

축소 및 부분모형 체임버의 내부폭발 내충격 응답해석

이상갑 (한국해양대학교)

1. 서론

Fig. 10에서와 같이 대함 미사일(Semi Armor Piercing, SAP Warhead) 등의 피격에 의한 함정격실 내부폭발(internal explosion) 시 함정의 생존성 향상을 위하여 손상구역을 제한하여야 하며 함내 인접격실로의 피해확산 방지 및 연속적인 침수 억제를 위한 폭발강화격벽(BHB: Blast Hardened Bulkhead)이 국외에서 개발되어 적용되어 왔으며(Galle & Erkel, 2002; Stark & Sajdak, 2012) 국내에서도 이와 같은 국외기술을 채용하여 부분적으로 적용해 왔다.



Fig. 1 Internal explosion damage of USS Stark (FFG-31) by Exocet missiles during Iran-Iraq War

국외에서는 폭발강화격벽의 적용을 위하여 다양한 규모의 실험을 실시하여 설계 및 해석기술을 검증하였다(Raymond, 2001). 국외에서의 실험 결과는 자국의 보안기술로 보호되기에 국내 기술 보유를 위해서는 국내 자체적 실험 실시가 필수적이며, 이를 기반으로 효과적인 해석, 설계 및 검증 기술이 국내에서 개발되어야 한다.

이와 같은 폭발강화격벽을 국내 함정에 자체 기술로 적용하기 위한 설계 및 성능검증 기술 개발의 일환으로 폭발강화격벽의 실제 규모의 부분모형 체임버의 내부폭발 실험을 구현하기 위한 기초 연구로서 축소모형 체임버의 내부폭발 실험과 내충격 응답해석을 수행하였고(Lee et al., 2013b), 이를 바탕으로 실제 규모의 부분모형 체임버의 내부폭발 실험을 수행하고 내충격 응답해석을 수행하여 비교 검토하였다(Lee et al., 2014).

본 연구에서는 내부폭발에 의한 폭발강화격벽의 거동평가 기술을 개발하는 것으로 LS-DYNA code(LSTC, 2012)의

MMALE (Multi-Material Arbitrary Lagrangian Eulerian) 및 유체-구조 연성(FSI, Fluid-Structure Interaction) 해석기법을 이용한 폭발강화격벽 및 연결부 거동의 내부폭발 내충격 응답 해석 기술을 개발하고자 하였다. 내부폭발에 의한 거동평가 기술은 폭발강화격벽 설계에 따른 다양한 거동을 실험을 대신하여 수치 해석적으로 예측함으로써 폭발강화격벽 설계에 필요한 비용과 시간을 크게 줄이고 설계 유형과 규격에 따른 거동을 정확하게 예측하기 위해 필요하다.

2. 축소 및 부분모형 체임버 내부폭발 실험

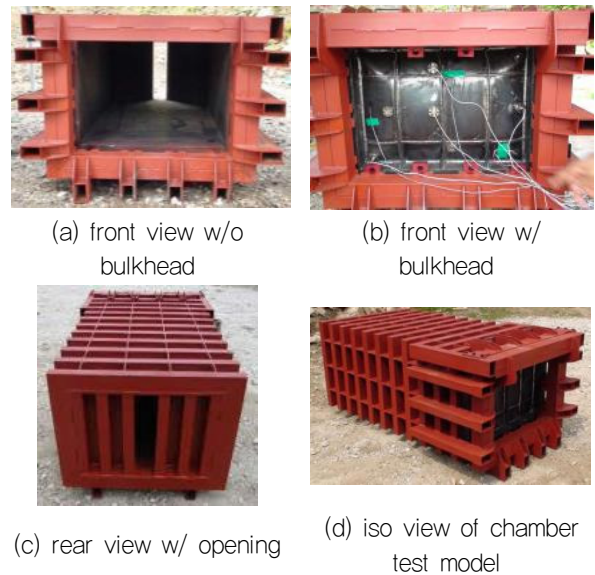


Fig. 2 Scaled chamber model for internal blast

축소 및 부분모형 체임버의 내부폭발 실험모델은 각각 Figs. 2~3에서와 같이 크게 체임버, 격벽구조 및 구속부 골조(clamp frame)로 구성되어 있다. 격벽구조는 탈착식으로 매 실험 시 교체하고, 체임버와 격벽 카트리지(cartridge)사이에서 폭발충격 압력의 유출을 방지하기 위하여 격벽 카트리지와 구속부 골조 사이에 다수의 웨지(wedge)로 격벽을 압착시켰다. 내부폭발 실험 체임버 설계 시 내충격 응답해석을 통하여

격벽 카트리지, 구속부 골조 및 웨지의 형상, 크기 및 부착에 따른 폭발충격 입력의 유출에 대하여 검토하였다 (Lee, et al., 2013a). 내부폭발 실험에 따른 격벽의 압력, 가속도 및 변형률의 응답을 측정하기 위하여 Figs. 2(b) 및 3(b)에서와 같이 측정 게이지 등을 부착하여 측정하였다. 축소모형 격벽 카트리지 골조는 SQ pipe 2개를 부분 용접하여 제작하였고 부분모형일 경우 1개를 사용하였다.

