



고속 변형률속도 효과를 고려한 폭발하중을 받는 보강형 방폭벽 구조의 동적 특성

김규동¹ · 노명현² · 이재익² · 이상열^{3*}

¹박사과정, 안동대학교, 토목공학과, ²책임 연구원, 포스코, 철강솔루션마케팅실 구조연구그룹, ³부교수, 안동대학교, 토목공학과

Dynamic Characteristics Stiffened Blast-wall Structures Subjected to Blast Loading Considering High Strain-rate Effects

Kim, Gyu Dong¹, Noh, Myung Hyun², Lee, Jae Yik², Lee, Sang Youl^{3*}

¹Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Andong National University, Korea

²Senior Researcher, Structure Research Group, Steel Solution Marketing Dept., POSCO, Korea

³Associate Professor, Department of Civil Engineering, Andong National University, Korea

Abstract - A finite element dynamic simulation is performed to gain an insight about the stiffened blast wall structures subjected to blast loading. 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 the high performance 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 dynamic response of the stiffened blast wall made of the high-performance steel considering high strain-rate effects. The numerical results for various parameters were verified by comparing different material models with dynamic effects occurred in the stiffened blast wall from the explosive simulation.

Keywords - Stiffened blast wall, High strain-rate effects, High performance steel, Explosive simulation

1. 서론

최근 각종 구조물은 빈번한 자연 및 인공재해에 노출되면서 각종 충격에 의한 손상 또는 붕괴로 인하여 심각한 인적·물적 피해가 증가하고 있다. 자연재해로부터 구조물에 발생할 수 있는 대표적인 충격은 지진, 태풍 및 쓰나미 등이 있고, 인공재해로는 테러 및 전쟁, 에너지산업으로 인한 각종 폭발, 차량 충돌 및 폭발로 인한 화재 등이 있다. 이러한 극

한충격으로부터 구조물의 손상을 최소화하여 인적·물적 피해를 예방하거나 복구하는 첨단화된 방재기술이 지속적으로 요구되고 있다.

구조물에 작용하는 자연재해로부터의 충격에 관한 동적 해석은 지속적으로 연구되어 왔으나, 인공적 재해로부터의 극한충격에 대한 상세 동적해석은 상대적으로 미진하다. 폭발과 같은 충격하중을 받는 구조물의 재질은 주로 강재로 되어 있으며, 대표적인 구조물은 해양플랜트 방폭벽이다. HSE(Health and safety executive)에서 발간된 연구 보고서에는 1/4 크기의 주름형 방폭벽을 대상으로 실제 실험과 유한요소 프로그램을 통한 방폭벽의 파라미터해석을 통해서 방폭벽의 폭발하중에 대한 동적응답특성에 대해서 분석하였으며, 재료의 고속 변형률 속도의 효과를 고려하기 위해 Cowper-symonds 구성방정식을 적용하는 기초 연구를 진행하였다^[1]. 그리고 Kim *et al.*은 웹과 플랜지에 발생하는

Note.-Discussion open until October 31, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 18, 2015; revised December 1, 2015; approved on December 14, 2015.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-54-820-5847 Fax. +82-54-820-6255

E-mail. lsy@anu.ac.kr

좌굴을 방지, 혹은 충격흡수를 통한 좌굴점 지연을 위한 방안을 제시하였다^[2]. 또한, Kim *et al.*은 국내 업체로부터 제안된 방폭벽의 여러 주름형 방폭벽을 대상으로 ABAQUS 유한요소 프로그램을 이용하여 최대 처짐 및 응력의 관점에서 최적의 형상을 제시하였다^[3]. 또한, Lee and Lee는 강재 압축재의 방폭 성능에 대한 중력하중효과의 해석적 연구를 수행하였다^[4]. 그러나, 폭발과 같은 극한충격을 받는 기존 구조물의 대부분은 일반강재 또는 스테인리스 강재로 구성되어 있으며, 그 중 스테인리스 강재를 주로 사용한다. 최근 소재산업의 발전으로 인하여 충격을 보다 효율적으로 흡수할 수 있는 다양한 고성능 소재가 개발되어 적용분야가 확대되고 있다^[5]. 이 중 고망간 강재는 오스테나이트계의 내마모강으로서 표면을 경화처리하고 경화되지 않은 내부는 연성을 유지하여 균열발생의 우려가 적으며 높은 충격흡수율을 가진다. 따라서, 고망간 강재는 극한충격을 받는 구조물에 대해서도 적용이 가능할 것으로 기대된다.

또한, 기존의 개발되어 적용된 방폭벽 구조는 주름형상을 갖는 경우가 대부분이다^[6]. 따라서, 본 연구에서는 보강재로 보강된 형상을 갖는 방폭벽에 대하여 확장하여 적용하고자 한다. 본 연구에서는 궁극적으로 해양플랜트 방폭벽 적용을 목적으로 하며 보강관으로 구성된 방폭벽 구조의 폭파해석을 통해 기존 강재와 고망간 강재의 방폭 성능에 대해서 비교 분석하고자 한다. 특히, 저변형률 속도 시뮬레이션을 통해 얻어진 준정적 실험데이터를 Cowper-symonds 구성방정식을 이용하여 동적방정식을 유도하며 고속 변형률 속도(High strain-rate)에 대한 재료의 물성을 예측하여 충격시 강재의 실제거동과 유사하게 하기 위해 폭발 충격속도에 따른 경화가 진행되는 효과를 상세 고려하고자 한다.

2. 고망간 강재 적용 Cowper-symonds 구성방정식

일반적인 충격 및 폭발해석은 재료비선형을 고려한 탄소성 모델, 기하학적 비선형을 고려한 다변형 모델 적용, 상이한 영역 사이의 접촉 비선형성이 고려되어야 한다. 강재의 인장 물성도출에 관한 해석은 재료비선형을 고려한 탄소성 모델에서의 비선형해석과 관련이 있으며 수치해석에서 쓰이는 강재에 대한 소성데이터는 실험에서 얻어지는 공칭응력(Engineering stress)과 공칭변형률(Engineering strain)이 아닌 충격에 의한 단면적 변화를 고려한 진응력(True

stress)과 진변형률(True strain)이 사용된다.

$$\sigma_T = \sigma_E(1 + \epsilon_E) \tag{1}$$

$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon_E) \tag{2}$$

여기서, σ_T , ϵ_T 은 진응력, 진변형률이고 σ_E , ϵ_E 는 공칭응력, 공칭변형률을 각각 의미한다.

