

강재압축재의 방폭성능에 대한 중력하중효과의 해석적 연구

이경구¹ · 이문창^{2*}

¹교수, 단국대학교, 건축공학과, ²연구원, 단국대학교, 건축공학과

Analytical Study on Effects of Gravity Load on Blast Resistance of Steel Compressive Members

Lee, Kyungkoo¹, Lee, Moon Chang^{2*}

¹Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin, 448-701, Korea

²Researcher, Dept. of Architectural Engineering, Dankook University, Yongin, 448-701, Korea

Abstract - Equivalent Single-Degree-of-Freedom(SDOF) analysis, most used for blast-resistant design, does not consider the effects of gravity load on the performance evaluation of blast resistance of structural members. However, since there exists gravity load on columns and walls of structures, the blast resistance of structural members should be evaluated considering gravity load on them. In this paper, an approach to reflect the gravity load effects on the equivalent SDOF analysis for dynamic blast response of structural members is proposed. For this purpose, the parametric studies using finite element analysis were performed by varying maximum blast load, blast load duration, and gravity load with constant the resistance and natural period of a structural member. The finite element analysis results were compared with the equivalent SDOF analysis results and the blast response of the structure member was estimated by conducting finite element analyses for various gravity loads. Finally, a graphical solution for ductility of a structural member with the variables of blast load, gravity load and structural member properties was developed. The blast response of structural members under gravity load could be estimated reasonably and easily by using this graphical solution.

Keywords - Blast response, Equivalent SDOF, Finite element analysis, Gravity load, Blast resistance, Dynamic analysis

1. 서론

폭발하중에 대한 구조물의 방폭성능에 대한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 주요 건축물 및 산업 시설물에서 발생하는 테러와 사고에 의한 피해는 치명적이다. 이에 국외에서는 랜드마크적 건물 및 주요 국가시설은 테러 폭발물에 대한 방폭설계가 요구되고, 플랜트 등의 산업 시설물은 가스 폭발에 대한 방폭설계가 요구되고 있다^[1]. 국내의 민

간 건축물 경우, 2012년에 “초고층 및 지하연계 복합건축물 재난관리에 관한 특별법”을 제정하고 사전재난영향성검토 내용에 방법, 보안, 테러 대비 시설설치 및 관리계획을 포함하고 있다. 그러나 여기에서는 배치계획이나 감시체계 등 계획적 내용만을 다루고 있다.

방폭설계법은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 등가단자유도(SDOF) 동적해석법으로서 미국방부 UFC 3-340-02^[2] 기준에서 제시하는 표준해석법이며 방폭설계에서 가장 널리 사용하는 해석법이다. 두 번째는 “Macro” level 해석으로 SAP, ETABS, STAAD 등의 구조해석 프로그램을 이용하는 해석법이다. 세 번째는 “Micro” level의 정밀해석법으로 ABAQUS, LS-DYNA, AUTODYN 등의 유한요소해석 프로그램을 이용하여 구조부재 및 접합부 상세, 강성, 연성, 파괴모드 등을 고려한 정밀해석이 가능하다.

등가단자유도 동적해석법에서는 반응모드를 가정하고 폭

Note.-Discussion open until December 31, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 10, 2014; revised March 11, 2015; approved on March 20, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-8005-3745 Fax. +82-31-8021-7225

E-mail. lmchang@dankook.ac.kr

발하중 시간이력에 대한 구조물의 비선형 동적응답을 산정한다. 그러나 이 등가단자유도 동적해석법은 구조부재의 방폭성능평가에 있어서 중력하중을 전혀 고려하지 않고 있다. 구조물의 기둥 및 벽체의 경우 일반적으로 상당한 중력하중이 존재한다^{[3],[4],[5]}. 이러한 중력하중은 구조부재의 방폭성능 및 전체 구조물의 안정성에 불리하게 작용할 것이다. 그러므로 폭발하중을 받는 구조부재의 동적응답을 정확히 예측하기 위해서는 중력하중을 고려하여야 한다. 국내에서는 이경구^{[6],[7],[8],[9]} 등이 강재기둥의 폭발응답과 잔여압축성능에 대한 중력하중 효과에 대하여 해석적 연구 결과를 일부 제시하였으나, 중력하중과 구조부재의 폭발응답과의 관계에 대한 구체적인 연구는 미흡한 실정이다.

이 논문에서는 강재압축재의 방폭성능평가를 위한 등가단자유도 동적해석법에 중력하중을 반영하는 방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 기본 압축재를 대상으로 폭발하중 크기 및 지속시간을 달리하여 유한요소해석을 수행하였다. 우선, 중력하중을 고려하지 않은 경우에 대하여 등가단자유도 해석에 의한 구조부재의 응답과 유한요소해석에 의한 구조부재의 응답을 비교 검증하였다. 다음으로, 다양한 중력하중을 작용한 경우에 대하여 유한요소해석에 의한 구조부재의 폭발응답을 파악하였다. 최종적으로 유한요소해석 결과를 도표화하고 중력하중을 고려한 등가단자유도 동적응답을 예측하는 방안을 도출하였다.