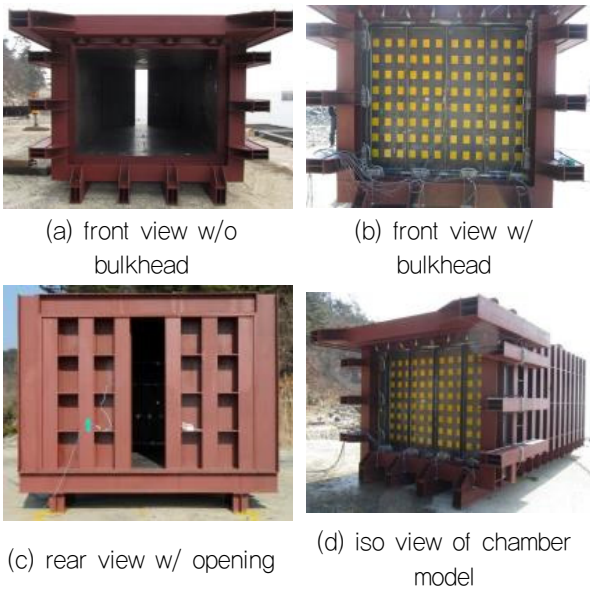


Fig. 3 Part chamber model for internal blast test

축소모형은 부분모형에 대하여 1/4 축소 모형실험을 수행하였다. 폭발실험 탄두는 부분모형 실험에서는 9kg의 고탄두 폭약(high explosives; HE) TNT를, 축소모형 실험에서는 상사비율 1/4에 따라 140.6g으로 정하였다. 실험 세팅을 점검하고 시뮬레이션과의 추가적인 비교를 위해 탄성영역의 변형을 일으키는 폭약의 크기인 약탄두 폭약(low explosives; LE) TNT로 부분 및 축소모형인 경우 각각 0.67kg 및 10.4g을 사용하였다.

체임버, 구속부 골조 및 격벽 카트리지는 연강(SS41)을 사용하였고, 축소모형의 격벽 및 보강재도 연강을, 부분모형의 경우는 고장력강(AH36)을 사용하였다. 부분모형의 격벽과 보강재의 끝단은 카트리지에 직접 용접하였으나, 축소모형일 경우에는 Fig. 4에서와 같이 격벽과 보강재 끝단은 삽입철판(insert plate)에 용접을 하였고, 둘러싸고 있는 카트리지 내측에 끼워넣어 접촉시키고 삽입철판 중앙에 일정한 간격으로 스폿용접(spot welding)하여 카트리지 내측에 부착시켰다.



Fig. 4 Spot welding in insert plate with cartridge

실제 함정 격실의 격벽 높이에 비하여 폭이 상당히 큰 경우가 많기 때문에 부분모형 실험에 적합한 경계조건을 판단하고자 Fig. 5에서와 같이 격벽과 삽입철판과의 용접면 개수에 따른 축소모형 실험 시나리오를 설정하였다. 축소모형 실험은 Table 1에서와 같이 격벽의 커튼 또는 단일평판 수밀격벽(curtain or plain plate bulkhead) 형상, 격벽과 삽입철판과의 용접면 개수, 기본 및 보조 보강재 개수 및 삽입철판 내다지 부분과 카트리지와의 용접형태 등을 요약하여 보여주고 있다. 5가지 격벽 모델에 대한 내부폭발 실험에 따른 손상형상은 Fig. 6에 보여주고 있다.

