

## 하중분배법을 사용한 격자형 방폭문의 최적화 설계

심관보<sup>1\*</sup> · 김병진<sup>2</sup> · 구현주<sup>3</sup>

<sup>1</sup>조교수, 한국산업기술대학교, 스마트기계공학과, <sup>2</sup>기술이사, (주)동광기업,  
<sup>3</sup>겸임교수, 경기과학기술대, 기계설계공학과

### Optimized Design of Grid Type Explosion-Proof Door Using Load Distribution Method

Shim, Kwan Bo<sup>1\*</sup>, Kim, Byeong Jin<sup>2</sup>, Koo, Hyunjoo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor, Dept. of Smart Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung, 15073, Korea

<sup>2</sup>Technical Director, Dongkwang Enterprise Co., Ltd., Hwaseong, 18533, Korea

<sup>3</sup>Professor, Dept. of 3D Convergence Design, Gyeonggi University of Science and Technology, Siheung, 15073, Korea

**Abstract** - Explosion-proof doors subjected to an explosion load must satisfy the conditions of rotational ductility and displacement ductility, and there must be no local damage. In order to prevent local damage of the grid-type explosion-proof door, the spacing of the grid and the thickness of the front plate of the explosion-proof door are designed. The design method using structural analysis through numerical analysis is inconvenient to apply to the field due to technical difficulty and time consuming. The graph method using the load distribution method can be practically applied easily to industrial sites. This will help improve reliability in explosion-proof door design.

**Keywords** - Blast door, Explosion load, Explosion proof test, Explosion-proof door thickness, Performance evaluation

#### 1. 서론

방호구조물의 연구범위는 크게 방호구조물을 파손시키는 폭발하중에 대한 연구와 방호구조물의 신뢰성 검증방법에 대한 연구, 방호 구조물 설계방법 등으로 구분할 수 있다.

폭발하중에 대한 연구는 Kingery<sup>[1]</sup>가 TNT를 지표면에서 폭발시켜 환산거리(scaled distance)에 따라 폭발 최대 압력, 폭발압력이 구조물에 도달하는 시간, 충격량 등을 측정하는 것부터 시작되었다. 이후 Kingery는 Bulmash와 함께<sup>[2]</sup> 충격파 전단에서의 속도에 대하여, 반사 압력(reflected pressure), 반사 충격량(reflected impulse)을 연구하면서 본격적으로 시작되었다.

Note.-Discussion open until June 30, 2021. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on September 08, 2020; revised October 28, 2020; approved on November 11, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-31-8041-0764 Fax. +82-31-8401-1245

E-mail. kbshim@kpu.ac.kr

방호구조물에 대한 연구는 Biggs<sup>[3]</sup>가 단자유도계(SDOF, single degree of freedom)와 다자유도계(MDOF, multi degree of freedom)의 lumped mass model을 사용하여 폭발하중에 대한 구조물의 거동을 평가하면서 시작되었다고 할 수 있다.

그 후 Haskell<sup>[4]</sup>은 판재에 폭발압력이 작용할 때, 판에 작용하는 단위 면적당 작용 에너지와 균일하중을 받을 때, 판에 저장되는 에너지를 수식화하고 에너지 보존법칙을 이용하여 판의 중앙에서의 최대 변위를 식으로 표현하였다. Kiwan<sup>[5]</sup>은 판재의 각 모서리 끝이 볼트로 완전히 구속된 상태에서 폭발하중을 받을 때, 판재의 중앙에서 일어나는 최대 변위를 수식을 사용하여 계산하였다. 판재중앙에서 최대 변위에 대하여 빠른 예측을 할 수 있으나 적용범위가 한정적이고 해석결과의 정밀도를 보장할 수 없었다. Jacob<sup>[6]</sup>은 이격거리를 변경하면서 완전히 고정된 연강 플레이트의 파괴 정도를 측정하는 시험을 수행하였다. 유한요소해석을 통해 예측한 구조물 중앙 처짐을 실험과 비교하여 만족스러운 결과를 얻었다.

Ngo *et al.*<sup>[7]</sup>은 압축강도 200 MPa의 초고강도 콘크리트(ultra high strength concrete)의 방폭 성능을 평가하여 고강

도 프리스트레스트 콘크리트 패널의 폭발 하중에 대한 거동을 분석하였다. 폭발하중에 대한 유한요소해석으로 해석 기법의 유효성을 검증하였다. Zhou *et al.*<sup>[8]</sup>은 고강도 강철 섬유를 사용한 콘크리트 슬래브에 TM5-1300으로 폭발 하중을 인가하여 변위를 측정하였다. Autodyn 프로그램을 이용하여 2D 계산에서 얻어진 폭발을 3D 모델에 매핑하여 폭발 하중에 대한 콘크리트 슬래브의 거동을 규명하였고 실험 값과 비교하였다. Bao and Li<sup>[9]</sup>는 폭발하중을 받는 기둥의 세장비, 주철근비, 띠철근비에 따른 파괴정도와 잔류 강도를 평가하였다.

