

설계변수에 따른 편개형 방폭문의 구조거동 유한요소해석

신현섭*, 김원우, 박기준, 이남곤, 문재흠, 김성욱
한국건설기술연구원 인프라안전연구본부

FE Analysis on the Structural Behavior of the Single-Leaf Blast-Resistant Door According to Design Parameter Variation

Hyun-Seop Shin*, Won-Woo Kim, Gi-Joon Park,
Nam-Kon Lee, Jae-Heum Moon, Sung-Wook, Kim

Department of Infrastructure Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

요약 강-콘크리트 편개형 방폭문은 외피 구조로서의 강재 박스와 내부의 철근콘크리트 슬래브 부재로 구성된 방호 구조물이다. 국내 방폭문 설계의 경우 폭압의 크기, 철근량 및 강박스의 강판두께와 같은 설계변수의 변화가 구조거동에 미치는 영향에 대해서 연구결과가 많지 않은 관계로 방폭문의 구조가 효율적으로 설계되지 않고 있다. 본 연구에서는 배근 간격 및 강재 박스의 강판 두께, 하중조건 등을 변수로 하여 유한요소 해석에 의한 구조거동 특성을 분석하였으며, 또한 방폭문의 구조성능을 구분하기 위해 산정되는 회전연성도 및 변위연성도를 재검토하고자 하였다. 유한요소해석 결과에 따르면, 배근 간격을 변수로 할 때 보다 강재 박스의 강판 두께가 변할 경우가 처짐과 같은 구조거동에 있어서 더 큰 변화를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 외피의 강재 박스의 강판 두께를 증가시킬 때 방폭문에 흡수된 변형 에너지가 더 큰 폭으로 감소하고, 결과적으로 전체적인 구조거동으로서의 처짐이 더 작게 발생하기 때문인 것으로 분석되었다. 또한, 방폭문의 구조성능을 구분하기 위한 방법으로서 회전 연성도 및 변위 연성도를 비교한 결과, 해석 대상 방폭문들의 성능은 회전 연성도 1도 및 변위 연성도 3을 기준으로 분류될 수 있었다. 폭발압에 대한 방폭문의 손상 수준을 분류하기 위해서는 향후 다수의 폭발시험 및 해석적 연구가 필요할 것으로 사료된다.

Abstract Steel-concrete single-leaf blast-resistant doors are protective structures consisting of a steel box and reinforced concrete slab. By the domestic blast-resistant doors, the structure is not designed efficiently because few studies have examined the effects of variables, such as the blast pressure, rebar ratio, and steel plate thickness on the structural behavior. In this study, the structural behavior of the doors was analyzed using the FE method, and the support rotation and ductility ratio used to classify the structural performance were reviewed. The results showed that the deflection changes more significantly when the plate thickness increases than when the rebar spacing is a variable. This is because the strain energy absorbed by the door is reduced considerably when the plate thickness increases, and as a result, the maximum deflection becomes smaller. According to a comparison of the calculated values of the support rotation and the ductility ratio, the structural performance of the doors could be classified based on the support rotation of one degree and ductility ratio of three. On the other hand, more explosion tests and analytical studies will be needed to classify the damage level.

Keywords : Blast-Resistant Door, Support Rotation, Ductility Ratio, Strain Energy, FEM

본 논문은 국토교통부 건설기술연구사업(19SCIPB146646-02)의 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Hyun-Seop Shin(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
email: hsshin@kict.re.kr

Received September 30, 2019

Revised October 31, 2019

Accepted November 1, 2019

Published November 30, 2019

1. 서론

화학물질, 폭약 등의 폭발을 비롯하여 총탄 및 각종 무기 등에 대한 보호의 목적으로 방호 및 대피 구조물의 출입구에 방폭문(Blast-Resistant Door)이 설치된다. 국가 중요시설 및 대피시설, 폭발성 화학물질 취급시설, 군사 시설 등에 주로 설치되고 있으며, 이중 군사시설의 경우에서와 같이 높은 폭발압에 노출될 가능성이 있는 경우에는 200 mm 이상 두께의 방폭문이 적용되고 있다. 이에 대한 구조형식을 검토해 보면 내부가 형강으로 보강되거나 콘크리트가 채워진 강재박스 형태를 취하고 있으며, 이중에서도 구조체의 변형 및 처짐에 대해 높은 성능수준이 요구되는 경우 후자의 구조형식을 취하고 있다 [1-3].

폭발압에 대한 방폭문의 성능을 분석하기 위해서는 폭발시험이 필요하지만, 작용하중으로 폭발압을 가해야 하기 때문에 위험도가 매우 높다. 또한, 폭발시험은 비용 및 장소의 제약 등으로 인해 전문기관에 의해 실시되고 있는 ‘방호 제작물의 성능평가시험’ 등과 같은 매우 제한적인 경우에만 가능하다. 이와 같은 제약조건이 주요 원인들 중의 하나이겠지만, 국내의 경우 방폭문을 비롯한 방호시설의 설계분야와 관련된 연구가 해외 관련기술 선진국에 비해서는 많이 미흡한 상태이다 [4-7]. 관련 연구 [1, 4, 8-15]를 검토해 보면, 폭발압 변화에 따른 구조물 응답, 지지조건 및 주변환경 등이 구조물 거동에 미치는 영향, 고성능 재료 및 구조적 충격흡수 메카니즘 적용에 의한 성능향상 방법 등 다양한 연구가 수행되어 왔다. 그러나, 보안 문제로 해외는 물론 국내에서도 연구결과가 부분적으로만 공유되고 있으며, 국내의 경우 폭발시험 데이터의 부족 및 관련 변수에 대한 구조거동의 해석적 연구가 많지 않은 관계로 방호구조물의 설계가 다소 과다 설계 되고 있음이 보고되고 있다.

구조거동을 정확하게 평가하기 위해서는 국외의 경우와 같이 다수의 폭발시험이 필요하지만, 국내에서는 1~2 회의 시험만을 실시하는 경우가 대부분을 차지하고 있다. 소수의 시험으로는 실험장소의 습도 및 지반 등의 환경 조건, 계측의 영향, TNT로부터 발현되는 폭발압의 편차 등으로 인해 의도한 폭발하중의 적용 및 구조거동의 정확한 계측이 쉽지 않다. 따라서, 폭발시험 회수의 절약 및 소수의 시험으로부터 의미 있는 결과를 얻기 위한 방법으로 해석적 연구의 필요성이 제기되고 있고, 이에 따라 기본적인 구조응답 및 시험으로부터 직접적 계측이 어려운 물리량의 경향 분석 등에 유한요소해석이 활발히 사용되고 있다 [1, 15, 16].

결론적으로 본 연구에서 검토하고자 하는 강-콘크리트 방폭문의 경우를 보면, 폭압의 크기, 철근량 및 강박스의 강판두께와 같은 주요 설계변수의 변화가 구조거동에 미치는 영향에 대한 연구가 많지 않고, 이로 인해 방폭문의 효율적 설계가 어려운 것으로 판단된다. 본 논문에서는 편개형 방폭문에 대해 유한요소에 의한 해석적 방법을 사용하여 위에서 밝힌 바와 같은 주요 변수가 구조거동에 미치는 영향을 정량적 및 정성적으로 나타내고자 한다. 또한, 방폭문의 구조성능을 구분하기 위해 산정되는 회전연성도 및 변위연성도를 재검토하고자 한다. 그리고, 이를 통해 향후의 편개형 방폭문의 사전설계, 실험적 연구 및 비교분석 연구의 효율적 수행 등에 기본자료로서 활용하고자 한다. 대표적인 설계변수를 갖는 방폭문에 대해서는 타 연구의 폭발시험 결과와 비교함으로써 해석 모델의 적합성을 검토하였으며, 이후의 기타 다른 변수값에 대한 해석에서는 동일한 유한요소 모델을 사용하였다. 해석에 사용된 프로그램은 충돌해석이나 폭발해석 등에 많이 사용되고 있는 LS-DYNA [17] 이다.

