

# 방폭문 실증시험을 반영한 골조형 방폭문 설계

심관보<sup>1</sup> · 이택성<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>조교수, 한국산업기술대학교, 스마트기계공학과, <sup>2</sup>교수, 한국산업기술대학교, 기계설계공학과

## Design of Frame Type Blast Door Reflecting Explosion Proof Test

Shim, Kwan Bo<sup>1</sup>, Lee, Taek Sung<sup>2\*</sup>

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

<sup>2</sup>Professor, Dept. of Mechanical Design Engineering, Korea Polytechnic University, Siheung, 15073, Korea

**Abstract** - It is used 125 kg TNT and 5.66 m separation distance for explosive demonstration test of the frame type blast door for 40 bar. In this condition, the explosion load was calculated using Autodyn to design the grid-type blast door, and the validity was verified by comparing with the explosion test results. The characteristics of explosion load under blast door test was analyzed and reflected in the grid design of blast door. The maximum elastic displacements of the blast door by performing static structural analysis on the four blast doors were calculated and the maximum displacements by performing dynamic analysis were evaluated to estimate the performance of those blast doors. It is presented the design direction for the grid-type blast door that can reduce the local damage of a front plate by changing a type of grid of a framed explosion-proof door.

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

### 1. 서론

방호구조물의 종류는 대피소, 방벽, 봉쇄 구조물로 구분한다. 해외에서는 2000년 이전에는 주로 판재<sup>[1]-[3]</sup>에 대하여 연구되었고 그 후 철근 콘크리트 슬래브, 기둥과 방폭벽<sup>[4]-[6]</sup>에 대한 연구가 진행되었다. 국내에서는 연평도 폭격사건 이후 방호구조물에 대한 안전성에 대하여 관심이 고조되었으며 봉쇄구조물의 출입을 제어하는 문에 대한 연구요구가 대두되었다. 정부에서는 민방위시설 기준으로 방호등급을 7등급으로 구분하여 방호체계를 정비하였으며, 방호능력의 신뢰성을 확보하기 위하여 한국가스안전공사에 담당부서를 신설하고 경기도 안산에 방호인증센터를 구축·운영하고 있다. 주요업무로 폭발 실증시험과 방호 시물레이션을 구축하고 있다. 폭발 실증시험은 실제 폭탄을 규격에서 정하

는 이격거리와 폭약량에 따라 폭발시켜 방폭문의 안전성을 인증하는 시험이다.

2016년 5월 육군공병학교 폭파시험장에서 TNT 125 kg으로 이격거리 7 m에서 국내 최초로 방폭문 폭발실증시험을 실시했다. Fig. 1은 2018년 11월 육군공병학교 폭파 시험장에서 2차 방폭문 폭발 실증시험한 사진으로 TNT 125 kg을 이격거리(normal distance) 5.66 m에서 터뜨려 방폭문의 안전성을 평가하였다<sup>[7]</sup>.



Fig. 1. Explosion proof test conducted in 2018

Note.-Discussion open until October 30, 2020. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 21, 2019; revised January 18, 2020; approved on February 04, 2020.

Copyright © 2020 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-31-8041-0423 Fax. +82-31-8401-0439

E-mail. lts724@kpu.ac.kr

2회에 걸친 실증시험의 운영의 차이점은 폭발물 이격거리에 있다. 방폭문에 적용되는 방호 2등급은 GP550 폭탄의 직접 폭발에 방호가 가능하여야 한다<sup>[8]</sup>. 방호 2등급의 방폭문은 40 bar의 폭발압력이 방폭문에 작용하여 안정성을 인정받아야 한다.

방폭문 실증시험에서 방폭문에 작용하는 적정 반사압력을 확보하는 것이 매우 중요한 사항이며 방폭문을 설치하는 콘크리트 구조체에 Fig. 2와 같이 압력센서를 삽입하여 반사압력을 측정한다. Fig. 3는 폭발 실증시험에서 관측한 반사압력을 도시한 것으로 피크 압력은 4.8 MPa이고 폭발압력이 작용하는 시간은 약 2 msec로 측정되었다.