진응력과 진변형률은 공칭변형률에서 단면적의 변화가 고려되기 때문에 수치해석 상에서는 기하학적 비선형도 같이 고려되어야 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 식 (1)과 식 (2)의 관계를 강재의 인장 실험을 통한 그래프로 나타내면 일반적인 강재의 응력-변형률 곡선과 같다. 이 곡선에서 항복응력 이후 재료의 경화가 시작되는 지점부터 진응력이 공칭응력보다 커지게 되는데, 이는 단면적이 감소함에 따라 이를 고려한 진응력이 크게 나타나는 결과이다. 그러나 수치해석 상에서는 변형률에 따른 응력의 변화를 고려하기가 매우 복잡하다. 즉, 비선형 해석상에서 수렴성의 문제가 발생하는데 응력-변형률 곡선의 기울기 변곡점에서 난이도 높은 알고리즘이 필요하다. 그러므로 일반적으로 단순화되고 선형화된 응력-변형률 곡선을 사용한다.

시간 이력해석에 관한 수치해석에서는 준정적해석과 동적해석으로 구분하여 진행할 수 있다. 충돌해석에서 준정적해석은 충돌물체의 속도와 가속도에 따른 관성력이 고려되지 않은 상태로 시간에 따른 정적해석을 진행한다. 이때는 충돌 물체들 사이에 힘의 평형에 의한 반발력만 고려된다. 준정적해석에서의 재료모델은 저변형률 속도실험에서 얻어진 데이터가 쓰이는데 정적 소성해석에 쓰이는 응력-변형률 곡선을 적용한다^[7]. 그러나 동적해석은 관성력이 존재하고, 이는 충돌물체에 추가적인 하중으로 작용한다. 따라서, 충격해석에서는 동적 마찰계수, 공기저항, 재료물성이 고려되어야 한다. 이 중 재료물성의 변화는 동적해석 결과에 있어서 큰 영향을 미치는데 이는 Fig. 1과 같이 충돌속도에 따라 재료의 경화도가 틀리기 때문이다. 특히, 충돌체가 강재인 경우 변형률속도에 따른 경화도가 고려되어야 하는데 이는 고속 인장시험을 통해 물성치가 얻어진다. 그러나 실제 실험을 통해서 구성방정식을 얻기 위해서는 수많은 반복적인 고속 인장시험을 해야 하는데 이에 따른 막대한 비용이 초래할 수 있다. 따라서 정적 시험 데이터로부터 동적방정식을 유도해야 하는 방법을 적용하는 것이 보다 효율적인 방법이 될 수 있다. 이를 위하여 Cowper-symonds의 구성방정식을 적용

하면 정적 시험데이터를 동적 방정식으로 유도하여 재료물성을 예측할 수 있고 Cowper-symonds 구성방정식은 식 (3)과 같다^[8].

$$\sigma_{d-Y} = \sigma_{s-Y} \left(1 + \left(\frac{\epsilon_p}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right) \quad (3)$$

여기서, σ_{d-Y} : 동적 유동응력
 σ_{s-Y} : 정적유동응력
 ϵ_p : 소성변형률 속도
 C, p : Cowper-symonds의 재료상수

3. 고속 변형률 속도를 고려한 강제 모델

본 연구에서는 LS-DYNA를 적용한 비선형 동적해석에 대하여 강재의 고속 변형률 속도를 고려하였다. 고속 변형률 속도를 상세 고려하기 위한 방법으로 두 가지 접근 방법을 제시하고자 한다. 첫 번째 방법은 물성값과 탄성영역 이후의 응력-변형률 곡선을 LS-DYNA에 적용하여 단순화된 응력-변형률 곡선을 구현하는 방법이다^[9]. 이 접근 방법은 LS-DYNA에서 Cowper-symonds 구성방정식을 적용할 수 있는 Mat-26 piecewise linear plasticity 재료 모델을 통해 Fig. 1과 같이 변형률속도에 따른 응력-변형률 곡선을 구현하여 고려할 수 있다. 두 번째 각 물성 값을 입력하면서 탄성 영역의 응력-변형률 곡선을 구현하는 방법은 첫 번째 접근 방법과 동일하나, 탄성 영역 이후의 곡선은 정적시험을 통해서 얻은 데이터를 직접 Cowper-symonds 구성방정식을 통하여 변형률 속도에 따른 응력-변형률 곡선을 예측한 후, 그

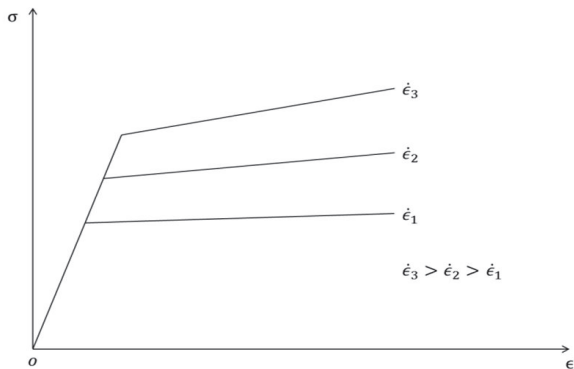
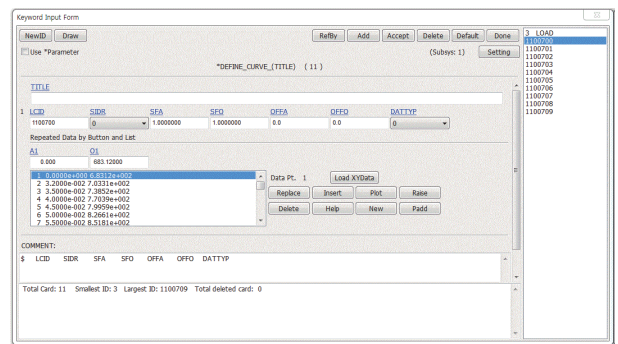
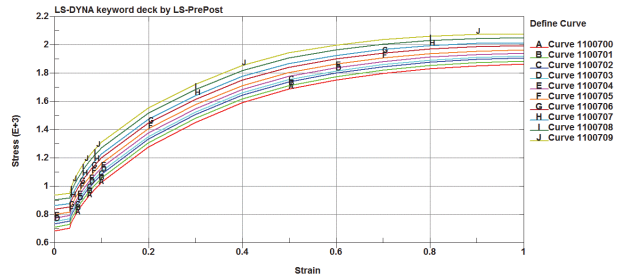