2. 편개형 방폭문 구조

방폭문의 종류에는 설치된 문 개수와 개폐방식에 따라 편개형(Single-Leaf), 양개형(Double-Leaf), 슬라이드 방폭문(Sliding Blast Door) 등이 있으며, 여기서 대상으로 하는 편개형의 예를 다른 종류의 방폭문과 함께 Fig. 1에 나타내었다. 또한, Fig. 2에는 전체 개요도를 나타내었다. 편개형 또는 양개형 방폭문의 경우 문의 지지와 개폐를 돕기 위해 측단에 힌지(Hinge) 및 렛치(Latch)와 같은 부속 철물이 설치되고 있다. 그러나, 폭압에 주로 저항하는 것은 방폭문 뒤쪽에 접해 있는 벽체이고, 힌지와 렛치의 역할은 1차적으로 벽체에 폭압이 전달된 이후, 충격에 의해서 방폭문에 발생하는 반력을 지지하는 것이다.

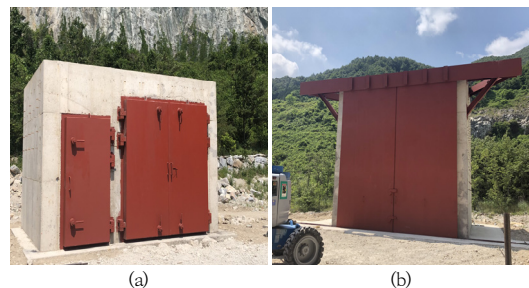


Fig. 1. Blast-resistant door types [18]
(a) Single- & double-leaf (b) Sliding

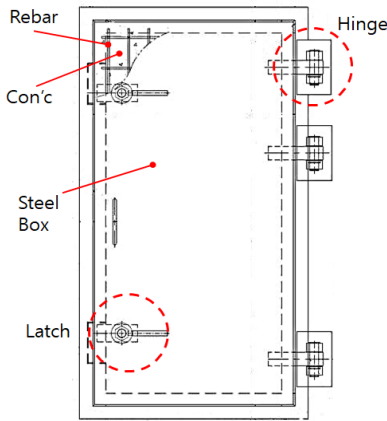


Fig. 2. Structure of single-leaf blast-resistant door [18]

양개형 방폭문의 경우 문 하나는 3번 지지 상태이나, 편개형 방폭문의 경우는 4번지지 상태로서 동일한 폭압에 대해 저항성능 측면에서 더 유리한 구조이다. 슬라이드 방폭문의 경우는 타 방폭문과 상이한 지지구조를 갖고 있다. 방폭문의 상하단 보다는 주로 좌우 측단에 접해 있는 벽체에 폭압이 전달되며, 이는 상하단에는 문의 개폐를 돕기 위해 롤러가 설치된 관계로 폭압의 전달에 있어 불리한 조건이기 때문이다.

방폭문의 구조성능을 사전에 검토하기 위해서는 하중으로 작용하는 폭압을 결정하여야 한다. 폭압은 주어진 폭약량 및 폭약-문 간의 이격거리의 조합으로 결정되며, 경험식 [19-21] 또는 미리 계산되어 있는 도표 [14]를 활용할 수 있다. 구조해석에 의해 구조물의 변형 및 변위, 응력, 흡수에너지 등을 검토하게 되고, 파괴에 도달하거나 변위에 대한 관련 기준값을 초과하게 되는 경우는 단면 재료의 재설정 및 반복 해석이 필요하다.

3. 해석조건 및 유한요소모델

3.1 해석조건

해석 대상의 편개형 방폭문의 크기는 mm 단위로 1,150(W)×2,250(H)×220(D)이며, 실제 형상은 Fig. 1. (a)에서 왼쪽에 위치한 방폭문과 동일한 구조를 취하고 있다. 주요 부재의 재료강도는 강박스의 경우 항복강도 275 MPa, 철근의 항복강도는 500 MPa이다. 또한, 콘크리트의 압축강도는 50 MPa이다.

변수로서 배근간격과 강박스 강판두께를 선정하였으며 Table 1에 나타낸 바와 같다. 배근간격의 경우 D16

철근을 사용하여 100/200/300 mm 간격으로 하였고, 강판두께는 5/10/15 mm로 하였다. 이는 대상 방폭문의 경우 일반적으로 배근간격 200 mm 내외(슬래브 상하단 배근), 강판두께의 경우는 5 mm ~ 10 mm 정도에서 설계되고 있음이 고려된 것이다.

Table 1. Analysis Variables

Type	Value		Symbol
Rebar Spacing (RC slab)	D16	@300	Case A
		@200	Case B
		@100	Case C
Plate Thick. (Steel Box)	5 mm	5t	
	10 mm	10t	
	15 mm	15t	
Blast Load	TNT	62.5 kg	P1
		125.0 kg	P2
		187.5 kg	P3

철근은 철근콘크리트 부재에서 인장에 대응하기 위해 설치되고 있으며, 강박스 강판의 경우는 인장/압축 및 휨 강도에도 기여하고 있는 점을 고려하여 서로 별도의 변수로 고려하였다. 또한, 기존 일반적인 편개형 방폭문의 경우 강박스와 내부의 철근콘크리트 부재가 서로 일체화된 구조는 아니므로 '강재량'과 같은 단일 변수로 고려하기에는 무리가 있을 것으로 사료된다. 방폭문 전체 두께의 경우는 최소 200 mm 이상으로 설계를 제시하고 있으며 [22], 두께가 증가할 경우 인력에 의한 개폐방식이 어렵기 때문에 현장에서 수용되기가 어려운 점, 또한 해석과 비교를 위해 참고한 폭발시험 [23]에서의 실험체 두께를 고려하여 220 mm로 고정하였다.

하중으로 작용하는 폭압은 TNT 폭약량을 기준으로 3가지의 경우를 고려하였다. 공인된 기관에서 폭발시험에 의한 구조성능을 검토할 때는 TNT 125 kg이 사용되며, 이를 중간값으로 설정하였다. 폭약의 폭발 위치와 구조체 간에 떨어진 거리는 6.0 m로서 폭발시험의 시험조건을 참고하였다. TNT 폭발에 의한 폭압이 구조체에 작용하는 시간은 수십 micro second(ms) 정도로 매우 짧고, 이 시간 동안 매우 강력한 압력이 작용하게 되는 관계로 폭발압 보다는 압력과 지속시간의 곱으로부터 얻어지는 충격량(impulse)을 하중으로서 분석에 사용하기도 한다.

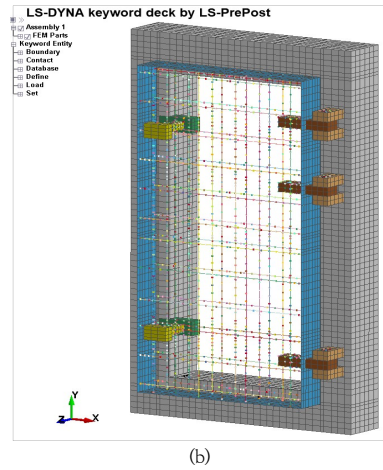
3.2 유한요소모델

해석에 사용된 유한요소모델을 Fig. 3에 나타내었다.

방폭문 자체 및 지지부재(힌지 및 랫치), 벽체로 구성되는 구조시스템을 모델링 한 것이다. 벽체의 경우 방폭문에 비해서는 상대적으로 강성이 매우 큰 강성체로서 거동하기 때문에 관련 연구 [18, 24]를 참고하여, 방폭문 주변부만 프레임 형태로 모델링 하였으며, 방폭문과 접하지 않은 반대편 벽체 면은 고정조건으로 하였다.