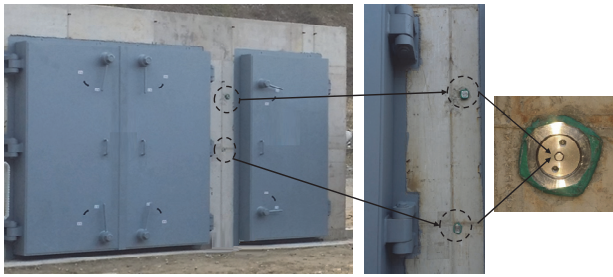


Fig. 2. Devices to measure reflected pressures

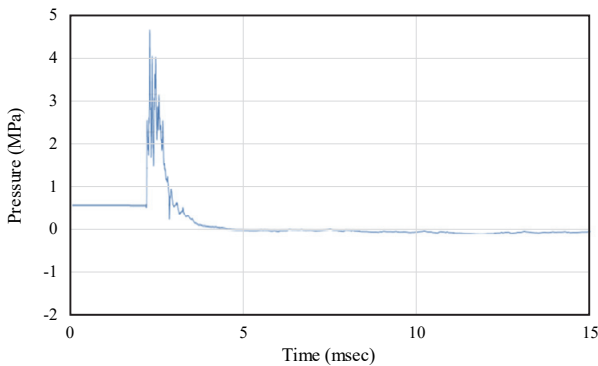


Fig. 3. Reflective pressure data measured during explosion proof test

폭발 실증시험에서 방폭문의 안전성을 평가하는 기준은 폭발을 받은 후 방폭문 사용이 가능해야 하며, 방폭문에 국부적인 변형이 생기지 않아야 하며 Table 1의 회전연성도 (rotational ductility ratio)와 변위연성도(displacement ductility ratio) 값의 범위에 따라서 안전등급이 정해진다.

회전연성도( $\theta$ )는 Fig. 4와 같이 폭발하중 작용할 때 방폭문의 지지점에서 최대회전각도로 정의되며 다음 식으로 계산한다<sup>[9]</sup>.

Table 1. Key performance indicators based on performance rating

Performance rating	Rotational ductility ratio ( $^\circ$ )	Displacement ductility ratio
A	$0 < \theta < 1$	$0 < \mu < 10$
B	$1 < \theta < 6$	$10 < \mu < 20$
C	$6 < \theta < 11$	-

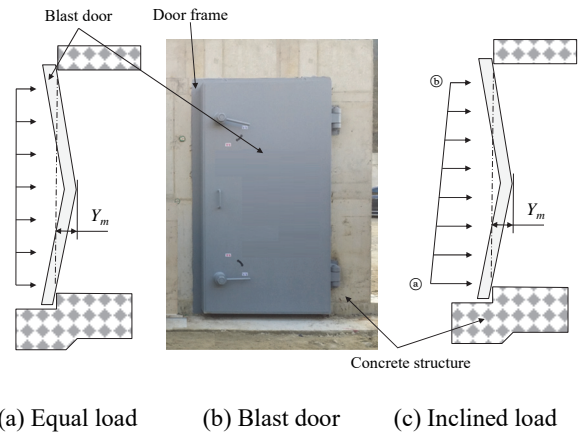


Fig. 4. Structure for explosion proof test

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

여기서  $Y_m$ 은 최대변위  $L/2$ 는 최대변위 발생지점에서 지지점까지 거리이다. 변위연성도( $\mu$ )는 최대변위 대비 최대탄성변위( $Y_e$ )의 비율로 정의되며 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\mu = Y_m/Y_e \quad (2)$$

최대변위( $Y_m$ )는 폭발실증시험에서 측정하여 얻으며, 최대탄성변위( $Y_e$ )는 실증시험업체가 공인인증기관에서 계산하여 방폭문 실증시험 전에 제출한다. Shim and Lee<sup>[10]</sup>는 철근 콘크리트 방폭문에 대한 최대탄성변위를 실용적으로 구하는 연구결과를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 국부항복에 취약한 골조형 방폭문에 대하여 40 bar 규격의 방호수준 A의 방호능력을 확보할 수 설계 방법을 제시하고자 한다. 방폭문에 작용하는 폭발압력을 시물레이션하고 폭발압력이 작용할 때 방폭문 골조의 격자 구조의 배치법에 따라 방폭문의 연성도에 미치는 영향을 분석하고 동적해석을 수행하여 최대 변위와 국부항복을 계산하여 방폭문의 성능을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다.

## 2. 폭발압력 산정

미국 국방부에서는 폭발시험을 수행하고 폭발압력을 구하는 매개변수값을 정의하고 그래프로 도식화하여 UFC 3-340-02에 수록하였다<sup>[11]</sup>. 그래프에서 40 bar 규격의 시험 조건에 대하여 삼제급근환산법<sup>[12]</sup>을 사용하여 폭약량과 이격 거리를 산출한다. UFC에서 제공하는 폭발압력 계산 방법은 개개의 실험조건에 따른 실험 수치값을 공개하지 않고 있어서 국내의 방폭설계에서는 폭압, 충격량 산정 같은 하중관련 사항과 재료의 동적 강도, 부재의 휨, 전단 강도의 평가, 변형의 제한값 등을 실험적 검증 데이터가 없는 상황에서 설계에 그대로 적용할 수밖에 없는 실정이다.