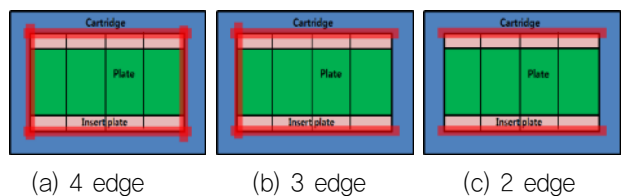


Fig. 5 Schematic diagram of bulkhead according to welding edge along bulkhead and inserted plate

Table 1 Information of 5 bulkhead models of reduced model

model	plate type	No. of welding edge	No. of BH stiffeners	welding type bt. insert plate & cartridge
1	curtain	4	3	partial
2	plain	4	3	partial
3	plain	3	3+1	partial
4	plain	4	3+2	continuous
5	plain	2	4	continuous

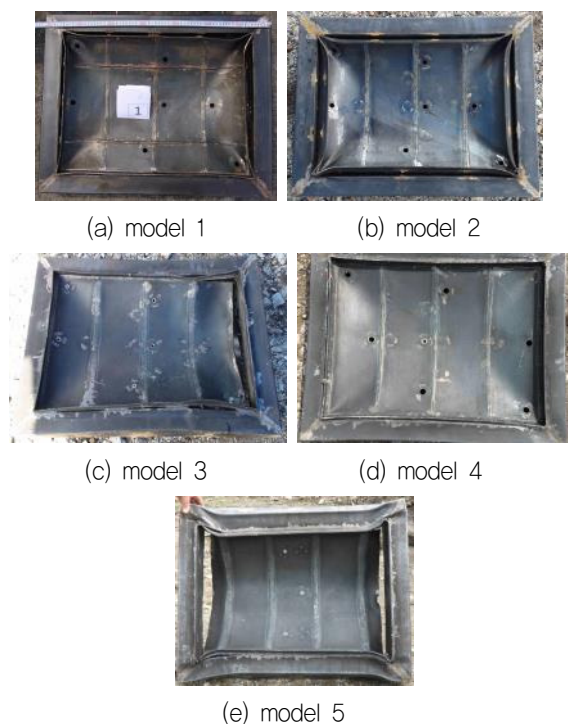


Fig. 6 Damage configurations of reduced bulkhead models under internal blast test

대체로 얇은 철판을 사용한 축소모형 실험 격벽구조의 손상 형상은 용접의 영향을 크게 받고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 특성을 내충격 응답해석을 위한 모델링에 적합하게 반영하여 구현시켰다. 격벽과 삽입철판은 폭발충격 압력에 의하여 격벽면이 바깥으로 휘어지면서 삽입철판의 폭발방향 중간에 스폿용접된 부분을 경계로 하여 삽입철판의 바깥쪽은 바깥으로 벌어지나 카트리지 내측과 접촉되어 있어 카트리지와 일체가 되고 카트리지 내측 부분은 안쪽으로 오므라들므로 삽입철판 내측면부와 카트리지와 부분 및 연속 용접상태에 따라 내측면부가 카트리지와 용접부위에서 떨어지거나 일체로 남아있었다.

축소모형 격벽의 삽입철판의 폭 중앙부와 내측면부의 삽입철판과의 용접은 CONSTRAINT_SPOTWELD option을 사용하였고, 격벽과 보강재가 삽입철판과의 용접부위는 일반적으로 용접부위에 대하여 알려진 바와는 달리 용접선을 따라 파단이 발생하였다. 매우 얇은 연강의 철판의 용접으로 인하여 일반 부위와는 달리 열의 영향으로 취성(brittle)이 증가한 것으로 사료되어 LS-DYNA의 용접 option을 사용하기 보다는 파단변형률(failure strain)을 일반 부위보다는 작게 사용하였다.

부분모형 실험에서도 격벽은 Table 2에서와 같이 커튼과 단일평판을 고려하였고, 수밀격벽의 소성변형의 특성과 파단

을 고찰하고자 체임버 길이의 중앙점(0.500L), 1/4인 점(0.250L) 및 1/8인 점(0.125L)에 고탄두 폭약(high explosives; HE)을 폭발시킨 경우와 커튼평판 격벽도 중앙점(0.5L)에서 고탄두 폭약을 폭발시킨 경우와 격벽의 보강재 방향을 체임버 방향(reverse)으로 폭발시킨 경우를 고려하였다. 수밀격벽에 체임버 중앙에 약탄두 폭약(low explosives; LE)을 폭발시킨 경우도 고려하여 고탄두와의 응답을 비교하였다. Fig. 7(a)는 0.500L에서의 수밀격벽의 고탄두 폭약에 의한 내부폭발 실험 결과를, Fig. 7(b)는 커튼평판 격벽의 reverse한 경우의 실험 결과를 보여주고 있다.

model	plate type	location of explosives	type of explosives	direction of bulkhead	No. of test
1	plain	1/2	HE	normal	3 & 6
2	plain	1/4	HE	normal	4
3	plain	1/8	HE	normal	2
4	plain	1/2	LE	normal	1 & 5
5	curtain	1/2	HE	normal	9
6	curtain	1/2	HE	reverse	10

