폭발하중에 의한 편개형 방폭문의 파괴거동 분석

Failure Behavior Analysis of Single-leaf Blast-resistant Door by Explosion Loads

신현섭* · 김성욱** · 문재흠*** · 김원우**** · 홍원희*****

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

Abstract

For a blast-resistant structural system with concrete slab as the primary structural member, edge rotation based on flexural failure is generally used as an index to evaluate its structural performance. However, it has been predicted that short-span single-leaf blast doors are vulnerable to shear failure. In this study, limitations on the general application of the edge rotation as a performance evaluation index were reviewed using a finite element (FE) method. The results demonstrated that shear failure was dominant in the impulsive and dynamic response regions, while shear failure or flexural-shear combined failure was dominant in the quasi-static region. In the case of short-span single-leaf blast door, the concrete slab is vulnerable to shear failure, and therefore, the door should be designed considering pressure-impulse curves based on shear failure. For further study, several explosion tests and FE analyses will be required to verify the structural responses and failure level changes according to various specifications of the blast door, and to obtain a general evaluation index for its structural performance.

Key words : Single-leaf Blast-resistant Door, Failure Behavior, Shear Strain, FE Analysis

요 지

콘크리트가 주 부재로 사용된 방폭 구조시스템에 있어서 구조성능을 평가하기 위한 지표로서는 휨과 파괴 거동에 기초하고 있는 회전연성도가 일반적으로 사용되고 있다. 그러나, 단기간 편개형 방폭문은 전단에 취약할 것으로 예상될 수 있으며, 본 연구에서는 회전연성도 지표의 일반적인 적용에 대한 한계점을 검토하고자 유한요소해석을 하였다. 분석 결과에 따르면, 충격 및 동적 응답 영역에서는 전단에 의한 파괴가 지배적이고, 준정적 응답 영역의 경우 전단 또는 휨전단 파괴가 복합적으로 발생하는 것으로 나타났다. 단기간 편개형 방폭문의 경우와 같이 콘크리트 부재가 전단파괴에 취약할 경우, 전단파괴에 대한 압력-충격량 선도를 검토하여 방폭문의 부재 설계에 반영할 필요가 있다고 판단된다. 향후, 방폭문의 다양한 제원 변화에 따른 구조응답 및 파괴 수준의 변화를 규명하고 구조성능에 대한 일반적인 평가지표를 구하기 위해서는 다수의 폭발실험과 유한요소해석이 필요할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 편개형 방폭문, 파괴거동, 전단변형률, 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

*****육군공병학교 전투실험과 군무사무관

Military Official, Combat Experiment Division, ROK Army Engineer School

1. 서 론

방호시설의 출입구에 설치되는 방폭문(Blast-resistant Door)의 구조 형식으로서 강판 및 스티프너로 보강된 강구조 형식, 강박스-콘크리트 합성구조 형식, Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) 판형 구조 등 다양한 구조 형식이 적용되고 있다. 이중에서 외파구조에 해당하는 강박스의 내부에 콘크리트가 채워지는 합성구조 형식의 방폭문은 주로 군사시설 또는 높은 수준의 방호가 요구되는 구조물의 출입구에 설치되고 있으며, 본 연구의 대상 구조체도 이에 대한 것이다. 또한, 구조 형식 외에 작동방식에 따라서는 하나의 문만 여닫이 형식으로 열고 닫는 편개형(Single-leaf Type), 두개의 문을 여닫는 양개형(Double-leaf Type), 그리고 미닫이 형식의 슬라이딩 형식(Sliding Type) 등으로 구분되기도 한다(NEMA, 2008).

방폭문의 성능 평가 및 방폭 등급을 분류하기 위한 방법 중의 하나로서 방폭문 단부에서 중심까지의 거리에 대한 최대 처짐의 비로 정의되는 회전연성도(Edge Rotation), 그리고 탄성 처짐에 대한 최대 처짐의 비를 의미하는 변위연성도(Ductility Ratio)를 기준에서 정하고 있는 한계값과 비교하고 있다(PDC, 2008; U.S. DoD, 2008; ASCE, 2011). 한계값은 구조물의 손상수준을 대표하는 정량적 지표로서 손상수준별 상한값을 의미하며, 설계에서는 이를 참고하여 부재의 재료강도, 재원을 결정하게 된다. ASCE (2011), PDC (2008) 및 U.S. DoD (2008)에서 제시하고 있는 기준에 따르면 철근콘크리트 구조체에 대해서는 회전연성도를 설계에 참고하고 있다.

일반적으로 대상 구조물에 작용할 수 있는 불특정한 폭발 위험에 대해 방호 목표수준에 적합한 설계를 위해서는 동일 손상수준을 유발시키는 폭발하중 조건에 대한 정보가 필요하다. 예를 들어 회전연성도 2도에 해당하는 처짐으로 생기는 손상수준이 어떤 폭발하중 조건에서 발생하는가에 대한 정보를 알아야 구조물의 재료강도 및 재원을 결정할 수 있다. 여기서, 어떠한 손상 수준에 대한 특정 폭발하중 조건은 폭약량 및 구조체와의 이격거리로 정해지지만 구조체에 작용한 최대 폭발압력과 충격량의 조합으로도 표현될 수 있으며, 이를 일련의 곡선 형태로 나타낸 것이 압력-충격량 선도(Pressure-impulse Diagram)이다. 이 선도는 동일 수준의 손상에 대해 얻어진 것이기 때문에 등가 손상 곡선이라고도 한다(Abedini et al., 2019).

