폭압 작용에 의한 방폭문의 반발거동 해석

신 현 섭^{1†}

¹한국건설기술연구원 구조연구본부 연구위원

Analysis of Rebound Behavior of Blast-Resistant Door Subjected to Blast Pressure

Hyun-Seop Shin^{1†}

¹Research Fellow, Department of Structural Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology(KICT), Goyang, 10223, Korea

Abstract

Steel-concrete single-leaf blast-resistant doors, having steel box and slab inside, are installed on the wall using supporting members such as hinges and latches. Several studies have been conducted on their deflection behavior in the same direction as that of the blast pressure, but studies on their deflection behavior in the opposite direction, that is, studies on negative deflection behavior are relatively insufficient. In this study, we conducted a parameter analysis using finite element analysis on blast-resistant doors, on their rebound behavior in the negative deflection phase. Results revealed that the plastic deformation of the door, and the change in momentum and kinetic energy during rebound, were major factors influencing the rebound behavior. Greater rebound force was developed on the supporting members in the impulsive region, than in the quasi-static region; due to the characteristics in the impulsive region, where the kinetic energy developed relatively greater than the strain energy. In the design process, it is necessary to consider excessive deformation that could occur in the supporting members as the rebound behavior progresses. Additionally, it was found that in the case of steel-concrete blast doors, the rebound force increased relatively more, when the effects of both rebound and negative blast pressure contributed to the negative deflection of the door. Since conditions for the occurrence of this superposition effect could vary depending on structural characteristics and explosion conditions, further investigation may be required on this topic.

Keywords : blast-resistant door, rebound force, negative blast pressure, finite element analysis

1. 서론

강-콘크리트(steel-concrete) 편개형 방폭문(single-leaf blast-resistant door)은 철근 콘크리트 슬래브가 강박스로 둘러싸져 있는 형태를 취하고 있으며, 방폭문의 좌우 측단에 힌지(hinge) 및 래치(latch)가 설치되어 있어서 개폐와 밀폐를 할 수 있게 되어 있다. 강재 및 콘크리트 부재로 제작되어 비교적 높은 수준의 방폭성능을 갖는 방폭문에는 본 연구에서 대상으로 하고 있는 방폭문 외에도 양개형(double-leaf) 및 슬라이딩 형식(sliding type)의 방폭문이 있다(Kim *et al.*, 2016a; NEMA, 2008).

방폭문의 설계 및 성능 비교분석을 위해서는 어떤 특정 폭

약량 및 폭약과의 이격거리(separation distance)로 정의되는 폭발조건에 대해 해석하고 시방서에서 정하고 있는 변형 한계를 만족하는지 검토하게 된다. 또한, 불특정의 다양한 폭발조건에 의해 구조물에 발생할 수 있는 압력(pressure)과 충격량(impulse)의 조합으로부터 압력-충격량 곡선(P-I curve)을 미리 구하고, 관심 대상이 되는 어떤 임의의 특정 폭발조건과 압력-충격량 곡선 상의 값을 비교하여 구조물의 설계에 참고하거나 안전 여부를 확인하기도 한다. 이 곡선은 구조물에 동일 수준의 손상을 발생시키는 압력과 충격량의 조합을 서로 연결하여 얻을 수 있다. 손상 수준을 나타내기 위한 지표로서는 휨파괴(flexural failure) 조건 하에 구조물의 처짐으로부터 얻을 수 있는 회전연성도

[†]Corresponding author:

Tel: +82-31-910-0287; E-mail: hsshin@kict.re.kr

Received September 27 2021; Revised October 21 2021;

Accepted October 21 2021

© 2021 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

(edge rotation) 및 변위연성도(ductility ratio), 전단파괴 조건 하에서의 전단변형률을 사용하고 있다(Abedini *et al.*, 2019).

유리 창문 및 기타 얇은 두께의 판넬과 같은 경우를 제외하고, 방폭문이나 구조물의 주요 부재 등과 같이 매우 높은 수준의 방폭 성능이 요구되는 경우에는 구조물 외부에서의 폭발로 인해 구조체에 정방향 처짐이 발생할 때를 기본적인 검토조건으로 한다. 폭압은 정압(positive pressure)이 작용하는 구간과 이후에 대기압 이하의 부압(negative pressure)이 작용하는 구간이 있는데, 위에서 처짐이 정방향이라고 하면 정압(positive pressure)이 작용하는 방향과 같은 방향이다. 정방향 처짐을 전제조건으로 하는 것은 방폭문 및 슬래브 등과 같은 구조체의 파괴가 정방향 처짐 조건에서 발생하기 때문으로 이들 구조체의 방폭성능 검토와 관련된 연구들의 많은 부분이 이와 같은 조건에서의 구조거동을 다루고 있다(Chen and Hao, 2012; Hsieh *et al.*, 2008).

방폭문의 경우 일반적인 벽체 및 바닥판 구조 등과 같은 연속 구조체와는 달리 예를 들어 힌지 및 랫치와 같은 지지물에 의해 벽체에 설치된다. 정방향 처짐이 발생할 때 초기 매우 짧은 순간에는 힌지 및 랫치에 의해 지지된다. 방폭문이 벽체와 접촉 후에는 4변 단순지지 조건이 형성된다고 가정되며, 폭압의 대부분이 이 조건에서 벽체에 전달되므로 정압조건에서는 4변 단순지지 조건이 주된 지지조건이다. 이와 반대로 부방향의 처짐이 발생할 때는 4점 지지조건(힌지, 랫치 각 2개씩 설치된 경우)이 형성된다. 이때는 정방향 처짐으로 인해 그 반대 방향으로 발생하는 탄성 반발력(rebound force), 정압 작용단계 이후의 부압이 힌지 및 랫치에 의해 지지된다.

유리 창문이나 기타 얇은 판넬 구조에 비해 강-콘크리트 방폭문의 경우 수 MPa 이상의 상대적으로 매우 높은 정압에 대해서 설계되고 있기 때문에 최대 0.1MPa 수준의 부압이 작용하는 단계에서 방폭문이 파괴될 위험은 없다고 할 수 있다(Krauthammer and Altenberg, 2000). 관련 연구들을 검토해 보면 이와 같은 이유로 정방향 처짐이 발생할 때를 기본조건으로 하여 주로 방폭문 자체의 거동을 분석하는 것이 대부분이다. 그러나 위에서 검토한 바와 같이 정방향 처짐이 발생한 이후에는 4점 지지조건에서 반발력과 부압이 작용하게 되는데, 이때 힌지 및 랫치와 같은 지지부재(supporting member)에는 어떠한 영향이 미치게 되는지, 이에 대한 변수는 무엇인지에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 수준이다. 반발력과 부압이 복합적으로 작용하는 단계에서의 거동을 분석한 연구들이 있으나, 주로 유리 또는 얇은 두께의 판넬에 대한 것이다(Dharani and Wei, 2004; Krauthammer and Altenberg, 2000). 4변 단순지지 및 탄성조건으로 가정하여 방폭문의 반발작용을 연구한 사례(Yan and Guo, 2018)에서는 부방향 처짐 거동의 분석에 대

한 필요성을 제기하고 있으나, 지점조건의 변화, 폭압을 받은 방폭문의 재료 비선형 거동, 폭발조건에 따른 구조응답 특성(충격영역/동적영역/준정적영역) 등은 고려되지 않았다.

본 연구에서는 강-콘크리트 방폭문 구조 중 비교적 간단한 구조인 편개형 방폭문을 대상으로 부방향 처짐 거동에 영향을 미치는 변수에 대해 유한요소해석으로 비교·분석을 하였다. 충격영역 및 동적영역, 준정적 영역에 속하는 구조응답을 유발하는 대표적인 폭발조건을 변수로 설정하고 부방향 처짐 단계에서 나타나는 반발(rebound) 거동을 비교해 보았다. 또한, 각 영역에서 폭발압의 증감에 의한 방폭문의 손상 정도(소성 변형 정도 또는 파괴 정도의 의미로 사용됨)가 반발 거동에 어떠한 영향을 미치는지 검토해 보았다. 해석에 사용된 프로그램은 LS-DYNA(LSTC, 2017)이며, 유한요소모델은 설계변수 해석 및 파괴거동 분석을 위해 작성되었던 해석모델(Shin *et al.*, 2019; 2020)을 이용하였다. 이것은 편개형 방폭문의 형태를 비교적 구체적으로 모사한 모델로서 폭발해석에 적합한 재료모델이 사용되었으며, 타 연구(Kim *et al.*, 2016b)의 방폭실험 결과와 비교하여 업데이트된 해석모델이다.