2000년에 들어오면서 국내에서도 방호구조물에 대한 연구가 진행되었다. Kim *et al.*<sup>[10]</sup>은 LS-DYNA를 사용하여 폭발하중을 받는 지중 파형강판 구조물에 대해 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과를 문헌자료와 비교하여 10% 내외에 오차에 있음을 보이고 해석기법의 타당성을 검증하였다. Kim and Wee<sup>[11]</sup>는 콘크리트 충전기둥 (CFT, concrete filled steel tube)의 폭발 저항 성능을 Autodyn 프로그램을 이용하여 해석하였다. CFT 두께에 따라 저항능력을 산정하였다. Choi *et al.*<sup>[12]</sup>은 축하중을 받고 있는 기둥이 폭발하중을 받을 때, 거동과 폭발 저항성을 평가하였다. 철근콘크리트 기둥의 단면비, 전단 경간비 축하중비 등의 변수에 대하여 Autodyn 프로그램을 수행하여 해석하였다. 해석결과를 근거로 폭발하중을 받은 철근콘크리트 기둥의 저항성능식을 제안하여 정량적으로 평가하는 방법을 제시하였다. Jo *et al.*<sup>[13]</sup>은 폭발하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 패널에 대하여 Autodyn 프로그램을 사용하여 부재의 거동을 해석하고 기존 연구의 실험결과와 비교하였다. 콘크리트 강도, 프리스트레스트 도입 여부, 프리스트레스트 크기를 변수로 해석을 수행하였고 폭발 하중을 받을 때의 거동을 해석으로 평가하는 해석기법을 제안하였다. Kang *et al.*<sup>[14]</sup>은 프리스트레스트 콘크리트 패널에 대하여 Autodyn 프로그램으로 해석을 수행했다. 콘크리트 강도, 프리스트레스트 적용 여부에 따른 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 패널의 거동과 파괴정도를 평가하였다. Kim<sup>[15]</sup>은 폭발하중을 받는 슬라이딩 도어에 대한 구조적 변형이나 파손에 대한 연구를 수행하였다. 슬라이딩 방폭문의 실증 실험 데이터와 ANSYS-Autodyn을 이용한 수치해석 데이터를 분석하여 구조적 안정성을 갖는 모델을 설계하였다. 폭발하중을 받는 구조물에 대한 연구는 2010년 이전에는 주로 판재에 대하여 연구되었으나 근래에 와서는 철근 콘크리트의 기둥과 같은 복합구조물에 대해서 연구되어 왔다. 그러나 방폭문에 대한 연구는 2015년부터

본격적으로 수행되었다고 할 수 있다.

이런 연구 활동을 배경으로 정부에서는 국내 방호시설 (제품) 안전인증과 외국 인증기관에 시험을 의뢰하면서 발생하는 외화유출을 방지하고 방호시험 기술 향상을 도모하기 위해 한국가스안전공사에 담당부서를 신설하였다. 부서의 주요업무는 폭발 실증시험과 방호 시뮬레이션을 구축하는 것이다. 2016년부터 매년 방폭문 실증시험을 실시하였다. Fig. 1은 2019년에 실시한 방폭물 폭발 실증시험의 현상이다. 방폭문 실증시험은 TNT 125 kg을 방폭문으로부터 5.66 m의 이격거리에서 폭발시켜 방폭문의 안정성을 평가하는 것이다. 방폭문의 안전성을 평가하는 기준은 방폭문에 국부적인 변형이 생기지 않아야 하며, 방폭문이 변형하여 발생한 회전연성도(rotational ductility ratio)와 변위연성도(displacement ductility ratio)가 규정하는 방호수준에 만족해야 한다<sup>[16]</sup>.



Fig. 1. Explosion proof test conducted in 2019

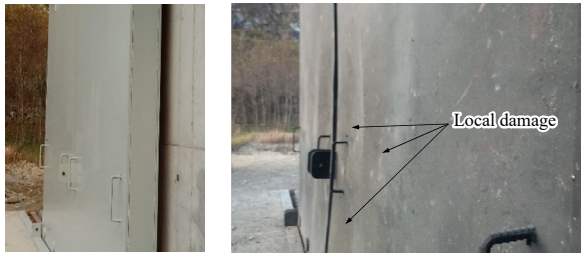
방폭문은 발주자의 요구와 현장의 여건을 고려하여 철근 콘크리트 문, 통강판(solid steel plate)문, 형강프레임에 강판을 용접한 문, 또는 조립문(built-up) 방식으로 제작할 수 있다. 조립문의 형태의 문은 주로 낮은 압력 범위와 방폭문의 지속시간이 길 때 사용한다. 전형적인 조립문 형태의 방폭문은 내·외부 강판을 지지하도록 구성된 테두리 및 내부 격자 형태의 강재 단면으로 구성한다. 폭발은 강판을 통해 프레임 구조에 전달된다. 방폭문은 폭발로 발생한 파편의 관통을 방지하기 위해 내부에 콘크리트 혹은 다른 재료를 채울 수 있다.

방폭문은 개폐 방법에 따라 한 개의 여닫이문(single swing door), 두 개의 여닫이문(double swing door), 문이 상하이동으로 열고 닫히는 스윙문(vertical swing door), 미닫이문(horizontal sliding)으로 구분된다.

화생방 시설에 설치되는 방폭문의 설계 및 제작 기준은 방폭 및 방탄시설 설계기준(DMFC 2-20-10, 2017년)과 화생방 방호시설 설계기준(DMFC 2-20-20, 2017년), 방폭 및 방탄 시설 설계 및 시공지침(DMFC 5-70-90, 2014년)을 따른다.