본 연구에서 상업용 소프트웨어인 ANSYS Autodyn<sup>[13]</sup>을 사용하여 방폭문 설계에 적용하는 반사압력을 산정하고 ANSYS Static Structural을 사용하여 최대탄성변위( $Y_e$ )를 구하고 ANSYS Explicit Dynamic을 사용하여 동적 최대변위( $Y_m$ )를 계산하여 방폭문의 성능을 평가한다.

Autodyn에서는 유한요소해석 모델 설정의 편의성 및 효율성 때문에 Fig. 5와 같이 1차원 썰기형 모델(1D wedge model)을 사용한다. 이 모델의 장점은 일정거리만큼 폭발압력을 미리 계산하여 해석시간을 단축시킬 수 있고, 조밀한 격자(mesh)를 사용하여 해석의 정확성을 향상시킬 수 있다는 점이다. 1D-wedge에서는 반사압력을 계산하지 못하고 입사압력만 계산할 수 있기 때문에 Autodyn-2D를 사용할 때 계산하고자 하는 폭발거리 중 반사가 일어나기 전까지만 수행한다.

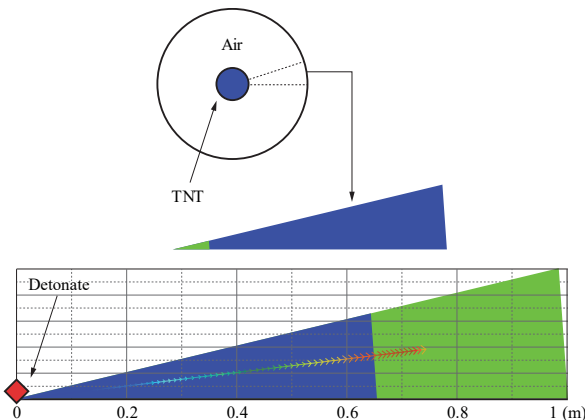


Fig. 5. Explosion load modeling using 1D-wedge

공중 폭발인 경우에 TNT 125 kg을 모델링할 때 폭발중심으로부터 처음 반사가 발생하기 전까지의 거리인 1,000 mm

만큼 공기를 모델링하고 TNT를 반지름 262 mm로 공기모델에 중첩시킨다. 공기와 TNT의 격자크기를 10 mm로 설정한다. 이와 같이 계산한 폭발압력파를 2D에서 결과를 불러서 사용한다<sup>[14]</sup>. Fig. 6에서 TNT 방향벡터(direction vector)로 표현한 것이 1차원 썰기형 모델에서 폭발압력을 불러온 것이다.

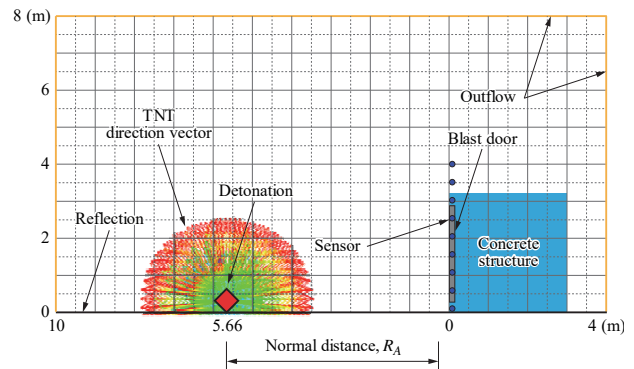


Fig. 6. Explosion test modeling using Autodyn-2D

Autodyn-2D를 사용하는 방폭문 실증시험해석모델에서는 지표면 폭발에 해당하므로 폭발형태를 구형이 아닌 반구형으로 한다. 지표면 반사효과를 고려하기 위하여 1차원 썰기형 모델의 TNT의 반지름은 구형의 262 mm가 아닌 331 mm로 설정해야 한다<sup>[15]</sup>. Autodyn-2D해석에서는 1D에서 산정된 데이터를 불러올 때 폭발물의 좌표를 지표면에서 폭발물의 반지름(331 mm) 만큼 오프셋(offset)시켜서 설정한다.

Autodyn-2D에서 14 m × 8 m를 해석범위로 설계하고, 옐러 공기모델을 격자크기를 50 mm로 만든다. 공기모델은 바닥면을 제외한 3면에 공기가 유출될 수 있도록 outflow 경계조건을 설정한다. 콘크리트 구조체는 라그랑지 모델로 격자크기 50 mm로 모델링한다. 폭발압력을 측정하기 위하여 공기 모델에서 방폭문 전면철판 위치에 센서를 배치하여 기폭 후 0.5 sec까지 압력을 측정하도록 하였다.