그러나, 폭약량 및 이격거리 등에 따라 구조물에 작용하는 폭발압력과 충격량이 변하게 되고, 구조물의 응답특성도 달라지게 된다. 무수한 조합의 폭발하중 조건 중 설계목표의 손상수준을 유발하는 조건을 폭발실험으로 찾아내는 것은 사실상 어렵다. 따라서, 대부분의 경우 보조적 방법으로서 유한요소해석을 사용하고 있다(Shi et al., 2008; Wang et al., 2012; Abedini et al., 2019). 그 외에도 폭발실험의 경우 위험도가 매우 높아서 다수의 실험이 어려운 점과 폭발압력이 작용하는 매우 짧은 순간에 나타나는 구조거동을 계측하

기가 쉽지 않기 때문에 해석적인 방법을 사용하여 결과를 예측하거나 실험 분석에 참고하게 된다. 기존에 많이 사용되고 있는 해석 및 설계 방법으로는 실제의 구조물을 단자유도 시스템(Single-degree-of-freedom System)으로 모델링하고, 해석을 통해 목표 최대 손상수준을 발생시킬 수 있는 폭약량과 구조물과의 이격거리를 찾음으로써 폭발하중 조건을 구하게 되면, 이 결정된 하중조건에 대한 구조물의 재원 및 재료강도를 구하는 방법이다. 단자유도 시스템 모델은 구조체 전체 거동의 분석에 있어서 해석시간을 줄일 수 있는 효율적인 모델이지만, 실제 구조체를 단순화한 것이기 때문에 응력상태나 국부적 파괴수준을 검토하기 위해서는 3차원 유한요소모델이 사용된다. Karthaus and Leussink (1983)에 의하면 구조체의 최종 파괴가 국부적 파괴모드에 의해 유발될 경우는 단자유도 시스템 모델에 의한 해석이 적합하지 않을 수 있다고 밝히고 있다.

여기서 재검토해 볼 필요가 있는 사항은 철근콘크리트 부재에 대한 회전연성도 지표는 연성적인 휨거동(Bending Behavior)에서 발생하는 파괴수준 및 이에 대한 처짐값에 기초하고 있다는 것이다(U.S. DoD, 2008; Abedini et al., 2019). 그러나, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 편개형 방폭문의 경우와 같이 지지경간이 매우 짧은 경우 전단의 영향이 구조거동에 큰 영향을 미치게 되며, 부재의 파괴는 휨 및 전단 파괴가 복합적으로 나타나거나 폭발하중 조건에 따라서는 전단파괴가 지배적으로 나타날 수 있다. 그렇다면 이와 같은 경우에도 회전연성도에 의해 부재의 손상수준을 평가할 수 있겠는가에 대한 검토가 필요하게 된다. Shi et al. (2008) 및 Wang et al. (2012)에 의하면 전단변형 같이 국부적 손상을 유발하는 거동이 복합되어 나타나거나, 또는 그 영향이 더 클 경우 구조시스템 전체 변형에 해당하는 처짐값을 기준으로 손상을 평가하는 것은 적합하지 않다고 하고 있다.

본 연구에서는 폭 1,150 mm, 높이 2,250 mm의 단기간 편개형 방폭문의 폭압에 대한 구조거동을 유한요소해석을 통해 분석하였다. 방폭문이 휨파괴 될 것으로 가정하여 회전연성도로서 평가되고 있는 손상수준에 대해 압력-충격량 선도를 구하였다. 이 선도 상의 각 폭발하중 조건에 대해 방폭문의 콘크리트 슬래브에 발생한 응력 및 변형률을 분석함으로써 전단에 의한 영향을 검토하였다. 또한, 전단파괴에 대한 압력-충격량 선도를 구하여 휨파괴에 대한 선도와 비교하였다. 이로 부터 단기간 편개형 방폭문의 경우 휨파괴보다 전단파괴가 더 큰 영향인자임을 확인하고자 하였고, 현재의 연성적인 휨파괴 거동으로부터 정의되는 손상수준 구분 및 구조성능 평가 방법의 일반적인 적용에 대한 한계점을 검토하였다. 해석에 사용한 프로그램은 충돌 및 폭발 해석 분야에서 범용적으로 사용되고 있는 LS-DYNA (LSTC, 2017)이다. 타 연구의 폭발실험 결과(Kim et al., 2016)와 비교함으로써 유한요소모델의 적합성을 검토한 후에 각 폭발하중 변수에 대한 구조거동을 비교 해석하였다.

2. 방폭성능 평가와 관련된 이론 검토

2.1 방폭성능 평가지표

폭발압력에 노출될 위험성이 있는 구조체의 방폭성능을 평가하기 위한 기준(Performance Criteria)으로서 회전연성도(Edge Rotation, θ) 및 변위연성도(Ductility Ratio, μ)가 사용되고 있으며, 아래의 Eqs. (1) and (2)로 정의된다. 여기서, X_m 은 최대처짐, X_e 는 탄성처짐을 의미하고 L 은 부재 길이이다(PDC, 2008; U.S. DoD, 2008; ASCE, 2011). 철근콘크리트 구조체의 경우 초기 항복은 철근의 항복에 의해 유도되지만, 실질적인 손상 및 파괴는 콘크리트의 압축파괴에 의해 지배된다. UFC 3-340-02 (U.S. DoD, 2008)에 따르면, 변위연성도는 탄성거동 이후 항복이 발생된 부분에 어느 정도나 소성변형이 발생하여 최종 파괴에 도달하는가를 평가하기 위한 지표이므로, 항복되는 부분과 실질적 손상이 발생하는 부분이 서로 다른 철근콘크리트 구조체에 대해서 적용하는 것은 적합하지 않다고 하고 있다. PDC (2008) 및 ASCE (2011)에서도 철근콘크리트 부재에 대해서는 회전연성도에 대한 한계값만을 제시하고 있다.

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

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

회전연성도에 의한 방폭성능 평가 개념은 예를 들어 Fig. 1과 같은 휨파괴 거동에서 발생하는 처짐에 근거한다(U.S. DoD, 2008; Abedini et al., 2019). 전단철근이 적절히 배근되어 있고 인장철근이 변형경화(Strain Hardening) 단계에까지 도달하는 이상적인 휨파괴가 발생하는 경우 회전연성도는 12도까지 증가한다. 그러나, 전단철근이 배근되지 않은 슬래브의 경우 회전연성도가 2도를 초과하게 되면, 콘크리트의 압축파괴 및 재료분리가 발생하게 되기 때문에 구조적인 측면에서는 파괴상태에 도달한 것으로 보고 있다.

Fig. 1. Flexural Failure of Reinforced Concrete Member with Appropriate Shear Reinforcement

회전연성도 기준은 위와 같이 연성적인 휨파괴 거동에 기초하기 때문에, 지지 경간이 짧거나 근접 거리에서의 폭발로 전단의 영향이 크게 작용하는 경우에는 전단파괴에 기초하는 손상수준에 대해 검토가 필요하다. 예로서 폭압을 받은 슬래브의 전단파괴에 대한 연구 사례를 검토해 보면 다음과 같다. 단자유도 시스템으로 단순화된 1방향 슬래브 모델에 대한 해석적 연구(Wang et al., 2012)에 의하면 단면 높이에 대한 지지경간의 비(L/h)가 10.9 이하인 경우는 구조응답 특성에 관계없이 전단파괴 거동만이 발생한다고 밝히고 있다. 이를 참고하면, 동일한 구조형식은 아니나 본 연구의 편개형 방폭문의 경우도 L/h 값이 10.9 이하에 해당하므로 전단파괴가 우세할 것으로 예상될 수 있다.