통철판 방폭문은 구조용 강판 또는 스테인레스 강판을 사용하고 내부는 H형강이나 I빔 또는 C형강 등을 사용하여 제작하며 힌지를 사용하여 개폐가 용이하도록 설계한다. 콘크리트 충전형 방폭문의 경우는 고강도 콘크리트(40 MPa 이상)를 기본으로 하고 있으며 콘크리트의 압축강도의 장점을 반영하여 수입 방폭문과는 달리 충전구조체를 폐쇄 형태의 구조의 형식을 많이 적용하여 설계를 하고 있다.

Fig. 2는 내부가 충전되지 않고 격자로 구성된 슬라이딩 방폭문으로 폭발 실증시험에서 폭발 압력으로 방폭문 전면 강판이 국부 파손된 모습이다.

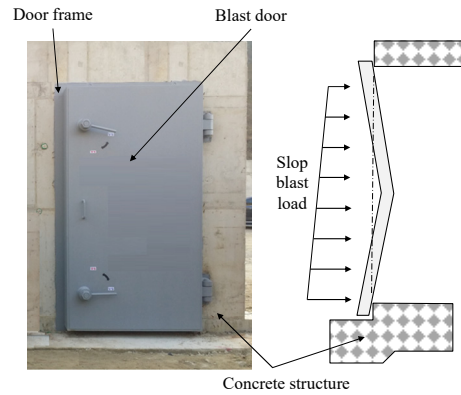


(a) Before the explosion (b) After the explosion

Fig. 2. Local damage caused by explosion pressure

본 연구에서는 Fig. 3에서와 같이 국부항복에 취약한 격자형 방폭문 중에서 한 개의 여닫이문(single swing door)에 대하여 40 bar 규격의 방호능력을 확보할 수 있는 설계방법을 제시하고자 한다. 방폭문 실증시험의 규격인 TNT 125 kg, 이격거리 5.66 m에서의 반사압력을 ANSYS Autodyn-2D 해석결과(Fig. 4)<sup>[17]</sup>를 사용하여 격자형 방폭문의 전면 Fig. 3(b)와 같이 경사하중을 적용한다.

Fig. 3의 한 개의 여닫이문(single swing door) 크기는 2,540×1,340×262(mm)이며 전면과 후면은 두께 16 mm의 강판으로 구성되었다. 그 사이에 같은 두께의 강판으로 격자 구조로 용접한 방폭문이다.(Fig. 5(a)) 격자형 방폭문의 처짐과 방폭문 전면 강판의 국부파손을 검증하기 위하여 3D 모델링하여 구조해석을 수행한다.



(a) Blast door (b) Inclined load

Fig. 3. Structure for explosion proof test

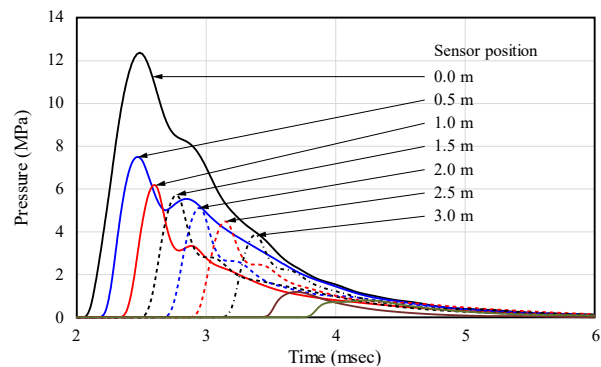


Fig. 4. Reflected pressure results after simulation (TNT 125 kg, distance = 5.66 m)

경사하중이 작용하는 격자형 방폭문에 상업용 소프트웨어인 ANSYS Static structural을 사용하여 소성변위를 산정한다.

Fig. 5(a)는 격자형 방폭문의 내부 격자의 크기를 도시한 것이다. 격자의 방폭문의 모델은 크기가 2,540×1,340×262 (mm)이며 두께는 16mm인 강판이 외부와 내부에 동일하게 구성되어 있다. Fig. 5의 3D 모델링에서 구조물의 휨에 영향을 주지 않는 방폭문의 장금장치에 대해서는 모델링하지 않고, 방폭문의 손잡이 등도 모델링하지 않았다. 격자의 간격은 높이방향으로는 346 mm로 6개의 격자를 모델링하고 폭 방향으로는 315 mm로 3개의 격자를 모델링한다.

Fig. 6(a)와 같이 약 4.4만 개의 유한요소를 만들고 방폭문의 후면 강판 테두리가 콘크리트 구조체(Fig. 3)에 압착되어 밀폐되므로 방폭문 뒤쪽 강판 테두리가 콘크리트 구조체 방향으로 변위가 발생되지 않도록 경계조건을 설정하였고, 문의 힌지 쪽 모서리는 힌지의 영향을 반영하여 회전 없이 설정한다. Table 1은 방폭문을 구성하는 구조용 강재(SS275)의 물성이다.