2. 방폭문의 반발거동에 대한 관련 연구 검토

4변 단순지지 및 탄성조건 하에 폭압을 받은 방폭문의 반발 작용(rebound effects)을 연구한 Yan과 Guo(2018)는 하중조건 및 구조 특성에 따라 구조체의 동적거동에 유의미한 차이가 나타나도록 해석적으로 검토하였다. 이를 근거로 경계조건에 따라서는 본 구조체의 파괴 전에 힌지 및 랫치 등과 같은 지지부재가 먼저 파괴될 가능성이 있다고 예측하였다. 방폭문은 아니나 유리 판넬의 거동에 대해 연구를 한 Krauthammer과 Altenberg(2000)에 의하면 부압과 반발작용의 조합으로도 판넬이 파괴될 수 있음을 해석적으로 밝힌 바 있다. 강-콘크리트 방폭문의 경우 문자체가 파괴에 도달할 가능성은 없으나, 부압과 반발작용의 조합이 힌지와 랫치와 같은 지지부재에 증폭된 하중효과를 가할 것으로 예상해 볼 수 있다. 프리캐스트 및 프리스트레스트 콘크리트 구조에 대해 방폭 기준을 정리한 Naito와 Oswald(2014)에 의하면 반발 거동에서 발생하는 반력은 정방향 처짐 단계에서 발생하는 반력의 20% ~ 150%의 범위에 있으며, 설계에서는 100%를 상한값으로 하고 있다. 그러나 방폭 설계기준 중의 하나로서 미국방부에서 제시한 UFC 3-340-02(U.S. DoD, 2008)에 의하면, 얇은 두께의 강판과 같은 연성부재와 달리 콘크리트 부재에서의 반발력은 균열과 관련된 댐핑(damping) 작용으로 현저히 감소한다고 되어 있다. 국내의 경우 관련 설계기준(MND, 2009)에 따르면, 반발력(rebounding force)은 입사압(incident blast pressure)의 50~100%, 또는 반사압(reflected

blast pressure)의 10~50%의 범위 내에서 적정값을 설정하여 방폭문의 설계에 반영하기도 한다고 되어 있으나, 기타 구체적인 내용이 제시되어 있지는 않다. 여기서, 입사압이란 구조물과 같은 장애물의 영향이 없을 때의 공기압력이고, 반사압은 구조물에 실제로 작용하는 압력이다. ASCE(2010)에 의하면, 반발력은 해석에 의해 그 값을 구체적으로 결정할 수 있다고 되어 있다. 이를 고려하면 관련 연구자나 기준에서 제시하고 있는 내용을 참조할 수 있으나, 정확한 분석 및 설계를 위해 그 값을 알고자 할 때는 직접 해석을 하는 것이 필요하며, 콘크리트 구조와 같이 폭압에 의해 균열이나 파괴가 예상될 때는 더욱 그러할 것으로 사료된다.

위에서와 같은 연구들을 검토한 결과에 따르면, 반발 작용 및 부압의 조합이 방폭문의 부방향 처짐 거동에 영향을 미칠 수 있다는 것을 알 수 있었다. 그러나 설계 등에 참조할 수 있는 구체적인 내용을 제시하지는 않고 있기 때문에 유한요소해석 및 기타 방법으로 분석이 필요하다고 판단된다. 본 연구에서는 편개형 방폭문을 대상으로 대표적인 폭발조건을 변수로 선정하여, 향후의 일반적인 설계기준 제시에 참고가 될 수 있는 기본적인 거동을 비교·분석하였다.

3. 해석 조건

3.1 방폭문 제원

본 연구에서의 편개형 방폭문은 외피구조로서의 강박스와 그 내부의 철근콘크리트 슬래브로 구성되며, 좌우 측단에는 힌지(hinge)와 렛치(latch)가 설치된다. 방폭문의 폭 및 높이 제원은 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같으며 두께는 220mm이다. 여기서, 힌지는 일반적인 여닫이 형식 문의 경첩과 같은 역할을 하며, 렛치는 걸쇠와 같은 역할을 한다.

사용된 재료강도로서 콘크리트 50MPa, 강박스 275MPa, 철

근 500MPa이고, 힌지와 렛치는 기본적으로 강박스의 항복강도와 같으나, 구성물로서 들어가는 핀 부재는 340MPa이다. Fig. 1(a)는 설치 사례를 나타낸 것으로서 좌측의 문이 편개형 방폭문이다.

3.2 해석변수 설정

폭압을 받는 구조체의 응답은 폭압의 작용시간(t_d)과 구조체의 고유주기(T_n) 관계, 또는 폭압의 작용시간(t_d)과 최대 응답이 나타나는 시간(t_m) 간의 관계에 따라 특성이 구분될 수 있다. 정확한 구분을 위해서는 해석이 필요하다. 폭압 작용시간이 매우 짧은 경우에는 최대응답이 폭압 작용시간 이후에 나타나게 되는 충격(impulsive) 영역에 속하는 특성을 보이게 되며, 폭압 작용시간 중에 최대응답이 나타나면 준정적(quasi-static) 영역에 속한다. 동적(dynamic) 영역의 경우 그 중간 수준으로 폭압-시간 이력에 따라 최대응답이 나타나는 시간이 결정된다(Abedini *et al.*, 2019; U.S. DoD, 2008).

구조체가 결과적으로는 동일한 최대 응답을 나타내더라도 응답특성이 어떤 영역에 속하는가에 따라 하중으로서 구조체에 가해진 폭압의 크기 및 충격량(폭압과 시간의 곱) 등은 다르다. 또한, 이때 구조체의 반발작용이 발생하기 전후 속도가 같지 않을 것이므로 반발력(rebound force)에 차이가 있을 것으로 예상할 수 있다. Table 1과 같이 이격거리(R) 및 폭약량(W)의 조합에 따라 방폭문의 응답이 충격/동적/준정적 영역에 속하도록 대표적으로 3가지 종류의 변수를 설정하였다. 또한, 구조체의 변형이나 파괴 정도에 따라서는 반발력의 크기는 변화하는 것으로 알려져 있으며(Jankowski, 2007), 이를 고려하여 각 이격거리별 폭약량의 증감을 고려하였다. 폭약량의 증감에 따라 손상정도가 변화하며, 여기서의 손상정도는 슬래브 단면에서의 평균 전단변형률을 지표로 하는 전단파괴 정도를 의미한다. 1%의 경우 가벼운 손상, 2%의 경우 중간정도, 3%의 경우 심각

(a) Installation example
(Kim *et al.*, 2016a)

(b) Schematic diagram
(Shin *et al.*, 2019; 2020)

Fig. 1 Single-leaf blast door

Table 1 Analysis variables

Case	R (m)	W (kg)	t_d/T_n	t_m/t_d	Response Domain	Shear Strain (%)
Imp1	2	10.6	0.52	3.67	Impulsive	1
Imp2		14.0	0.50	3.91		2
Imp3		18.0	0.47	4.73		3
Dyn1	6	93.2	1.94	1.02	Dynamic	1
Dyn2		118.0	2.59	0.82		2
Dyn3		145.0	2.72	0.78		3
QSt1	30	4,000.0	10.79	0.24	Quasi-Static	1
QSt2		4,700.0	11.66	0.29		2
QSt3		5,120.0	12.09	0.34		3

한 손상을 의미하며, 이와 같은 손상정도에 대한 기준은 Conrath 등(1999) 및 Huang 등(2010)의 연구를 참고하였다. 여기서, 이격 거리 및 폭약량 값의 조합, 이때의 각 변수에 대한 손상정도(전단변형률) 등은 기존 연구를 참고하였다(Shin *et al.*, 2020).

