



고에너지흡수 신소재 적용 해양플랜트 파형 방폭벽의 폭발 저항 성능

노명현¹ · 박규식¹ · 이재익¹

포스코 철강솔루션마케팅실 제품이용기술센터¹

Explosion Resistance Performance of Corrugated Blast Walls for Offshore Structures made of High Energy Absorbing Materials

Noh, Myung-Hyun¹, Park, Kyu-Sik¹, Lee, Jae-Yik¹

¹Product Application Center, Steel Solution Marketing Division, POSCO

Abstract: In this paper, a finite element dynamic simulation study was performed to gain an insight about the blast wall test details for the offshore structures. The simulation was verified using qualitative and quantitative comparisons for different materials. Based on in-depth examination of blast simulation recordings, dynamic behaviors occurred in the blast wall against the explosion are determined. Subsequent simulation results present that the blast wall made of high energy absorbing high manganese steel performs much better in the shock absorption. In this paper, the existing finite element shock analysis using the LS-DYNA program is further extended to study the blast wave response of the corrugated blast wall made of the high manganese steel considering strain rate effects. The numerical results for various parameters are verified by comparing different material models with dynamic effects occurred in the blast wall from the explosive simulation.

Key Words: Offshore Structures, Corrugated Blast Wall, High Energy Absorbing Materials, Explosion Resistance

1. 서론

해양플랜트는 화재와 같은 사고 시 피해의 정도가 아주 크므로 경제성 못지않게 안전성을 매우 중요시 하고 있다. 최근 가스 생산용 해양플랜트 설비의 등장으로 기존의 석유생산용 육상 및 해양플랜트 설비의 폭발사고에 대한 기준으로 폭발하중 및 안전시스템 설계에 적용은 많은 문제점을 가지고 있다. 가스 생산용 해양플랜트 설비의 폭발사고는 기존의 석유 생산용 설비에 비해 폭발하중이 상대적으로 높고, 또한 가스공정 설비시스템이 매우 복잡한 구조로 되어있다(HSE, 2003). 따라서 설비특성을 정밀하게 구현된 폭발하중을 적용하여 응답 특성치를 반영한 위험도기반 안전시스템설계가 요구

되고 있다.

해양플랜트 구조물은 가스폭발과 같은 사고를 대비하여 탈출로와 인접 모듈의 피해확산방지 목적으로 해양플랜트 설비의 모듈과 거주구 주위에 방폭벽을 설치하게 되는데, 주로 스테인레스 강재를 적용하고 있다. 스테인레스 강재는 탄소강에 비해 고열에 대하여 내구성이 강한 재료이다. 스테인레스 강재는 폭발로 발생하는 에너지를 비교적 쉽게 흡수하는 연성능력이 좋고, 내화성과 부식저항능력이 좋아서 산업전반에 많이 적용되고 있다 (Steel Construction Institute, 1999). 최근 용도에 따라 다양한 종류의 강재가 개발되고 있는데, 이 중에서 고망간강은 오스테나이트 조직으로 구성되어 강인하지만 격렬한 충격적 외력의 작용으로 표면층이 현저하게 가공경화하며 연삭 마모 또는 거친 마모에 잘

주요어: 해양구조물, 파형 방폭벽, 고에너지흡수 신소재, 폭발저항

Corresponding author: Lee, Jae-Yik

Product Application Center, Steel Solution Marketing Division, POSCO, Korea
 POSCO Global R&D Center 100, Songdogwahak-ro, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Republic of Korea
 Tel: +82-32-200-2485, E-mail: jaeyiklee@posco.com

Received March 3, 2015 / Revised March 11, 2015 / Accepted March 13, 2015

견디는 장점을 갖는다. 따라서 본 연구에서는 고망간강을 적용한 파형 방폭벽에 대하여 폭발하중이 작용하였을 경우에 대한 동적거동과 설계기법을 분석하기로 한다.