Fig. 7은 TNT 125 kg, 이격거리 5.66 m에서 방폭문 반사압력 해석결과를 기폭 후 2 msec - 6 msec 구간을 도시한 것이다. 방폭문의 하단에서 3.2 m까지는 콘크리트 구조체의 영향으로 반사압력이 발생하고 그 이상에서는 폭발압력이 반사되지 않으므로 압력이 낮아진다. 센서 높이 1.5 m에서 반사압력이 5.7 MPa로 실증시험결과인 4.8 MPa보다 크게 산정되었는데 이는 시뮬레이션에서 지표면의 영향 등 실험 환경 조건을 단순화한 결과로 추측한다.

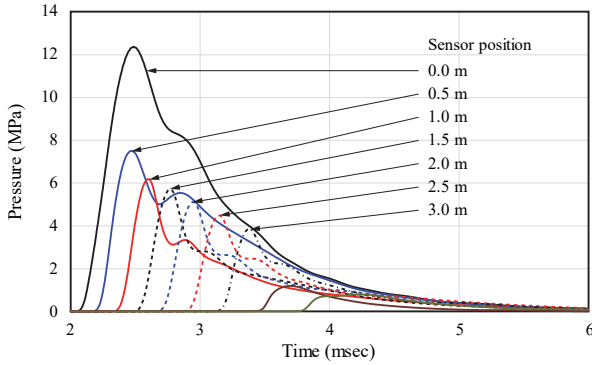


Fig. 7. Reflected pressure results after simulation (TNT 125 kg, distance = 5.66 m)

### 3. 정적 최대탄성변위 산정

본 연구의 대상인 방폭문은 크기가 2,540 × 1,340 × 262 (mm)이며 전면과 후면은 두께 16 mm의 철판으로 구성되어 있고, 그 사이에 같은 두께의 철판으로 격자 형태로 교차하도록 용접한 것이다(Figs. 8-9). 격자 구조의 배치에 따라 방폭문의 처짐 정도와 방폭문 전면 철판의 국부파손 정도를 연구하기 위하여 4개의 모델을 해석하여 처짐량을 비교한다. Fig. 8에서 basic 모델(6-channel)은 현재 현장에서 일반적인 사용하고 있는 골조형 방폭문 모델이며 bias 모델은 경사 분포하중에 대한 저항력을 향상시키기 위하여 경사 분포하중의 분포경향을 따라서 압력이 큰 아래쪽에 골조의 폭을 좁게 한 모델이다. 8-channel 모델은 basic 모델에서 격자를 등간격으로 1개 추가한 모델이고 9-channel 모델은 basic 모델에서 격자를 등간격으로 2개 추가한 모델이다.

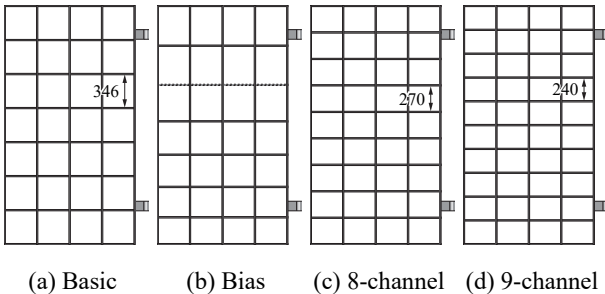


Fig. 8. Internal structures of lattice door

격자형 방폭문의 최대탄성변위를 산정하기 위하여 Fig. 9(a)와 같이 약 4.4만개의 요소를 만들고 방폭문의 후면

철판 테두리가 콘크리트 구조체와 압착하여 밀폐되는 모서리 부위에서 문의 수직방향으로 변위가 발생되지 않는 경계 조건을 설정하였고, 문의 힌지쪽 모서리는 힌지의 영향을 반영하여 회전이 되지 않도록 설정하였다. Table 2는 방폭문을 구성하는 SS275에 대한 물성이다.