Fig. 2는 예를 들어 Imp1/Dyn1/QSt1에 대해 방폭문에 작용하는 폭압의 시간이력을 비교하여 놓은 것이다. 가시화를 위해 정압 단계(positive pressure phase) 및 부압 단계(negative pressure phase)를 별도로 나타내었다. Imp1의 경우 정압 단계에서 최대 약 23.7MPa의 폭압이 작용하고, Dyn1 및 QSt1의 경우에는 최대 약 5.5MPa 및 1.3MPa의 폭압이 작용한다. 부압 단계에서는 Imp1/Dyn1/QSt1 순서대로 최대 약 89.5kPa, 70.6kPa, 44.9kPa의 압력(절대값)이 작용한다. 정압 단계 및 부압 단계에서 폭압의 작용시간 t_d 및 t_d^- 을 비교해 보면 QSt1의 경우가 가장 긴 것으로 나타났다. 각 변수에 대한 이와 같은 하중조건은 해석 프

로그래에 input 값으로 주어지며, 압력 및 작용시간 등의 주요 값들에 대해서는 UFC 3-340-02(U.S. DoD, 2008)에서 제공하는 그래프를 이용해도 유사한 결과를 얻을 수 있다.

3.3 해석 모델

벽체에 힌지 및 랫치로 고정된 편개형 방폭문 구조에 대해 작성된 해석모델은 Fig. 3과 같다. 이 해석모델은 설계변수 해석 및 파괴거동 분석을 위해 작성되었던 해석모델(Shin *et al.*, 2019; 2020)로서 사용된 재료모델 및 경계조건 등에 대한 내용은 중복되므로 간략히 아래와 같이 요약될 수 있다.

내부의 슬래브를 둘러싸고 있는 강박스를 shell 요소, 그밖의 슬래브, 힌지/랫치, 벽체는 solid 요소가 사용되었다. 슬래브 내부의 선형요소로 된 철근은 해당 위치에서 rigid link로 슬래브와 연결하였다. 여기서, 강박스와 그 내부의 슬래브, 강박스와 벽체 간에는 contact 조건이 적용되었다. 경계조건으로서 방폭문 테두리와 접하고 있는 벽체는 고정조건으로 하였다. 벽체 일부만 모델링한 것은 방폭문에 비해 폭압에 대한 저항이 매우 큰 구조물 전체에 대한 단순화 방법으로 기존 연구(Chen and Hao, 2012; Hsieh *et al.*, 2008)를 참고하였다. 힌지/랫치는 실제 설치조건에 따라 경계조건을 설정하였다.

콘크리트에 대한 재료모델로는 Karagozian and Case 모델(K & C model)(Crawford *et al.*, 2012)을 참고로 하여 LS-DYNA에 포함되어 있는 CONCRETE_DAMAGE_REL3 모델이 사용되었고, 강재의 경우 PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 모델이 사용되었다(LSTC, 2017). 콘크리트 및 강재에 대한 감쇠비(damping ratio)는 관련 연구(Amiri and Yahyai, 2013; Kuda *et al.*, 2015; Kristensson and Carlsson, 2012)를 참고하여 5.0% 및 2.0%로 가정되었다.

Fig. 2 Pressure time history(Imp1/Dyn1/QSt1)

Fig. 3 FE model

위와 같이 작성된 모델로 폭약량 125kg, 이격거리 6m의 폭발조건에 대해 해석했을 때 폭발실험(Kim *et al.*, 2016b)에서 얻은 방폭문의 최대처짐 결과와 약 12% 정도의 크지 않은 차이가 나타났다. 또한, 해석에서 얻은 내부에너지(internal energy)에 대한 모래시계 에너지(hourglass energy)의 비도 10% 이하로 나타나서 위에서와 같은 해석모델은 변수 비교분석 연구(parameter study)의 목적에 적합(Draganic and Varevac, 2018; Zhang *et al.*, 2012)하다고 판단되었다.

4. 해석 결과

4.1 반력-처짐 거동

각 변수에 대해 해석에서 얻은 반력(reaction force)-처짐(방폭문의 처짐) 관계를 Fig. 4~Fig. 6과 같이 그래프로 나타내었다. 여기서, (+) 반력(이하, $V^{(+)}$)은 폭압 방향으로의 정방향 처짐(그래프에서 (+)부호 표시의 처짐)이 발생하는 단계에서 힌지 및 랫치를 비롯한 벽체에 발생한 반력이다. 이중 힌지 및 랫치에 발생한 (+) 반력은 이하 $V_{hl}^{(+)}$ 로 표기한다. 반대로 (-) 반력은 방폭문의 반발(rebound) 또는 부압의 작용으로 부방향의 처짐이 발생할 때 힌지 및 랫치에 발생한 반력이다. (-) 반력은 방폭문이 벽체로부터 떨어지는 단계에서 발생하기 때문에 벽체 반

Fig. 4 Reaction-deflection history(Imp 1/2/3)

Fig. 5 Reaction-deflection history(Imp1/Dyn1/QSt1)

Fig. 6 Reaction-deflection history(Imp3/Dyn3/QSt3)

력은 포함되지 않는다. 이하에서 이 (-) 반력은 $V_{hl}^{(-)}$ 로 표기한다 (hl: hinge & latch), 또한, 이하에서 언급되는 ‘반발력(rebound force)’은 방폭문이 벽체에 접촉한 후 반발하는 것을 힌지 및 랫치와 같은 지지부재(supporting member)가 저항하면서 생기는 반력으로 $V_{hl}^{(-)}$ 로 표기할 수 있겠으나, 본 연구에서는 (-)값 중에서 첫 사이클의 피크값을 반발력으로 정의하며 이하에서는 $\max. |V_r|$ (r: rebound)로 표기한다.

- ① $V^{(+)}$: 정방향 처짐이 발생하는 단계에서 벽체 및 지지부재에 발생하는 (+)반력
- ② $V_{hl}^{(+)}$: (+)반력 중 지지부재에 발생하는 반력
- ③ $V_{hl}^{(-)}$: 지지부재에 발생하는 (-) 반력
- ④ V_r : 지지부재에 발생하는 (-) 반력 중 첫 사이클에 속하는 (-) 반력
- ⑤ $\max. |V_r|$: $|V_r|$ 중에서 최대값. ‘반발력’으로 정의

Fig. 4는 충격영역에 속하는 이격거리 2m에 대한 변수(Imp1~Imp3)에 대한 결과로서 Fig. 4(a)에서의 (+) 반력은 전체반력에 대한 것이고(+값: $V^{(+)}$, -값: $V_{hl}^{(-)}$), Fig. 4(b)의 경우에서 (+) 반력은 전체 중 힌지와 랫치에 발생한 반력에 대한 것이다(+값: $V_{hl}^{(+)}$, -값: $V_{hl}^{(-)}$). Fig. 4(a)에 따르면, 폭압의 증가에 따라 $V^{(+)}$ 의 최대 크기가 증가하고 있다. 방폭문 중앙부에 10mm의 처짐(정방향 처짐으로 그래프에서 (+)부호)이 발생한 이후

에 반력이 급하게 증가하는 것으로 나타나는데, 이는 폭압을 받은 방폭문이 벽체에 충돌하여 접촉한 결과이다. Fig. 4(a)에서는 (+) 및 (-) 반력의 상대적 크기 차이로 분명히 드러나지 않으나, Fig. 4(b)를 보면 반발력(max. $|V_r|$)은 폭압이 증가하여 방폭문 슬래브에 손상수준이 증가함(전단변형률 1% ~ 3%, Table 1 참조)에 따라 감소하는 추세를 나타내어 Imp3의 경우에서 가장 작게 나타났다. 이것은 방폭문 슬래브의 손상 정도에 따른 결과로서 이에 대한 좀 더 구체적인 검토는 4.2절에서 하였다. 전체적인 그래프 형상을 보면, 부방향 처짐이 발생하는 단계에서의 처짐 강성이 정방향 처짐이 발생하는 단계의 처짐 강성보다 작다는 것을 알 수 있다. 이는 지점조건이 ‘정방향 처짐 단계에서 4번 지지’, ‘부방향 처짐 단계에서 4점 지지’로 서로 다르기 때문이다.