Fig. 1. Hardening characteristics of the strain-rate

값을 LS-DYNA 프로그램에 입력하는 방법이다. 첫 번째 방법은 단순화된 응력-변형률 곡선을 통해 해석을 수행하기 때문에 실제 강재의 거동과 차이가 발생한다. 반면, 두 번째 방법은 시험데이터를 Cowper-symonds 구성방정식을 통하여 직접 입력하기 때문에 첫 번째 방법보다 정확한 결과를 얻을 수 있다. 이 방법은 LS-DYNA keyword manager의 Define-curve 옵션에서 Fig. 2(a)와 같이 정적시험 데이터를 Cowper-symonds 구성방정식을 통하여 직접 대입하여 구한 응력-변형률 곡선의 값을 입력하게 된다. Fig. 2(b)는 이와 같은 방법을 적용하여 구현된 고속 변형률 속도 곡선을 보여준다. Define-table에서 변형률 속도에 따른 응력-변



(a) High strain-rate effects using the LS-DYNA program



(b) Induced high strain-rate curves

Fig. 2. High strain-rate effects using LS-DYNA program

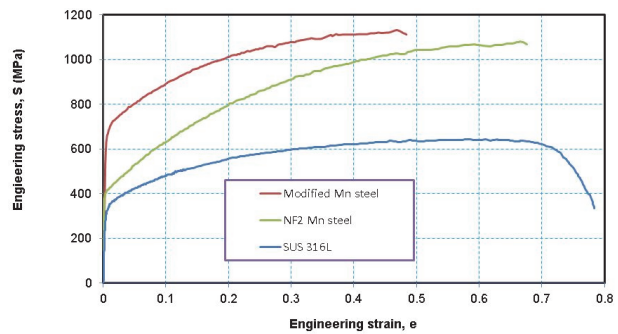


Fig. 3. Quasi-static test results of the material

형률 곡선을 정의하게 되며, Keyword manager의 Mat 옵션에서 탄성영역 이후의 응력-변형률 곡선을 정의하면 변형률 속도가 고려된 재료를 구현 할 수 있다^[10]. 따라서 본 연구에서는 두 번째 접근 방법에 착안하여 해석에 적용된 강재 중에서 Modified Mn, NF2 Mn은 실제 정적 시험을 수행하여 값을 도출하였고, SUS316L은 Choung *et al.*의 정적 시험 데이터를 사용하였으며 각 재료에 대한 인장시험 결과를 도시하면 Fig. 3과 같다. 정적 시험 결과는 로그 보간법에 의해 단순화 되어 Fig. 4와 같이 나타나며 식(3)에 정적 유동응력 (σ_{s-y})이 된다. Fig. 4는 Modified Mn 강재의 경우이고 해석에 적용된 강재모두 Fig. 4처럼 보간되어 Cowper-symonds 구성방정식에 적용되었다. 본 논문에서 식(3)의 p값은 5로 고정되어 있다고 가정하였으며, C 값은 소성변형률의 함수로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다^[11].

$$C = \alpha + \beta \epsilon_p^2 \quad (4)$$

여기서, α , β 는 재료의 상수를 예측하기 위한 각 계수이고 ϵ_p 은 소성변형률을 의미한다. 본 연구에서는 Choung *et al.*에 의해 선채 구조용 강재인 EH36(저온/상온)의 α , β 값을 각각 사용하여 C값을 도출하였다. Modified Mn은 EH36강재의 저온일 때, NF2 Mn과 SUS316L은 상온일 때의 α , β 값이 적용되었다. 본 해석에 적용된 강재의 재료상수 및 물성값은 Table 1에 도시하였다. Table 1의 값과 정적 유동응력 (σ_{s-y})값은 Cowper-symonds의 구성방정식을 이용하면 동적 유동응력(σ_{d-y})을 유도할 수 있으며 이 값을 변형률 속도와 소성변형률에 따라 정리하면 Fig. 2(b)와 같이 변형률 속도에 따른 응력-변형률 곡선을 얻을 수 있다.

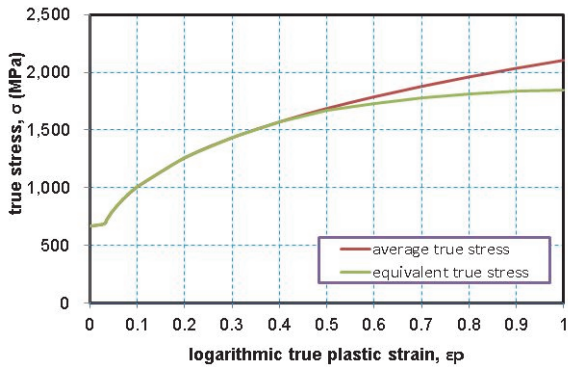


Fig. 4. Quasi-static test of the modified Mn by interpolation log

4. 수치해석 예제

4.1 해석 모델

수치해석 예제는 고망간 강재 Modified Mn, NF2 Mn과 SUS316L 강재를 적용한 보강판 형상의 방폭 구조에 대한 비선형 동적거동을 비교 분석한다. 특히, Cowper-symonds 구성방정식을 사용하여 고속 변형률속도의 적용 여부에 따른 효과를 분석하여 방폭에 대한 성능을 평가하고자 한다. 전술한 바와 같이 방폭 구조는 보강판 형상을 갖는 구조와 주름형 또는 파형판 구조가 있는데, 보강판 형태의 방폭벽에 대한 연구는 상대적으로 미미하므로 본 연구에서는 보강판 형상 구조에 대하여 방폭 성능을 분석하였다. LS-DYNA 프로그램을 적용한 폭파 해석은 솔리드 요소를 사용하여 3차원 해석을 수행하였다^[10]. Fig. 5는 본 해석에서 다루는 보강판형상의 방폭 구조에 대한 상세제원을 보여준다.