폭압을 받는 철근콘크리트 구조체의 휨파괴에 대한 손상 수준을 대표하는 지표로서 회전연성도가 사용되는 것과 유사하게 전단파괴에 대해서는 전단변형률이 사용되고 있다. 이와 관련된 문헌(Conrath et al., 1999; Huang et al., 2010)에 의하면 Table 1에 나타난 바와 같이 손상수준별로 1.0~3.0%의 단면 평균 전단변형률을 한계값으로 제시하고 있다.

Table 1. Empirical Shear Damage Criteria

Type of Failure	Criteria	Damage Level		
		Light	Moderate	Severe
Shear	Average shear strain across section	1%	2%	3%

2.2 압력-충격량 선도

동일한 수준의 손상을 발생시키는 폭발하중 조건은 ‘폭발 압력(Blast Pressure)의 최대 크기’ 및 ‘폭압-시간 이력곡선의 면적으로 정해지는 충격량(impulse)’으로 특정될 수 있는데, 이를 그래프로 나타낸 것이 예를 들어 Fig. 2와 같은 압력-충격량 선도(Pressure-impulse Diagram, 이하 P-I 선도)이다. P-I 선도는 구조물의 응답에 따라 충격(Impulsive) 영역, 동적(Dynamic) 영역, 준정적(Quasi-static) 영역과 같이 3가지 영역으로 구분된다. 여기서, 구조물의 응답특성은 하중의 지속시간과 구조물의 고유주기와 관계로부터 예상될 수 있으며, 이와 관련하여 Cormie et al. (2009), Mays and Smith (1995), NORSOK (1999) 등에 의해 제시된 기준이 있다. 예로서, NORSOK에서 제시한 응답특성 구분 기준은 Table 2와 같다. 여기서, t_d 는 폭발압력이 작용한 시간, T_n 은 폭압을 받는 구조체의 고유주기를 의미한다. 문헌에 따라 다소 다른 기준으로 응답특성을 예측하고 있는데, 이에 대해 UFC 3-340-02 (U.S. DoD, 2008)에 따르면 다음과 같이 설명되어 있다. 구조물의 응답은 구조물 형식 및 폭압에 대한 민감도, 폭약 위치와 같은 폭발 조건 등에 따라 변하기 때문에 어느

특정 구조체에 대해 충격/동적/준정적 영역을 구분하는 일반적인 기준은 없으며, 직접 해석하여 구하여야 한다.

Fig. 2. Pressure-Impulse Curve (Abrahamson and Lindberg, 1976)

Table 2. Criteria for Classification of Structural Response (NORSOK, 1999)

t_d/T_n	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

3. 편개형 방폭문 유한요소해석 방법

3.1 해석 조건 및 분석 절차

Fig. 3에 방폭문 설치 사례 및 구조 개요도를 나타내었다. 해석 대상의 편개형 방폭문의 크기는 1,150 mm (W) × 2,250 mm (H) × 220 mm (D)이다. 방폭문 구조는 외피구조로 강판두께 10 mm의 강박스와 그 내부의 철근콘크리트 슬래브로 구성된다. 문의 좌측단에는 문의 밀폐를 돕는 랫치(Latch)가 설치되어 있고, 우측단에는 개폐 시의 회전을 위한 힌지(Hinge) 철물이 설치되어 있다. 콘크리트의 정적 1축 압축강도는 50 MPa, 200 mm 간격으로 상하단 배근되어 있는 D16 철근의 항복강도는 500 MPa이고, 강박스 강판의 항복강도는 275 MPa이다.

위와 같은 단시간의 편개형 방폭문에 대해 외부하중으로서 작용하는 폭발압력을 해석변수로 하였다. 방폭문 응답이 충격(Impulsive), 동적(Dynamic), 준정적(Quasi-static) 영역 등 각 영역에 속하도록 하기 위해 다음과 같은 방법을 취하였다. 폭발하중 조건인 폭약량, 구조체와의 이격거리를 변화시켜 가면서 예를 들어 Table 2에 나타난 바와 같이 각 응답 영역에서 나타나게 되는 방폭문의 고유주기에 대한 폭발압

력 작용 시간의 비를 만족하도록 한다. NORSOK (1999)에서 제시한 기준을 참고하여 가해석을 하되, 실제 구조응답이 어떤 영역에 속하는지는 하중의 작용시간과 최대 처짐에 도달하는 시간, 압력 또는 충격량에 민감한 정도 등에 대한 결과를 검토하여 최종적으로 정하였다. 또한, 구하고자 하는 P-I 선도는 특정 폭약량 및 이격거리에 대해 동일한 손상수준을 나타내는 곡선으로서, 예를 들어 회전연성도 2도의 손상수준(192 mm의 처짐에 상당)에 대한 곡선을 얻기 위해서는 주어진 이격거리에서 폭약량을 조금씩 변화시켜 가다가 해당 처짐이 발생했을 때의 폭약량을 구한다. P-I 선도는 이와 같이 얻은 폭약량으로 인해 구조체가 받는 폭발압력 최대값 및 충격량의 조합으로 구하게 된다. Table 3은 위와 같은 과정을 위해 설정한 폭약량 및 이격거리의 범위를 나타낸 것이다.

