

## 실험을 통한 함정의 내부폭발에 의한 구조적 변형의 검증

최걸기 (KAIST), 김민준 (㈜한화)

### 1. 서론

지연신관을 이용하여 함정 외판을 관통하여 함정 내부로 침투하여 폭발하는 대함 미사일(Semi Armor Piercing, SAP Warhead 대함 미사일)은 내부폭발에 의한 폭발압력파의 충격과 높은 가스압력의 생성을 통하여 격실 사이를 차단하는 격벽을 파손하여 폭발이 일어난 격실뿐만 아니라 인접 격실에까지 물리적, 기능적 손실을 가져와 최악의 경우 함정 전체의 손실까지 가져오는 큰 피해를 입힐 수 있는 위협이다. 이와 같은 내부폭발에 의한 피해를 최소화하기 위하여 선체구조하중과 정수압에만 견딜 수 있게 설계된 수밀격벽 대신 특정 위협 수준의 내부폭발에 의한 충격파와 높은 가스압력 에너지를 소성변형을 통해서 견디고 수밀을 유지할 수 있는 폭발강화격벽(BHB, Blast Hardened Bulkhead)의 적용이 필요하다. 폭발 강화격벽은 국외에서 개발되어 적용되어 왔으며 (Galle & Erkel, 2002; Stark & Sajdak, 2012) 국내에서도 이와 같은 국외기술을 채용하여 부분적으로 적용해 왔다. 하지만 보다 본격적이며 효율적으로 국내에서의 다양한 함정에 적용되기 위해서는 적용에 필요한 기술이 국내 자체적으로 정밀한 실스케일 실험을 실시하고 이를 기반으로 효과적인 해석, 설계 및 검증 기술이 국내에서 개발되어야 한다.

국외에서는 폭발강화격벽의 적용을 위하여 다양한 스케일의 실험을 실시하여 설계 기술과 해석 기술을 검증하였다. 미국의 경우에는 함정의 한 격벽과 다른 격벽사이가 모두 포함된 함정의 한 섹션을 실제 함정과 같은 스케일로 제작하여 실제 위협에 상응하는 폭약을 사용한 실험 등 다양한 규모의 실험을 수행한 사례가 있으며 네덜란드의 경우에도 Fig.1(a)와 같이 퇴역함을 사용한 내부폭발 실험을 통하여 수밀격벽의 손상실험과 개발된 폭발강화격벽에 대한 실스케일 실험을 수행하였다(Galle & Erkel, 2002). 호주에서는 실스케일의 격벽과 격실에 대한 부분적인 모형을 제작하여 실제 폭발압력을 구현하여 실험을 수행하였다(Raymond, 2001). 이와 같은 국외에서의 자세한 실험 결과는 자국의 보안기술로 보호되기에 국내에서는 입수가 불가하며 국내 기술 보유를 위해서는 국내 자체적 실험 실시가 필수적이다.

본 연구는 이와 같은 폭발강화격벽을 국내 함정에 자체 기술로 적용하기 위한 기술 개발의 일환으로 정밀한 실스케일의

내부폭발 실험을 구현하기 위한 기초 연구로서 실험 과정을 수립하고 실험 실시 결과 분석을 통하여 실스케일 실험에서 일어날 수 있는 현상을 미리 예측하고자 하였다.

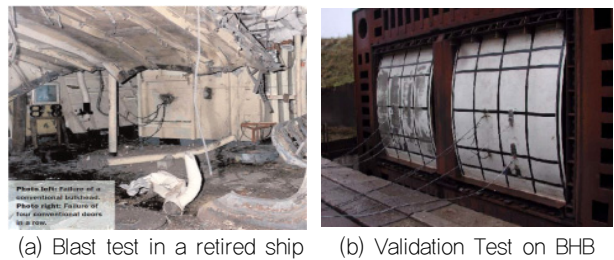


Fig. 1 함정 내부폭발 실험, TNO (Galle & Erkel, 2002)



Fig. 2 함정 내부폭발 실험 DSTO

### 2. 실험 설계

#### 2.1 실험 개요

폭발강화격벽의 실제 함정에 적용하여 그 성능을 실험을 통하여 정확하게 평가하기 위해서는 실제 함정에 적용하여 내부 폭발 실험을 하는 것이 가장 정확할 것이다. 실제 선진국의 몇몇 나라는 함정의 폭발강화격벽이 적용된 함정을 직접 제작하여 내부폭발에 대한 성능을 평가 하고 있다. 그러나 이는 많은 시간과 비용이 필요하게 된다. 본 연구에서는 제한된 시간과 비용 내에서 최대한 정확한 실험이 될 수 있도록 부분 모형실험을 수행하였다. fig 3은 실제 외국의 실험 사례와 국내 실험의 차이를 나타내는 표이다. 실제 함정 실험을 위해서는 많은 비용과 시간이 필요함을 알 수 있다. 부분모형 실험은 실제 함정의 일부분을 사용하는 것으로서 실제 함정의 폭