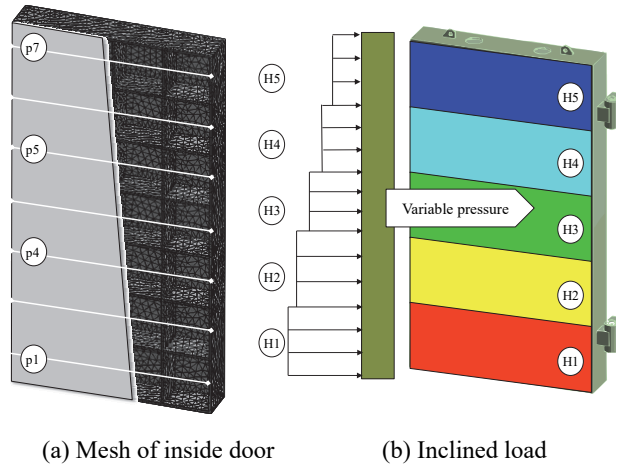


Fig. 9. Finite element analysis of blast door

Table 2. Material properties of the components of the blast door<sup>[16]</sup>

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

방폭문의 최대탄성변위를 구하기 위한 하중조건은 균일 분포압력이 방폭문 철판에 작용하는 것이다. 그러나 실제로는 Fig. 4(c)와 같이 폭발압력이 방폭문의 높이에 따라 다르게 작용하므로 방폭문의 높이에 따라 경사진 분포를 갖는 하중을 인가하여 성능을 평가하는 것이 실제에 근접할 것이다. 방폭문의 높이에 따라 작용하는 피크압력(peak pressure)을 나타내면 Fig. 10과 같다. 따라서 방폭문에 작용하는 압력은 Fig. 4(c)와 같이 ㉠지점에 7.5 MPa, ㉡지점에 4.2 MPa의 경사하중으로 작용하는 것으로 하였고 폭발방향으로는 동일한 것으로 가정하였다. Fig. 8(a)의 일반격자모델에 대하여 전면철판에 Fig. 4(a), Fig. 4(c)에서와 같이 균일 분포하중과 경사 분포하중을 각각 적용하여 방폭문 후면철판의 최대 처짐과 최대 응력관계를 정적 구조해석하여 그 결과를 Fig. 11에 도시하였다.

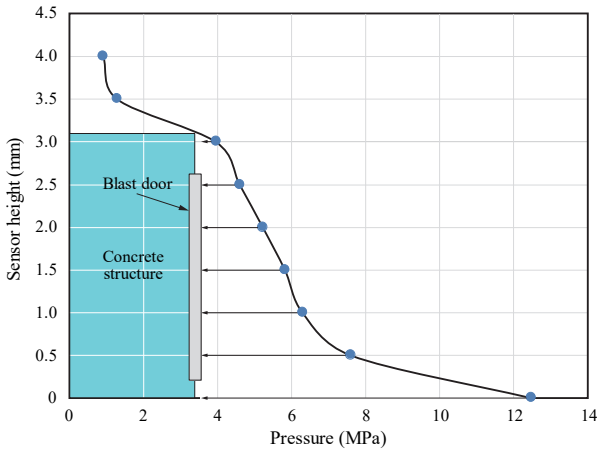


Fig. 10. Peak pressures at each sensor height

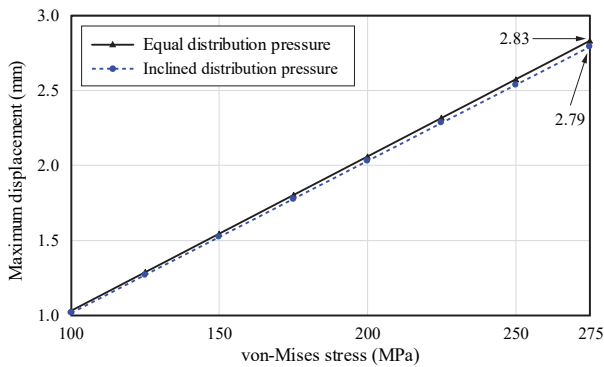


Fig. 11. Maximum elastic displacement of the basic model

해석결과 균일분포하중을 받을 때는 문의 중심부(하면에 서 1,240 mm 높이)에서 최대 탄성변위가 2.83 mm로 산정되었고, 경사 분포하중을 받을 때는 문의 하면에서 1,203 mm 지점에서 2.79 mm로 산정되었다. 따라서 경사 분포하중을 받을 때는 방폭문의 중앙에서 하측으로 36.8 mm 지점에서 최대 처짐이 발생하며 균일분포하중에 비하여 0.04 mm 감소하여 거의 차이가 없다고 할 수 있다. 따라서 등분포하중을 받을 때의 최대 탄성변위를 4개의 격자형 골조모델에 대하여 구하면 Table 3과 같다.

Table 3. Maximum elastic displacements for 4 models

(Unit: mm)

Basic model	Bias model	8-channel model	9-channel model
2.8	3.1	3.0	2.8

#### 4. 동적 최대변위 산정

방폭문에 폭발압력이 Fig. 7과 같이 시간에 따라 변하면서 작용할 때 동적 최대 처짐을 계산하기 위하여 Fig. 9과 같이 유한요소모델을 만들었다. 요소와 경계조건은 정적구조 해석과 동일하며 하중 조건은 Fig. 9(b)에서와 같이 전면 철판을 5개의 구간으로 나누어 각 구간별로 시간에 따른 변동 압력(Fig. 12)을 하중 경계조건으로 설정하였다.