Fig. 3. Door Structure (Moon et al., 2019)

Table 3. Analysis Variables

Separation Distance (m)	Weight of Explosive (kg)	Expected Response
1.0	1.0~10.0	Impulsive
1.5	5.0~15.0	
2.0	10.0~20.0	
3.0	25.0~50.0	Dynamic
6.0	50.0~150.0	
10.0	100.0~500.0	
20.0	1,000.0~3,000.0	Quasi-static
30.0	3,500.0~6,000.0	

위와 같은 변수에 대한 분석 절차를 간략히 나타내면, 첫째, Table 3에 나타난 바와 같은 폭약량 및 이격거리를 조정해 가며 방폭문의 회전연성도가 2도에 해당하는 처짐값이 얻어지면, 이때의 방폭문에 작용한 최대 폭발압력과 충격량을 기록하여 P-I 선도(회파피 될 것을 가정했을 때의 손상수준에 해당)를 작성하였다. 본 연구의 편개형 방폭문은 전단철

근이 배근되어 있지 않은 경우에 해당하여, 서두에서 검토한 바와 같이 큰 변형 및 붕괴 정도에 상당하는 2도 초과 회전연성도에 대해서는 검토 범위에서 제외하였다. 또한, 큰 변형이나 붕괴가 발생하는 경우는, 폭발작용 후에도 문의 개폐가 가능해야 한다는 설계목적에도 적합하지 않기 때문에 2도 초과의 범위는 검토 필요성이 없을 것으로 사료된다. 둘째, 첫 번째 단계에서 결정된 각 폭발하중 조건에 대해 해석으로 얻은 응력 및 변형률을 분석하여 휨 또는 전단파괴의 정도를 검토하였다. 세 번째, Table 1에 나타난 바와 같은 전단에 의한 파괴수준을 구분하는데 사용되는 전단변형률 1.0, 2.0 및 3.0%를 발생시키는 폭발압력과 충격량을 구하여 P-I 선도를 작성하였다. 응력 검토결과와 함께, 휨파괴를 가정하고 얻은 P-I 선도와 전단파괴에 대한 P-I 선도를 비교 검토함으로써 단기간 방폭문의 경우 전단파괴가 더 큰 영향을 미치고 있음을 알아보고자 하였다.

3.2 해석모델 및 적합성

Fig. 3에서와 같은 방폭문 구조체의 처짐, 단면 내의 응력 및 변형률에 대한 분석을 위해 Fig. 4와 같은 3차원 해석모델을 작성하였으며, LS-DYNA (LSTC, 2017)를 이용하여 해석하였다. 이 해석 모델은 방폭문의 강박스 강판 두께 및 철근량과 같은 설계변수의 결정에 관련된 연구(Shin et al., 2019a, 2019b)에서 사용된 모델링 방법에 준하여 작성된 것이므로 여기서는 주요 모델링 방법만을 간략하게 나타내면 다음과 같다.

Fig. 4. FE Model

방폭문의 외피구조를 이루는 강박스는 Shell 요소 4,324개, 내부의 콘크리트 슬래브 및 철근은 Solid 요소 10,920개 및 1차원 선형요소 1,464개를 사용하였다. 그 외의 부재는 모두

Solid 요소 7,586개를 사용하였다. 모델에 사용된 절점 수는 총 33,479개이다. 슬래브와 강박스 간의 접촉면, 강박스와 벽체의 테두리 간에 접촉하는 면 등은 Contact 요소를 사용하였다. 경계조건으로서 우측 힌지는 3방향 모두 고정, 좌측 래치는 y 및 z 방향을 고정하였으며, 벽체의 경우는 문 반대편 면을 모두 고정하였다. 재료모델로서는 콘크리트의 경우 Fig. 5와 같이 주응력 공간에서 콘크리트의 재료적 비선형 거동을 비교적 잘 모사할 수 있고, 동적 효과가 고려될 수 있는 CONCRETE_DAMAGE_REL3 모델을 사용하였다(Malvar et al., 1997). 강재에 사용된 재료 모델로 비선형 및 동적 변형률 속도의 영향을 고려할 수 있는 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY를 사용하였다(LSTC, 2017).

Fig. 5. Concrete Material Model

위와 같은 해석모델의 적합성을 검증하기 위해 폭약량이 125.0 kg이고 이격거리 6.0 m인 경우에서 동일 구조의 편개형 방폭문에 대한 폭발실험(Kim et al., 2016)과 비교한 결과를 검토해 보면, 실험에서 얻은 방폭문 중앙부의 최대 처짐값의 평균은 10.6 mm이고, 해석에서 얻은 최대 처짐값은 12.1 mm로서 약 12%의 차이가 나타남을 알 수 있다(Shin et al., 2019b). Draganić and Varevac (2018)에 의하면, 폭발실험의 경우 폭발압 편차 및 실험 당시의 온습도 조건에 따라 다소간의 편차가 발생할 소지가 있으므로 10% 내외의 차이는 납득될 수 있다고 하고 있다. 또한, 해석에서 얻은 내부에너지 (Internal Energy)에 대한 모래시계 에너지(Hourglass Energy)의 비도 10% 이하를 나타내고 있는데, 관련 문헌(Zhang et al., 2012)을 참고한 것에 따르면 이와 같은 경우 해석적 오류가 작은 경우로 판단된다(Shin et al., 2019b). 이와 같은 비교 결과로 볼 때 폭발실험을 매우 정확히 모사할 수는 없어도 특정 변수에 따른 거동 변화의 추이를 판단함에 있어서는 해석모델의 적합성은 충분하다고 판단하였고, 폭발하중 조건의 변화에 따른 방폭문의 거동 특성을 분석하기로 하였다.

4. 해석 결과

4.1 폭발하중 조건별 방폭문 응답 분석

해석조건에서 설정한 각 이격거리 및 폭발량 변수에 대한 방폭문의 구조응답 특성을 Table 4에 나타내었다. 표에 나타난

Table 4. Loading Condition and Structural Response for 2 degree Edge Rotation

Case	Loading Condition		P-I Diagram		t_d (ms)	t_d/T_n	t_m (ms)	t_m/t_d	Response Domain	
	R (m)	W (kg)	Pressure (MPa)	Impulse (MPa · ms)					Expected	Results
D1	1.0	5.5	48.90	5.15	0.44	0.19	6.17	14.02	Imp.	Imp.
D1.5	1.5	11.0	28.10	4.12	0.75	0.33	7.77	10.36	Dyn.	Imp.
D2	2.0	17.4	18.95	3.67	1.07	0.46	7.83	7.32	Dyn.	Imp.
D3	3.0	33.0	11.50	3.41	1.90	0.83	8.10	4.26	Dyn.	Imp.
D6	6.0	132.0	5.66	3.78	4.10	1.78	9.10	2.22	Dyn.	Dyn.
D10	10.0	365.0	3.32	4.20	7.68	3.34	8.30	1.08	Q-Sta.	Dyn.
D20	20.0	1,695.0	1.86	5.48	18.34	7.97	7.80	0.42	Q-Sta.	Q-Sta.
D30	30.0	4,490.0	1.41	6.78	26.40	11.48	10.05	0.38	Q-Sta.	Q-Sta.

