

# 폭발 하중을 받는 보강된 방폭벽의 동적 구조 응답 특성에 관한 연구

김상진<sup>1</sup> · 손정민<sup>1,2</sup> · 이종찬<sup>1</sup> · 리춘보<sup>1</sup> · 성동진<sup>1</sup> · 백점기<sup>1,†</sup>  
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원<sup>1</sup>  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소<sup>2</sup>

## Dynamic Structural Response Characteristics of Stiffened Blast Wall under Explosion Loads

Sang Jin Kim<sup>1</sup> · Jung Min Sohn<sup>1,2</sup> · Jong Chan Lee<sup>1</sup> · Chun Bao Li<sup>1</sup> · Dong Jin Seong<sup>1</sup> · Jeom Kee Paik<sup>1,†</sup>  
The Korea Ship and Offshore Research Institute (The Lloyd's Register Foundation Research Centre of Excellence), Pusan National University<sup>1</sup>  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering<sup>2</sup>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Piper Alpha disaster drew attention to the damage likely to arise from explosions and fires on an offshore platform. And great concerns have been increased to prevent these hazards. Blast wall is one of the passive safety systems; it plays a key part of minimizing the consequences. However, a buckling due to explosion loads is a factor which can reduce the strength of blast wall. The buckling often occurs between web and flange at the center of blast wall. This study aims to find a solution for reinforcing its strength by installing a flat plate at the spot where the buckling occurs. First of all, ANSYS finite element method is adopted to numerically compute the structural resistance characteristic of blast wall by using a quasi-static approach. Sequentially, the impact response characteristics of blast wall are investigated the effect on thickness of flat plate by using ANSYS/LS-DYNA. Finally, pressure-impulse diagrams (P-I diagram) are presented to permit easy assessment of structural response characteristics of stiffened blast wall. In this study, effective use is made to increase structural intensity, of blast wall and acquired important insights have been documented.

**Keywords** : Stiffened blast wall(보강된 방폭벽), Explosion loads(폭발 하중), Dynamic structural response characteristics(동적 구조 응답 특성), Permanent deflection(영구 처짐량), Pressure-impulse diagram(압력-충격량 곡선)

## 1. 서 론

해양구조물은 운용 시 화재, 폭발, 오일누출 등 다양한 위협에 노출되어있다. Table 1은 과거 해양구조물에서 발생한 사고 중 심각한 결과를 초래한 사고를 정리하였다. 이중에서도 가장 심각한 결과를 초래한 사고는 폭발사고로, 1988년 'Piper Alpha' 와 2010년 'Deepwater Horizon' 사고이다. 두 사고는 인명 피해와 해양생태계에 심각한 문제를 야기하였으며, 국제적으로 해양구조물 설비의 설계 시 위험도 평가의 중요성을 다시 한 번 상기시킨 사례이다.

이와 같이 해양구조물은 운항 시 화재 및 폭발사고와 같은 고 위험성이 존재하며, 이를 방지 혹은 피해를 최소화하기 위하여 위험도를 감소시키는 안전시스템 설계가 요구된다 (Paik & Thayamballi, 2007). 해양구조물에는 유정 속의 고압가스, 물, 원유 등이 분출하여 발생하는 사고를 방지하기 위해 폭발방지 장치

설비 또는 분출압력을 낮추는 장치 등 다양한 안전시스템이 설치된다. 본 연구에서는 안전시스템 중 사고 발생 후 피해를 최소화하여 위험도를 감소시키는 설비인 방폭벽을 대상으로 한다. 이는 적은 비용으로도 충분히 위험도를 낮출 수 있어 해양구조물 상부 구조물을 비롯해 산업전반에 걸쳐 비용 효과 제어 수단으로 폭넓게 사용된다.

Fig. 1은 현재 해양구조물에 설치되는 전형적인 파형 방폭벽으로, 주름형식의 판으로 구성된다. 일반적인 방폭벽을 대상으로 한 구조 응답 특성 및 안전성평가는 활발하게 연구되어 왔다. HSE (2003; 2004; 2006)는 1/4크기의 방폭벽을 대상으로 한 실험, 해석적 및 수치적 방법을 통하여 방폭벽의 구조 응답 특성을 알아보았으며, Sohn, et al. (2013)은 실제 운항중인 FPSO의 방폭벽을 대상으로 비선형 구조 해석을 수행하였다.