2 기본 이론

2.1 변형률 속도

강재의 경우 비선형 거동을 정확히 묘사하기 위해서 강관의 변형률 경화, 변형률 속도 경화, 열적 연화효과가 고려되어야 한다. 시간 이력해석에 관한 수치해석에서는 준정적해석과 동적해석으로 구분하여 진행할 수 있다. 충돌 시뮬레이션에서 준정적해석이란 충돌체의 속도와 가속도에 따른 관성력(Inertia Force)이 고려되고 있지 않은 상태로 시간에 따라 정적해석을 진행하는 것을 말한다. 이때는 충돌체들 사이에 힘의 평형에 의한 반발력만 고려된다. 준정적 해석에서의 재료모델은 저변형률 속도일 경우에서 얻어진 데이터가 쓰이는데 정적 소성해석에서 쓰이는 응력-변형률 곡선이 적용된다고 보면 된다. 한편, 동적해석에서는 준정적해석과 다르게 관성력이 존재하는데 이는 충돌체에 추가적인 하중으로 작용한다. 동적 충격 시뮬레이션에서는 동적마찰 계수, 공기저항, 재료물성변화 등이 고려되어야 한다. 이 중 재료물성의 변화는 동적해석 결과에 있어서 가장 큰 영향을 미치는데 충돌속도에 따른 경화도가 틀리기 때문이다. 특히, 충돌체가 강재인 경우 변형률 속도에 따른 경화도가 고려되어야 하는데 이는 고속인장실험을 통하여 재료 물성치가 얻어진다. 그러나 실험을 통해 구성방정식을 얻기 위해서는 많은 고속인장실험을 실시해야 하는데 막대한 비용 초래한다. 일반적으로 이를 피하기 위해 준정적 실험 데이터에서 동적특성을 유도할 수 있는 구성방정식을 사용하는데 Cowper-Symonds 모델과 Johnson-Cook 모델이 대표적이다. Cowper-Symonds 모델의 경우 재료의 열 발생과 이로 인한 연화를 고려할 수 없기 때문에 중·저속 충돌해석에 적합하다. 또한, 등방성 경화법칙에 위배되지 않기 때문에 구성방정식이 간단하고 시뮬레이션에 적용하기 쉽다. Johnson-Cook 모델의 경우 열에 따른 물성치의 변화를 고려할 수 있는 장점을 갖고 있다. 그래서 열 손상에 의한 모델, 고속충돌에서의 열에 의한 연화 등을 구성방정식을 통해 구현할 수 있다.

변형률 속도를 고려한 동적영향은 Cowper-Symonds 모델을 일반적으로 사용하고 있다. Cowper-Symonds 모델 방정식은 식(1)과 같다(Cowper and Symonds, 1957).

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \quad (1)$$

여기서, σ_d 는 동적 항복응력, σ_s 는 정적항복응력, $\dot{\epsilon}$ 은 변형률속도, 그리고 C , P 는 Cowper-Symonds 관계상수를 각각 의미한다. 식 (1)에 의하면, 정적 및 동적 항복 응력 비율은 변형률속도에 의존하고 있음을 알 수 있다. 본 연구에서는 고망간강에 대한 Dynamic Strain Rate 효과를 고려하기 위해 Cowper-Symonds 식을 적용한 Stress-Strain Curve를 도출하였다.

2.2 설계법 분석

폭발사고에 대한 방폭벽은 크게 두 가지 형태인 보강판구조와 파형판구조로 구분할 수 있으며, 이러한 방폭벽은 재료적인 측면에서 기존 스테인레스 강재의 연성특성과 내부식 특성을 확보하고 있으며, 동시에 파형 단면구조가 지니는 에너지 흡수측면에서의 효율적인 기하학적 구조를 제공한다. 실제 크기의 방폭벽 폭발응답특성 분석실험은 다양한 실험적 제약조건이 따르게 된다. 따라서 축소스케일의 방폭벽 폭발응답실험을 통하여 충격하중특성을 예측하고, 유한요소해석용 하중 데이터로 사용하는 것이 일반적이다. 또한, 유한요소 해석모델을 활용하여 우수한 충격응답특성을 갖는 구조를 도출하기 위한 매개변수 해석을 수행하는 프로세스로 구성된다. 파형 방폭벽은 파형형태인 파형판(Corrugated Plate)과 상하부 주부재(I-beam), 그리고 이들을 연결하는 부재로 구성된다. 파형형상은 폭발과 같은 급격히 큰 충격하중이 왔을 때 에너지 흡수측면에서 효율적인 기하구조를 지니고 있다. 또한, 연성과 내부식 성능이 우수한 스테인레스 강재가 널리 적용되고 있다. 최근, 파형방폭벽을 1/4 Scale로 축소하여 폭발시험 및 수치해석 결과를 상호 비교분석한 연구들이 제시되고 있다 (Schleyer and Langdon, 2002).

