강-콘크리트 양개형 방폭문의 강재량 결정을 위한 설계 민감도 분석

Design Sensitivity Analysis of a Steel-concrete Double-leaf Blast-resistant Door to Determine the Steel Ratio

신현섭* · 김원우** · 김성욱*** · 문재흠****

Shin, Hyunseop*, Kim, Wonwoo**, Kim, Seongwook***, and Moon, Jaehum****

Abstract

Blast-resistant doors are application-specific structures that are installed at the entrances of protective facilities and used to protect lives, important equipment, and critical materials from blast pressure. In this study, based on flexural performance, the design sensitivity of a steel-concrete double-leaf blast-resistant door with regard to variables such as rebar ratio and steel plate thickness is analyzed by comparing deflection, internal energy, and stress. The results revealed that differences in performance based on variations in the rebar ratio are insignificant. However, with respect to plate thickness, the difference in maximum deflection was greater than 26%. The results also showed that designing a steel box as a structural member is more effective than simply using it as a formwork. The appropriate value of the variables was found to be 10 mm for the plate thickness and D10 for the rebar. The results also showed that the strengthening level of the door itself was higher, and the structural performance of supporting members such as hinges and latches should be improved.

Key words : Blast-Resistant Door, Design Sensitivity, Structural Behavior, FE Analysis

요 지

방폭문은 방호 및 대피 구조물의 출입구에 설치되는 구조체로서 폭발물로부터 발생하는 폭발압에 대해 인명, 중요 설비 및 자재 등을 보호하는 기능을 한다. 본 논문에서는 강-콘크리트 양개형 방폭문을 대상으로 철근량 및 강박스 강판두께에 따른 처짐, 흡수에너지, 부재응력 등의 변화를 비교 검토함으로써 휨성능에 대한 설계 민감도를 분석하였다. 해석결과에 따르면, 철근량에 따른 구조성능의 변화는 크지 않으나 강재박스 강판두께가 변할 경우 최대처짐이 26% 이상 차이가 나는 것으로 나타나서 강박스를 단순히 거푸집 용도로 사용하는 것 보다 방폭에 주요 변수로 작용하는 구조체로 보고 설계하는 것이 효과적인 것으로 분석되었다. 적정 강판두께는 10 mm이고, 배근은 D10 철근을 적용하는 것이 효율적인 것으로 나타났다. 또한, 힌지 및 랫치와 같은 지지부재의 경우 문 자체의 보강 수준이 높을수록 단면성능이 향상되어야 하는 것으로 검토되었다.

핵심용어 : 방폭문, 설계 민감도, 구조거동, 유한요소해석

1. 서 론

방폭문(Blast-Resistant Door)은 방호 및 대피 구조물의

출입구에 개폐가 가능하도록 설치되는 구조체로서 폭발물로부터 발생하는 폭발압 및 파편에 대해 인명, 중요 설비 및 자재 등을 보호하는 기능을 한다(Anderson and Dover,

*교신저자, 정회원, 한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 연구위원(Tel: +82-31-910-0287, Fax: +82-31-910-0121, E-mail: hsshin@kict.re.kr)
Corresponding Author, Member, Research Fellow, Department of Infrastructure Safety Research, KICT

**한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 선임연구원
Research Specialist, Department of Infrastructure Safety Research, KICT

***한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 선임연구위원
Senior Research Fellow, Department of Infrastructure Safety Research, KICT

****한국건설기술연구원 인프라안전연구본부 수석연구원
Senior Researcher, Department of Infrastructure Safety Research, KICT

2003; Koh et al., 2003; Chen and Hao, 2012). 예로써 정유시설 및 기타 산업·발전시설, 국가적 중요시설 및 대피시설, 군사적 용도의 탄약고 및 다양한 시설·장비의 저장소 등에 설치되고 있다. 개폐방식에 따른 방폭문의 종류로는 편개형(Single-Leaf), 양개형(Double-Leaf), 슬라이드형(Sliding) 등이 있고, 수동식 또는 대형의 슬라이드형의 경우는 전동식으로 개폐가 가능하도록 하고 있다(NEMA, 2008).

방폭문의 구조형식에 대한 관련 연구개발 현황을 조사한 결과에 따르면(Koh et al., 2003; Hsieh et al., 2008; NEMA, 2008; Luo et al., 2012; Chen and Hao, 2013; Tavakoli and Kiakojouri, 2014; Veeredhi and Rao, 2015; N.H. Kim et al., 2016; Meng et al., 2016; Shim et al., 2018), 방폭문의 자중을 가볍게 하기 위해 Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP)를 사용한 허니컴 형태의 방폭문 구조 및 CFRP 패널을 다수의 스티프너로 보강한 구조도 있으나, 화생방 대피시설 및 군사 용도의 저장소에서도 같이 매우 높은 폭발압 및 화염에 대비할 필요가 있는 경우에는 강재 박스의 내부를 I-beam 또는 채널 등으로 보강한 구조나 철근 배근 및 콘크리트로 채운 20 cm 이상 두께의 방폭문 구조가 사용되고 있음을 알 수 있다. 방폭성능 인증시험 등에서 방폭문의 성능에 대한 척도로 사용되고 있는 회전연성도 및 변위연성도 값이 예를 들어, 각각 2도 이하 및 10 이하의 값(ASCE, 1985, 1997)을 만족해야 하는 경우에는 자중의 문제가 없는 한 대부분 강재 박스 내부를 철근 배근 및 콘크리트로 채운 형태의 방폭문이 적용되고 있다.

위 현황조사에서 검토된 문헌 및 국내의 관련 연구(Oh, 1998; Lee et al., 2007; Nam, 2007; Park, 2007; Choung et al., 2008; Yi et al., 2009; Kim et al., 2011; Choi et al., 2012; Hwang et al., 2012; Kim et al., 2012; Kim et al., 2014; Park, 2014; Kim, 2015; N.H. Kim et al., 2016; Shin and Kim, 2016; Lim and Lee, 2017; Sohn et al., 2017; Shim et al., 2018)를 검토해 보면 폭발압 산정 및 구조물에 미치는 영향, 경계조건에 따른 구조거동 해석, 방폭성능 향상을 위한 재료 및 구조적 접근방법 등 다양한 연구가 수행되어 왔으나, 국내의 경우 강재와 콘크리트 부재로 구성된 방폭문의 구조거동 해석 및 설계 민감도 분석과 관련된 연구결과가 많지 않다. 또한, 관련 설계기준도 일정 부분 국외자료(U.S. DoD, 2008)를 참고하고 있는 상태이다. 국내 문헌자료(Shim et al., 2018)에 의하면, 방폭문의 성능을 평가하기 위한 폭발시험의 경우 시험 장소 및 비용적인 측면에서의 제약으로 제한적으로 시행되고 있으며, 구조해석 및 설계에 대한 연구 또한 부족한 상태인 것을 알 수 있다. 예로써 기존의 강-콘크리트 방폭문에서 방폭문 외피 구조로 사용되고 있는 강박스의 경우, 강판두께가 10 mm 이상인 경우도 있으나, 대부분의 경우에 있어서 5 mm 정도로서 주로 거푸집 용도로 사용되고 있는 상태이며, 강박스의 구조적 역할에 대한 것은 충분히 고려되고 있지 않다. 또한, 방폭문 내부 철근콘크리트 부재의

철근량 결정에 대해서도 관련된 연구결과가 많지 않은 상태이다.