발강화격벽에 사용되는 재료와 같은 두께를 사용하고, 격벽에 가해지는 압력은 실제와 같을 수 있도록 폭발물의 양을 조정하였다. 따라서, 폭발하중에 따른 구조물의 거동은 실제와 비슷하도록 설정하였다.

## 2.2 실험 구성

본 실험은 내부폭발실험으로서 폭발 체임버를 제작하고 실험하고자 하는 격벽을 체임버에 부착하고, 폭발물을 체임버의 내부에 설치하여 폭발시킴으로서 격벽의 구조적 거동을 확인하는 실험이다. 실험은 크게 폭발물 기폭, 격벽의 설치, 계측의 3부분으로 나뉜다.

주관 기관	U.S. NSWC(Alion)		KAIST
시험 기간	Test article #1	Test article #2	부분 모형 실험
	1998 ~ 2003 (6년)		
시제품 크기	Full scale		1.8x2.4x4.8(m)
제작 비용	40억원	70억원	2억원
실험 비용	70억원	100억원	5억원
총 비용	280억원		7억원
참조 그림			

Fig. 3 국외 함정폭발실험과 비교

### 2.2.1 기폭시스템 구성 및 절차

먼저 폭발물 기폭시스템은 탄두를 원거리에서 안전하게 기

폭하기 위해 fig 4와 같이 구성하였다. 탄두 기폭지점과 기폭 인가 지점의 거리를 80M(TNT 9kg 기준 폭풍압 위협 양거리 : 42M(주거시설기준))로 이격하였고, EBW 기폭관을 사용하여 시스템 전류, 물리적 외력, 전정기, 전파 등에 대해 기폭 안전성을 확보하였다. 특히 EBW(Exploding Bridge Wire Detonator) 기폭관은 전기식 기폭관 보다 비인가 전류에 매우 안정적인 장점을 가지고 있어 비이상적인 상태에서 기폭요원의 안전성을 확보할 수 있다.

기폭 프로세스는 Energy Input 입력신호를 Delay generator로 보내어 동시에 고전압 발파기(high energy pulser)와 DAQ, VIDEO, Camera 장비로 보내어 작동시키고 고전압 발파기에서 EBW 기폭관으로 5kV의 전압을 인가하여 기폭 방식을 채택하였다. 이때 기폭의 신뢰성을 높이기 위해 EBW의 기폭에너지(1.8kV)보다 약 3배 높은 에너지를 인가하여 누설전류로 인한 전압차가 발생하더라도 확실히 기폭할 수 있도록 하였다. 또한 정확한 폭발현상을 해석하기 위하여 delay generator에서 동일 신호를 주어 기폭과 폭발동영상, DAQ에서 획득되어지는 폭발의 물리적 계측값을 서로 연동할 수 있도록 기폭시스템을 구성하였다.

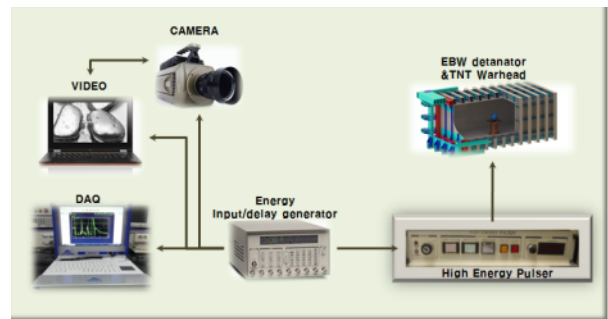


Fig. 4 기폭시스템 구성도

### 2.2.2 격벽의 설치

실험을 위해서는 폭발을 위한 폭발체임버와 실험을 위한 격벽이 있어야 한다. 본 실험에서는 다양한 실험 조건을 수행하기 위하여 실험격벽을 교체할 수 있도록 구성하였다. Fig 5는 체임버를 구성을 나타낸 그림이다. 실험을 격벽을 카트리지형태로 제작하여 매 실험에 다른 격벽을 실험할 수 있도록 구성하였다. Fig 6은 실험격벽이 설치된 격벽을 현장에서 설치하는 방법이다. (a)와 같이 체임버를 평평한 곳에 설치하고, (b)와 같이 실험격벽이 설치된 카트리지를 삽입한다. 이 후 (c)와 같이 상단 탈착 브래킷을 덮어 상단부를 고정하고 (d)와 같이 나머지 부분은 웨지를 이용하여 체임버와 카트리지를 밀착시킨다.