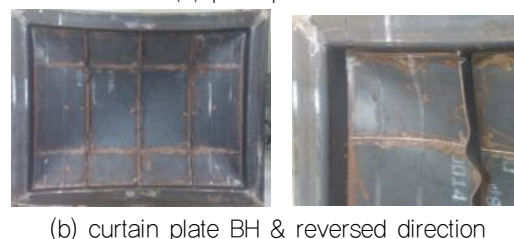
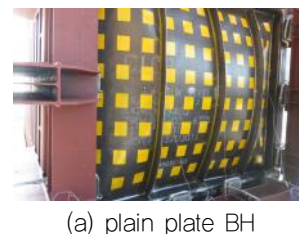


Fig. 7 Damage configurations of part bulkhead models under internal blast test

Fig. 7(b)에서와 같이 커튼격벽 모델의 reverse한 방향에서 체임버 중앙에서 고탄두 폭약이 폭발한 경우에 보강재 끝단에 파단이 발생한 것 이외에는 어떠한 부분모형 모델의 경우에도 파단이 발생하지 않았다. 보강재 끝단에 발생한 파단은 용접선을 따라 발생한 것이 아니고 용접 비드(bead)을 벗어난 위

치에서 발생하였다. 축소모형의 경우와는 달리 용접선에는 용접 비드에 준하는 두께를 고려하였다.

3. 축소모형 체임버 내충격 응답 모델링

Fig. 8에서와 같은 축소 및 부분모형 체임버에 Tables 1 & 2의 시나리오에 따라 Fig. 9에서의 고탄두와 약탄두 폭발을 폭발시키는 내충격 응답해석을 수행하였다. 구조는 shell 요소를, 공기와 폭발의 MMALE는 solid 요소를 사용하였고, 전반적으로 축소 및 부분모형의 경우 shell 및 ALE 격자 요소 수는 각각 약 400,000개 및 2,500,000개이다. 실제 제작과정과 같이 접촉된 부분은 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE option을 사용하여 접촉(contact)시켰고, 용접 부분은 CONSTRAINED_NODE_SET option을 사용하여 일체화시켰다. 웨지는 pre-stress시켜 격벽구조를 체임버에 밀착시켰다. 공기와 폭발의 MMALE는 체임버 구조와 LS-DYNA code의 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID option을 사용하여 유체-구조 연성 해석기법을 적용하였다.

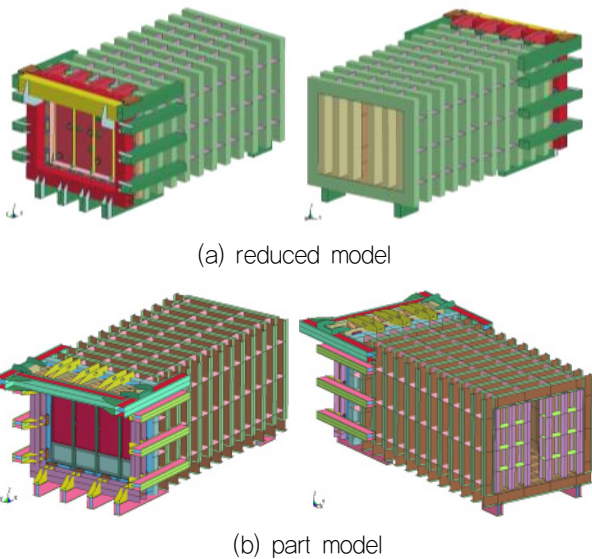


Fig. 8 F.E. configuration of reduced and part chamber models

내부폭발 시뮬레이션에 따른 격벽의 압력 및 가속도 응답의 측정 위치는 Fig. 10과 같고 이들 게이지들의 형상은 Fig. 11과 같다. 연강(SS41)과 고장력강(AH36) 강재의 물성치는 Table 3과 같이 Cowper-Symond 변형률 의존 재료 물성치

(strain rate material properties)를 사용하였고 응력-변형률 곡선은 Fig. 14와 같다. 강재의 파손기준은 Shear Fracture Model을 사용하였고, 파단변형률(failure strain)은 유한요소 크기(요소길이/두께)에 의해 영향을 고려하여 결정하였다.