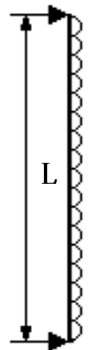
2. 등가단자유도 동적해석

2.1 해석절차

등가단자유도 동적해석은 폭발하중이 작용하는 구조물의 변형이 주로 단일 모드에 의해 형성된다고 가정하여 구조물의 변형형상과 저항력을 단자유도계로 간략화한 것이다. 구조부재의 등가단자유도 해석절차는 하중에 따른 변형형상과 실제 구조부재와 단자유도계 사이의 strain energy 등가개념에 기초한다. 우선, 경계조건과 하중분포를 고려한 변환계수(transformation factors, K_L, K_M)를 산정한다(Table 1 참조). 이 변환계수를 이용하여 실제 구조부재의 강성, 질량, 하중을 등가의 값들로 치환하고, 이를 등가단자유도계의 동적평형방정식에 적용한다(식 1 참조).

$$K_M \ddot{M}y + K_L R = K_L F \quad \text{또는} \quad K_{LM} \ddot{M}y + R = F \quad (1)$$

Table 1. Transformation factor, stiffness and resistance

Loading diagram	Variables	Elastic range	Plastic range
	Load Factor, K_L	0.64	0.50
	Mass Factor, K_M	0.50	0.33
	Load-Mass Factor, $K_{LM} = K_M / K_L$	0.78	0.66
	Stiffness, K	$\frac{384EI}{5L^4}$	0
	Resistance, R	-	$R_u = \frac{8M_P}{L^2}$

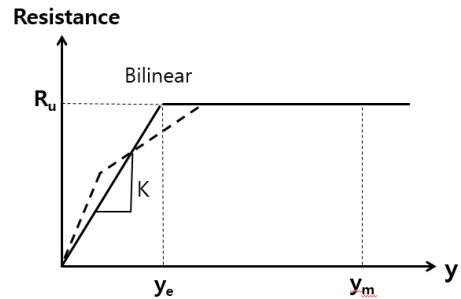


Fig. 1. Equivalent resistance of SDOF

일반적으로 등가단자유도계의 저항력은 strain energy 등가개념을 통해 Fig. 1과 같이 탄성영역과 등가휨강도(R_u) 도달 후의 소성영역을 갖는 탄성-소성의 이선형 곡선으로 나타낸다.

폭발하중을 받는 구조물의 해석에는 순간적으로 매우 큰 하중이 순간적으로 사라지는 하중특성을 고려한 구조물의 동적 거동을 고려해야 한다. 다시 말해, 폭발하중이 구조부재를 매우 빠른 시간에 변형을 야기시켜, 결과적으로 재료의 변형률속도(strain rate)가 매우 높게 형성된다. 높은 변형률속도는 재료의 정적물성치를 변화시킨다. 대표적인 현상이 콘크리트, 철근, 강재 등의 재료항복강도 증가현상이다. 등가휨강도(R_u) 산정에서 이러한 변형률 속도 효과를 반영한 동적증가계수를 적용해야 한다.

폭발하중은 초기에 주변의 대기와 평형상태를 이루기 위해 압력을 순간적으로 상승시킨 후, 아주 짧은 시간동안 감소되는 충격파형태를 이룬다. 폭발하중은 대기압 이상의 정압 구간(Positive phase)과 대기압 이하의 부압구간(Negative phase)으로 구성되며, 부압구간의 폭발하중은 구조부재 응

답에 상대적으로 영향이 크지 않기 때문에 일반적인 방폭설계에서는 고려하지 않는다^[10]. 또한 폭발하중의 시간이력곡선은 동일한 최대하중과 충격량을 갖는 삼각형 형상의 하중 곡선으로 간략화하는 것이 일반적이다. 삼각형 형상의 폭발하중은 최대폭발하중(F_o)과 지속시간(t_d)으로 정의된다.

이렇게 결정된 등가단자유도계와 폭발하중을 이용하여 직접 비선형 동적해석을 수행한 후, 요구되는 변위 및 지점회전각을 예측한다. 미국 TM 5-856^[11]에서는 탄소성(Elasto-Plastic) 단자유도계의 폭발응답을 위한 도표해법(Chart Solution)를 제시하고 있다. 도표해법을 이용할 경우, 구조부재의 휨강도 및 고유주기와 폭발하중 크기 및 지속시간을 알면, 구조부재의 요구 연성(ductility)과 변위를 근사적으로 예측할 수 있다.