콘크리트, 지지부재, 벽체는 8절점의 Solid 요소, 강재 박스는 Shell 요소, 철근은 1차원 선형 요소를 사용하였다. 콘크리트 요소와 철근 요소 간에는 Rigid Link로서 연결하여 RC구조로 거동하게 하였다. 또한, 콘크리트와 강재 박스, 방폭문과 벽체 간에는 Contact 조건을 줌으로써 부재 간의 상호거동 및 폭발압이 방폭문으로부터 벽체에 전달될 수 있도록 하였다. 관련 문헌 [25]에 따르면, 강재-콘크리트 간의 마찰계수는 0.3 ~ 0.6의 범위에 있으며, 적정 값으로 제시되고 있는 0.47이 적용되었다. 지점조건으로서 힌지 부재의 끝단은 x, y, z 방향 모두 고정되고, 랫치 부재의 끝단은 y, z 방향이 고정된다. 랫치 부재의 끝단에 대해 x 방향을 구속하지 않은 것은 실제 구조에서도 구속조건이 없기 때문이다 [18, 24].

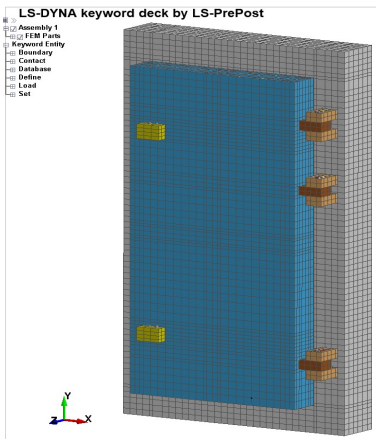
해석 프로그램으로 사용한 LS-DYNA에서는 콘크리트에 대해 CONCRETE_DAMAGE_REL3(기호72R3), SOIL_CONCRETE(기호78), WINFRITH_CONCRETE_REINFORCEMENT(기호84), CSCM(기호159) 등의 재료모델을 제시하고 있다. 본 연구에서는 Fig. 4에서와 같은 CONCRETE_DAMAGE_REL3를 사용하였다.



(b)

Fig. 3. FE model of the single-leaf blast-resistant door (a) Overall door structure (b) Rebar modelling

문헌 [5, 26-29]에 따르면 CONCRETE_DAMAGE_REL3 (기호72R3) 모델의 경우 콘크리트 재료거동을 비교적 정확히 분석할 수 있으며, 3차원 주응력 공간에서 Fig. 4 및 Eq. (1) ~ Eq. (3)에서와 같은 항복, 최대압축, 잔류응력상태 등을 판단할 수 있다 [18, 24, 27, 30]. 또한 폭발과 같이 짧은 시간에 높은 변형률이 발생하는 경우 콘크리트 재료 강도가 증가하는 효과(strain rate effect)를 고려하여야 한다. 본 연구의 해석에서는 Fig. 5에서와 같은 동적증가계수가 고려되었다 [18, 24, 30]. 한편, LS-DYNA에서는 한계 변형률을 초과 했을 때 Element를 삭제시킬 수 있는 'Erosion 옵션'을 제공하고 있으나, 해석에는 사용되지 않았다.



(a)

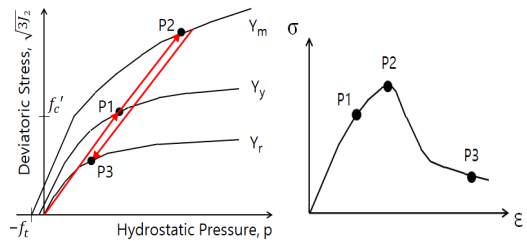


Fig. 4. Failure surfaces in K&C concrete material model [30]

(a) failure surface (b) constitutive behavior

- 항복상태 포락선(Yield Failure Surface)

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

- 최대압축상태 포락선(Maximum Failure Surface)

$$Y_m = \Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2 p} \quad (2)$$

- 잔류응력상태 포락선(Residual Failure Surface)

$$Y_r = \Delta\sigma_r = \frac{p}{a_{1f} + a_{2f} p} \quad (3)$$

$$\text{for } \sigma_y > 270 \text{ MPa}, \quad (4)$$

$$C = 92000 \cdot \exp(\sigma_y/364) - 194000$$

$$\text{for } \sigma_y \leq 270 \text{ MPa},$$

$$C = 40$$

4. 해석 결과

4.1 방폭문 힘거동 비교

강박스 강판두께 및 철근간격과 같은 구조설계 변수, 그리고 외부하중으로 작용하는 폭압의 변동에 따른 전체적인 구조거동을 검토하기 위해 방폭문 중앙부에서 발생한 처짐을 Table 2에 비교하여 놓았다. Fig. 6은 대표적인 예로서 강판두께 5t, 철근배근은 Case B, 그리고 하중조건 P2에 대해 최대처짐 발생 시의 방폭문 전체 처짐 분포를 나타낸 것이다. 또한, Fig. 7은 전반적인 양상을 파악하기 위해 철근간격은 같고 강판 두께가 변할 경우의 처짐 이력곡선을 비교하여 놓은 것으로서, 대표적인 예로서 철근간격은 Case B, 하중은 P2 Case에 대한 것을 나타내었다.

또한, Fig. 8은 Table 2에 나타낸 값들 중 예로서 철근배근은 Case B로 고정인 상태에서 강판두께가 5t에서 15t로 변화할 경우의 최대처짐을 비교하여 놓은 것이다. Fig. 8의 그래프에서 가로축은 하중조건 P1, P2, P3에서 발생하는 폭압을 충격량(폭압과 작용시간의 곱)으로 변환한 후, 가장 작은 값을 기준으로 정규화 하여 나타낸 것이며, 세로축은 가장 큰 처짐값을 기준으로 정규화한 것이다.

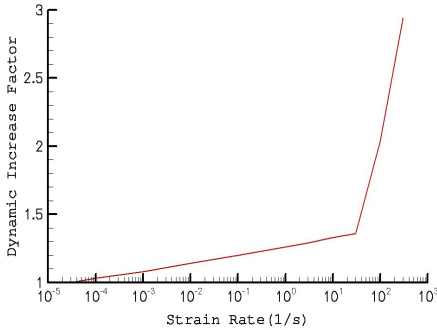


Fig. 5. Dynamic Increase Factor

또한, 강박스 강판 및 철근에 대해서는 재료모델로서 PLASTIC_KINEMATIC (기호003) 및 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (기호 024) 모델을 사용할 수 있으며, 여기서는 소성거동 및 변형률 속도의 영향을 고려할 수 있는 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 모델을 사용하였다 [18, 24]. 변형률 속도의 영향에 의한 강도가 증가하는 현상은 동적경화계수(dynamic hardening factor, DHF)에 의해 고려될 수 있으며, 이는 $DHF = 1 + (\epsilon/C)^{(1/p)}$ 와 같이 표현된다. 여기서, 상수로서 사용되는 p는 5, C는 Eq. (4)와 같은 식으로 구할 수 있다 [18, 24, 31].

Table 2. Comparison of Overall Structural Behavior: Deflection

Plate t (mm)	Rebar	Maximum Deflection (mm)						Permanent Deflection (mm)					
		Load Case						Load Case					
		P1		P2		P3		P1		P2		P3	
5	Case A	8.3		27.1		49.3		2.6		10.1		15.1	
	Case B	7.6	7.5 (1.00)	23.5	23.5 (1.00)	44.1	42.7 (1.00)	2.0	2.2 (1.00)	8.8	8.6 (1.00)	14.6	14.4 (1.00)
	Case C	6.7		19.8		34.8		1.9		6.8		13.5	
10	Case A	6.1		12.7		29.1		1.8		3.1		13.1	
	Case B	6.0	6.0 (0.80)	12.1	12.3 (0.52)	27.2	27.4 (0.64)	1.6	1.6 (0.73)	2.9	3.0 (0.35)	12.6	12.4 (0.86)
	Case C	5.8		12.0		25.9		1.5		2.9		11.4	
15	Case A	5.5		10.1		21.1		1.3		2.3		6.9	
	Case B	5.4	5.3 (0.71)	9.8	9.7 (0.41)	19.7	19.9 (0.47)	1.2	1.2 (0.54)	2.0	2.0 (0.23)	6.9	6.8 (0.47)
	Case C	5.1		9.3		19.1		1.0		1.8		6.5	

먼저, 강판 두께는 고정된 조건에서 철근배근 간격이 변할 경우의 방폭문 최대처짐을 비교 검토해 보았다. Table 2에 나타난 바와 같이 각 강판 두께에 따라 다소간의 차이는 보이고 있으나, 전반적으로 폭압이 작은 경우는 철근량의 변화에 따라 큰 차이를 보이고 있지 않으며, 폭압이 증가함에 따라 다소간의 차이를 보이고 있다.