Paik (2011)은 부유식 원유생산저장하역설비를 대상으로 한 정량적 폭발 위험도 평가를 통하여 선정된 폭발 설계하중에 따른

Table 1 Landmark past accidents (Chritou & Konstantinidou, 2012)

Offshore Name	Date	Location	Event	Consequence
Alexander L. Kielland	1980.03.27	North Sea	Failure	123 fatalities
Ixtoc I	1979.07.03–1980.03.23	Gulf of Mexico	Blowout	Estimated 3.5 million barrels
Piper Alpha	1988.07.06	North Sea	Explosion	167 fatalities
Ekofisk B	1977.04.22–1977.04.30	North Sea	Blowout	80,000–126,000 barrels
Deepwater Horizon	2010.04.20	Gulf of Mexico	Explosion, Blowout	11 fatalities, over 4 million

방폭벽의 안전성 평가 절차를 제시 하였으며, Kim, et al. (2011) 은 1/4크기 파형 방폭벽의 최적화를 위하여 방폭벽의 주요 설계 변수에 따른 구조 응답 특성을 살펴보았다.

의 좌굴이 발생하는 위치에 보강판을 부착하여, 방폭벽의 구조강도를 조사하였으며, 보강판의 위치와 두께를 달리하여 동적 구조 응답특성을 살펴보았다.

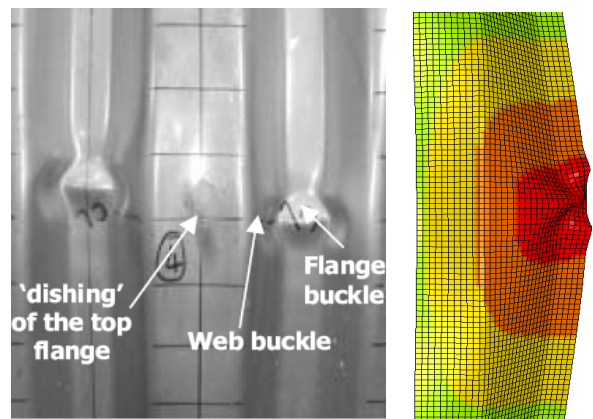


Fig. 1 Typical blast wall on offshore structures (Mech-Tool Korea Inc., 2013)

또한, Kang, et al. (2012)는 소성영역까지 고려하는 경우, 파형형태의 방폭벽이 적합함을 확인하였다. 그러나, 파형 방폭벽은 폭발하중을 받을 시, 처짐과 함께 좌굴이 발생하면서 그 강도가 현저히 떨어진다. Fig. 2는 실험 및 유한요소해석에서 나타난 폭발 하중을 받는 방폭벽의 웹(web)과 플랜지(flange)에 발생한 좌굴(buckling)을 보여주고 있다. 이러한 좌굴은 발생 전과 후의 구조 강도에 큰 차이를 야기하며, 특히, 좌굴이 발생하는 시점에서 구조물이 하중에 저항하는 정도는 현저히 떨어진다.

Fig. 3은 전형적인 파형 방폭벽에 삼각형상의 폭발하중 ( $p_{peak} = 1.18\text{bar}$ ) 가 해졌을 경우 ANSYS/LS-DYNA (2013)를 통해 계산된 시간 대비 처짐 곡선을 보여준다. 하중이 증가하는 시점( $t_o - t_m$ )까지는 하중-처짐선도는 선형성을 유지하다가, 하중이 감소하는 시점에( $t_m - t_{dur}$ )서는 좌굴이 발생하여 하중량이 작음에도 불구하고 구조 본연의 강도가 저하되어 처짐량이 급격히 증가 하는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 이 지점을 좌굴점(buckling point)이라 정의하였다. 하중이 끝난 이후( $t_{dur} - t_{term}$ )에는 비선형구조거동인 좌굴로 인해 소성변형이 발생하였음을 알 수 있다 (Kim, et al., 2011).

본 연구는 웹과 플랜지에 발생하는 좌굴을 방지, 혹은 충격 흡수를 통한 좌굴점 지연을 위한 방안을 모색하였다. 기존 방폭벽



(a) Experimental method (b) FEM

Fig. 2 Web buckling of blast wall under explosion impact pressure (HSE, 2004; Sohn, et al., 2013)

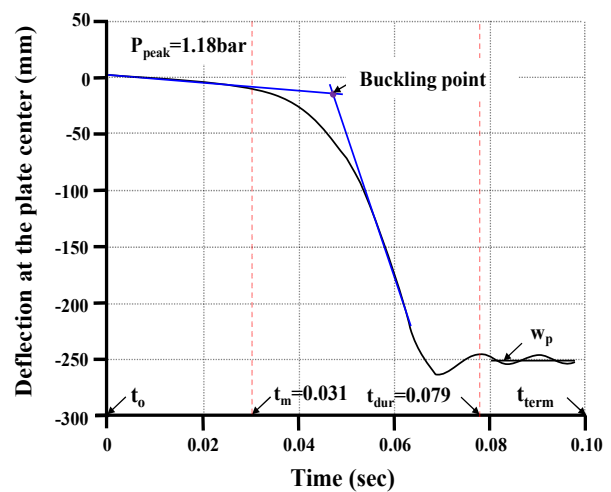


Fig. 3 Deflection-time history of 1/4-scale blast wall (Kim, et al., 2011)

## 2. 대상 구조물

### 2.1 대상 구조물

본 연구에 사용된 대상 구조물은 부유식 원유생산저장하역설비 상부 구조물에 설치되는 방폭벽으로 작업 인부의 안전을 지키기 위해 수용시설 앞에 설치된다. Fig. 4는 기존의 방폭벽과 연결부의 주요치수를 나타낸다 (HSE, 2003). 우선적으로, 보강판을 부착하는 지점을 선정하기 위해 좌굴이 발생하는 위치를 조사하였다.