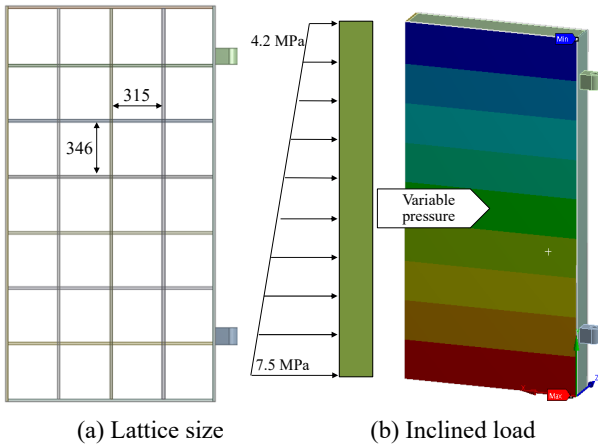


Fig. 5. Finite element analysis of blast door

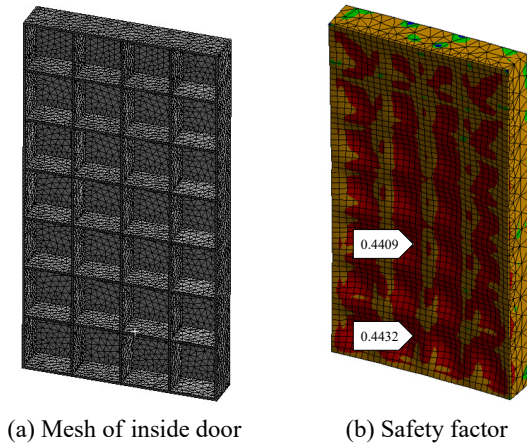


Fig. 6. Front plate failure of lattice blast door

Table 1. Material properties of the components of the blast door

Material	Elastic modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	Poisson's ratio
SS275	210,000	275	0.3

구조해석결과 Fig. 6(b)는 격자형 방폭문에 소성이 발생된 모습을 안전율로 도시한 것이다. 안전율은 방폭문의 항복강도(275 MPa) 대비 발생 응력값으로 1보다 작은 부분은 소성변형이 발생된 것으로 해석한다.

이렇게 소성이 발생할 것이라고 예측하는 것은 Fig. 2(b)에서와 같이 폭발실험에서 나타나는 현상으로 이해할 수 있다. 따라서 격자 크기 315 mm × 346 mm에서는 방폭문 전면강판의 하부에 소성변형이 크게 발생된다. 이런 소성변형을 방지하기 위해서는 격자의 간격을 조정하거나 전면 강판의 두께를 크게 해야 한다.

격자의 간격을 조절하며 Fig. 5와 같이 3D 모델링하여 유한요소해석을 수행하면 3D 실험 모형을 모델링하는데 15 Man-day가 소요되며 프리프로세스와 해석 시간으로 15 Man-day가 소요된다. 따라서 격자의 설계를 치수를 변경하고 해석으로 검증할 때마다 30 Man-day가 소요되어 효율적이라고 할 수 없다.

격자의 간격을 조절하며 3D 모델링하는 구조해석 방법 대신 수학적 모델을 만들고 전면 강판이 소성되지 않는 강판의 두께와 격자의 넓이의 상관관계를 제시하는 것이 방폭문 설계 현장에서 설계자가 사용하기 편리하다.

본 연구에서는 방폭문 기초설계 단계에서 방폭문의 3D 모델링을 이용한 구조해석 대신 간편하게 사용할 수 있는 이론적 방법을 제시하고 이 결과를 그래프로 작성하여 설계 시 쉽게 사용할 수 있도록 하는 것에 목적이 있다.

## 2. 하중분배법의 도입

Timoshenko and Woinowsky-Krieger<sup>[18]</sup>는 단순 지지되어 있는 사각형판에 분포하중( $W$ )이 인가될 때 식 (1)을 제시하였다.

$$\delta = \frac{W}{24D} (x^4 - 2S^3 + S^2x) + \frac{WS^4}{D} \sum_{m=1}^{\infty} \left( A_m \cosh \frac{m\pi y}{S} + B_m \sinh \frac{m\pi y}{S} \right) \sin \frac{m\pi y}{S} \quad (1)$$

$$A_m = -\frac{2(\alpha_m \tanh \alpha_m + 2)}{\pi^5 m^5 \cosh \alpha_m},$$

$$B_m = -\frac{2}{\pi^5 m^5 \cosh \alpha_m}, \alpha_m = \frac{m\pi H}{2S}$$

여기서  $W$ 는 전면 강판에 작용하는 압력,  $S$ 는 방폭문의 폭,  $L$ 은 방폭문의 높이,  $D$ 는  $\frac{E_{cm}h^3}{12(1-\nu^2)}$ 이며  $\nu$ 는 푸아송비,  $h$ 는 부재의 두께,  $E_{cm}$ 은 등가탄성계수이다.

이 식은 동일한 재질로 구성된 두께가 균일한 판에 적용된다. 따라서 방폭문을 적용하기 위해서는 복합구조물의 등가탄성계수를 고려해야 하는 문제점이 있다.