본 논문에서는 강-콘크리트 양개형 방폭문을 대상으로 철근량 및 강박스 강판두께에 따른 최대처짐 및 잔류 영구처짐, 흡수에너지, 반력 및 부재응력 등의 변화를 비교 검토함으로써 휨성능에 대한 해당 변수의 설계 민감도를 분석한다. 이를 통해 양개형 방폭문의 구조거동 특성을 규명하고 선택한 변수에 대한 적정 설계 수치를 검토해 보고자 하며, 양개형 방폭문의 사전설계, 향후의 폭발시험 및 성능평가 등에 참고자료로 활용하고자 한다. 또한, 폭발시험에 의한 성능평가의 경우 비용적인 측면이나 고위험물로 취급됨에 따라 매우 제한적으로 시행될 수밖에 없는 상황이므로 유한요소해석에 의한 구조거동 분석방법이 활발히 사용되고 있는 바(N.H. Kim et al., 2016), 본 연구에서의 결과를 얻기 위해 사용한 분석 방법 및 과정을 기타 다른 강-콘크리트 방폭문에 대한 해석적 연구에 있어서 기본적인 참고자료로 제시하고자 한다. 여기서, 해석 대상 양개형 방폭문의 전체적인 크기 및 전체단면 두께, 재료 물성치 등의 구조상세는 대피시설 및 폭발물 저장소 등에 설치되고 있는 방폭문 구조의 제원을 참고하여 결정하였다(KICT, 2018). 또한, 폭발해석에 입력값으로 사용되는 폭약량 및 방폭문 간의 이격거리, 폭발조건 등의 제반 경계조건은 관련문헌의 사례를 참고하였다. 방폭문 구조체의 구조거동 해석을 위해 사용한 프로그램은 충돌해석이나 폭발해석 등에 많이 사용되고 있는 LS-DYNA (LSTC, 2017)이다.

2. 방폭문 구조형식 및 설계방법

2.1 방폭문 구조형식

강재 및 콘크리트 부재가 사용되는 방폭문의 종류에는 강판 또는 콘크리트 판형 부재로 된 단일 재료 및 단순 판형 구조형식, 강재 판형을 형강 또는 기타 스티프너로 보강한 구조형식, 강박스 구조에 콘크리트를 채운 복합구조형식 등이 있다. 개폐방법에 따라 편개형(Single-Leaf), 양개형(Double-Leaf), 슬라이드 방폭문(Sliding Blast Door) 등으로 구분되기도 한다(N.H. Kim et al., 2016; Krauthammer, 2011). 본 연구에서는 서론에서 밝힌 바와 같이 강-콘크리트 복합구조형식의 양개형 방폭문을 대상으로 한다.

방폭문의 지지 및 개폐를 위해 좌우 측단 및 상하단에 힌지(Hinge) 및 래치(Latch)와 같은 부속 철물을 설치한다. 개폐 시 문의 회전을 돕기 위한 편연결 구조와 같은 부속물이 힌지이며, 래치는 지렛대 구조와 유사하게 제작되어 방폭문의 밀폐를 돕는다.

Fig 1은 예로써 강재 박스 및 내부의 철근콘크리트 부재로 구성되는 방폭문의 종류를 개폐 방식에 따라 구분하여 나타낸 것이다.

(a) Single- & Double-leaf (b) Sliding

Fig. 1. Blast-Resistant Door Types (N.H. Kim et al., 2016)

2.2 방폭문 설계방법

방폭문 설계를 위해서는 먼저 폭약량과 이격거리의 조합으로 결정되는 폭발압을 산정하게 되는데, 경험식(Brode, 1955; Newmark and Hansen, 1961; Mills, 1987) 또는 미리 계산되어 그래프로 나타난 도표(U.S. DoD, 2008) 등을 이용할 수 있으나, 폭발압이 구조물에 가해지는 영향을 구체적으로 분석하기 위해서는 유한요소 프로그램을 사용하게 된다 (S.K. Kim and Y.S. Park, 2011).

구조물의 변형 및 응력상태와 같은 구조거동을 정량적으로 산정한 후에는 관련 기준에서 제시하는 변형한계(회전연성도 및 변위연성도)를 만족하는지 검토하게 되며, 불만족 시에는 단면변경 및 위와 같은 일련의 프로세스를 반복함으로써 방폭문의 단면을 결정하게 된다. 회전연성도(θ)는 최대 처짐 발생 시 최대변위 발생위치와 지점까지의 거리($L/2$) 및 최대처짐값(X_m)으로부터 구하고, 변위연성도는 탄성처짐(X_e) 대비 최대처짐의 비를 의미하며, 각각 Eqs. (1) 및 (2)와 같이 정의된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{2X_m}{L} \right) \quad (1)$$

$$\mu = X_m / X_e \quad (2)$$

방폭문의 변형한계에 대한 구체적인 관련 기준은 ASCE에서 제시하는 기준(ASCE, 1985, 1997), 미국 국방성 통합 설계기준(U.S. DoD, 2008) 등이 있으며, 국내는 국방·군사 시설기준(MND, 2011, 2018), 방호구조물설계기준(MND, 1998), 화생방방호시설 설계·시공지침(MND, 2008) 등을 참고할 수 있다.

3. 양개형 방폭문의 유한요소해석 방법

3.1 변수 및 해석조건

강-콘크리트 양개형 방폭문을 대상으로 철근량 및 강박스 강판두께에 따른 최대처짐 및 잔류 영구처짐, 흡수에너지, 반력 및 부재응력 등의 변화를 비교 검토함으로써 설계 민감도를 분석한다.

해석 대상의 양개형 방폭문의 한쪽 문 크기는 mm 단위로 1,320(W)×2,650(H)×280(D)이며, 실제 형상은 Fig. 1(a)에서 오른쪽에 위치한 양개형 방폭문과 유사한 구조를 취하고 있다. 해석모델에서는 양개형 방폭문의 지지 부재로서 좌우 측에 각각 3개씩의 힌지가 설치되며, 또한 한쪽 방폭문당 총 4개의 래치를 상하단에 나누어 설치한다. Table 1은 전체 해석변수를 정리해 놓은 것으로서, 강박스 강판두께는 5 mm, 10 mm, 15 mm로 하였고, 철근의 경우는 D10, D16, D22로 선정하여 철근량이 거의 배수로 증가되는 것을 고려하였다. 철근은 슬래브 상하단 2단으로 가로 및 세로 방향으로 배근된다. 배근간격은 기존 도면 검토 및 간섭발생이 없고 제작이 가능하도록 세로방향 및 가로방향 철근을 150 mm 및 200 mm 간격으로 하였다. 여기서, 각 변수값의 변화 폭은 현재 시공되고 있는 방폭문의 설계값을 참조하여 결정하였다.