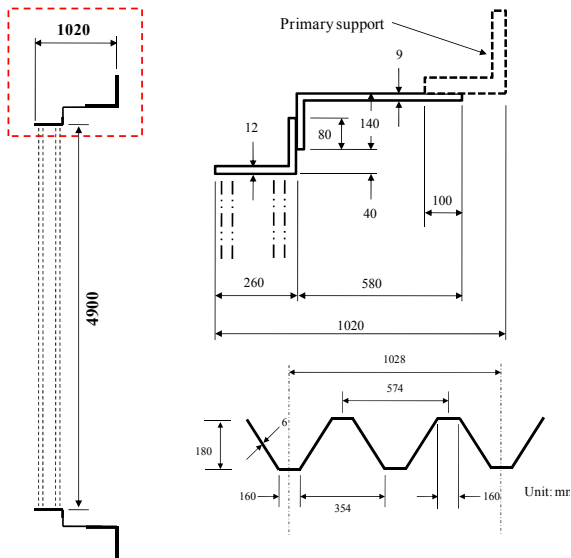


Fig. 4 Dimensions of unstiffened blast wall (HSE, 2003)

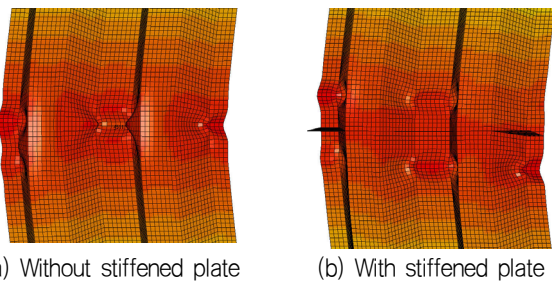


Fig. 5 Location of buckling point of with and without flat type stiffeners

Fig. 5(a)에서 보이는 바와 같이 보강판을 부착하지 않을 경우에는 구조물의 가운데에 좌굴이 발생하였으며, 중앙지점에 보강판을 설치할 경우, Fig. 5(b)와 같이 보강판 위치에서 일정한 간격을 두고 대칭적으로 좌굴이 발생하였다. 본 연구에서는 보강판의 위치에 따른 영향을 살펴보기 위해 Fig. 6과 같이 2가지의 방안을 고려하였다. 1안의 경우 기존의 방폭벽에서 좌굴이 발생하는 중앙부에 보강판을 위치하였으며, 2안은 Fig.5(b)에서 좌굴이 발생하는 지점에 보강판을 배치하였다. 보강판은 파형구조물과

함께 연속적으로 구성되며, 폭은 180mm로 제한하였으며, 보강판의 두께별 영향을 조사하기 위해 4mm와 8mm를 비교하였다.

기하학적 비선형을 묘사하기 위해 파형판과 보강판은 4절점 shell요소를 사용하였으며, 연결부는 8절점 solid 요소로 구성하였다. 파형판과 연결부는 용접으로 고정되어있으므로, 접합된 위치의 절점을 공유시킴으로써 상이한 요소자유도를 일치시켰다. 파형판의 요소크기 결정은 동일한 충격하중에 대하여 흡수에너지, 최대변형량을 기준으로 요소의 크기를 변화하여 요소개수에 대한 수렴도 분석을 통해 유한요소의 크기를 4mm로 결정하였다 (Paik, 2011).

