폭발하중 조건에 따른 슬라이딩 형식 방폭문의 구조거동 유한요소해석

Finite Element Analysis of Structural Behavior of Sliding-Type Blast-Resistant Doors Based on Blast Loading Conditions

신현섭* · 김성욱** · 문재흠*** · 김원우****

Shin, Hyunseop*, Kim, Sungwook**, Moon, Jaeheum***, and Kim, Wonwoo****

Abstract

In current specifications, it is assumed that the structural performance is the same if the same deflection occurs, regardless of the structural characteristics or explosive conditions. However, depending on the structural characteristics and explosion conditions, structural responses may differ. Therefore, flexural deflection and shear need to be considered. In this study, the differences in the structural behaviors of steel-concrete sliding-type blast doors in the impulsive, dynamic, and quasi-static regions were analyzed using the finite element method. The results showed that in the impulsive region and under significant impact forces, shear failure occurred at the initial behavioral step, and the door was more vulnerable to shear than in the dynamic and quasi-static regions. Furthermore, in the impulsive region, a relatively large deformation occurred in the wheel installed on the lower part of the door, affecting functionality, such as opening and closing. Because combined flexural-shear and direct shear failures cause more damage than flexural failure, they must be considered during the design process, and further studies are required to develop a generalized evaluation method and design criteria to reflect the shear effect.

Key words : Sliding Type Blast Door, Response Characteristics, Shear Failure, FE Analysis

요 지

현재의 방폭 설계기준에서는 구조체 특성이나 폭발조건에 대한 구분 없이 같은 구조체에서 동일한 처짐이 발생한다면, 손상수준이 서로 같고 동일한 구조성능을 갖는다고 가정하고 있다. 그러나, 구조체의 응답특성은 구조체 특성 및 폭발조건에 따라 다를 수 있고, 파괴거동과 관련하여 휨처짐 거동뿐만 아니라 전단에 대해서도 고려되어야 한다. 본 연구에서는 강-콘크리트 합성구조의 슬라이딩 형식 방폭문에 대해 충격/동적/준정적 영역에서의 기본적인 거동 차이를 유한요소해석에 의해 분석하였다. 분석결과에 따르면, 동일한 최대 처짐이 발생하는 조건이지만 충격영역에 속하는 거동 특성을 보이며 폭약과의 이격거리가 가깝고 충격력이 크게 작용할 경우, 초기 거동 단계에서 방폭문 슬래브에 전단파괴가 발생함으로써 동적 및 준정적 영역에 비하여 전단에 더 취약한 것으로 나타났다. 이때 방폭문 하부에 설치된 휠 부재에도 상대적으로 더 큰 변형이 발생하는 것으로 나타나서, 방폭문의 개폐와 같은 기능적 역할에도 영향을 받을 수 있음을 간접적으로 추정해 볼 수 있었다. 일반적으로 휨전단 복합 파괴 또는 직접 전단파괴는 단순 휨파괴 보다 더 큰 피해를 주므로 구조성능 검토 및 설계 시 이에 대한 고려가 필요하며, 전단의 영향에 대한 일반화된 평가방법 및 설계기준을 얻기 위해 향후 많은 실험적 및 해석적 연구가 필요하다.

핵심용어 : 슬라이딩 형식 방폭문, 응답특성, 전단파괴, 유한요소해석

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

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

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

1. 서 론

슬라이딩 형식 방폭문(sliding type blast-resistant door)은 좌우 한쌍의 문을 미단이 형식으로 개폐가 가능하게 제작되는 구조체이다. 방호시설의 출입구에 설치되고 있으며, 폭발에 의해 발생하는 높은 압력에 대해 내부의 주요설비 및 자재, 인명을 보호하는 역할을 한다. 방폭문 자체는 거푸집 역할 및 외피구조로서의 강재 박스와 그 내부에 강성 보강을 위해 설치되는 스티프너(stiffener)로 구성되거나, 또는 본 연구에서 분석한 방폭문과 같이 스티프너 없이 강재 박스 내부가 콘크리트로 채워지는 형식을 취할 수 있다(NEMA, 2008; Kim et al., 2016; Moon, Kim, Shin et al., 2019). 콘크리트로 채워지는 경우는 방폭문의 중량이 증가하여 운용 측면에서 단점으로 작용할 수 있다. 그러나, 강성이 크게 증가하고, 또한 중량 증가에 의한 관성저항(inertia resistance)의 증가로 인해 매우 짧은 시간 내에 높은 폭압이 예상되는 경우에 있어서 효과적으로 적용될 수 있다(Hao, 2015). 슬라이딩 형식 방폭문의 상하단에는 미단이 방식으로 개폐를 위해 휠(wheel) 및 레일(rail)이 설치되며, 개폐 용이성을 위해 전동 모터가 추가로 설치되기도 한다. 여단이 형식의 편개형(single-leaf) 및 양개형(double-leaf) 방폭문의 경우, 문의 밀폐 및 지지를 위해 걸쇠(latch) 및 힌지(hinge) 부재가 설치되는데 반해 슬라이딩 형식의 경우는 휠 및 레일 구조가 설치되고 있다. 서로 상이한 구조이고 다른 역할을 하므로 방폭문 자체와 함께 검토가 필요한 부분이다.

일반적으로 중요 시설물의 방호 목적을 위해서는 불특정 위험에 대비해 다양한 폭발조건 및 이에 대한 구조거동이 고려되어야 한다. 예를 들어, 폭약량 및 구조체와의 이격거리(separation distance)로 주어지는 어느 특정 폭발조건에 대해서 구조체는 충격(impulsive) 영역이나 동적(dynamic) 영역, 또는 준정적(quasi-static) 영역 중 어느 하나에 속하는 응답특성을 나타낸다. 설계 및 성능검토 과정에서는 이와 같은 영역들에서 나타날 수 있는 구조응답(structural response)을 모두 고려하는 것이 필요하다(U.S. DoD, 2008).