강판두께가 10t로 고정인 경우를 예로 들면, 하중조건이 P1에서 P2, P3로 변화함에 따라 배근간격 Case간의 처짐값 차이는 최대 0.3 mm (P1), 0.7 mm (P2) 및 3.2 mm (P3)로서 폭압이 증가함에 따라 다소 증가하는 것으로 나타났다.

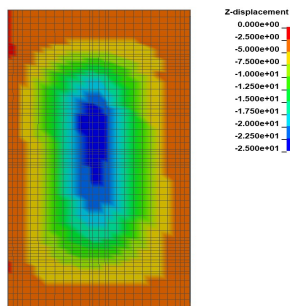


Fig. 6. Deflection contour

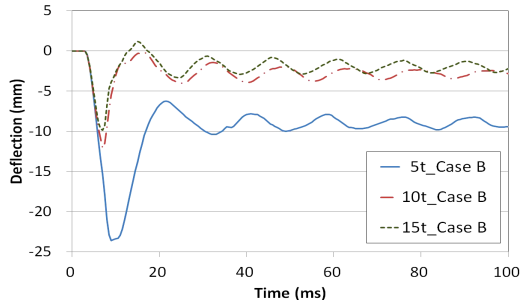


Fig. 7. Deflection hysteresis according to the plate thickness

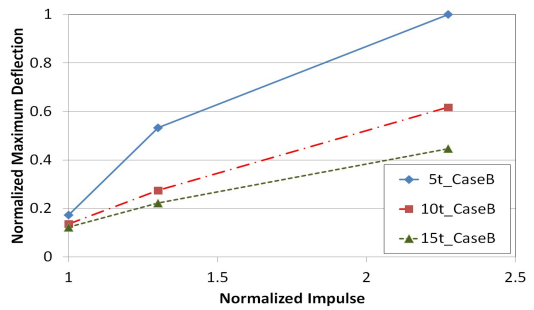


Fig. 8. Max. deflection according to the plate thickness

위와 반대로 철근배근 간격은 고정인 상태에서 강판두께가 변할 경우의 방폭문 최대처짐을 비교 검토해 보았다. 예를 들어 Case B로 고정인 경우, 폭압이 증가함에 따라 변수간의 최대 차이는 2.2 mm (P1), 13.7 mm (P2) 및 24.4 mm (P3)로 나타났다.

이와 같은 결과에 따르면, 강박스의 강판두께는 고정이고 배근간격만 변화할 경우는 전반적으로 최대처짐의 차이가 크지 않지만, 반대로 배근간격은 고정이고 강판두께가 변할 경우는 상대적으로 상당한 차이를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

Table 3은 방폭문 구조의 성능과 폭압에 대한 파손 정도를 판단하는데 사용되고 있는 회전연성도(Edge Rotation) θ 및 변위연성도(Ductility Ratio) μ 를 각 변수 조합에 대해 나타낸 것이다. 여기서, 회전연성도 θ 와 변위연성도 μ 는 아래의 Eq. (5) 및 Eq. (6)과 같이 정의되며 [22-24], X_m 은 최대처짐, X_c 는 탄성처짐을 의미하고 L 은 슬래브 길이이다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2X_m}{L}\right) \quad (5)$$

Table 3. Comparison of Overall Structural Behavior: Support Rotation and Ductility Ratio

Plate t (mm)	Rebar	Edge Rotation (deg)						Ductility Ratio					
		Load Case						Load Case					
		P1		P2		P3		P1		P2		P3	
5	Case A	0.42	0.38 (1.00)	1.38	1.20 (1.00)	2.51	2.17 (1.00)	1.41	1.33 (1.00)	4.23	3.78 (1.00)	8.44	7.72 (1.00)
	Case B	0.39		1.20		2.24		1.33		3.75		7.72	
	Case C	0.34		1.01		1.77		1.25		3.35		6.42	
10	Case A	0.31	0.31 (0.82)	0.65	0.63 (0.53)	1.48	1.40 (0.65)	1.20	1.19 (0.89)	2.02	1.98 (0.52)	5.39	5.14 (0.69)
	Case B	0.31		0.62		1.39		1.18		1.96		5.14	
	Case C	0.30		0.61		1.32		1.18		1.95		5.13	
15	Case A	0.28	0.27 (0.71)	0.51	0.49 (0.41)	1.07	1.01 (0.47)	1.15	1.13 (0.85)	1.85	1.82 (0.48)	4.12	3.95 (0.53)
	Case B	0.28		0.50		1.00		1.12		1.82		3.95	
	Case C	0.26		0.47		0.97		1.11		1.80		3.92	

$$\mu = X_m / X_e \quad (6)$$

ASCE [32] 및 국내 기준 [22]에서 제시하고 있는 철근콘크리트 슬래브에 대한 회전연성도를 참고하면, 낮은 수준의 응답 및 손상(Low Damage)에 대한 한계값으로 2도 이하를 제시하고 있다. 이에 따르면, 강판두께가 5t 이고 하중 Case가 P3인 경우를 제외하고 모든 경우에 있어 낮은 수준의 손상이 발생하는 것으로 분류된다.

그러나, 폭발 하중에 대한 구조물 설계방법을 제시하고 있는 UFC 3-340-02 [14]에서 제시하고 있는 1도 이하의 값을 참고하면, 결과는 다소 달라진다. 즉, 강판두께가 5t인 경우 하중 Case P1에 대해서만 낮은 수준의 손상이 발생하고, 10t 및 15t인 경우는 하중 Case P2까지에 대해 낮은 수준의 손상이 발생한 것으로 볼 수 있다. 그리고, 이 이외의 하중 Case에 대해서는 중간 정도 손상(Medium Damage) 수준의 유의미한 균열 및 파쇄가 발생한 것으로 구분될 수 있다.

한편, 변위연성도의 경우 ASCE [32]에서는 강구조물 및 프리스트레스트 콘크리트에 대한 기준값은 제시되어 있으나, 철근콘크리트 슬래브에 대한 값은 별도로 제시되어 있지 않다. U.S. Army Corps of Engineers [33]에 의하면, 표면적인 손상(superficial damage)에 대해서만 변위연성도 1 이하의 값을 제시하고 있고, 그 이상의 손상에 대한 값은 제시되어 있지 않다. 국내 문헌 [22, 34]에 따르면 변위연성도 1 이하일 때 미세균열 발생(낮은 수준의 손상), 1 초과 3 이하일 때 균열 또는 파쇄 발생(중간 수준의 손상), 3 초과 10 이하일 때 철근과 콘크리트가 분리(높은 수준의 손상) 등과 같은 값을 제시하고 있다. 이에 따르면, Table 3의 변위연성도에 대한 비교에서 음영으로 된 경우는 철근과 콘크리트가 분리되는 수준의 손상이 발생되고, 그 이외의 경우는 균열 또는 파쇄가 발생하는 수준의 손상이 발생된 것으로 분류될 수 있다.