Goltermann<sup>[19]</sup>은 4면이 콘크리트 구조체에 밀착되어 등분포하중을 받는 직사각형 슬래브에 대하여 최대처짐량을 식 (2)로 제시하였다. 이 식은 슬래브를 구성하고 있는 재료들의 공통된 등가 탄성계수를 구하여 적용하여야 한다. 슬래브 이론(plate theory)으로 계산한 최대변위는 다음과 같다.

$$\delta_{\max} = \alpha W \frac{S^4}{D} \quad (2)$$

여기서  $\alpha = 0.163069 \left(\frac{S}{L}\right)^2 - 0.33840 \left(\frac{S}{L}\right) + 0.186631$

Shim and Lee<sup>[20]-[22]</sup>는 슬래브에 적용하는 하중분배법을 이용하여 식 (3)과 같이 제시하였다.

$$\delta = \frac{W_S x}{24E_c I_S} (S^3 - 2Sx^2 + x^3) \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{W_S}{2I_S} x(S-x)y, W_S = \frac{I_S L^4}{I_S L^4 + I_L S^4} W \quad (4)$$

위 식에서  $I_S$ 는 방폭문의 짧은 변 방향 휨에 대한 콘크리트 환산 단면2차모멘트 합,  $I_L$ 는 긴 변 방향 휨에 대한 콘크리트 환산 단면2차모멘트 합이다.

Shim and Lee의 하중분배법은 식 (1), 식 (2)와 같이 복잡한 등가탄성계수를 구하지 않고, 부자재에 대한 환산단면적법을 사용하여 산술계산을 하여 폭발압력을 받는 방폭문의 처짐과 응력을 산정한다.

### 3. 하중분배법을 이용한 격자간격의 최적화

격자형 방폭문 전면강판의 국부 소성을 계산하기 위하여 Fig. 7과 같이 모델링한다. 격자형 방폭문에서 전면 강판의 격자부분은 4면이 완전 고정된 2방향 슬래브와 같다. 따라서 2방향 슬래브에 하중분배법을 적용한다.

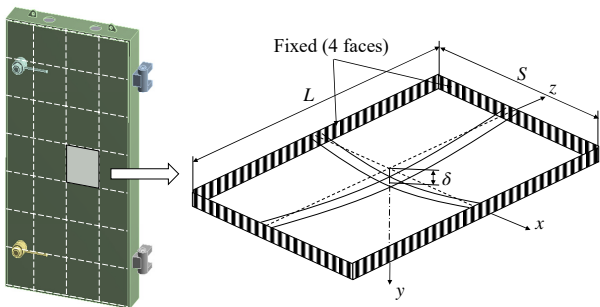


Fig. 7. Load distribution modeling of front steel plate

Fig. 7과 같은 2방향 슬래브는 4면이 고정되어 있는 두께가 균일한 직육면체로 하중이 슬래브에 작용할 때 변형은 접시모양으로 휘게 되고 어느 지점에서나 휨모멘트가 생기며 휨모멘트는 곡률에 비례하게 된다. 슬래브가 y 방향으로 등분포 압력(W)을 받을 때 각 변에 평행하고 서로 직교하는

두 슬래브 대(strip)에는 W에서 분담되는 등분포하중( $W_S$ ,  $W_L$ )을 받는 양단고정보처럼 작용한다.

2방향 슬래브(Fig. 7)의 두 슬래브대의 교차하는 위치에서 처짐은 같아야 하므로 다음과 같은 식이 된다.

$$\delta = \frac{1}{384} \frac{W_S S^4}{EI_S} = \frac{1}{384} \frac{W_L L^4}{EI_L} \quad (5)$$

여기서  $W_S$ 는 짧은 쪽 대의 휨에 기여하는 압력이고,  $W_L$ 는 긴 쪽 대의 휨에 기여하는 압력이며  $I_S$ 는 짧은 변에 해당하는 단면2차모멘트이고  $I_L$ 는 긴 변에 해당하는 단면2차모멘트이다.

그러므로

$$\frac{W_S}{W_L} = \frac{L^4 I_S}{S^4 I_L} \quad (6)$$

그리고

$$W_S + W_L = W \quad (7)$$

식 (5)를 식 (7)에 대입하고 단면2차모멘트  $I_S = \frac{L^3 t^3}{12}$ ,  $I_L = \frac{S t^3}{12}$  를 대입하면 방폭문에 작용하는 방향별 분배압력은 다음과 같이 분배된다.

$$W_S = \frac{I_S L^4}{I_S L^4 + I_L S^4} W = \frac{L^5}{L^5 + S^5} W \quad (8)$$

$$W_L = \frac{I_L S^4}{I_S L^4 + I_L S^4} W = \frac{S^5}{L^5 + S^5} W \quad (9)$$

단변 방향으로 휨을 발생시키는 모멘트 분포는 Fig. 8과 같다. a)지점이 b)지점보다 2배 정도 모멘트가 크므로 전면 강판의 소성은 a)지점에서 가장 먼저 발생한다.

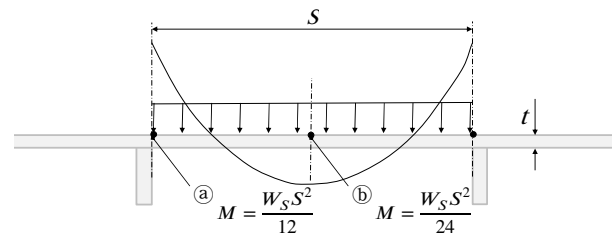


Fig. 8. Moment distribution of short side beam

a)지점에서 발생하는 모멘트는 다음과 같이 산정된다.

$$M_{\max} = \frac{W_S S^2}{12} \quad (10)$$

이 때 최대응력은 다음과 같이 산정한다.