본 연구에서는 FABIG (Fire & Blast Information Group, 1999) Note를 중심으로 설계법을 분석하기로 한다. FABIG에서 제시하는 설계방법은 크게 단자유도계(SDOF) 해석법과 유한요소 해석을 이용한 다자유도계(MDOF) 해석법이 있다. 부재의 연성능력치에 따라서 좌굴위험도가 달라져 구조물의 응답이 복잡해진다. 단자유도계 해석법은 비교적 간단하게 접근이 가능하므로 계획과 기본설계단계에서 유용한 방법이다. IGN 자료에 양단구속조건과 소성변형의 영향을 고려하여 계산하는 과정을 설명되어 있다. 또

한, 동적응답에 대한 Rebound의 경우에도 적용이 가능하다.

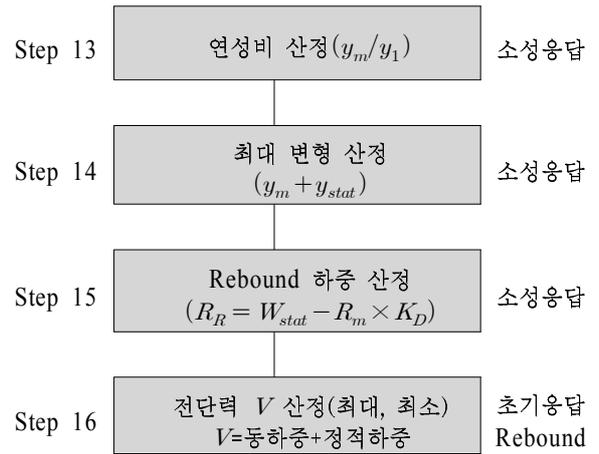
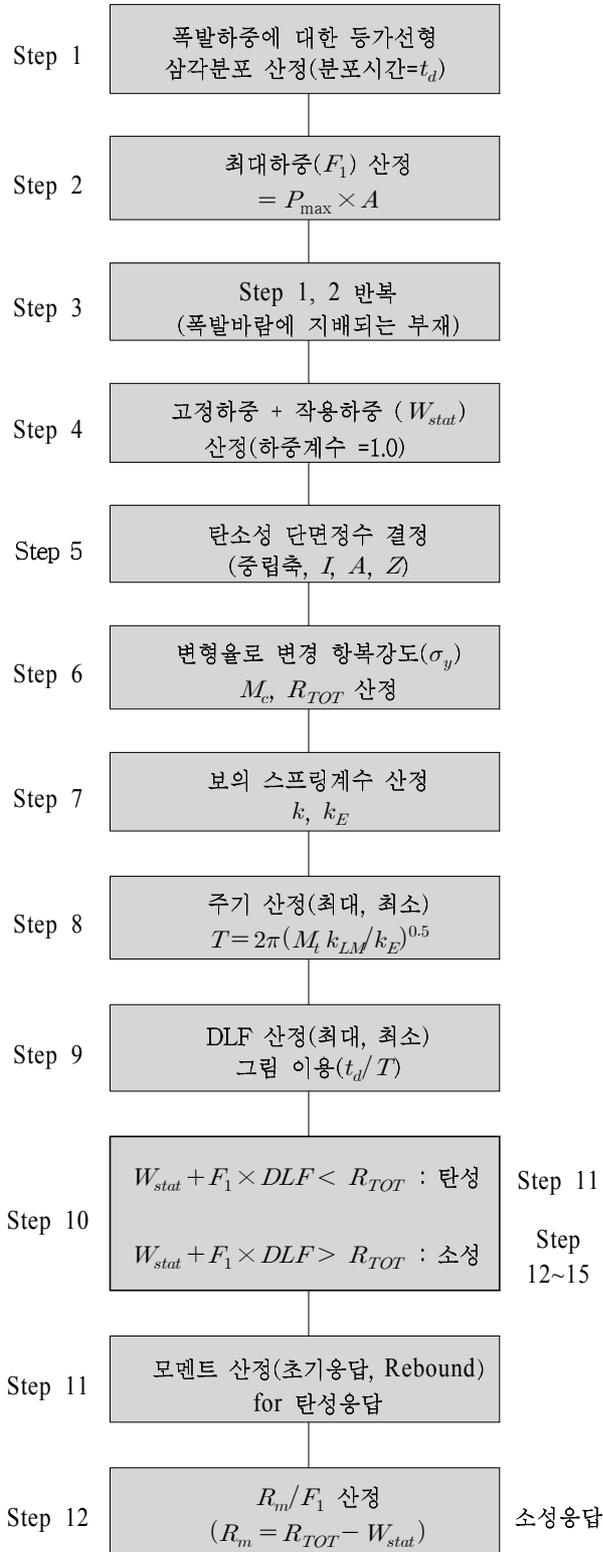