Table 1. Variables for Sensitivity Analysis

Structural Member	Variables		
	Type	Value (unit area)	Symbol
Inner RC	Rebar Ratio	D10 (78.5mm ²)	D10
		D16 (201.1mm ²)	D16
		D22 (380.1mm ²)	D22
outer Steel Box	Plate Thickness	5mm	5t
		10mm	10t
		15mm	15t

본 연구에서 설계변수로 방폭문 강박스의 강판두께를 선정한 것은 강박스의 휨성능 및 인장성능 등의 구조적 역할 여부를 검토하기 위함이다. 또한, 철근량도 인장에 기여하고, 추후 방폭문의 설계 시에는 강재량의 구분 제시가 필요하므로 변수에 포함하였다. 방폭문 전체 두께의 경우 자중 및 이로 인한 운용 문제(인력 개폐)로 더 증가시키는 것은 어려운 것으로 사료된다. 또한, 두께 감소의 경우도 방폭성능의 감소 우려와 같은 인식이 있기 때문에 고강도 및 섬유보강 콘크리트가 적용되기 전까지는 받아들이기 쉽지 않은 상황이므로 변수에는 포함하지 않았다.

해석조건으로서 재료강도 및 하중은 다음과 같다. 강재박스 및 지지부재(힌지/래치)에 사용된 강재의 항복강도는 275MPa (SS275, 구SS400), 철근의 항복강도는 500MPa (SD500)이며, 콘크리트의 압축강도는 50MPa이다. 힌지 및 래치의 구성부재에서 shaft의 경우 S45C의 강종이 사용되며, 항복강도는 343MPa이다. 방폭문에 가해지는 폭발압은 TNT 276 파운드(≒125kg)에 의해 발생하는 압력과 같으며, 폭발 원점과 방폭문 간의 이격거리는 5.66 m이고 폭발 원점의 높이 상의 위치는 지면으로부터 10 cm로 가정한 Surface Blast 조건으로서 관련 사례를 참고하였다.

Fig. 2는 최대처짐이 발생하는 방폭문 구조시스템 중앙부

에서의 입사압력(Incident pressure) 및 반사압력(Reflected pressure)을 예로서 나타낸 것이다. 여기서, 입사압력이라는 것은 구조물과 같은 장애물의 영향이 없을 때의 공기압이며, 반사압력은 구조물에 실제로 작용하는 압력이다.

Fig. 2. Blast Pressure

LS-DYNA에서는 ConWEP 프로그램에서 사용되고 있는 폭발하중 산정방법에 기초하여 입사압과 반사압을 계산하고 있다(Load_Blast_Enhanced 조건 입력). 여기서, ConWEP은 미국 국방성에서 실시한 다수의 폭발시험 자료에 기반을 둔 것으로서, 압력과, 파편, 지표면 충격 등의 영향을 고려한 폭발하중의 산정이 가능한 프로그램으로 현재는 보안 문제로 부분적으로만 공개되고 있다(Byun et al., 2011).

3.2 유한요소 모델

3.2.1 재료 모델

3.2.1.1 콘크리트

해석 프로그램으로 사용한 LS-DYNA에서는 콘크리트에 대해 다수의 재료 모델을 제시하고 있다. 모델 선택과 관련된 연구에 의하면 CONCRETE_DAMAGE_REL3 (기호72R3), SOIL_CONCRETE (기호78), WINFRITH_CONCRETE_REINFORCEMENT (기호84), CSCM (기호159) 등이 주로 사용되고 있음을 알 수 있다(Akram, 2008; Sangi and May, 2009; Chung et al., 2011; J.H. Kim and T.H. Park, 2011). 이중 Karagozian and Case (K&C) 콘크리트 모델이라고 불리는 72R3 모델은 1축, 2축 및 3축 거동을 비교적 높은 수준으로 예측할 수 있고, 폭발하중과 같이 높은 변형률 속도를 유발하는 해석에 적합하다고 알려져 있으며(Malver et al., 1997; Brannon and Leelavanichkul, 2009; J.H. Kim and T.H. Park, 2011; Crawford et al., 2012; Lim and Lee, 2017), 본 논문에서도 이 모델을 사용하였다.

소성 손상이론에 기반을 둔 이 모델에서는 Fig. 3에서와 같이 항복(yield, Y_y), 최대압축(maximum compressive, Y_m),

잔류응력상태(residual, Y_r) 등 3개의 파괴포락선에 의해 3차원 주응력공간에서의 콘크리트 응력상태를 판단할 수 있다(Brannon and Leelavanichkul, 2009; Crawford et al., 2012). Eqs. (3) ~ (5)는 3개의 파괴포락선을 수식으로 나타낸 것이며, 여기서 각 식에 포함된 상수값은 50MPa 콘크리트에 대해 Table 2와 같다(Malver et al., 1997; Nam et al., 2007; Markovich et al., 2009; J.H. Kim and T.H. Park, 2011).

Fig. 3. Failure Surfaces in K&C Concrete Material Model

- Yield Failure Surface:

$$Y_y = \Delta\sigma_y = a_{0y} + \frac{p}{a_{1y} + a_{2y}p} \quad (3)$$

- Maximum Failure Surface:

$$Y_m = \Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2p} \quad (4)$$

- Residual Failure Surface:

$$Y_r = \Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f}p} \quad (5)$$

Table 2. Coefficients of Failure Surfaces

Yield		Maximum		Residual	
a_{0y}	9.080	a_0	14.00	-	-
a_{1y}	0.6448	a_1	0.4195	a_{1f}	0.4635
a_{2y}	0.003978	a_2	0.002580	a_{2f}	0.002410

또한, 폭발 또는 충돌과 같이 매우 높은 변형률 속도가 발생하는 경우에는 재료의 강도가 일반적일 때 보다 더 증가하는 현상(Strain Rate Effect)이 발생하는데, 변형률 속도에 따른 증가되는 강도는 동적증가계수(Dynamic Increase Factor, DIF)에 의해 고려되고 있다(Ross et al., 1995; Malver and Ross, 1998). 본 연구에서는 Ross et al. (1995) 및 Malver and Ross (1998) 등에 의해 제안된 Fig. 4와 같은 동적증가계수를 사용하였다(Markovich, 2009).