위의 비교 결과에 따르면, 각 변수들에 대한 해석결과는 회전연성도 기준으로는 낮은 수준 정도의 손상과 중간 수준 정도의 손상으로 분류되지만, 변위연성도 기준으로는 한단계씩 높은 수준의 손상이 발생하는 것으로 볼 수 있다. 관련 문헌 [35]에 의하면, 위 기준에 제시된 한계값들은 철근콘크리트 구조물에 대한 기준으로서 강-콘크리트 복합구조물에도 적용 가능한지는 의문 사항으로 남아있기 때문에 향후 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다. 따라서, 본 연구의 해석결과에서는 회전연성도 1

도 및 변위연성도 3을 기준으로 해석 대상의 방폭문의 성능이 구분될 수 있음을 알 수 있었다. 회전연성도 및 변위연성도를 종합적으로 고려하여 손상수준의 개념에 따라 파손정도를 분류하기 위해서는 향후 다수의 폭발시험 및 해석적 연구가 필요하다.

위와 같은 유한요소해석 결과의 신뢰성을 검증하기 위해 폭발시험 결과 [23]와 비교해 보면, 동일 구조의 편개형 방폭문에 대해 Table 4와 같다. 비교 표에서의 해석 결과는 10t - Case B - 하중 Case P2의 변수 조합에 대한 것이다. 비교결과, 실험체 2 보다는 해석결과가 다소 크게 나타났으나, 실험체 1과는 큰 차이를 보이지 않고 있다. 실험값 평균으로 최대처짐의 경우 10.6 mm, 회전연성도는 0.58도로서 해석결과와는 각각 12 % 및 6 % 수준의 차이를 나타낸다. 방폭 해석과 관련된 연구 [36]에 의하면 10 % 내외 수준의 차이는 충분히 납득될 수 있는 오차로 받아들여지고 있는 점을 감안할 때, 본 연구에서의 해석결과가 실험결과를 정확히 예측할 수는 없더라도 구조거동의 특성을 파악하고, 동일 해석모델로 설계변수의 변화에 따른 추세분석을 하기에는 적합한 것으로 판단된다. 또한, 서론 부분에서 밝힌 바와 같이 폭발시험 결과는 폭약의 폭발압 편차, 온도 및 습도와 같은 외부환경에 따라 동일 장소에서도 다소 달라질 수 있음을 감안할 때, 10 % 내외의 차이는 크지 않다고 사료된다.

Table 4. Comparison of Test and FE analysis

Type	specimen 1	specimen 2	FE results
max. deflection	12.7 mm	8.5 mm	12.1 mm
support rotation	0.69°	0.46°	0.62°

또한, 수치해석 자체의 오류를 검토하기 위한 수단으로 내부에너지(internal energy, 본 해석의 경우 변형 에너지에 해당)에 대한 hourglass energy(변형된 요소의 형상을 따서 모래시계 에너지라 하며, zero strain energy라고도 함)의 비율을 검토하여 보았다. 검토 결과에 따르면, 최소 2.27 %에서 최대 9.66 %를 나타내고 있다. 10 % 이하일 때 해석적 오류가 적은 신뢰성 있는 결과로 받아들여지고 있는 점을 감안할 때 [37], 본 연구의 해석에서 발생한 수치적 오류는 납득될 수 있는 범위 내에 있다고 할 수 있다.

4.2 방폭문 변형에너지 비교

일반적으로 충격하중이나 폭발압을 받는 구조체에 대해 변형 정도를 정량적으로 비교 판단하기 위한 수단으로 구조체에 흡수된 변형에너지를 비교하게 된다 [38, 39]. 하중 종류 및 해석 대상에 따라 다른 물리량에 대한 흡수에너지를 비교하기도 하기 때문에 크게는 내부에너지라고도 한다. Table 5는 변수 조합 전체에 대해 최대 처짐 발생 시 방폭문 구조체의 변형에너지를 비교하여 나타낸 것이며, Fig. 9 (a)는 강판두께는 10t이고, 배근간격을 변수로 하였을 때, Fig. 9 (b)는 철근배근은 Case B로 고정이고 강판두께를 변수로 하였을 때 충격량 변화에 따른 변형에너지를 그래프의 형태로 비교해 놓은 것이다.

강판두께가 어느 하나의 경우로 고정인 상태에서 배근간격의 변화에 따른 변형에너지를 비교해 보면, 폭압의 크기에 따라 다소 간의 차이는 있으나 의미있는 수준의 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 예를 들어, 강판두께가 10t인 경우 하중 Case P1일 때 배근간격이 A와 C인 경우의 차이는 0.15 kJ이고, 하중 Case가 P2 및 P3로 변화함에 따라 각각 0.6 kJ 및 0.8 kJ과 같은 차이를 보이고 있다. Fig. 9 (a)와 같이 정규화한 그래프를 검토해 보면 배근간격을 변수로 한 경우는 전체적인 경향을 보았을 때 변형에너지에 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

Table 5. Comparison of the absorbed strain Energy

Plate t (mm)	Rebar	Strain Energy (kJ)					
		Load Case					
		P1	P2	P3	P1	P2	P3
5	Case A	5.20	5.07	14.70	14.37	26.10	25.90
	Case B	5.10		14.40		25.90	
	Case C	4.91		14.00		25.70	
10	Case A	4.58	4.51	12.60	12.33	23.80	23.43
	Case B	4.53		12.40		23.50	
	Case C	4.43		12.00		23.00	
15	Case A	4.34	4.23	11.90	11.67	22.60	22.27
	Case B	4.24		11.70		22.30	
	Case C	4.11		11.40		21.90	

이에 비해 철근배근은 어느 한 경우로 고정인 상태에서 강판두께를 변수로 할 경우는 더 큰 차이를 보이고 있다. 예를 들어 배근간격이 Case B로 고정이고, 강판두께를 변수로 한 경우에서 폭압이 P1에서 P3로 변화함에 따라 변수 간의 변형에너지 최대 차이는 0.86 kJ (P1),

2.70 kJ (P2) 및 3.6 kJ (P3)로서 철근배근이 변수인 경우 보다 더 큰 차이를 나타낸다. Fig. 9 (a)와 Fig 9 (b)를 상호 비교해 보아도 강판두께를 변수로 한 경우가 더 큰 변화를 보이고 있음을 알 수 있다.

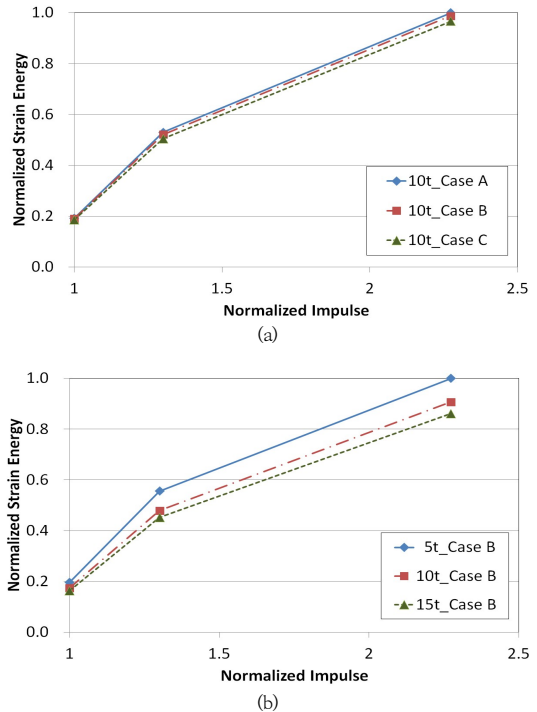


Fig. 9. Comparison of max. absorbed strain energy (a) According to the rebar spacing (b) According to the plate thickness

위와 같은 비교결과로 볼 때 철근배근을 변수로 하는 경우 보다 강판두께를 변수로 하는 경우 더 큰 변형에너지 차이를 나타내는 것을 알 수 있다. 이와 같은 변수 종류별 경향으로부터 처짐값 비교에서 얻은 분석결과의 유효성을 확인할 수 있었다.

