

하중분배법에 실험계획법을 적용한 콘크리트 충전형 강판문의 최적설계

심관보^{1*} · 김병진² · 이택성³

¹조교수, 한국산업기술대학교, 스마트기계공학과, ²기술이사, (주)동광기업,

³교수, 한국산업기술대학교, 기계설계공학과

Design of Concrete Filled Steel Plate Door by Design of Experiment in Load Distribution Method

Shim, Kwan Bo^{1*}, Kim, Byeong Jin², Lee, Taek Sung³

¹Associate Professor, Dept. of Smart Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung, 15073, Korea

²Technical Director, Dongkwang Enterprise Co., Ltd., Hwaseong, 18533, Korea

³Professor, Dept. of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung, 15073, Korea

Abstract - The load distribution method and the experimental design method are used for the optimized design of the concrete filled steel plate door that resists explosion load. The load distribution method is to calculate the deflection displacement and stress by modeling the concrete filled steel plate door as a two-way slab and distributing the explosion pressure into the components affecting the width-wise and height-wise bending of the explosion-proof door. In the design of experiments, a fatal factor is selected by performing eight experiments on seven factors using a two-level orthogonal array table. The finite element analysis selects seven factors that affect the deflection of the concrete filled steel plate door and selects the critical factors by calculating the maximum deflection and the maximum stress by the load distribution method for the combination of factors. In consideration of the stability and workability of the concrete filled steel plate door, the basic design is made by determining the level of 7 factors. The detailed design of the concrete filled steel plate door is performed with the lethal factor selected in the basic design.

Keywords - Blast door, Concrete filled steel plate door, Design of experiment, Maximum elastic displacement, Load distribution method

1. 서론

방호구조물은 잠재적으로 위협을 갖는 폭발로부터 인원 장비 등을 보호하는 정도에 따라 방벽(barrier), 대피소(shelter), 봉쇄구조물(containment structure)로 구분된다. 방벽은 폭발의 전파를 방지하기 위해 사용되며, 대피소는 완전히 밀폐된 구조물로서 인원이나 장비 등이 폭발로 인한 압력이나 파편, 지면 충격으로부터 보호한다. 봉쇄구조물은

강화된 구조체로 피해 유발 요소를 완전히 혹은 거의 완전하게 방호하는 건물이다. 이들 방호구조물의 사용성을 확보하기 위하여 방폭문이 사용된다.

방호구조물에 대한 연구는 Biggs^[1]가 lumped mass model을 사용하여 폭발하중에 대한 구조물의 거동을 평가하면서 시작되었다고 할 수 있다. Kiwan^[2]은 판재의 각 모서리가 완전 고정된 상태에서 폭발하중을 받을 때, 판재의 중앙에서 일어나는 최대 변위를 수식을 사용하여 계산하였다. Jacob *et al.*^[3]은 폭발 이격거리를 변경하면서 완전히 고정된 연강 플레이트의 파괴 정도를 유한요소해석을 수행하였다. Zhou *et al.*^[4]은 TM5-1300으로 폭발 하중을 인가하여 고강도 강철 섬유를 사용한 콘크리트 슬래브의 변위를 측정하였다. Autodyn 프로그램을 이용하여 2D 계산에서 얻어진 폭발을 3D 모델에 매핑하여 폭발 하중에 대한 콘크리트 슬래브의 거동을 규명하였고 실험값과 비교하였다.

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 22, 2020; approved on October 26, 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

국내에서 Kim *et al.*^[5]는 LS-DYNA를 사용하여 폭발하중을 받는 지중 파형강판 구조물에 대해 수치해석을 수행하였다. Kim and Wee^[6]는 Autodyn 프로그램을 이용하여 콘크리트 충전기둥의 폭발 저항 성능을 해석하였다.

Jo *et al.*^[7]은 폭발하중을 받는 프리스트레스 콘크리트 패널에 대하여 Autodyn 프로그램을 사용하여 해석하였다. Kang *et al.*^[8]은 콘크리트 강도, 프리스트레스 적용 여부에 따른 프리캐스트 프리스트레스 콘크리트 패널의 거동을 Autodyn 프로그램으로 해석하였다.

Kim^[9]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. Shim and Lee^{[10]-[13]}는 하중분배법(load distribution method)으로 방폭문의 처짐과 응력을 산정하는 방법을 제시하였다. 이 연구에서 하중분배법은 방폭문을 2방향 슬래브로 모델링하고 폭발압력을 방폭문의 폭 방향 휨과 높이 방향 휨에 영향을 주는 성분으로 분배하여 1방향 슬래브로 단순화하여 휨 변위와 응력을 계산하는 방법이다.

방호구조물에 대한 연구는 2010년 이전에는 주로 판재에 대하여 연구되었으며, 2015년부터 방폭문에 대한 연구가 시작되었으나 방폭문 성능평가에 대한 내용으로 방폭문 설계 방법을 제시하지 못했다.

콘크리트 충전형 강판문은 무겁고 면적이 넓으며 인가되는 폭발하중이 크기 때문에 제품 개발 중 신뢰성 시험을 할 수 없었고 따라서 방폭문의 신뢰성을 요구하는 현장에는 외국 제품을 사용하는 실정이었다.