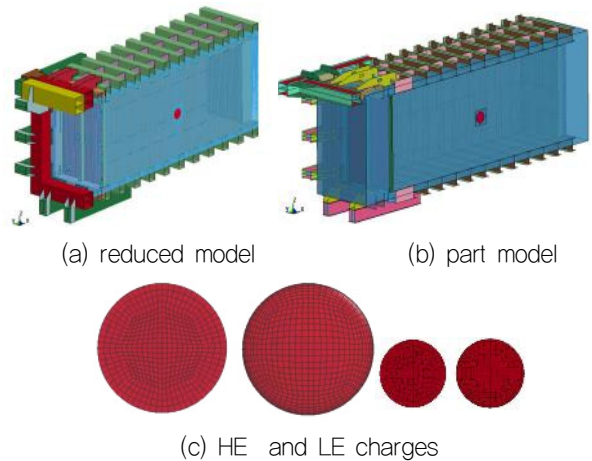


Fig. 9 F.E. configuration of charge in reduced and part chamber models

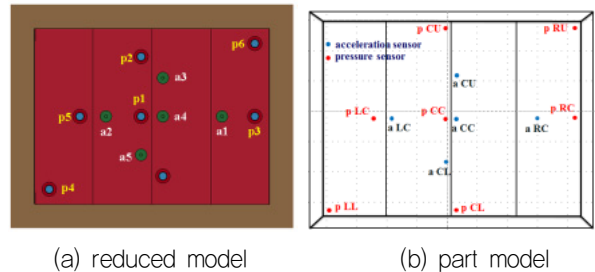


Fig. 10 Pressure & acceleration response measuring points

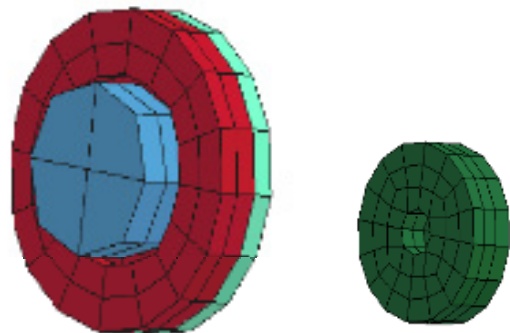


Fig. 11 F.E. configuration of pressure and acceleration sensors(adaptor & mount) on bulkhead

Table 3 Properties of mild and high tensile steels

Property	mild steel	high tensile steel
Young's modulus	206,0 GPa	206 GPa
Density	7.85×103 kg/m3	7.85×103 kg/m3
Yield stress	235,0 MPa	315,0 MPa
Ultimate stress	445,0 MPa	525,0 MPa
Failure strain	0,15~0,35	0,15~0,35
Dynamic yield stress constants	D=40,4 s ⁻¹ , q=5	D=50,194,4 s ⁻¹ , q=5

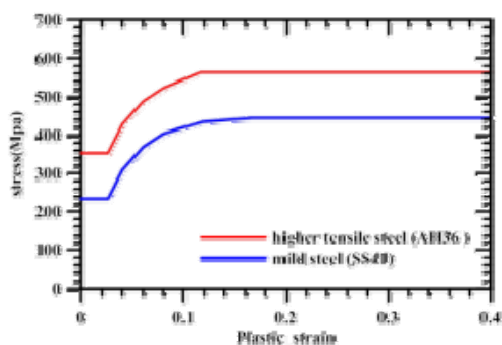


Fig. 12 Stress-strain curves of mild & high tensile steel

4. 축소 및 부분모형 체임버 내충격 응답

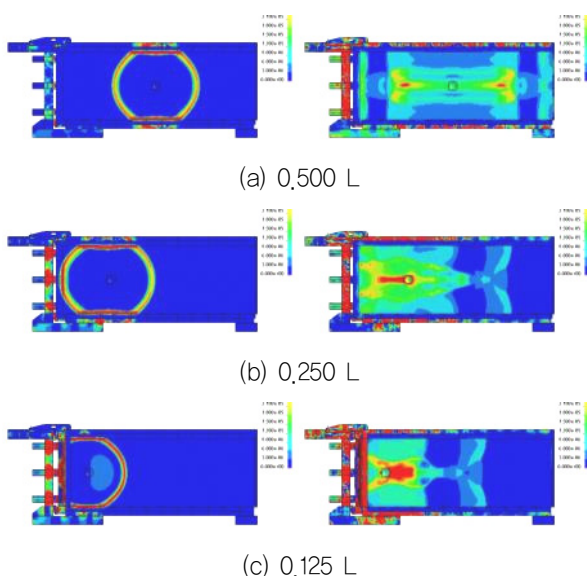


Fig. 13 Propagation of shock pressure in chamber model according to HE charge position

Fig. 13은 고탄두 폭약의 위치에 따른 수직단면에서의 충격파의 전파과정을 보여주고 있다. 폭약의 위치에 따라 초기 충격파와 체임버의 내부벽면의 반사에 따라 격벽에 충격파가 전달되는 과정의 차이를 잘 파악할 수 있다. Fig. 14는 고탄두 폭약이 폭발하였을 경우 격벽을 포함한 체임버에 발생하는 소성변형률의 분포를 보여주고 있다. 체임버와 구속부 골조에 비하여 격벽구조에 소성변형률 응답이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