* R (separation distance), W (weight of explosive); * Imp. (Impulsive), Dyn. (Dynamic), Q-Sta. (Quasi-Static)

(a) D1 (Impulsive Response)

(b) D6 (Dynamic Response)

(c) D30 (Quasi-static Response)

Fig. 6. Deflection Response

Fig. 7. P-I Curve for 2 degree Edge Rotation

값들은 앞서 분석절차에 대해 설명한 바와 같이 회전연성도 2도에 대한 폭발하중 조건 및 P-I 선도를 구하기 위한 것이다. t_d 는 폭발하중의 작용시간, T_n 은 방폭문의 고유주기이며, t_m 은 최대처짐 발생 시간이다. 유한요소해석으로 구한 고유주기는 약 2.27 ms (441 Hz)이다. 간단한 4변 단순지지조건에 대해서는 Jänich (1962) 또는 Blevins (1979)의 식에 따라 약 1.75 ms (570 Hz), LS-DYNA로는 약 1.88 ms (532 Hz)과 같은 값을 구할 수 있으나, 단부 구속조건의 차이로 비교적 더 저진동수와 장주기 모드를 나타낸 것으로 판단된다. 또한, 이격거리 1 m, 6 m, 30 m에 대한 방폭문의 처짐 응답을 Fig. 6에 예로서 나타내었고, 각 폭발하중 조건에 의해 방폭문에 회전연성도 2도에 해당하는 처짐이 발생했을 때의 동일 손상수준을 나타내는 P-I 선도를 Fig. 7에 나타내었다.

Table 2의 NORSOK에서 제시한 고유주기에 대한 하중 작용시간의 비를 참고하면, Table 4에서와 같이 폭발하중 조건 D1 (이격거리 1 m)에 대해 구조물의 응답은 충격영역에 속하고, D1.5~D6에 대해서는 동적영역, D10~D30에 대해 준정적 영역에 속할 것으로 예상될 수 있다. 그러나, 표에 나타낸 바와 같이 각 영역별 응답특성에 대한 해석결과를 참고하면, D1~D3의 경우 하중작용시간(t_d)에 비해 최대응답

발생 시간(t_m)이 상당히 지연되어 나타나기 때문에 모두 충격영역에 속한다. 또한, D10에 대해서는 준정적 영역에 속할 것으로 예상되었지만, 최대응답이 하중작용시간 직후에 나타나기 때문에 동적 영역에 속한다.

그 외에는, 압력이 높고 하중 작용 시간이 짧을수록 충격 응답이 나타나고, 반대인 경우 준정적 응답이 나타나는 것으로 보아 전체적으로는 예상된 결과와 일치한다.

한편, Fig. 7에 나타난 P-I 선도를 기준으로 응답 특성을 분류해 보면, D1~D3 구간의 경우 폭발압력이 4배 이상 차이가 나도 동일 손상수준을 나타내는 것으로 나타났기 때문에 압력에 민감하지 않은 경우이고, 따라서 D1~D3의 하중조건에 대해 방폭문의 구조응답은 충격영역에 속하는 것으로 판단할 수 있다. 반대로 D20~D30에 대해서는 충격량의 증감에 민감하지 않은 경우로서 구조응답은 준정적 영역에 속한다.

4.2 응력 및 변형률 분석에 의한 파괴수준 검토

Fig. 7에 나타난 P-I 선도는 회전연성도 2도에相当하는 처짐(19.2 mm)을 유발하는 폭발압력과 충격량 간의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 선도 상의 각 점들이 나타내는 조건에 대해 방폭문은 휨에 의해 파괴되며, 동일한 손상수준을 나타낸다고 가정된 것이다. 그러나, 서두에서 검토한 바와 같이 회전연성도 2도라는 값은 철근콘크리트 부재의 휨파괴에 기초하여 제안된 것으로서, 지간이 짧거나 근접거리에서의 폭발로 전단파괴가 예상될 때는 적합하지 않을 수 있다. 여기서는 Fig. 7과 같은 P-I 선도 상의 하중조건에 대해 방폭문 콘크리트 부재에 발생한 응력 및 변형률 상태를 검토하여 휨 또는 전단파괴 여부를 검토하였다. 이하에 나타난 그래프 및 이에 대한 분석에서는 각 응답 영역의 대표적 예로서 D1/D6/D30의 경우를 비교하였다.

Table 5는 각 하중조건에 대해 방폭문 높이의 중앙부 절단면($L = 1,150$ mm)에 발생한 평균 전단변형률 및 평균 수직변형률(휨변형률)의 최대값을 나타낸 것이다. 또한, Fig. 8은 예로서 D1, D6, D30 하중조건에 대해서 평균 전단변형률과 평균 수직변형률의 변화를 나타낸 것이다. 여기서의 절단면은 단면에 평행한 절단면으로서 Fig. 4를 참고하면 방폭문 높이의 중앙부에 위치한 $z-x$ 평면이다. 전단변형률과 수직변형률 성분은 각각 γ_{zx} 및 ϵ_{xx} 이며, 표에 나타난 전단변형률은 방폭문 단면높이에 발생한 평균값이고, 수직변형률은 휨 압축응력이 최대로 작용하는 절단면 상단 중앙부에서의 평균값이다. 전단변형률을 검토한 것은 Table 1에 나타난 바와 같은 전단에 대한 손상수준을 검토하기 위한 것이다. 또한, 수직변형률에 대한 검토는 단면을 지간으로하여 1방향 슬래브로 거동하는 방폭문의 휨변형을 알고자 한 것이다(휨압축 변형률로서 휨에 의한 곡률 변화와 비례 관계).

Table 5에 의하면 이격거리 6 m 이하의 경우(D1~D6), 단면에 발생한 평균 전단변형률은 2% 초과 및 3% 미만의

범위에 있으며, 이격거리 10 m~30 m의 경우(D10~D30), 1% 초과 및 2% 미만의 범위에 있는 것으로 나타났다. 또한, Fig. 8에 의하면 이격거리가 클수록 휨변형의 변화가 상대적으로 더 크고, 반대로 이격거리가 작은 경우는 전단변형의 변화가 더 큰 것을 알 수 있다. Table 1의 전단에 대한 손상수준 평가기준에 따르면 슬래브는 전체 폭발하중 조건에 대해 전단에 의한 손상이 발생했고, 이격거리 6 m 이하에서는 평균 전단변형률이 2% 초과로서 중간 수준(Moderate Damage Level)에서 심각한 수준(Severe Damage Level) 사이의 손상이 발생한 것으로 평가될 수 있다. 한편, 수직변형률의 경우 이격거리 6 m 이하에서는 2‰ 미만이나 이격거리 10 m~30 m의 경우 2‰를 초과한 것으로 나타났다.