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{Z} \quad (11)$$

$$Z = \frac{I}{t/2} = \frac{Lt^2}{6} \quad (12)$$

식 (11)을 상세히 전개하면

$$\sigma_{\max} = \frac{6}{Lt^2} \times \frac{W_S L S^2}{12} = \frac{W_S S^2}{2t^2} \quad (13)$$

전면강판이 소성이 발생하지 않는 최소의 강판두께를 구하기 위하여 항복의 응력을 적용하면 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\sigma_y = \frac{W S^2}{2t^2} \left( \frac{I_S L^4}{I_S L^4 + I_L S^4} \right) = \frac{W S^2}{2t^2} \left( \frac{L^5}{L^5 + S^5} \right) \quad (14)$$

식 (14) 응력을 두께(t)로 전환하면 식 (15)와 같다.

$$t > S \sqrt{\frac{W}{2\sigma_y} \left( \frac{L^5}{L^5 + S^5} \right)} \quad (15)$$

식 (15)는 2방향슬래브에서 전개된 식이므로 2방향 슬래브의 조건  $0.5 < S/L < 1$ 을 만족해야 적용할 수 있다.

$S/L < 0.5$ 인 경우에는 1방향 슬래브로 해석하므로 항복을 하지 않을 강판의 두께는 식 (16)과 같이 전개된다.

$$t > S \sqrt{\frac{W}{2\sigma_y}} \quad (16)$$

Fig. 9는 4 MPa의 압력을 받는 격자형 방폭문의 단변과 장변 길이에 대하여 소성이 발생하지 않는 최소 두께를 도시한 것이다.

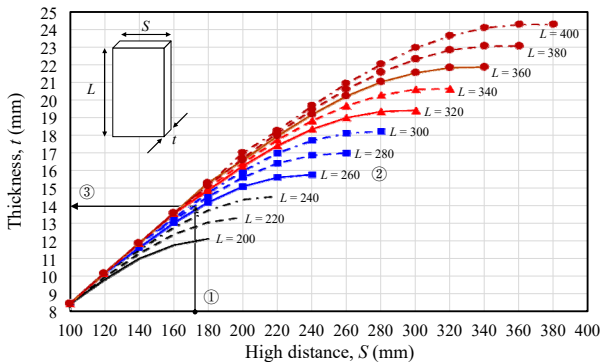


Fig. 9. Calculation of minimum thickness without local yield ( $W = 4 \text{ MPa}$ )

#### 4. 구조해석에 의한 최적화 설계 검증

격자형 방폭문이 4 MPa의 압력을 받을 때 격자의 장변 길이가 260 mm이고 단변 길이가 170 mm인 경우 소성이 발생하는 방폭문 전면판의 최대 두께는 14 mm인 것을 Fig. 9에서 도시할 수 있다. 이를 검증하기 위하여 260 mm × 170 mm × 14 mm의 강판에 분포하중 4 MPa을 작용하여 범용 소프트웨어인 ANSYS Static structural을 사용하여 구조해석을 수행한다. 검증을 위한 해석은 정적구조해석으로 탄성범위에서 해석을 하며 해석결과와 응력이 항복응력을 초과하며 소성이 발생된다고 판단한다.

격자의 구조해석 모델링은 Fig. 7에서와 같이 하나의 격자를 모델링한다. 격자는 전면 강판에 비하여 폭발압력에 대한 휨 현상이 일어나지 않을 것으로 가정하고 격자 하나를 Fig. 10와 같이 모델링하고 격자의 측면 4모서리에는 변위가 발생하지 않는다는 조건으로 고정조건(fixed support)을 부여하고 한다. 방폭문이 폭발 압력을 받을 때는 방폭문의 높이에 따라서 경사 압력분포압력을 받는데 하나의 격자에서는 높이에 따른 압력차이가 작다고 가정하고 정적 등분포하중 4 MPa을 적용한다.

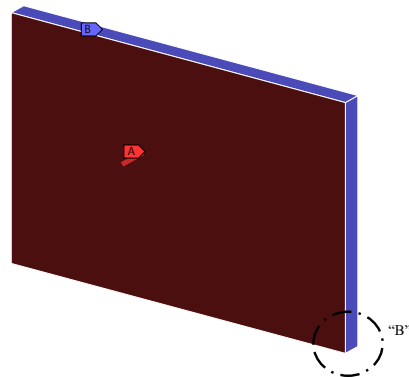


Fig. 10. Boundary conditions of a grid model

메쉬는 요소길이를 1 mm로 설정하여 61만 개의 요소를 생성한다. Fig. 11은 격자 모델에서 하단부에 생성된 메쉬를 도시한 것이다.

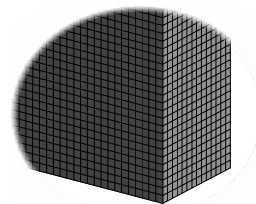


Fig. 11. Mesh shape of part B

단위격자의 해석결과는 Fig. 12(a)에서 단변 방향의 휨에 의한 응력이 장변 방향의 응력에 비하여 크게 발생된다.

