 현황



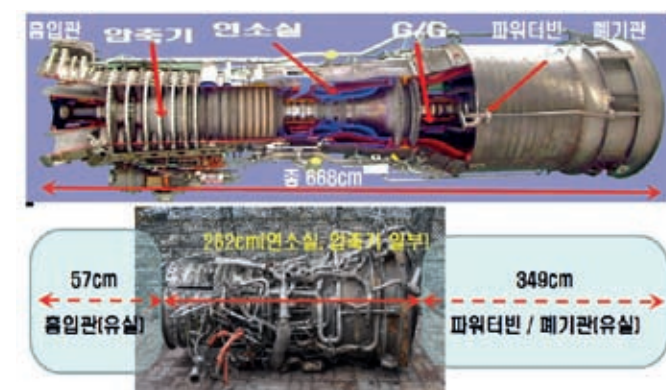
〈그림 3장-2-8〉 가스터빈실 및 가스터빈 형상

중량이 작은 물체를 수거하였으며, 2구역 정밀탐색은 고령함이 4월 25~26일까지 접촉물을 식별하였다. 이와 함께 보다 명확한 탐색작전을 위해 4월 17~20일까지 해양연구원 조사선(장목호, 이어도호)을 투입하여 사고 해역에 대한 해저 지형조사를 실시하였다.

이러한 탐색작전을 통해 많은 접촉물을 식별하였으나 기상불량, 강한 조류 및 수중 시계제한 등의 어려움으로 수거작전에 많은 제한이 있었다. 이러한 제한사항에도 불구하고 5월 7일에는 폭발로 유실되었던 가스터빈 보호덮개 및 발전기 부품·원동기를 인양하였으며 5월 8일 09:30~14:00경 섬유, 금속조각 등 14점을 수집하였다. 또한 인접한 곳에 있던 가스터빈실 선체로 추정되는 물체의 인양을 시도하였으나 지역지반이 암반으로 형성되어 있어 함정투묘(고정)가 어려워 잠수사 투입이 제한되고, 기상악화와 무거운 중량으로 인해 인양이 제한되었다.

결국 5월 9일 UDT 잠수사에 의해 미상물체가 가스터빈실임이 확인되어 해군의 광양함이 인양을 시도하였으나, 인양간 수면에서 5인치(12.7cm) 로프가 절단되어 실패하였다. 해군이 보유한 60톤 해상크레인의 특성³⁾과 현장의 수중환경을 고려해 보면 군 장비로는 인양이 불가능한 것으로 판단되어 민간업체인 유성개발과 계약을 하였다. 5월 17일 민간업체가 현장에 도착, 인양로프 결색 등 준비를 한 후 5월 19일 06:30경 가스터빈실을 인양한 결과 인양된 가스터빈실은 <그림 3장-2-9>와 같이 선저 및 우현 부분으로 길이 8.7m, 폭 11m 크기였으며 무게는 30톤에 달하였다. 폭발 위치로 예상하였던 가스터빈실 중간 좌현 선저 약 3m 지점이 절단되었고 가스터빈 패드, 완충기, 받침대 등 강한 철골 구조물로 형성된 부분은 절단되지 않았고 상대적으로 철골이 약한 패드 앞과 뒤 부분이 절단된 상태였다. 폭발압력을 직접적으로 받은 가스터빈실에서는 선저와 절단면을 중심으로 닦은 거즈 3점과 금속류 2점을 채증하였다.

또한 가스터빈실 인양 하루 전인 5월 18일에 인양된 터보엔진(가스터빈)은 흡입관, 압축기, 연소실, 파워터빈, 폐기관 등 총 668cm에 이르는 몸체 중 흡입관(57cm), 파워터빈 및 폐기관



<그림 3장-2-10> 인양된 가스터빈

(349cm)은 유실되어 없었으며 연소실과 압축기 일부(262cm)만 남아 있는 상태로 증거물 채증 여부를 판단하였으나, 보호덮개로 쌓여 있었던 장비라는 점에서 금속 파편 또는 폭약성분 검출 가능성이 희박하다고 판단하여 별도의 채증 없이 형상 변형에 대한 부분만 확인하였다.

특수구물을 활용하여 해저에 분산되어 있는 증거물의 수거를 위해 해군본부, 해군 작전사, 해군 탐색구조단, 해병 6여단에게 작업목적 및 방법을 설명하고 작업 지휘통제, 수거 및 분리 병력 준비 및 교육, 수거물 육상이송용 RIB 지원, 백령도 육상 작업장소 준비 등 해군 지원사항을 협조하였다. 수거물 및 증거물에 대해서는 목록화하여 2함대로 이송하도록 하는 등 구체적인 준비사항을 협의하였다. 이와 함께 해양연구원 해저 지형조사 결과와 국방과학연구소의 '폭발에 의한 수중체 이동거리 추정 결과' 등을 종합하여 현장채증팀에게 명확한 지침을 하달하여 5월 10일부터 본격 실시, 약 10일간의 작전을 통하여 어뢰 추진동력장치를 포함한 21점을 채증하였다.

위와 같이 수거 및 채증된 증거물 중 해역 수거물 29점, 채증물 307점, 해저 수거물 21점 등 총 357점을 감정하였다.

또한 채증 위치, 채증물의 특성을 고려하여 우선순위를 정하여 국방부조사본부 과학수사



<그림 3장-2-9> 인양된 가스터빈실 선저 외판

3) 최대 수심 20m 묘박 가능, 인양고도 25m.

구분	계	감정	미감정
계	797	357	440
해역 수거물	431	29	402
채증물	345	307	38
해저 수거물	21	21	0

<표 3장-2-1> 증거물 현황

연구소와 국립과학수사연구소에서 감정하였으며, 일부 증거물 118점에 대해서는 물리·화학 분석을 2중으로 실시하였다. 이들에 대한 감정 결과를 토대로 증거물 판단위원회를 구성, 3차에 걸친 토의를 통해 증거물 채택 여부를 판단하였다.

아울러 함수 인양 시 사건 발생 당시의 상황을 확인할 수 있는 천안함의 CCTV 통제 컴퓨터 하드디스크를 우선적으로 수거하여 복원작업에 착수하였으며 하드 분리, 하드 세척(기름, 땀 제거 등), 전원공급, 하드 작동, 하드 내 자료복원의 절차를 거쳐 약 8일 만인 5월 2일 11개 CCTV 중 6개소의 촬영장면 복원에 성공하여 사건 발생 직전 상황을 확인하였다.

이러한 증거물 채증활동은 합동조사단과 해군 탐색구조단뿐만 아니라 민간 자원까지 가용한 모든 수단을 동원하는 등의 노력을 경주하여 악기상 등 열악한 해양환경을 극복하였다. 함미, 함수 인양과 탐색구조활동 단계에 따라 일자별 증거물 수거 및 채증·감정 현황을 종합해 보면 <표 3장-2-3>과 같다.

구분	계	섬유류	금속류	합성수지	석면	토양	거즈	기타
계	357	33	67	31	34	42	96	54
금속	164	7	67	11	3	25	35	16
폭약	311	33	41	25	31	31	96	54

* 합계는 중복된 증거물을 차감한 수치임.

<표 3장-2-2> 증거물 감정 현황

구분	내용
1 단계 함미 인양 (4. 15)	<ul style="list-style-type: none">생존자 피복, 해상 수거물, 함미부위 채증(626점), 감정 의뢰(219점)해저 증거물 수거 준비(장관 승인)<ul style="list-style-type: none">공군 안전실장, 업체 대표 토의 : 4. 17해군본부 협조회의 : 4. 19그물 제작(4. 26), 현지 도착(4. 30)
2 단계 함수 인양 (4. 24)	<ul style="list-style-type: none">함수부위, 연돌부위 채증 및 감정 의뢰(98점)CCTV 수거 : 4. 24(토) 11:00 / 사관실해저 증거물 수거, 채증 준비 * 채증팀 13명 백령도 전개 : 5. 1 (토)
3 단계 추진동력장치 및 가스터빈 인양 (5. 15~24)	<ul style="list-style-type: none">5. 7 발전기, 가스터빈실 보호덮개 인양5. 15 어뢰 추진동력장치 수거 * 대평수선(대평 11, 12호)5. 18~19 가스터빈, 가스터빈실 인양 * 작업 : 유성개발(유성호)가스터빈 보호덮개, 어뢰 추진동력장치 등 해저 증거물 채증(73점), 감정 의뢰(40점)

<표 3장-2-3> 단계별 증거물 수거 및 채증·감정 현황

2) 화학 분석

화학 분석은 폭약성분 검출에 중점을 두고, 국방부조사본부 과학수사연구소에서 액체크로마토그래피(High performance liquid chromatography ; Waters사의 Acuity모델)-질량분석기(Mass spectrometer ; Waters사의 Q-TOF Premier모델)를 이용하여 총 311점에 대해 감정을 실시하였다.

(1) 분석 절차



<표 3장-2-4> 폭약성분 분석 절차

(2) 분석 결과

폭약성분은 함수 절단부위, 연돌, 가스터빈실, 해역 및 해저 수거물 등에서 검출되었으며 HMX는 28개소에서 527.91ng, RDX는 6개소에서 70.59ng, TNT는 2개소에서 11.7ng이 검출되었다.

먼저 함수 절단부위에서는 1st Platform 끈 뭉치, 배수관 부근 천조각, 용골 부근 의류조각, 외판 흡수선 부위 부착물질 등에서 HMX가 검출되었고 안정기 부근 부착물질 및 외판 흡수선 부위 부착물질에서 RDX, TNT가 검출되는 등 8개소에서 HMX 15.39ng, RDX 47.94ng, TNT 11.7ng이 검출되었다.

폭발압력이 분출되어 유실되었던 연돌부위에서는 내부 그을음, 상부 섬유, 하부 부착물질, 내부 파이프 부착물질, 하부 스펀지, 승조원식당 조리실 천장 하단 섬유에서 HMX가 검출되었고, 하부 스펀지(2점)에서 RDX가 검출되는 등 8개소에서 HMX 108.44ng, RDX 19.75ng이 검출되었다.

폭발압력을 직접적으로 받아 파괴되어 유실되었던 가스터빈실에서는 좌측 안쪽면 석면(2점), 보호격실 천장 플라스틱 조각(2점), 출입문 외벽 금속조각, 보호격실 내 금속조각, 좌측 출입문 외벽 채취 거즈(3점), 발전기 내부토양 및 천(2점), 절단면 채취 거즈(2점) 등 13개소에

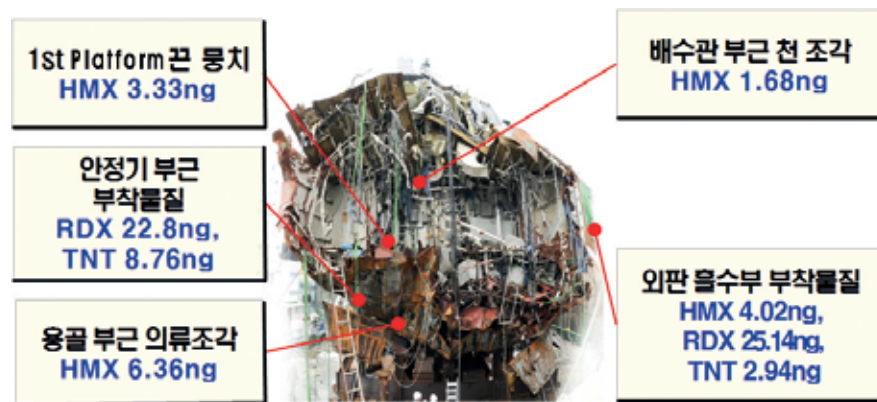
서 HMX 370.78ng이 검출되었다.

탐색 및 구조 활동과 쌍끌이 어선을 활용한 해저 증거물 수거작전을 통해 수거된 가방, 금속(2점), 로프, 페인트 조각 등에서 HMX가 검출되었고 가방과 폭발원점 지역 모래에서 RDX가 검출되는 등 7개소에서 HMX 33.3ng, RDX 2.92ng이 검출되었다.