2.2 해석 모델 및 변수

이 논문에서는 양단이 단순지지된 높이 3600mm인 직사각형 단면의 압축재를 모델의 기본으로 하였다. 다양한 압축재 단면을 일반화하기 위하여 직사각형 단면형상과 1000mm 단면폭을 가정하였다. 또한 미국의 W14×99 단면과 유사한

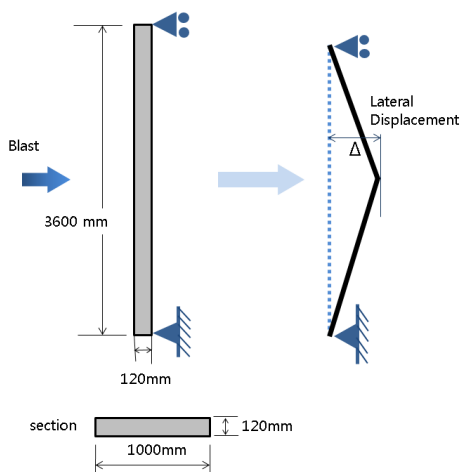


Fig. 2. Boundary condition and deformation

Table 2. Section properties and member strengths^[12]

Member	A_s (mm^2)	Z (mm^3)	F_y N/mm	M_p (kNm)	P_n (kN)
Length: 3600	120,000	3,600,000	352	1,267	17,187
Section: 1000×120					

소성단면계수를 갖도록 부재의 두께를 120mm로 결정하였다(Fig. 2 참조).

재료물성치는 강재 A36으로 가정하고, 정적공칭항복강도 $248N/mm^2$, 정적강도증가계수 1.1, 동적증가계수 1.29를 적용하여 동적항복강도 $352N/mm^2$ 를 산정하였다^[2]. 탄성계수는 $E=205,000N/mm^2$ 를 적용하였다. 해석부재의 단면특성 및 강도를 Table 2에 정리하였다.

등가단자유도 동적해석을 위하여 구조부재를 2.1절의 해석절차에 따라 등가단자유도계로 변환하였다. 등가질량, 등가강성, 등가휨강도, 고유주기 등 등가단자유도 동적해석을 위해 필요한 변수들을 Table 3에 정리하였다.

변수해석을 위하여 폭발하중의 크기와 지속시간을 변수로 하였다. 미국 TM 5-856^[8]의 도표해법에서도 알 수 있듯이, 구조부재의 휨강도 대 폭발하중 크기의 비와 폭발하중 지속시간 대 구조부재의 고유주기의 비가 구조부재의 폭발응답을 결정하는 주요 변수이다. 이 연구에서는 동일한 단면, 높이, 지지조건을 통해 구조부재의 휨강도와 고유주기를 일정하게 유지시키고, 폭발하중의 크기와 지속시간을 달리함으로써 앞서 기술한 두 가지 변수효과를 고려하였다. 다시 말해, 등가단자유도계의 등가휨강도(R_u)를 기준으로 최대폭발하중(F_o)을 달리하여, 등가휨강도-최대폭발하중 비(R_u/F_o)가 0.6 ~ 1.5의 범위를 갖도록 하였다. 이 값들을 Table 4에 정리하였다. 또한, 구조부재의 고유주기(t_n)를 기준으로 폭발하중 지속시간(t_d)을 달리하여, 지속시간-고유

Table 3. Variables for SDOF dynamic analysis

Variables	Values
$R_u = \frac{8M_p}{L}$	2,815 (kN)
$K = \frac{384EI}{5L^3}$	49.1 (kN/mm)
$y_e = \frac{R_u}{K}$	57.4 (mm)
Elastic $K_{LM} = \frac{K_M}{K_L}$	0.78
Plastic $K_{LM} = \frac{K_M}{K_L}$	0.66
Average $K_{LM} = (Elastic K_{LM} + Plastic K_{LM})/2$	0.72
$M_e = K_{LM} \times M$	2.4 (kNsec ² /m)
$t_n = 2\pi \sqrt{\frac{M_e}{K}}$	0.044 sec

Table 4. Equivalent resistance and maximum blast load

R_u/F_o	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5
F_o (kN)	4,692	4,021	3,519	3,128	2,815	2,346	1,876

Table 5. Blast load duration and natural period

t_d/t_n	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0
t_d (s)	0.0044	0.0088	0.0132	0.0176	0.022	0.0264	0.0352	0.044

주기 비(t_d/t_n)가 0.1 ~ 1.0의 범위를 갖도록 하였다. 이 값들을 Table 5에 정리하였다. 모든 폭발하중은 구조부재에 등분포하중으로 하였다.

2.3 등가단자유도 해석결과

앞 절에서 제시한 다양한 폭발하중을 등가단자유도계에 적용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 해석은 MATLAB 기반 구조부재 폭발응답해석 프로그램^[13]을 사용하였다. Fig. 3은 해석결과의 일례로서 $R_u/F_o=1.0$, $t_d/t_n=1.0$ 일 때의 부재의 수평변위 시간이력곡선을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 전체적으로 최대 수평변위는 초기에 발생하였으며, 이를 최대변위(y_m)로 정의하였다.