그러나, 방폭 분야의 특성상 폭발로 인한 위험이 크고 제반 조건에 많은 제약이 따르기 때문에, 실험에서 다수의 변수를 모두 고려하기에는 한계가 있다. 또한, 관련 연구도 다른 분야에 비해서 많지 않은데, 슬라이딩 형식 방폭문에 대한 경우도 이와 다르지 않은 상태이다. 관련 연구문헌(Shi et al., 2008; Wang et al., 2012)에 따르면, 충격영역에 속하는 구조응답을 발생시키는 근접거리 폭발(near-field explosion)에 대해서는 다른 응답영역의 경우와 달리 전단파괴(shear failure)에 대한 고려가 필요하다고 되어 있다. 그러나, 방폭문 슬래브에서 구체적으로 어떤 부분이 어떤 폭발조건(폭약량 및 이격거리 조건 등)에서 전단에 취약한지는 지지조건 및 기타 구조체 특성에 따라 다를 수 있기 때문에 개별적인 분석이 필요하다.

또한, 슬라이딩 방폭문에서 대부분의 폭압은 벽체로 전달되어 지지되지만, 상하단에 설치된 휠 구조 또한 하중 전달과 정에서 일정 부분 충격력을 받게 된다. 전체 구조시스템 중 일부로서의 구조적 성능, 휠 구조 본래의 기능적 역할을 위해서는 큰 변형이 발생되지 않도록 해야 한다. 그러나, 방폭문 구조와 관련된 연구(Koh et al., 2003; Luo et al., 2012; Chen and Hao, 2013; Tavakoli and Kiakojouri, 2014; Veeredhi and Rao, 2015)의 경우 대부분 슬래브 또는 방폭문 자체의 거동에 대한 것으로서 휠과 같은 기타 부재의 거동에 대한 연구는 많지 않다.

본 논문에서는 강-콘크리트 슬라이딩 형식 방폭문 구조에 대해 충격/동적/준정적 영역에서의 처짐, 충격력, 응력 등의 거동 특성을 유한요소해석으로 분석하였다. 이로부터 각 영역 간의 기본적인 거동 차이를 비교하였으며, 방폭문 슬래브의 전단파괴와 관련하여 해당 폭발조건 및 응답영역, 전단에 취약한 부분 등을 검토해 볼 수 있었다. 또한, 각 응답영역에 대해 방폭문 상하단에 설치된 휠 부재의 변형 정도를 비교하여, 어떤 조건에서 한계에 도달하여 방폭문의 개폐가 어려울 수 있을지를 추정해 보았다. 유한요소해석에 사용한 프로그램은 LS-DYNA (LSTC, 2017)이고, 폭발실험 결과(Moon, Kim, Shin et al., 2019)와 비교하여 적합성을 검토한 해석모델을 구조거동 비교 분석에 사용하였다.

2. 해석조건 및 변수 설정

Fig. 1은 슬라이딩 형식 방폭문의 개요도 및 설치 사례를 나타낸 것이다. 서론에서 밝힌 바와 같이 좌우 한쌍의 미단이 형식의 강-콘크리트 방폭문이다. 외피의 강재 플레이트로 제작된 박스 내측 면에는 15~20 cm 간격으로 스티드(stud)가 용접되어 있으며, 콘크리트가 채워져 있다. 스티드에 의한 전단합성 효과로 강박스와 콘크리트 슬래브가 합성구조로서 거동하므로 슬래브 내의 배근은 생략되었다. 방폭문 하단에는 휠이 설치되어 있고 레일을 따라 움직이게 되어 있다. 상단에도 도르래 모양과 유사한 휠이 설치되어 있으며, 철골 지지구조 내에 설치된 가이드빔(guide-beam)을 따라 좌우로 움직이게 된다(Moon, Kim, Shin et al., 2019).

폭압이 방폭문 전면에 작용하게 되면, 대부분의 힘은 벽체에 의해 지지되지만 방폭문 상하단에 설치된 휠에도 일부분의 힘이 전달될 수 있다. 하단부의 경우 Fig. 1(b)에서와 같이 하단 일부가 전후로 벽체에 의해 지지될 수 있다. 그러나, 상단의 경우는 다른 조건이므로 폭압에 의한 반동을 지지하기 위해 철골의 지지구조가 필요하게 된다.

한쪽 방폭문의 크기는 3,055 mm(W) × 6,150 mm(H) × 280 mm(D)이다. 사용된 재료의 강도는 외피구조의 강재 플레이트와 상단 철골구조의 경우 항복강도 275 MPa, 상하단 휠은 340 MPa이다. 외피 내부에 채워진 콘크리트의 경우 섬유보강시멘트로서 압축강도는 180 MPa이고, 인장강도는

13.5 MPa이다.

본 연구에서는 충격/동적/준정적 영역에서 슬라이딩 방폭문 구조의 거동 차이를 분석하고자 하며, 이를 위해 방폭문 응답이 각 영역의 특성에 적합하게 나타나도록 할 필요가 있다. 폭약량, 방폭문과 폭발 위치 간의 이격거리(separation