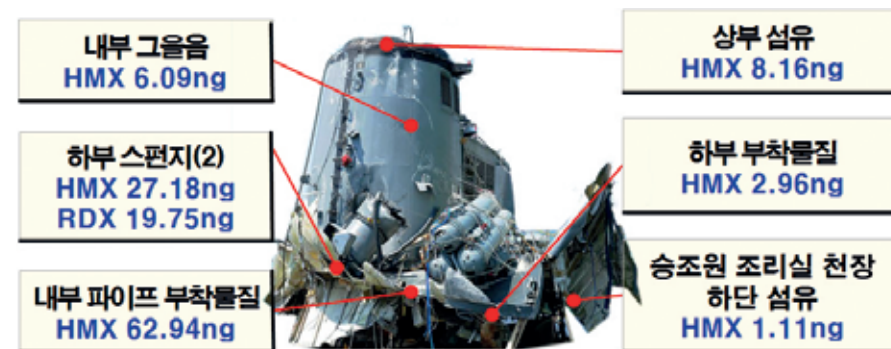
이를 종합적으로 분석해 볼 때 폭발지점에서 가까운 함수 좌현, 연돌, 가스터빈실, 해저지역에서 폭약성분이 검출되었고 스펀지, 섬유, 석면 등 흡착이 용이한 물질에서 검출되었다는 사실과 함께 HMX, RDX, TNT가 혼합된 폭약이 사용되었다는 사실을 확인하였다.

또한 폭약성분 제조방식에 대하여 연구한 결과 RDX 생산 시 울리치(Woolwich) 방식은 순수한 RDX가 생산되는 반면, 베크만(Bachmann) 방식은 RDX 생산과정에서 HMX가 5~10% 가량 생산된다는 사실과 HMX 생산 시는 베크만 방식만을 사용하며 순수한 HMX만 생산된다는 사실을 확인하였다.

이러한 사실을 토대로 주요 폭약의 종류를 확인해 본 결과 HMX(High melting point explosive, 폭발속도 9,100m/sec)는 무색의 분자 결정체 분말 형상으로 RDX보다 밀도 및 용점



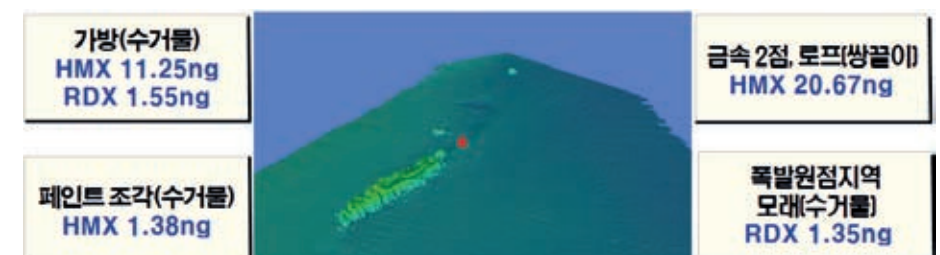
〈그림 3장-2-11〉 함수부위 폭약 검출 결과



〈그림 3장-2-12〉 연돌부위 폭약 검출 결과



〈그림 3장-2-13〉 가스터빈실 폭약 검출 결과



〈그림 3장-2-14〉 해저 수거물 폭약 검출 결과

HMX	RDX	Tetryl	TNT
C ₄ H ₈ N ₈ O ₈	C ₃ H ₆ N ₆ O ₆	C ₇ H ₅ N ₅ O ₈	C ₇ H ₅ N ₃ O ₆

〈표 3장-2-5〉 폭약 분자구조

이 높으며 가장 고성능의 화약이어서 정밀무기체계에 이용하는 화약이고, RDX(Research department explosive, 폭발속도 8,700m/sec)는 무색의 결정체 분말 형상으로 다른 화약에 비하여 비교적 높은 밀도와 폭발속도를 보유하고 민감도가 안정적이어서 무기체계에 광범위하게 이용하는 화약이며, Tetryl(Tetranitromethylaniline, 폭발속도 7,850m/sec)은 TNT보다 폭발력이 커서 TNT 대체화약으로 지뢰, 수류탄 등에 많이 사용되고, TNT(Trinitrotoluene, 폭발속도 6,900m/sec)는 널리 사용되는 군용폭약으로 화학적 안정성이 커서 각종 장약 및 폭파화약으로 사용된다는 사실을 확인하였다.

이후 검출된 폭약이 아측의 보·포병사격이나 함포사격에 의한 것인지를 알아보기 위해 백령도 주변 사격훈련관계를 확인한 결과 보병대대의 도서방어 통합사격은 '09년에 6중 1,558발, 포병대대의 해상사격은 '09년에 3중 636발, 함포사격은 '09년에 3중 712발, '10년에 3중 257발을 사격하였으나, 해병 6여단, 보·포병화기 폭약에는 RDX를 주로 사용하고, 아군

구분	모델명	충전화약	주요 폭약성분
한국	어뢰 A	DXC-04	Ammonium perchlorate, RDX, Al
	어뢰 B	DXC-05	HMX
	기뢰 A	H-6	RDX, TNT, Al
	기뢰 B	DXC-03	Ammonium perchlorate, RDX, Al
	76mm	Comp-A3	RDX
	40mm	Comp-A4	RDX
	유도탄 A	Destex	TNT, Al
	유도탄 B	DXC - 10	HMX, NTO, Al, Binder
구(舊) 소련제 SAET-60M(어뢰)			RDX, TNT ※Bonn International Center for Conversion, 2005

〈표 3장-2-6〉 주요 해상무기 폭약성분

구분	탄약 종류	주요 폭약성분
1	고폭탄 A	RDX, TNT, WAX
2	고폭탄 B	RDX, TNT, WAX
3	고폭탄 C	TNT
4	자폭탄 A	RDX, WAX
5	전차 고폭탄	RDX, TNT , WAX
6	해안포 고폭탄	RDX, TNT, WAX
7	고폭탄 D	TNT
8	고폭탄 E	TNT
9	우박탄	RDX, WAX
10	고폭탄 F	RDX, TNT, WAX
11	고폭탄 G	TNT
12	76mm	RDX, WAX
13	40mm	RDX, WAX
14	폭뢰	RDX, TNT, AL, WAX

〈표 3장-2-7〉 아군 탄종별 폭약성분

의 어뢰, 기뢰, 함대함 유도무기(하푼)는 서해상에서 시험하지 않았으며, 각종 함포 또한 RDX를 주로 사용하는 것으로 확인하였다.

이와 함께 폭약 전문가의 자문을 구한 결과 고폭탄 해상사격 시 탄두가 해수면과 접촉하는 순간 충격으로 폭발하며, 고폭탄이 해수면에서 폭발 시 대부분의 화약성분은 폭발력 발생을 위해 폭발재, 폭발가스 등으로 바뀌어 수중에서 유실되고, 폭발되지 않은 일부 미세량의 화약성분이 수중 또는 해저에 남아 있을 수 있으나 조류 등을 고려 시 현장에 잔류할 가능성이 희박하다는 점에서 아군의 사격에 의한 폭약이 아니라는 것을 확인하였다.

이에 따라 검출된 폭약성분에 대해 국립과학수사연구소에서 미국, 프랑스, 캐나다, 우리나라의 폭약성분과 채증물에서 검출된 폭약의 동위원소 분석을 통한 화학적 지문검사⁴⁾를 실시하여 폭약성분의 원산지를 판단하고자 하였으나, 구체적으로 밝히는 것은 제한되었다.

3) 물리 분석

물리 분석은 침몰요인 분석 결과 어뢰에 의한 침몰 가능성이 높다는 점에서 함수, 함미 인양

.....

4) 모든 물질이 원료와 제조회장에 따라 독특하게 다른 화학적 지문의 형태를 보이는 것을 이용, 원산지 규명에 사용되는 검사방법.

이전부터 대조물인 북한 어뢰의 시편 확보에 주력하였으며, '03년 3월 12일 포항 근해에서 민간 잠수사가 발견한 북한 시험용 어뢰를 국방과학연구소 진해분소에서 연구용으로 보관하고 있다는 사실을 인지하여 대조시료로 북한 시험용 어뢰 시편 3점을 확보하였다.

이와 함께 천안함 선체의 재질은 국방과학연구소와 협조, 선체 부분별 금속·재료 규격을 획득하여 성분 및 성분비 등의 재질을 분석하였고 그 중 폭발부위인 가스터빈실의 재질관련 자료는 이를 제작, 납품하는 (주)삼성테크윈에 협조를 요청하였다. 부품별 성분비 등 세부 재질은 회사 기밀로 취급하고 있어 제한되었으나 수차에 걸친 협조를 통하여 부품별 성분을 확인할 수 있었다.

천안함 선체에서 발견된 알루미늄 파편은 발견 당시 1~7mm 정도의 작은 파편이었고, 뿔과 섞여 있거나 절단면 틈 사이에 놓여 있는 등 육안 식별이 제한되는 경우가 다수였으나 조사활동간 해저 수거물과 함께 함수와 함미, 연돌, 가스터빈을 인양 후 미세 증거물 채증에 역량을 집중하여 금속성분으로 판단되는 164점의 증거물을 채증하였다.

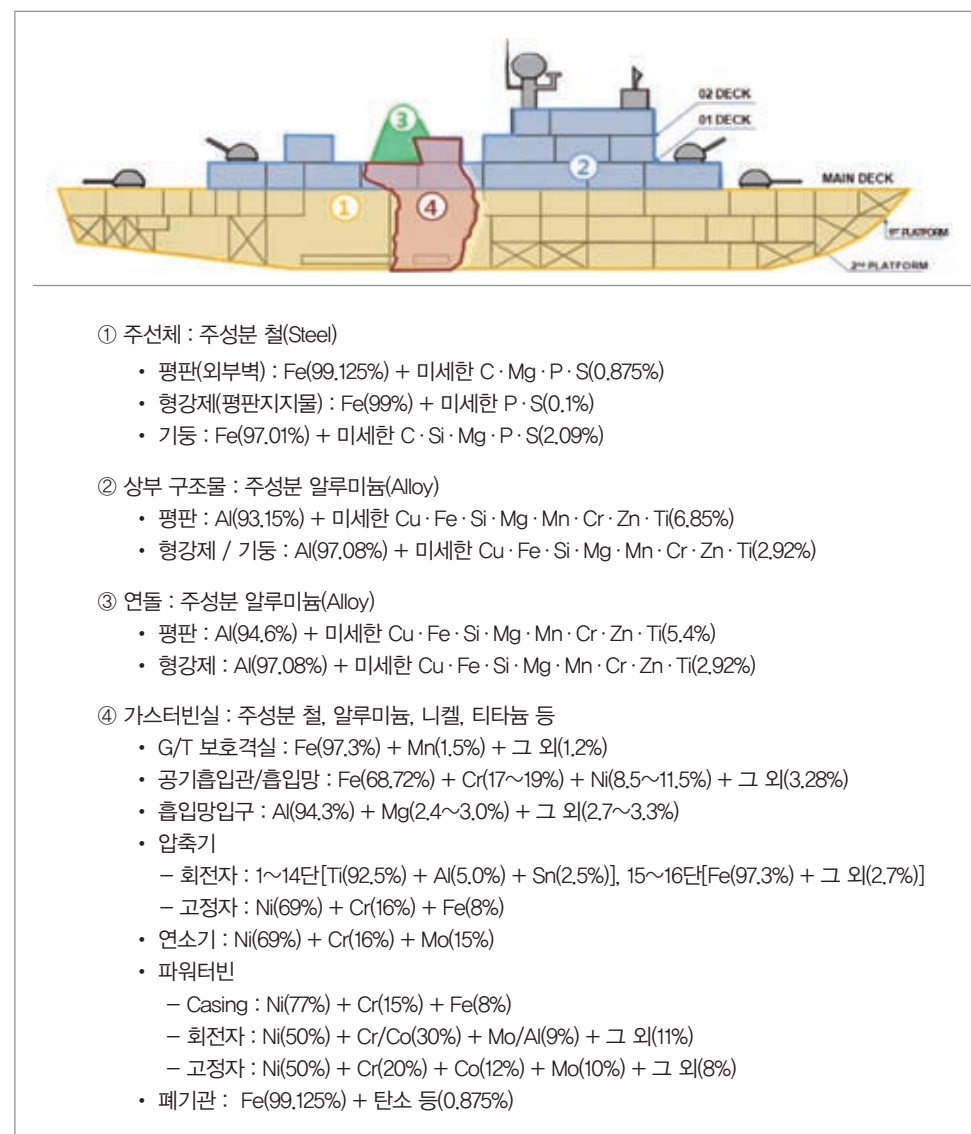
위의 과정을 통해 확보된 대조물 시료 및 채증물은 국방부조사본부 과학수사연구소에서 주사 전자현미경(Scanning electron microscope ; Philips사의 모델 XL30) 에너지 분산형 X선 분석법을 통해 재질분석을 실시하였다. 이를 통해 금속물질로 확인된 증거물을 북한 시험용 어뢰와 천안함에서 채취한 시편 성분과 비교하여 관련성이 없는 금속은 제거하고, 어뢰에 사용되는 알루미늄 및 알루미늄 합금 성분으로 판단되는 금속은 계속 검토하는 방법으로 분석하여 최종 6점의 금속조각을 식별하였다.⁵⁾

(1) 대조물 재질

〈그림 3장-2-15〉에서 보는 바와 같이 천안함의 주선체는 주성분이 철로 되어 있으며, 상부 구조물과 연돌은 주성분이 알루미늄이었다. 폭발 위치에 가까운 가스터빈 보호격실은 철로 되어 있고 주요 부품인 압축기, 연소기, 파워터빈 등은 알루미늄 합금, 또는 열에 강한 니켈 합금 등 각각 다른 성분으로 구성되어 있었다.