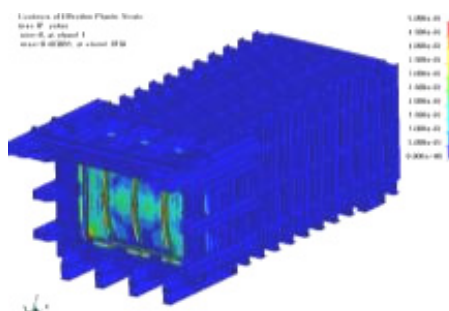


Fig. 14 Plastic strain response configurations of chamber and bulkhead structures according to HE charge

Fig. 15에 고탄두 폭약의 내부폭발에 대한 각 축소모형 격벽구조 모델의 내부폭발 충격파에 의한 내충격 손상응답을 보여주고 있다. 기본적인 모델의 용접면 이외에 대체로 얇은 철판이어서 용접상태에 따라 파손 형상은 달라졌고, 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. model 4의 고탄두 폭약의 압력 및 가속도 응답을 실험 결과와 비교 검토하여 Figs. 16~17에 나타내었으며, 역시 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

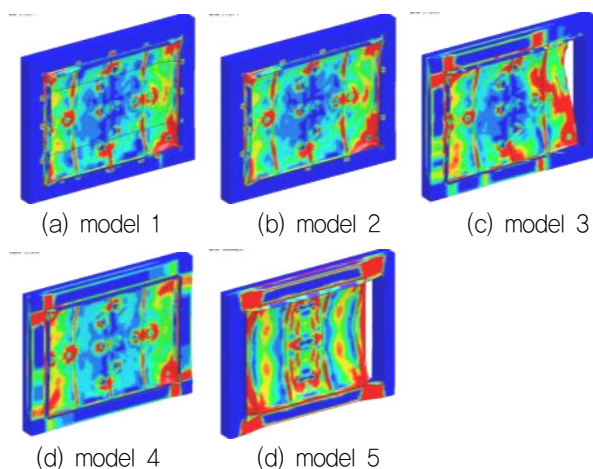


Fig. 15 Damage responses of 5 bulkhead models under internal blast with HE charge

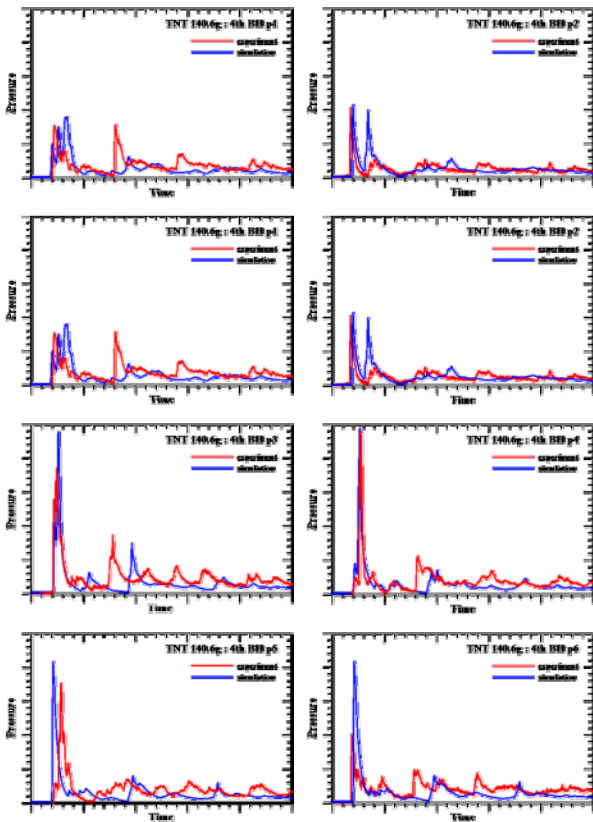


Fig. 16 Pressure responses between experiment and simulation at reduced model 4 bulkhead with HE charge