Fig. 1 Design Flow Diagram of Single Degree of Freedom Response Analysis

동적하중에 대한 최초 최대응답치를 구하고 Rebound시의 동적하중계수(RDLF)도 구할 수 있다. Fig. 1은 단자유도계 응답해석 및 설계 흐름도를 보여준다. Fig. 1에서 기본응답은 탄성거동내의 보의 경우 최대하중 Q 는 다음과 같이 계산한다.

$$Q = W_{stat} + F_1 \times DLF \quad (2)$$

여기서, W_{stat} 는 지속하중, F_1 은 최대 폭발하중이다. 소성거동내의 보의 경우 폭발하중의 저항값은 다음과 같다.

$$R_m = R_{TOT} - W_{stat} \quad (3)$$

여기서, R_{TOT} 는 소성과괴시 부재의 경간하중능력 $= 16M_c/L$ 이다.

탄성거동영역의 경우, FABIG에서는 댐핑계수가 0 또는 5%일 때의 RDLF값이 그래프로 주어져 있다. $t_d/T = 1 \sim 2$ 의 경우 댐핑계수가 0일 때는 RDLF의 하한치가 0.8, 5% 댐핑계수 일 때는 0.7로 제한이 있는데, SDOF 해석의 불규칙 때문이다. 초기응답이 충격하중의 대응하여 역방향으로 작용 시 더욱 위험하고 소성변형이 유발될 수 있는데, 이러한 경우가 단자유도계 해석이 유효하다. 소성거동영역의 경우는 단순보 또는 단순 켄틸레버보의 경우 최대 Rebound 하중은 다음과 같다.

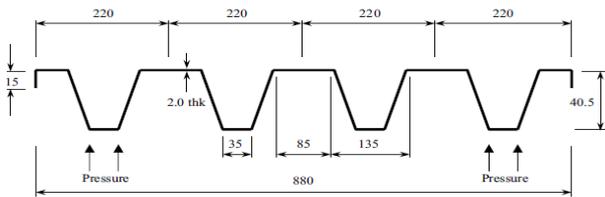
$$R_R = W_{stat} - R_m K_D \quad (4)$$

여기서, K_D 감소계수(댐핑조건)이며, $K_D = 0.87(5\% \text{ 댐핑})$, 그리고 $K_D = 1.0(\text{zero 댐핑})$ 이다. 일

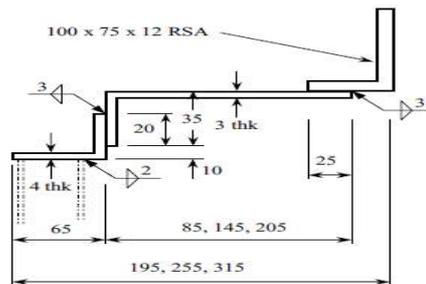
반적으로 2% 댐핑값을 적용하며, 연속보에도 적용 가능하다. 전단의 경우, DLF와 RDLF 계수는 휨모멘트 산정시에도 동일하게 적용된다. 그러나, 동하중에 전단력은 다른 계수가 적용된다. IGN 자료를 통해서 산정할 수 있는데, F는 동하중 최대점에서의 (t_m) 폭발하중 값이다. 이와 같은 적절한 가정조건들이 적용된다면 단자유도 해석을 통해서 신뢰성 있는 해석결과를 얻을 수 있다.