북한 시험용 경어뢰의 경우 몸체는 Al 97.28%, Mg 2.72%, 프로펠러는 Al 96.22%, Mg 3.78%, 고정날개 부위는 Al 95.88%, Mg 4.12% 등 모두 알루미늄 합금임을 확인하였다.

5) 수중폭발의 경우 선체를 직접 파괴하면서 어뢰가 뚫고 들어오지 않고, 또한 어뢰 외부 재질이 주로 알루미늄 합금으로 제작되어 있어 폭발 시 물에 녹거나 미세한 파편으로 분해되며, 무게가 가벼워 조류에 떠내려가기 때문에 발견하기가 쉽지 않다고 전문가들은 밝히고 있음.



〈그림 3장-2-15〉 천안함 선체 재질

구분	몸체 (Al 97.28%, Mg 2.72%)	프로펠러 (Al 96.22%, Mg 3.78%)	고정날개 (Al 95.88%, Mg 4.12%)
북한 시험용 경어뢰			



〈그림 3장-2-16〉 북한 시험용 경어뢰 시편 재질

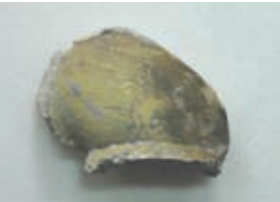

(2) 채증 증거물 재질

이렇게 식별된 6점과 천안함 선체 및 북한 시험용 어뢰 금속성분과 식별된 6점의 금속조각을 비교 분석하였으나, 각각의 금속이 동일하지 않다는 결과만을 확인하였다. 각국에서 어뢰에 사용하는 금속 및 금속조성을 비밀로 관리하고 있어 국립과학수사연구소의 다원소 분석, KAIST의 정밀 성분 분석 등 가능한 모든 분석방법을 동원하였으나 확보된 대조 시료와의 비교, 분석만으로는 근본적인 제한이 있을 수밖에 없었다. 특히 수중폭발의 경우 파편이 미세하게 분해되기 때문에 발견하기가 쉽지 않다는 것이 전문가의 의견이었다.

(3) 분석 결과

북한 시험용 어뢰 시편 3점(몸체, 프로펠러, 고정날개), 천안함 선체 시편 6점(연돌 외판, 연돌 내부 보강재, 함미 내부, 식당 외부 격벽 등)과 주요 채증물 6점에 대하여 정밀분석을 실시하였으나, 천안함 사건에 사용된 어뢰의 파편이라고 단정할 수 있는 금속은 식별하지 못하였다.

위치	취사장 배식대 벽면틈	승조원식당 우현 앞	함미 좌현 발지킬 부근
실물			
성분	Al 96.08%, Mg 3.92%	Al 100%	Al 100%

위치	함미 우현 중앙	승조원식당 진흙 속	승조원식당 외부 벽면
실물			
성분	Al 96.07%, Mg 3.93%	Al 100%	Al 분말(Mg 포함)

〈그림 3장-2-17〉 채증 증거물 분석 결과

4) 소결론

채증물의 분석 결과를 단계별로 살펴보면 1단계 함미 인양 시(4. 15)까지 수거 및 채증한 생존자 피복, 해상 수거물, 함미부위에서의 채증물 626점 중 219점을 감정의뢰하여 분석한 결과 HMX 2개소 12.63ng, RDX 2개소 2.9ng을 검출하였으며, 금속성분으로 Al, Al합금 6점을 식별하였다.

2단계 함수 인양 시(4. 24)까지 함수부위, 연돌부위에서의 채증물 98점을 감정의뢰하여 분석한 결과 HMX 10개소 123.83ng, RDX 4개소 67.69ng, TNT 2개소 11.7ng을 검출하였다.

3단계 추진동력장치 및 가스터빈 인양 시(5. 19)까지 발전기, 가스터빈실, 어뢰 추진동력장치 등에서의 채증물 40점을 감정의뢰하여 분석한 결과 HMX 16개소 391.45ng을 검출하였다.

이를 종합적으로 볼 때 천안함은 HMX(28개소 527.91ng), RDX(6개소 70.59ng), TNT(2개소 11.7ng)가 혼합된 폭약이 들어 있는 수중무기에 피격되어 침몰하였다는 사실을 확인하였다.

3. 생존자 진술 분석

생존자 58명에 대한 진술청취는 사전 국군수도병원장의 승인을 받고 담당군의학관의 소견에 따라 생존자의 안정을 고려하여 진행하였고, 일과 후 개인 동의를 받아 조사를 실시하였다. 사건 발생 다음날인 3월 27일 국군수도병원에서 중환자 및 수색 참여자 8명을 제외한 함장 등 생존자 50명을 대상으로 사고상황에 대한 전반적인 진술을 청취하였고, 다음날에는 사건 당시 위치, 시간대별 조치 및 행동 등에 대한 진술서를 수리하였다. 3월 31일에는 1차 진술 내용이 불명확하여 확인이 필요한 인원과 진술을 청취하지 못한 인원을 대상으로 추가 진술을 청취하였고, 4월 1일에는 58명 전원에 대해 사고 발생시간 전후 세부행동에 대해 진술서를 수리하였다. 이와 함께 함장이 전대장에게 지휘보고한 내용, 통신관이 레이더기지 근무병과 교신한 내용 등에 대한 진술도 청취하였다.

천안함 침몰 당시 상황을 목격한 백령도 초병 2명에 대해서는 1차 3월 28일 1명, 2차 4월 2일 2명, 3차 4월 4일 1명에 대해 진술을 청취하여, 각각 2차에 걸쳐 진술서를 수리하였고, 5월 2일 거짓말 탐지검사를 실시한 결과 2명 모두 진실반응이 나와 증거로 채택하였다.

1) 당시 상황

함장 등 생존 승조원 중 26명이 ‘굉! 파-아앙’ 하는 폭발음과 함께 정전이 되면서 몸이 30cm~1m까지 뿔다가 우현쪽으로 떨어졌다고 진술하였으며 “기름냄새가 났다.”는 진술자가 41명이었고 화염·불꽃·물기둥 목격자 및 화상환자는 없었고, 50명이 골절, 타박상 및 염좌 등의 부상을 입은 것으로 확인되었다.

특히, 전탐장은 “1차 ‘쿵’, 2차 ‘굉’ 하는 폭발음과 함께 전원이 차단되었다.”, 병기병은 “‘굉’ 하는 소리와 함께 함정이 우현으로 기울고 함미가 찢겨져 나가는 듯한 ‘파~앙’ 소리를 청취하였다.”며 폭발음을 2회 청취하였다고 진술하였는데, 이는 수중폭발에 따른 1차적인 폭발

주요 진술 내용

- 함장실에서 KNTDS 확인, 작전 및 일과계획 확인 중 갑자기 폭발음과 동시에 몸이 30~40cm 부양되었다가 우현으로 떨어진 후 부하들에 의해 구출(함장)
- 부장실에서 행정업무 중 갑자기 ‘굉’ 하는 소리와 함께 몸이 붕 뜬 후 넘어지면서 정전이 되었고, 출입문을 열고 갑판으로 탈출하여 보니 함미쪽이 없고, 마스트가 우현으로 쓰러져 출렁이고 있었음(부장)
- 함교 당직사관 근무 중 ‘굉’ 하는 소리와 동시에 배가 우현으로 80~90도 기울어졌고, 불빛·섬광·화염·물기둥·연기 등은 보지 못하였음(당직사관)
- 기관장실에서 업무 중 폭음과 충격으로 정신을 잃었다가 부장의 목소리를 듣고 세면대와 문턱을 딛고 탈출 후 구조작업을 함(기관장)
- 함수포 R/S실에서 동료들과 대화 중 ‘쿵’ 하는 충격음과 함께 정전이 되었고 기름냄새가 났으나, 사고원인은 판단이 되지 않음(포술장)
- 전투상황실 당직사관 근무 중 ‘쿵’ 하는 소리와 함께 몸이 조금 떠오르는 느낌, 화약 등 냄새 맡지 못함(통신관)
- 작전관실에서 취침 중 ‘굉’ 하는 소리를 듣고 외부 도어를 열고 탈출하여 2함대 지통실로 구조 요청을 함(전투정보관)
- 침실에서 부사관 능력평가 대비 공부 중 ‘쿵’ 하는 소리와 함께 정전되었고 화약·가스 냄새는 없었으며 외부의 어떤 충격으로 사고가 발생한 것으로 판단(조타장)
- 침실에서 취침 중 ‘굉’ 하는 소리와 함께 해수와 유류 냄새가 났으나 사고원인은 모르겠음(내기장)
- 침실에서 취침 중이었고 당시 충격음이나 폭발음은 듣지 못했으며, 침대가 푸욱 꺼지는 느낌은 있었으나 화약냄새는 없었고 기름냄새는 맡았으며, 사고원인은 북한 잠수정이나 반잠수정 소행으로 생각(전자장)