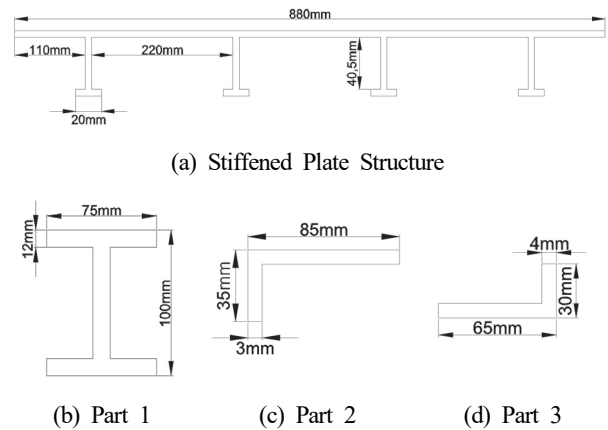


Fig. 5. Sections in detail of a stiffened plate structure model

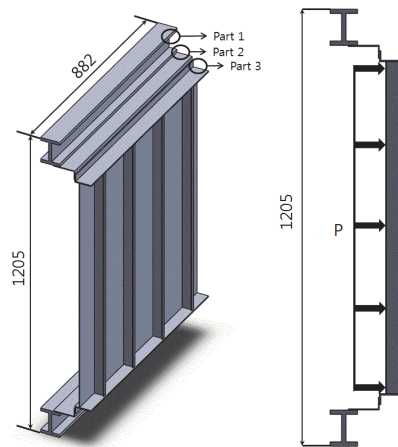


Fig. 6. Dimensions of blast structures with stiffened plate shapes

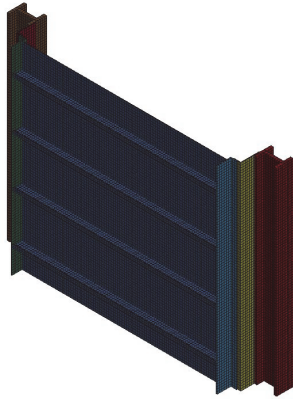


Fig. 7. Finite element model of stiffened blast structures

보강판으로 구성된 방폭벽의 두께는 2.0mm이고 방폭벽의 전체적인 모델형상은 Fig. 6과 같다. Fig. 7은 방폭벽의 3차원 유한요소 모델을 보여준다. 방폭벽을 구성하는 각각의 부품들은 접촉조건이 적용되어야 하는데, 본 연구에서는 용접된 상태를 구현하기 위하여 LS-DYNA에서 제공하는 Tied surface to surface 옵션을 사용하여 접촉 조건을 정의하였다. 경계조건은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 최하단과 최상단면에 6방향 모두 고정시켰다. 일반적인 폭발은 일정 범위 내에서 높은 에너지가 짧은 시간과 속도에 방출되는 현상으로 범위 내에서 압력파나 충격파의 형태로 발생되며 시간에 따른 하중 형태는 Fig. 8과 같다^[12]. 또한, HSE 보고서의 PPLR(Pulse pressure loading rig) 실험에 의해서 이상화된 Fig. 8(b)와 같은 하중으로 모델링이 가능하다^[1]. 따라서 본 연구에서는 이동변 삼각형 형태의 압력파를 가하여 해석을 수행하였으며, 적용한 폭발하중은 Fig. 9와 같다. 하중의 크기는 가스 생산용 설비에서 발생할 수 있는 최대 충격하

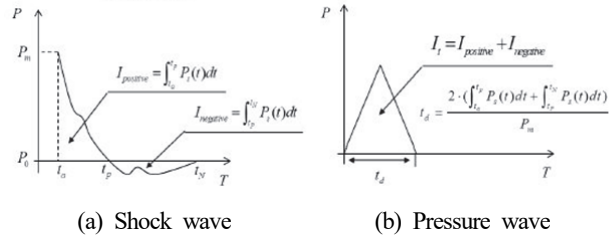


Fig. 8. Shock and pressure waves

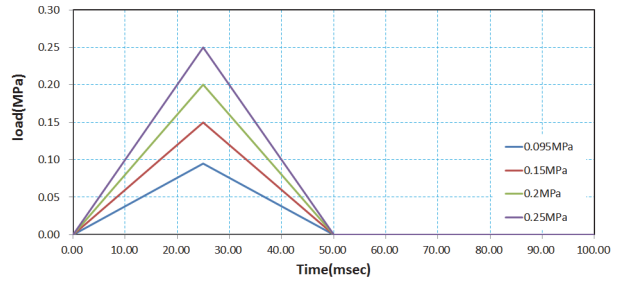


Fig. 9. Load cases

중인 0.1MPa를 기준 값으로 하여 하중값을 점점 증가시키면서 총 100msec까지 해석을 수행하였다^[5]. Table 1은 본 해석을 위해 적용한 강재의 재료물성과 Cowper-symonds 모델의 재료 상수를 각각 나타낸다. 세 가지 스테인리스 강재의 전체적인 재료 물성은 모두 같으나 고속 변형률 속도에 따른 응력-변형률 곡선은 각각 다르게 유도되어 적용하였다. 해석에 적용된 강재는 충격흡수에 효율적인 고망간 강재인 Modified Mn, NF2 Mn과 일반강재 SUS316L을 비교하여 해석을 수행하였다. 이 세 가지의 재료의 변형률 속도에 대한 응력-변형률 선도는 Fig. 10과 같다. Fig. 10(a)에서 변형률 속도가 높을수록 응력-변형률 선도가 위쪽에 위치하

Table 1. Cowper symonds material constants and property values and material properties

Items	Nominal grade of steel		
	Modified Mn	NF2 Mn	SUS316L
Density (t/mm^3)	7.97×10^{-9}		
Young's modulus (MPa)	206,000		
Poisson's ratio	0.3		
Static yield stress, σ_y (MPa)	663	401	310
Material constant, D	Variable		
Material constant, α	89,453.56	372,264.70	372,264.70
Material constant, β	32,937,522.3	9,397,325.23	9,397,325.23
Material constant, P	5	5	5
Dynamic yield stress, σ_d (MPa)	444	434	335