3. 수치해석 예제

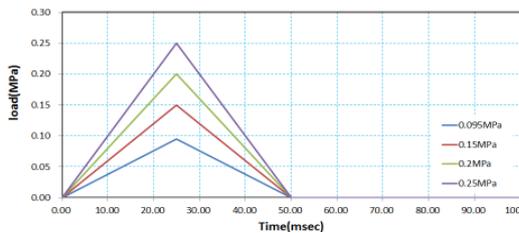
본 연구에서는 HSE의 연구 보고서 Pulse Pressure Testing of 1/4 Scale Blast Wall Panels with Connections의 방폭벽 해석 모델을 기반으로 기본적인 유한요소 모델링을 수행하였다. Fig. 2는 HSE 보고서에 제시한 SDOF 모델의 기본 제원을 토대로 방폭벽 단면이 나타나있고 해석에 적용된 압력을 보여준다. Fig. 3은 모델링된 LS-DYNA 프로그램을 사용한 유한요소모델과 하중이 적용되는 부분을 도시하였다.



(a) Corrugated Wall Section (1/4 Scale)



(b) Detail of Connection Part



(c) Design Pulse Pressure Load

Fig. 2 Blast Wall Section and Design Pulse Pressure Load

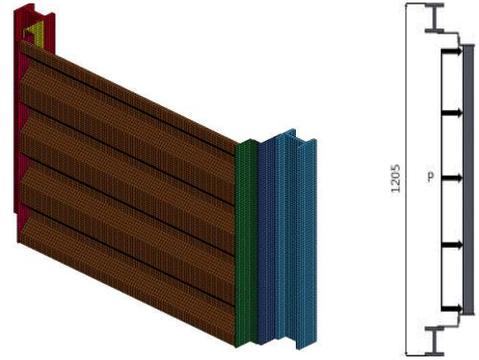


Fig. 3 Finite Element Model for Corrugated Blast Walls

3.1 Cowper-Symonds 모델을 이용한 재료물성 예측

본 연구에서는 고망간강 및 SUS316L 강재에 대하여 전술한 Cowper Symonds 모델을 기반으로 변형률 속도(Strain Rate)가 고려된 재료물성을 예측하기로 한다. 해석에 적용된 재료는 고망간강인 Modified Mn Steel과 NF2 Mn Steel이 사용되었고 일반강재인 SUS316L이 적용되었다. 적용된 재료에 쓰이는 Cowper- Symonds 재료모델의 상수값은 Table. 1과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서 사용하고자 하는 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA에서는 기본적으로 Cowper-Symonds 구성모델을 제공한다.

Table 1. Material Parameters for Cowper-Symonds Models According to Steels

Items	Nominal Grade of Steel		
	Modified Mn	NF2 Mn	SUS316L
Static Yield Stress, σ_y	663	401	310
Material Constant, D	Variable	Variable	Variable
Material Constant, α	89453.56	372264.70	372264.70
Material Constant, β	32937522.3	9397325.23	9397325.23
Material Constant, P	5	5	5
Dynamic Yield Stress, σ_d	444	434	335

고망간강의 준정적 데이터인 경우 Fig. 4에서 보는 바와 같이 소성변형률 0의 항복응력 666MPa에서 시작으로 인장강도 902MPa까지 유동응력이 선형으

로 증가함을 알 수 있다. 이는 기존의 SUS316L보다 매우 높은 수치이며, 고방간강이 소성영역에서의 충격흡수에 대하여 우수한 성능을 가질 수 있음을 의미한다.

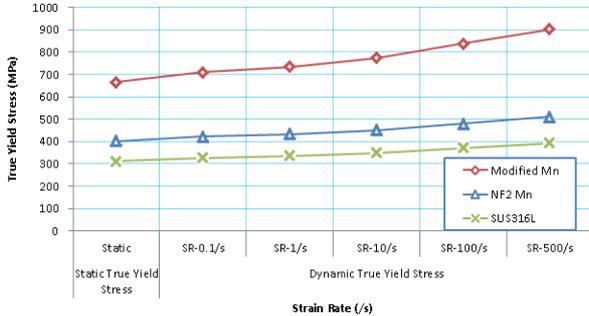
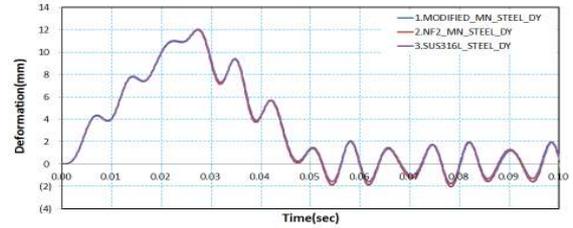