Fig. 4. Dynamic Increase Factor

3.2.1.2 강재

방폭문의 강재 박스 및 철근, 지지부재에 대해 강재의 소성 거동 및 변형률 속도의 영향을 고려할 수 있는 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 모델을 사용하였다. LS-DYNA에서는 변형률 속도에 따른 동적 경화 현상(Dynamic Hardening)을 고려하기 위해 Eq. (6)과 같이 변형률 속도, $\dot{\epsilon}$ 의 함수로 표현되는 Cowper-Symonds에 의해 제안된 식을 사용하고 있다. 이에 의해 변형률 속도의 변화에 따른 동적 항복응력, $(\sigma_y)_d$ 은 Eq. (7)에서와 같이 정적 항복응력, $(\sigma_y)_s$ 과 Eq. (6)으로 표현되는 동적경화계수(Dynamic Hardening Factor, DHF)의 곱으로 나타낼 수 있다(Choung et al., 2011).

$$DHF(\dot{\epsilon}) = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \quad (6)$$

$$(\sigma_y)_d = (\sigma_y)_s \cdot DHF \quad (7)$$

여기서, p 및 C 는 재료상수로서 p 는 5, C 는 Eq. (8)과 같은 경험식에 의해 구할 수 있다(Choung et al., 2011). Choung et al., (2011)에 의하면 C 값으로서 40 정도를 적용하는 경우가 있으나, 이는 항복강도가 270 MPa 이하의 연강일 경우에 한하여 적당하다고 보고하고 있다.

$$\begin{aligned} &\text{for } \sigma_y > 270 \text{ MPa,} \\ &C = 92000 \cdot \exp(\sigma_y/364) - 194000 \\ &\text{for } \sigma_y \leq 270 \text{ MPa,} \\ &C = 40 \end{aligned} \quad (8)$$

3.2.2 구조 모델

Fig. 5는 방폭문(강재 박스 및 RC 구조), 힌지(Hinge) 및 래치(Latch)를 포함하는 지지부재, 벽체 프레임으로 구성되는 양개형 방폭문 구조시스템을 LS-DYNA를 이용하여 모델링 한 것을 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 모델에서는 방폭문 내부의 철근을 가시적으로 보이기 위해 원편 방폭문의 강재 박스 일부와 콘크리트를 삭제한 후 나타내었다.

콘크리트, 지지부재, 벽체 프레임은 8절점의 Solid 요소, 강재 박스는 Shell 요소, 철근은 1차원 선형 모델을 사용하였다. 여기서, 철근과 콘크리트는 Rigid Link를 사용하여 서로 일체화 하였으며, 강재 박스와 콘크리트 간에는 Contact 조건을 부여하여 상호작용을 하도록 하였다. 또한, 방폭문과 벽체 간에도 Contact 조건을 부여하여 방폭문에 가해지는 폭발압이 전달되도록 하였다. 힌지 및 래치 등의 지지부재와 방폭문 간에는 Rigid Link를 사용하여 일체화 하였다.

지점조건으로는, 힌지 부재의 벽체쪽 측단은 x , y , z 방향 모두 벽체에 고정되고, 래치 핀의 벽체쪽 측단은 x , z 방향이 벽체에 고정된다. 래치 부재에 대해 y 방향을 구속하지 않은 것은 방폭문 구조시스템에서의 실제 설치조건을 고려한 것이다. 여기서, 구조시스템 전체 좌표계는 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 방폭문 구조의 폭, 높이 및 두께 방향을 각각 x , y 및 z 축으로 하였다. 또한, 벽체 프레임에서 방폭문과 맞닿지 않는 반대측 면은 고정조건으로 하였다. 벽체를 프레임 형태만으로 단순화 하지 않고, 건물 형태로 모델링 할 수도 있겠으나, 일반적으로 벽체를 포함하는 건물의 강성이 방폭문에 비해 매우 크기 때문에 프레임 형태로만 모델링하여 해석시간을 줄이고자 하였다. 비교를 위해 방폭문 및 방폭 벽체에 대한 다른 해석 사례(Lu and Jiang, 2002; Dharmasena et al., 2008; Hsieh et al., 2008; Chen and Hao, 2012; Aitavade et al., 2013; Kim et al., 2014; N.H. Kim et al., 2016; Meng et al., 2016; Shim et al., 2018; Zhao et al., 2018)를 검토해 본 결과, 직접적인 해석 대상의 방폭문 또는 방폭벽체와 주변 지지부재에 대해서만 모델링하여 해석하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5. FE Model for the Door Structure

4. 해석 결과

4.1 처짐 거동 비교

방폭문의 강박스 강판두께(5/10/15 mm) 및 철근량(D10/

D16/D22)을 변수로 하여 해석하고 폭압에 대한 구조성능을 비교 검토하기 위해 방폭문 구조시스템 중앙부에서의 최대 처짐 및 영구처짐을 비교하여 보았다. Fig. 6은 강박스 강판두께 5 mm, D10 철근이 사용된 방폭문에서 전체적인 처짐 분포를 예로 나타낸 것이다. 처짐해석 결과를 검토해 보면 5 mm로 강판두께는 일정하고 철근량 변화에 따른 처짐을 비교해 본 결과, Fig. 7에 나타난 바와 같이 철근량 증가에

따라 최대처짐 및 영구처짐이 감소하는 경향을 보이지만 크지 않은 차이만을 나타내고 있다. Table 3에 나타난 바와 같이 강판 두께는 일정하고 철근량만 증가할 때의 처짐 변화의 추세는 10 mm 및 15 mm 강판의 방폭문에서도 유사한 경향을 나타내었다.

이에 비해 Table 3 및 Fig. 8에 나타난 바와 같이 강박스 두께를 변수로 하여 비교해 보면, 5 mm에서 10 mm 및

Fig. 6. Deflection Distribution in z-Direction

Fig. 7. Deflection Hysteresis According to the Rebar Ratio

Fig. 8. Deflection Hysteresis According to the Steel Plate Thickness

Table 3. Comparison of Overall Structural Behavior

Plate Thickness (mm)	Rebar	Elastic Deflection (mm)		Maximum Deflection (mm)		Permanent Deflection (mm)		Edge Rotation (deg)		Ductility Ratio	
5	D10	7.9	7.7	30.1	29.0 (1.00)	6.4	5.9 (1.00)	1.30	1.25 (1.00)	3.81	3.77 (1.00)
	D16	7.7		29.0		5.7		1.25		3.76	
	D22	7.4		27.8		5.7		1.20		3.75	
10	D10	7.1	6.9	22.1	21.4 (0.74)	3.6	3.4 (0.58)	0.96	0.93 (0.74)	3.11	3.09 (0.82)
	D16	6.9		21.5		3.5		0.93		3.10	
	D22	6.7		20.5		3.1		0.89		3.06	
15	D10	6.5	6.3	18.5	16.6 (0.57)	3.1	2.6 (0.44)	0.80	0.72 (0.58)	2.85	2.63 (0.70)
	D16	6.3		16.2		2.8		0.70		2.57	
	D22	6.1		15.0		1.9		0.65		2.46	

15 mm로 증가함에 따라 최대처짐은 74% 및 57%, 영구처짐은 58% 및 44% 수준의 처짐이 발생하여 철근량을 변수로 하여 비교했을 때에 비해 비교적 큰 변화폭을 나타내었다.