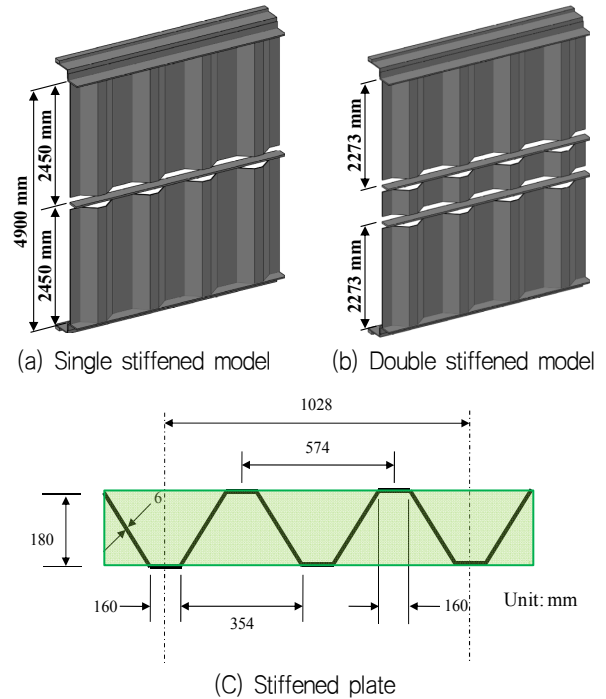


Fig. 6 Schematic of target blast wall

### 2.2 재료물성치

일반적으로 폭발하중과 같은 충격하중을 받는 구조물의 항복응력은 준정적 항복응력보다 증가한다. 이러한 동적 효과를 변형률 속도 효과 (Strain-rate effect)라고 하며, 폭발 하중과 같은 동적하중을 받는 구조물의 구조 해석 시 이를 고려하여야 한다. Cowper and Symonds (1957)는 정적항복강도와 실험을 통해 얻어진 재료별 보정계수를 통해 변형률 속도효과가 고려된 동적항복응력을 계산하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{\sigma_{Yd}}{\sigma_Y} = 1.0 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/q} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{Yd}$ 는 동적항복 응력,  $\sigma_Y$ 는 정적 항복 응력,  $\dot{\epsilon}$ 는 기준점에서의 측정된 변형과 하중속도의 비( $\dot{\epsilon} = d\epsilon/dt$ )로 정의

된다. 또한,  $C$  와  $q$ 은 재료시험으로부터 얻어진 계수이다. 일반적으로 방폭벽의 구조 거동 분석 시, 최대 처짐 및 영구처짐의 관점으로 구조물을 분석 하기에 파단변형률은 고려하지 않았다. 본 연구에 사용된 재료는 연강이며, 응력-변형률 곡선은 완전탄소성모델로 가정하였다. 관련 물성치는 Table 2에 표기하였다.

Table 2 Material properties of blast walls

$\sigma_y$	$E$	$\rho$	$\nu$	$C$	$q$
235MPa	205800MPa	7850kg/m <sup>3</sup>	0.3	40.4/s	5

### 2.3 고유주기

동적하중을 받는 구조물의 구조응답은 하중의 지속시간과 구조물의 고유주기의 비에 따라 거동영역이 달라지며, NORSOK (1999)에서는 이들의 비에 따라 다음과 같이 준정적, 동적, 충격 영역으로 구분한다.

- 준정적(Quasi-static) 영역:  $3 \leq t_d/T$
- 동적(Dynamic) 영역:  $0.3 \leq t_d/T \leq 3$  (2)
- 충격(Impulsive) 영역:  $t_d/T < 0.3$

여기서,  $T$ 는 고유주기이며,  $t_d$ 는 하중의 지속시간이다. 방폭벽의 동적영역을 정의하기 위해 모델별로 고유주기를 조사하였으며, Table 3에 정리하였다.

Table 3 Natural period of blast walls

Type of stiffener	Natural period (s)
Unstiffened model	0.04900
Single stiffened model (4mm)	0.04976
Single stiffened model (8mm)	0.05045
Double stiffened model(4mm)	0.04993
Double stiffened model(8mm)	0.05129

### 2.4 하중조건

본 연구에서는 Fig. 7과 같이 최대압력( $p_{peak}$ )과 지속시간( $t_d$ )으로 정의되는 이등변 삼각형 형상의 폭발하중을 적용하였으며, 하중의 방향은 파형판의 수직으로 작용하였다. 시간에 따라 발생하는 하중의 면적은 구조물에 전달되는 충격량으로 정의된다. 최대 입력의 크기 및 지속시간에 따른 영구 처짐량과 보강판 유무에 따른 동적구조응답특성을 살펴보기 위해 Table 4와 같이 시나리오를 선정하였다.

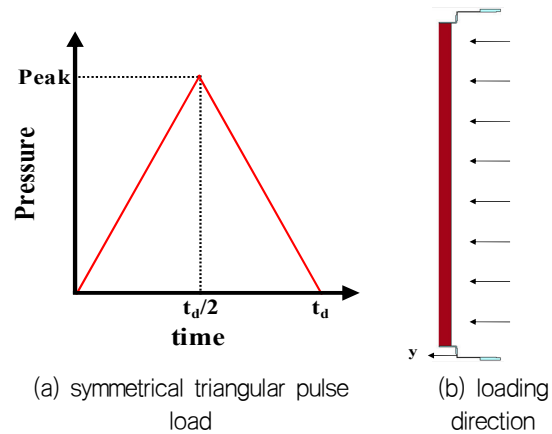


Fig. 7 Applied blast loading conditions for blast wall

Table 4 Loading conditions

Duration(s)	Impulse (bar·s)						
	0.031	0.038	0.05	0.056	0.063	0.075	
$P_{peak}$ (bar)	1	0.062	0.076	0.100	0.112	0.126	0.150
	2	0.031	0.038	0.050	0.056	0.063	0.075
	3	0.021	0.025	0.033	0.037	0.042	0.050
	4	0.016	0.019	0.025	0.028	0.032	0.038
	5	0.012	0.015	0.020	0.022	0.025	0.030

### 2.5 경계조건

해양구조물에 설치되는 방폭벽은 동일한 파형의 연속이기 때문에 양끝은 대칭조건을 사용하였으며, 위·아래면은 상하부 데크(deck)에 용접되므로 완전 고정하였다. Fig. 8은 본 연구에 적용된 경계조건을 보여준다.