구조부재의 연성(μ)은 다음과 같이 정의하였다.

$$\mu = \frac{y_m}{y_e} \tag{2}$$

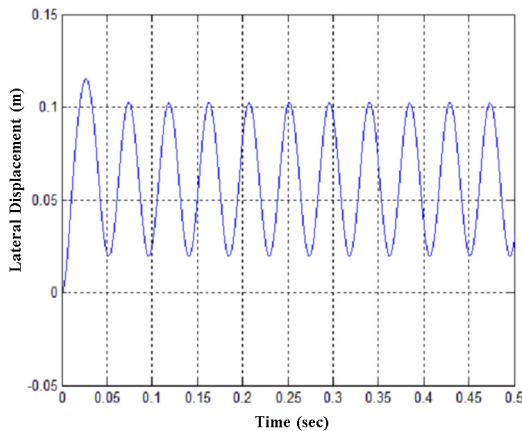


Fig. 3. Typical horizontal displacement from SDOF nonlinear dynamic analysis

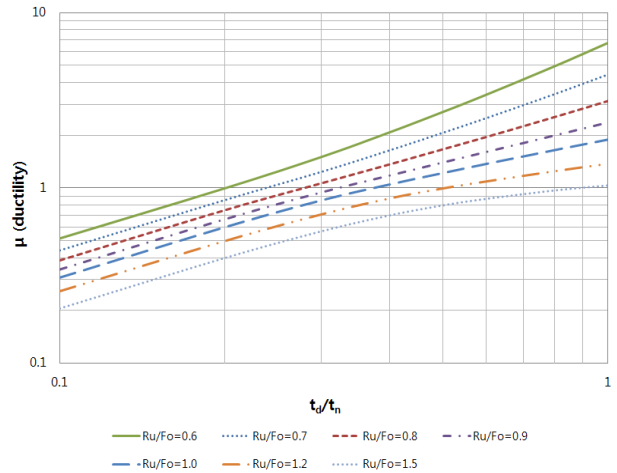


Fig. 4. Prediction of ductility from SDOF nonlinear dynamic analyses

여기서, y_e 는 부재가 항복할 때의 변위이다.

Fig. 4에서는 지속시간-고유주기 비(t_d/t_n)와 구조부재 연성(μ)과의 관계를 기본적으로 나타내었고, 등가힘강도-최대폭발하중 비(R_u/F_o)가 다른 곡선들을 비교하였다. R_u/F_o 가 일정한 경우 t_d/t_n 값이 클수록 연성이 커지며, t_d/t_n 이 일정한 경우 R_u/F_o 이 작을수록 연성이 커짐을 알 수 있다. 특히, 이 논문에서 선정한 $t_d/t_n=0.1 \sim 1.0$ 과 $R_u/F_o=0.6 \sim 1.5$ 범위에서는 연성과 t_d/t_n 이 거의 선형관계임을 보여준다. 이 등가단자유도 비선형 동적해석결과는 TM 5-856에서 제시하는 도표해법과 매우 일치하였다.

3. 유한요소해석

3.1 해석 모델링

동일한 구조부재와 폭발하중에 대하여, 폭발해석에 널리 사용되는 유한요소해석 프로그램 LS-DYNA^{[14],[15]}를 활용하여 명시적(explicit) 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 해석모델에는 유한요소로서 8절점 육면체 요소를 적용하였다. 한 개의 요소는 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 30\text{mm}$ 크기로 세밀하게 하여 가능한 정확한 결과를 도출하고자 하였다(Fig. 5 참조).

재료모델은 등가단자유도 해석모델과 동일한 탄성계수와 동적항복강도를 적용하였고, 탄소성(elasto-plastic) 이선형 곡선으로 간략화하였다. 해석모델 경계조건은 하단부의

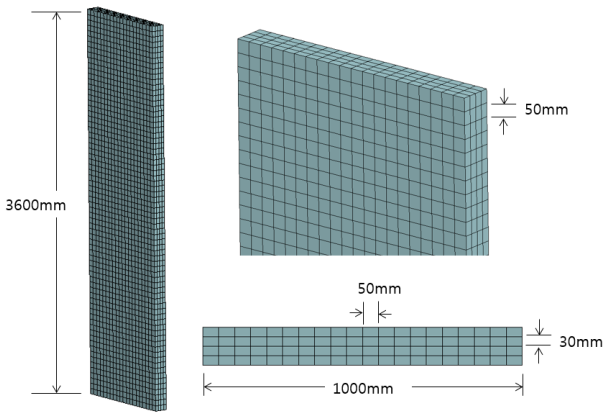


Fig. 5. Finite element sizes

두께 중앙부 절점은 모든 방향에 대하여 변위구속하였고, 상단부 두께 중앙부 절점은 부재축력방향을 제외하고 변위구속하였다. 즉, 폭발하중에 대하여 부재 하단부 핀조건과 상단부 롤러조건으로 하였다(Fig. 2 참조). 이 유한요소해석에서는 중력하중을 고려하지 않은 경우와 중력하중을 고려한 경우에 대하여 구조부재의 폭발응답을 평가하고 하였다. 중력하중을 고려한 경우 초기중력하중재하단계와 폭발하중재하단계의 두 단계로 나누어 해석을 수행하였다. 폭발응답에 대한 중력하중 효과를 관찰하기 위하여, 중력하중크기를 변수로 추가하였다. 중력하중(P_i)은 압축재의 공칭압축강도(P_n)의 0.1배에서 0.5배까지 $0.1P_n$ 차이를 두었다.

