

## 수중폭발에 의한 함정의 손상

정정훈 (한국기계연구원)

본고에서는 수중폭발 현상과 이로 인한 함정 충격응답 특성을 개괄하고, 수중위협 무기인 어뢰 및 기뢰에 의한 실제 함정의 대표적 손상사례를 소개하고자 한다.

### 1. 수중폭발 현상 및 이로 인한 함정 충격응답 특성

폭약이 수중에서 폭발하면 급격한 에너지 변환을 통하여 충격파를 방출한다. 충격파는 폭발원(Explosion Source) 가까이에서는 음속(약 1500m/s)의 3~5배의 속도로 전파되지만, 곧이어 음속의 속도로 전파된다. 충격파 선단은 구(Sphere) 표면을 이루므로 구상파(Spherical Wave)의 형태로 전파된다. 충격파는 접수 외판에 충격하중으로 작용하여 함정 전체에 급격한 순간 응답(속도, 가속도, 변위 등)을 발생시키며, 심한 경우 선체 국부구조 및 주요 탑재장비에 치명적인 손상을 입힐

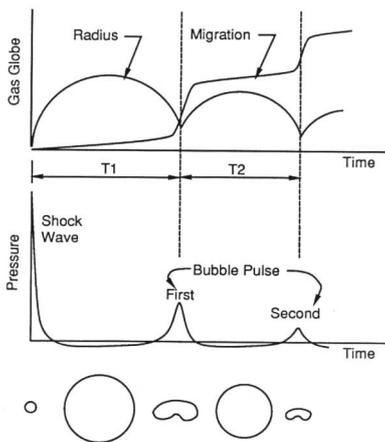


그림 1 수중폭발 현상의 시간이력

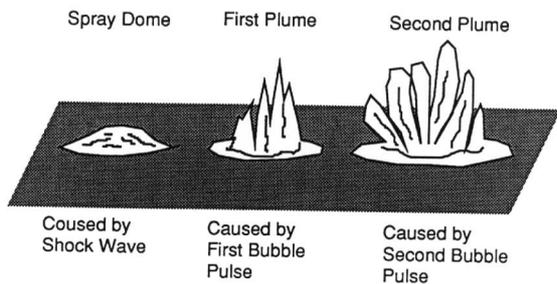


그림 2 수중폭발에 의한 자유수면 위에서의 현상

수 있으므로 함정 설계에서 가장 중요한 위협으로 취급한다.

폭발 반응에 의해 가스로 변환된 폭약은 고압 가스구체(Gas Bubble, 이하 “버블”이라 표기함)를 형성한다. 고압 버블은 주위 수압과의 불평형으로 인해 주기적인 팽창과 수축의 맥동운동(Pulsating Motion)과 부력에 의한 수직상승(Migration) 운동을 한다. 버블의 팽창과 수축은 선체 주위에 밀고 당기는 유체력을 형성함으로써 선체의 호깅(Hogging) 및 새깅(Sagging) 변형을 유발한다. 버블은 맥동운동의 각 주기마다 최소 수축점에서 붕괴하면서 압력 펄스(“버블 펄스”라고도 함)를 주기적으로 방출한다. 버블의 맥동운동 주기가 함정 주선체(Hull Girder)의 상하방향 저차 고유주기와 비슷하게 될 경우 선체에 큰 변형을 일으킬 수 있으며 과도한 경우 함정 주선체가 종강도를 상실할 수 있으므로 함정 구조설계에서 중요하게 취급한다. 그림 1에는 버블 거동(시간에 따른 반경 및 수직상승 운동)과 버블 펄스의 발생과정을 개념적으로 나타내었다. 그림 1의 압력은 폭발원과 떨어진 점(선체 외판 등)에서 감지되는 것이며, 최초 폭발로 발생한 충격파에 의한 압력도 함께 표시되어 있다.

수중폭발 충격파가 수면에 도달하면 스프레이 돔이 형성된다. 충격파는 음속으로 전파되므로 스프레이 돔은 폭발과 거의 동시에 수면에 나타난다. 버블 펄스가 수면에 이르면 분출되며, 이를 수중폭발에 의한 물기둥(Plume)이라 한다. 스프레이 돔과 물기둥의 전형적인 형상을 그림 2에 나타내었다. 물기둥은 폭발의 깊이와 폭약량에 따라 다른 높이, 형상으로 분출될 수 있으며 깊은 수중에서 폭발이 발생하면 수면에는 버블의 영향이 가시화 되지 않을 수도 있다. 또한, 버블이 팽창 중에 선체와 닿게 되면, 수축 시 구의 형태를 유지하지 못하고 이로 인해 비대칭적인 고속의 유동 즉, 워터 제트(이를 “버블 제트”라고도 부름)가 발생하여 매우 큰 에너지를 선체에 전달하므로 선체에 심각한 손상을 일으킬 수 있다.