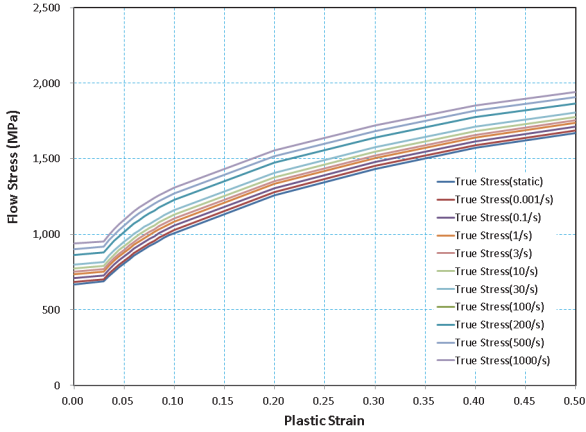
는 경향을 알 수 있는데, 이러한 결과는 충돌 속도에 따라 강재의 경화도가 달라지게 되며 이를 고려하기 위해서 Cowper-symonds 구성방정식에서는 변형률 속도가 올라

감에 따라 ϵ_p 값이 증가하면서 곡선도 위쪽에 위치하게 된다. 즉, 변형률속도가 높을수록 강재의 경화가 고려되어 강성이 높아진다는 것을 의미한다. 따라서, Modified Mn, NF2 Mn 은 SUS316L보다 강성이 좋다고 판단할 수 있으며 Modified Mn, NF2 Mn은 값은 비슷하지만 기울기가 서로 다르다. Fig. 10으로 부터 Modified Mn은 NF2 Mn보다 기울기가 완만하다는 것을 알 수 있으며, 이는 Modified Mn의 강성이 상대적으로 우수한 것으로 판단할 수 있다.

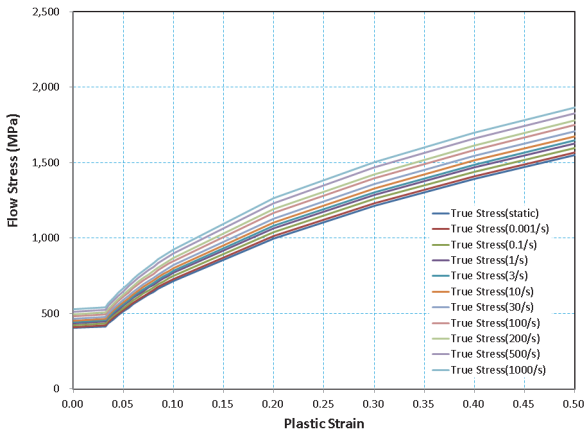
4.2 결과 분석

Fig. 11은 고속 변형률 속도가 고려된 경우 재료와 하중에 따른 최대 동적 변위를 각각 보여준다. 여기서 DY는 변형률 속도가 고려된 경우이고 ST는 고려되지 않은 경우를 각각 의미한다. Fig. 11로부터 Modified Mn이 최대변위와 잔류변형이 가장 적다는 것을 알 수 있으며, 하중의 크기가 커질수록 Modified Mn의 변위곡선이 NF2 Mn와 SUS316L의 변위 곡선과 점차 비슷해지는 것을 관찰 할 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 10에서 제시한대로 Modified Mn의 응력-변형률 곡선의 초기 응력 값이 가장 크고 변형률이 높아질수록 다른 재료들과의 응력 값 차이가 점점 줄어들기 때문인 것으로 분석 된다.

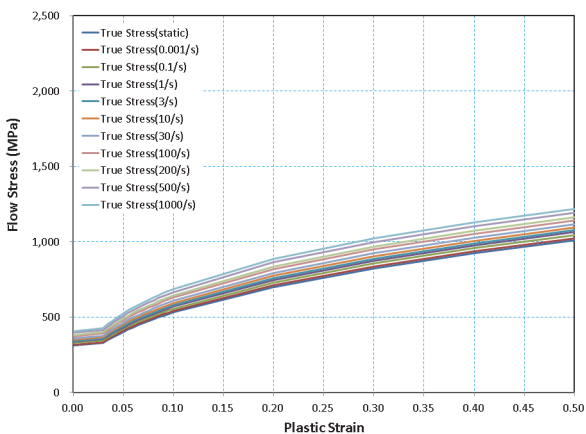
Fig. 12~15는 고속 변형률 속도의 적용 여부에 따른 최대 동적 변위를 비교하여 나타낸 것이다. 모든 재료가 변형률 속도를 고려한 경우가 변위 값이 적게 나타났다. 이러한 결과는 충돌 시 강재의 경화가 고려되기 때문이며, 이러한 거동은 실제 강재의 거동과 비슷한 것으로 분석되었다. 또한, Modified Mn이 변형률 속도의 효과가 가장 좋은 것으로 나타났다. 하중이 증가함에 따라 변형률 속도의 효과가 점점 줄어드는 것으로 나타났다. 하중이 0.2MPa인 경우에 Modified Mn은 하중이 사라진 0.05sec이후 변형된 형태로 부터 다시 재경화가 일어나면서 탄성의 성질을 가지지만 NF2 Mn과 SUS316L는 변형된 상태에서 탄성적 거동이 거의 사라진 것으로 나타났다. Fig. 16은 고속 변형률 속도가 고려된 상태에서의 최대 von mises stress를 나타낸다. 이러한 결과로부터 Modified Mn이 재료적 성능이 가장 뛰어나며 방폭 성능이 가장 우수한 것으로 판단된다. Fig. 17은 하중이 0.2MPa일 때 Modified Mn에 대한 시간에 따른 동적 변형 형상을 나타낸 것이다. 시간이 증가될 수록 중앙부에 최대응력이 집중되는 것을 관찰할 수 있으며, 충격흡수율이 우수하여 탄성적 거동을 보이는 것으로 분석되었다.