3.2 폭발저항성능평가

3.2.1 중력하중을 고려하지 않은 압축재의 폭발저항성능평가

등가단자유도해석과 동일하게 최대폭발하중 및 지속시간을 변수로 하여 다양한 해석을 수행하였다. 이 해석의 목적은 유한요소해석 결과를 등가단자유도해석 결과와 비교하기 위함이다.

Fig. 6은 지속시간-고유주기 비(t_d/t_n) 및 등가힘강도-최대폭발하중 비(R_u/F_o)와 구조부재 연성(μ)과의 관계를 나타낸 것이며, Fig. 3의 등가단자유도 동적해석결과와 비교하였다. 유한요소해석결과는 실선으로 등가단자유도해석결과는 점선으로 표현하였다. 전체적으로 두 해석결과는 유사함을 보여주고 있다. 비록 t_d/t_n 가 0.5 이상이 될수록 두 해석결과의 약간의 차이가 확인되지만, 충분히 근사한 결과를 보여주고 있다. 그러므로 이 연구에서 적용한 유한요소해석 모델은 중력하중을 고려한 구조부재의 방폭성능평가를 위해

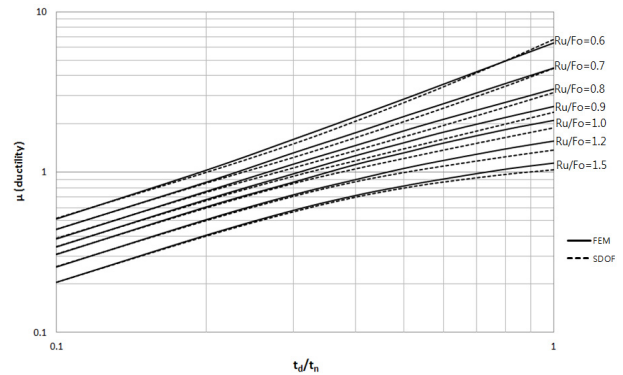


Fig. 6. Comparison between SDOF and FEM results

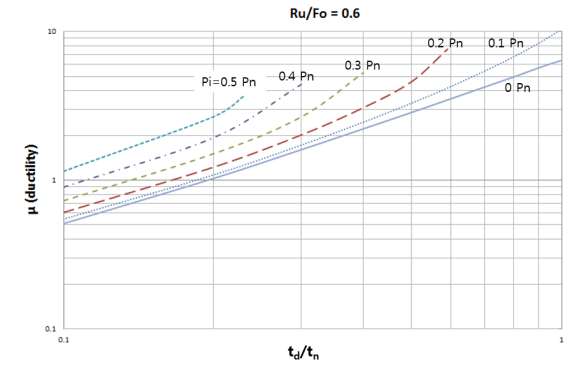
충분히 합리적이다.

3.2.2 중력하중을 고려한 압축재의 폭발저항성능 평가

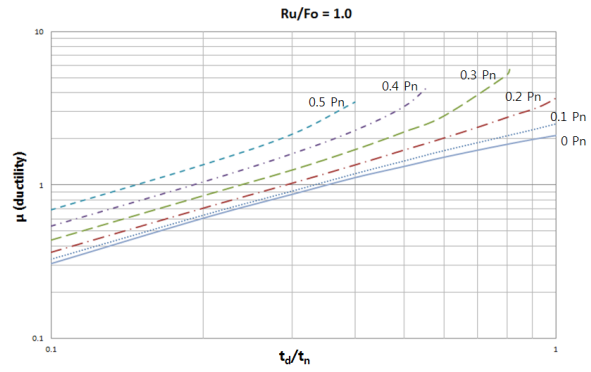
이 해석에서는 중력하중을 작용한 상태에서 폭발하중을 받았을 때 구조부재의 변형에 대하여 평가하고자 하였다. 이 논문에서 선정한 $t_d/t_n = 0.1 \sim 1.0$ 및 $R_u/F_o = 0.6 \sim 1.5$ 의 범위에서 폭발하중을 작용하였고, 초기에 재하한 중력하중은 기본적으로 $P_i = 0.1 \sim 0.5P_n$ 의 범위로 하였다. 그러나 폭발하중에 의해 변형이 과대하여 중력하중을 더 이상 저항하지 못하는 순간의 중력하중을 최대중력하중으로 간주하여 이를 초과하는 중력하중은 제외하였다. 따라서 폭발하중 변수에 따라 최대중력하중은 다음을 주의하여야 한다.