외화유출 방지와 방호시험기술 향상을 위해 정부에서는 국내 방호시설 인증시험을 주관하는 담당부서를 한국가스안전공사에 신설하고 지난 2012년 10월부터 방호인증센터

를 운영하기 시작하였으며 방폭문에 대해서는 3차례의 방폭문 실증폭발시험을 실시하였다. Fig. 1은 2019년에 실시한 방폭문실증시험 현장이다. 국제공인시험기관으로 지정된 한국가스안전공사는 방폭문 체계의 공인 인증을 위하여 화생방 방호 시설과 방폭문 실증 폭발 시험의 세부 절차 및 방법을 제시하고 있다^[14].

폭발실증시험으로 방폭문에 대한 성능을 보증할 수 있는 체계가 운영되고 있으나, 설계자는 경험에 의하여 방폭문을 설계하고 있는 실정이며 방폭문 설계 근거에 대한 이론적 데이터와 신뢰성 검증을 위한 설계 지표들을 제시하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 방폭문 실증시험을 통과하기 위하여 과도한 설계를 하는 경향이 있다.

본 연구는 콘크리트 충전형 강판문의 방폭문 휨 저항 성능에 영향을 주는 방폭문 자재의 형상, 치수와 물성, 투입량 등 부자재의 기여도를 설계근거자료로 설계자들이 사용할 수 있도록 돕고자 한다.

2. 콘크리트 충전형 강판문의 구조

방폭문은 전시에 군 지휘소 및 폭발로 인해 대량 피해가 예상되는 탄약창고, 유류시설과 민방위 시설에 사용되는 문으로 건축구조기준이 요구하는 안전성(safety), 내구성(substantiality), 사용성(serviceability), 친환경성(environment friendly)이 확보되도록 설계해야 하며 특히 방호수준 ‘A’의 방폭문은 폭발 하중의 받기 전과 후에 동일하게 사용에 불편함이 없도록 문의 개폐가 용이하도록 사용성을 보장함과 더불어 방폭문 전면 강판에 4 MPa의 폭발압력이 작용할 때 국부파손이 발생하지 않아야 하며 폭탄 파편이 방폭문에 충돌하여도 관통하지 않도록 설계해야 한다. 또한 압력, 화



Fig. 1. Explosion proof test conducted in 2019

염, 화학 가스의 유입을 차단하여 안정성을 확보해야 한다. 방폭문 개폐 방법에 따라서 미닫이 방식(Fig. 2(a))과 여닫이 방식(Fig. 2(b))으로 구분한다. 본 연구에서는 여닫이 방식의 콘크리트 충전형 강판문을 대상으로 한다.



(a) Swing door installed inside



(b) Sliding door installed outside

Fig. 2. Installation example of blast door

3. 실험계획법 기반의 설계프로세스

실험계획법은 입력 변수들에 대해서 의도적인 변화를 주어서 시험을 하여 출력 반응의 변화에 대한 원인을 규명하는 시험이다. 입력 변수들의 의도적 변화에 대하여 출력 반응의 변화를 분석하는 방법으로 처리 비교(treatment comparison), 중요 인자의 선별(factor screening), 반응표면 탐색(response surface exploration), 시스템 최적화(system optimization), 시스템의 로버스트 조건(robust condition of system)의 기법이 있다. 본 연구에서는 방폭문 골조의 휨 변형과 응력에 영향을 주는 많은 인자들 중에서 치명 인자를 선별하고 치명 인자에 대한 영향 민감도를 파악하며 작업성(용접성)을 고려하여 방폭문 설계의 근거를 제공한다^[15].

4. 방폭문 골조 설계의 수치해석계획법

4.1 목적함수의 정의

방폭문의 안정성에 대해 성능평가는 변위연성도와 회전연성도를 사용한다. 변위연성도(μ)는 폭발에 의해 발생한 최대 변위(Y_m)와 방폭문의 최대탄성변위(Y_e)의 비율($\mu = Y_m/Y_e$)이다. 회전연성도(θ)는 폭발압력을 받을 때 부재의 지지점에서 발생하는 최대 회전각도(θ)로 정의하고, 폭발시험 중 최대 변위(Y_m)와 최대변위 발생지점과 지지점 사이의 거리($L/2$)사이의 각도($\theta = \tan^{-1}(2Y_m/L)$)로 정의한다. 방폭문의 등급은 Table 1의 범위에 따라서 결정된다^[14].

본 연구에서 높은 등급의 방폭문을 설계하기 위하여 탄성 변위(Y_e)가 작게 되도록 설계해야 한다. 즉 방폭문의 강성이 커서 휨 변형에 저항하는 성능이 커야 한다. 철근콘크리트 슬래브의 소성이 시작되는 기준은 강판의 항복을 기준으로 한다. 콘크리트는 인장에 약하여 작은 휨모멘트에서도 균열이 발생하나 강판 복합구조물의 거동은 강판의 영향이 지배적이므로 강판의 항복을 기준으로 소성여부를 판단한다^[17].