위와 같은 경향은 강박스의 경우 강판두께가 2배 및 3배로 증가함에 따라 늘어나는 강재량이 상대적으로 매우 크고, 처짐강성 증가에도 기여하는 부분이 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 결과로 볼 때, 처짐성능(휨성능) 증가를 위해서는 제작비용은 더 크게 증가하겠으나 강판 두께를 증가하는 것이 더 효율적이다. 철근량의 경우 배근간격 및 철근간섭 문제도 있을 뿐 아니라, 최대 배근량에도 한계가 있다.

위 해석적 결과에 대한 적절성을 검토하고자 타 연구에 의한 양개형 방폭문의 폭발시험 결과(S.B. Kim et al., 2016)를 참조해 보면, 최대처짐 20 mm 내외, 회전연성도 1도 내외의 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 해석결과와 유사한 경향을 나타내는 것으로서 본 연구의 해석적 접근방법이 적합한 것으로 판단될 수 있다.

방폭성능 인증시험 등에서는 성능을 평가하는 척도로서 회전연성도와 변위연성도를 평가하게 되는데, 예를 들어 ASCE (1997)에서 제시하고 있는 석유화학 시설물에 대한 회전연성도 기준에 의하면 경미한 손상에 대한 한계값으로 2도 이하를 제시하고 있다. 본 연구의 결과값들은 모두 2도 미만의 회전연성도를 보이므로 모두 안전측에 포함된다. 그러나, 방폭구조물의 성능 강화 추세에 따라 1도 미만의 값이 적용되는 경우 강박스의 강판두께는 10 mm 또는 15 mm가 적합할 것이다. 한편, 변위연성도의 경우 ASCE (1997)에는 값이 제시되어 있지 않으며, 핵폭발에 대한 기준을 정하고 있는 ASCE (1985)에 의하면 10 이하로 되어 있다. 본 연구의 결과값들은 모두 10 이하의 값을 갖고 있으므로 모두 기준을 만족하고 있다. 여기서, 대상 방폭문의 변위연성도 계산에 사용된 탄성처짐은 관련문헌을 참고하여 안전측으로 콘크리트 부재의 변형율이 0.0005일 때 구한 값이다.

그러나, 위 기준은 모두 파괴 수준을 나타내기 위한 경계값으로서, 경계값 이내의 구조물에 대한 성능을 구분하기에는 무리가 있으며, 또한 콘크리트 구조물에 대한 기준으로서 강-콘크리트 복합구조물에도 적용 가능한지는 의문이 제기되어 있는 상태이다(S.K. Kim and Y.S. Park, 2011). 따라서, 처짐값으로부터 유도된 회전 및 변위연성도에 의하기 보다는 단순히 처짐 이력곡선 상에 나타난 추세 기준으로 판단한다면, 강판두께 5 mm의 경우 상대적으로 큰 처짐이 발생하고, 강판두께가 10 mm에서 15 mm로 증가될 경우는 사실상 성능에 변화가 없는 것을 고려하면 10 mm 두께가 적합할 것으로 판단된다.

4.2 내부에너지 비교

방폭 구조체의 설계에서는 전반적인 동적특성, 최대처짐

및 영구처짐 등의 변위량으로 알 수 있는 폭압 저항성능도 중요하지만 변형 및 손상량과 관계되는 에너지 흡수능력 또한 주요 검토사항에 포함된다(Chen and Hao, 2012; Kim et al., 2014). 방폭문 구조 전체의 변형 및 손상 정도를 전반적으로 비교 판단하기 위한 수단으로 방폭문 구조시스템에 의해 흡수된 내부에너지(Internal Energy)를 비교하여 보았다. 여기서, 내부에너지는 변형에너지이다. 내부에너지의 비교를 통해 본 연구의 설계변수에 따른 거동 상의 차이를 좀 더 명확히 평가할 수 있다.

예로써 5 mm 강판두께의 강재 박스가 사용된 방폭문 구조시스템에서 철근 직경이 10 mm, 16 mm 및 22 mm로 변할 때 방폭문(지지부재 제외)에 의해 흡수된 에너지를 비교해 보면 Fig. 9와 같다. 아래의 비교결과를 설명해 놓은 내용에서 흡수에너지와 내부에너지, 변형에너지는 모두 같은 물리량이며, 흡수에너지가 감소한다는 의미는 변형이 더 작게 발생한다는 의미와 통한다. 비교결과에 따르면, 철근 직경이 늘어나서 철근량이 배수로 증가하더라도 흡수 에너지는 1.8% 및 4.6% 정도만 감소하고 있는 것으로 나타나서, 앞서 처짐 비교에서도 검토한 바와 같이 철근량에 대한 민감도는 크지 않은 것으로 판단된다.

이에 비해 Fig. 10에 예로써 나타난 바와 같이 강재 박스의 강판두께가 변할 경우는 11.2% 및 19.8% 정도의 흡수에너지가 감소하는 것으로 나타나 철근량이 증가하는 경우에 비해 상당히 큰 차이를 가져올 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 위의 예를 포함하여 다른 변수에 대한 흡수에너지 산출 결과를 함께 나타낸 것이다. 비교를 쉽게하기 위해 강판두께 5 mm의 강박스 및 D10 철근이 사용된 방폭문의 흡수에너지를 1.0으로 하였다. 전체적인 경향을 검토해 보면, 강박스 강판두께가 고정일 경우 철근량 증감에 대해 가장 큰 변화를 보이는 경우는 강판두께가 5 mm일 때이다. 강판두께가 얇아서 다른 경우에 비해 항복상태에 더 일찍 도달하며, 이에 따라 철근의 영향이 상대적으로 크기 때문이다. 10 mm 또는 15 mm 두께의 강박스가 사용되는 경우에는 철근량이 증가하는 것에 비해 방폭문의 흡수에너지에 비교적 큰 변화는 없어서 구조성능에도 상대적으로는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

또한, 강박스 강판두께가 증가함에 따른 변화를 검토해 보면, 5 mm에서 10 mm 및 15 mm로 증가함에 따라 흡수에너지는 평균적으로 9.3% 및 19.0% 감소하고 있어서, 철근량을 변수로 했을 경우에 비해 상당히 큰 변화폭을 보이고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과로부터 판단했을 때, 강박스를 단순히 거푸집 용도로 사용하는 것 보다는 방폭성능에 주요 설계변수로 작용하는 하나의 구조체로 보고 설계하는 것이 합리적일 것으로 사료된다.