Fig. 5 및 Fig. 6은 방폭문 슬래브의 손상수준이 각각 1% 및 3%로 같을 때 변수 종류(Imp/Dyn/QSt)별로 반력-처짐 결과를 비교한 것으로서 여기서의 반력은 전체 반력 중에서 힌지 및 랫치에서 얻은 반력(+값: $V_{hl}^{(+)}$, -값: $V_{hl}^{(-)}$)이다. 2%인 경우는 Fig. 4와 같이 중간수준의 상태를 나타내고, 다른 분석의 필요성은 없어 생략하였다. Fig. 5에 따르면, 반발력(max. $|V_r|$)의 차이가 뚜렷하였다. 서로 동일한 손상수준 상태이나 반발력의 크기는 다르게 나타났다. 이 경우에서의 반발력 차이는 운동량 변화와 관계된 것으로서 4.2절에서 검토하였다. $V_{hl}^{(+)}$ 의 경우 $V_{hl}^{(-)}$ 에 비해 상대적으로 차이를 보이고 있지 않다. 정방향 처짐 단계에서 발생하는 반력은 대부분 벽체에 전달되고, 힌지 및 랫치가 지지하는 힘에는 한계가 있어 변화 폭이 크지 않기 때문이다. Fig. 6의 경우도 Fig. 5와 유사한 추세를 나타냈으나, 변수 종류 간의 반발력 차이는 다소 감소한 것으로 나타났다. 또한, 폭압은 Fig. 5의 경우에 비해 증가한 경우이나, 반발력은 증가하지 않았다. 이는 방폭문의 손상 정도에 따른 결과로서 마찬가지로 이에 대해서도 4.2절에 그 원인을 기술하였다.

4.2 반발력(Rebound Force) 검토

폭압이 방폭문에 작용하게 되면 그 직후에 짧은 순간이지만 힌지 및 랫치에 의해 지지되다가 방폭문이 벽체에 충돌하여 접촉하게 되면서 대부분은 폭압이 벽체에 전달된다. 이후 충돌에 대한 반발작용으로 반대 방향의 처짐이 나타나며, 힌지 및 랫치가 이에 저항하는 과정에서 반력으로서의 반발력(rebound force)이 발생한다. 이와 관련하여 물체 간의 충돌과 관련된 이론을 검토해 보면, 충돌 전후의 속도 비율(k , velocity restitution coefficient, 이하 반발계수)은 상수가 아닌 변수로서 높은 속도로 충돌할수록 물체의 소성변형의 증가 및 에너지 소산으로 인해 충돌 직전

속도에 대한 충돌 직후의 속도 비는 감소하게 된다(Jankowski, 2007). Targ(1963)에 의하면 에너지 감소량(ΔW)은 식 (1)과 같이 반발계수(k), 질량(m) 및 속도 변화량(Δv)으로 표현된다.

$$\Delta W = \frac{1-k}{2(1+k)} [m_1 \Delta_1^2 + m_2 \Delta_2^2] \quad (1)$$

위와 같은 이론을 근거로 방폭문 구조체의 경우를 검토해 보면, 방폭문이 벽체에 충돌하면서 운동에너지(kinetic energy, KE)가 소산된다(ΔKE_c , c=collision). 충돌 직후 부방향 처짐이 최대로 증가하는 과정에서도 역시 속도의 감소가 발생하므로, 추가적인 에너지 소산(ΔKE_r , r=rebound)이 발생한다. 마치 공을 낙하시켰을 때 바닥에 충돌 후 다시 최대로 떠오르는 과정과 유사하다고 할 수 있다. 공이 떠오르기 직전에 일정 속도(충돌할 때의 속도 보다는 작은 속도)가 있고, 최대로 떠올랐을 때는 속도가 0으로 되며, 바닥으로 떨어질 때 다시 속도가 증가한다. 속도 변화량이 클수록 튀어 오르는 힘(반발력)은 큰 것이고, 속도 변화량이 크므로 이때의 운동에너지 변화량(소산량)도 증가하게 된다. 이 운동에너지 소산량이 클수록 위치에너지가 증가하여 공은 더 높이 튀어 오르게 된다.

여기서, 물리학 관련 이론으로부터 반발력과 작용시간(t_2-t_1)의 곱(반발력의 시간 적분)인 충격량(impulse)은 질량과 속도의 곱인 운동량(momentum)의 변화($m\Delta v$)와 같으며 식 (2)로 표현된다(Alrasheed, 2019). 다시 방폭문의 경우를 들면, 부방향 처짐 단계에서의 힌지 및 랫치에 발생하는 반발력은 방폭문이 벽체에 충돌 후 반발하여 나오는 것에 대해 힌지 및 랫치가 저항하는 과정에서 발생하게 된다. 식 (2)를 참조하면 힌지 및 랫치에 발생하는 V_r (앞서 정의된 바에 따라 ‘지지부재에 발생하는(-) 반력 중 첫 사이클에 속하는(-) 반력’), 이에 의한 충격량은 반발작용 전후의 운동량 변화에 비례한다. 또한, 운동량 변화는 운동에너지 변화량 ΔKE_r 에 비례한다. 이 운동에너지 변화량(소산량)이 클수록 힌지 및 랫치에는 더 많은 변형에너지가 발생한다(더 큰 반발력 작용).

$$\int_{t_1}^{t_2} V(t) dt = mv_2 - mv_1 = m\Delta v \quad (2)$$

변수별로 해석에서 얻은 충돌(collision) 전후 및 반발작용(rebound) 전후의 속도 변화, 운동량 변화, 운동에너지 변화를 Table 2에 나타내었다. 여기서, 속도 변화를 얻기 위해 중앙부(door center, ‘d.c.’) 18개 포인트 및 문 전체(whole door, ‘w.d.’) 68개 포인트에서 얻은 속도의 평균값을 이용하였다(속도 평균값 v_1, v_2, v_3, v_4). 그러나 반발작용 전후의 운동량 변화($|m\Delta v_r|$)와 운동에너지 변화(ΔKE_r)는 비례한다는 조건에서 검토해 보면,

Table 2 Analysis results about rebound behavior

Case	collision and rebound velocity(m/s)												momentum (×10 ³ kgm/s)		average rebound force (×10 ³ kN)		kinetic energy (kJNm)	
	collision				rebound				Δv _c * ⁴		Δv _r * ⁵		m Δv _r * ⁶		ave. (Vr)		ΔKEc	ΔKEr
	prior (v1)		post (v2)		prior (v3)		post (v4)											
	d.c.* ¹	w.d.* ²	d.c.	w.d.	d.c.	w.d.	d.c.	w.d.	d.c.	w.d.	d.c.	w.d.	d.c.	w.d.	d.c.	w.d.		
Imp1	5.41	4.66	-2.59	-2.88* ³	-2.46	-2.88	1.32	1.36	8.00	7.54	3.78	4.24	7.18	8.06	4.69	5.27	13.00	5.68
Imp2	6.42	5.53	-2.78	-2.82	-2.84	-2.70	1.51	1.19	9.20	8.35	4.35	3.89	8.27	7.39	5.17	4.62	20.30	5.56
Imp3	7.12	6.07	-2.46	-2.68	-2.43	-2.68	1.68	1.08	9.58	8.75	4.11	3.76	7.81	7.14	4.34	3.97	26.40	5.44
Dyn1	4.47	4.44	-2.60	-2.10	-2.54	-2.00	1.24	0.95	7.07	6.54	3.78	2.95	7.18	5.60	4.46	3.48	12.60	3.69
Dyn2	5.05	4.92	-2.68	-2.02	-2.30	-1.91	0.89	0.76	7.73	6.94	3.20	2.67	6.07	5.07	3.49	2.92	16.70	2.97
Dyn3	5.80	5.59	-2.50	-1.87	-1.48	-1.87	0.47	0.63	8.30	7.46	1.95	2.50	3.71	4.74	1.96	2.51	22.80	2.75
QSt1	2.64	2.67	-1.60	-1.14	-1.13	-0.92	0.29	0.38	4.24	3.81	1.42	1.29	2.70	2.46	2.33	2.12	6.16	1.17
QSt2	2.95	3.04	-1.61	-0.85	-0.83	-0.72	0.36	0.36	4.56	3.89	1.19	1.08	2.26	2.06	1.81	1.64	8.67	0.91
QSt3	3.60	3.46	-1.62	-0.76	-1.17	-0.62	0.53	0.31	5.22	4.22	1.69	0.93	3.22	1.76	2.46	1.34	11.60	0.81