Table 1. Key performance indicators based on performance rating

Performance rating	Displacement ductility ratio (°)	Rotational ductility ratio
A	$0 < \theta < 1$	$0 < u < 10$
B	$1 < \theta < 6$	$10 < u < 20$
C	$6 < \theta < 12$	-

따라서 최대탄성변위(Y_e)는 방폭문 강판의 중앙에서 발생한다. 방폭문을 구성하는 부자재는 용접으로 결합한다. 따라서 작업성 평가 지표는 용접길이이다. 방폭문의 안정성/작업성에 대한 목적함수(탄성변위, 최대응력, 용접길이)는 망소특성이며 탄성변위와 최대응력은 상관관계가 성립되고, 용접길이는 방폭문 골조 설계 방법에 따라서 다르다. 방폭문의 목적함수가 망소특성이기 때문에 방폭문 부자재의 수량을 늘리면 휨 강성이 커진다. 그러나 Fig. 2(a)와 같이 건축물 내부에 설치되는 방폭문은 부자재의 크기를 증가시킬 수 없는 경우가 있고, 부자재의 투입량이 증가하면 방폭문이 무거워 사용성이 나빠진다. 부자재의 과다 투입으로 재료비 및 시공비 문제가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 방폭문의 두께를 262 mm로 고정하고 각 부자재를 변화시켜 최소의 목적함수값을 구한다.

4.2 요인설계 및 수치해석계획

폭발압력에 대한 처짐과 응력을 방폭문 안전성에 대한 목적함수로 정의하고, 용접길이는 작업성에 대한 목적함수로 정의한다.

목적함수에 영향을 주는 가인자(trivial many)를 도출하고, 이를 검토하여 치명인자(vital few)를 선정한다. 일반적으로 치명인자를 선정하는 방법으로 특성요인도와 로지트 리 분석 방법을 사용한다^[17].

본 연구에서는 범용 소프트웨어인 ANSYS의 Static Structural(Ver. 17)을 사용하여 Fig. 4와 같이 유한요소해석을 한다. 유한요소해석을 위하여 각각의 두께를 가지는 철근과 강판, 콘크리트를 3D모델링(Fig. 3)한다. 유한요소해석을 위하여 방폭문은 90만 개의 요소를 만들고 콘크리트와 철근, 강판, 형강 사이의 접촉 조건은 접합(bonded)으로 한다. 방폭문과 구조체 사이의 지지 조건은 4변 단순지지(displacement $x = \text{free}, y = 0, z = \text{free}$)로 한다. 방폭문 전면 강판에 정적압력 4 MPa(pressure 4 MPa)을 인가하여 선형 탄성 해석을 수행하여 방폭문의 응력을 계산한다^[11].

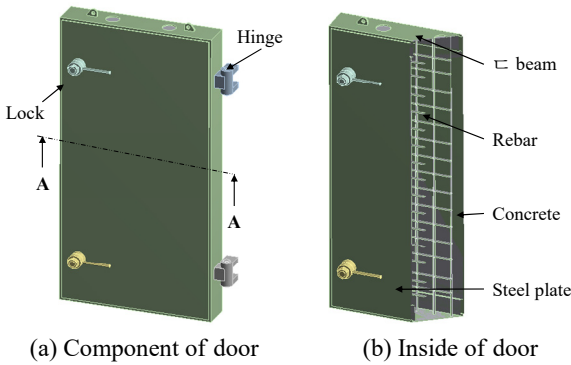


Fig. 3. Structure of single swing type blast door

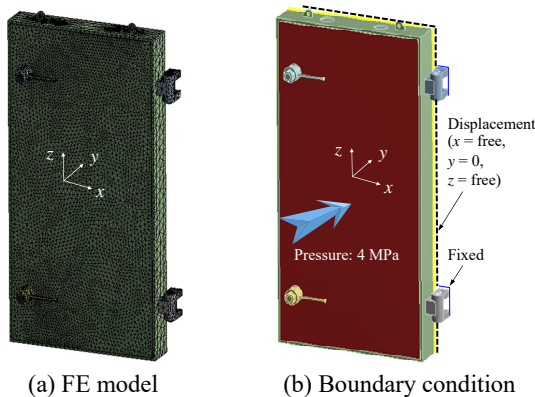


Fig. 4. FE model and boundary condition for finite element analysis

Fig. 5는 방폭문 전면 강판에 4 MPa의 압력이 작용할 때 응력을 도시한 것이다. + 부호는 인장응력이 작용하며, - 부호는 압축응력이 작용한다. 방폭문 폭 방향의 응력 분포(Fig. 5)에 영향을 주는 방폭문의 부재는 방폭문 전·후 강판, 철근의 위치 및 철근의 지름, 철근의 중심 간의 거리(철근의 개수), 콘크리트 강도, C형강의 크기 등이며 이러한 부재들은 방폭문의 최대 탄성변위에 영향을 주므로 이 항목들을 목적함수에 중요한 영향을 주는 인자(factor)로 선정한다.