(a) Modified Mn

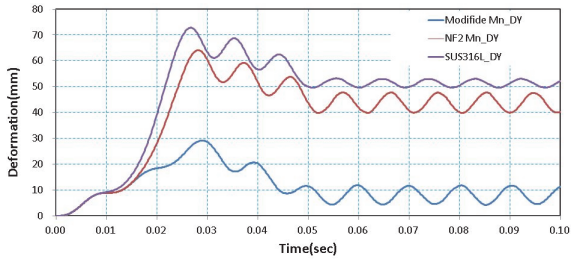


(b) NF2 Mn

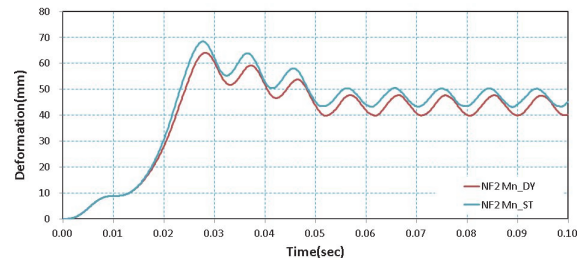


(c) SUS316L

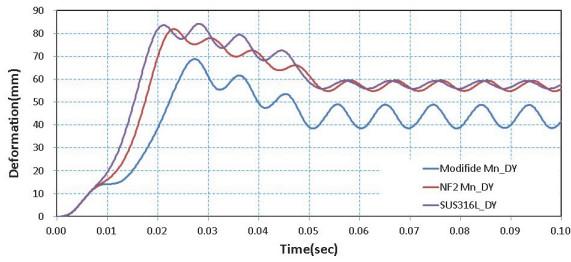
Fig. 10. Stress-strain curves according to high strain-rates



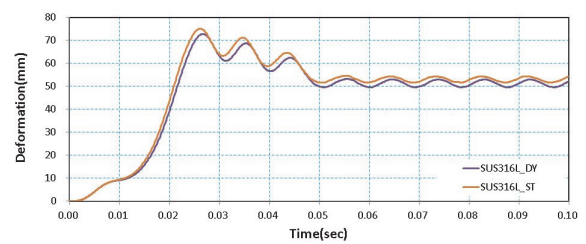
(a) 0.095MPa



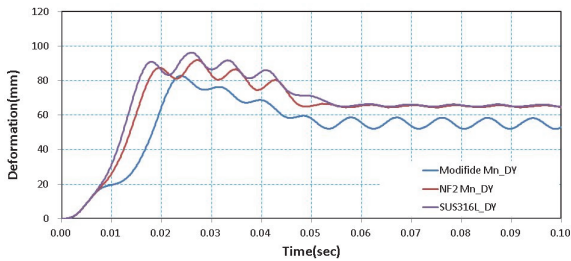
(b) NF2 Mn



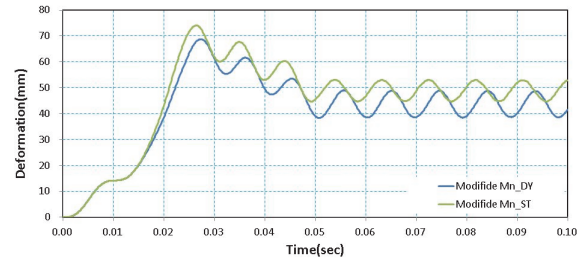
(b) 0.15MPa



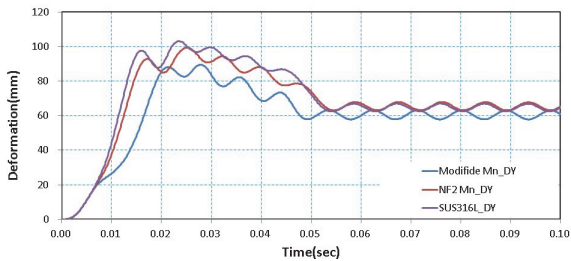
(c) SUS316L



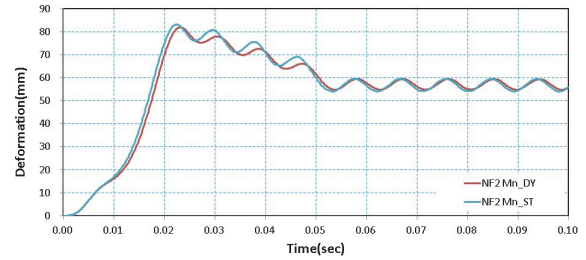
(c) 0.2MPa



(a) Modified Mn

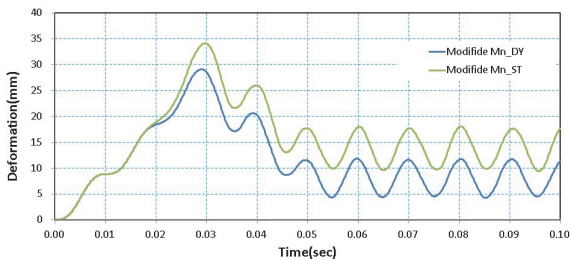


(d) 0.25MPa

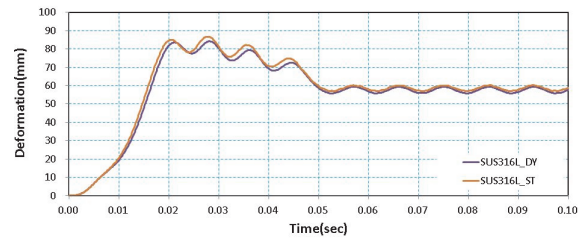


(b) NF2 Mn

Fig. 11. Comparison of induced maximum displacements for different material considering the high strain-rate effects



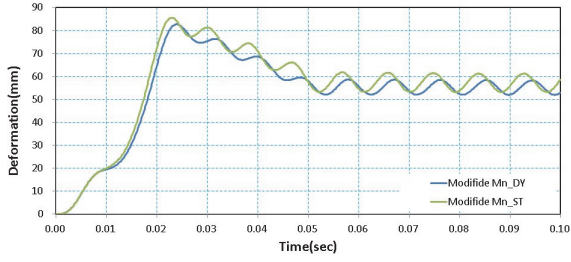
(a) Modified Mn



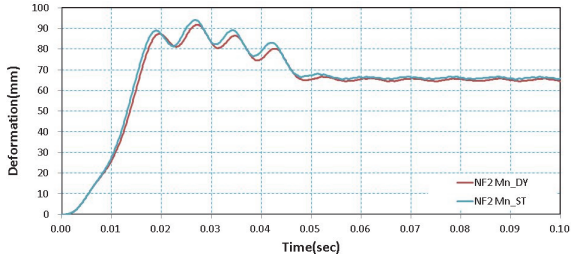
(c) SUS316L

Fig. 13. The induced maximum displacements according to high strain-rate effects (Load=0.15MPa)

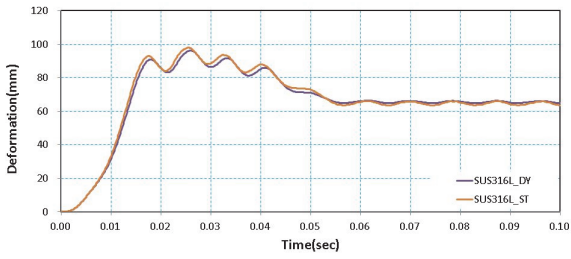
고속 변형률속도 효과를 고려한 폭발하중을 받는 보강형 방폭벽 구조의 동적 특성