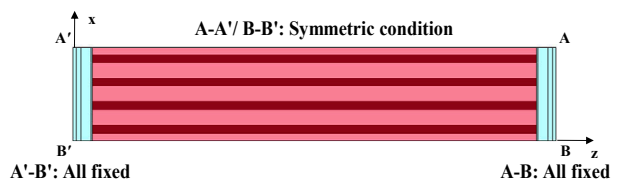


Fig. 8 Boundary conditions for blast wall

## 3. 해석 결과

### 3.1 정적하중을 받는 구조물의 구조응답특성

동적구조 응답을 살펴보기에 앞서, ANSYS (2013)를 활용하여, 정적하중 하에서의 구조물의 비선형성 거동을 살펴보았다. 준정적해석에서의 구조응답은 구조물의 하중이력시간보다 구조물의 강성에 의존하며, 결과는 Fig. 9에 도시하였다.

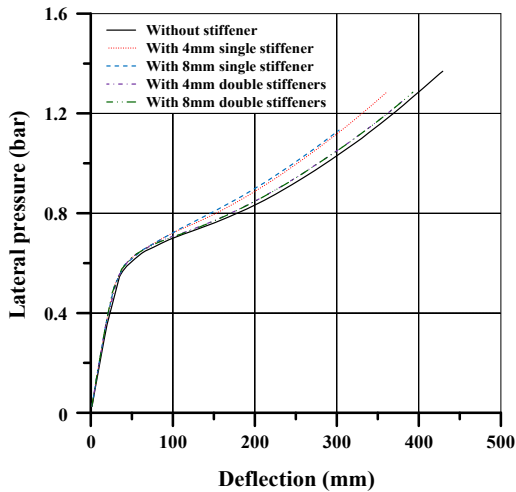


Fig. 9 Maximum deflection of blast wall under quasi-static load

선형구간이 끝나는 지점인 약 0.6bar가 본 모델의 좌굴점으로 판단되며, 탄성처짐량한계는 40mm이고, 소성처짐량의 한계는 약 440mm이다. 좌굴점은 보강판의 배치로 인한 차이는 없으며, 좌굴 발생 지점의 차이가 좌굴 후의 강도차이를 야기한다. 보강판이 부착될 경우 정적강도는 증가하였으며, 이는 부착된 보강판이 기존구조물보다 높은 강성을 가짐으로써 구조물의 비선형 거동 영향을 약화시킴을 의미한다. 이를 통해 2안보다는 1안이 강도향상에 적합함을 알 수 있으며, 부착된 판의 두께는 방폭벽의 강도에 영향을 없음을 확인 할 수 있다.

### 3.2 압력-충격량 선도

방폭벽 설계 시, 설계자는 구조의 전반적인 동적거동이력보다 특정한 하중에서의 구조물의 손상(최대처짐량, 영구영구처짐량)에 관심을 가진다. 압력-충격량 선도(pressure-impulse diagram)는 방폭벽의 손상에 대한 평가를 용이하게 하며, Fig. 10에 나타내었다.

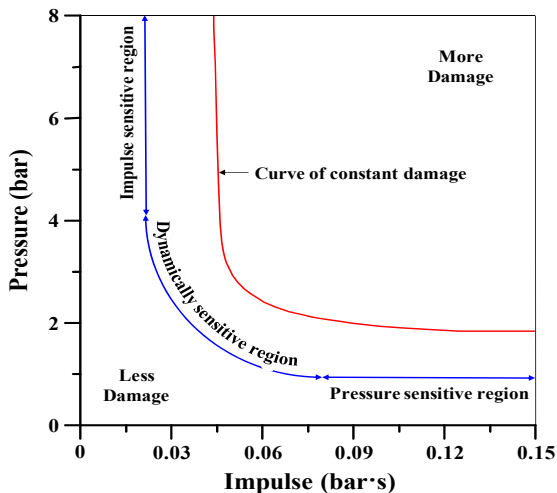
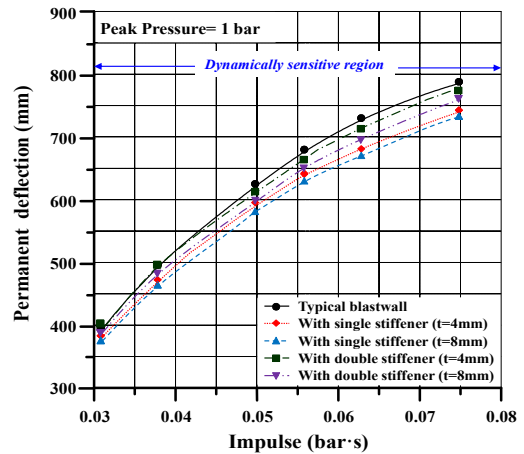