(a) Schematic diagram

(b) Side elevation

(c) Installation example

Fig. 1. Sliding Type Blast-Resistant Door (Moon, Kim, Shin et al., 2019)

distance)의 조합에 따라 방폭문에 가해지는 폭발압력, 고유 주기(T_n) 대비 하중 작용시간(t_d)이 변화하고, 충격/동적/준정적 영역에 속하는 응답을 발생시킬 수 있다. 각 응답영역에 속하는 거동을 유발하는 변수값(이격거리(R), 폭약량(W)) 설정을 위해 NORSOK (1999)에 제시된 Table 1과 같은 기준을 참고하여 가해석을 하고, 해석결과에서 얻은 응답특성을 재검토하여 변수값을 선정하였다. Tables 2와 3에 변수값(R , W), 폭발하중 특성(최대 폭발압력(P_m), 충격량(I_m),

Table 1. Response Criteria (NORSOK, 1999)

Response Criteria	Response Domain
$t_d / T_n < 0.3$	Impulsive
$0.3 < t_d / T_n < 3.0$	Dynamic
$t_d / T_n > 3.0$	Quasi-static

Table 2. Variables for FE Analysis

Variable symbol	R (m)	W (ton)
Imp-A-1	3.0	0.018
Imp-A-2		0.060
Imp-A-3		0.160
Imp-B-1	5.66	0.028
Imp-B-2		0.095
Imp-B-3		0.245
Dyn-1	50.0	0.770
Dyn-2		3.100
Dyn-3		9.000
Sta-1	150.0	8.900
Sta-2		45.500
Sta-3		140.000

* symbol: -1 for 0.5 deg, -2 for 1.0 deg and -3 for 2.0 deg

Table 3. Loading Condition and Response Domain

Variable symbol	P_m (MPa)	I_m (MPa ms)	t_d/T_n	Response domain
Imp-A-1	6.000	2.62	0.07	Impulsive ($t_d / T_n < 0.3$)
Imp-A-2	18.000	6.18	0.06	
Imp-A-3	38.200	14.20	0.05	
Imp-B-1	1.900	1.73	0.19	
Imp-B-2	6.000	4.13	0.15	
Imp-B-3	15.300	8.94	0.13	
Dyn-1	0.115	1.40	1.24	Dynamic ($0.3 < t_d / T_n < 3$)
Dyn-2	0.311	3.78	1.62	
Dyn-3	0.812	8.20	1.63	
Sta-1	0.069	2.33	3.26	Quasistatic ($t_d / T_n > 3$)
Sta-2	0.195	7.30	4.36	
Sta-3	0.492	16.33	4.93	

응답영역(response domain) 등을 요약하여 나타냈다. 충격/동적/준정적 영역 등 각 영역에서 대표적으로 한 경우씩을 고려하였고, 이격거리 5.66 m에 대한 것은 해석과 비교를 위한 폭발실험(Moon, Kim, Shin et al., 2019)에서 설정된 거리로서 함께 포함하였다.

Table 2에서 각 이격거리에 대해 폭약량을 3가지로 설정하였는데, 이는 하중 증감에 따른 거동을 보기 위한 것이다. 예를 들어, 이격거리 5.66 m에서 0.028/0.095/0.245 ton의 폭약이 폭발할 때, 방폭문에는 0.5도, 1.0도, 2.0도의 회전연성도(edge rotation)가 발생한다. 이때의 방폭문 중앙부 최대 처짐은 각각 26.5 mm, 53.0 mm, 106.0 mm이다. 변수명을 폭약량에 따라 -1, -2, -3으로 세분하였으나, 이후 분석결과로 나타내는 표 및 그림 등에서는 경우에 따라 0.5 deg, 1.0 deg, 2.0 deg로 구분하여 나타내기도 하였다. 여기서, 회전연성도는 슬래브 단부에서 중심까지의 거리에 대한 최대처짐의 비로 결정되는 회전 각도로서 철근콘크리트 구조체의 손상 수준 및 방폭성능에 대한 지표로 사용되고 있다(U.S. DoD, 2008; ASCE, 2011). 이와 같이 이격거리가 서로 다른 경우에도 동일한 회전연성도(동일 최대처짐)가 발생하도록 하였다. 이는 응답특성이 충격/동적/준정적 등으로 서로 다르지만, 영역간 비교 분석을 위해 초기 전제조건으로서 “동일한 손상수준(휨처짐 거동 기준)으로 가정”하기 위한 것이다.

3. 유한요소모델

Fig. 1에서와 같은 슬라이딩 형식 방폭문에 대한 유한요소 모델을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2(a)는 전체 모델을 Fig. 2(b)는 상단부 상세, Fig. 2(c)는 하단부의 휠 및 레일 등에 대한 상세를 나타낸 것이다. 방폭문이 설치되는 건물은 방폭문에 비해 강성이 매우 크므로 해석모델의 단순화를 위해 테두리의 벽체만을 모델링하고 고정조건을 부여하였다. 이와 같은 모델링 방법은 다른 연구에서도 동일하다(Hsieh et al., 2008; Lu and Jiang, 2002).

방폭문에서 외피를 이루는 강재 플레이트 박스구조는 shell 요소, 내부의 콘크리트는 solid 요소를 사용하였다. 강재 플레이트와 콘크리트는 플레이트에 설치되는 스티드에 의해 합성구조를 이루는데, 유한요소모델에서는 1차원 요소 및 rigid link를 사용하여 단순화하여 모델하였다. 또한, 강재 플레이트와 콘크리트 슬래브 사이에는 contact 조건이 적용되었다. 그 외에 상단부의 철골 지지구조는 shell 요소, 벽체 및 상하단의 휠 등은 solid 요소를 사용하였다. 또한, 방폭문과 벽체 사이, 상단 휠과 철골 지지구조 사이, 그리고 하단 휠과 레일 사이 등에 contact 조건이 적용되었다. 여기서, contact 조건은 LS-DYNA에서 제공하는 AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 조건이다. 경계조건으로 벽체는 모델 외측면을 따라 변위 및 회전 모두 고정조건으로 하였고, 상단부의 철골 지지구조 및 하단부의 레일 또한

벽체측에서 모두 고정조건이다.