Table 5. Maximum Average Shear and Normal Strain in the Central Part of Slab

Case	max. γ_{zx}	max. ϵ_{xx}	Case	max. γ_{zx}	max. ϵ_{xx}
D1	0.0274	0.0015	D6	0.0226	0.0019
D1.5	0.0266	0.0014	D10	0.0184	0.0022
D2	0.0234	0.0014	D20	0.0124	0.0022
D3	0.0231	0.0013	D30	0.0113	0.0023

Fig. 8. Average Shear and Normal Strain Curve for the Case D1, D6 and D30

Fig. 9와 같이 슬래브 중앙부 절단면에 발생한 평균 전단응력과 평균 전단변형률의 관계 곡선을 검토해 보면, D1/D6/D30 모두 최대 약 7 MPa의 전단응력이 발생한 것으로 분석되었다. 참고로서 지간(l_n)과 유효높이의 비(d)가 $l_n/d < 5$ 또는 전단지간(a)과 보의 유효높이(d)의 비가 $a/d < 2$ 인 깊은 보(Deep Beam)의 전단거동에 관한 실험적 연구(Yang and Chung, 2001)를 참고하면, 본 연구의 콘크리트 압축강도와 유사한 54 MPa의 콘크리트의 전단강도는 5.1~8.2 MPa로 나타났다. 이를 고려하면 D1/D6/D30 모든 경우에 있어서 슬래브에 발생한 전단응력은 전단파괴가 발생하는 범위 내에 있는 것으로 판단된다. 각 경우별 전단파괴 수준은 Table 1에 의해 구분될 수 있다. 또한, Fig. 10에서와 같은

전단응력 분포도(Shear Stress Contour)를 검토해 보면, D30에 비해 전단변형이 더 크게 발생한 D6의 경우가 더 넓은 범위에 걸쳐 응력이 집중되고 있음을 알 수 있다. 여기서, 편개형 방폭문은 폭을 지간으로 하는 1방향 슬래브로서 거동하므로 Fig. 10에는 폭방향 절단면을 기준으로 슬래브 절반에 대한 응력상태를 나타내었다.

Fig. 9. Shear Stress(τ_{zx})-Strain(γ_{zx}) Curves

Fig. 10. Stress Contour in Half of Slab

Figs. 9 및 10에 나타난 바와 같이 전단변형이 제일 커서 전단파괴 수준이 가장 높은 D1의 경우 D6 및 D30의 경우와는 다소 구분되는 거동을 보인다. 구조응답이 충격영역에 속하는 D1의 경우 매우 짧은 시간에 강한 충격하중의 작용으로 하중작용 직후($t = 0.35$ ms)에 Fig. 10(a)와 같은 높은 강도의 응력파(Stress Wave)가 발생한다. 이로 인해 다른 경우보다 상대적으로 작은 변형이 발생함에도 순간적으로 매우 큰 응력이 발생하게 되며, Table 5 및 Fig. 8에 나타난 바와 같이 다른 경우보다 직접 전단에 더 가까운 거동을 보이게 된다. 이격거리(R)와 폭약량(W)의 비 $R/W^{1/3}$ 가 0.57로서 편칭전단은 발생하지 않았다. 폭발압력의 작용이 끝난 이후 자유진동 구간에서는 다른 경우와 동일한 최대 처짐(회전연

성도 2도에 상당하는 처짐)이 발생하지만 응력의 증가 정도 보다 변형만이 상대적으로 더 크게 증가하는 것으로 나타났고, 최대 평균 전단변형률은 2.74%로서 심각한 파괴 수준 (Severe Damage Level)에 해당하는 3%에 가까운 변형이 발생한 것으로 판단된다. D1의 경우에서와 같이 충격하중이 작용하는 짧은 순간에 작은 변형에도 높은 응력이 발생하는 이유는 구조체에 발생하는 가속도가 변위 보다 더 빠른 속도로 증가하는데 원인이 있다. 가속도와 질량과의 곱에 상당하는 관성 저항이 크게 증가하게 되어 응력은 크게 증가하지만, 강성계수와 변위의 곱에 상당하는 탄성 저항은 관성저항 보다 상대적으로 느린 속도로 증가하여 작은 변형만이 생기게 되기 때문이다(Hao, 2015). 이와 같은 현상은 폭발하중 작용시간이 방폭문의 고유주기에 비해 상대적으로 매우 짧은 D1의 경우에서 가장 뚜렷하게 나타났다.

한편, Fig. 11에서와 같이 슬래브 중앙부 상단에서 발생한 평균 수직응력(σ_{xx}) 및 평균 수직변형률(ϵ_{xx})을 비교해 보았다(휨응력 및 휨변형률). 여기서의 응력 및 변형률 값은 최대 처짐이 발생하는 시점까지 나타난 것이며, 슬래브 중앙부 Solid 요소들에서의 평균값이다. 전단응력의 경우 초기에 크게 증가하는 것에 비해 휨에 의한 수직응력은 최대 처짐이 발생하는 시점 부근에서 최대값에 도달하는 것으로 나타났다. D1의 경우 초기에 작은 변형에도 상대적으로 큰 응력이 발생했지만, 최대 처짐이 발생할 때에는 최종적으로는 다른 경우 보다 더 작은 응력과 변형률이 발생했음을 알 수 있다. 준정적 영역에 속하는 D30의 경우가 가장 큰 수직응력과 수직변형률이 발생했으며, D1의 경우에 비하면 응력은 1.4배, 변형률은 1.5배 더 크다. 응력분포를 검토해 보면 Fig. 12와 같이 D30의 경우가 더 넓은 범위에 걸쳐 응력이 집중되는 것으로 나타났다.