Fig. 4 Comparison of Static and Dynamic True Yield Stress for Different Materials

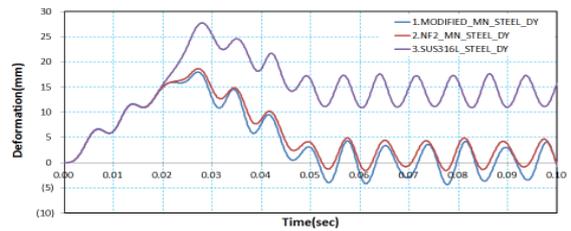
3.2 동적 변형률속도 고려 여부에 따른 거동 비교

본 연구에서는 동적 변형률속도 고려여부에 따른 거동을 재료에 따라서 비교분석을 수행하였다. Fig. 5는 좌형 방폭벽에 대하여 압력하중이 증가함에 따라 재료별 동적거동을 비교한 것이다. 여기서 DY는 변형률속도가 고려된 경우이고 ST는 고려되지 않은 경우이다. 하중이 0.095MPa 일때는 3개의 재료가 거의 비슷한 거동을 보였으며 NF2 Mn Steel 과 Modified Mn Steel이 거의 비슷한 거동을 보였으나 하중이 증가함에 따라 Modified Mn Steel이 잔류 변형도 없고 최대 변위 값이 가장 작게 나타났다. 이러한 결과는 Fig. 4에서 제시한 대로 응력-변형률 곡선의 전체적인 값이 크기 때문인 것으로 관찰된다. Fig. 6~8 은 변형률 속도의 적용 여주에 따른 최대 동적거동을 비교하여 나타낸 것이다. 하중이 0.095MPa 일때와 Fig. 6~7의 Modified Mn Steel 일때의 변형률속도의 고려 여부에 따른 변위의 차이가 거의 나지 않기 때문에 도시하지 않았다. 압력하중이 작은 경우는 동적 변형률 속도 고려여부에 따른 거동의 차이는 10%미만으로 작게 나타났다. 반면, 하중이 증가함에 따라 그 차이는 점차 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 현상은 하중이 증가됨에 따라 재료는 소성거동을 하면서 동적 변형률속도 곡선의 영향이 증가되기 때문으로 판단된다. 따라서 실제 방폭벽 설계에서는 FABIG 등의 해외 기준에서 제시한 바와 같이 재료의 변형률 속도를 산정하여 해석 시 고려하여야 보다 정확한 동적거동을 규명할 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 9는 하중이 0.25MPa 일 때 Modified Mn Steel에 대한 시간에 따른 동적거동 형상을 나타낸 것이다. 처음에는 양쪽

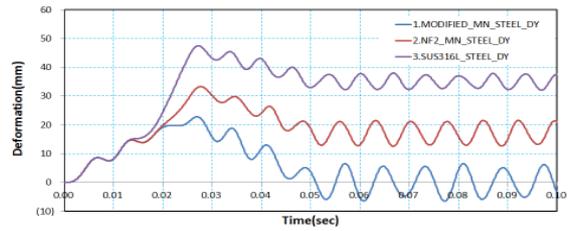
단부에 응력이 집중되었지만 시간이 지날수록 중앙부에 최대응력이 집중이 되는 것을 관찰할 수 있었으며, 충격에 대한 흡수가 우수하여 탄성적 거동을 하는 것으로 분석된다.



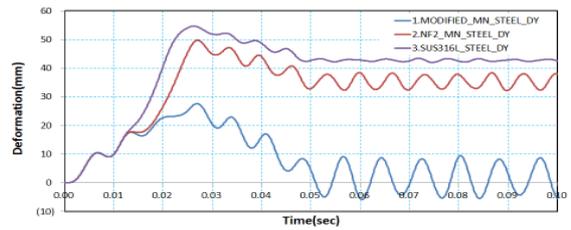
(a) 0.095MPa



(b) 0.15MPa

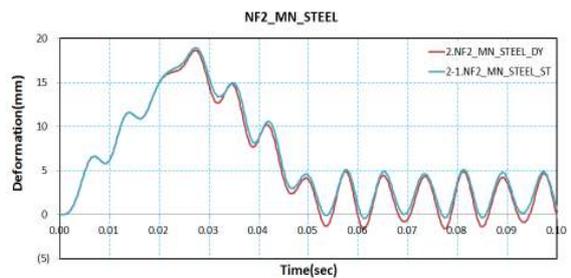


(c) 0.20MPa



(d) 0.25MPa

Fig. 5 Comparison of Maximum Displacements for Different Material Considering Strain Rates