콘크리트에 대한 재료모델은 LS-DYNA에 포함되어 있는 Karagozian & Case 모델(Malvar et al., 1997)이다. 이 모델은 고속 충돌이나 폭발 등에서 나타나는 변형률 속도 효과(strain rate effect)를 모사할 수 있으며 폭발해석에 범용적으로 사용되고 있다. 이 재료모델에 대한 기본적 내용은 Malvar et al. (1997) 또는 방폭문 해석 관련 문헌(Shin et al., 2019)을 참조할 수 있다. 또한, 고강도 섬유보강 콘크리트의 재료모델에 사용되는 상수값들은 Moon, Kim, Kim et al. (2019)의 동일 제원 콘크리트에 대한 실험결과를 참고하였으며, 이 중에서 예를 들어 동적증가계수(DIF)는 Table 4와 같다. 항복응력점(탄성한계), 최대응력점, 파괴이후 잔류응력점 등 콘크

(a) Full model

(b) Upper part

(c) Lower part

Fig. 2. FE Model

Table 4. DIF for Concrete (Moon, Kim, Kim et al., 2019)

Strain rate	DIF	Strain rate	DIF
-250	3.2	-10	1.3
-171	2.8	-0.127	1.0
-70	2.0	0	1.0
-50	1.8	167	1.45
-30	1.5	237	1.63

리트의 재료실험에서 볼 수 있는 특이점들은 소성손상이론에 근거를 둔 재료모델에 의해 계산된다(Malvar et al., 1997; LSTC, 2017). 이때 콘크리트의 3차원 주응력공간에서의 응력상태는 Eq. (1) 및 Eq. (2)에서와 같이 항복(yield, Y_y) 및 최대압축(maximum compressive, Y_m)을 나타내는 파괴포락선을 기준으로 판단할 수 있다. 고강도 섬유보강 콘크리트와 관련된 상수값들은 위에서 밝힌 바와 같이 관련 실험결과(Moon, Kim, Kim et al., 2019)를 참고하였다. 또한, 강재는 소성거동과 변형을 속도 효과를 고려할 수 있는 모델(PIESEWISE_LINEAR_PLASTICITY 모델; LSTC, 2017)을 사용하였다.

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

$$Y_m = \Delta\sigma_m = a_0 + \frac{p}{a_1 + a_2p} \quad (2)$$

위에서와 같은 해석 모델을 사용하여 Table 2에서 설정한 변수에 대해 방폭문의 거동을 분석하였다. 변수 해석에 들어가기 전에 폭발실험 결과(Moon, Kim, Shin et al., 2019)와 비교해 봄으로써 해석 모델이 적합한지를 검토하였다. 폭발 실험 조건으로는 폭약량 125.0 kg, 이격거리 5.66 m, 지면에 근접한 위치에서의 폭발(surface blast)이다. 방폭문 중앙부에서 최대처짐(maximum deflection) 및 회전연성도(edge rotation)를 해석 결과와 비교해 보면 Table 5와 같다.

이에 따르면, 최대처짐 및 회전연성도의 경우 8% 정도 해석결과가 더 큰 것으로 나타났으나, 관련 연구(Draganic and Varevac, 2018)에 의하면 폭발실험에 대한 10% 내외의 오차는 대부분의 경우 크지 않은 수준으로서 인정하고 있다.

한편, 해석모델에는 223,230개의 node, 161,536개의 shell element 및 162,983개의 solid element가 사용되었다. 예를 들어 콘크리트 슬래브 모델의 mesh 크기는 최소 30 mm, 최대 80 mm, 평균 약 45 mm로서 전체 길이 대비 1% 미만 수준이다. 수치해석적 오차 수준을 판단하기 위한 수단으로서 내부 에너지(internal energy)에 대한 모래시계 에너지(hourglass energy)의 비를 검토하였다. 이에 따르면, Table 5에서와 같이 약 2.2%로서 10% 미만으로 나타났다. 관련문헌(Zhang et al., 2012)에 따르면, 이와 같은 경우 수치해석적 오류가 작은 경우로 판단되며, 본 연구의 해석모델은 변수들 간의 거동 비교를 위한 목적에 적합한 것으로 판단하였다.

4. 해석 결과

4.1 충격력 - 처짐 거동 분석

Table 2에서와 같은 변수(폭약량 및 이격거리)에 대해 슬라이딩 형식 방폭문의 구조응답을 비교 분석하였다. 변수 설정은 '2. 해석조건 및 변수 설정'에서 설명한 바와 같이, 각 이격거리 마다 3가지 폭약량에 의해 발생하는 폭압이 방폭문 중앙부에 26.5 mm, 53.0 mm, 106.0 mm의 최대처짐이 발생하도록 하였다(각각 0.5도, 1도 및 2도의 회전연성도에 상응하며, 동일 손상수준으로 가정된 후에 구조거동을 비교하기 위함). 예로써 이격거리 5.66 m (Imp-B)의 경우 28.0/95.0/245.0 kg의 폭약량에 의해 발생하는 폭압이 작용하여 Fig. 3에서와 같은 처짐 이력이 발생한다.