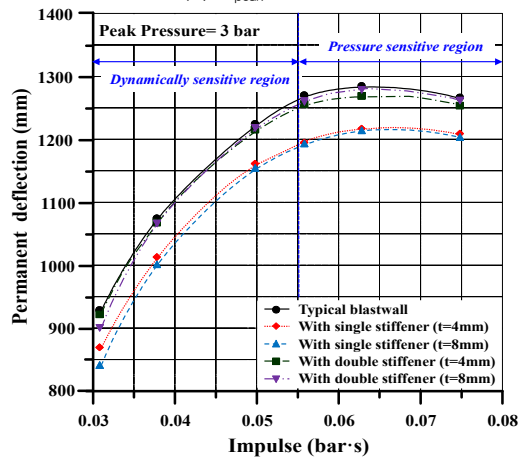
Fig. 10 Typical pressure-impulse diagram

횡축은 충격량, 종축은 압력(하중)으로 구성되며, 구조물이 받는 손상(최대변위)은 압력과 충격량의 조합으로 표기된다. 구간에 따라, 충격량 변화에 민감한 충격영역(impulsive sensitive region), 압력과 충격량 변화에 민감한 동적영역(dynamically sensitive region) 그리고 압력 변화에 민감한 압력영역(Pressure sensitive region)으로 나누어진다.

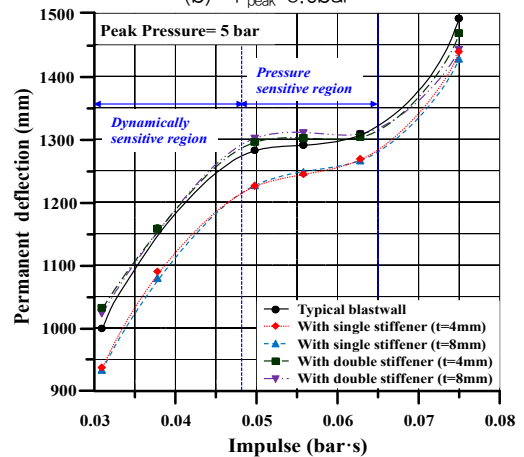
### 3.3 동적하중을 받는 구조물의 구조응답특성



(a)  $P_{peak}=1.0bar$



(b)  $P_{peak}=3.0bar$



(c)  $P_{peak}=5.0bar$

Fig. 11 Permanent deflection of blast wall

본 논문에서는 수치시뮬레이션을 통해 얻어진 동적구조응답의 영역을 재분류 하였다. Fig. 11은 폭발 하중을 받는 방폭벽의 보강판 유무 및 두께에 따른 영구 처짐량을 나타낸다. 동적구간에서는 충격량이 구조물에 큰 영향을 미치며, 준정적영역에서는 압력이 구조물에 큰영향을 미침을 알 수 있다. 즉, 준정적영역이 민감한 압력영역이며, 충격량의 증가로도 일정한 영구변형량을 가짐을 알 수 있다.

또한, 정적해석 결과와 동일하게 1안의 경우 강도향상에 효과를 보였으나, 2안의 경우 기존의 파형판과 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 이러한 차이는 압력이 커질수록 뚜렷하게 나타났으며, 부착된 판의 두께의 영향은 미미하였다. 이는 고압의 가스가 누출되었을 경우, 얇은 판을 좌굴 지점에 설치함으로써 발생할 수 있는 피해를 줄이고, 피해규모를 최소화시킬 수 있는 방안을 증빙한다. 상대적으로 큰 압력이 발생하는 5bar가 작용하는 경우, 충격량이 0.06bar·s보다 클 때 영구처짐량의 변화가 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 파형 방폭벽이 횡압력에 의해 좌굴발생을 지나 판의 형태로 변하여 파형판의 연결부에 발생하는 응력 증대로 급격한 처짐이 추가 발생하였다고 사료된다.

### 3.4 압력-충격량 선도

일반적인 방폭벽과 효과가 가장 좋은 1안 (t=8mm)을 파형 방폭벽의 동적구조응답 특성을 이용하여 압력-충격량 선도 (pressure-impulse curve)를 생성하여 비교하였다. 식 (3)은 계산된 수치데이터를 바탕으로 제시된 파형곡선함수이다. 함수와 수치데이터와의 제곱오차를 구하고 이를 최소가 되도록 각 변수에 계수를 부여하였다.