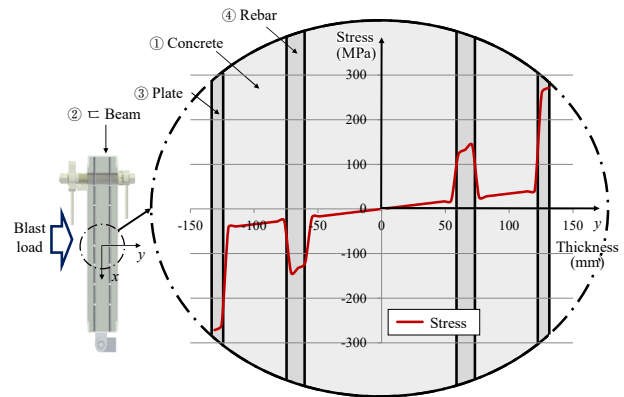


Fig. 5. Distribution of normal stress resistant to flexural deformation

Fig. 6에서 목적함수에 영향을 주는 치명 인자로 ① 충전재의 강도, ② C형강 웹 두께, ③ C형강 플랜지 두께, ④ 강판의 두께, ⑤ 철근의 지름, ⑥ 철근의 간격, ⑦ 철근의 위치 등 7항목을 선정한다. 여기서 C형강의 높이와 충전재의 높이는 같으며 철판의 두께와 상관관계를 가지고 변한다.

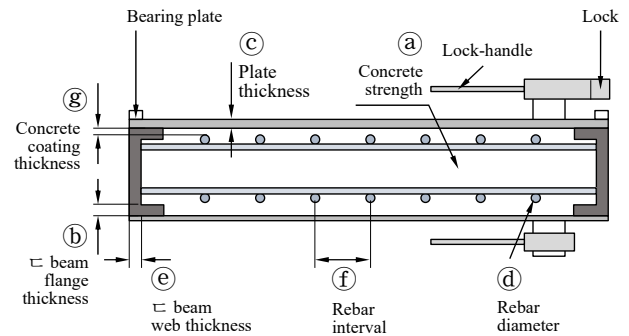


Fig. 6. Section of single blast door (section A-A of Fig. 3)

본 수치해석에서는 직교배열표를 사용하여 선정한 7개의 인자를 배치하고 8차례의 실험을 수행한다. Table 2에서 0은 낮은 수준을 1은 높은 수준을 표현한다.

Table 2. Orthogonal array table

Experimental trial	Vital few						
	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	1	1	1
3	0	1	1	0	0	1	1
4	0	1	1	1	1	0	0
5	1	0	1	0	1	0	1
6	1	0	1	1	0	1	0
7	1	1	0	0	1	1	0
8	1	1	0	1	0	0	1

4.3 인자 수준 결정

Table 3는 본 연구에 사용하는 인자들의 수준을 정리한 것으로 ㉠ 콘크리트 강도는 일반적으로 건축물에 많이 사용하는 27 MPa과 고강도 콘크리트 45 MPa을 사용한다. ㉡형강의 ㉢ 웹 두께와 ㉣ 플랜지 두께는 현장에서 쉽게 구할 수 있는 자재로 선정한다. ㉤ 방폭문 앞·뒤 강판의 두께는 용접성과 가격을 고려하여 6 mm와 8 mm로 선정한다. 철근은 이형 철근을 사용하며 ㉥ 철근의 지름은 온도균열을 방지하는 이형 철근으로 공칭 지름 12.7 mm와 휨하중에 저항하는 용도로 사용하는 이형 철근의 공칭 지름 25.4 mm를 선정한다. ㉦ 철근의 순 간격은 150 mm와 200 mm를 선정하며 ㉧ 피복 두께는 슬래브에 사용하는 20 mm와 기둥에 사용하는 40 mm를 선정한다. 강판의 재질은 SN275를 사용한다.

부자재의 탄성계수는 건축구조기준에서 제시하는 값으로 다음과 같이 사용한다.

- 철근의 탄성계수 $E_r = 200,000$ (MPa)
- 강판, 형강의 탄성계수 $E_s = 210,000$ (MPa)
- 콘크리트의 탄성계수 $E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}}$ (MPa)

여기서, $f_{cu} = f_{ck} + \Delta f$ (MPa)

Table 3. Factors and levels for flexural resistance

Level	(a) Concrete strength (MPa)	(b) ㄷ beam web thickness (mm)	(c) Plate thickness (mm)	(d) Rebar diameter (mm)	(e) ㄷ beam flange thickness (mm)	(f) Rebar interval (mm)	(g) Concrete coating thickness (mm)
0	27	9	6	12.7	13	200	40
1	45	12	12	25.4	15	150	20

Δf 는 f_{ck} 가 40 MPa 이하면 4 MPa, 60 MPa 이상이면 6 MPa이며, 그 사이는 직선보간으로 구한다^[18].

4.4 수치해석 실행

방폭문 전면 강판에 4 MPa의 균일분포하중을 인가하는 것은 현실적으로 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 실험에 대신할 시뮬레이션 방법을 사용할 수 있다. 선정된 7개의 인자에 대하여 2수준계 직교배열표를 사용하면 Table 3과 같이 8번의 수치해석을 실시해야 하므로 8개의 수치해석 모델이 필요하다. Fig. 4와 같이 유한요소해석을 수행하면 3D 실험 모형을 모델링하는데 15 Man-day가 소요되며 프리프로세스와 해석 시간으로 15 Man-day가 소요된다. 따라서 총 8번의 시뮬레이션에 240 Man-day가 소요되어 효율적이라고 할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 3D 모델링을 하지 않는 이론적 방법을 사용한다.