- CPO 침실 2층 침대에서 취침 중 외부에서 ‘굉’ 하는 소리와 함께 머리가 3층 침대에 부딪치면서 바닥으로 떨어졌고 화약냄새는 없었으나 기름냄새는 많이 났으며 외부 충격에 의한 사고로 판단(갑판장)
- 통신실 당직 근무 중 ‘굉’ 하는 소리와 함께 몸이 의자에서 30~40cm 뜬 상태로 앞쪽(우현)으로 넘어졌으며, 좌현으로 올라왔을 때 물이 고여 있어 발이 침범침범하였고, 당시 화약냄새는 나지 않고 기름냄새는 났음(통신장)
- 침실에서 취침 중 ‘굉’ 소리와 함께 몸이 좌측으로 쏠리면서 가재도구 등이 넘어지는 소리를 들었음. 기름냄새 외 특별한 것은 없었음(내연장)
- 병기행정실에서 PC작업 중 ‘굉’ 하는 폭발음과 동시에 정전되었고 몸과 집기들이 허공으로 뜨면서 떨어짐(병기장)
- 1차로 ‘쿵’ 하는 소리가 나고 2~5초 후 2차로 ‘굉’ 하는 소리가 났고 전원이 꺼졌으며 얼굴에 기름이 튀었음(전탐장)
- CPO 침실에서 수면 중 충격음은 듣지 못했으나 3층 침대에서 떨어졌고, 정신을 차려 보니 해수가 들어오면서 기름냄새가 났음(보수장)
- 항해부 침실에서 휴식 중 큰 소음과 동시에 배가 기울었고, 동료들이 배에 물이 찬다며 빨리 나가라고 하여 탈출하였고, 당시 유증기냄새가 났음(갑판사)
- 항해부 침실에서 취침 중 ‘쿵’ 하는 충격음이 있은 후, 기름냄새가 났음(조타부사관)
- 포술부 침실 2층 침대에서 취침 중 ‘굉’ 하는 소리와 함께 몸이 우현 격벽으로 날아가 등과 팔다리를 충격 후, 바닥으로 떨어짐(사통부사관)
- 포술부 침실에서 취침 중 폭발음이 났으며 당시 화약냄새는 없었으나 기름냄새는 맡았고, 함교가 90도 정도 기울어 있었으나 함미쪽은 확인할 수 없었음(병기부사관)
- 전투상황실 부직사관 근무 중 갑자기 큰 충격음과 함께 몸이 우현 격벽으로 튕겨져 나갔으며 모든 물체들도 우현쪽으로 쏠려 내려왔음(전탐사)
- 부직사관 당직근무 중 ‘굉’ 소리와 함께 함정이 90도로 기울었고, 탈출하여 동료들 구조작업을 함(갑판사)
- 작전부 침실에서 취침 중 외부 충격으로 우현 격벽에 부딪혔다가 바닥에 떨어졌음(통신부사관)
- 포술부 침실에서 취침 중이어서 충격음이나 폭발음은 듣지 못하였으나, 좌현쪽 체스터가 떨어지는 소리를 들었고, 섬광·화염·물기둥은 보지 못하였으며 어뢰 사고가 발생되었다고 생각(음탐부사관)
- 작전부 침실 우현쪽 1층 침대에서 휴대전화 게임 중 ‘굉’ 하는 소리와 함께 심한 요동이 있은 후, 배가 우현으로 기울음(통신사)
- 전투상황실 당직근무 중 큰 굉음이 나면서 함정이 기울었고, 당시 컴퓨터 등 장비에 깔려 머리, 허리, 다리 등 골절상을 입었음(전자전부사관)
- 음탐 당직근무 중 당시 특이한 신호나 소리는 없었으나 갑자기 ‘굉’ 하는 소리와 함께 정전이 되었고, 순간적으로 배가 충돌한 것으로 생각했지만 외부 갑판으로 나와 보니 연돌 부분부터 잘려져 나가다시피 한 것을 보고 전쟁이 났구나 생각함(음탐사)

- 작전부 침실에서 취침 중 ‘쿵’ 하는 소리가 1회 들린 후, 몸이 수직으로 5~10cm 상승하였고, 당시 화염 및 화약냄새는 없었음(전탐부사관)
- 향해 당직근무 중 ‘과과광’ 소리와 함께 앞으로 튕겨져 나갔으며, 화약 및 기름 냄새는 맡지 못하였음(조타부사관)
- 당직근무 중이었고, 사고 당시 기절하여 동료들에게 구조되어 밖으로 나왔고, 내부소행 같지는 않으며 외부에서 큰 충격을 받은 것으로 판단(사통부사관)
- 전부 포술부 침실에서 취침 중 ‘굉’ 하는 소리와 동시에 몸이 공중으로 뜨면서 함이 90도로 꺾이면서 모든 물건들이 한쪽으로 쏠림(음탐부사관)
- 포술부 침실에서 음악을 듣던 중 폭발음 1회 후 전원이 나갔고, 배가 기울며 집기들이 떨어졌음. 나중에 보니 함미는 보이지 않았고, 사고원인은 어뢰 또는 기뢰로 생각함(병기부사관)
- 당직근무 중 ‘굉’ 하는 소리와 함께 몸이 우측으로 강하게 튕겨 나갔고, 기름냄새가 났으며 사고원인은 어뢰로 생각됨(전탐부사관)
- 작전부 침실에서 취침 중 충격이 온 후, 배가 기울어지면서 체스트 등이 넘어졌고 갑판에 올라왔을 때 기름냄새가 많이 났음(전탐부사관)
- 포술부 침실에서 독서 중 ‘굉’ 하는 충격음이 1번 들린 후, 몸이 상승 및 기울. 함미는 좌현쪽에서 볼 수가 없었음(유도부사관)
- 작전부 침실에서 취침 중 ‘굉’ 하는 폭발음이 1회 들린 후 정전이 되면서 침대가 오른쪽으로 기울었음. 정신을 차렸을 때 기름냄새가 진동함(전탐부사관)
- 항해부 침실에서 책을 보고 있던 중 ‘굉’ 하는 소리와 동시에 50cm~1m 공중으로 뜨면서 의식을 잃었고, 그 후 의식을 찾아 선임병 2명과 함수로 이동(조타부사관)
- 전자장비실에서 휴식 중 ‘굉’ 하는 소리와 동시에 몸이 50cm 정도 붕 뜨면서 배가 우현으로 기울었으며 당시 화염은 보이지 않았음(전자부사관)
- 동근무복, 방한복 2벌을 착용하고 우현 견시근무를 하였고, 당시 날씨가 추워 함수만 보면서 근무하였고, ‘굉’ 하는 소리와 동시에 배가 우현으로 쏠리면서 허벅지까지 물이 차올라 함교를 통해 좌현 구명대 쪽으로 이동했으며, 함미 단정쪽 밑부분에서 심한 진동 느낌이 있었으나 화약냄새는 맡지 못하였음(갑판부사관)
- 작전부 침실에서 취침 중 큰 충격음과 폭발음 등이 뒤섞인 소리가 난 후 배가 90도로 기울어졌고, 침대에서 우현쪽으로 날아가서 처박힘, 물기둥·섬광 등은 보지 못했으나 기름냄새는 풍겼으며, 기뢰, 어뢰 등 외부 충격으로 판단(전탐부사관)
- 갑판행정실에서 음악을 듣던 중 ‘굉’ 하는 소리와 동시에 몸이 뜨는 것을 느꼈고, 곧바로 몸이 좌측으로 기울. 당시 화약냄새는 느끼지 못했고, 기름냄새만 남(갑판부사관)
- 기관전령수 임무수행 중 ‘굉’ 하는 소리와 동시에 몸이 50cm 공중으로 뿔뚝 내려앉으며 배가 기울고 정전이 됨(조타수)
- 작전부 침실에서 취침 중 갑자기 몸이 뿔뚝 떨어졌으며 침대가 부서지는 소리와 물이 새는 소리가 들렸음(전탐부사관)

- 작전부 침실에서 취침 중 ‘굉’ 하는 소음에 배가 기울었고, 3층 침대에서 몸이 붕 뿔뚝 떨어졌으며, 갑판으로 탈출하여 주위를 둘러보니 배가 연돌을 포함, 반파되어 보이지 않았음(통신부사관)
- 타수 임무수행 중 좌현 함미에서 큰 굉음이 들렸고, 동시에 몸이 뿔 정도로 함수가 들린 후, 배가 우현으로 90도 기울었으며, 큰 굉음이 충격음인지 폭발음인지 정확하게 구분할 수 없지만 선체가 뜯겨 나가는 소리가 들렸고 함미방향에서 기름냄새가 올라옴(갑판병)
- 항해부 침실에서 세면 준비 중 ‘굉’ 하면서 뭔가 때리는 듯한 느낌, 엄청난 무게감을 느꼈고 동시에 배가 갑자기 흔들(좌우측)리면서 우현으로 기울어졌고 사고 직후 물이 들어오는 소리와 기름냄새가 났음(갑판병)
- 침실에서 샤워를 하기 위해 준비 중 ‘굉’ 하는 소리와 함께 공중으로 몸이 뜨면서 오른쪽으로 넘어졌으며 정전이 되어 잘 보이지는 않았지만 화염이나 연기는 없었고 기름냄새는 났음(조리병)
- 당직근무 중 철판끼리 부딪치는 목격한 충격음이 난 후, 배가 바로 기울어졌으며 갑판에 나왔을 때 기름냄새가 약간 났고 외부 갑판으로 나왔을 때 함교 부분이 1/3 정도 잠겨 있었음(통신병)
- 항해부 침실 옆 계단에서 휴식 중 ‘굉’ 하는 소리와 동시에 30cm 공중으로 뿔뚝 떨어졌 후 좌현으로 탈출하였고, 좌현으로 나왔을 때 기름냄새가 나고 함미가 보이지 않았음(갑판병)
- 전투상황실에서 R/D 근무 중 ‘굉’ 하는 폭발음과 동시에 몸이 50cm 정도 공중으로 뜨면서 정전이 되었고, 약 2~3초 후 눈을 뜨니 배가 완전히 우현으로 기울어 있었으며, 화염, 화약냄새는 못 맡았으나 기름냄새는 진하게 풍겼음(전탐병)
- ‘굉’ 하는 소리 후 배가 기울는 동안 함미가 찢겨지는 듯한 ‘과~아양’ 하는 소리가 계속 났고 동시에 정전되었으며 배가 우현으로 90도 기울었고, 기름냄새가 많이 났음(병기병)
- 작전부 침실에서 세면 준비 중 엄청난 폭발음이 났고, 화약냄새는 나지 않았지만 선저 부분에서 기름냄새가 났음. 탈출하여 보니 함미가 보이지 않았음(조타병)
- 화장실에서 용변 중 ‘쿵’ 소리와 함께 배가 우측으로 90도 기울어 화장실 안쪽에서 갑판 행정실 문 옆으로 떨어졌고, 당시 기름냄새가 심하게 났음(조리병)
- 취침 중 ‘굉’ 하는 소리와 함께 배가 침몰하기 시작하였고, 외부 갑판으로 탈출하여 보니 함미가 보이지 않았고, 당시 기름냄새 말고는 다른 냄새는 없었음(전산병)
- 동근무복에 방한복을 착용하고 함수만 보면서 좌현 견시근무를 하던 중, 갑자기 ‘굉’ 소리와 동시에 몸이 1m 공중으로 뿔뚝 바닥으로 떨어졌으며, 당시 화약냄새, 물기둥, 화염 등은 보지 못하였으나 얼굴에 물방울이 튀었음(갑판병)
- 화장실에서 샤워 중 전쟁영화에서 나오는 소음 단성과 함께 물건이 떨어지는 소리를 들었음(의무병)
- 세탁기로 세탁 후 탈수기로 가던 중 ‘땅’과 ‘쿵’의 중간소리를 내며 철판에 무언가 부딪치는 느낌을 받은 뒤 배가 떠오르는 느낌도 받았음. 연돌에서 기름 타는 냄새 이외에 섬광·화염·연기 등은 보지 못하였음(통기병)
- 화장실에서 세면 중 ‘굉’ 소리를 들었고, 내부에 의한 것인지, 외부에 의한 것인지는 알 수 없었음(병기병)

음이 발생한 후에 압력이 분출되면서 2차적인 충격과 함께 소음이 발생한 것으로 보여 버블 효과에 의한 현상과 일치하였다.

2) 폭발원인

생존자들 중 다수 인원(11명)이 사고장소가 NLL과 인접해 있는 경비구역의 특성, 정상항로에서 갑자기 당한 점, 순간적으로 함정이 절단된 점 등을 고려 시 침몰원인을 어뢰에 의한 폭발로 인식하였다고 진술하였다.