Fig. 7은 유한요소해석결과를 중력하중, 등가힘강도-대-최대폭발하중 비, 고유주기-대-지속시간 비에 따른 구조부재의 소요연성을 나타낸 그림이다. 기존의 등가단자유도 동적해석 도표와 유사한 형식으로 표현하였으며, 각각의 R_u/F_o 에 대하여, 중력하중크기에 따른 t_d/t_n 과 연성과의 관계로 표현하였다.

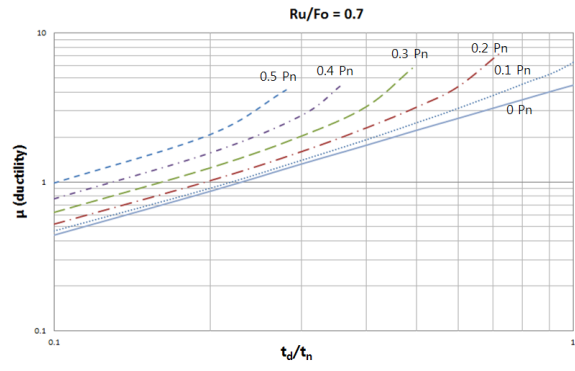
모든 R_u/F_o 에 대하여, t_d/t_n 일 일정할 때 중력하중(P_i)이 커질수록 소요연성이 커짐을 보여준다. 또한 모든 R_u/F_o 에 대하여, 중력하중(P_i)일 일정할 때 t_d/t_n 이 커질수록 소요연성이 커짐을 보여준다. 한편, 다른 R_u/F_o 를 가진 Fig. 7 (a)~(g) 각각에서, 동일한 중력하중(P_i)과 t_d/t_n 에 해당하는 소요연성을 살펴보면, R_u/F_o 로 커질수록 소요연성이 작아짐을 확인할 수 있다. 이 결과를 통해 구조부재의 폭발응답인 소요연성은 t_d/t_n 및 중력하중(P_i)에 비례하고 R_u/F_o 반 비례함을 알 수 있다.