Timoshenko and Woinowsky-Krieger는 단순 지지되어 있는 사각형판에 분포하중(W)이 인가될 때 식 (1)을 제시하였다^[19]. 이 식은 동일한 재질로 구성된 두께가 균일한 판에 적용된다. 따라서 방폭문을 적용하기 위해서는 복합구조물의 등가탄성계수를 고려해야 하는 문제점이 있다.

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

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

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

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 ν 는 푸아송비, h 는 부재의 두께, E_{cm} 은 등가탄성계수이다.

Goltermann^[19]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 최대 변위는 다음과 같다.

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

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

Shim and Lee는 슬래브에 적용하는 하중분배법을 이용하여 식 (3)과 같이 제시하였다^[11].

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

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

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

본 연구에서는 방폭문의 철근, 형강, 콘크리트에 대하여 등가탄성계수를 구하는 방법인 식 (1)-(2)를 사용하지 않고, 부자재에 대한 환산단면적법을 사용하는 하중분배법을 사용하여 Table 4와 같이 엑셀에서 로직을 구현하여 식 (3)-(4)의 처짐과 응력을 산정한다. Table 4의 ㉠는 8차래의 실험모델 중 첫 번째 실험모델에 대한 수준인자를 입력한 값이며 이 입력된 수준인자를 사용하여 ㉡와 ㉢에서 방폭문 폭 방향

Table 4. Displacement, stress and welding length calculation by load distribution method

㉠												
Experiment trial	Concrete strength	□ beam web thickness (width)		Plate thickness	Rebar diameter	□ beam flange thickness (height)		Rebar interval (height)	Rebar interval (width)	Concrete coating thickness		
1	27	9		6	D13	13		15	200	20		
㉡ Height direction (Unit: mm)												
Name	Spec.	Height	Width	Web	Flange	$n = E_s/E_c$	Area	Unit I	y_o	Q'ty	Total I	Welding length
Plate (rear)	1,223×12t	6	1,340			7.68	8,040	24,120	128.0	1	1,011,509,284	2,680
Rebar (rear)	Diameter		19.1			7.49	286	6,530	109.0	7	178,735,402	2,005
□ beam	300×90×9×13	250	90	9	13	7.68	4,356	41,321,388	0.00	2	634,481,944	
Concrete	1,263×300	250	1,300			1	325,000	1,692,708,333	0.00	1	1,692,708,333	
Rebar (front)	Diameter		19.1			7.49	286	6,530	-109.0	7	178,735,402	2,005
Plate (front)	1,223×6t	6	1,340			7.68	8,040	24,120	-128.0	1	1,011,509,284	2,680
Neutral center (y_c)				W_L			Height (L)			ΣI_L		
131.0				0.041			2,540			4,707,679,649		
㉢ Width direction (Unit: mm)												
Name	Spec.	Height	Width	Web	Flange	$n = E_s/E_c$	Area	Unit I	y_o	Q'ty	Total I	Welding length
Plate (rear)	2,540×6t	6	2,540			7.68	15,240	45,720	128.0	1	1,917,338,493	5,080
Rebar (rear)	Diameter 19		19.1			7.49	286	6,530	109.0	15	383,004,432	4,296
□ beam	300×90×9×13	250	90	9	13	7.68	7,076	41,321,388	0.0	2	634,481,944	
Concrete	2,540×300	250	2,522			1	630,500	3,283,854,167	0.0	1	3,283,854,167	
Rebar (front)	Diameter		19.1			7.49	286	6,530	-109.0	15	383,004,432	4,296
Plate (front)	2,540×12t	6	2,540			7.68	15,240	45,720	-128.0	1	1,917,338,493	5,080
Neutral center (y_c)				W_S			Width (S)			ΣI_S		
131.0				0.959			1,340			8,519,021,962		

의 하중과 높이 방향의 하중으로 분배되며 ㉔에서 방폭문 설계 압력인 4MPa를 적용하면 ㉔와 같이 처짐이 산정된다. 그리고 응력 및 용접길이는 각각 ㉕와 ㉖ 절차에 따라 산정되는데 8차례의 실험결과를 Table 5에 정리하였다. 8차례의 실험결과에서 응력은 항복강도 275 MPa를 넘지 않으므로 인자의 수준 조합에 따른 소성변형이 발생되지 않는 것으로 확인됨을 알 수 있다.

4.5 요인분석

선정된 설계인자가 서로 상호작용이 있는지, 방폭문의

처짐에 가장 영향을 미치는 인자는 무엇인지, 영향을 미친다면 어느 정도의 영향을 미치는지를 파악하기 위해 요인분석을 수행하였다. 요인분석에서 중요인자를 도출하고 최적 설계 시 고려하지 않을 인자를 제거함으로써 보다 정밀하고 정확한 설계를 할 수 있다. 요인분석은 상용소프트웨어인 미니탭을 사용한다^[20]. Figs. 7-11은 인자의 영향을 그래프로 분석을 한 결과이다.