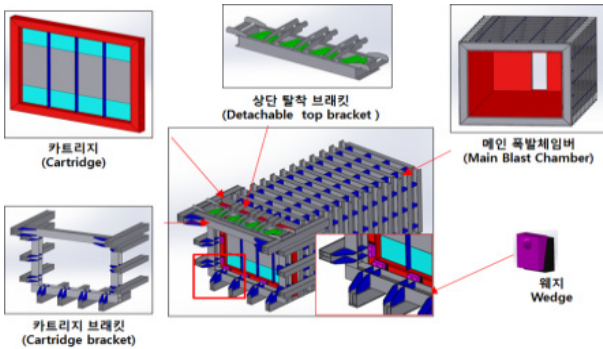


Fig. 5 폭발실험 체임버와 격벽의 구성

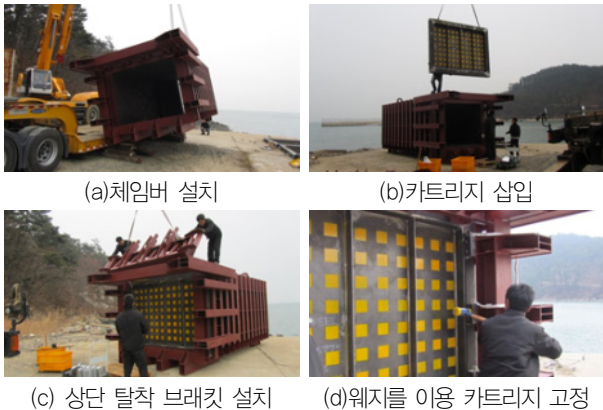


Fig. 6 격벽설치

### 2.2.3 계측

마지막으로 격벽의 구조적 거동과 내부폭발에 대한 현상을 연구하기 위하여 가속도와 압력 그리고 고속카메라를 사용하였다. 격벽의 바깥부분에 가속도 센서를 붙이기 위한 아답터를 제작하고 설치하였다. 또한 내부폭발에 의하여 격벽에 가해지는 압력을 계측하기 위하여 격벽에 압력 센서를 부착하기 위한 홀을 뚫고 압력센서를 삽입하여 시간에 따른 압력을 계측하였다. 마지막으로 총 3대의 초고속 카메라를 사용하여 격벽의 체임버의 정면, 측면, 대각에서 촬영하여 내부폭발 시 외부적으로 발생하는 현상을 기록하였다.

계측된 값들은 국내 폭발시뮬레이션 기술발전을 위한 자료로 사용될 것이며, 내부폭발현상연구, 그리고 폭발강화격벽의 성능 검증의 데이터로 사용될 것이다.

## 2.3 실험조건

부분모형실험은 폭발강화격벽의 성능을 검증하기 위한 실

험이다. 크게 3가지의 변수에 대한 실험을 수행하였다.

- (1) 격벽의 타입에 따른 구조성능검토
- (2) 격벽과 폭발물간의 거리에 따른 성능검토
- (3) 격벽 보강재의 방향에 따른 폭발저항성능 검토

일반 수밀격벽과 국내함정에 기 적용된 Curtain Type 폭발강화격벽 그리고 발포알루미늄 수밀격벽에 부착한 강화격벽의 3가지 타입에 대하여 실험을 수행하였다. 격벽과 폭발물간의 거리는 전체 4.8(L)\*2.4(W)\*1.8(H)의 폭발체임버 기준으로 중앙발파인 2.4, 1.2, 0.6에 대하여 실험을 수행하였다. 마지막 격벽에 붙은 보강재의 방향에 따른 폭발저항성능 검토는 보강재가 폭발이 일어나는 방향에 있을 때와 폭발이 일어나는 방향 반대에 있을 때를 가정하여 실험을 수행하였다. 총 17회의 실험을 수행하였으며, 앞서 언급한 실험 조건을 토대로 하여 실험을 수행하였다. 최종 실험에서는 실험 기준으로 삼은 폭약의 두 배를 사용하여 격벽의 극한 상황을 가정하여 실험을 하였다. 자세한 내용은 추후 연구결과를 정리하여 논문으로 게재하도록 하겠다.