Fig. 12(a)의 ㉠점에서 응력이 가장 크게 발생하며 응력값이 275 MPa이다. 이 값은 강판의 항복응력과 일치하는 것으로 ㉠에 소성이 발생한다고 판단할 수 있다.

Fig. 12(b)는 격자의 중앙에서 방폭문 강판의 내부에 발생하는 응력을 도시한 것이다. 휨이 가장 큰 중앙부분에서 80 MPa 정도의 압축응력과 인장응력이 발생한다.

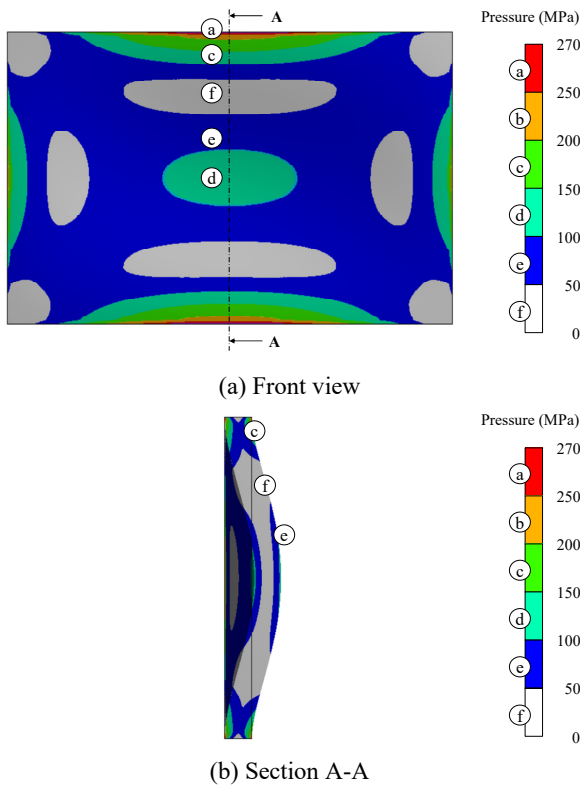


Fig. 12. von Mises stress distribution of 260 mm × 170 mm × 14 mm plate

Fig. 13은 단변을 따라 공칭응력(normal stress)의 변화를 도시한 것이다. 이론적 결과와 동일하게 격자의 변 부분에서는 인장응력이 발생하며 소성응력과 동일한 응력이 발생되었으며 격자의 중앙 부분에는 압축응력이 발생되었다.

Fig. 9에서 해석모델의 격자판 폭이 170 mm이므로 ①에 해당하고 격자판 높이가 260 mm이므로 ②점에 해당한다. 이런 조건에서 항복응력이 발생될 최소대의 격자판 두께는 14 mm로 산정된다. Fig. 12의 해석결과와 일치한다.

이 구조해석결과를 근거로 하중분배법으로 산정한 격자의 크기에 대한 강판 두께를 도시한 Fig. 9은 방폭문 설계현장에서 기초설계단계에서 유용하게 사용될 수 있다.

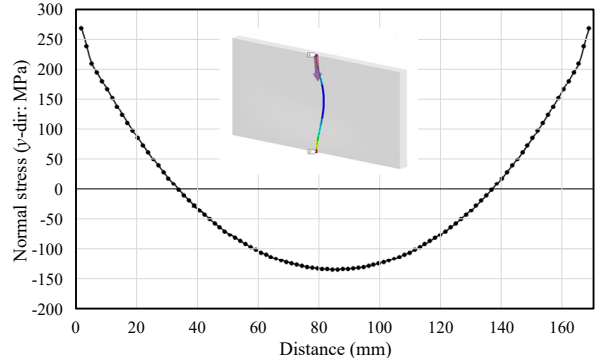


Fig. 13. Normal stress distribution in the center line

### 5. 결론

격자형 방폭문의 국부파손을 방지하는 최적화 설계 방법에 대한 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 방폭문의 전면 강판의 국부파손이 발생하지 않도록 결정하는 방법으로 하중분배법을 사용할 수 있다.
- (2) 국부 파손이 발생하지 않은 방폭문 전면 강판의 최소 두께를 수치해석으로 산정한 결과는 하중분배법을 사용한 결과와 일치한다. 격자판의 크기가 260×170일 때 하중분배법으로 도시한 Fig. 9에서 두께는 14 mm 일 때 항복응력이 발생하고, 3D 모델로 해석한 결과를 도시한 Fig. 12에서는 ㉠ 부분에서 항복응력이 발생한다.
- (3) 하중분배법을 사용한 격자 크기와 강판 두께를 도시한 그래프는 산업현장에서 방폭문 최적설계에 유효하게 적용할 수 있다.

### 참고문헌(References)

[1] Kingery, C.N. (1966) *Air Blast Parameters Versus Distance for Hemispherical TNT Surface Burst*, BRL Report No. 1344, U.S. Army Ballistic Research Laboratories, USA.

[2] Kingery, C.N., and Bulmash, G. (1984) *Air Blast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*, ARBRL Technical Report No. TR-02555, U.S. Army Ballistic Research Laboratories, USA.