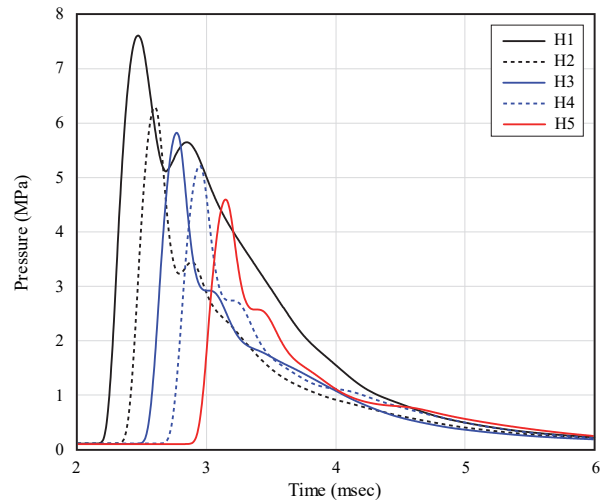


Fig. 12. Dynamic pressures at various heights for dynamic analysis

본 연구에서는 재료의 변형률 속도와 온도를 반영하는 Johnson-Cook 모델<sup>[17]</sup>을 적용한 식 (3)의 재료물성을 사용하여 동적해석(ANSYS Explicit Dynamic)을 수행하였다.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (3)$$

위 식에서

$$\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_{ref}, T^* = (T - T_{ref})/(T_m - T_{ref}) \quad (4)$$

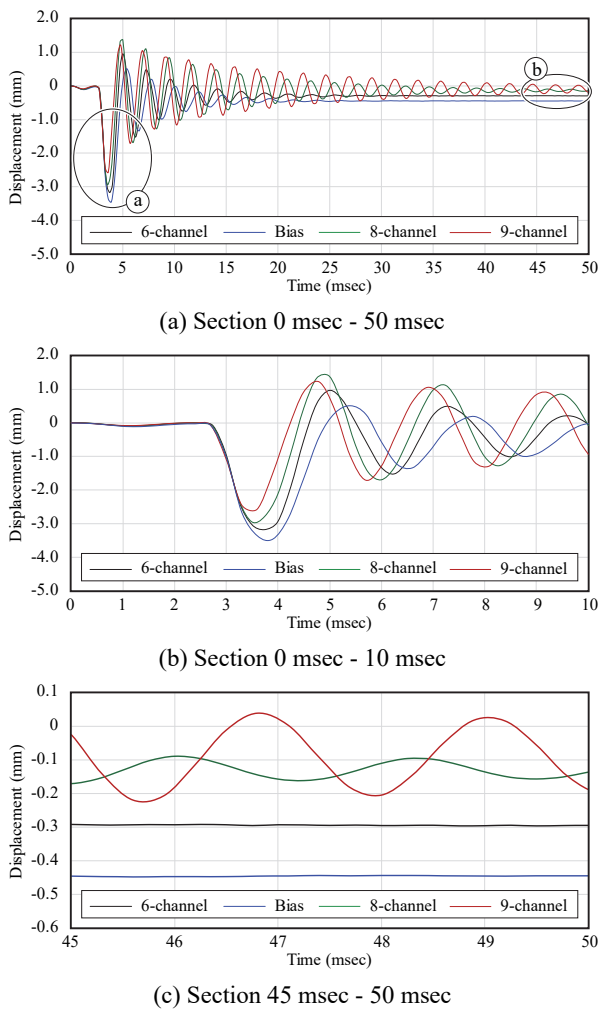
이며  $\dot{\epsilon}^*$ 은 무차원 변형률 속도,  $\dot{\epsilon}$ 은 변형률 속도(strain rate),  $\dot{\epsilon}_{ref}$ 는 기준 변형률 속도(reference strain rate),  $T^*$ 은 균질온도(homogeneous temperature),  $T$ 는 변형온도,  $T_{ref}$ 는 기준 변형온도(reference deformation temperature)이다.

식 (3)에서 방폭문 재료인 SS275의 Johnson-Cook 모델 재료상수들( $A, B, C, n, m$ )의 값은 Table 4와 같다.

**Table 4.** Material properties of Johnson-Cook model

Material constants & reference item	Value
Initial yield stress ( <i>A</i> )	286 MPa
Strain hardening constant ( <i>B</i> )	500 MPa
Strain hardening exponent ( <i>n</i> )	0.228
Strain rate constant ( <i>C</i> )	0.017
Thermal softening exponent ( <i>m</i> )	0.917
Melting temperature ( <i>T<sub>ref</sub></i> )	1,460 K
Reference strain rate ( $\dot{\epsilon}_{ref}$ )	1

각 모델에 대하여 동적해석을 실시하여 해석시간 50 msec 까지 방폭문 후면 철판 중앙부의 처짐량을 Fig. 13에 도시하였다.