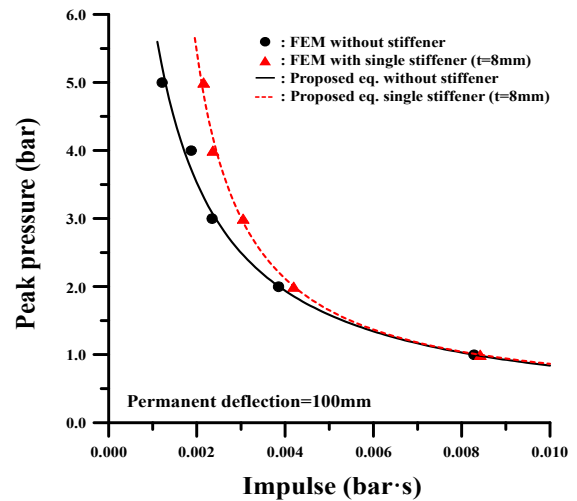
$$\frac{1}{[Pressure]} = \alpha [Impulse]^2 + \beta [Impulse] + \gamma \quad (3)$$

여기서, Pressure 는 최대압력, Impulse 는 충격량 그리고  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ 는 다항식 계수를 나타낸다. 제시된 계수의 값은 Table 5에 정리하였다. 본 연구에서 최대변형량이 아닌 하중이 작용한 뒤 구조물의 영구처짐량을 관찰하였다. 영구처짐량은 시간-하중 곡선 이후의 구조물의 거동으로 구조물이 탄성변형을 넘어 소성변형이 발생한 값이다.

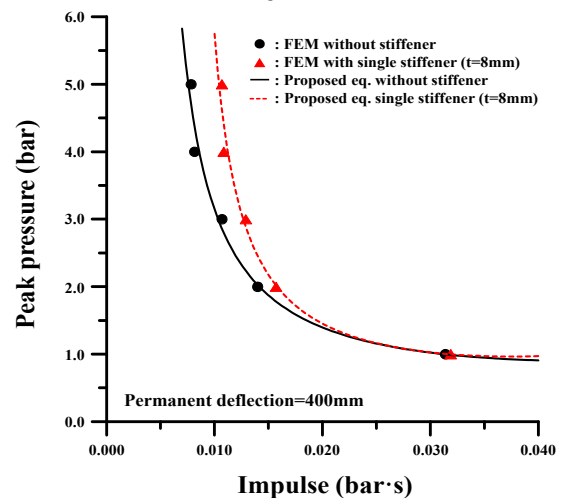
Table 5 Coefficient for proposed equation

$w_p$ (mm)	Model type	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
100	Unstiffened	-432.945	118.539	0.049
	Single stiffened (t=8mm)	-3847.722	167.151	-0.135
400	Unstiffened	-687.443	60.485	-0.219
	Single stiffened (t=8mm)	-1145.383	85.760	-0.570

FABIG (1999)에 따르면, 일반적으로 길이/40에서 길이/25까지를 최대 허용범위로 지정한다. 그러나, 연결부의 형상에 따라, 허용범위가 달라진다고 명시되어있다. 본 논문에서는 파형판 양 끝에 브래킷이 연결되어 더 많은 처짐이 허용되므로, 100mm와 400mm에서의 압력-충격량 선도를 작도하였으며, Fig. 12에 제시하였으며, 제안된 식의 계수는 Table 5에 정리하였다.



(a)  $w_p = 100mm$



(b)  $w_p = 400mm$

Fig. 12 P-I diagrams

Fig. 12는 식 (3)을 이용하여 표현된 처짐량에 따른 압력-충격량 선도를 나타내고 있다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 보강판의 유무 및 보강판의 두께에 따른 영향은 민감한 압력 영역에서는 미비하며, 민감한 동적영역에서 민감한 충격영역으로 진행되면서 영향이 증대된다. 민감한 충격에서는 소성을 발생시키는데 필요한 충격량이 기존의 방폭벽에 비해 1안이 최대 2배가 되며, 이는 보강된 방폭벽의 강도가 최대 2배 증가하였다는 것을 의미한다. Table 6에서는 제안된 식과 수치해석 시뮬레이션을 통해 계산된 값을 검증하였다.

Table 6 Comparison of the results of the FEA and proposed equation

$w_p$ (mm)	Model type	Pressure (bar)	Impulse (bar*s)		Propose Eq./FEA	$w_p$ (mm)	Model type	Pressure (bar)	Impulse (bar*s)		Propose Eq./FEA
			FEA	Proposed eq.					FEA	Proposed eq.	
100	Unstiffened	0.0083	1	1.00	1.00	400	Unstiffened	0.0314	1	1.00	1.00
		0.0038	2	2.01	1.01			0.0140	2	2.03	1.02
		0.0023	3	3.09	1.03			0.0107	3	2.86	0.95
		0.0019	4	3.72	0.93			0.0082	4	4.37	1.09
		0.0012	5	5.22	1.04			0.0078	5	4.70	0.94
	Single stiffened (t=8mm)	0.0084	1	1.00	1.00		Single stiffened (t=8mm)	0.0319	1	1.00	1.00
		0.0042	2	2.01	1.01			0.0157	2	2.02	1.01
		0.0031	3	2.95	0.98			0.0129	3	2.89	0.96
		0.0024	4	4.19	1.05			0.0109	4	4.42	1.11
		0.0022	5	4.83	0.97			0.0107	5	4.62	0.92
					mean	1.00					
					COV	0.0355					
										mean	1.00
										COV	0.0622