주요 진술 내용

- 사고발생 후 좌현 갑판에 나와 보니 함미 부분이 절단되어 보이지 않았고, '굉' 하는 폭발음이 큰 점과 속초함에서 사격한다는 무선통신 내용을 듣고 적의 어뢰 공격으로 판단함(함장)
- 사고 당시 화약냄새가 없었고, 배가 두 동강난 것으로 볼 때 어뢰나 기뢰에 의한 폭발이라고 생각함(부장)
- 경비구역 특성, 선체구조 등을 나름대로 판단해 보았을 때 북한의 어뢰 공격으로 추측됨(전투정보관)
- 직별이 전탐이라 외부 충격소리에 민감하여 처음에는 상선에 부딪힌 줄 알았으나, 함수로 탈출하여 함미 등 주변 상황을 보니 어뢰에 부딪힌 것으로 생각됨(전탐장)
- 승조원들 구조 후 외부 갑판으로 나와 보니 함미 부분이 연돌부위부터 잘려진 것을 보고 전쟁이 났구나 생각하였고, 이 정도 충격을 줄 수 있는 것은 어뢰라고 생각함(음탐사)
- 항상 가는 항로였고 몇 시간 동안 이상 없다가 갑자기 당한 일이라 기뢰보다는 잠수함 어뢰라는 생각이 듦(조타사)
- 어뢰 또는 기뢰로 생각함, 함내에서 폭발이 발생한다면 함수 또는 함미 방향으로 몸이 날아갔을 텐데 너무 확연하게도 우현으로 날아갔음(병기사)
- 무엇인가에 맞았다는 느낌, 외부 충격의 느낌을 받았기 때문에 기뢰, 어뢰로 판단되고, 암초 등은 아닌 것으로 사료됨(전탐사)
- 북한의 어뢰공격이나 바다 밑에 있던 기뢰의 폭발이라고 생각함, 어뢰 공격으로 좌현에 맞아 배가 우현으로 기울어지며 폭발로 침몰(갑판병)
- 터졌을 때 소리가 너무 커서 지금도 생각이 나며 넘어지고 어딘가에 부딪히는 상황에서도 북한의 어뢰에 피격당하였다고 생각함(조타병)
- 사고원인은 북한의 반잠수정에 탑재된 경어뢰에 좌현 함미 부근이 맞아서 함정이 균열되어 무거운 함미 부분이 자연스럽게 찢어졌다고 생각함(갑판병)

3) 교신 내용

상황발생 초기 천안함 생존자 일부가 경황이 없어 '좌초', '조난' 등 정확한 용어 사용이 되지 않은 상태로 보고하였던 사실을 확인하였으며, 함장은 전대장과 침몰원인이 "어뢰 같다."는 내용으로 통화하였고, 통신장은 레이더기지 당직병과 "어뢰 피격으로 판단된다."는 내용으로 교신한 사실을 확인하였다.

주요 진술 내용

- 포술장 ↔ 2함대 상황반장 : 3. 26(금) 21:28경
 - 포술장 : 천안인데 침몰되었다. 좌초다.
 - 상황반장 : 좌초되었나?
 - 포술장 : 배가 우측으로 넘어갔고 구조가 필요하다.
 - ※포술장은 상황이 급해 구조를 빨리 받고 싶어 '좌초' 용어를 사용하였다고 진술
- 전투정보관 ↔ 2함대 당직사관 : 3. 26(금) 21:30경
 - 전투정보관 : 천안함이 백령도 근해에서 조난당했으니 대청도 235편대를 긴급 출항시켜 주십시오.
 - 당직사관 : 현재 상황은?(교신불량으로 통화 끊김)
 - ※당직사관은 전투정보관이 '조난'이라고 한 것을 '좌초'로 잘못 듣고 보고 및 전파
- 통신장 ↔ 레이더기지(무선병) : 3. 26(금) 21:51~21:52
 - 레이더기지 : 귀국 침몰사유 통보할 것.
 - 천안함 : 본국 어뢰, 어뢰, 어뢰로 사료됨, 어뢰로 사료됨 이상.
 - 레이더기지 : 어뢰가 정확한가?
 - 천안함 : 어뢰피격으로 판단됨.
 - 레이더기지 : 현재 인원 구조차 고속정 기동 중임.
 - 천안함 : 수신완료 끝.
- 함장 ↔ 전대장 : 3. 26(금) 22:32~22:42
 - 함 장 : 뭐에 맞은 것 같습니다.
 - 전대장 : 뭔거 같애?
 - 함 장 : 어뢰 같은데요, 함미가 아예 안 보입니다.
 - 전대장 : 함미? 함미 어디부터?
 - 함 장 : 연돌이 안 보여요, 고속정이나 RB 빨리 좀 조치해 주십시오.
 - 전대장 : 생존자는?
 - 함 장 : 58명이고 다수가 피를 흘리고, 못 일어서는 중상자가 2명입니다.

4) 초병

사고 발생 지점으로부터 2.5km 떨어진 해안초소에서 경계근무 중이던 초소원 해병 6여단 상병 등 2명은 21:23경⁶⁾ ‘굉’ 하는 소리와 함께 하얀 불빛 또는 하얀색 섬광불빛(폭 20~30m, 높이 약 100m)을 목격했다고 진술하였다.⁷⁾

주요 진술 내용

- 해안초소 경계근무 중, ‘굉’ 하는 소리(사격소리보다 더 큰 깜짝 놀랄 정도)와 동시에 4~5km로 추정되는 거리에서 하얀 불빛이 주변으로 퍼졌다가 소멸하는 것을 봄(상병)
- 해안초소 경계근무 중, ‘굉’ 하는 소리를 듣고, 해상 전방 약 4km, 방위각 270°를 쳐다보니 하얀색 섬광불빛(폭 20~30m, 높이 약 100m)이 보였다가 2~3초 후 소멸됨(상병)

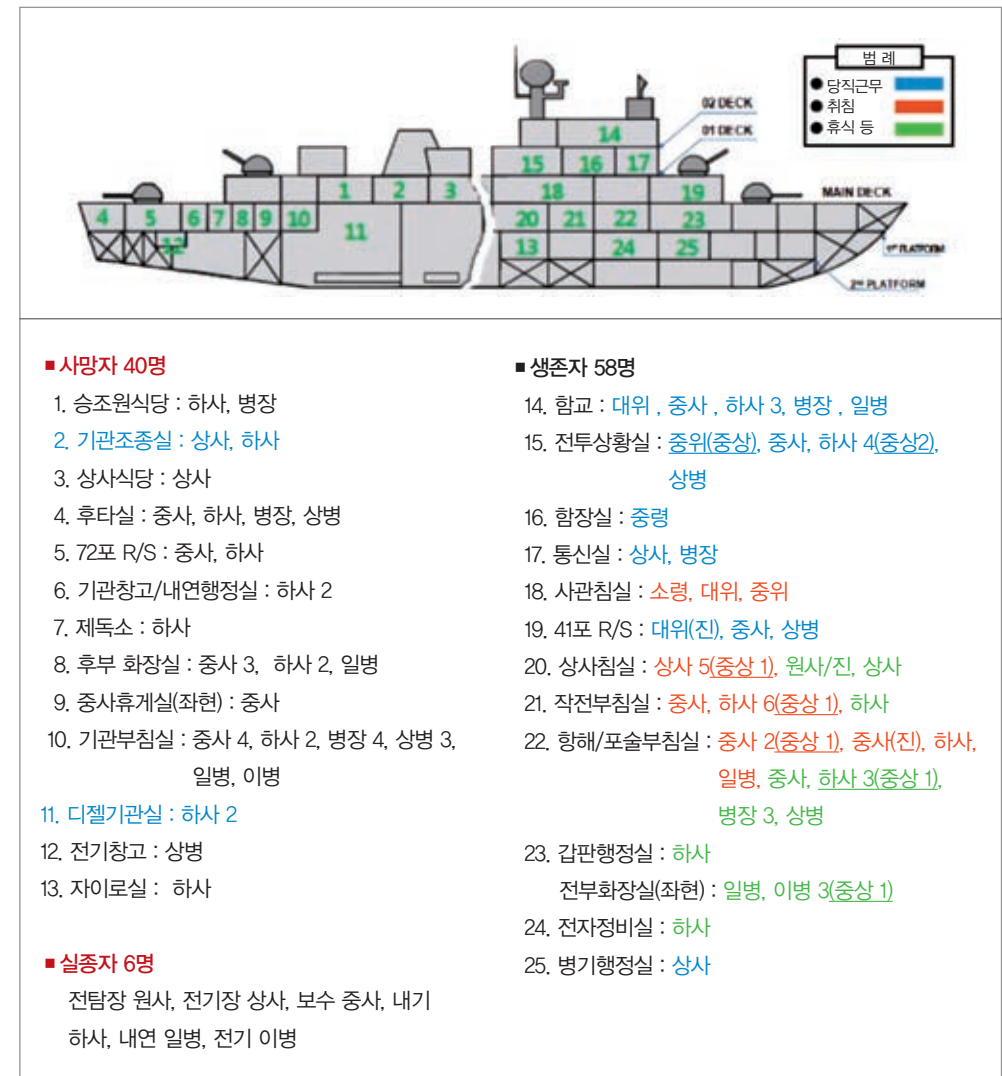
5) 소결론

생존자 및 초병의 진술내용 분석 결과 생존자 다수 인원이 공중으로 뿔뿔히 떨어져 폭발음을 2회 청취한 인원이 있었으며, 화염·불꽃·물기둥 목격자 및 화상환자는 없었다. 골절 및 타박상 환자가 발생했다는 점, 생존자 다수가 침몰원인을 어뢰로 판단하고 있었던 점, 그리고 초병이 섬광불빛을 목격하고 소음을 청취하였다고 진술한 점 등을 종합적으로 판단해 볼 때 어뢰의 수 중폭발에 의한 버블효과 현상과 일치한다는 것을 확인하였다.

4. 생존자 환자 상태 및 시체검안 결과

생존자 58명은 신체적 부상뿐만 아니라 사건에 대한 심리적 충격으로 인한 외상 후 스트레스 증후군이 우려되어 입원조치되었다. 저체온증, 타박상, 염좌 등 경상자 대부분은 약 10~12 일간의 치료 후 퇴원하였고, 중상자 8명 중 늑골골절 환자 등 6명은 약 1~2개월가량 치료 후

6) 초병이 충격음 및 하얀색 섬광을 목격한 후 상황보고를 위해 전자 손목시계를 확인 시 21:23이었고 ‘초’ 단위는 확인하지 않았다고 진술하였으며, 소속 중대 상황일지 확인 결과, 3. 26. 21:23경 00초소 ‘낙뢰소리 청취’라고 기록되어 있었음.
7) 침몰 당시 기상상태 : 해무 40%, 월광 78%, 시정 500m 이내.



〈그림 3장-4-1〉 천안함 승조원 위치

퇴원하였으나 요추 및 대퇴부 골절 등 2명과 경상자로 분류되었던 환자 중 1명은 급성스트레스로 인해 2개월 이상 입원치료 후 퇴원하였다.

어뢰로 인한 환자 상태를 연구한 KAIST 신영식 박사와 과거 수중폭발을 경험한 영국 측에 의하면 “버블효과 시에는 충격 및 압력파에 의해 승조원들이 골절상, 열창(부딪혀서 찢겨지는 상처), 타박상 등을 입을 수 있으며 천안함 사건에서 발생한 환자는 버블효과로 나타나는 현상을 증명할 수 있는 증거가 된다.”는 의견이었다.

시체검안은 침몰원인을 규명하기 위한 파편, 화상흔, 직접적인 사인 등을 확인하기 위해

구분	계	저체온증	열상 및 타박상	뇌진탕	열좌	인대파열 및 치아골절
경상자	50명	4명	11명	2명	29명	4명

구분	계	경추, 요추 골절	늑골골절	대퇴부골절	우쇄골골절	발목골절
중상자	8명	3명	2명	1명	1명	1명

〈표 3장-4-1〉 환자 현황

탐색, 구조간 발견한 시신 및 함미·함수 인양 시 수습한 시신 40구에 대해 실시하였으며 검안(육안) 및 X선 촬영 등 정밀검안을 실시하였다.

1) 탐색, 구조 활동간 발견된 시신(2구)

함미 탐색·구조 활동 중 4월 3일 발견된 상사의 시신을 4월 4일 10:00~10:40경 검안한 결과 시신 안면부 위·아래 턱뼈 및 우측 팔 상박 부분이 골절되었고 좌측 팔 상박 부분 근육이 찢어져 있었으며, 기타 안면부 좌측 경부 등에 다수의 찢리고 찢어진 상처를 확인하였다.

함미 인양을 위해 함미를 탐색하는 과정에서 기관조종실 절단면 부근에서 발견된 상사의 시신을 4월 7일 19:53~21:30경 검안한 결과 팔꿈치가 탈구되었고 다수의 쓸리거나 긁힌 상처가 있었으나 파편에 의한 상처나 관통상은 없는 것을 확인하였다.