**Fig. 13.** Behavior of maximum displacement of grid-type blast door

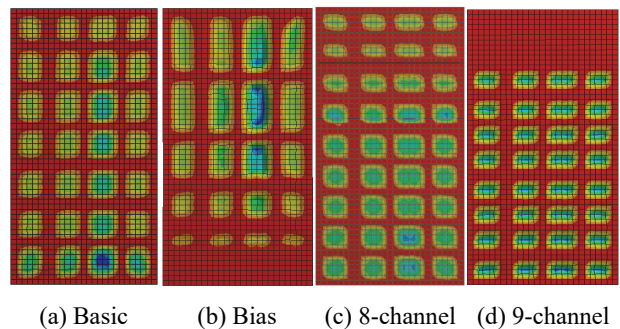
회전연성도와 변위연성도(식 (1) - 식 (2))를 계산하면 Table 5와 같으며 여기서 문의폭 *L*은 1,340 mm이다. 따라서 격자형 방폭문의 안전성능은 Table 1의 등급판정기준에 의해 A등급에 해당한다.

**Table 5.** Comparison of rotational ductility ratio and displacement ductility ratio

Model	Result		
	Maximum displacement	Rotational ductility ratio	Displacement ductility ratio
Basic	3.2 mm	0.27°	1.14
Bias	3.5 mm	0.30°	1.13
8-channel	2.9 mm	0.25°	0.97
9-channel	2.6 mm	0.22°	0.93

## 5. 전면철판의 국부소성변형

폭발압력을 직접 받는 방폭문의 전면 철판은 폭발압력을 받은 후 골조 사이에서 국부적인 소성변형이 발생하는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 14). Basic 모델에서는 방폭문 하부의 압력이 크기 때문에 하부 첫 번째 격자에서 휨이 크게 남았다. Bias 모델은 상부의 격자 간격이 넓기 때문에 상부에서 소성 변형이 크게 발생했다. 8-channel 모델에서는 소성의 정도가 방폭문 전체에 걸쳐서 고르게 발생되었으며 9-channel 모델에서는 상부 골조에서 소성변형에 저항성이 커서 소성변형이 발생하지 않았다.



**Fig. 14.** Results of displacement distribution after dynamic simulation

Basic 모델의 전면철판에 path(p1 - p7, Fig. 9(a) 참조)를 설정하고 각 path에 대하여 처짐량을 Fig. 15에 도시하였다.

P1에서 최대 소성 처짐량이 약 6 mm로 가장 크게 발생했다. 상대적으로 폭발압력이 낮은 P7에서 1.5 mm로 처짐이 가장 적게 계산되었으며 소성 변형도 상대적으로 작게 발생했다.

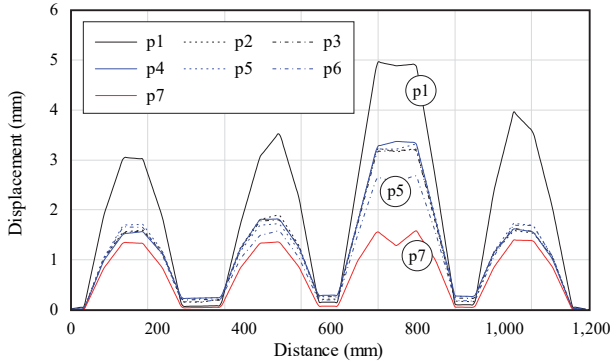


Fig. 15. Results of displacement at each path after dynamic simulation

Fig. 16은 4개 모델이 폭발하중을 받은 후 전면 철판 소성의 동적거동을 시뮬레이션으로 구한 후 처짐량을 도시한 것이다. 9-channel과 8-channel 모델에서는 최대 영구처짐량이 각각 1.6 mm, 2.4 mm 발생하였고, basic 모델과 bias 모델에서는 각각 5.2 mm, 6 mm가 발생하였다.