1. average velocity in **door center**, 18 points
2. average velocity in **whole door**, 68 points
3. velocity in the same direction as the (-)z-direction deflection
- 4/5. velocity change by **collision** and **rebound**
6. m: mass of door(about 1900kg)

Table 3. Rebound force ratio

Case	momentum $ m \Delta v_r $ ($\times 10^3$ kgm/s)	rebound force ratio			
		$\max V_r $ / $\max. V^{(+)}$		$\max V_r $ / $\max. V_{hl}^{(+)}$	
Imp1	8.06	0.148	(1.00)	0.626	(1.00)
Imp2	7.39	0.102	(0.69)	0.453	(0.72)
Imp3	7.14	0.093	(0.63)	0.428	(0.68)
Dyn1	5.60	0.085	(1.00)	0.339	(1.00)
Dyn2	5.07	0.067	(0.79)	0.290	(0.85)
Dyn3	4.74	0.047	(0.55)	0.224	(0.66)
QSt1	2.46	0.029	(1.00)	0.124	(1.00)
QSt2	2.06	0.023	(0.79)	0.104	(0.84)
QSt3	1.76	0.019	(0.65)	0.090	(0.72)

Fig. 7 Relationship between momentum and rebound force ratio

문 전체 68개 포인트에서 얻은 속도의 평균값(v3 및 v4, w.d.)을 이용하는 것이 적합하였다. 한편, Table 3에는 해석에서 얻은 ‘반발력비’(rebound force ratio)를 반발작용 전후의 운동량 변화($m \Delta v_r$)와 함께 나타낸 것이다. 여기서, 반발력비는 전체반력 중의 최대값($\max. V^{(+)}$)에 대한 반발력($\max. |V_r|$), 또는 (+)반력 중 지지부재에 발생하는 반력의 최대값($\max. V_{hl}^{(+)}$)에 대한 반발력으로 정의한다. V_r , $V^{(+)}$, $V_{hl}^{(+)}$ 는 4.1절 서두에서 정의된 바와 같다. Fig. 7은 힌지/렛치에 발생한 반력을 기준으로 얻은 반발력비와 반발작용 전후의 운동량 변화($m \Delta v_r$) 간의 관계를 그래프로 나타낸 것이다. 전체 반력을 기준으로 하여도 그래프의 경향은 동일하다. 힌지 및 렛치에 발생하는 반력을 기준으로 한 것은 본 연구의 전반적인 검토가 결국은 힌지 및 렛치에 어떤 영향을 미치는지 알아보고자 하는 것이기 때문이다.

위와 같은 비교로부터 얻은 분석결과는 다음과 같다. 먼저, Imp/Dyn/QSt 등 각 변수 범위 내에서 반발력비를 검토해 보면, 반발작용이 발생할 때의 운동량 변화량($|m \Delta v_r|$)이 작아짐에 따라 그 값이 감소하는 것으로 나타났다(예: Imp의 경우, 0.626→0.453→0.428). Fig. 4를 참고로 같이 검토해 보면, 폭압이 증가하면서 방폭문이 벽체에 접촉할 때 발생하는 반력의 최대값(+값, $\max. V^{(+)}$ 또는 $\max. V_{hl}^{(+)}$)은 증가했지만, 이에 비해 반발력($\max. |V_r|$)은 감소함으로써 반발력비는 감소하고 있다. Table 2 및 이에 관련된 전후 설명에서 검토한 바와 같이 에너지 소산량 ΔKE_r 과 운동량 변화, 운동량 변화와 반발력이 서로 비례 관계로 보았으며, 반발력비의 감소 또한 이와 같은 관계로 설명될 수 있다. 또한, Naito와 Oswald(2014)에 의하면,

폭압을 받은 슬래브가 탄성거동을 할 경우에 가장 큰 반발력이 나타나고, 소성변형이 증가할수록 반발력은 더 감소한다고 설명하고 있다. 이와 관련하여 Table 2의 결과를 보면 충돌 전 속도는 증가하지만, 충돌 직후 속도는 감소하고 있다. 이는 4.2절 서두의 참고문헌 검토에서 알 수 있었던 바와 같이 소성변형의 증가가 원인으로 사료된다. Table 2에서 ΔKE_c 가 점차 증가하고 있는데, 이는 방폭문이 벽체에 충돌할 때 운동에너지의 감소량이 더 커진다는 것이며 방폭문의 변형 증가를 의미하기도 한다. 이와 관련하여 3.2절의 변수설정 부분에 나타난 바와 같이 슬래브 손상으로 전단변형률이 1%에서 3%로 증가하고 있어 위와 같은 반발력비의 감소를 설명할 수 있다.

한편, Imp, Dyn 및 QSt 등 변수 종류 간에 반발력비를 비교해 보면(응답특성 간의 비교로서 예를 들어 Imp1과 QSt1 간의 비교), Imp의 경우, 다시 말해 방폭문의 거동이 충격영역에 속하는 응답특성을 보이는 경우가 전반적으로 더 크게 나타났다. 반발작용이 발생할 때의 운동에너지 소산량 ΔKE_c 과 반발력비가 서로 비례관계에 있는 것은 앞서 각 변수 범위 내에서 분석된 내용과 동일하다. 또한, 반발력비의 대소도 같은 논리로 설명된다. 다만, 변수 종류 간 비교의 경우 방폭문의 소성변형 정도 내지는 탄성복원 정도를 ΔKE_c 를 기준으로 판단하고 이로부터 반발작용의 대소를 설명하는데 오류가 있을 수 있다. 이에 대한 설명은 다음과 같다.

서론부에 설명한 바 있는 압력-충격량 곡선 상의 어느 두 점(예를 들어, 각각 충격영역 및 준정적영역에 속하는 두 점)은 서로 다른 폭압과 충격량을 나타내지만, 구조체에는 동일한 응답을 발생시킨다. 이때 구조체에 발생한 운동에너지(kinetic energy, KE) 및 변형에너지(strain energy, SE)의 시간에 따른 변화 추세는 예를 들어 Fig. 8에서와 같다. 이 예는 동일한 P-I 곡선상의 점들에 해당하진 않지만 충격영역과 준정적영역에서의 특징적인 에너지 변화를 잘 나타내고 있기에 든 예이다(그래프 형상 및 에너지 비율을 참고).

이에 따르면 충격영역에 속하는 거동은 초기에 운동에너지가 급격히 증가하며, 변형에너지는 상대적으로 초기에는 크게 증가하지 않다가 서서히 증가하는 경향을 나타낸다(Tsai, 2015). 이에 비해 준정적 영역에서의 거동은 운동에너지 증가 보다는 변형에너지의 증가 속도가 더 크다. 이와 같은 점을 고려하면, 다른 응답영역 간에는 처짐이나 변형률 등 동일한 응답을 나타내거나 유사한 손상이 발생하더라도 운동에너지 변화량 ΔKE_c 은 서로 다를 수 있다. 따라서, 방폭문의 소성변형 정도 내지는 탄성복원 정도를 ΔKE_c 를 기준으로 간접적으로 판단하는 것은 어느 한 응답영역 내에서 유효하나, 서로 다른 응답영역 간의 비교에서는 적합하지 않은 것으로 사료된다.

위와 같은 점을 고려할 때 서로 유사한 변형정도를 갖는 방

Fig. 8 Energy transition history(Tsai, 2015)

폭문이 있다면, 충격영역에 속한 거동을 나타내는 방폭문에서의 반발력비가 준정적 영역의 경우에 비해 더 큰 것은 충돌할 때의 입사속도가 더 큰 만큼 충돌 직후 속도가 증가하기 때문이다. 결과적으로 충돌 직후 속도가 큰 만큼 ΔKE_c 가 더 크며, 반발력비도 비례하여 더 크게 나타난 것으로 분석될 수 있다.

4.3 지지부재 변형 검토

각 변수별로 힌지 및 랫치 등의 지지부재가 받는 반발력에 차이가 있는 것으로 나타났으며, 이와 같은 차이가 결과적으로 힌지 및 랫치의 변형 정도에는 어떤 영향을 미치는지 알아보았다. 지지부재 전체의 변형 정도를 전반적으로 비교 판단하기 위한 수단으로서 변형에너지(strain energy)를 비교하였다.