(a) Modified Mn

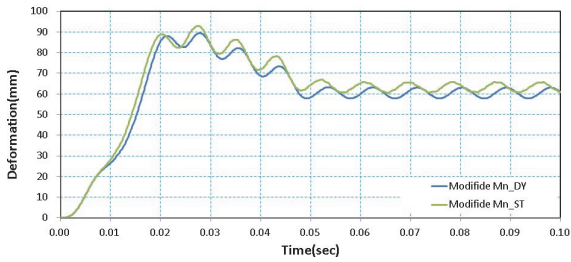


(b) NF2 Mn

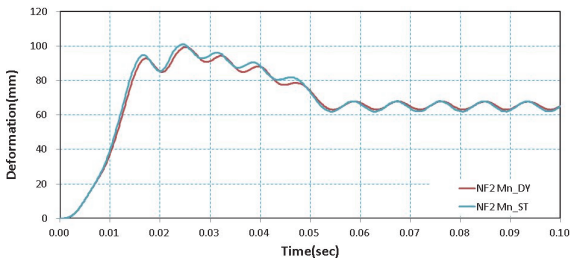


(c) SUS316L

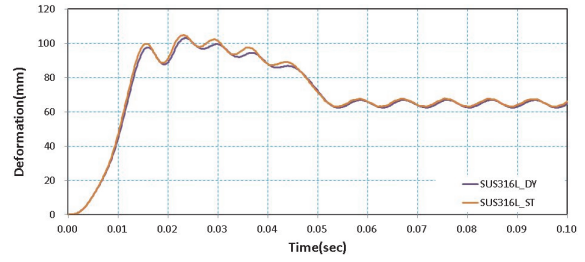
Fig. 14. The induced maximum displacements according to high strain-rate effects (Load=0.2MPa)



(a) Modified Mn



(b) NF2 Mn



(c) SUS316L

Fig. 15. The induced maximum displacements according to high strain-rate effects (Load=0.25MPa)

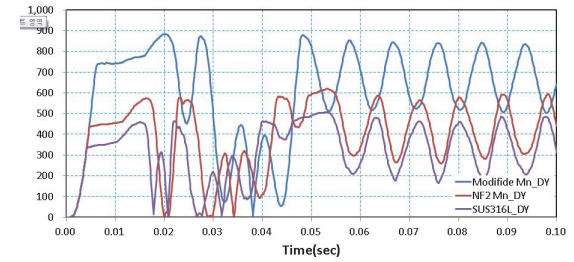
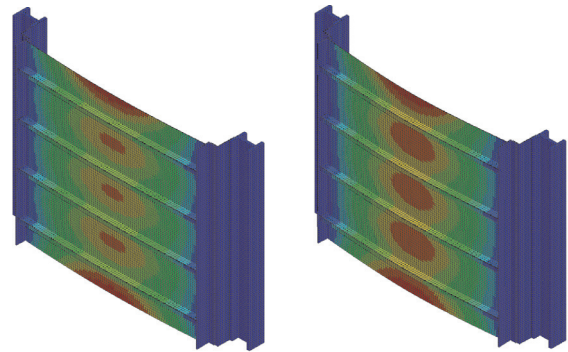
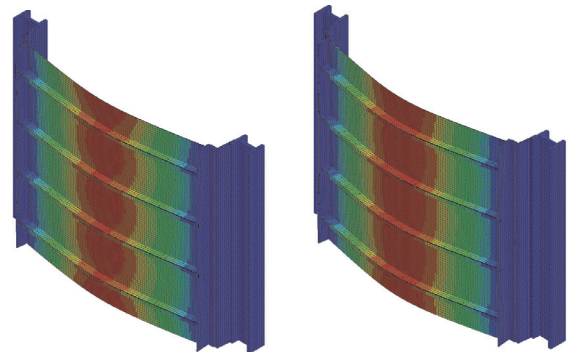


Fig. 16. The induced maximum von mises stress according to high strain-rate effects (Modified Mn, Load=0.25MPa)



(a) 0.01sec

(b) 0.015sec



(c) 0.02sec

(d) 0.03sec

Fig. 17. Deformed shapes for the increased time step (Modified Mn, Load=0.2MPa)

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 다양한 강재로 구성된 보강판 형상을 갖는 방폭벽 구조에 대하여 비선형 유한요소 동적 해석을 수행하였다. 특히, Cowper-symonds 구성방정식으로부터 동적 방정식을 유도하여 고속 변형률 속도를 고려한 재료의 물성을 유도하고 이를 적용하여 3차원 폭발 해석을 수행하였다. 해석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 충격 흡수용 강재인 Modified Mn, NF2 Mn와 일반 강재인 SUS316L 중 Modified Mn이 최대변위와 잔류 변형이 가장 적은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 3가지의 재료의 전체적인 물성은 같지만 변형률 속도가 고려된 응력-변형률 곡선 중 Modified Mn이 변형률에 따른 초기 응력값이 가장 크고 변형률이 증가함에 따라 3가지 재료의 응력값이 거의 같아지기 때문인 것으로 분석된다.
- (2) 고속 변형률 속도효과를 고려한 경우, 정적 응력-변형률 곡선을 사용한 결과보다 최대 변위 값이 상대적으로 작게 나타났다. 폭발과 같은 극한 충격에 대한 비선형 동적 해석에서 수렴성의 문제를 피하기 위해 선형화된 응력-변형률 곡선을 적용하게 되며, 이는 해석에 오차가 발생한다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 변형률 속도에 따른 응력변화가 고려되어야 한다.
- (3) Modified Mn이 변형률 속도의 효과가 가장 좋은 것으로 나타났으며, 하중이 증가함에 따라 변형률 속도의 효과가 점점 줄어드는 것으로 나타났다. NF2 Mn, Modified Mn은 하중이 제거된 후 변형된 형태로부터 다시 재경화가 일어나면서 탄성 거동을 보이거나 SUS316L는 변형된 상태에서 탄성적 거동이 거의 사라진 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 Modified Mn이 재료적 성능이 가장 뛰어나며 방폭 성능이 가장 우수한 것으로 판단된다.