분석 결과로서 먼저 방폭문 전체적인 구조거동을 비교하였다. 폭압이 작용할 때 방폭문에 발생하는 충격력-처짐 거동을 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 그래프는 전체 거동 중에서 폭압 작용 이후 충격력 및 처짐이 최대가 되는 구간을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서의 충격력은 방폭문의 지지구조(벽체, 상하단 휠 부재)에서 발생하는 반력이다. 이에 따르면, Figs. 4(a)~4(c)에서와 같이 폭압의 크기에 따라 다소 차이는 있으나, 충격영역에 속하는 Imp-A 및 Imp-B의 경우(이하, 변수명은 Tables 2 and 3 참조), 초기에 처짐이 작용에도 충격력이 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 관련된 이론적 내용(Hao, 2015)을 검토해 보면 다음과 같다. Eq. (3)과 같은 운동방정식에서 t 가 매우 작은 하중 초기에는 변위(v) 및 탄성저항(kx)이 매우 작고,

Fig. 3. Example of Deflection-Time Curve (R = 5.66 m)

Table 5. Test Results (Moon, Kim, Shin et al., 2019) and FE Analysis

Results	Test	FE
Maximum deflection (mm)	59.0 (1.00)	63.9 (1.08)
Edge rotation	1.10 (1.00)	1.19 (1.08)
Hourglass energy / Internal energy	-	2.2%

외부에서 작용한 하중은 주로 관성저항($m\ddot{v}$)과 균형을 이룬다. 구조체의 고유주기 보다 하중의 작용시간이 매우 짧아서 변위 및 탄성저항이 충분히 발현되기 전에 하중이 제거되는 경우 하중 초기에 관성저항이 크게 증가하게 된다.

충격영역에 속하는 Imp-A 및 Imp-B의 경우가 위와 같은 경우에 해당한다. 이중 Imp-B-3의 경우, 특히 Imp-A-2 및 Imp-A-3의 경우는 Table 3에 나타난 바와 같이 방폭문에 가해지는 폭압 자체가 매우 짧은 순간에 비교적 크게 작용하기 때문에 변위가 작은 거동 초기에 비교적 큰 충격력이

작용하게 된 것이다.

$$m\ddot{v} + kv = P(t) \quad (3)$$

후반부 응력검토 부분에서 설명해 놓은 바와 같이 Imp-A-3의 경우 관성저항이 크게 증가하는 단계에서 슬래브에 전단파괴가 발생한 것으로 추정되었으며, 또한 휠 부재에 의해 많은 변형에너지가 흡수된 것으로 나타났다. 이는 Fig. 4(c)의 그래프에서도 나타난 바와 같이 Imp-A-3의 경우 Imp-B-3보다 충격력(반력)이 더 작게 나타난 것으로부터도 알 수 있다. 이에 반해 Figs. 4(b)와 4(c)에서 Dyn 및 Sta의 경우는 관성저항 보다 탄성저항이 비교적 더 크게 발현된 것으로 나타났다. 거동 초기에 변곡점이 보이는데, 이는 상대적으로 강성이 약한 방폭문 상하단의 휠 부재의 변형이 반영된 결과이다.

응답영역별 거동 차이를 분석하며 확인할 수 있었던 것 중에서 또 하나는 충격영역의 경우(Imp-A 및 -B) 방폭문 하부에 충격의 집중 및 운동량의 변화가 크다는 것이다.

예를 들어 Fig. 5는 2도의 회전연성도를 발생시키는 폭압이 작용하는 경우에 대해 방폭문 전체 충격량(impulse)에 대한 방폭문 하부(하부 휠 및 하단 벽체)에 발생한 충격량의 비를 응답영역별로 비교한 것이다. 이에 따르면, Imp-A 및 Imp-B와 같이 충격영역에 속하는 경우, 구조거동 초기에는 거의 대부분의 충격이 방폭문 하부에 집중되는 것으로 나타났다. 0.5도 및 1도의 회전연성도를 발생시키는 경우에 대해서는 Table 6에 요약하여 나타내었다.

이처럼 충격영역의 경우 방폭문 하부에 충격이 집중되는 것은 근접 또는 원거리 폭발에 따라 방폭문에 작용하는 폭압의 분포가 다르다는 것에 원인이 있다. 원거리 폭발의 경우에는 높은 폭압이 이동하면서 점차 낮아지고 공간적으로 균등한 압력으로 작용하게 되나, 근접 폭발의 경우, Fig. 6에서와 같이 폭발물 위치를 중심으로 집중된 압력파가 구조체에 작용하게 된다(Rigby et al., 2014; Zhang et al.,

Fig. 4. Reaction Force - Deflection Curve for Edge Rotation, 0.5/1.0/2.0 deg

Fig. 5. Ratio of Lower Part Impulse to Total by Edge Rotation 2 deg

Table 6. Ratio of Lower Part Impulse to Total Impulse

Response domain (variable)	0.5 deg	1.0 deg	2.0 deg
Imp-A	1.0 ^{*1} / 0.45 ^{*2}	1.0 / 0.40	1.0 / 0.44
Imp-B	1.0 / 0.42	1.0 / 0.36	1.0 / 0.35
Dyn.	0.51 / 0.43	0.46 / 0.36	0.85 / 0.32
Sta.	0.50 / 0.44	0.44 / 0.36	0.38 / 0.31

Impulse ratio at the initial loading step (*1) and when maximum deflection occurs (*2)

Fig. 6. Pressure Distribution by Near-Field Explosion (Zhang et al., 2020)

2020). 해석결과로 얻은 폭압 분포를 검토해 보면, 이격거리 150 m에 대한 것은 거의 균등한 분포를 보였으나, 이격거리 5.66 m의 경우와 같이 근접거리 폭발의 경우에는 하부에 집중된 분포를 나타냈다. 예를 들어 95 kg의 폭약이 폭발할 때 방폭문 하단에서 상단의 순서로 5개 위치에서 5.98/5.26/3.56/2.13/1.36 MPa의 압력을 나타냈다. 이와 같은 이유로 충격영역에 속하는 Imp-A 및 -B의 경우 방폭문 하단부에 충격이 더 집중되어 발생하는 것으로 분석될 수 있다.