Fig. 12는 D10 철근이 사용된 방폭문에서 강박스의 강판두께가 변화함에 따른 힌지 및 랫치와 같은 지지부재의 흡수 에너지를 서로 비교해 놓은 것이다. 이에 따르면, 강판두께가

Fig. 9. Internal Energy Hysteresis According to the Rebar Ratio

Fig. 10. Internal Energy Hysteresis According to the Steel Plate Thickness

Fig. 11. Comparison of Normalized Internal Energy for All Variables

Fig. 12. Comparison of Internal Energy Absorbed by Hinges and Latches

5 mm로서 제일 얇은 방폭문의 경우에서 흡수에너지가 가장 작고, 두께가 증가할수록 흡수에너지도 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 문 자체에서 변형이 크게 발생하여 에너지를 많이 흡수한 경우 지지부재에는 상대적으로 더 작은 변형이 발생하기 때문이다. 반대로 강판두께가 15 mm의 방폭문의 경우, 문 자체에는 더 적은 변형이 발생하여 흡수에너지가 더 작지만 지지부재에는 폭압의 영향이 더 많이 전달되어 흡수에너지가 더 크게 나타난 것이라 할 수 있다.

또한, Fig. 12에서 5 ms 부근이 방폭문의 최대처짐이 발생하는 시간과 같고, 20 ms 부근은 리바운드가 발생했을 때, 즉 방폭문이 반대방향으로 처졌을 때와 같다. 비교에 따르면 리바운드가 발생할 때, 강박스의 강판두께가 큰 경우의 방폭문 지지부재에 더 큰 에너지가 발생함을 알 수 있다. 리바운드가 발생할 경우에는 벽체 없이 오직 지지부재에 의해서만 방폭문이 지지되므로, 지지부재 측면에서는 최대처짐 발생 시 보다 더 취약할 수 있다. 이와 같은 사항을 고려하면, 강판두께나 철근량이 더 많이 보강된 방폭문일수록 지지부재의 단면크기를 더 증가시켜야 지지부재에서 발생하는 응력을 제한할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 부재응력 및 지점반력 검토

철근량 및 강박스 강판두께 변화에 따른 철근, 강판, 콘크리트 부재에 발생하는 응력을 비교하여 Fig. 13에 나타내었다. 또한, 지점반력을 검토하기 위해 지지부재에 발생하는 부재력을 Fig. 14에 비교하여 나타내었다. 여기서, Fig. 13에 나타난 철근, 강판, 콘크리트 부재의 응력은 방폭문 구조시스템 전체 중앙부의 최대처짐이 발생하는 위치에서의 최대응력이다.

철근 응력 비교에 따르면, 강판 두께가 증가함에 따라 철근의 응력은 감소하는 것으로 나타났다. D10 철근이 사용된 경우는 강판 두께의 증가에 대해 응력 변화폭이 비교적 크게 나타났으나, 직경이 증가하여 철근량이 늘어날수록 강판 두께 증가에 따른 철근 응력의 증가폭은 감소하는 추세를 보이고 있다. 또한, D10 철근이 적용된 경우 이외에 다른 직경의 철근이 사용된 경우, 철근은 항복하지 않은 것으로 분석되었다.

강판 응력의 경우, 강판 두께 및 철근량이 증가할수록 더 작은 응력이 발생하나 증감폭은 크지 않으며, 전체 경우에 있어 항복하는 것으로 분석되었다. 변형율 비교 결과로서는 5 mm 강판의 경우 평균 6.2×10^{-3} , 10 mm 및 15 mm 강판의

경우는 평균 5.1×10^3 및 1.3×10^3 정도의 소성변형이 발생하는 것으로 나타났다.

변수에 따른 콘크리트 부재의 응력 및 파손 정도를 비교해 보기 위해 Fig. 13(c)에 나타난 바와 같이 주응력 공간에서의 응력을 파괴포락선(Fig. 3 참조)과 함께 나타내었다. 이에 따르면, 모든 경우에 있어 항복 파괴 포락선(Yield Failure Surface) 이내에 있는 것으로 나타나서 방폭문 중앙 압축부 콘크리트의 응력은 소성범위 이하에 있고 파손이 없는 것으로 분석되었다. 또한, 강판 두께가 증가할수록 콘크리트 부재에 발생하는 응력은 감소하는 것으로 나타났다.

(a) Stress in Rebar

(b) Stress in Steel Plate

(c) Stress in Concrete

Fig. 13. Comparison of Maximum Stress According to the Variables

D10 철근이 사용된 경우는 다른 경우에 비해서 편차응력 (deviatoric stress)이 더 크게 나타나서 항복 파괴 포락선에 비교적 더 근접하는 것으로 나타났으나, D16 및 D22 철근이 사용된 경우는 동수압응력(hydrostatic pressure) 대비 편차 응력의 증가 추세가 서로 유사한 것으로 분석되었다.

한편, Fig. 14에 나타난 바와 같이 각 변수의 변화에 따른 지지부재의 부재력을 검토해 봄으로써 폭압에 대한 방폭문 구조시스템의 지점반력을 비교하여 보았다.

Fig. 14. Comparison of Member Reaction Force According to the Plate Thickness

그림에 나타난 예에서는 철근량 변화에 따른 미소한 변화는 제외하고, 변동폭이 더 큰 강판 두께가 증가함에 따른 부재력을 비교하고자 하였다. 예로써 D10철근이 사용되었을 때 강판 두께별 지지부재의 부재력 합계(힌지 및 랫치 부재 전체의 부재력 합계)를 비교한 것이다. 이에 따르면, 폭압에 의해 최대처짐이 발생하는 5 ms 부근에서는 강판두께가 5 mm에서 10 mm 및 15 mm로 증가함에 따라 5 mm 일 때 대비 14% 및 18% 더 큰 부재력이 반력으로 작용하고 있으며, 반대방향으로의 처짐이 최대일때인 20 ms 부근에서는 26% 및 82% 더 큰 반력이 작용하는 것으로 분석되었다. 강판 두께가 증가함에 따라 반력이 더 크게 발생하는 이유는 앞서 흡수에너지 비교에서 논한 바와 같이 방폭문이 비교적 더 탄성체로 거동함에 따라 지지부에 더 큰 힘이 전달되기 때문이며, 여기서의 반력 비교 결과로부터 정량적으로 확인할 수 있었다. 또한, 폭압의 당초 작용방향과 반대방향으로 처짐이 일어날 때 반력이 더 큰 비율로 증가하는 것은, 이때는 벽체의 영향이 없이 지지부재에 의해서만 방폭문 구조체가 지지되기 때문이다.

5. 결론

- (1) 방폭문의 휨성능 비교를 위해 처짐거동을 검토한 결과에 따르면, 철근량 증가에 따른 최대처짐 및 영구 처짐의 변화는 강재 박스의 강판두께 증가의 경우에

비해 상대적으로 작은 수준으로 나타났다. 이는 강재 박스의 경우 강재량 증가폭이 상대적으로 크고 처짐강성에 대한 기여도 또한 더 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 처짐이력곡선의 비교결과에 의하면 강판두께를 10 mm 보다 더 증가시킬 필요는 없는 것으로 분석되었다.