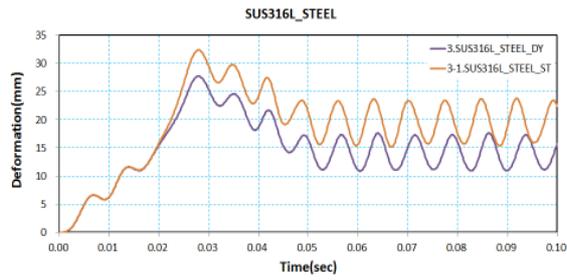


Fig. 6 The maximum Displacement According to Application of Strain Rate (Load=0.15MPa)

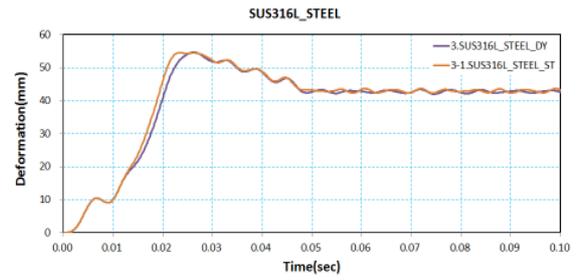


Fig. 8 The Maximum Displacement According to Application of Strain Rate (Load=0.25MPa)

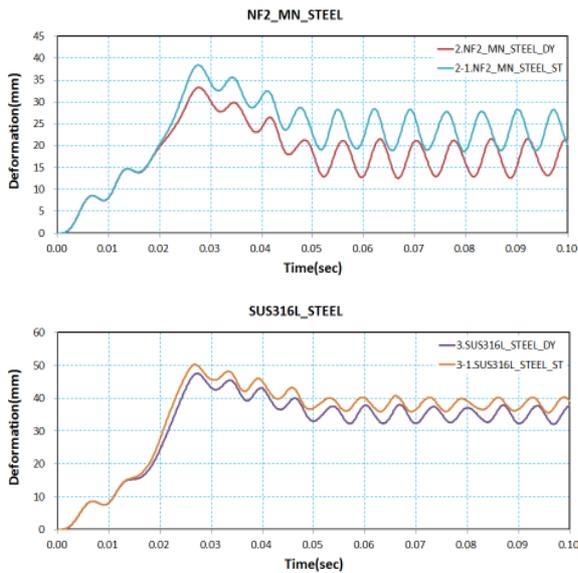
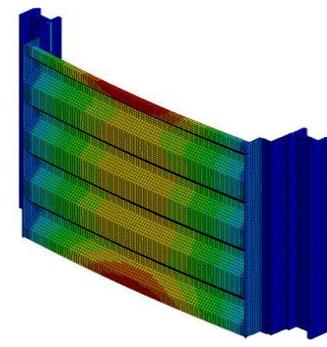
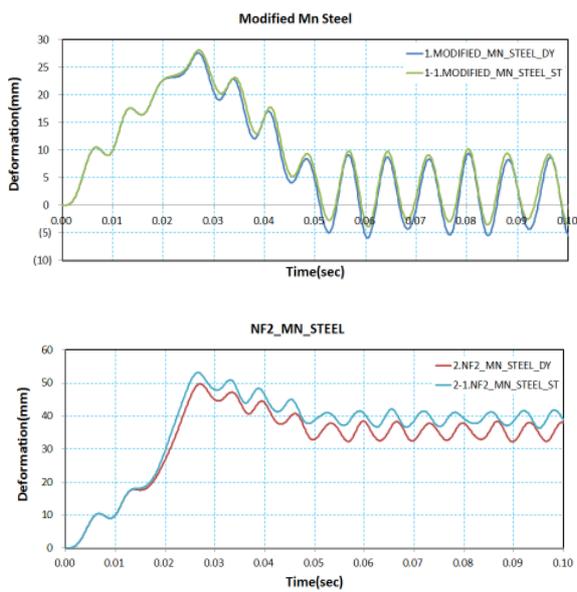
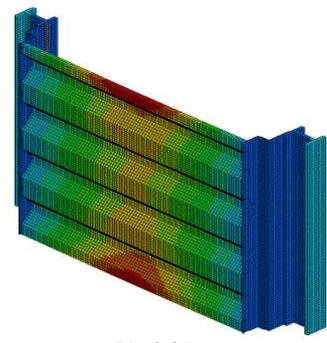