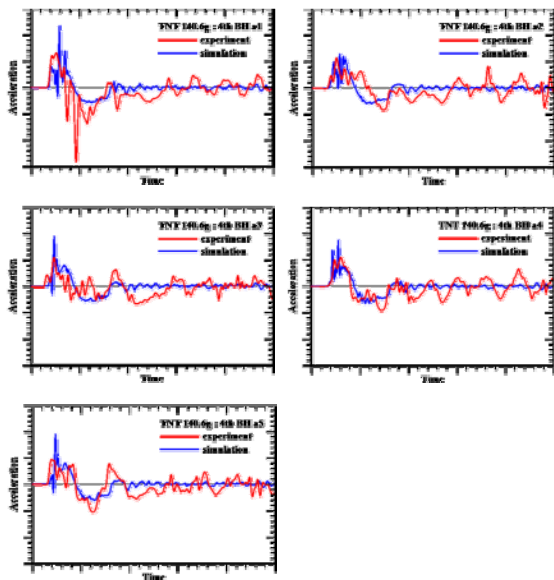


Fig. 17 Acceleration responses between experiment and simulation at reduced model 4 bulkhead with HE charge

Fig. 18은 고탄두 폭약을 사용한 경우에 폭약의 위치에 따른 부분모형 커튼 및 수밀격벽에 발생하는 소성변형률의 전반적인 분포를 보여주고 있다. 폭약이 격벽에 가까이 폭발할 경우 초기 충격파에 의해 격벽의 중앙부에도 큰 소성변형률이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 보강재의 카트리지와 의 용접부에도 좌굴이 발생하는 등 가장 큰 소성변형률이 발생함을 Fig. 19(a)에, 커튼격벽의 방향을 반대로 폭발시킨 경우 보강재 끝단에 파단이 발생하는 것을 Fig. 19(b)에서 확인할 수 있다.

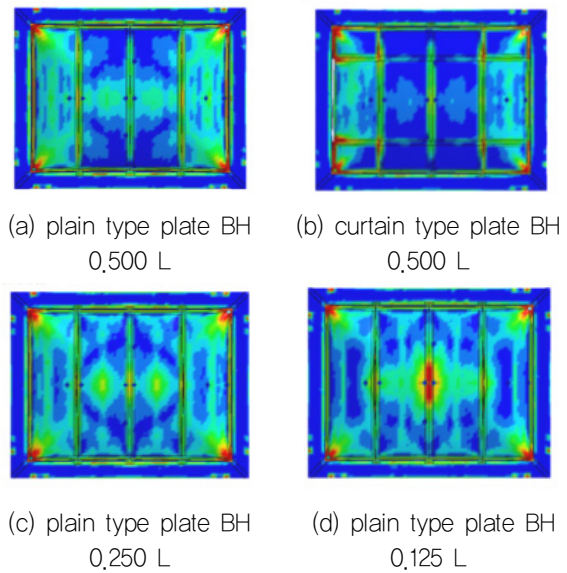


Fig. 18 Plastic strain response configurations of bulkhead structures of part model according to HE charge location

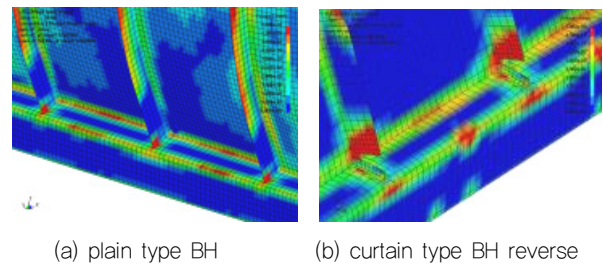


Fig. 19 Plastic strain response configurations of bulkhead structures according to HE charge location 0.500L

Table 2에서의 부분모형 내부폭발 실험 및 내충격 응답 중에서 수밀격벽의 고탄두 폭약이 체임버 길이의 중앙에 폭발하는 경우의 격벽에 발생하는 압력 및 가속도 응답을 실험의 결

과와 비교하여 Figs. 20~21에 나타내었다. 실험결과와 전반적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구는 LS-DYNA code의 MMALE 및 FSI 해석기법을 이용하여 함정의 폭발강화격벽 및 연결부 거동평가 기술 개발을 위하여 5가지 격벽 모델에 대한 축소모형 체임버와 수밀 및 커튼격벽 모델에 대한 부분모형 체임버의 고탄두와 약탄두의 폭발위치에 따른 내부폭발 실험에 대하여 내부폭발 내충격 응답해석을 수행하여 거동 해석기법을 검증하고 격벽 모델의 내충격 응답특성도 파악하였다.

축소모형 체임버인 경우 기본적인 격벽 모델의 용접면 개수 등의 형상 이외에 얇은 철판의 격벽구조로 제작되어 있어 용접 상태에 따라 충격폭발 압력에 의해 찢어지고 용접 부위가 떨어지는 등 파손 형상이 좌우되었다. 부분모형 체임버인 경우 폭약이 격벽에 더 가깝게 폭발하여도 예상과는 달리 변형 영역과 크기도 크지 않았다. 폭약의 위치가 격벽에 가까워짐에 따라 전반적으로 격벽의 압력과 가속도의 응답이 크게 증가하였고, 수밀이나 커튼격벽의 경우에는 초기 충격파 압력이나 가속도 응답에는 큰 차이가 발생하지 않았다. 폭발시험과 내충격 응답 해석에 따른 압력과 가속도의 응답도 대체로 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

후기

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.