## 3. 실험 결과 분석

### 3.1 격벽 타입에 따른 구조성능검토

실제 함정에서 사용되는 같은 재질의 강과 같은 두께를 가지고 실험을 수행하였다. 총 3가지 형태의 격벽을 실험하였다. 수밀격벽과, Curtain Type 폭발강화격벽, 알루미늄폼을 부착한 폭발강화격벽이다. Curtain Type 폭발강화격벽은 Fig 7과 같이 격벽의 데크가 만나는 부분의 두께를 두껍게 함으로서 격벽의 코너 부위를 보강하는 형태이다. 알루미늄폼을 부착한 폭발강화격벽은 알루미늄폼을 격벽의 폭발방향에 부착하여 알루미늄폼의 변형을 통하여 폭발압력을 흡수하는 형태이다. 격벽의 타입에 대한 성능의 검토는 현재 연구 중이며, 격벽의 형태 따른 성능의 평가도 본 연구를 통하여 제시될 예정이다.

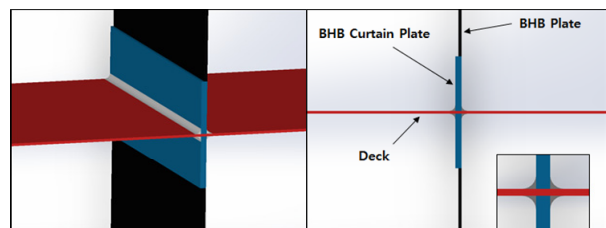


Fig. 7 Curtain Type 폭발강화격벽 concept

### 3.2 격벽과 폭발물간의 거리에 따른 성능 검토

폭발물과의 거리에 따른 실험은 fig 8과 같이 격벽과 폭발물간의 거리만을 조절함으로써 폭약의 위치가 격벽에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험이다. fig 9는 격벽과 폭약간의 거리에 따른 압력의 크기 변화를 나타낸 그래프이다. 폭발체임버의 길이방향의 총 거리를 L 이라 하였을 때, 검정색은 L/2, 빨강색 L/4, 파랑색 L/8 거리에 폭약을 두고 실험했을 때의 압력 그래프이다. 폭약이 근접거리에서 폭발 했을 때 초기 높은 Shock pressure가 발생한다. 그러나 격벽의 최대 처짐은 거리가 가까워짐에 비례하여 커지지 않으며, 특정 거리에서 가장 큰 처짐이 발생하는 것으로 확인 하였다.

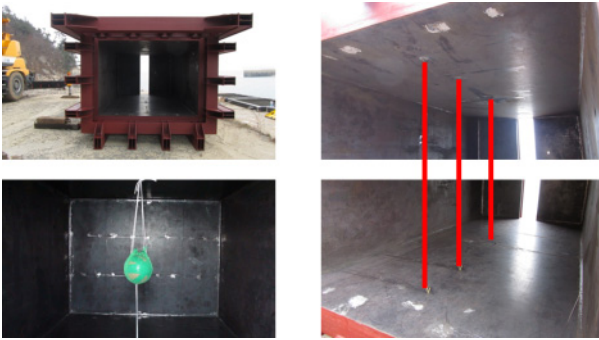


Fig. 8 폭약과 격벽간의 거리 변경

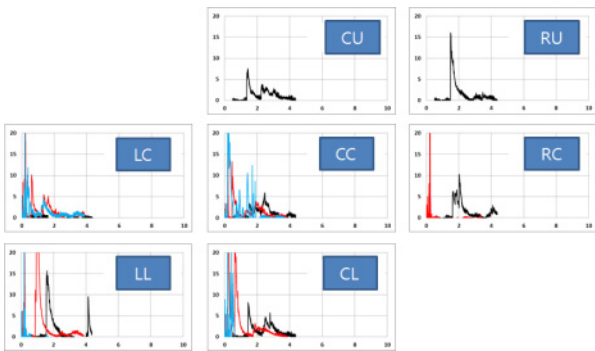


Fig. 9 폭약과 격벽간 거리에 따른 센서 위치별 압력

### 3.3 격벽 보강재의 방향에 따른 폭발저항성능 검토

실제 함정에서 격벽의 보강재를 선택할 시 내부폭발에 대한 고려가 크게 적용되어 있지 않다. 따라서 보강재의 위치가 폭발이 일어나는 방향에 위치하는지 반대 방향에 위치하는지에 따라서 격벽이 폭발저항이 달라 질 수 있다.