### 2. 수중폭발에 의한 함정 손상사례

수중폭발은 폭발 시 함정 선체와의 접촉여부에 따라 접촉 수중폭발과 비접촉 수중폭발로 대별되며, 비접촉 수중폭발은 폭약과 선체간의 폭발거리에 따라 근접 수중폭발과 원거리 비접촉 수중폭발로 구분할 수 있다(근접 수중폭발과 원거리 수중

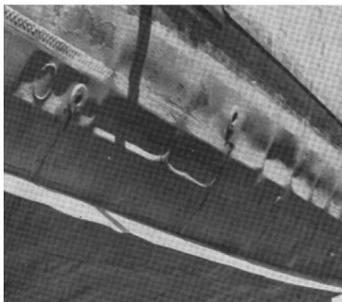


그림 3 수중폭발 충격파에 의한 선체외판의 “Dishing 현상” 예

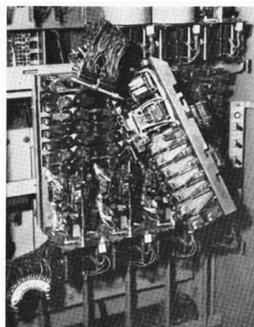
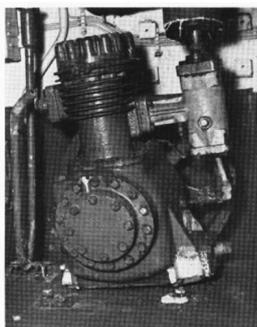


그림 4 수중폭발 충격파에 의한 함정 탑재장비 손상 예

폭발을 구분하는 명확한 기준은 현재까지 없음). 접촉 수중폭발은 접촉기뢰나 직주어뢰의 공격에 의해 가능하며, 비접촉 수중폭발은 함정에서 발생하는 압력, 음향 또는 자기 신호에 감응하여 폭발하는 감응식 기뢰나 어뢰에 의해 가능하다. 전세계적으로 현재까지 수중폭발에 대한 함정 내충격 설계에서는 비접촉 수중폭발에 의한 충격하중만을 고려하고 있다. 이하에서는 어뢰 및 기뢰에 의한 실제 함정의 대표적 손상사례를 소개하였다.

그림 3 및 그림 4에는 2차 세계대전 중에 감응기뢰의 폭발 시 발생한 충격파에 의한 함정의 전형적인 손상사례를 도시하였다. 이들 그림에서 보듯이 수중폭발 충격파는 함정 선체 국부구조와 탑재장비에 치명적인 손상을 입힐 수 있음을 알 수 있다. 한편, 그림 3에서 보면 보강재와 보강재로 둘러싸인 선체외판 일부에는 충격파에 의해 “Dishing 현상”이라 불리는 접시모양의 소성변형이 발생하는데, 이는 비접촉 수중폭발 충격파에 의한 손상에서만 볼 수 있는 전형적인 손상형태이다.

그림 5에는 2차 세계대전 중에 감응기뢰의 폭발 시 발생한 버블 펄스에 의한 함정의 전형적인 손상사례를 도시하였다. 이들 그림에서 보듯이 수중폭발 버블 펄스는 함정의 종강도를 상실 시킬 수 있음을 알 수 있다.

한편, 한국해군을 비롯한 각국 해군에서는 어뢰의 효과도 (Effectiveness)를 검증하기 위해 퇴역 함정에 검증대상 어뢰를 실



그림 5 수중폭발 버블 펄스에 의한 함정 종강도 상실 예



그림 6 근접 수중폭발에 의한 함정 침몰손상 예

제로 발사하는 시험(미국에서는 이를 “Sink Exercise Trial”이라고 함)을 수행하고 있다. 그림 6에는 호주해군에서 자국의 퇴역 함정인 Torrens를 사용하여 미국에서 개발된 Mark 48 ADCAP(Advanced Capability) 감응어뢰의 효과도를 검증하기 위해 1999년에 실시한 시험 장면을 도시하였다. 본 시험은 근접 수중폭발 시험이며 충격파와 버블 펄스 및 버블 제트에 의해 대상 함정이 순식간에 함수와 함미가 절단되어 침몰하였다. 그러나 이쉽게도 어뢰의 효과도 검증시험 후 침몰된 함정을 인양하여 손상 상태를 확인한 경우는 현재까지 보고된 바가 없는 것으로 알고 있다.