4.2 방폭문 응력 분석

방폭문 콘크리트 슬래브의 응력을 변수별로 비교해 본 결과에 따르면, 응답특성이 뚜렷이 구별되는 충격영역과 준정적영역 간 슬래브의 전단응력 분포에 뚜렷한 차이를 나타내었다. 이는 폭압이 비교적 크게 작용하는 1도, 특히 Figs. 7과 8에서와 같이 2도의 회전연성도를 유발하는 경우에 있어서 더 뚜렷하였다. 충격영역 Imp-A-3의 경우, 초기 $t = 4$ ms 및 5 ms 시점에 방폭문 하부(하단부 및 우측 테두리 하측)를 중심으로 전단응력이 높게 나타났다. 최대 전단응력은 16.4 MPa이다. 이는 앞서 충격력-처짐의 분석 내용 중에 밝힌 바와 같이 근접거리 폭발로 인해 폭압 및 충격력이 하부에 집중된 것이 원인이다.

이에 비해 준정적영역 Sta-3의 경우는 충격력이 가장 발생하는 $t = 14$ ms, 그리고 휨에 의한 처짐이 크게 증가하는 단계인 $t = 30$ ms에서 방폭문 둘레 전반에 걸쳐 전단응력이

Fig. 7. Shear Stress Contour (Imp-A-3)

Fig. 8. Shear Stress Contour (Sta-3)

집중되었다. 최대 전단응력은 11.9 MPa로 나타났다. 이와 같이 충격영역에서는 구조거동 초기에 방폭문 하부를 중심으로 응력이 집중되나, 준정적영역의 경우에는 돌레를 따라 전체적 범위에 걸쳐 응력이 집중되며 초기 이후 처짐이 증가하면서 최대에 도달하는 것으로 분석되었다.

전단응력이 집중된 부분의 응력을 포락선(Eqs. (1), (2))과 함께 주응력 공간에 나타내면 Fig. 9와 같다. Sta-3의 경우에는 서는 대부분의 응력이 항복 포락선(Yield F.S.) 이하에 존재

Fig. 9. Comparison of Stress State by Failure Envelope

하고 있다. 그러나, Imp-A-3의 경우는 상당수의 응력이 항복 포락선과 최대압축 포락선(Max F.S.) 사이에 있는 것으로 나타나 파괴 및 이에 가까운 응력상태에 있는 것으로 분석되었다. 한편, 고강도 섬유보강 콘크리트의 전단강도에 대한 연구자료(Lim and Hong, 2016; Li et al., 2019; Wu et al., 2019)에 따르면, 본 연구에서와 유사한 제원의 콘크리트가 약 14.4에서 18 MPa의 전단강도를 나타내고 있다. 이를 고려하면, 준정적영역에 속하는 Sta-3의 경우 전단파괴는 발생하지 않았다고 판단된다. 그러나, 방폭문 하부에 최대 16.4 MPa의 전단응력이 발생한 Imp-A-3의 경우는 충격력 집중 및 이에 의한 전단파괴가 발생한 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 분석결과로부터 충격영역과 준정적영역에서의 방폭문 슬래브의 파괴거동에는 차이가 있음을 알 수 있었다.

한편, 휨처짐에 의해 슬래브 중앙에서 최대가 되는 휨압축 응력에 대해서 검토하였다. 0.5도의 회전연성도가 발생하는 수준에서는 슬래브 중앙부에 21~32 MPa 정도의 응력이 발생하였으며, 1도 및 2도의 회전연성도가 발생할 때는 각각 49~64 MPa, 68~85 MPa 정도의 응력이 슬래브 중앙부에 발생하였다. 변수별로 응력값에 다소 차이는 있으나, 응력 분포 측면에서는 모두 슬래브 중앙부에 집중되는 분포를 보여 큰 차이를 나타내지 않았다. 외피구조를 이루는 강박스는 1도의 회전연성도가 발생하는 수준에서 이미 휨인장으로 인해 항복강도 275 MPa 이상의 응력을 나타내었다. 2도의 회전연성도가 발생하는 단계에서는 소성 및 동적 경화로 인해 318 MPa까지 도달하였다. 강박스를 이루는 강재 플레이트가 이와 같이 항복강도 이상의 응력을 나타내며 소성거동을 보이는 것으로 보았을 때, 내부 슬래브 또한 더 큰 폭압이 작용한다 하더라도 위에 나타난 응력 이상으로 크게 증가하지는 않고 한계에 수렴할 것으로 예상되었다.

슬래브의 휨압축 응력 및 강판의 응력은 최종적으로 모두 중앙부에서 크게 증가된 양상을 보이며, 분포형상 측면에서 변수 간에 뚜렷한 차이를 보이고 있지 않으므로 분포도를 포함한 다른 구체적인 내용은 생략하였다. 유사한 거동에

대한 원인 중의 하나로는 처짐 증가 및 탄성저항이 크게 발현되는 후반부 거동에서는 변수 간에 큰 차이가 없기 때문이다.

4.3 월 부재의 변형 분석

Fig. 1에서와 같이 방폭문 상하단에 설치되는 월 부재는 문의 개폐를 위해 설치되는 것이지만, 폭압이 작용하게 되면 1차적으로 이 월 부재에 충격력이 전달된다. 방폭문과 벽체 간의 설치 간격을 매우 작게 유지한다면, 월 부재에 전달된 충격력은 바로 벽체에 전달되므로 폭압을 지지하는 데에 문제가 없다고 볼 수도 있다. 그러나, 별도의 설계적인 대책이 없다면, 시공과정에서 생길 수 있는 제작 오차를 고려하여 앞뒤로 최소 10 mm 이상 수준의 간격은 존재하게 된다. 따라서, 월에 상당한 변형이 유발될 수 있고, 폭압 작용 이후에도 영구변형이 존재할 경우에는 월의 본래 설치 목적인 방폭문 개폐가 쉽지 않을 수 있기 때문에 분석이 필요한 부분이다.