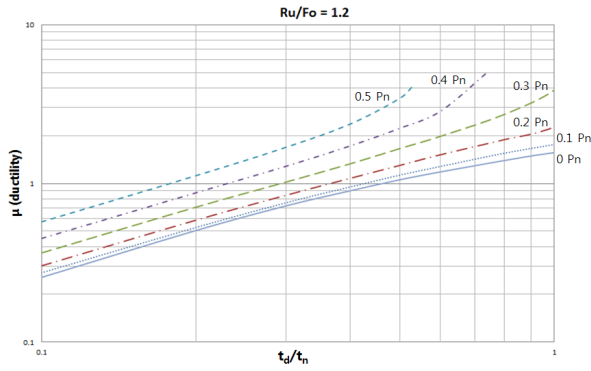
(a) $R_u/F_o = 0.6$



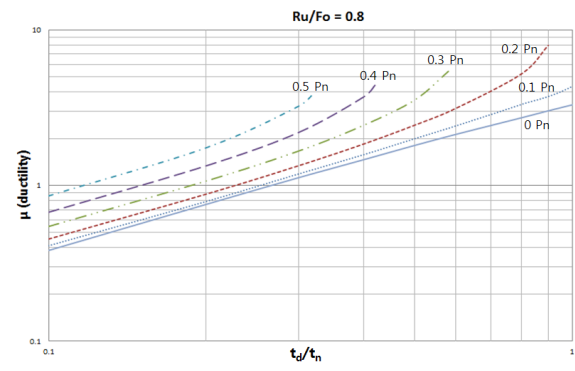
(e) $R_u/F_o = 1.0$



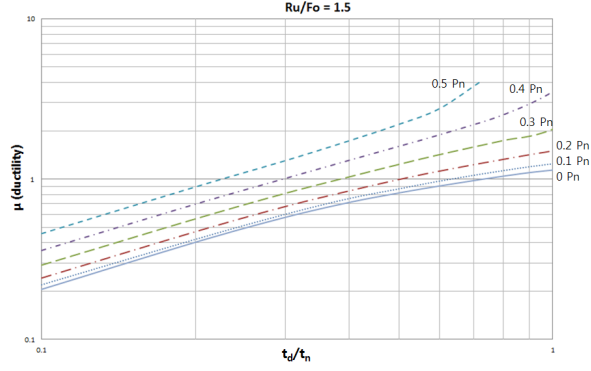
(b) $R_u/F_o = 0.7$



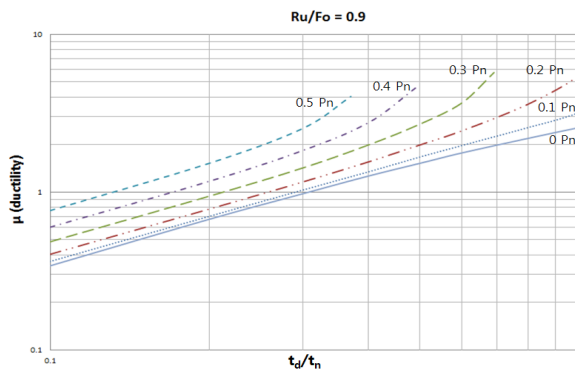
(f) $R_u/F_o = 1.2$



(c) $R_u/F_o = 0.8$



(g) $R_u/F_o = 1.5$



(d) $R_u/F_o = 0.9$

Fig. 7. Proposed blast response chart for vertical members under gravity load

4. 도표를 활용한 폭발저항성능평가 방안

이 연구결과를 통해 최종적으로 Fig. 7의 그림을 활용하여 다양한 중력하중을 받는 압축재의 폭발응답을 구하는 방안을 제시하고자 한다. 평가절차는 미국 TM 5-856^[8]에서 제시한 단자유도계 도표해법(Chart Solution)과 동일하며, 다만 압축재에 작용하는 중력하중에 따라 적용하는 그림을

Fig. 7에서 선택해야 한다. 등가단자유도해석법에 중력하중 효과를 반영하는 절차는 다음과 같다.

- (1) 압축재를 등가단자유도계로 전환한다. (이 논문의 2.1 또는 참고문헌을 참조한다.)
- (2) 등가단자유도계의 등가휨강도(R_u)와 고유주기(t_n)를 산정한다.
- (3) 폭발하중의 최대크기(F_o)와 지속시간(t_d)을 결정한다.
- (4) 압축재에 작용하는 중력하중(P_i)의 크기를 공칭압축 강도(P_n)의 비율(α)로 표현한다.
- (5) 등가휨강도-최대폭발하중 비(R_u/F_o)를 산정하여 Fig. 7에서 해당 그림(도표)을 선택한다.
- (6) 지속시간-고유주기 비(t_d/t_n)와 압축재에 작용하는 중력하중($P_i = \alpha P_n$)에 대한 소요연성(μ)을 그림에서 읽는다.
- (7) 필요시 소요연성(μ)을 수평변위 또는 지점회전각으로 환산하여 압축재의 폭발저항성능을 평가한다.

5. 결론

이 연구에서는 방폭설계에 널리 적용되는 등가단자유도 해석법에 중력하중효과를 반영하는 방안을 제시하였다. 이를 위하여, 구조부재의 휨저항력과 고유주기를 일정하게 하고 폭발하중 크기 및 지속시간을 달리하여, 등가단자유도 해석 및 유한요소해석을 수행하였다. 또한, 동일한 폭발변수에 대하여 중력하중의 크기를 달리하여 유한요소해석을 수행하였다.

이 논문의 주요 연구결과는 다음과 같다.

첫째, 중력하중을 고려하지 않았을 때, 폭발하중에 대한 구조부재의 최대변위 및 연성은 유한요소해석결과와 등가단자유도해석결과와 유사하였다. 이를 통해 이 논문에 이용한 유한요소해석모델이 합리적임을 검증하였다.

둘째, 유한요소해석을 통해 다양한 중력하중을 받는 구조부재의 폭발응답을 평가하였다. 구조부재가 받는 중력하중이 커질수록 동일한 폭발하중에 대하여 구조부재의 최대변위 및 연성은 커짐을 확인하였다.

셋째, 구조부재의 폭발응답에 중력하중효과를 반영하기 위하여, 구조부재의 휨저항력 대 폭발하중크기의 비, 폭발하중 지속시간 대 구조부재 고유주기의 비, 중력하중크기에

따른 연성을 도표화하였다. 이 도표를 활용하여 중력하중을 고려한 등가단자유도의 응답을 직접 구하는 방안을 제안하였다.

현재 널리 적용되는 구조부재의 방폭성능은 중력하중을 고려하지 않는 것이 일반적이다. 이 논문에서는 정밀한 유한요소해석을 수행하지 않고, 중력하중을 받는 강제 압축재의 방폭성능을 예비 평가할 수 있는 합리적인 방안을 제안하고자 하였다. 향후 강제 압축재뿐만 아니라 모든 압축재에 적용될 수 있고 일반화된 방안을 도출하는 연구가 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단(과제번호: 2012R1A1A2009490)의 지원을 받아 수행되었고 이에 감사를 드립니다.