- (2) 흡수에너지 비교결과, 철근량 및 강판두께의 변화에 대한 전반적인 경향은 처짐거동 비교에서 얻은 결론과 유사하게 나타났다. 특이점으로는 강판두께가 증가될수록 철근량의 변화에 대한 방폭문의 변형에너지에 대한 민감도는 감소하는 것으로 나타나서 두꺼운 강판이 사용될 경우와 얇은 강판이 사용될 경우에 있어서 철근에 대한 설계 민감도는 서로 구분됨을 알 수 있었다.
- (3) 방폭문이 보강되어 더 강제로 작용함으로써 문 자체에서 흡수하는 에너지가 작을수록 힌지 및 랫치와 같은 지지부재에는 더 큰 부재력이 발생하며 변형도 더 증가하는 것으로 나타났다. 방폭문이 리바운드 되어 벽체의 간섭 없이 지지부재에 의해서만 방폭문을 지지할 경우 이와 같은 경향이 더 뚜렷이 나타나므로, 보강된 방폭문일수록 지지부재의 단면성능도 향상되어야 할 것으로 판단된다.
- (4) 위의 결론 및 각 부재의 응력 비교 결과를 종합해 볼 때, 대상의 양개형 방폭문의 경우 강재박스의 강판두께는 10mm, 철근은 D10을 사용하는 것이 설계효율 측면에서 적합한 것으로 나타났다. D10 대신 D16 철근을 사용한다면 철근콘크리트 부재에서 발생하는 응력을 탄성범위 내로 더욱 제한할 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) 강-콘크리트 방폭문 구조에서 강박스를 단순히 거푸집 용도로 사용하는 것 보다는 방폭성능에 주요 설계변수로 작용하는 하나의 구조체로 보고 설계하는 것이 합리적일 것으로 판단되며, 구조성능과 함께 제작비 측면에서의 경제성도 함께 고려하여 적절한 단면 설계가 필요하다.
- (6) 본 연구에서는 양개형 방폭문의 휨성능을 기준으로 대상 변수에 대한 비교 검토를 하였으나, 향후 강재량 및 배근간격의 변화에 따른 전단성능에 대한 연구가 필요하다. 또한, 본 연구로부터 얻은 결과 및 향후 다수의 폭발시험으로부터 얻은 결과와의 비교를 통해 양개형 방폭문의 설계방법 개선 및 지침 반영을 위한 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 민군협력진흥원에서 지원하는 민군기술협력사업 “고성능 섬유보강 시멘트 복합재료를 적용한 방호

구조체 개발” 과제의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- Abu-Odeh, A. (2008). Modeling and simulation of bogie impacts on concrete bridge rails using LS-DYNA. *10th International LS-DYNA Users Conference*, pp. 3-20.
- Aitavade, N.S., Jadhav, D.N., Thorat, D.R., and Ramavat, S.A. (2013). Design and analysis of single plate blast resistant door. *International Journal on Theoretical and Applied Research in Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 1, pp. 107-111.
- Anderson, M., and Dover, D. (2003). Lightweight, blast resistant doors for retrofit protection against the terrorist threat. *International Conference on Innovation in Architecture Engineering and Construction*, pp. 23-33.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (1985). *Design of structures to resist nuclear weapons effect*. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice-No. 42. ASCE Publications.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (1997). *Design of blast resistant buildings in petrochemical facilities* (1st ed.). ASCE Publications.
- Brannon, R.M., and Leelavanichkul, S. (2009). *Survey of four damage models for concrete*. Sandia National Laboratories, SAND2009-5544.
- Brode, H.L. (1955). Numerical solutions of spherical blast waves. *Journal of Applied of Physics*, Vol. 26, No. 6, pp. 766-775.
- Byun, K.J., Kim, H.J., and Nam, J.W. (2011). Blast load and design of protective structures. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, pp. 16-22.
- Chen, W., and Hao, H. (2012). Numerical study of a new multi-arch double-layered blast-resistance door panel. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 43, pp. 16-28.
- Chen, W., and Hao, H. (2013). Numerical simulations of stiffened multi-arch double-layered panels subjected to blast loading. *International Journal of Protective Structures*, Vol. 4, No. 2, pp. 163-187.
- Choi, H.S., Kim, M.S., and Lee, Y.H. (2012). Parametric study on reinforced concrete columns under blast load. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol. 25, No. 3, pp. 219-226.

- Choung, J.M., Cho, S.R., and Yoon, K.Y. (2008). Fracture estimation of stiffened plates under impact loading using micromechanics plasticity model. *Proceeding of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, pp. 1607-1617.
- Choung, J.M., Shim, C.S., and Kim, K.S. (2011). Theoretical backgrounds of strain hardening and rate hardening of a marine structural steel. *Proceeding of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, pp. 1393-1403.
- Chung, C.H., Lee, J.W., Kim, S.Y., and Lee, J.H. (2011). Influencing factors on numerical simulation of crash between RC slab and soft projectile. *Journal of the Computational Structure Engineering Institut of Korea*, Vol. 24, No. 6, pp. 591-599.
- Crawford, J.E., Wu, Y., Choi, H.J., Magallanes, J.M., and Lan, S. (2012). *Use and validation of the release III K&C concrete material model in LS-DYNA*. Karagozian&Case Technical Report TR-11-36.5, California, US.
- Dharmasena, K.P., Wadley, H.N.G., Xue, Z., and Hutchinson, J.W. (2008). Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 9, pp. 1063-1074.
- Hsieh, M.W., Hung, J.P., and Chen, D.J. (2008). Investigation on the blast resistance of a stiffened door structure. *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 16, No. 2, pp. 149-157.
- Hwang, H.K., Nam, J.S., Kim, H.S., Lee, I.C., Miyauchi, H., and Kim, G.Y. (2012). Evaluation on the blast resistant performance of fiber reinforced mortar with fiber type and PVA+STF panel installed intermediate space thickness. *Journal of the Architectural Institut of Korea, Sturcture & Construction*, Vol. 28, No. 9, pp. 115-122.
- Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (KICT). (2018). *Development of protective structure applied with high-performance fiber reinforced cememtitious composites*. KICT.
- Kim, B.T., Koh, S.W., and Kim, K.H. (2012). Stress analysis on the profile of blast wall with finite element method. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 11, No. 3, pp. 130-137.
- Kim, J.H., and Park, T.H. (2011). Analysis techniques of blast resistance concrete structures and concrete material model. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 2, pp. 30-36.
- Kim, M.H., Min, K.H., Yoo, D.Y., and Yoon, Y.S. (2011). Strengthening effect of CFRP sheets and steel fibers for enhancing the impact resistance of RC beams. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 11, No. 5, pp. 41-47.
- Kim, N.H. (2015). *A study on the structural stability of the sliding blast door under blast load*. Master's thesis, Seoul National University of Science and Technology.
- Kim, N.H., Park, K.J., and Lee, K.O. (2016). A study on structural stability of blast door by blast pressure. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 31, No. 3, pp. 8-15.
- Kim, S.B., Baik, S.H., Lee, J.H., Min, A.S., and Koh, Y.C. (2016). *Three companies producing CBR facilities, explosion test on the six blast-resistant doors*. Hwarang-dae Research Institute.
- 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*, Vol. 51, No. 5, pp. 380-387.
- Kim, S.K., and Park, Y.S. (2011). Protective design and blast resistant structures. *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, Vol. 59, No. 4, pp. 12-17.
- Koh, C.G., Ang, K.K., and Chan, P.F. (2003). Dynamic analysis of shell structures with application to blast resistant doors. *Shock and Vibration*, Vol. 10, No. 4, pp. 269-279.
- Krauthammer, T. (2011). *Modern protective structure*. CRC Press.
- 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 Architectural Institute of Korea, Structure & Construction*, Vol. 23, No. 12, pp. 43-50.
- Lim, K.M., and Lee, J.H. (2017). Evaluation of blast resistance of slab-column connections according to the confinement effects and drop panel. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 37, No. 2, pp. 451-457.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC). (2017). *LS-DYNA S/W and user's manuals*.
- Lu, X., and Jiang, J. (2002). Dynamic FEA and simulation for A series of blast-resist-door. *Proc. ISSST 2002, Progress in Safety Science and Technology*, pp. 839-843.