## 5. 결론

본 연구에서는 좌굴을 방지 또는 충격흡수를 통해 좌굴점을 지연하기 위한 방안으로 기존의 방폭벽에 얇은 판이 부착된 새로운 형태의 방폭벽의 동적 구조 거동이 조사되었다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내었다.

- 방폭벽의 높이 방향 중앙에 판형태의 보강판을 설치 할 경우 방폭벽이 가지는 강성의 향상으로 6.5~9.5%정도의 처짐을 감소시킨다.
- 2가지의 해석모델 중 2개의 얇은 판이 부착된 2안보다, 1개의 얇은 판이 부착된 1안의 연구처짐이 작았으며, 이는 초기모델에서의 좌굴이 발생하는 지점에서의 보강이 중요함을 알 수 있다.
- 보강재의 유무에 따른 강도향상은 확연히 나타났지만, 보강재 두께에 따른 영향은 크게 나타나지 않았다.
- 특정한 하중에서의 구조물의 손상에 대한 평가를 용이하게 하는 설계기법인 압력-충격량 선도를 제시하였다.
- 폭발 하중은 높은 압력과 짧은 지속시간을 유발하는 현상으로, 압력-충격량 선도의 민감한 충격영역에 속한다. 폭발 하중이 발생 하면, 보강재를 부착한 구조물이 상대적으로 더 큰 충격량을 흡수 할 수 있다.

본 연구는 향후 해양구조물 폭발 사고 시 방폭벽의 강도 증가와 효율적인 제작에 유용한 지침서가 될 것이다.

## 후 기

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외우수연구기관유치사업 연구임(2014040731)

## References

ANSYS, 2013. *User's Manual (Version 14.0)*. ANSYS Inc.: Pennsylvania.

ANSYS/LS-DYNA, 2013. *User's Manual (Version 14.0)*. ANSYS Inc.: Pennsylvania.

Chritou M. & Konstantinidou M., 2012. *Safety of Offshore Oil and Gas Operations Lessons from Past Accident Analysis*. Report EUR 25646 EN. Roma: EUR.

Cowper, G.R. & Symonds, P.S., 1957. *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. Division of Applied Mathematics. Rhode Island: Brown University.

Fire and Blast Information Group (FABIG), 1999. *Technical Note 5 on Design Guide for Stainless Steel Blast Walls*, Berkshire: FABIG.

Health and Safety Executive (HSE), 2003. *Research Report 124 on Pulse Pressure Testing of 1/4-scale Blast Wall Panels with Connection*, London: HSE.

Health and Safety Executive (HSE), 2004. *Research Report 146 on Analysis and Design of Profiled Blast Walls*, London: HSE.

Health and Safety Executive (HSE), 2006. *Research Report 404 on Pulse Pressure Testing of 1/4-scale Blast Wall Panels with Connection (Phase II)*, London: HSE.

Kang, H.R. Lee, J.S. & Min, J.H., 2012. The structure

analysis of explosion pressure of the blast wall. *Paper presented at the Conference of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Daegu, Korea, 31 May – 6 June 2012, pp.1794–1798.

Kim, B.J. Kim, B.H. Sohn, J.M. Paik, J.K. & Seo, J.K., 2011. A Parametric Study on Explosion Impact Response Factors Characteristics of Offshore Installation's Corrugated Blast Wall. *Journal of Korean Society of Ocean Engineering*, 26(3), pp.46–54.

Mech-Tool Korea Inc., 2013. [Online] Available at: <http://www.mechtoolkorea.com> [Accessed 15 April 2013]

Norway Standards (NORSOK), 1999. *NORSOK N003 on Action and Action Effects*, Norway: NORSOK.

Paik, J.K., 2011. *Explosion and Fire Engineering of FPSOs (Phase III): Nonlinear Structural Consequence Analysis*. LRET Research Centre of Excellence, Pusan National University: Busan.

Paik, J.K. & Thayamballi, A.K., 2007. *Ship-shaped*

*Offshore Installations: Design, Building, and Operation*. Cambridge University Press: Cambridge.

Sohn, J.M. Kim, S.J. Kim, B.H. & Paik, J.K., 2013. Nonlinear Structural Consequence Analysis of FPSO Topside Blast Walls. *Ocean Engineering*, 60, pp.149–162.



김 상 진



손 정 민



이 종 찬



리 춘 보



성 동 진



백 점 기