참고문헌(References)

- [1] ASCE (2010) *Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, Second edition*, American Society of Civil Engineers.
- [2] DoD (2008) *Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions*, Unified Facilities Criteria UFC 3-340-02, Department of Defense.
- [3] 이철호, 강기용, 김성용, 구철희(2013) 각형 콘크리트충전 강관기둥 부재의 구조설계기준 비교연구, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.389-398.
Lee, C.H., Kang, K.Y., Kim, S.Y., and Koo, C.H. (2013) Review of Structural Design Provisions of Rectangular Concrete Filled Tubular Columns, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp. 389-398 (in Korean).
- [4] 이명재, 김철환, 김희동(2014) HSA800 강재를 적용한 합성기둥의 축방향 내력 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제5호, pp.473-483.
Lee, M.J., Kim, C.H. and Kim, H.D. (2014) The Evaluation of the Axial Strength of Composite Column with HSA800 Grade Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.5, pp. 473-483. (in Korean).
- [5] 윤원순, 이철호, 김정재(2014) 가새좌골을 고려한 X형 내진 가새골조의 기둥축력 산정법, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제26권, 제6호, pp.523-535.

- Yoo, W.S., Lee, C.H. and Kim, J.J. (2014) Prediction of Column Axial Force in X-braced Seismic Steel Frames Considering Brace Buckling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.6, pp.523-535 (in Korean).
- [6] 이경구(2010) 폭발하중을 받는 강재압축재의 잔여저항 성능 평가, 대한건축학회논문집구조계, 대한건축학회, 제26권, 제10호, pp.37-44.
- Lee, K.K. (2010) Evaluation of Residual Capacity of Steel Compressive Members Under Blast Load, *Journal of the The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.26, No.10, pp.37-44 (in Korean).
- [7] 이경구, 김태진, 김은석, 김진구(2007) 폭발하중에 의한 강재기둥의 거동, 대한건축학회논문집구조계, 대한건축학회, 제23권, 제7호, pp.37-44.
- Lee, K.K., Kim, T.J., Kim, E.S. and Kim, J.K. (2007) Behavior of Steel Columns Subjected to Blast Loads, *Journal of the The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.23, No.7, pp.37-44 (in Korean).
- [8] 이경구, 김태진, 김진구(2007) 경계조건에 따른 강구조물의 폭발응답평가, 대한건축학회논문집구조계, 대한건축학회, 제23권, 제12호, pp.43-50.
- Lee, K.K., Kim, T.J. and Kim, J.K. (2007) Blast Response Evaluation of Steel Structures due to the Boundary Conditions, *Journal of the The Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, AIK, Vol.23, No.12, pp.43-50 (in Korean).
- [9] 이경구, 노지은, 김선웅(2013) 중력하중을 고려한 H형강 기둥의 방폭성능에 대한 해석적 평가, 한국방재학회논문집, 한국방재학회, 제13권, 제2호, pp.31-36.
- Lee, K.K. Rho, J.E. and Kim, S.W. (2013) Analytical Evaluation of Blast Resistance of H-shaped Columns Considering Gravity Load, *Journal of The Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.13, No.2, pp.31-36 (in Korean).
- [10] Glasstone, S. and Dolan, P.J. (1977) The effects of nuclear weapons, United States Department of Defense and Energy Research And Development Administration.
- [11] TM 5-856 (1960) Design of structures to Resist the Effect of Atomic Weapons, Technical Manuals 5-856-1 through 9(9 Volumes), Department of the Army, Washington, DC.
- [12] 한국강구조학회(2009) KBC2009 강구조설계, 구미서관. KSSC (2009) KBC2009 *Design of Steel Structures*, Korean Society of Steel Construction, Goomiseogwan (in Korean).
- [13] 이경구(2012) 구조부재 폭발응답 해석프로그램, 단국대학교 Lee, K.K. (2012) *Program for Blast Response Analysis of Structural Members*, Dankook University
- [14] LS-DYNA (2009) LS-DYNA Keyword User's Manual, version 971, Livermore Software Technology Corporation.
- [15] LS-DYNA (2006) LS-DYNA Theoretical Manual, Livermore Software Technology Corporation.

요 약 : 방폭설계에 가장 널리 사용되고 있는 등가단자유도 해석법은 구조부재의 방폭성능평가에 있어서 중력하중효과를 전혀 고려하지 않고 있다. 그러나 구조물의 기둥 및 벽체의 경우 일반적으로 중력하중이 존재하므로, 이를 고려한 구조부재의 방폭성능을 평가하여야 한다. 이 논문에서는 강재 압축재의 동적 폭발응답 등가단자유도해석에 중력하중효과를 반영하는 방안을 제시하고자 한다. 이를 위하여 압축재의 휨저항력과 고유주기를 일정하게 하고 최대폭발하중 및 지속시간, 중력하중을 달리하여 변수해석을 수행하였다. 등가단자유도해석결과와 유한요소해석결과를 비교하고, 다양한 중력하중을 작용한 경우에 대하여 유한요소해석에 의한 압축재의 폭발응답을 평가하였다. 최종적으로, 폭발하중, 중력하중, 부재특성에 따른 강재 압축재의 소요연성을 도표화하였다. 이 도표를 활용하여 중력하중을 고려한 강재 압축재의 폭발응답을 합리적이고 편리하게 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 폭발응답, 등가단자유도해석, 유한요소해석, 중력하중, 방폭성능, 동적해석