- Luo, X., Qian, X., Zhao, H., and Huang, P. (2012). Simulation analysis on structure safety of refuge chamber door under explosion load. *Procedia Engineering*, Vol. 45, pp. 923-929.
- Malvar, L.J., and Ross, C.A. (1998). Review of strain rate effects for concrete in tension. *ACI Material Journal*, Vol. 95, No. 6, pp. 735-739.
- Malvar, L.J., Crawford, J.E., Wesevich, J.W., and Simons, D. (1997). A plasticity concrete material model for DYNA3D. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 9-10, pp. 847-873.
- Markovich, N. (2009). *Investigation and calibration of constitutive models of concrete*. Master's thesis, Ben-Gurion University of the Negev.
- Markovich, N., Kochavi, E., and Ben-Dor, G. (2009). Calibration of a concrete damage material model in LS-Dyna for a wide range of concrete strengths. *International Workshop on Structures Response to Impact and Blast (IWSRIB) 2009*, Haifa, Israel.
- Meng, F., Zhang, B., Zhao, Z., Xu, Y., Fan, H., and Jin, F. (2016). A novel all-composite blast-resistant door structure with hierarchical stiffeners. *Composite Structure*, Vol. 148, pp. 113-126.
- Mills, C.A. (1987). The design of concrete structure to resist explosions and weapon effects. *Proceedings of the 1st Int. Conf. on Concrete for Hazard Protection*, Edinburgh, UK, pp. 61-73.
- Ministry of National Defense (MND). (1998). *Design standards for protective facilities*.
- Ministry of National Defense (MND). (2008). *Design and construction guide for CBR protection facilities*.
- Ministry of National Defense (MND). (2011). *Standards for national defense and military facilities, design guide for ammunition storage*. DMFC 5-60-30.
- Ministry of National Defense (MND). (2018). *Standards for national defense and military facilities, CBR protection facilities*. DMFC 4-70-20.
- Nam, J.W. (2007). Blast analysis of RC wall structure using high strain rate dependent concrete damage model and non-uniform peak pressure distribution model. Ph.D. dissertation, Yonsei University.
- Nam, J.W., Kim, H.J., Kim, S.B., and Byun, K.J. (2007). HFPB analysis of concrete wall structure subjected to blast loads. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3A, pp. 433-442.
- National Emergency Management Agency (NEMA). (2008). *A study on the standards and utilization plan of CBR facilities*. Policy Research Report.
- Newmark, N.M., and Hansen, J.R. (1961). Design of blast resistant structures. In C.M. Harris, and C.E. Crede (Eds.), *Shock and Vibration Handbook* (Vol. 3), New York: McGraw-Hill.
- Oh, I.H. (1998). *A study on the estimation of blast load and the design of a blast resistant door*. Military Science Graduate.
- Park, B.H. (2008). *A study on protective Criteria and Explosion safety evaluation of shelter*. Ph.D. dissertation, Kumoh National Institute of Technology.
- Park, S.J. (2014). *Development of a blast protective design method for steel panels with strain-rate effects*. Master's thesis, Chung-Ang University.
- Ross, C.A., Tedesco, J.W., and Kuennen, S.T. (1995). Effects of strain rate on concrete strength. *ACI Materials Journal*, Vol. 92, No. 1, pp. 37-47.
- Sangi, A.J., and May, I.M. (2009). High-mass, low-velocity impacts on reinforced concrete slabs. *7th European LS-DYNA Conference*.
- Shim, K.B., Lee, J.Y., Lee, J.H., Seong, Y.S., and Lee, T.S. (2018). Performance evaluation and structural proposal of sliding door under explosive load. *Proceeding of Conference*, The Korean Society of Mechanical Engineering, pp. 24-29.
- Shin, J.W., and Kim, J.K. (2016). Effects of near-field explosion of high explosives on blast over-pressures and impulses. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 16, No. 6, pp. 21-28.
- Sohn, S.G., Park, M.J., Ryu, J.H., and Ju, Y.K. (2017). Impact resistant of PROTECT panel for blast resistant column. *Journal of the Architectural Institut of Korea, Structure & Construction*, Vol. 33, No. 2, pp. 3-10.
- Tavakoli, H.R., and Kiakojoori, F. (2014). Numerical dynamic analysis of stiffened plates under blast loading. *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 11, No. 2, pp. 185-199.
- U.S. Department of Defense (DoD). (2008). *Unified facilities criteria (UFC) structures to resist the effects of accidental explosions*. UFC 3-340-02.
- Veeredhi, L.S.B., and Rao, R. (2015). Studies on the impact of explosion on blast resistant stiffened door structures. *Journal of the Institution of Engineers India: Ser. A*, Vol. 96, No. 1, pp. 11-20.
- Yi, N.H., Kim, S.B., Kim, J.H., and Cho, Y.G. (2009). Behavior analysis of concrete structure under blast loading: (II) Blast loading response of ultra high

strength concrete and reactive powder concrete slabs. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 5A, pp. 565-575.

Zhao, Z., Zhang, B., Zhou, J., Chen, H., Wang, B., Zhou, Y., et al. (2018). Quasi-far-field blast responses of hierarchical orthogrid-stiffened sheet molding compound protective door structures. *Engineering*

Structures, Vol. 168, pp. 431-446.

Received	May 27, 2019
Revised	June 3, 2019
Accepted	July 15, 2019