Figs. 7-9은 주인자 분석으로 그래프에서 인자의 영향 정도를 파악할 수 있다. 주인자 분석에서 인자 ㉔, ㉕, ㉖, ㉗가 목적함수 값의 변화에 큰 변화를 보이므로 주요인자로 판단할 수 있다.

Table 4. (Continued)

㉔ Blast pressure (W)				
4 MPa				
㉕ Displacement				
Load distribution (W _s)	Pressure (S direction: W _s * L)	Moment of inertia (S direction: I)	Modulus of elasticity (E _c)	Displacement (δ _{max})
3.84 MPa	9,742.95 N/mm	8,519,021,962 mm ⁴	26,702 MPa	1.80 mm
㉖ Plate stress				
Distance (y)	Moment (M = W _s S ² /8)	Moment of inertia (I _s)	Concrete Stress (σ _c)	Plate stress (σ _s = n σ _c)
131	2,186,804,334	8,519,021,962	33.63	251.9
㉗ Total welding length				
28,120				

Table 5. Orthogonal array of L₈(2⁷) and results

Column No.	㉔	㉕	㉖	㉗	㉘	㉙	㉚	Displacement y	Stress σ	Welding length L
Experimental trial	Concrete strength (MPa)	□ beam web thickness (mm)	Plate thickness (mm)	Rebar diameter (mm)	□ beam flange thickness (mm)	Rebar interval (mm)	Concrete coating thickness (mm)			
1	27	9	6	D13	13	200	20	1.80	251.8	28,120
2	27	9	6	D25	15	150	40	1.74	243.8	41,855
3	27	12	8	D13	13	150	40	1.69	236.7	22,103
4	27	12	8	D25	15	200	20	1.50	209.8	37,803
5	45	9	8	D13	15	200	40	1.60	224.3	21,090
6	45	9	8	D25	13	150	20	1.42	198.2	41,855
7	45	12	6	D13	15	150	20	1.74	244.2	22,103
8	45	12	6	D25	13	200	40	1.66	233.1	60,087

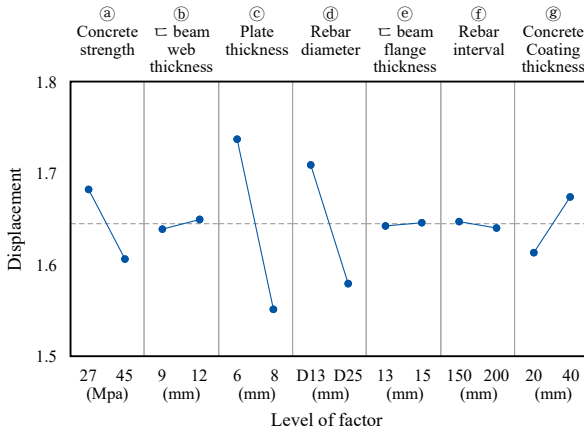


Fig. 7. Main effect plot of displacement

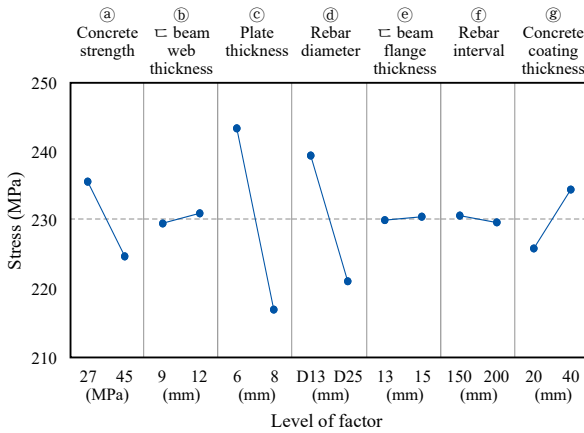


Fig. 8. Main effect plot of stress

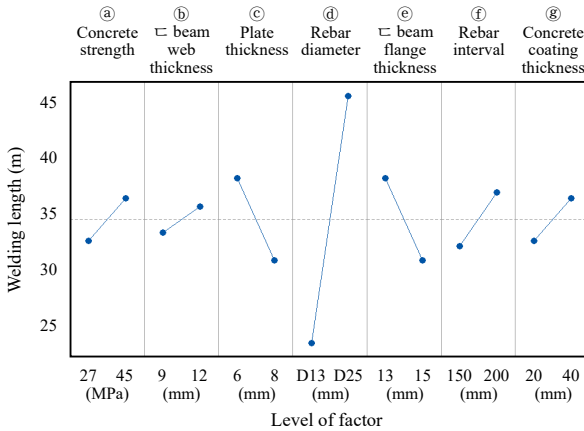


Fig. 9. Main effect plot of welding length

수치적 요인분석 방법에는 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 파레토도로 유의한 인자인지를 파악한다. Fig. 10에서 인자 ③, ④, ⑤의 영향도가 20% 이상이므로 치명인자 (vital few)로 선택함이 타당하다.