[3] Biggs, J.M. (1964) *Introduction to Structural Dynamics*, McGraw-Hill, USA, pp.3-26.

[4] Haskell, D.F. (1972) *Deformation and Fracture of Tank Bottom Hull Plates Subjected to Mine Blast*, U.S.

- Army Ballistic Research Laboratories, USA.
- [5] Kiwan, A.R. (1982) *Theoretical and Experimental Study of the Response of Clamped Rolled Homogeneous Steel Armor Plates to Close-in Blast Loading*, U.S. Army Ballistic Research Laboratories, USA.
- [6] Jacob, N., Nurick, G.N., and Langdon, G.S. (2007) The Effect of Stand-off Distance on the Failure of Fully Clamped Circular Mild Steel Plates Subjected to Blast Loads, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.29, No. 10, pp.2723-2736.
- [7] Ngo, T., Mendis, P., Gupta, A., and Ramsay, J. (2007) Blast Loading and Blast Effects on Structures, *Electronic Journal of Structural Engineering*, EJSE International, Special Issue, pp.76-91.
- [8] Zhou, X.Q., Kuznetsov, V.A., Hao, H., and Waschl, J. (2008) Numerical Prediction of Concrete Slab Response to Blast Loading, *International Journal of Impact Engineering*, Elsevier, Vol.35, No.10, pp.1186-1200.
- [9] Bao, X., and Li, B. (2010) Residual Strength of Blast Damaged Reinforced Concrete Columns, *International Journal of Impact Engineering*, Elsevier, Vol.37, No.3, pp.295-308.
- [10] Kim, G.T., Kim, S.K., Lee, J., and Cho, H. (2010) Numerical Analysis of the Earth-Covered Structure Using Corrugated Steel Plates Under Blast Loads, *Proceedings of the Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, pp.1217-1220 (in Korean).
- [11] Kim, H.S., and Wee, H.-H. (2015) An Evaluation of Blast Resistance of Partially Reinforced CFT Columns Using Computational Analysis, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.28, No.5, pp.503-510 (in Korean).
- [12] Choi, H., Shin, D.H., Kim, M.-S., Kim, D.J., Kim, H., and Lee, Y.H. (2013) A Study on the Proposal of Residual Strength Equation of Reinforced Concrete Columns Under Blast Load, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, KOSHAM, Vol.13, No.1, pp.17-24 (in Korean).
- [13] Jo, E., Kim, M.S., Park, J.Y., and Lee, Y.H. (2014) Behavior of Prestressed Concrete Panels Under Blast Load, *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, COSEIK, Vol.27, No.2, pp.113-120 (in Korean).
- [14] Kang, J.-W., Jo, E., Kim, M.S., and Lee, Y.H. (2015) Behavior of Precast Prestressed Concrete Panels Subjected to Blast Loading, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, KASSS, Vol.15, No.1, pp.95-102 (in Korean).
- [15] Kim, N.H. (2015) *A Study on the Structural Stability of the Sliding Blast Door Under Blast Load*, Master's Thesis, Seoul National University of Science and Technology, Korea, pp.24-37 (in Korean).
- [16] Defense Installations Agency (2014) *Test Execution Guide for Blast Proof Door Explosion Demonstration*, DIA, Korea, pp.24-26 (in Korean).
- [17] Shim, K.B., and Lee, T.S. (2020) Design of Frame Type Blast Door Reflecting Explosion Proof Test, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.2, pp.67-74 (in Korean).
- [18] Timoshenko, S., and Woinowsky-Krieger, S. (1989) *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, USA, pp. 208-211.
- [19] Goltermann, P. (2013) *Reinforced Concrete Slabs - Analysis and Design*, Technical University of Denmark, Denmark, pp.1-5.
- [20] Shim, K.B., and Lee, T.S. (2019) Estimation of Maximum Elastic Displacement of Sliding Blast Door, *Journal of Standards, Certification and Safety*, Society for Standards, Certification and Safety, Vol.9, No.2, pp.1-13 (in Korean).
- [21] Shim, K.B., and Lee, T.S. (2019) Piratical Calculation Method of the Maximum Elastic Displacement of a Blast Door Using the Load Distribution Method and Finite Element Analysis, *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineering - A*, KSME, Vol.43, No.10, pp.737-745 (in Korean).
- [22] Shim, K.B., and Lee, T.S. (2019) Method to Calculate the Maximum Elastic Displacement on Double Blast Reinforced Concrete Door Supported by 3 Sides, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, KSPE, Vol.36, No.12, pp.1165-1172 (in Korean).

**요약** : 폭발하중을 받는 방폭문은 국부파손이 없고 폭발하중을 받은 후 회전 연성도와 변위 연성도 조건을 만족해야 한다. 격자형 방폭문의 국부파손을 방지하기 위하여 격자의 간격에 대하여 방폭문 전면 강판 두께를 설계한다. 구조해석을 사용한 설계방법은 기술적 난이도와 시간이 소요되어 현장에 적용하기 불편하다. 하중분배법을 사용한 그래프 방법은 실용적으로 산업현장에서 쉽게 적용할 수 있어서 방폭문 신뢰성 향상에 도움이 될 것이다.

**핵심용어** : 방폭문, 폭발하중, 폭발실증시험, 방폭문 두께, 성능평가