대표적인 예로서 Fig. 9(a)는 다른 응답영역에 비해 반발력이 크게 나타난 충격영역에 속한 변수 Imp 1/2/3에 대해 비교한 것이고, Fig. 9(b)는 Imp, Dyn 및 QSt 등 변수 종류 간의 비교로서 반발력이 크게 나타난 Imp1/Dyn1/QSt1에 대해 비교한 것이다.

Fig. 9(a)를 보면 두 개의 피크가 나타난다. 첫 번째는 정방향 처짐 단계에서 발생한 것인데, 1.32 ~ 1.55kNm의 범위 내로서 고려된 변수 Imp 1/2/3 간에 큰 차이는 없다. 이는 정방향 처짐 단계에서 초기 매우 짧은 순간 지지부재가 폭압을 지지하다가 이후에는 벽체가 대부분의 힘을 받기 때문이다. 두 번째는 부방향 처짐 단계에서 발생한 것으로 Imp1의 경우 1.56kNm의 변형에너지(증가량)가 부방향 처짐 단계에서 발생하여(첫번

(a) Imp 1/2/3

(b) Imp 1 / Dyn 1 / QSt1

Fig. 9 Strain energy absorbed by supporting members

째 ‘골’에서 두 번째 ‘산’ 사이의 변화량), 정방향 처짐 단계의 1.32kJ 보다 더 큰 것으로 나타났다. 변수별 구체적인 값은 Table 4에 나타난 바와 같다. 다른 변수 Imp2 및 Imp3의 경우 정방향 처짐 단계의 변형에너지가 더 크게 나타나긴 했으나, 부방향 처짐 단계의 변형에너지도 작지는 않은 수준이다.

또한, 각 경우에 대해 변형률(여기서는 effective strain) 변화를 비교해 보았다. 힌지 부재 보다는 랫치 부재에서 더 큰 변형이 발생하여 Table 4 및 Table 5에 나타난 값들은 랫치 부재에 대한 것이며, 평균값 및 최대값을 나타내었다. 여기서, 랫치 부재에 더 큰 변형이 발생하는 것은 힌지와 랫치의 구조상 강성이 강한 랫치 쪽에 더 큰 힘이 걸리기 때문으로 추정할 수 있다. 이와 같은 경향은 부방향 처짐 단계에서 뚜렷하였다. 표에서 ‘1st peak’ 및 ‘2nd peak’는 Fig. 9(a)에서 지시된 것과 같다. Imp1의 경우 정방향 처짐단계 보다 부방향 처짐단계에서, 즉 반발작용이 발생할 때 더 큰 변형률이 발생하였고, 이때 변형률 변화량의 크기는 평균값 기준으로 1.16배, 최대로는 2.40배 더 큰 것으로 나타났다. Imp2 및 Imp3의 경우는 변형에너지의 변화 추세와 같게 나타났는데 평균값 기준으로는 부방향 처짐 단계에서 감소하는 것으로 나타났고, 최대값 기준으로는 더 증가하는 것으로 나타났다.

여기서, 다시 Imp1의 경우를 검토해 보면 방폭문이 벽체에 충

Table 4 Change in strain energy and strain(Imp1/2/3)

Case	$\Delta SE^*(kJ)$		ave. $\Delta \epsilon^*(\times 10^{-3})$		max. $\Delta \epsilon^*(\times 10^{-3})$	
	1st peak	2nd peak	1st peak	2nd peak	1st peak	2nd peak
Imp1	1.32 (1.00)	1.56 (1.18)	0.94 (1.00)	1.09 (1.16)	3.23 (1.00)	7.74 (2.40)
Imp2	1.41 (1.00)	1.31 (0.93)	1.01 (1.00)	0.98 (0.97)	3.34 (1.00)	7.15 (2.14)
Imp3	1.55 (1.00)	0.96 (0.62)	1.06 (1.00)	0.65 (0.61)	3.51 (1.00)	5.48 (1.56)

*1. change in Strain Energy absorbed by supporting member

*2. average and maximum change in effective strain for latch

Table 5 Change in strain energy and strain(Imp1/Dyn1/QSt1)

Case	$\Delta SE(kJ)$		ave. $\Delta \epsilon (\times 10^{-3})$		max. $\Delta \epsilon (\times 10^{-3})$	
	1st peak	2nd peak	1st peak	2nd peak	1st peak	2nd peak
Imp1	1.32 (1.00)	1.56 (1.18)	0.94 (1.00)	1.09 (1.16)	3.23 (1.00)	7.74 (2.40)
Dyn1	1.39 (1.00)	0.54 (0.39)	1.00 (1.00)	0.33 (0.33)	3.29 (1.00)	3.01 (0.91)
QSt1	1.13 (1.00)	0.04 (0.03)	1.01 (1.00)	0.11 (0.11)	3.26 (1.00)	0.66 (0.20)

돌 접촉하면서 대부분의 힘을 벽체가 받기 때문에 이때(정방향 처짐 단계) 지지부재에 2.0×10^{-3} 수준을 넘어 일부분에 항복(yielding) 응력이 발생하더라도 폭압을 지지하는 것에는 문제가 없다고 할 수 있다. 그러나 부방향 처짐 단계에서는 오직 힌지 및 랫치에 의해 방폭문이 지지된다. 예를 들어 지지부재에 최대 7.74×10^{-3} (Imp1의 랫치에 대한 것으로서 정방향 처짐 단계에 비해 2.40배)의 변형률이 발생하게 되면 폭압(부압)이 크지 않아 방폭문 자체는 큰 문제가 없더라도 힌지 및 랫치와 같은 지지부재의 소성변형으로 방폭문 구조시스템은 물론이고 방폭문 안쪽의 구조물 내부에 위치한 인명 및 중요 저장물의 안전성에 문제가 발생할 수 있을 것으로 사료된다.

또한, Fig. 9(b) 및 Table 5에서 Imp1/Dyn1/QSt1 등과 같은 변수 종류별로 비교한 결과를 검토해 보면 정방향 처짐 단계에서는 사실상 변수 종류 간에 큰 차이가 없다고 할 수 있으나(그래프에서 첫 번째 피크값 비교), 부방향 처짐 단계에서 반발작용이 발생할 때(그래프에서 두 번째 피크값에 해당)는 매우 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 앞서 검토한 바와 같이 Imp1의 경우 반발작용이 발생할 때 상당한 변형이 발생하지만, 이에 비해 특히 준정적영역의 경우는 비교적 작은 것으로 나타났다. 그리고 동적영역의 경우는 두 영역 중간 정도 수준으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 반발력이 상대적으로 크지 않은 경우, 특히 준정적 영역의 경우에는 부방향 처짐 단계에서 지지부재의 과도한 변형으로 결국은 전체 구조시스템이 파괴에 도달할 위험성은 비교적 낮은 것으로 분석되었다. 반대 경우인

충격영역의 경우에서 지지부재의 과도 변형에 대한 위험성은 앞에서 이미 검토한 바와 같다.

4.4 부압이 미치는 영향 검토

방폭문에 작용하는 폭압은 Fig. 2에서와 같이 초기 t_0 의 시간 동안에는 정압력(positive pressure)이 작용하다가 그 이후에는 부압력(negative pressure)이 작용한다. 최대 0.1MPa의 부압력은 대기압 이하의 압력으로서 주위의 물체에 당기는 힘이 작용하게 된다. 앞서 검토한 반발작용은 부압력의 영향까지 고려하여 얻은 결과인데, 여기서는 단순 수치적 검토이긴 하지만 부압력의 영향이 없을 경우에는 어떠한 차이가 있는지 알아보았다.

Fig. 10은 각 변수 종류 별로 반발력이 크게 나타난 Imp1,

Fig. 10 Reaction of supporting member with and without negative pressure

Dyn1 및 QSt1에 대해 힌지 및 랫치에 발생한 반력을 부압이 작용하지 않는다고 가정한 경우인 (Imp1), (Dyn1) 및 (QSt1) 등과 비교한 것이다. 앞서 4.1절에서 내린 정의와 같이 이하 설명에서 언급되는 반발력이란 지지부재에 발생한 (-)반력 중 첫 번째 피크(peak) 부분이다. 그래프에서의 주요 포인트에 대한 구체적인 값은 Table 6에 나타내었다(앞에서 정의된 바와 같이, $\max. |V_r|$ 은 반발력, $\max. |V_{hl}^{(-)}|$ 은 음의 값을 갖는 반력의 절대값 중 최대).