그러나, 해석에 의해 얻는 월 부재의 응력이나 변형률만으로 폭발 시 실제의 3차원적인 변형 및 개폐 가능 여부를 추정해 내기는 쉽지 않다. 본 연구에서는 월 부재 전체의 변형 정도를 전반적으로 검토하기 위한 방법으로 월에 의해 흡수된 변형에너지를 비교해 보았다. 이에 의해서도 개폐 가능 여부를 직접적으로 추정하기는 어렵지만, 어떤 변수 조건에서 변형이 크게 증가하여 개폐에 더 영향을 미칠지를 간접적으로 추정해 보았다.

변수별 상하부 월의 변형에너지 비교에 의하면, 회전연성도 0.5 deg를 발생시키는 폭압이 작은 경우는 변수 간에 최대 2배 정도의 차이가 있었다. 폭압이 증가하여 더 큰 회전연성도를 유발하는 경우에는 유의할 수준의 차이를 보이고 있으며, 특히 Fig. 10에 나타난 바와 같이 회전연성도 2도를 발생시키는 경우에는 큰 차이를 보이고 있다. 상부 월에서 흡수한 변형에너지를 비교해 보면 초기(Fig. 10(a)에서 약 36 ms 전까지)에는 큰 차이를 보이지 않으나, 폭압 작용 이후 반동(rebound)에 의해 방폭문이 반대 방향의 처짐을 나타낼 때는 충격(Imp-A-3 및 -B-3) 및 동적영역(Dyn-3)의 경우 더 큰 변형에너지가 흡수된 것으로 나타났다. 하부 월의 경우, 충격영역에 속하는 Imp-A-3 및 Imp-B-3의 경우가 더 큰 변형에너지를 흡수하며, 특히 Imp-A-3의 경우 준정적영역에 속하는 Sta-3에 비해 8배 이상 더 큰 것으로 나타났다.

이외 다른 변수에 대한 해석결과를 Table 7에 비교해 놓았다. 전체적인 결과를 보면 상하부 월 모두 충격영역의 경우가 더 큰 변형에너지를 흡수한 것으로 나타났다. 특히, Imp-A-3에서 하부 월의 경우는 매우 큰 차이를 보였고, 이에 대한 원인은 앞서 충격력 비교에서처럼 충격영역의 경우 방폭문 하단에 폭압이 크게 집중되었기 때문으로 분석된다. 또한, Imp-A-3의 2도 회전연성도를 유발시키는 폭발하중 조건에서 하부 월의 변형에너지가 큰 폭으로 급격히

(a) Upper wheel

(b) Lower wheel

Fig. 10. Strain Energy Absorbed by Upper and Lower Wheels by 2 deg Edge Rotation

Table 7. Strain Energy Absorbed by Upper and Lower Wheel (unit: MNmm)

Response domain (variable)	Upper wheel			Lower wheel		
	0.5 deg	1.0 deg	2.0 deg	0.5 deg	1.0 deg	2.0 deg
Imp-A	0.36 (2.25)	1.85 (2.76)	3.78 (3.34)	0.23 (2.30)	1.08 (4.32)	3.92 (8.52)
Imp-B	0.31 (1.94)	2.13 (3.18)	4.49 (3.97)	0.16 (1.60)	0.69 (2.76)	1.31 (2.85)
Dyn	0.22 (1.37)	1.29 (1.93)	2.71 (2.40)	0.16 (1.60)	0.44 (1.76)	0.74 (1.61)
Sta	0.16 (1.00)	0.67 (1.00)	1.13 (1.00)	0.10 (1.00)	0.25 (1.00)	0.46 (1.00)

증가한 점을 고려하면, 이때 휠 부재의 구조적 및 기능적 한계를 넘어선 것으로 볼 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 폭발하중을 받는 슬라이딩 형식 방폭문의 거동을 유한요소해석에 의해 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

지면상 근접거리 폭발로 충격영역에 속하는 거동을 보이며 충격력이 크게 작용하는 경우, 폭발압력 및 충격력의 집중으로 인해 방폭문의 콘크리트 슬래브에는 휨 및 전단 파괴가 복합적으로 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 충격/동적/준정적영역 모두 동일 최대 처짐이 발생하는 조건이었으나, 위와 같은 거동은 동적 및 준정적 영역의 경우처럼 단순 휨파괴가 발생하는 경우와는 구별되는 거동임을 알 수 있었다. 근접거리 폭발의 경우 전단파괴가 발생할 수 있다는 관련 이론연구 결과(Shi et al., 2008; Wang et al., 2012)를 확인해 볼 수 있었고, 슬라이딩 방폭문에 있어서 전단파괴를 발생시키는 구체적인 폭발조건 및 전단에 취약한 슬래브 부분은 본 연구의 해석을 통해 추정해 볼 수 있었다.