2) 함미에서 수습된 시신(36구)

4월 15일 함미 인양 후 16일까지 이틀간 함미 내부수색을 통해 수습한 시신 36구에 대해 4월 15일 18:00~16일 03:00경 검안 및 X선 판독 결과 대부분의 시신에서 열창, 피하출혈, 표피박탈, 좌상, 골절 등 비교적 경미한 외상이 확인되었으며 하사 등 5명(하사 3, 병장 1, 일병 1)의 시신에는 외부손상이 없는 것으로 확인되었다.

손상형태별 부위를 보면 열창은 대부분 안면부 및 후두부에서 발견되었고 피하출혈, 표피박탈, 좌상은 안면부, 팔, 다리, 복부, 발목, 허리 등 신체 전반에 걸쳐 발견되었으며, 골절은 요추, 측두골, 척골이 주로 골절되었다. 36구의 시체검안 결과에 대해 분석한 결과 특이할 점은 한 시신의 주요 손상부위가 우측 견갑부-우상완-우측 요부-우측 무릎으로 이어지

고, 또 다른 시신의 경우 좌측 두부-좌측 어깨-좌측 팔로 이어지는 등 좌우 어느 한쪽으로 방향성을 보이는 경향이 있었으며, 이는 사망 전 외력에 의해 신체가 좌우 한쪽으로 밀리거나 넘어지면서 신체 내부 구조물에 부딪치며 손상이 발생한 것으로 판단하였다.

종합적으로 시신에서 파편, 화상흔이 발견되지 않았으며 열창, 골절, 좌상 등의 외상이 확인되었으나 사망에 이르게 할 만한 결정적인 상해는 아닌 것으로 판단하였다. 정확한 사인은 부검을 통하여 알 수 있으나 유족들의 의견을 반영하여 실시하지 않았고, 정황상 외상에 의한 사망 가능성보다는 익사로 추정하였으며 부패 소견을 고려, 동일 시간대 사망한 것으로 판단하였다. 손상별 인원 현황은 〈표 3장-4-2〉와 같다.

구분	열창	표피박탈	피하출혈	좌상	골절	절창	기타
인원(명)	15	15	14	10	7	3	치아탈락 1, 피부파열 1, 탈구 1

〈표 3장-4-2〉 시신 36구 검안 및 X선 판독 결과

3) 연돌에서 수습된 시신(1구)

4월 22일 21:20경 함미에서 떨어져 나간 연돌을 끌어올리기 위해 수중작업을 하던 SSU⁸⁾에 의해 연돌 내부에서 전투복을 입은 채 발견된 하사의 시신을 4월 23일 09:30~10:13경 검안한 결과 시신 좌측 이마에 열창, 우측 무릎부위 좌상 등이 관찰되었다.

4) 함수 자이로실에서 수습된 시신(1구)

4월 24일 함수 인양 후 인공배수를 위해 1차 수색을 하는 과정에서 함수 중앙 부분 작전부침실 아래 가스터빈실 앞 ‘자이로실’에서 발견된 하사의 시신을 4월 24일 17:03~17:47경 검안한 결과 시신 양측 경골(정강이뼈)이 골절되었고, 하악골이 분쇄골절되었으며 피부와 연조직, 좌측 후두부 두피에 열창이 있음을 확인하였다.

.....
8) SSU(Ship salvage unit) : 해군 해난구조대, 해난구조와 항만 및 수로상 천연/인공 장애물 제거 등의 임무를 수행하는 특수부대.

5) 소결론

생존자 환자 상태 및 시신에 대한 검안 결과를 종합적으로 분석해 볼 때 환자와 시신에 화상, 파편상, 관통상은 없었다. 생존자 환자는 골절, 열창 및 타박상이 다수였고 시신 대부분은 비교적 경미한 상해를 입은 상태로 외상에 의한 사망 가능성은 적으며, 정황상 익사한 것으로 추정되었다.

특히, 사망자들이 발견 당시 침실, 휴게실, 화장실 등에서 체육복, 근무복, 속옷 등 평상시 일과 이후의 일상복을 착용한 상태인 것으로 보아 일상생활 중 사망한 것을 확인하였다. 생존자 환자와 다수의 시신에서 좌·우 한쪽으로 넘어지면서 신체와 부딪쳐 발생한 것으로 판단되는 골절, 열창 및 좌상 등이 관찰되는 등 시신상태를 고려 시 버블효과에 의한 현상과 일치하였다.

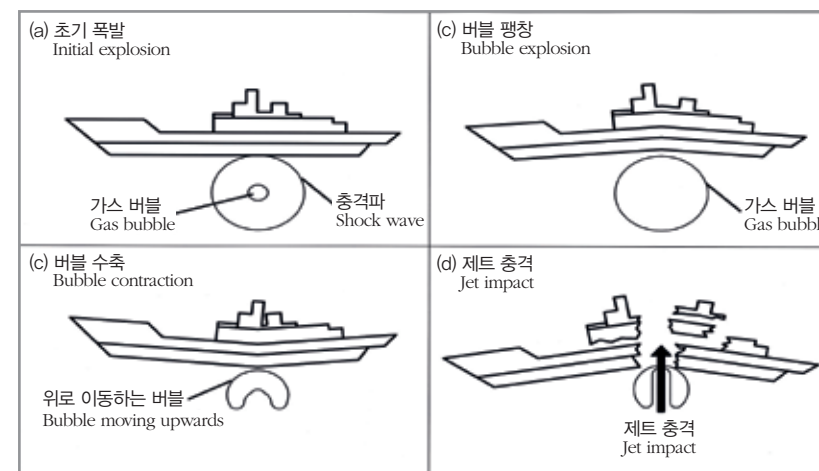
5. 폭발유형 분석

천안함은 강력한 비접촉 수중폭발에 의하여 선체가 절단되어 침몰한 것으로 분석되었으며, 결정적 증거물인 어뢰 추진동력장치를 인양함으로써 어뢰의 수중폭발에 의한 침몰로 판단되었다. 본 절에서는 이러한 분석 결과와 확인된 증거물을 근거로 천안함을 침몰시킨 어뢰의 위력(폭약량)과 폭발 위치를 판단하였다. 이를 위하여 미국팀은 전문기법을 활용하여 폭발량과 폭발 위치를 판단하였고, 한국팀에서는 미국팀과 영국팀의 판단을 근거로 시뮬레이션 분석을 수행하였다.

1) 수중폭발 현상

천안함 침몰원인에 대한 이해를 돕기 위해 선체 밑에서 화약이 폭발했을 때 발생하는 버블의 파괴효과를 <그림 3장-5-1>에 제시하였다.

선체 밑에서 폭약이 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 실제로 선체에 가해지는 충격은 크지 않게 된다. 이러



<그림 3장-5-1> 선체 밑에 형성된 버블의 시간에 따른 물리적 현상

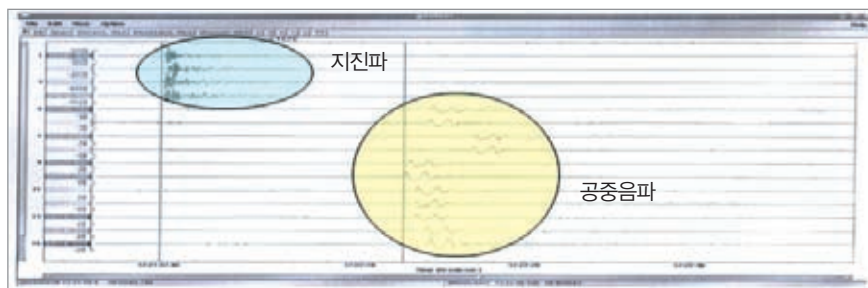
한 전파특성 때문에 충격파가 선체에 주는 손상은 대부분 선체 내부의 전기 및 통신 시설의 오작동이나 가벼운 파손 정도로 알려져 있다.

충격파 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 워터제트(Water jet)가 형성되기 시작한다.

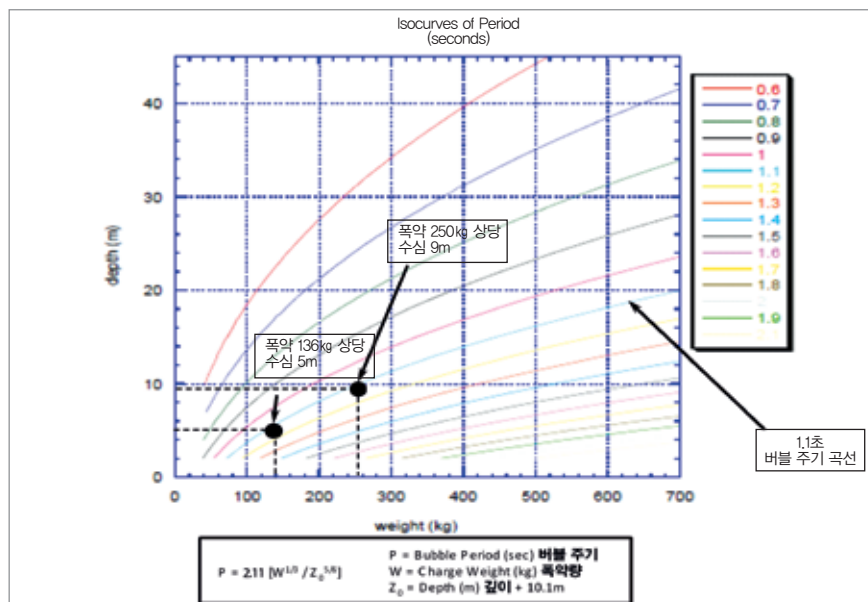
워터제트가 점점 성장하면서 선체는 강한 워터제트의 충격을 받게 되어 결국 절단되게 된다. 이와 같은 워터제트의 충격은 다른 충격파에 비해 매우 크기 때문에 오늘날 대부분의 국가들은 버블효과를 최대화하는 비접촉식 수중폭발 무기체계를 사용하고 있다. 수중폭발 현상과 관련된 세부 이론은 ‘부록 II’에 포함하였다.

2) 1차 폭발유형(폭약량 및 폭발 위치) 분석 : 미국팀

미국 조사팀은 천안함을 절단시킨 어뢰의 폭약량과 폭발 위치를 분석하기 위하여 폭발 당시 지진연구센터에서 감지한 지진파 및 공중음파를 분석하였다. <그림 3장-5-2>에 제시된 바와 같이 백령도의 4개의 지진감시소에서는 진도 1.5의 지진파를 감지하였고, 11개의 음파감시소에서는 1.1초 간격으로 2개의 음향 파동주기가 포함된 공중음파를 감지하였다. 수중에



〈그림 3장-5-2〉 사건 당일 감지된 지진파 및 공중음파

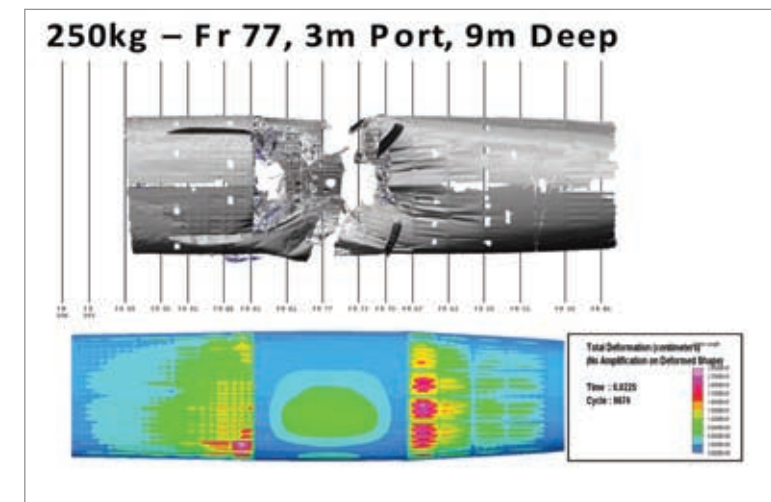


〈그림 3장-5-3〉 버블 주기에 따른 폭약량 및 수심

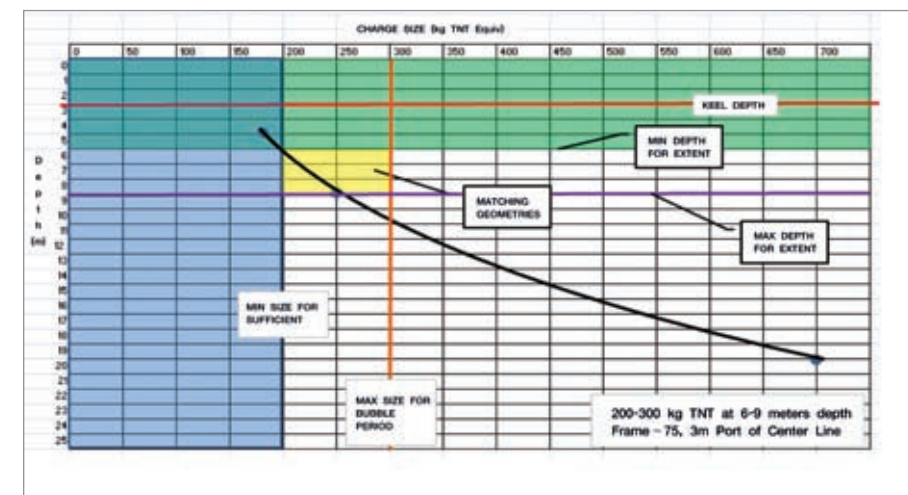
서 폭약이 폭발할 때 2개의 음향파동이 발생하는데 첫번째 파동은 폭약이 폭발 시 발생하며, 두 번째 파동은 버블 팽창 순간에 발생하는 것으로 음파간격 1.1초는 수중폭발 시 발생하는 버블 주기를 나타낸다. 이러한 측정 데이터를 근거로 Willis의 공식을 적용하여 버블 주기에 해당되는 폭약량과 수심을 분석한 결과는 〈그림 3장-5-3〉과 같다.