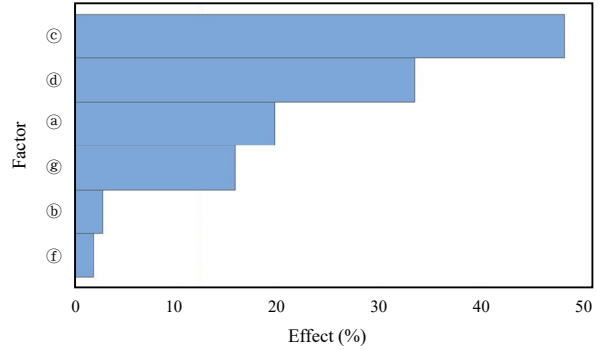


Fig. 10. Pareto plot of displacement

Fig. 11은 교호작용효과를 도시한 것으로 인자 ②와 인자 ⑥, 인자 ③와 인자 ⑦는 강한 상관관계가 있어 보인다. 본 연구에서는 여러 인자 중에서 치명인자를 선택하는 것이 주목적이므로 인자 간의 교호 작용의 영향은 무시한다.

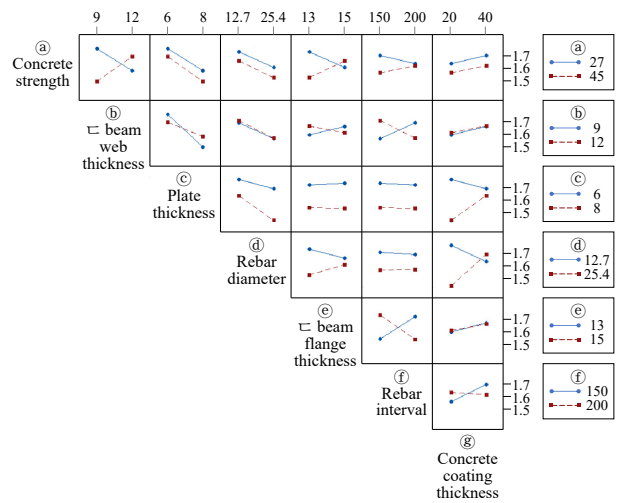


Fig. 11. Interaction effect plot of displacement

요인분석의 다른 방법으로 분산분석을 사용한다. Table 3의 직교배열표에 7개의 인자를 배치하면 오차항이 없기 때문에 요인분석 시 모두 유의하지 않는 인자로 분석된다. Figs. 7-8에서 인자 ③의 영향 정도가 가장 적으므로 오차항으로 대체하고 분산분석을 수행한다. 8가지의 수치해석 결과를 분석하여 인자에 대한 분산(adj. SS)과 오차(error)의 분산을 비교하여 인자의 유의함을 판단한다^[20]. 95% 신뢰수준으로 유의 확률(P)값을 계산하여 Table 6에 도시하였다. 본 연구에서는 95% 신뢰수준으로 P값을 0.05보다 작거나 같게 되면 해당인자가 해석의 결과에 지대한 영향을 주는 인자로 판정한다. Table 6에서 인자 ①, ③, ④, ⑦은 유의차가 있다. 즉 목적함수에 영향을 많이 준다고 판단한다.

Table 6. ANOVA table on displacement

Factor	DF	Adj SS	Adj MS	F-value	P-value
Ⓐ	1	0.011456	0.011456	385.14	0.032
Ⓑ	1	0.000214	0.000214	7.2	0.227
Ⓒ	1	0.068761	0.068761	2,311.76	0.013
Ⓓ	1	0.033168	0.033168	1,115.11	0.019
Ⓕ	1	0.000093	0.000093	3.12	0.328
Ⓖ	1	0.007322	0.007322	246.18	0.041
Error	1	0.00003	0.00003	-	-
Total	7	0.121044	-	-	-

4.6 최적설계

요인분석과 분산분석의 결과를 고려하여 설계에 적용하는 인자를 선정한다. 유의차가 있는 ㉠(plate thickness)는 12 mm로 선택한다. ㉡(rebar diameter)는 유의차가 있지만 작업성을 고려하여 용접 길이가 짧은 19.1 mm을 선정한다. ㉢(concrete strength)의 경우 고강도 콘크리트는 시공 시 관리의 어려움이 있어 27 MPa을 선택한다. 유의차가 없는 인자들의 수준은 기존에 사용한 설계 수준을 유지한다. ㉣(c beam web thickness)는 12 mm, ㉤(c beam flange thickness)는 15 mm, ㉦(rebar interval)는 150 mm, ㉧(concrete coating thickness)는 20 mm를 선정한다. 이와 같이 선정한 인자 수준으로 최적 설계를 하면 처짐은 1.58 mm, 응력은 222 MPa로 산정한다. 이 결과는 Fig. 12 및 Fig. 13에서 빗금친 막대 그래프로 표시한다. 이렇게 얻어진 최적화 모델은 방폭문에 작용하는 하중을 분배하여 단순화한 결과이다. 이런 수치해석모델의 타당성 검증을 위해서 산정된 치명인자와 각 인자의 수준을 고려하여 각 부재를 3D 모델링하고 유한요소해석하여 정확성을 검증해야 한다. 이 단계가 상세설계 단계이다.