결론적으로 배근간격을 좁혀서 철근량이 늘어나는 경우 보다 강판두께를 증가시킬 때 변형에너지가 더 큰 폭으로 감소한다는 것은 강판두께가 증가할 때 방폭문의 변형이 더 작게 발생한다는 의미로서 구조적 성능 증가에 더 큰 영향을 미친다고 할 수 있으며, 그 결과가 방폭문 전체 구조의 최대처짐 감소로 나타나게 된다고 판단된다.

4.3 방폭문 응력 검토

강박스 강판두께 및 배근간격 등 강재량 변화에 따라

콘크리트 부재에 발생하는 응력을 비교 검토하였다. Fig. 10은 예로서 배근간격은 Case B로 고정하고 강판두께를 변수로 하였을 때, 콘크리트 슬래브 부재의 중앙부에서 발생하는 최대 응력을 정수압(hydrostatic pressure)과 편차응력(deviatoric stress)의 응력공간에서 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 11은 예로서 강판두께는 10t로 일정하고, 배근간격을 변수로 하였을 때에 대한 것이다. 또한, Fig. 10의 각 점에 해당하는 콘크리트 부재의 응력 분포 상태를 Fig. 12 ~ Fig. 14에 각 강판두께 별로 나타내었다. Fig. 10 및 Fig. 11 그래프에서 괄호 안의 기호는 하중 Case를 의미하는 것으로 폭압의 변화에 따른 응력 증감을 나타내었다. 또한, Yield Surface 및 Maximum Surface는 파괴포락선을 의미한다.

Fig. 10의 강판 두께 변화에 따른 콘크리트 부재의 응력변화를 검토해 보면, 5t인 경우 폭압이 큰 경우(하중 Case P2 및 P3)에도 편차응력이 40 MPa 이하로서 다른 변수의 경우에 비해 상대적으로 작은 값을 나타내고, 또한 파괴포락선에 더욱 근접하고 있음을 알 수 있다. 10t 및 15t인 경우는 하중 Case P1에서 P2로 폭압이 증가함에 따라 최대 편차응력이 50 MP 이상의 값을 나타내어, 최대 처짐이 발생할 때까지 상당한 응력을 부담할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나, 폭압이 Case P3(폭약량 187.5 kg, 충격량으로 0.49 bar·s에 해당)로 P2인 경우에 비해 75 % 더 증가한 경우에는 폭압 증가량에 상응하는 응력 증가를 보이고 있지 않으며 오히려 미소하게 감소한 값을 보이는 경우도 있고, 또한 파괴포락선 방향으로 더 근접하고 있는 것으로 분석되었다.

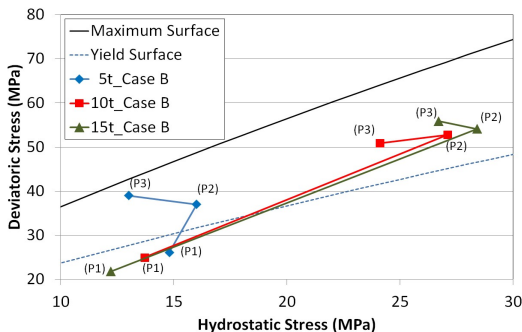


Fig. 10. Max. stress in the center of con'c slab according to the plate thickness

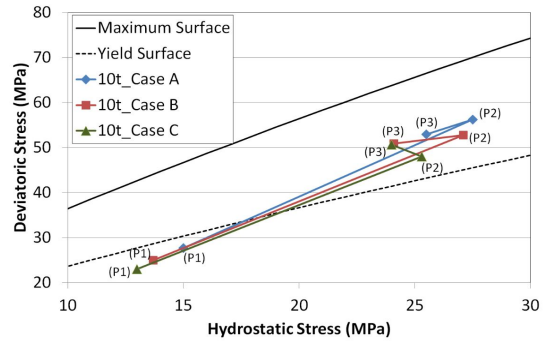


Fig. 11. Max. stress in the center of con'c slab according to the rebar spacing

위에서와 같은 응력값 비교 결과를 Fig. 12 ~ Fig. 14에서와 같은 콘크리트 부재 상면에서의 응력분포(Stress Contour) 비교 결과와 연관하여 검토하면 다음과 같다. 강판두께가 5t인 방폭문의 경우, 폭압이 높은 경우(하중 Case P2 및 P3)에도 다른 강판두께의 방폭문에 비해서 부재 중앙부에 상대적으로 더 작은 응력(40MPa 미만)이 분포되어 있음을 볼 수 있다. 강판두께 5t의 방폭문에 대한 이와 같은 결과는 다음과 같은 원인 때문이다. 즉, 강판 및 철근에 발생한 응력을 검토해 보면 두 부재 모두 항복점을 이미 지난 상태로서 콘크리트 부재의 단면에 상대적으로 높은 압축응력이 형성될 수 없기 때문이다. 이로 인해 다른 강판두께의 방폭문에 비해 더 큰 처짐이 발생한 것으로 판단된다.

강판두께 10t 및 15t의 방폭문에서는 하중 Case P2 및 P3로 높은 폭압이 작용할 경우 콘크리트 부재 중앙부에 50 MPa 이상의 휨 압축응력이 집중되고 있음을 볼 수 있다(중앙부 붉은색 부분). 단, 하중 Case P3인 경우에는 P2인 경우에 비해 응력집중 정도가 감소한 것을 볼 수 있다. 이를 Fig. 10의 그래프에 나타낸 것과 연관해 보면, 하중이 P2에서 P3로 증가하였으나, 정수압(Hydrostatic Pressure)은 감소하고, 편차응력(Deviatoric Stress)은 미소하게 증가 또는 감소하여 P3 하중조건에서는 파괴포락선에 더 근접해 있음을 알 수 있다.

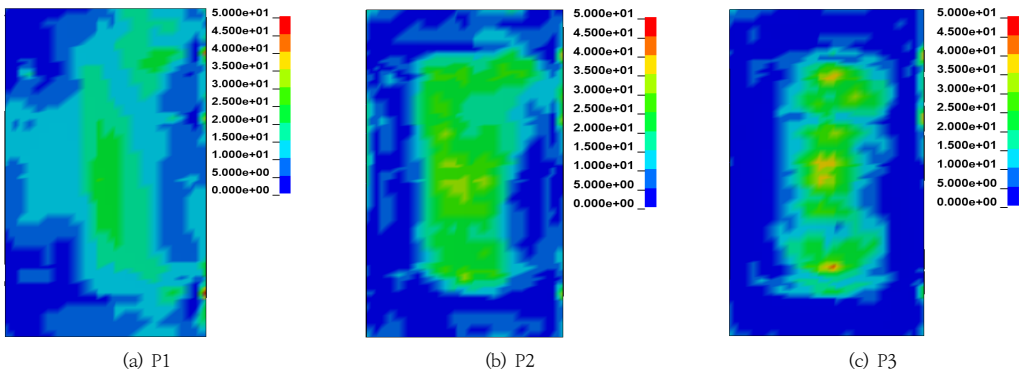


Fig. 12. Deviatoric stress contour of con'c slab according to the blast pressure in the case of 5t plate

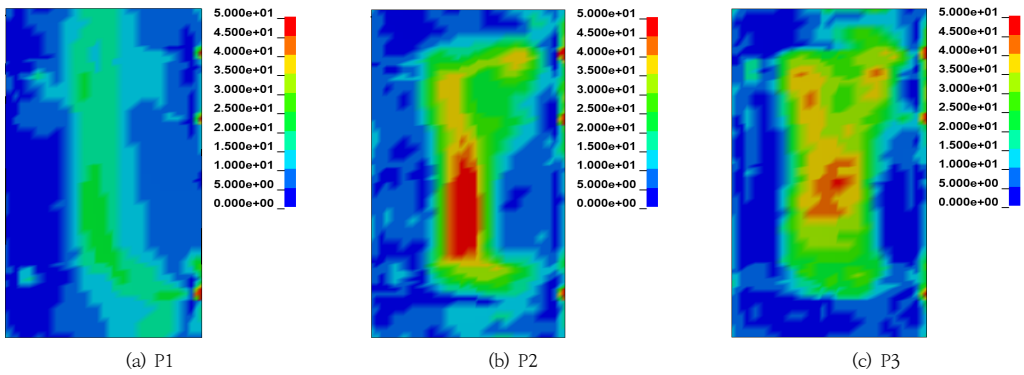


Fig. 13. Deviatoric stress contour of con'c slab according to the blast pressure in the case of 10t plate