비교 결과에 따르면, Imp의 경우에서 반발력에 가장 큰 차이가 나타났다. 이는 3.2절의 폭압에 대한 정보를 고려했을 때 반발작용이 발생하는 구간(그래프에서 Reb.(Rebound))과 부압이 최대가 되는 구간(그래프에서 $\max.NP$ (max. Negative Pressure))이 서로 겹쳐서 발생한 것으로, 반발작용에 의한 영향 및 부압 모두가 방폭문의 부방향 처짐에 기여한 결과이다. 이에 비해 Dyn의 경우 부압이 최대가 되는 구간이 방폭문의 첫 번째 반발 이후 다시 가라앉는 시점과 겹치는 관계로 반발력의 차이는 비교적 크지 않았다. 그리고 QSt의 경우 반발력의 차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 반발력이 나타나는 시점이 20ms 전후 구간인데, 부압이 최대가 되는 시점은 80ms 전후로서 부압은 반발력 증가에 거의 영향을 주지 않았기 때문이다. QSt1의 경우, 부압이 최대인 80ms 시점에서의 반력(절대값)이 반발력(절대값) 보다 더 크게 나타났다(Fig. 10(c)의 $\max.NP$ 부분).

한편, 4.2절 Fig. 7에 나타난 각 변수별 반발력비 변화 추세를 부압의 영향이 없는 경우와 비교하여 Fig. 11에 나타내었다.

Table 6 Reaction force of supporting member with and without negative pressure(unit: MN)

reaction	Case					
	Imp1	(Imp1)	Dyn1	(Dyn1)	QSt1	(QSt1)
$\max. V_r $	1.32 (1.40)	0.94 (1.00)	0.76 (1.13)	0.67 (1.00)	0.24 (1.00)	0.24 (1.00)
$\max. V_{hl}^{(-)} $	1.32	0.94	0.76	0.67	0.29 (1.21)	0.24 (1.00)

Fig. 11 Relationship between momentum and rebound force ratio with and without negative pressure

Table 7 Rebound force ratio with and without negative pressure

Case 1* ¹	rebound force ratio, ① ($\max V_r / \max V_{hl}^{(+)}$)	Case 2* ²	rebound force ratio, ② ($\max V_r / \max V_{hl}^{(+)}$)	① / ②
Imp1	0.626	(Imp1)	0.449	1.39
Imp2	0.453	(Imp2)	0.355	1.28
Imp3	0.428	(Imp3)	0.337	1.27
Dyn1	0.339	(Dyn1)	0.294	1.15
Dyn2	0.290	(Dyn2)	0.271	1.07
Dyn3	0.224	(Dyn3)	0.207	1.08
QSt1	0.124	(QSt1)	0.123	1.01
QSt2	0.104	(QSt2)	0.104	1.00
QSt3	0.090	(QSt3)	0.090	1.00

*1. negative pressure considered

*2. negative pressure not considered

여기서의 반발력비는 앞서 정의한 바와 같이 힌지 및 랫치에 발생한 (+)반력의 최대값에 대한 (-)반력 값 중 첫 번째 피크 값 (반발력)의 비이다. 구체적인 반발력비 값은 Table 7에 나타난 바와 같다.

Fig. 11 및 Table 7에 나타난 결과를 전반적으로 검토해 보면, 첫째로 운동량의 변화와 반발력비 간의 관계는 부압의 영향에 관계없이 비례 관계에 있는 것으로 나타났고, 둘째로는 앞서 Fig. 10의 반력 차이에 대한 분석에서 살펴본 바와 같이 전반적으로 Imp의 경우가 가장 큰 차이를 보이고 있고, Dyn 및 QSt의 경우는 상대적으로 큰 차이를 보이고 있지 않는 것으로 나타났다. QSt의 경우 ‘반발력’ 기준의 비교가 아닌 ‘(-)반력’ 간의 비교로 본다면, 일정한 차이가 나지만 (-)반력의 크기(절대값) 자체가 다른 영역의 경우 보다 상당히 작은 관계로 큰 의미는 없을 것으로 판단된다. 서론부에서 P-I 곡선과 관련된 내용에서 검토한 바와 같이 불특정의 폭발위험에 대비하여 설계를 한다면, 이미 충격영역에서 얻은 반발력이 지지부재의 설계값을 결정할 것이기 때문이다.

본 연구의 변수 범위에서는 충격영역의 경우에서 부압의 영향이 크게 나타났으나 중첩효과는 구조체 특성이나 폭발조건에 따라 발생될 수 있는 조건이 달라질 수 있으므로(Krauthammer and Altenberg, 2000), 향후 더 많은 연구가 필요할 것으로 사료된다. 본 연구의 범위에서는 강-콘크리트 방폭문의 경우에서도 부압의 영향으로 인해 반발력이 더 크게 증가할 수 있으므로, 부압을 고려하여 해석하고 이에 따라 지지부재를 설계하는 것이 안전 측에 속한다는 결과를 얻을 수 있었다.

5. 결 론

폭압을 받는 편개형 방폭문의 부방향 처짐 단계에서 발생하는 반발 거동(rebound behavior)에 대해 유한요소해석으로 변

수 분석을 하였다. 변수로서 폭약량 및 이격거리와 같은 폭발 조건이 변화하여 방폭문의 거동 특성은 충격영역, 동적영역, 준정적영역에 속하게 된다. 또한, 각 영역 내에서도 폭약량이 변화함으로써 방폭문의 변형 및 파괴정도를 다르게 한 경우에 대해 비교하였다. 비교 분석한 결과는 다음과 같다.

각 변수 범위(응답영역) 내에서의 반발력비의 변화 추세는 폭압이 증가함에 따라 점차 감소하는 것으로 나타났다. 이에 대한 원인을 검토한 결과에 따르면, 방폭문과 벽체의 충돌 접촉이 발생할 때 방폭문의 파괴 내지는 소성변형 정도의 증가에 따라 운동에너지가 더 많이 감소하는 것으로 나타났다. 이로 인한 연쇄반응으로서 충돌 직후에 나타나는 반발작용도 감소하게 되며(반발작용이 발생하는 시점에서의 운동에너지 감소가 원인), 결과적으로는 반발력의 감소로 나타났다. 이 분석과정에서 반발작용이 발생하는 시점 전후의 운동량 변화 및 운동에너지 변화량(소산량)과 반발력비가 서로 비례관계에 있음을 확인할 수 있었다.

변수 종류별 비교(응답영역 비교)에서도 관련 물리량과 반발력비가 비례관계에 있음은 동일하였다. 그리고 서로 유사한 수준의 파괴를 나타내는 방폭문들의 경우, 초기 충돌 접촉할 때의 속도가 커서, 이에 대한 연쇄응답으로 반발작용이 발생하는 시점에서의 속도도 더 큰 ‘충격영역 하의 방폭문의 경우’가 반발력비 또한 더 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 변형에너지 보다 운동에너지가 상대적으로 더 크게 증가하는 충격영역에서의 거동특성 때문임을 확인할 수 있었다.

변수별 반발거동의 차이가 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 힌지 및 랫치 등 지지부재의 변형을 검토하였다. 이 중 방폭문이 충격영역에 속하는 거동을 보이는 경우, 부방향 처짐 단계에서는 폭압(부압)이 크지 않아 방폭문 자체에는 추가 변형이나 파괴가 적을지라도, 지지부재의 변형은 이 단계에서 더 크게 나타났다. 이에 비해 준정적영역의 경우 지지부재의 변형이 크지 않은 것으로 분석되어 방폭문 자체의 거동이 더 중요한 것으로 분석되었다. 본 연구에서 설정한 변수 내에서는 동적영역의 경우 지지부재의 변형이 충격영역의 경우 처럼 크게 나타나지는 않았다. 그러나 폭압 작용시간이 짧아져 충격영역의 거동에 근접하게 된다면 다른 결과를 얻을 수도 있다. 설계 과정에서는 예상되는 불특정의 모든 위험을 고려해야 하고, 부재 제원 등의 설계조건 또한 많은 경우의 수가 있으므로 결국 방폭문 뿐만 아니라 지지부재도 검토 항목에 포함해야 할 것으로 사료된다.