본 연구 결과로부터 충격 흡수용 고성능 소재를 방폭 용도보다 적극적으로 적용한다면 다양한 극한 충격에 대한 구조물의 피해를 저감할 수 있을 것으로 기대된다. 향후 다양한 방폭 구조형식에 대하여 고성능 소재 적용에 따른 구조 성능을 분석연구가 필요하며, 개발 강재에 대한 고속인장시험을 통한 동적성능 검증 등의 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 (주)포스코의 지원과 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2015R1A2A2A01005637).

참고문헌(References)

- [1] Schleyer, G.K., and Langdon, G.S. (2006) *Pulse Pressure Testing of 1/4 Scale Blast Wall Panels with Connection (Phase II)*, HSE Research Report No. 404, Health and Safety Executive, UK.
- [2] 김상진, 손정민, 이종찬, 리춘보, 성동진, 백점기(2014) 폭발 하중을 받는 보강된 방폭벽의 동적 구조 응답특성에 관한 연구, 대한조선학회논문집, 대한조선학회, 제51권, 제5호, pp.380-387.
Kim, S.J., Sohn, J.M., Lee, J.C., Li, C.B., Seong, D.J., and Paik, J.K. (2014) Dynamic Structural Response Characteristics of Stiffened Blast Wall Under Explosion Loads, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, SNAK, Vol.51, No.5, pp.380-387 (in Korean).
- [3] 김기동, 고만기, 김동성, 주재용, 장대영(2012) 차량 속도-시간 이력을 이용한 고구격 종방향 연성 배리어 설계, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제12권, 제3호, pp.157-167.
Kim, K.D., Ko, M.G., Kim, D.S., Joo, J.W., and Jang, D.Y. (2012) Design of High-Performance Longitudinal Flexible Barrier Using Vehicle Velocity-Time History, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.12, No.3, pp.157-167 (in Korean).
- [4] 이경구, 이문창(2015) 강재압축재의 방폭성능에 대한 중력하중효과의 해석적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제3호, pp.273-280.
Lee, K., and Lee, M.C. (2015) Analytical Study on Effects of Gravity Load on Blast Resistance of Steel Compressive Members, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.3, pp.273-280 (in Korean).
- [5] 김봉주, 김병훈, 손정민, 백점기, 서정관(2012) 해양플랜트 설비 Corrugated Blast Wall의 폭발 충격응답 인자 특성에 관한 파라메트릭 연구, 한국해양공학회지, 한국해양공학회, 제26권, 제3호, pp.46-54.
Kim, B.-J., Kim, B.-H., Sohn, J.-M., Paik, J.-K., and Seo, J.-K. (2012) Parametric Study on Explosion Impact Re-

- response Characteristics of Offshore Installation's Corrugated Blast Wall, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Korean Society of Ocean Engineering, Vol.26, No. 3, pp.46-54 (in Korean).
- [6] 노명현, 박규식, 이재익(2015) 고에너지흡수 신소재 적용 해양플랜트 파형 방폭벽의 폭발 저항 성능, 한국복합신소재구조학회 논문집, 한국복합신소재구조학회, 제6권, 제1호, pp.38-44.
- Noh, M.-H., Park, K.-S., and Lee, J.-Y. (2015) Explosion Resistance Performance of Corrugated Blast Walls for Offshore Structures Made of High Energy Absorbing Materials, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, Vol.6, No.1, pp.38-44 (in Korean).
- [7] 이정환, 오재용, 박상후, 남기중, 류광현, 신석훈, 신보성 (2010) 변형률 속도 효과를 고려한 355nm UV 레이저 다중 펄스 미세가공의 전산해석에 관한 연구, 한국정밀공학회지, 한국정밀공학회, 제27권, 제10호, pp.29-33.
- Lee, J.H., Oh, J.Y., Park, S.H., Nam, G.-J., Ryu, G.-H., Shin, S.-H., and Shin, B.-S. (2010) A Study on the Computational Analysis of 355nm UV Laser Multiple-Pulsed Micro Machining Considering the Strain Rate Effect, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, KSPE, Vol.27, No.10, pp.29-33 (in Korean).
- [8] Cowper, G.R., and Symonds, P.S. (1957) *Strain-Hardening and Strain-Rate Effects in the Impact Loading of Cantilever Beams*, Technical Report, Report No. C11-28, Brown University, USA.
- [9] Livermore Software Technology Corp. (2007) *LS-DYNA Keyword User's Manual, Ver. 971*, LSTC, USA.
- [10] Livermore Software Technology Corp. (2001) *LS-DYNA Theory Manual*, LSTC, USA.
- [11] Choung, J., Nam, W., and Lee, J.-Y. (2013) Dynamic Hardening Behaviors of Various Marine Structural Steels Considering Dependencies on Strain Rate and Temperature, *Marine Structures*, Elsevier, Vol.32, pp.49-67.
- [12] 최광호, 김용구(2002) 건축물의 방폭 설계시 폭발하중의 모델링 및 적용 기법, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제14권, 제2호, pp.63-69.
- Choi, K.-H., and Kim, Y.-K. (2002) Modeling of Blaster Load and Its Application in Blaster Resistance Design, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.14, No.2, pp.63-69 (in Korean).

요 약 : 본 연구는 폭발하중을 받는 보강판으로 구성된 방폭벽 구조에 대하여 유한요소 동적해석을 수행하였다. 수치 시뮬레이션은 서로 다른 재료로 구성된 경우에 대하여 비교 검증하였으며, 폭발 시뮬레이션 데이터를 기반으로 폭발하중에 대한 방폭벽의 동적거동을 상세 규명하였다. 충격흡수력이 좋은 고강간 강재로 구성된 방폭벽의 경우 충격에 대한 성능이 상대적으로 우수한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 LS-DYNA 프로그램을 적용하여 유한요소 충격해석을 수행하였으며, 고속 변형률 속도 효과를 추가로 고려하여 고강간 강재로 보강된 방폭벽에 대하여 확장하였다. 다양한 매개변수를 적용한 수치해석 결과는 폭발 시뮬레이션으로부터 보강된 방폭벽 구조의 동적 효과를 비교 분석하여 서로 다른 재료의 적용효과를 보여준다.

핵심용어 : 보강형 방폭벽, 고속 변형률속도 효과, 고성능 강재, 폭발 시뮬레이션