그림 7에는 직주어뢰 및 접촉기뢰의 접촉 수중폭발에 의한 함정 손상사례를 도시하였다. 그림 7-(a)에는 1967년 이스라엘 Mortor Torpedo Boat에서 발사한 직주어뢰에 의한 미국해군 함정 Liberty의 손상 상태를, 그림 7-(b)에는 1988년 이란 접촉기뢰에 의한 미국해군 함정 S.B. Roberts의 손상 상태를, 그리고 그림 7-(c)에는 1990년 이라크의 접촉기뢰에 의한 미국해군 함정 Tripoli의 손상 상태를 각각 도시하였다. 접촉폭발에 의해서도 함정은 매우 심각한 손상을 입지만, 이로 인한 함정의 침몰 손상사례는 현재까지 보고된 바가 없는 것으로

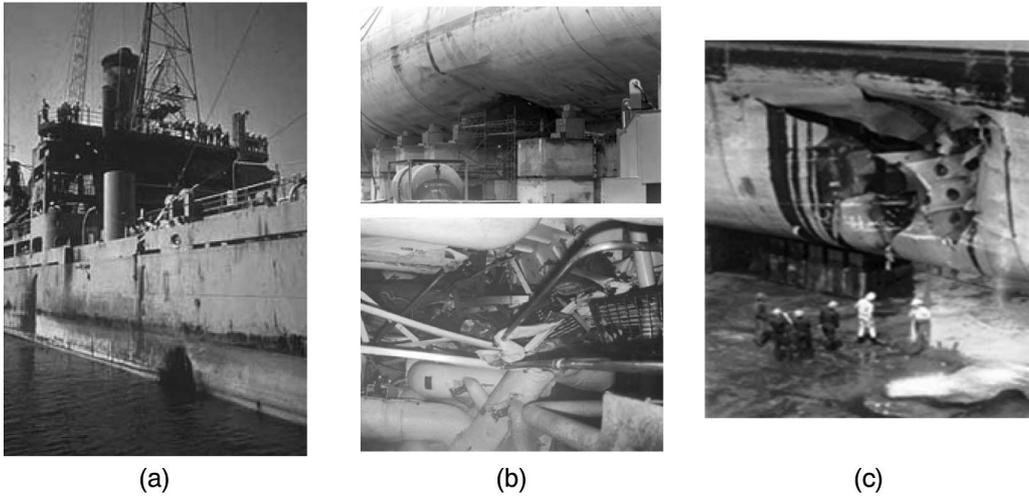


그림 7 접촉폭발에 의한 함정 손상 예

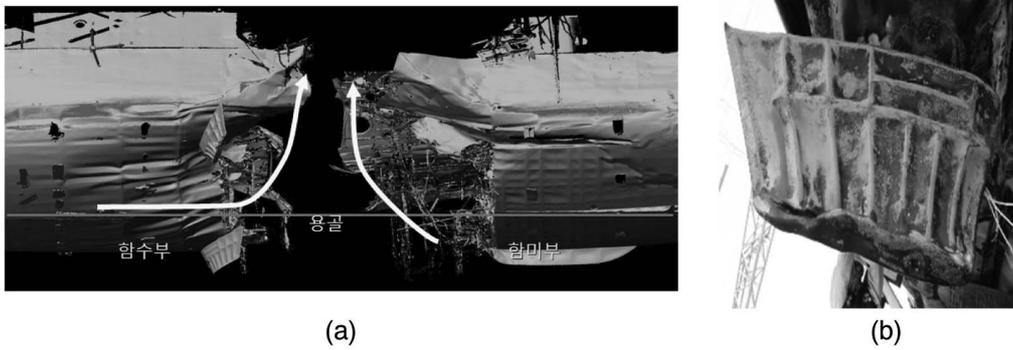


그림 8 인양 후 확인된 천안함 손상 상태

알고 있다.

끝으로, 그림 8에는 금년 3월에 발생한 천안함 피격, 침몰 사건 후 인양하여 확인된 천안함의 대표적인 손상 상태를 도시하였다. 그림 8에서 보듯이 천안함은 일부구간의 유실로 인한 함수부 및 함미부의 절단 파괴뿐만 아니라, 선체외판 일부와 좌현 함안정기 외판은 수중폭발 충격파에 의한 손상에서만 볼 수 있는 있는 “Dishing 현상”이라고 불리는 과도한 소성변형이 발생하였음을 알 수 있다. 앞에서 기술한 수중폭발에 의한 외국의 함정 손상사례와 비교했을 때, 천안함은 틀림없이 근접 수중폭발 공격에 의해 피격되었다고 판단된다.



**정정훈**

- 1962년 7월생
- 1991년 서울대학교 조선공학 박사
- 관심분야 : 함정 생존성 향상 설계·해석, 수중폭발에 대한 함정 내충격 강화 설계·해석
- 현 재 : 한국기계연구원 시스템엔지니어링연구 본부장
- E-mail : jhchung@kimm.re.kr