그리고 천안함 선체가 인양된 이후 절단면과 선저부분을 육안으로 검사한 결과, 충격파와 버블효과에 의한 외판 디싱(Dishing)과 선체 휘어짐(Bending) 현상이 관찰되었다. 중급힘(Whipping)에 대한 내충격 전산모델⁹⁾을 이용하여 선체 절단을 야기할 수 있을 정도의 폭약량

9) 선체가 외부 충격에 견디는 힘을 산출하기 위한 시뮬레이션 모델.



〈그림 3장-5-4〉 천안함 선저 디싱 형태와 유사한 폭발유형



〈그림 3장-5-5〉 천안함 폭발유형 판단 결과

과 수심을 판단하였다. 선저 외판 디싱 현상에 대한 계측치와 선체면 변형(Deformation) 유한 요소 전산해석¹⁰⁾을 통해 도출된 계산치를 비교한 결과, TNT 250kg이 가스터빈실 아래 수심 6~9m, 중앙에서 좌현으로 3m 지점에서 폭발한 것으로 판단하였다(〈그림 3장-5-4〉 참조).

따라서 버블 주기 1.1초에 해당하는 폭약량과 수심, 내충격 전산모델에 의한 분석 결과, 그리고 선체면 변형 유한요소 전산해석 결과 등을 종합하여 〈그림 3장-5-5〉와 같은 결과를

10) 해석 대상을 유한되어 있는 요소로 분할하여 수학적 모델로 만들어 해석하는 방법.

도출하였다.

〈그림 3장-5-5〉에 나타난 수심은 〈그림 3장-5-4〉에 나타난 디싱의 길이방향 분포를 고려해 6~9m로 판단했고, 폭발지점은 가스터빈실 중앙에서 좌현으로 3m 지점이며, 폭약량은 내충격 분석 결과와 버블 주기에 의한 분석 결과를 통해 TNT 200~300kg으로 판단했다.

3) 2차 폭발유형(폭약량 및 폭발 위치) 분석 : 한국팀

한국팀에서는 미국팀과 영국팀의 분석 결과를 토대로 시뮬레이션 기법을 사용하여 선체의 실제 파괴형태를 세부적으로 분석하였다. 이 과정에서 결정적인 증거물인 어뢰 추진동력장치¹¹⁾가 인양되어 추가 증거물로 활용하였으며 선체 절단면 분석을 통하여 미국팀 분석에서 확인한 폭발 위치를 재확인하였다.

(1) 폭발 방향 및 위치 분석(절단면 분석)

폭발 방향과 위치 확인을 위하여 선체 절단면의 파괴형태를 관찰하고 이를 근거로 힘의 작용점과 방향을 분석하였다.

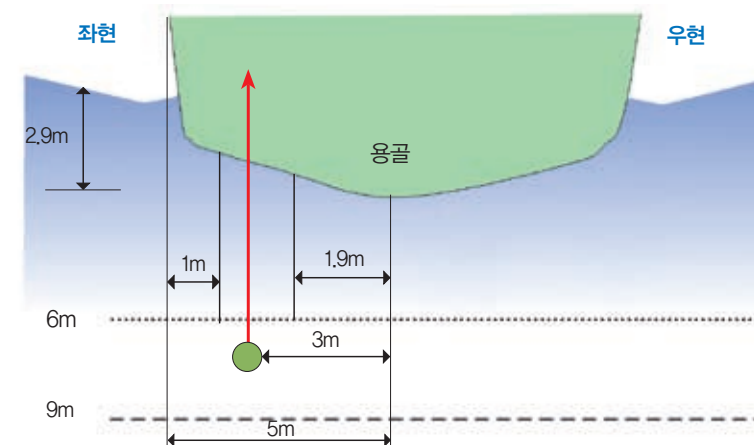
〈그림 3장-5-6〉과 같이 함미 절단면 세 군데에서 약 15cm×15cm 크기로 시편을 채취하였다. 채취한 시편의 절단면은 모두 전단파괴와 취성파괴 형상인 것으로 밝혀졌으며, 연성파괴¹¹⁾와 피로파괴 형상은 관찰되지 않았다. 2번 시편은 전단파괴 형상을 보이고 있고, 3번 시편은 전형적인 취성파괴 형상을 보인다. 반면 1번 시편은 전단파괴와 취성파괴가 혼재하고 있었다. 그리고 1번 시편과 2번 시편 사이는 전부 전단파괴가 발생하였고, 1번 시편과 3번 시편 사이는 모두 취성파괴가 일어난 것을 확인할 수 있었다.

천안함의 절단면에 대한 세부적인 분석 결과(부록 III 참조), 좌현 하부방향으로부터 상부 방향으로 큰 곡면의 함체 소성변형이 일어난 후 강력한 외력에 의해 전단파괴가 일어난 것으로 분석되었고, 절단이 시작된 위치는 용골의 좌현 1.9m 지점인 것으로 분석되었다. 따라서 좌현의 선폭 5m를 고려 시, 폭발은 용골 좌현 1.9~5m 사이에서 발생한 것으로 판단하였고, 선저 중 폭발 가능 위치는 용골 기준 1.9~4m의 중앙인 3m 지점으로 판단하였다(〈그림 3장-5-7〉 참조).

11) 연성파괴(延性破壞) : 탄성한계를 넘는 힘을 가함으로써 물체가 한계치까지 늘어나다가 파괴되는 현상.



〈그림 3장-5-6〉 절단면의 시편 채취 위치

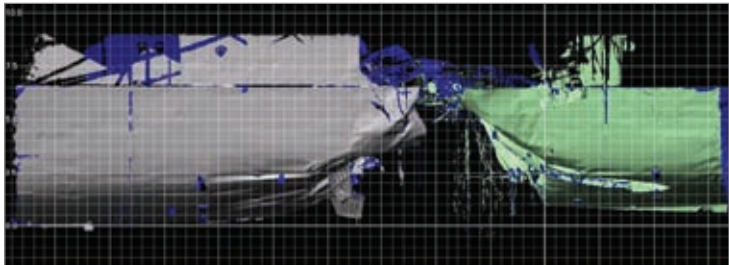


〈그림 3장-5-7〉 폭발 가능 위치

(2) 폭발유형 시뮬레이션 분석

앞에서 실시한 절단면 분석에 따른 폭발 방향과 위치를 근거로 천안함 피격사건과 유사한 폭발유형(폭약량과 수심)을 판단하기 위하여 시뮬레이션 분석을 하였다.

시뮬레이션 분석의 분석 범위는 우선 제한된 시간내에 결과를 얻기 위하여 선체는 가능한 단순화된 모형(손상부위를 중심으로 부분모델링, 선체와 용골 및 늑골, 격벽만 모델링)을 사용하였으며, 천안함의 피해와 유사한 형태의 폭발을 일으킬 수 있는 폭약량, 수심 등을 다양하게 설정하였다.



〈그림 3장-5-8〉 천안함의 피해 형태

요소	실물	시뮬레이션 '예'
① 선체 하부 파괴범위		
② 함미 절단면 격벽의 변형/파단 형상		
③ 함미 절단면 격벽 용골변형길이	 <small>함미 용골변형길이 : 함미 절단면 격벽 용골로부터 함미부 용골 최저점까지의 거리(3,580mm)</small>	

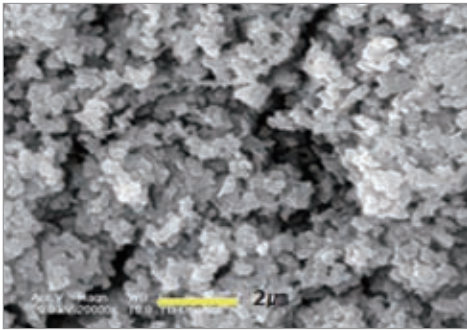
〈그림 3장-5-9〉 비교 요소

3가지 기준을 선정하여 시뮬레이션 분석 결과와 천안함 실물파손을 비교하고 이를 모두 만족하는 폭발유형을 후보군으로 선정하였다. 비교 결과는 〈그림 3장-5-9〉와 같다.

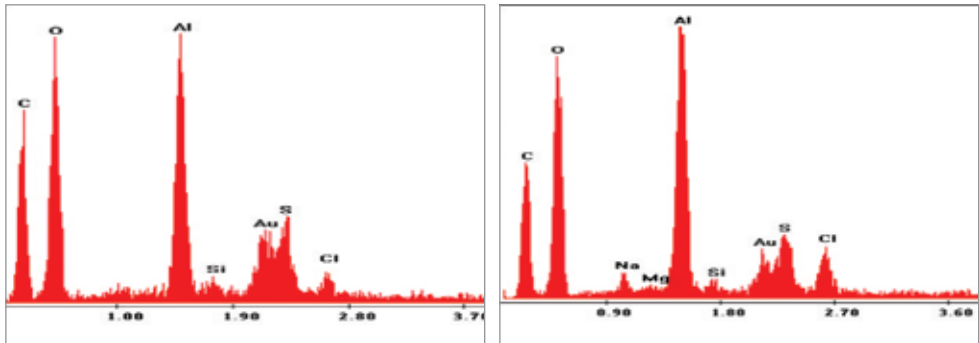
시뮬레이션 분석 결과 프레임 75, 좌현 3m에서 폭발이 발생하는 경우에 TNT 250kg의 폭약량은 수심 6m, TNT 300kg의 폭약량은 수심 7m, TNT 360kg의 폭약량은 수심 7~9m에서 천안함 절단과 유사한 폭발현상이 발생하는 것으로 확인되었다. 세부적인 내용은 ‘부록 IV’에 포함되어 있다.

4) 흡착물질 분석

천안함의 함미와 함수 및 연돌에서 절단면 부위에 흰색 분말 덩어리가 다량 흡착되어 있었으며, 어뢰 추진동력장치에서도 유사한 흰색 분말 덩어리가 다량 흡착되어 있었다. 흡착물질은 알루미늄 소재뿐만 아니라 알루미늄이 아닌 소재의 표면에서도 발견되었다. 흡착물질에 대한 전자현미경(SEM) 사진, 에너지 분광(EDS), X선 회절(XRD) 등을 통하여 분석한 결과 선체와 어뢰의 흡착물질은 동일한 원소성분으로 구성되어 있으며 마이크로미터 이하 크기의 미세입자가 뭉쳐 있는 다공질 형상으로서 대부분이 비결정성 알루미늄 산화물(Al_xO_y)과 수분으로 약간의 탄소와 황 또는 황화합물 그리고 모래와 염분 등이 함유되어 있었다.