또한, 철근 및 강박스 강판에서 발생한 최대 인장응력을 검토해 보면, 강판의 경우 D1, D6, D30 모두 항복강도인 275 MPa 이상의 응력이 발생한 것으로 나타났다. 철근의 경우는 D1에서 254 MPa로서 항복하지 않았고, D6 및 D30에서는 모두 항복한 것으로 나타났다.

Fig. 11. Normal Stress(σ_{xx})-Strain(ϵ_{xx}) Curves

Fig. 12. Normal Stress(σ_{xx}) Contour in Half of Slab

위와 같은 응력 및 변형을 분석으로 부터 D1의 경우 전단에 의해 파괴가 발생했고, D30의 경우는 전단에 의한 파괴가 발생했지만 비교적 낮은 수준이며 휨에 의한 파괴가 상대적으로 더 많이 발생한 것으로 볼 수 있다.

그러나, 콘크리트 슬래브의 응력상태 및 파괴정도는 수직 응력(휨응력)이나 전단응력 등 개별적 응력조건이 아닌 3차원 주응력공간에서 정수압 응력(Hydrostatic Stress)과 편차 응력(Deviatoric Stress) 간의 상관관계에 따라 검토되고 있다 (Markovich, 2009). 해석에 사용된 콘크리트 재료모델은 폭발해석에 많이 사용되고 있는 Karagozian & Case (K&C) 모델(Malvar et al., 1997)로서 콘크리트의 항복 및 최대압축에 대한 포락선(Failure Envelop)으로 파괴 여부를 검토할 수 있다. 항복상태 포락선(Yield Failure Surface)은 Fig. 5의 P1 상태, 최대 압축상태 포락선(Maximum Failure Surface)은 P2 상태에 해당한다.

Fig. 13은 슬래브 중앙부 위치의 단면방향 절단면에서 발생한 응력을 포락선과 함께 주응력 공간에 나타낸 것으로서 Fig. 13(a)는 폭발압력 작용 초기의 상태이며 응력파(stress wave)가 발생하여 짧은 시간에 높은 응력이 발생하는 단계에 해당한다. 처짐이 크게 증가하기 전이며, 전단이 상대적으로 더 지배적인 단계이다. 충격 영역에 속하는 D1의 경우 전반적으로 응력이 크게 증가한 상태이며, 대부분이 항복 포락선 주변에 집중되어 있다. 준정적 영역에 속하는 D30의 경우 비교적 낮은 응력이 발생하였는데 일부는 항복 포락선을 넘어서고 있지만 대부분은 포락선을 초과하지 않고 있다. 이로부터 응력-변형을 검토와 함께 전체적으로 고려할 때 충격영역 또는 이에 근접할수록 전단에 의한 파괴가 더 지배적으로 나타남을 알 수 있다.

Fig. 13(b)는 최대 처짐 발생 시점에서의 상태로서 전단에 대한 영향이 없지는 않으나 휨이 크게 증가하는 단계에서의 응력상태를 나타낸 것이다. D1의 경우 대부분 포락선 이하에 분포하고 있으나, D30의 경우 항복 포락선과 최대 포락선 사이에 걸쳐 있는 응력상태가 존재하는 것으로 나타났다.

따라서, 위와 같은 결과를 전체적으로 검토해 볼 때 충격영역에 속하는 D1의 경우는 전단파괴가 지배적이며, D30의 경우 휨과 전단이 복합적으로 파괴에 영향을 미친 것으로 판단된다.

(a) At a Time of High Increasing Shear Stress

(b) At a Time of High Increasing Flexural Stress

Fig. 13. Failure of Concrete

4.3 전단파괴에 대한 압력-충격량 곡선

휨파괴를 가정하고 충격/동적/준정적 응답을 발생시키는 각각의 하중조건에 대해서 회전연성도 2도에 상당하는 처짐이 발생하였을 때 얻은 등가 손상수준이 Fig. 7과 같은 P-I 선도이다. 그러나, 앞서 응력 및 변형을 관계 및 파괴 정도에 대한 분석 결과에 따르면, 충격 영역에서는 전단이 지배적이고 준정적 영역에서는 휨과 전단이 복합적으로 영향을 미친 것으로 나타났으며, 슬래브의 파괴정도도 차이가 있는 것으로 분석되었다. 이와 같은 결과로 볼 때 전단에 대한 등가 손상수준의 검토가 필요하여, Table 1의 전단에 의한 파괴수준을 구분하는데 사용되는 전단변형률 1.0, 2.0 및 3.0%를 발생시키는 폭발압력과 충격량을 구하여 P-I 선도를 구하였다. Table 6은 각 응답영역에 대한 폭발하중 조건 및 해석결과로서 얻은 폭발압력과 충격량을 나타낸 것이고, Fig. 14는 이를 그래프로 나타낸 것이다. Table 6 및 Fig. 14에 따르면 이격거리 1.0~30.0 m 전체 구간에서 회전연성도 2도에 상당하는 처짐이 발생하기 전에 1% 수준의 전단변형이 선행하여 발생하는 것으로 나타났다. Table 1의 전단파괴 수준별 변형률 한계치를 참고하면, 위와 같은 결과는 회전연성도 2도를

발생시키는 폭발하중 조건 보다 더 낮은 수준에서 전단파괴가 이미 시작되었음을 의미한다.

Table 6. Loading Condition for Each Level of Shear Failure

Case	Loading Condition		P-I Diagram		Shear Strain (%)
	R (m)	W (kg)	Pressure (MPa)	Impulse (MPa·ms)	
D1-S	1.0	3.5	33.2	3.19	1.0
		5.0	43.6	4.46	2.0
		5.8	49.6	5.28	3.0
D1.5-S	1.5	6.0	19.2	2.69	1.0
		9.0	25.3	3.65	2.0
		11.1	30.0	4.36	3.0
D2-S	2.0	10.6	14.1	2.62	1.0
		14.0	17.4	3.32	2.0
		18.0	20.2	3.9	3.0
D3-S	3.0	27.0	7.73	2.7	1.0
		29.3	10.6	3.17	2.0
		34.5	12.2	3.61	3.0
D6-S	6.0	93.2	4.06	2.9	1.0
		118.0	5.13	3.5	2.0
		145.0	6.2	4.09	3.0
D10-S	10.0	225.0	2.7	3.55	1.0
		383.5	3.48	4.35	2.0
		445.0	4.04	4.89	3.0
D20-S	20.0	1,490.0	1.63	5.35	1.0
		1,895.0	2.08	5.96	2.0
		2,100.0	2.31	6.45	3.0
D30-S	30.0	4,000.0	1.28	6.74	1.0
		4,700.0	1.51	7.22	2.0
		5,120.0	1.62	7.69	3.0