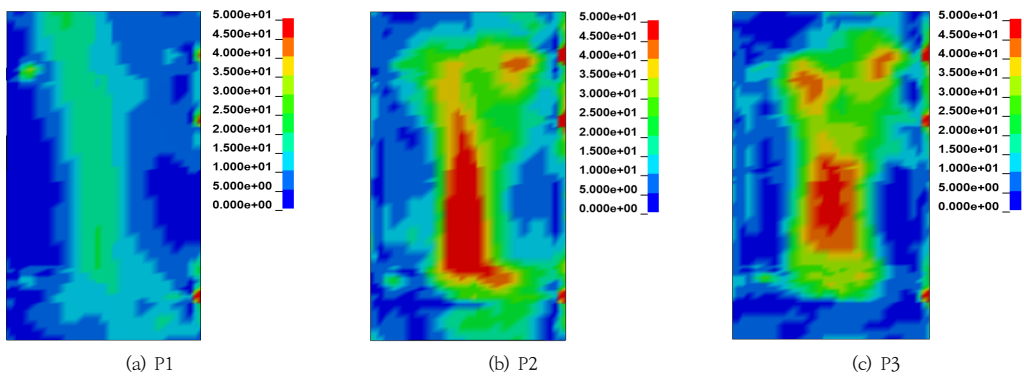


Fig. 14. Deviatoric stress contour of con'c slab according to the blast pressure in the case of 15t plate

강박스의 강판과 철근에서 발생한 최대 응력을 검토한 결과, 강판은 P2 및 P3 조건에서 모두 항복하였고, 철근의 경우 P2에서 항복 전이었으며, P3에서는 항복점에 근접(15t의 방폭문 경우) 또는 항복한 상태(10t의 방폭문 경우)이다. 따라서, 폭압이 P2에서 P3로 증가한 경우, 인장재의 항복으로 인해 콘크리트 부재에는 폭압 증가에 비해 압축응력이 증가하지 못하고 응력상태가 파괴포락선으로 근접한 것으로 판단된다.

한편, Fig. 11에 나타낸 바와 같이 강판두께는 고정인 상태에서 배근간격을 변수로 한 경우 콘크리트 부재에 발생한 응력을 비교하여 보았다. 이에 따르면, 강판두께를 변수로 한 경우에 비해 전체적인 경향은 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 단, 철근배근 간격이 넓어서 철근량이 가장 작은 Case A인 경우, 그래프의 기울기가 더 큰 것을 볼 수 있고, 하중이 P2에서 P3 조건으로 증가할 때 응력이 더 큰 폭으로 감소되고 있음을 알 수 있었다. Case B 및 Case C와 같이 철근배근 간격을 상대적으로 작게 해서 철근량이 많아질 경우에는 동일 하중조건에서 콘크리트에 발생하는 응력이 더 작게 나타나서 응력상태에 더 '여유도'가 있는 것으로 나타났다.

위와 같은 응력검토 결과, 앞에서의 처짐 및 변형에너지 비교 결과와 같은 결론에 도달할 수 있었다. 응력검토에서 새롭게 확인할 수 있었던 것은 강판두께 5t의 방폭문의 경우 하중 Case P2 및 P3 조건에서 강박스 및 인장철근의 항복으로 인해 방폭문의 구조성능이 충분하지 않은 것으로 나타났다. 강판두께 10t 및 15t의 방폭문의 경우는 하중 Case P3 조건에서 항복된 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과로부터 Table 3에 대한 검토결과인 회전연성도 1도 및 변위연성도 3을 기준으로 방폭문의 성능이 분류될 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 강-콘크리트 편개형 방폭문의 전체 두께는 제한된 조건에서 강박스 강판두께 및 슬래브 배근간격과 같은 설계요소와 외부하중으로 작용하는 폭압을 변수로 하여 처짐, 변형에너지 및 응력과 같은 구조거동을 비교 분석하였다. 분석결과에 따르면 방폭문의 구조성능을 향상시키기 위해서 슬래브의 철근 배근량을 증가시키는 것 보다는 외피를 이루고 있는 강박스의 강판두께를 증가시켜 휨에 대한 강성 증가와 변형에너지 흡수용량을 더 증가시키는 것이 내부의 RC 슬래브 부재의 변형

을 억제시킬 수 있고, 결과적으로 전체 구조의 처짐을 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로 볼 때 방폭문 전체 구조의 두께가 한정된 경우에는 강박스를 1차적인 주요 변수로 하여 설계하는 것이 구조성능 향상에 있어서 더 합리적인 것으로 판단된다. 또한, 해석대상의 방폭문 성능은 회전연성도 1도, 변위연성도 3을 기준으로 분류될 수 있었다. 단, Low/Medium/High Damage 등과 같이 손상수준 개념에 따라 파손정도를 분류할 수는 없었으며, 이에 대해서는 향후 배근간격 및 철근량의 변화에 따른 콘크리트 부재의 파손 정도와 관련하여 다수의 폭발시험 및 비교 해석이 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] N. H. Kim, K. J. Park, K. O. Lee, "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, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2016.31.3.8>
- [2] Ministry of National Defense, Design Standards for Protective Facilities, Republic of Korea, 1998.
- [3] Ministry of National Defense, Design and Construction Guide for CBR Protection Facilities, Republic of Korea, 2008.
- [4] K. B. Shim, J. Y. Lee, J. H. Lee, Y. S. Seong, T. S. Lee, "Performance Evaluation and Structural Proposal of Sliding Door under Explosive Load", *Proceeding of Conference of The Korean Society of Mechanical Engineering*, pp. 24~29, 2018.
- [5] J. H. Kim, T. H. Park, "Analysis Techniques of Blast Resistant Concrete Structures and Concrete Material Model", *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.2, pp.30~36, 2011.
- [6] K. J. Byun, J. W. Nam, H. J. Kim, S. B. Kim, "Dynamic Analysis of Reinforced Concrete Wall under Blast Loading", *Proceeding of 2nd ACF International Conference*, Asian Concrete Federation, Bali, Indonesia, pp.180~186, 20~21 November, 2006.
- [7] J. W. Nam, H. J. Kim, S. B. Kim, N. H. Yi, J. H. Kim, "Numerical Evaluation of the Retrofit Effectiveness for GFRP Retrofitted Concrete Slab Subjected to Blast Pressure", *Composite Structure*, Vol.92, No.5, pp.1212~1222, 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.10.031>
- [8] L. S. B. Veeredhi, R. Rao, "Studies on the impact of explosion on blast resistant stiffened door structures", *Journal of the Institution of Engineers, India Series A*, Vol. 96, No. 1, pp.11~20, 2015.
DOI: [10.1007/s40030-014-0103-x](https://doi.org/10.1007/s40030-014-0103-x)