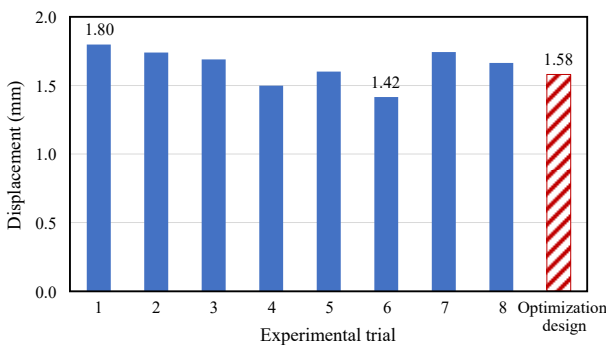


Fig. 12. Optimum design values of displacement

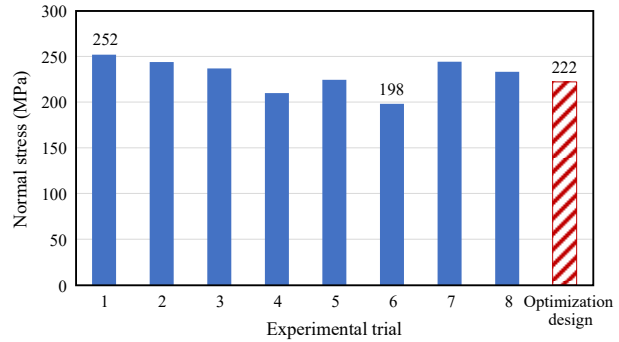


Fig. 13. Optimum design values of normal stress

5. 결론

본 연구에서는 철근, 강판, 콘크리트로 만들어진 편개형 방폭문의 탄성변위를 실용적인 하중분배법으로 구하고, 실험계획법의 직교배열표를 사용하여 부자재의 영향도를 평가한다. 이 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 하중분배법과 실험계획법으로 폭발 하중을 받은 방폭문의 휨 강성에 대한 부자재의 기여도를 산정할 수 있다.
- (2) 방폭문의 휨 변형에 저항하는 부자재의 기여도 크기는 방폭문의 강판 두께, 이형 철근의 지름, 콘크리트의 강도, 콘크리트 피복 두께의 순서이다.
- (3) 방폭문 시공의 편리성을 고려하여 콘크리트 강도와 이형 철근의 두께를 낮은 수준으로 설계하여도 방폭문의 휨 강성에 대한 설계 범위를 만족시킨다.
- (4) 안정성과 시공성을 고려한 262 mm 방폭문의 최적설계에서 편개형 방폭문에 4 MPa의 하중이 작용할 때 최대 처짐은 1.58 mm이고, 최대응력은 222 MPa이다.
- (5) 하중분배법에 실험계획법을 적용한 설계방법은 주요설계인자들을 3D 모델링 없이 방폭문의 기초설계 단계에 사용하며, 기초설계의 산출물인 최적화 인자의 수준을 반영한 3D 모델링으로 상세설계단계의 구조해석을 수행한다.

참고문헌(References)

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

- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] Korea Gas Safety Corporation (2014) *Explosion Proof Door Test Execution Guide and Performance Criterion*, KGS, Korea, p.18, pp.24-26 (in Korean).
- [15] Kim, J.H., Kim, J.Y., Han K.M., Na, H.S., and Kim, W.K. (2007) The Study for Clamping Property of 1300 MPa Grade High Strength Bolts by Using the Design of Experiment (DOE), *Proceedings of the Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.363-368 (in Korean).
- [16] Goltermann, P. (2013) *Reinforced Concrete Slabs - Analysis and Design*, Technical University of Denmark, Denmark, pp.1-5.
- [17] Park, S.H., and Park, Y.H. (2015) *Statistical Quality Control*, Minyoungsa, Korea, pp.40-77 (in Korean).
- [18] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016) *General Rules for Korean Building Code (KDS 41 10 05: 2016)*, Korea, pp.161-162 (in Korean).
- [19] Timoshenko, S., and Woinowsky-Krieger, S. (1989) *Theory of Plates and Shells*, McGraw-Hill, USA, pp. 208-211.
- [20] Park, J.-C., and Shin, S.-M. (2012) A Simulation-Based Optimization of Design Parameters for Cooling System of Injection Mold by Using ANOVA with Orthogonal Array, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, KSMPE, Vol.11, No.5, pp.121-128 (in Korean).

요 약 : 여단이 형식의 콘크리트 충전형 강판문을 하중분배법과 실험계획법을 사용하여 최적화 설계를 한다. 하중분배법은 방폭문을 2방향 슬래브로 모델링하고 방폭문 폭 방향과 높이 방향으로 하중을 분해하여 처짐과 응력을 계산하는 것이다. 실험계획법은 2수준 직교배열표를 사용하여 7개 주요 인자에 대하여 8차례의 실험을 수행하여 치명적 인자를 선택한다. 유한요소해석으로 방폭문의 강성에 영향을 미치는 7가지 인자를 선정한다. 선정된 인자조합에 대한 하중분배법을 적용하여 처짐과 응력을 계산하여 치명인자를 선정한다. 방폭문의 안정성과 작업성을 고려하여 7가지 인자의 수준을 결정하여 기초설계를 한다. 기초설계에서 선정된 치명인자로 방폭문의 상세설계를 한다.

핵심용어 : 방폭문, 콘크리트 충전형 강판문, 실험계획법, 최대탄성변위, 하중분배법