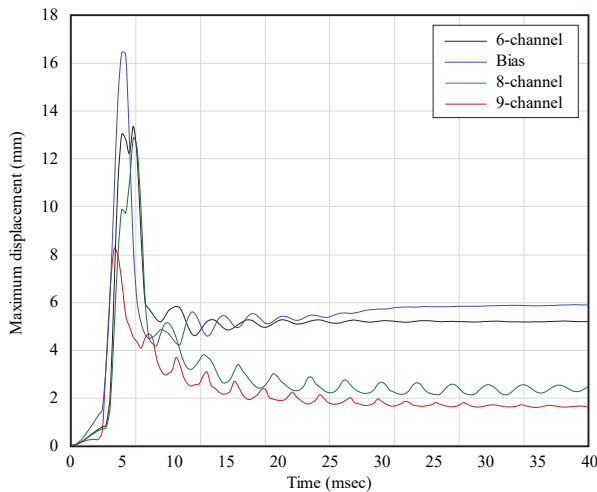


Fig. 16. Behavior of maximum displacement of four models

## 6. 결론

폭발 실증시험의 폭발압력 시뮬레이션과 골조형 방폭문의 설계에 대한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 폭발 실증시험에서 사용한 TNT 125 kg, 이격거리 5.66 m에서 40 bar 규격 방폭문 실증시험조건으로 적합하다.
- (2) 성능규격 40 bar 방폭문의 최대탄성변위를 구하기 위하여 정적 구조해석을 할 때 방폭문 전면 철판에 인가하는 폭발압력을 등분포 압력으로 하는 것은 경사분포 압력으로 하는 것과 결과값의 차이가 거의 없다.
- (3) 경사분포의 폭발하중을 받는 방폭문에서 동일한 격자개수를 사용하여 격자 간격만을 조정하는 편심구조에서는 최대소성변위가 증가하는 역효과가 발생한다.
- (4) 골조형 방폭문의 국부좌굴을 방지하기 위해서는 channel의 위치 변경보다 channel을 추가하는 것이 더 유효하다.

## 참고문헌(References)

- [1] Haskell, D.F. (1972) *Deformation and Fracture of Tank Bottom Hull Plates Subjected to Mine Blast* (AD 750 329), Army Ballistic Research Lab Aberdeen Proving Ground MD, USA.
- [2] Kiwan, A.R. (1982) Theoretical and Experimental Study of the Response of Clamped Rolled Homogeneous Steel Armor Plates to Close-in Blast Loading, *Proceedings of the Army Symposium on Solid Mechanics, 1982 - Critical Mechanics Problems in Systems Design*, Army Materials and Mechanics Research Center, USA, pp. 80-95.
- [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] 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.
- [6] Kim, G.D., Noh, M.H., Lee, J.Y., and Lee, S.Y. (2016)

- Dynamic Characteristics Stiffened Blast-Wall Structures Subjected to Blast Loading Considering High Strain-Rate Effects, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.2, pp.65-74 (in Korean).
- [7] Shim, C.-S. (2011) Performance Evaluation of Protective Structures and Systems, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol.59, No.4, pp.32-36 (in Korean).
- [8] Kim, Y.H. (2018) Korea Gas Safety Corporation Conducted Explosion Proof Test, *Energy Time News*, Korea (in Korean).
- [9] Korea Gas Safety Corporation (2014) *Guideline for Explosion Proof Door Test Execution*, Defense Installations Agency, Korea, p.18, pp.24-26 (in Korean).
- [10] 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, Vo.36, No.21, pp.1165-1172 (in Korean).
- [11] US Department of Defense (2008) *Unified Facilities Criteria: Structures to Resist the Effects of Accidental Explosions* (UFC 3-340-02), USA, p.77, 80, 87, 89, 90.
- [12] Krauthammer, T. (2008) *Modern Protective Structures*, Taylor & Francis Group, USA.
- [13] ANSYS (2012) *ANSYS Autodyn, Ver. 14*, ANSYS Inc., USA.
- [14] Zukas, J.A. (2004) *Introduction to Hydrocodes*, Elsevier, USA, p.313.
- [15] Park, J.P. (2011) *Evaluation of Blast Resistance Performance with the Columns of Tall Building Using Computational Numerical Analysis*, Master's Thesis, Konkuk University, Korea, pp.12-13 (in Korean).
- [16] 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).
- [17] Meyers, M.A. (1994) *Dynamic Behaviour of Materials*, John Wiley & Sons, USA.

---

**요 약** : 40 bar 규격의 방폭문의 폭발 실증시험에서 TNT 125 kg과 이격거리 5.66 m를 적용한다. 이 조건에서 격자형 방폭문을 설계하기 위하여 Autodyn을 사용하여 폭발하중을 산정하고 폭발실증시험결과와 비교하여 타당성을 입증하였다. 방폭문 실증시험의 폭발하중의 특성을 분석하여 격자형 방폭문 골조설계에 반영하였다. 4가지 격자구조의 방폭문에 대하여 정적 구조해석을 수행하여 방폭문의 최대탄성변위를 산정하고, 동적해석을 수행하여 최대 변위를 산정하여 방폭문의 성능을 평가하였다. 전면 철판의 국부파손에 취약성을 해결하기 위하여 골조격자의 배열을 변경하여 국부파손의 방지할 수 있는 골조형 방폭문에 대한 설계 방향을 제시하였다.

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

---