편개형 및 양개형 방폭문에서와 같이 지지간격이 작은 경우 구조적으로 전단에 취약할 수밖에 없다. 슬라이딩 방폭문은 이에 비해 지지간격이 2배 내외로 크지만, 폭발하중 조건에 의해 충격력이 크게 작용하는 경우에는 마찬가지로

전단의 영향을 받을 수 있음을 해석적 방법으로 검토해 볼 수 있었다. 방폭문 하부의 휠이 설치되는 부분은 콘크리트가 채워지지 않는 부분이므로 강성이 상대적으로 작고 전단에 대해 취약부로 작용한 것도 하나의 원인으로 보이며, 향후의 성능개선 과정에서 고려가 필요한 부분이다. 본 연구에서의 슬라이딩 방폭문은 최대 1도 이하의 회전연성도를 발생시키는 폭발조건에 대해 비교적 안전한 것으로 나타났고, 이는 이격거리 5.66 m의 경우에 대해 실시된 폭발실험의 결과(Moon, Kim, Shin et al., 2019)와도 일치한다.

위에서와 같이 본 연구에서는 방폭문 콘크리트 슬래브의 ‘파괴양상의 차이’를 알아보았고, 휨전단 복합파괴와 단순 휨파괴 간의 상대적인 ‘파괴수준의 경중’에 대해서는 더 많은 연구가 필요하다. 또한, 균열양상 및 주응력 분포를 통하여 전단거동을 규명하는 것이 필요하다고 사료된다.

또한, 방폭문 휠 부재에서 흡수된 변형에너지를 비교하여 보았다. 방폭문이 특히 충격영역에 속하는 거동을 보이며, 폭약과의 이격거리가 가까울수록 그리고 폭압이 증가할수록 하부 휠 부재의 변형이 상당히 증가하여 개폐와 같은 기능적 역할에도 영향을 받을 수 있음을 간접 추정해 볼 수 있었다. 예를 들어, 본 연구에서 검토한 범위 내에서는 Imp-A-3의 이격거리 3 m, 폭약량 160 kg의 폭발조건에 대해 하부 휠의 구조적 및 기능적 역할은 더 이상 기대할 수 없는 것으로 추정될 수 있었다.

방폭문 자체의 구조성능이 우선적으로 중요하겠으나, 폭

압 작용 이후에 문을 여는 것 또한 기본적으로 가능해야 하므로 향후 휠 부재의 설계에 고려해 볼 필요가 있다고 사료된다. 다만, 개폐 가능 여부에 대한 직접적인 지표로서 변형에너지 한계값 유도 또는 다른 방법으로 휠 부재의 변형상태를 더 적합하게 판단하기 위해서는 향후 실험 및 해석 결과의 비교가 다수 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호: 21SC IP-B146646-04)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2011). *Blast protection of buildings*. ASCE/SEI 59-11, New York, U.S.
- 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. 163-188.
- Draganic, H., and Varevac, D. (2018). Analysis of blast wave parameters depending on air mesh size. *Hindawi Shock and Vibration*, Vol. 2018, pp. 1-18.
- Hao, H. (2015). Predictions of structural response to dynamic loads of different loading rates. *International Journal of Protective Structures*, Vol. 6, No. 4, pp. 585-605.
- 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.
- 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*. Institute of HwaRangDae.
- 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.
- Li, C., Feng, Z., Ke, L., Pan, R., and Nie, J. (2019). Experimental Study on Shear Performance of Cast-In-Place Ultra-High Performance Concrete Structures. *Materials* 2019, 12, 3254, MDPI, pp. 1-16.
- Lim, W.Y., and Hong, S.G. (2016). Shear tests for ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) beams with shear reinforcement. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 10, No. 2, pp. 177-188.
- 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., 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.
- Moon, J.H., Kim, S.W., Kim, W.W., Lee, D.H., Roh, J., and Kim, D.J. (2019). Protective structure with high-performance fiber-reinforced cementitious composites against armor piercing projectile. *The 2019 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM19)*, Jeju Island, Korea, 2019.
- Moon, J.H., Kim, W.W., Shin, H.S., and Kim, S.W. (2019). *Development of protective structure applied with high-performance fiber reinforced cementitious composites*. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology.
- National Emergency Management Agency (NEMA). (2008). *A study on the standards and utilization plan of CBR facilities*. Policy Research Report.
- NORSOK. (1999). *Norwegian standards; action and action effects*. Norsok-N-004-Annex A, Oslo.
- Rigby, S.E., Tyas, A., Clarke, S.D., Fay, S.D., Warren, J.A., Elgy, I., and Gant, M. (2014). Testing apparatus for the spatial and temporal pressure measurements from near-field free air explosions. *6th International Conference on Protection of Structures against Hazards*, Tianjin, China, pp. 1-8.
- Shi, Y., Hao, H., and Li, Z.X. (2008). Numerical derivation of pressure-impulse diagrams for prediction of RC column damage to blast loads. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35, No. 11, pp. 1213-1227.
- Shin, H.S., Kim, W.W., Kim, S.W., and Moon, J.H. (2019). 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.
- 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 (U.S. 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 Series A*, Vol. 96, No. 1, pp. 11-20.
- Wang, W., Zhang, D., Lu, F., Wang, S.C., and Tang, F. (2012). The effect of span length to height ratio of reinforced concrete slabs on pressure-impulse diagram with multiple failure modes under blast loading. *EPJ Web of Conference, EDP Science*, Vol. 26, Article No. 04015.
- Wu, P., Wu, C., Liu, Z., and Hao, H. (2019). Investigation of shear performance of UHPC by direct shear tests. *Engineering Structures*, Vol. 183, pp. 780-790.
- Zhang, C., Gholipour, G., and Mousavi, A.A. (2020). Blast Loads induced Responses of RC Structural Members: State-of-the-Art Review. *Composites Part B*, Vol. 195, pp. 1-24.
- Zhang, X., Zhao, X., Zhang, Y., and Li, Z. (2012). A one-point quadrature element used in simulation of cold ring rolling process. *Materials Science Forum*, Vols. 704-705, pp. 165-171.

Received	May 27, 2021
Revised	May 28, 2021
Accepted	July 9, 2021