본 실험에서는 실험적으로 폭발방향의 반대편에 보강재를

배치하였을 때 격벽의 변형 형태는 비슷하나 폭발에 저항하는 성능이 더 좋아짐을 알 수 있었다. 보강재가 반대 방향에 붙음으로서 격벽의 처짐이 크게 줄었다. 반면, 보강재가 폭발방향 즉, 체임버 내부를 향하고 있을 때는 Fig 11과 같이 보강재에 좌굴이 발생하고 상대적으로 적은 폭발저항 성능을 보였다.



Fig. 10 보강재의 방향 반대 (외부)

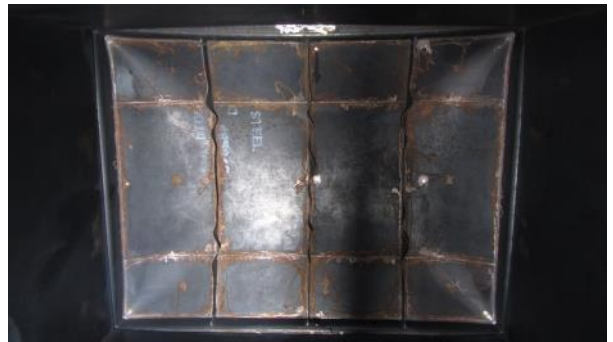


Fig. 11 보강재 방향 반대 (내부)

## 4. 결 론

본 실험연구는 국내 최초로 진행된 실험으로서 지연신관을 가진 탄두가 함정의 내부로 침투하여 폭발하는 시나리오를 바탕으로 설계되었다. 실제상황과 같은 상황을 모사하여 실험을 하기에는 시/공간적 제약과 금액의 제한에 따른 어려움이 있어, 격벽의 일부분을 모사하는 부분모형실험을 계획하고 수행하였다. 또한, 다양한 격벽에 대한 실험이 가능하도록 폭발체임버를 제작하고, 카트리지 타입의 실험을 설계하여 여러 형태의 반복실험이 가능하도록 하였다.

수밀격벽, Curtain Type 폭발강화격벽, 발포알루미늄을 부착한 강화격벽과 같은 여러 타입의 격벽의 폭발저항성능을 평가하였다. 또한, 격벽과 폭발물간의 거리에 따른 격벽의 구조성능을 평가함으로써 다양한 형태의 내부폭발현상에 대한 연



구를 수행하였다. 해석기술의 검증자료로 사용함으로써 폭발 해석 기술의 고도화를 이뤘다.

본 실험은 국내최초로 진행된 실제 폭발물을 이용한 내부 폭발 시 구조물 거동 평가를 위한 실험이다. 향후 본 연구를 통하여 개발된 실험기술과 데이터는 국내 폭발관련 연구에 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

## 후 기

본 논문은 국방과학연구소 산학연 주관 응용연구의 일환으로 수행 중인 "폭발강화격벽 설계 및 검증기술 연구" 과제 연구 결과의 일부입니다. 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 감사의 말씀을 드립니다.

## 참 고 문 헌

Galle, L.F., & Erkel, van A. G., 2002. TNO-PML Developments of Blast Resistant Doors and Walls, The 1st European Survivability Workshop, Cologne, Germany  
 Lee, S.G. & Zhao, T., 2013, Shoick Response Analysis of Blast Hardened Bulkhead in Naval Vessel under Internal Blast, Proceeding of the Society of Naval Architects of Korea, Jeju, Republic of Korea  
 Raymond, I. K., 2001. Tools for the formation of optimized

X-80 Steel Blast Tolerant transverse bulkheads, Master of Engineering Thesis in the University of New South Wales

Stark, S., Sajdak, J., 2012. Design and Effectiveness Criteria for Blast Hardened Bulkhead Applications on Naval Combatants, the 4th International Conference on Design and Analysis of Protective Structures, Jeju, Republic of Korea



최 걸 기

- 1983년생
- 2009년 충북대학교 구조시스템공학과 석사
- 현 재 : 한국과학기술원 선임연구원
- 관심분야 : 폭발에 의한 구조물 손상
- 연 락 처 : \*\*\*-\*\*\*-\*\*\*\*
- E - mail : gulgi@kaist.ac.kr



김 민 준

- 1971년생
- 1999년 충남대학교 화학공학과 석사졸업
- 현 재 : (주)한화/화학 종합연구소 수석연구원
- 관심분야 : 고품약 폭발시험 및 거동 예측
- 연 락 처 : \*\*\*-\*\*\*-\*\*\*\*
- E - mail : mjunkim@hanwha.com

# 2014년도 추계공동학술대회

일 자: 2014년 11월 6일(목)~7일(금)

장 소: 창원 컨벤션센터