* R (Separation Distance), W (Weight of Explosive)

Fig. 14. P-I Curves for Each Level of Shear Failure

D1-S에서 D10-S까지 이격거리 10 m 이하의 구간(충격영역 및 동적영역에 해당)을 보면, 휨파괴 된다고 가정한 후 얻은 회전연성도 2도일 때의 손상수준이 분석결과로는 사실상 전단변형을 2~3%에 해당하는 높은 수준의 전단파괴를 나타낸다는 것을 알 수 있다. 충격 및 동적응답 영역의 경우 특히, 충격응답 영역에서는 작은 폭발량 증가에도 전단변형이 1%에서 3%까지 변화하는 것으로 보아, 앞서 응력 검토에서 얻은 결과대로 전단파괴가 지배적임을 알 수 있다. 준정적 영역(이격거리 20 m 이상)에서는 전단변형 증가에 상대적으로 더 많은 폭발량 증가가 필요하다는 점과 앞서 응력 검토결과를 전체적으로 고려할 때, 전단파괴가 선행되고 폭발량이 더 증가할 경우에는 휨 및 전단파괴가 복합적으로 발생하는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 연성적인 휨파괴 거동으로부터 정의되는 회전연성도 지표에 의해 손상수준을 구분하고 구조성능을 평가하고 있는 기존 방법의 일반적인 적용에 있어서의 한계점을 검토하였다.

단시간 편개형 방폭문에 대한 유한요소해석 결과에 따르면 충격 및 동적 응답 영역에서는 전단에 의한 파괴가 지배적이고, 준정적 응답 영역에서는 작은 폭발량에 대해서 전단파괴가 선행하여 발생하고 폭발량이 증가될 경우는 휨과 전단에 의한 파괴가 복합적으로 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과에 따르면, 본 연구에서의 편개형 방폭문과 같이 주 지지경간(단변)이 짧거나 근접거리에서의 폭발로 전단에 취약해질 경우는 전단파괴에 대한 압력-충격량 선도를 우선적으로 검토하여 방폭문의 전단보강 등과 같은 부재 설계에 반영할 필요가 있다고 판단된다.

준정적 영역에서 나타난 파괴거동과 같이 휨과 전단에 의한 파괴가 복합적으로 나타날 경우 어떠한 인자가 구조성능에 더 지배적인지에 대해서는 추가 연구가 필요하다. 또한, 폭발조건, 방폭문의 지간길이 및 단면높이 등 다양한 제원 변화에 따른 구조응답과 파괴수준의 변화를 규명하고 구조성능에 대한 일반적인 평가지표를 구하기 위해서는 향후 다수의 폭발실험과 유한요소해석이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설기술연구사업(과제번호: 20SCIP-B146646-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Abedini, M., Mutalib, A.A., Raman, S.N., Alipour, R., and

- Akhlaghi, E. (2019). Pressure-impulse (P-I) diagrams for reinforced concrete (RC) structures: A review. *Archives Computational Methods in Engineering*, Vol. 26, pp. 733-767.
- Abrahamson, G., and Lindberg, H. (1976). Peak load-impulse characterization of critical pulse loads in structural dynamics. *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 37, No. 1, pp. 35-46.
- American Society of Civil Engineers (ASCE). (2011). *Blast protection of buildings*. ASCE/SEI 59-11, ASCE, New York, U.S.
- Blevins, R.D. (1979). *Formulas for natural frequency and mode shape*. Malabar, FL: Krieger Publishing Company.
- Conrath, E.J., Krauthammer, T., Marchand, K.A., and Mlakar, P.E. (1999). *Structural design for physical security: State of practice*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Cormie, D., Mays, G., and Smith, P. (2009). *Blast effects on buildings* (2nd ed.). London, UK: Thomas Telford Ltd.
- Draganić, H., and Varevac, D. (2018). Analysis of blast wave parameters depending on air mesh size. *Shock and Vibration*, Hindawi, Vol. 2018, Article ID 3157457. doi: 10.1155/2018/3157457
- 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.
- Huang, X., Ma, G.W., and Li, J.C. (2010). Damage assessment of reinforced concrete structural elements subjected to blast load. *International Journal of Protective Structures*, Vol. 1, No. 1, pp. 103-124.
- Jänich, R. (1962). Die näherungsweise berechnung der eigenfrequenzen von rechteckigen platten bei verschiedenen randbedingungen. *Die Bautechnik*, Vol. 3, pp. 93-99.
- Karthauss, W., and Leussink, J. (1983). Dynamic loading. *Proceedings of International Symposium on the Interaction of Non-Nuclear Munitions with Structures*, U.S. Air Force Academy, CO, pp. 151-154.
- 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.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC). (2017). *LS-DYNA S/W and User's manuals*.
- 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.
- Mays, G.C., and Smith, P.D. (Eds.). (1995). *Blast effects on building: Design of building to optimize resistance to blast loading*. London, UK: Thomas Telford.
- 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, NEMA.
- Norsk Søkkel Konkurranseseposisjon (NORSOK). (1999). *Action and action effects*. Norsok-N-003- Annex A, Standards Norway, Oslo, Norway.
- Protective Design Center (PDC). (2008). Single degree of freedom structural response limits for anti-terrorism design. PDC-TR-06-08, U.S. Army Corps of Engineers, Omaha, NE, USA.
- 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. (2019a). Design sensitivity analysis of a steel- concrete double-leaf blast-resistant door to determine the steel ratio. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, Vol. 19, No. 4, pp. 165-177.
- Shin, H.S., Kim, W.W., Park, G.J., Lee, N.K., Moon, J.H., and Kim, S.W. (2019b). FE analysis on the structural behavior of the single-leaf blast-resistant door according to design parameter variation. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 11, pp. 259-272.
- U.S. Department of Defense (DoD). (2008). *Structures to resist the effects of accidental explosions*. Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02.
- 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.

Yang, K.H., and Chung, H.S. (2001). The shear behavior of reinforced high-strength concrete deep beams without shear reinforcement. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 17, No. 11, pp. 11-18.

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	■	April 24, 2020
Revised	■	April 27, 2020
Accepted	■	May 22, 2020