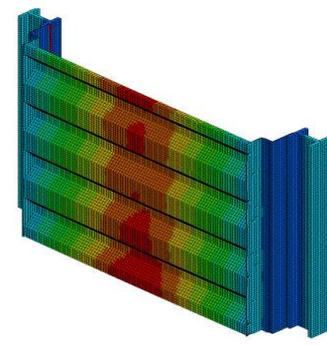
Fig. 7 The Maximum Displacement According to Application of Strain Rate (Load=0.20MPa)



(a) 0.020sec



(b) 0.05sec



(c) 0.07sec

Fig. 9 Deformed Shape for the Increased Time Step (Modified Mn Steel, Load=0.25MPa)

5 요약 및 결론

본 연구에서는 해양플랜트 폭발충격 기술동향을 조사하고 관련 국외 기준을 분석하여 적용할 수 있도록 하며, 파형 단면을 갖는 방폭벽에 대하여 폭발 충격 해석을 수행하였다. 특히, 고등 유한요소 해석 프로그램인 LS-DYNA를 사용하여 폭발 압력하중에 대한 고망간강 등의 고성능재료를 적용하여 방폭 성능 시뮬레이션을 수행하였으며, 동적 변형률 속도를 고려하여 해석에 대한 정확도를 높이고자 하였다. FABIG 등 국외 방폭벽 설계기준 및 설계 과정은 EURO CODE 3 등의 설계기준에 기반한 경우가 많아서 그대로 도입하여 적용하기에는 고려할 사항들이 있다. 그러나 SDOF 방법을 적용한 간편 방법은 방폭벽 설계에 대한 기준으로 충분히 적용할 수 있으므로 유한요소 해석에 의한 상세해석과 함께 수행하여 검증할 필요가 있다.

한편, 고망간강 및 SUS316L의 재료 중 Modified Mn Steel이 최대 변위와 잔류 변형이 가장 적게 나타났다. 이러한 결과로부터 Modified Mn Steel이 재료적으로 성능이 가장 뛰어나며 방폭에 대한 성능이 가장 우수한 것으로 판단된다. 동적 변형률 속도 고려여부에 따른 거동분석에서는 압력하중이 작은 경우는 동적 변형률 속도 고려여부에 따른 거동의 차이는 10%미만으로 작게 나타났다. 반면, 하중이 증가함에 따라 그 차이는 점차 증가하는 것으로 분석되었다. 이러한 현상은 하중이 증가됨에 따라 재료는 소성거동을 하면서 동적 변형률 속도 곡선의 영향이 증가되기 때문으로 판단된다. 따라서 실제 방폭벽 설계에서는 FABIG 등의 해외 기준에서 제시한 바와 같이 재료의 변형률 속도를 산정하여 해석 시 고려하여야 보다 정확한 동적 거동을 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 (주)포스코의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

Cowper, G. and Symonds, P. (1957), "Strain Hardening and Strain Rate Effects in the Loading of Cantilever Beams," Brown Univ. Applied Mathematics Report, Report No. 28.

- Kim, K.D, and Lee, S.-Y. (2014), "Passenger Safety Assessment by Real Car Crash Simulation of Composite Post Structures," Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 5, No. 2, pp. 15-20. (in Korean).
- Noh, M.-H., Lee, S.-Y. (2010), "Evaluation of Impact Damage Behavior of a Reinforced Concrete Wall Strengthened with Advanced Composite Materials," Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures, Vol. 1, No. 3, pp. 41-48. (in Korean).
- Steel Construction Institute (1999), "Design guide for stainless steel blast walls," Fire and Blast Information Group Technical Note 5.
- Schleyer, G.K. and Langdon, G.S. (2002), "Pulse pressure testing of 1/4 scale blast walls and blast wall connections," HSE Final Report, Project D3920.
- Schleyer, G.K., Langdon, G.S. and Jones, N. (2003), "Research Proposal - pulse pressure testing of 1/4 scale blast walls with connections - phase II," HSE Proposal.