- [9] H. R. Tavakoli, F. Kiakojoori, "Numerical dynamic analysis of stiffened plates under blast loading", *Latin American Journal of Solids and Structures*, Vol. 11, No. 2, pp.185~199, 2014.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-78252014000200003>
- [10] W. Chen, H. Hao, "Numerical simulations of stiffened multi-arch double-layered panels subjected to blast loading", *Int. J. of Protective Structures*, Vol. 4, No. 2, pp.163~188, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1260/2041-4196.4.2.163>
- [11] C. G. Koh, K. K. Ang, P. F. Chan "Dynamic analysis of shell structures with application to blast resistant doors", *Shock and Vibration*, Vol. 10, No. 4, pp.269~279, 2003.
- [12] X. Luo, X. Qian, H. Zhao, P. Huang, "Simulation analysis on structure safety of refuge chamber door under explosion load", *Procedia Engineering*, Vol. 45, pp.923~929, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.08.260>
- [13] National Emergency Management Agency, A Study on the Standards and Utilization Plan of CBR Facilities, Policy Research Report, Republic of Korea, 2008.
- [14] U.S. Department of Defense, Unified Facilities Criteria: Structures to resist the effects of accidental explosions, UFC 3-340-02, 2008.
- [15] J. W. Nam, H. J. Kim, S. B. Kim, K. J. Byun, "HFPB Analysis of Concrete Wall Structure Subjected to Blast Loads", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.27, No.3, pp.433~442, 2007.
- [16] N. H. Yi, S. B. Kim, J. H. Kim, Y. G. Cho, "Behavior Analysis of Concrete Structure under Blast Loading: (II) Blast Loading Response of Ultra High Strength Concrete and Reactive Powder Concrete Slabs", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.5A, pp.565~575, 2009.
- [17] Livermore Software Technology Corporation, LS-DYNA S/W and User's manuals, 2017.
- [18] Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Development of Protective Structure Applied with High-Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, KICT, 2019.
- [19] H. L. Brode, "Numerical Solutions of Spherical Blast Waves", *Journal of Applied of Physics*, Vol.26, No.6, 1955.
- [20] N. M. Newmark, J. R. Hansen, Design of Blast Resistant Structures, Shock and Vibration Handbook, Vol.3, McGraw-Hill, 1962.
- [21] C. A. Mills, "The Design of Concrete Structure to Resist Explosions and Weapon Effects", *Proceeding of 1st International Conference on Concrete for Hazard Protection*, Edinburgh, UK, pp.61~73, 1987.
- [22] Ministry of National Defense, Standards for National Defense and Military Facilities: Design Guide for Ammunition Storage, DMFC 5-60-30, Republic of Korea, 2011.
- [23] S. B. Kim, S. H. Baik, J. H. Lee, A. S. Min, Y. C. Koh, Three Companies Producing CBR Facilities: Explosion Test on the six Blast- Resistant Doors, Institute of HwaRangDae, 2016.
- [24] H. S. Shin, W. W. Kim, S. W. Kim, J. H. Moon, "Design Sensitivity Analysis of a Steel-concrete Double-leaf Blast-resistant Door to Determine the Steel Ratio", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.19, No.4, pp.165~177, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.4.165>
- [25] Y. S. Kwon, H. G. Kwak, J. Y. Hwang, J. K. Kim, J. M. Kim, "An Improved Bond Slip Model of CFT Columns for Nonlinear Finite Element Analysis", *Journal of Computational Structural Engineering Institute of Korea*, Vol.19, No.2, pp.213~220, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.2.213>
- [26] K. M. Lim, J. H. Lee, "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, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2017.37.2.0451>
- [27] L. J. Malvar, J. E. Crawford, J. W. Wesevich, J. Simons, "A Plasticity Concrete Material Model for DYNA3D", *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 19, No. 9, pp.847~873, 1997.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)00023-7](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)00023-7)
- [28] R. M. Brannon, S. Leelavanichkul, Survey of four damage models for concrete, Sandia National Laboratories, SAND2009-5544, 2009.
- [29] J. E. Crawford, Y. Wu, H. J. Choi, J. M. Magallanes, S. Lan, 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, 2012.
- [30] N. Markovich, *Investigation and calibration of constitutive models of concrete*, Ph.D dissertation, Ben-Gurion University of the Negev, 2009.
- [31] J. M. Choung, C. S. Shim, K. S. Kim, "Theoretical Backgrounds of Strain Hardening and Rate Hardening of a Marine Structural Steel", *Proceeding of the Korean Association of Ocean Science and Technology Societies*, Busan BEXCO, Korea, pp.1393-1403, 2011.
- [32] American Society of Civil Engineers(ASCE), Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities, First Edition, ASCE Publication, 1997.
- [33] U.S. Army Corps of Engineers(U.S. ACE), Single Degree of Freedom Structural Response Limits for Anti-terrorism Design, Technical Report PDC-TR 06-08, Protective Design Center, 2006.
- [34] J. C. Lee, Y. J. Park, G. S. Kim, T. S. Lim, Y. G. Park, "A Basic Study on Upgrading of the Evaluation Factors of the Protective Capacity in Military Protective Facilities", *Journal of the Architectural Institute of*

Korea Planning & Design, Vol. 22, No. 1, pp.31~38, 2006.

- [35] S. K. Kim, Y. S. Park, "Protective Design and Blast Resistant Structures", *Korean Society of Civil Engineers Magazine*, Vol.59, No.4, pp.12~17, 2011.
- [36] H. Draganic, D. Varevac, "Analysis of Blast Wave Parameters Depending on Air Mesh Size", *Hindawi Shock and Vibration*, Vol.2018, pp.1~18, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/3157457>
- [37] X. Zhang, X. Zhao, Y. Zhang, Z. Li, "A one-point quadrature element used in Simulation of Cold Ring Rolling Process", *Materials Science Forum* Vols.704-705, pp.165-171, Trans Tech Publications, Switzerland, 2012.
DOI: [10.4028/www.scientific.net/MSF:704-705.165](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF/704-705.165)
- [38] W. Chen, H. Hao, "Numerical study of a new multi-arch double-layered blast-resistance door panel", *International Journal of Impact Engineering* 43, pp.16~28, 2012.
DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2011.11.010](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2011.11.010)
- [39] S. J. Kim, J. M. Sohn, J. C. Lee, C. B. Li, D. J. Seong, J. K. Paik, "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, 2014.
DOI: [http://dx.doi.org/10.3744/SSNAK.2014.51.5.380](https://doi.org/10.3744/SSNAK.2014.51.5.380)

신 현 섭(Hyun-Seop Shin)

[정회원]



- 1996년 2월 : 인하대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 9월 : 독일 아헨공대 (RWTH Aachen) 토목공학과 (공학박사)
- 2004년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 연구위원

〈관심분야〉

토목공학, 합성구조

김 원 우(Won-Woo Kim)

[정회원]



- 2016년 2월 : 경기대학교 일반대학원 건축공학과 (공학석사)
- 2015년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

〈관심분야〉

건설재료 및 합성구조

박 기 준(Gi-Joon Park)

[정회원]



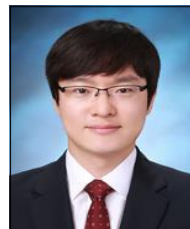
- 2015년 2월 : 세종대학교 일반대학원 건설환경공학과 (공학석사)
- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

〈관심분야〉

토목공학, 건설재료

이 남 곤(Nam-Kon Lee)

[정회원]



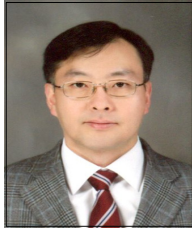
- 2010년 2월 : 서울대학교 대학원 건축학과 (공학석사)
- 2014년 8월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 (공학박사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

〈관심분야〉

콘크리트 및 시멘트 미시구조 재료

문 재 흠(Jae-Heum Moon)

[정회원]



- 2000년 2월 : 한양대학교 일반대학원 토목공학과(공학석사)
- 2006년 5월 : Purdue University, School of Civil Eng. (공학박사)
- 2007년 2월 ~ 2011년 12월 : 한국건설생활환경시험연구원 선임연구원

- 2011년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

토목공학, 건설재료

김 성 욱(Sung-Wook Kim)

[정회원]



- 1986년 2월 : 영남대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 1998년 2월 : 동국대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2003년 12월 ~ 2004년 12월 : 호주 UNSW, 객원연구원
- 1989년 5월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 선임연구위원

<관심분야>

토목공학, 건설재료