또한, 부압(negative pressure)이 반발작용에 미치는 영향을 검토한 결과에 따르면, 반발에 의한 영향 및 부압 모두가 방폭문의 부방향 처짐에 기여할 경우에서 반발력비가 상대적으로 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과로부터 강-

콘크리트 방폭문과 같이 강성이 큰 구조체에서도 부방향 처짐 단계의 거동에 반발작용과 함께 부압 또한 중요 변수가 됨을 확인해 볼 수 있었다. 본 연구의 범위에서는 충격영역의 경우가 이에 해당하는 경우로 나타났으나, 기존 타 연구결과를 참고하면 구조체 특성 및 폭발조건 등에 따라 해당되는 응답영역이나 중요 변수가 될 수 있는 조건은 달라질 수 있으므로, 이에 대해서는 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

- Abedini, M., Mutalib, A.A., Raman, S.N., Alipour, R., Akhlaghi, E. (2019) Pressure-impulse (P-I) Diagrams for Reinforced Concrete (RC) Structures: A Review, *Arch. Comput. Methods Eng.*, 26, pp.733~767.
- Alrasheed, S. (2019) *Principles of Mechanics, Advanced in Science, Technology & Innovation*, Springer, p.179.
- American Society of Civil Engineers (ASCE) (2010) *Design of Blast Resistant Buildings in Petrochemical Facilities*, 2nd Edition, ASCE Publications.
- Amiri, M.M., Yahyai, M. (2013) Estimation of Damping Ratio of TV Towers Based on Ambient Vibration Monitoring, *Struct. Des. Tall & Special Build.*, 22, pp.862~875.
- Chen, W., Hao, H. (2012) Numerical Study of a New Multi-Arch Double-Layered Blast-Resistance Door Panel, *Int. J. Impact Eng.*, 43, pp.16~28.
- Conrath, E.J., Krauthammer, T., Marchand, K.A., Mlakar, P.E. (1999) *Structural Design for Physical Security: State of Practice*, Reston, VA: American Society of Civil Engineers (ASCE).
- Crawford, J.E., Wu, Y., Choi, H.J., Magallanes, J.M., 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, U.S.
- Dharani, L.R., Wei, J. (2004) Dynamic Response of Laminated Glass under Blast Loading: Effect of Negative Phase, Structures under shock and impact VIII, pp.181~190, Crete, Greece.
- Draganic, H., Varevac, D. (2018) Analysis of Blast Wave Parameters Depending on Air Mesh Size, *Shock & Vib.*, 2018, pp.1~18.
- Hsieh, M.W., Huang, J.P., Chen, D.J. (2008) Investigation on the Blast Resistance of a Stiffened Door Structure, *J. Marine Sci. & Technol.*, 16(2), pp.149~157.
- Huang, X., Ma, G.W., Li, J.C. (2010) Damage Assessment of Reinforced Concrete Structural Elements Subjected to Blast Load, *Int. J. Prot. Struct.*, 1(1), pp.103~124.
- Jankowski, R. (2007) Theoretical and Experimental Assessment of Parameters for the Non-Linear Viscoelastic Model of Structural Pounding, *J. Theor. & Appl. Mech.*, 45(4), pp.931~942.
- Kim, N.H., Park, K.J., Lee, K.O. (2016a) A Study on Structural Stability of Blast Door by Blast Pressure, *J. Korean Soc. Safety*, 31(3), pp.8~15.
- Kim, S.B., Baik, S.H., Lee, J.H., Min, A.S., Koh, Y.C. (2016b) Three Companies Producing CBR Facilities; Explosion Test on the Six Blast-Resistant Doors, Institute of HwaRangDae.
- Krauthammer, T., Altenberg, A. (2000) Negative Phase Blast Effects on Glass Panels, *Int. J. Impact Eng.*, 24(1), pp.1~17.
- Kristensson, R., Carlsson, M. (2012) Structural Response with Regard to Explosions – Mode Superposition, Damping and Curtailment, Master Thesis, Lund University, Lund, Sweden.
- Kuda, F.N., Ucak, S., Osmancikli, G., Türker, T., Bayraktar, A. (2015) Estimation of Damping Ratios of Steel Structures by Operational Modal Analysis Method, *J. Constr. Steel Res.*, 112, pp.61~68.
- Livermore Software Technology Corporation (LSTC) (2017) LS-DYNA S/W and User's Manuals.
- Ministry of National Defense (MND) (2009) Standards for National Defense and Military Facilities, DMFC 5-30-20, p.74.
- Naito, C., Oswald, C. (2014) Blast-Resistant Design of Precast, Prestressed Concrete Components, *PCI J. Precast/Prestress. Concr. Inst.*, 59(1), pp.137~159.
- National Emergency Management Agency (NEMA) (2008) A Study on the Standards and Utilization Plan of CBR Facilities, Policy Research Report, Republic of Korea.
- Shin, H.S., Kim, S.W., Moon, J.H., Kim, W.W., Hong, W.H. (2020) Failure Behavior Analysis of Single-leaf Blast-resistant Door By Explosion Loads, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 20(4), pp.195~206.
- Shin, H.S., Kim, W.W., Park, G.J., Lee, N.K., Moon, J.H., Kim, S.W. (2019) FE Analysis on the Structural Behavior of the Single-leaf Blast-Resistant Door According to Design Parameter Variation, *J. Korea Acad.-Ind. Cooper. Soc.*, 20(11), pp.259~272.
- Targ, S.M. (1963) *Short Course of Theoretical Mechanics*, Moscow: Gos. izd. fiz-mat, lit.
- Tsai, Y.K. (2015) Energy Based Load-Impulse Diagrams for Structural Elements, Dissertation, University of Florida, U.S.A.
- U.S. Department of Defense (U.S. DoD) (2008) Unified Facilities Criteria; Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions, UFC 3-340-02.
- Yan, Q., Guo, D. (2018) Rebound Effects of Loading Conditions for Blast Door, *Mech. Adv. Mater. & Struct.*, 26(22), pp.1833~1840.
- Zhang, X., Zhao, X., Zhang, Y., Li, Z. (2012) A One-Point Quadrature Element Used in Simulation of Cold Ring Rolling Process, *Mater. Sci. Forum*, 704/705, pp.165~171.

요 지

강-콘크리트 편개형 방폭문은 외피 구조로서의 강박스 내에 콘크리트 슬래브가 채워진 구조로서 힌지 및 랫치와 같은 지지부재에 의해 벽체에 고정되어 설치된다. 폭압이 작용하는 방향과 같은 정방향으로의 처짐 거동에 대해서는 많은 연구가 되어 왔으나, 부방향 처짐 거동에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 수준이다. 본 연구에서는 폭압을 받는 편개형 방폭문의 부방향 처짐 단계에서 발생하는 반발 거동(rebound behavior)에 대해 유한요소해석으로 변수 분석을 하였다. 분석결과에 따르면 방폭문의 소성변형 내지는 파괴 정도, 반발작용 전후의 운동량 및 운동에너지 변화가 반발거동에 영향을 미치는 주요 요소로 분석되었다. 또한, 방폭문의 거동 특성이 준정적 영역에 속하는 경우에 비해 충격영역에 속하는 경우에서 더 큰 반발력이 발생하는 것으로 나타났는데, 이와 같은 결과는 변형에너지 보다 운동에너지가 상대적으로 더 크게 증가하는 충격영역에서의 거동 특성이 원인인 것으로 사료된다. 반발작용의 결과로 인해 지지부재에 과도한 변형이 발생할 수 있으므로 성능분석 및 설계 과정에서 이에 대한 고려가 필요하다. 또한, 부압이 미치는 영향을 검토한 결과에 따르면 강-콘크리트 방폭문의 경우에서도 반발에 의한 영향 및 부압 모두가 방폭문의 부방향 처짐에 기여할 때 반발력이 상대적으로 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 중첩 효과의 발생조건은 구조체 특성 및 폭발조건 등에 따라 다를 수 있으므로 이에 대해서는 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 방폭문, 반발력, 부압, 유한요소해석