참고 문헌

- Galle, L.F. and Erkel, van A.G. (2002). "TNO-PML Developments of Blast Resistant Doors and Walls," The 1st European Survivability Workshop, Cologne, Germany.
- Lee, S.G. and Zhao, T. (2013a). "Shock Response Analysis of Blast Hardened Bulkhead in Naval Vessel under Internal Blast", Proceedings of Joint Symposium of KOST 2013 Spring, pp. 676-685.
- Lee, S.G., Zhao, T., Kim, M.J., Kim, Y.Y., Shin, Y.S. and Choi, G.G. (2013b). "Shock Response Analysis of Reduced Chamber Model under Internal Blast",

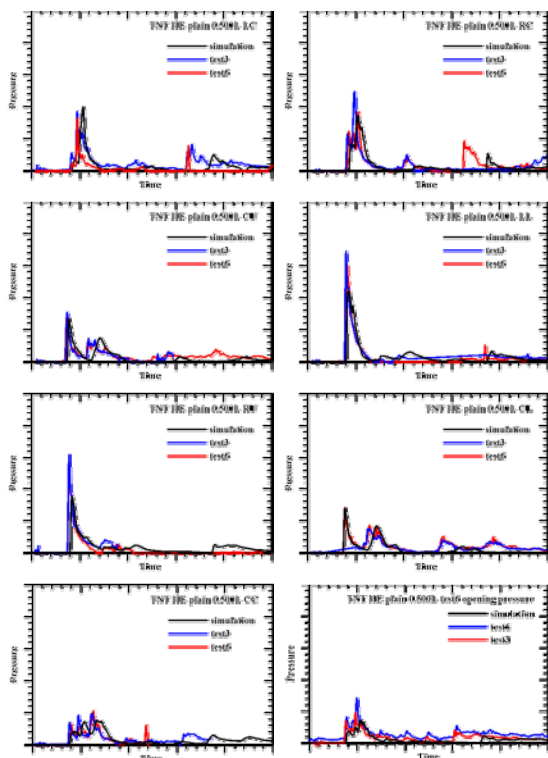


Fig. 20 Pressure responses of part model bulkhead with HE charge at 0.500L between simulation & tests 3/6

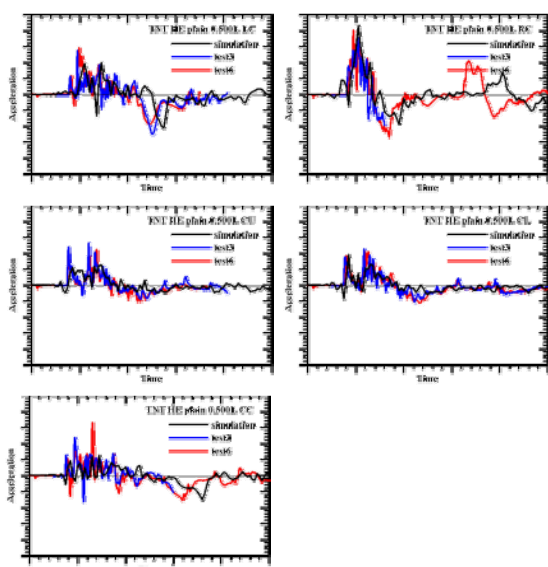


Fig. 21 Acceleration responses of part model bulkhead with HE charge at 0.500L between simulation & tests 3/6

Proceedings of the Annual Autumn Conference, SNAK, pp. 102–108.

Lee, S.G., Lee, H.S., Shin, Y.S. and Choi, G.G. (2014), "Shock Response Analysis of Part Chamber Model under Internal Blast", Proceedings of Joint Symposium of KOAST 2014 Spring, pp. 455–466.

LSTC. (2012). LS-DYNA User's Manual, Version 971 R6, Livermore Soft Technology Corp., USA.

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. and 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.



이상갑

- 1955년생
- 1990년 Illinois대학교 토목공학 박사
- 현재 : 한국해양대학교 교수
- 관심분야 : 유체-구조 연성 내충격 해석
- 연락처 : ***-***-****
- E-mail : glee@kmou.ac.kr

International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering

2015년부터 IJNAOE 발간이 연6회 될 예정입니다.
(1, 3, 5, 7, 9, 11월 발간 예정)

Impact Factor : 0.216