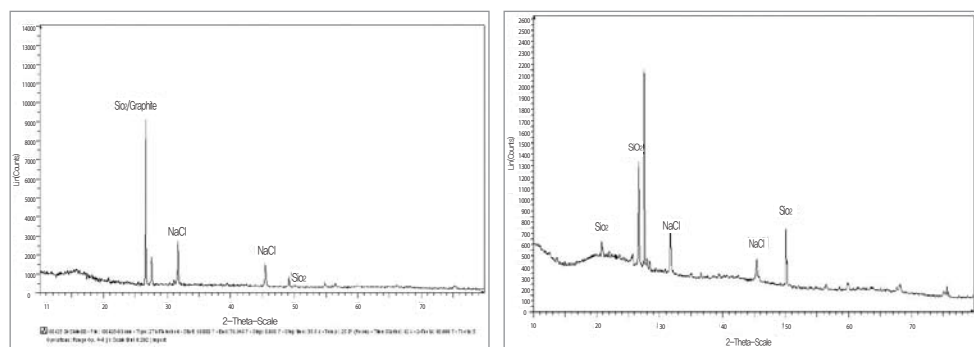
〈그림 3장-5-10〉 흡착물질의 전자현미경 사진



천안함 선체

어뢰 추진동력장치

〈그림 3장-5-11〉 흡착물질의 에너지 분광 분석 결과



천안함 선체

어뢰 추진동력장치

〈그림 3장-5-12〉 흡착물질의 X선 회절 분석 결과

결론적으로 천안함 선체와 어뢰 추진동력장치의 흡착물질은 동일성분이며, 대부분 비결정성 알루미늄 산화물로 구성되어 있었다. 따라서 흡착물질은 알루미늄 첨가 수중폭약의 폭발재인 것으로 판단하였다.

폭발재 확인을 위한 소형 수중폭발 시험 결과와 흡착물질에 대한 세부적인 분석 결과는 ‘부록 II’ 및 ‘부록 V’에 첨부하였다.

5) 소결론

지진파 및 공중음파, 외판 디싱, 중급힘 내충격 등에 대한 1차 분석과 절단면 분석, 시뮬레이션 분석 등의 2차 분석을 통하여 천안함 피격사건에 사용된 무기체계의 위력을 도출하였다.

미국팀의 분석 결과 천안함과 유사한 손상을 발생하는 폭발의 폭약량은 TNT 폭약량 200~300kg, 폭발위치는 가스터빈실 중앙 하단에서 좌현 3m, 수심 6~9m로 판단되었다.

한국팀의 분석 결과 함수·함미 절단면 분석을 통하여 폭발지점은 가스터빈실 중앙하단에서 좌현 3m 부근인 것으로 판단되었고, 시뮬레이션 분석 결과 천안함을 침몰시킨 폭발은 TNT 폭약량 250~360kg, 수심 6~9m 정도에서 발생한 것으로 판단되었으며, 흡착물질 분석 결과 천안함을 침몰시킨 폭약은 알루미늄이 첨가된 수중폭약인 것으로 판단되었다.

결론적으로 폭발유형 분석과 수거된 결정적 증거물을 종합하여 판단하면, 천안함은 고성능 폭약 250kg이 탑재된 어뢰가 수심 6~9m, 가스터빈실 중앙에서 좌현으로 3m 지점에서 비접촉폭발로 형성된 버블효과로 인해 침몰된 것으로 분석되었다.

6. 수중폭발 선체 충격 해석

천안함 침몰원인 조사 분석 초기 단계에서는 폭발유형(폭약의 크기, 위치)이 한정되지 않아 어떠한 폭발이 함정의 파괴를 일으킬 수 있는지를 빠르게 분석하기 위해 선체구조 휘핑(Whipping) 해석을 실시하였다. 이후 폭발유형분석분과에서 도출한 유력 폭발유형에 대하여 구체적인 선체구조의 파괴양상을 해석하고 천안함의 실제 파괴상태와 비교 분석함으로써 해당 폭발유형의 타당성을 검토하였다. 이를 위해 선체구조의 상세 모델을 이용한 3차원 근접 수중폭발 해석을 실시하였다.

1) 수중폭발 선체 충격 해석 방법

(1) 일반적인 함정의 충격 해석 방법

함정 설계 시 수중폭발은 전투 생존성 관점에서 가장 중요하게 다루는 위협이다. 그러나 천안함과 같은 선체 절단 파괴를 유발시킬 수 있는 근접 수중폭발을 설계 대상 위협으로 할 경우, 선체구조 및 탑재장비는 감당할 수 없을 정도로 보강되어 비현실적인 설계가 되므로 전 세계적으로 함정 설계에는 선체로부터 비교적 먼 거리에서 폭발이 일어나는 원거리 비접촉 수중폭발조건을 적용한다.

원거리 비접촉 수중폭발의 경우 충격파와 버블을 분리하여 생각할 수 있다. 함정 설계에서 고려하는 수준의 수중폭발이 일으키는 충격파는 함정 탑재장비 설계에 주로 반영된다. 일반적으로 선체구조는 원거리 비접촉성 폭발에 의한 충격파에 대하여 별도 설계가 필요 없을 정도로 강하다. 원거리 비접촉성 폭발의 충격파에 대한 함정 충격응답 해석은 일반적으로 이중점근근사법¹²⁾에 의거하여 개발된 전용해석 코드를 사용한다.

버블의 팽창, 수축에 의한 영향은 함정의 주요 강도인 종강도(Longitudinal strength)와 관련이 있으며, 이때 선체구조는 길이가 폭·높이보다 매우 크므로 보(Beam)로 간주될 수 있다. 선체(Hull girder)가 버블의 팽창, 수축 영향을 받아 급격히 호잉¹³⁾, 새김¹⁴⁾하는 현상을 수중폭

12) 이중점근근사법(Doubly asymptotic approximation) : 수중폭발 시 물과 선체 구조물의 상호작용과 현상을 해석하는 동역학기법.

13) 호잉(Hogging) : 배의 중앙이 선수, 선미에 비해 들어 올려지는 굽힘 변형.

14) 새김(Sagging) : 배의 중앙이 선수, 선미에 비해 처지는 굽힘 변형.

발에 의한 휘핑(Whipping)이라 부르며, 통상 함정 설계에서는 이에 대한 계산을 휘핑 해석이라 한다. 휘핑 해석 코드라 함은 충격파에 대한 영향을 배제하고 버블의 팽창 및 수축 시 발생하는 버블 펄스의 영향만을 선체에 가하여 해석하는 전용 프로그램을 말한다.

한편, 원거리 비접촉 수중폭발의 경우 버블이 선체에 접촉하여 붕괴되면서 발생하는 워터제트와 같은 현상은 발생할 수 없으므로 일반적인 함정 설계에서 고려대상이 아니다.

(2) 천안함 수중폭발 충격 해석에 사용된 방법

일반적으로 함정 설계에서 고려하는 원거리 수중폭발이 충격파와 워터제트의 영향을 분리하여 설명할 수 있는 반면, 근접 수중폭발은 충격파의 근접 작용, 버블에 의한 호킹과 새깅, 그리고 버블 팽창 시 선체의 접촉에 의한 버블의 비정상 수축으로 발생하는 워터제트의 영향까지 단시간내에 혼합 연결된 상황을 유발하므로 이들 작용을 분리하여 해석할 수가 없다. 천안함을 절단 파괴에 이르게 한 폭발은 이와 같이 모든 폭발 영향을 고려하여야 하는 근접 수중폭발로 분석되었으며 이를 위해 2단계의 해석을 수행하였다.

먼저, 선체 종강도의 상실이 전반적인 절단 파괴에 크게 기여한 것으로 판단하여 보유추 휘핑 해석¹⁵⁾을 수행하였다. 이 해석은 천안함 침몰원인 조사 분석 초기 단계에서 폭발유형이 한정되지 않아 어떠한 폭발이 함의 전반적 파괴를 일으킬 수 있는지를 신속하게 분석하기 위한 것이었다.

다음으로 가능한 근접 수중폭발의 주요 영향을 모두 포함할 수 있도록 선체, 해수, 공기, 폭약 및 폭발작용을 모두 고려하고 하이드로코드를 사용하여 3차원 탄소성 해석을 수행하였다. 하이드로코드는 유체와 구조 연성(Couple) 문제, 고속 변형 및 파괴 해석에 적합한 해석 코드의 범주를 말한다. 이 해석을 위해 조사 초기 단계부터 선체 상세 유한요소 모델링을 준비하였으며, 유력한 폭발유형이 도출된 후 해석을 수행하였다. 이 해석방법은 충격파의 영향, 버블의 팽창, 수축의 영향을 혼합 연결하여 함을 절단 파괴에 이르게 한 주요 과정을 시뮬레이션할 수 있을 것으로 판단하였다. 워터제트는 물의 고속 분사 및 분산 등 복잡한 작용으로 선체에 손상을 일으키며 이를 모두 고려하여 해석하는 것은 현재의 수치해석 기술로는 한계가 있으나 본 해석을 통해 이 현상의 발생 단계 등 간접작용은 분석할 수 있을 것으로 판단하였다.

15) 선체를 보(Beam)로 유추하여 수중폭발에 의한 선체의 급격한 휨 현상을 계산하는 것.

2) 주선체 보유추 휘핑 해석

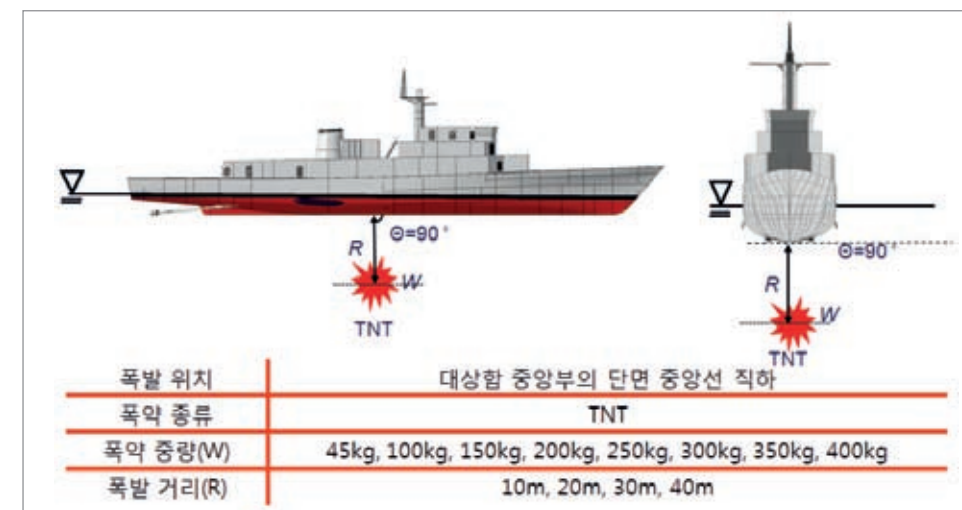
수중폭발에 의해 생성된 버블의 반복적 팽창, 수축이 일으키는 천안함 주선체의 1차원 보유추 휘핑을 해석하고, 최종 강도 관점에서 주선체 종강도 안전성을 검토하였다. <표 3장-6-1>에 천안함의 주요 제원을 정리하였다.

항목	제원
• 전체 길이(Length overall)	88.32m
• 수선간 길이(Length between perpendiculars)	83.47m
• 폭(Breadth)	10.0m
• 깊이(Depth)	6.2m
• 만재 시 평균 흘수(Mean draft at full load)	2.88m
• 만재 배수량(Displacement at full load)	1,223ton

<표 3장-6-1> 천안함 주요 제원

(1) 휘핑 해석을 위한 수중폭발 조건

휘핑 해석을 위해 고려한 수중폭발 조건은 <그림 3장-6-1>에 도시하였다. 그림에서 보듯이 TNT 폭약을 기준으로 폭약 중량 45kg, 100kg, 150kg, 200kg, 250kg, 300kg, 350kg 및 400kg의 8가지에 대하여 천안함 중앙부의 단면 중심선 직하에서 폭발하는 경우를 가정하여



<그림 3장-6-1> 휘핑 해석을 위한 수중폭발 조건