

방폭패널을 활용한 철근콘크리트 구조물의 폭압저감능력 실험적 평가

Experimental Evaluation of Internal Blast Resistance of Reinforced Concrete Structures using Blast Resistance Panels

심보훈* · 김국주** · 김춘호*** · 박상우**** · 백장운***** · 박영준*****

Sim, Bohoon*, Kim, Kukjoo**, Kim, Chunho***, Park, Sang-woo****, Baek, Jang-woon*****,
and Park, Youngjun*****

Abstract

Blast loading varies based on the location of the explosion. Furthermore, blast loading can be classified into unconfined explosions and confined explosions. Many studies have evaluated blast resistance performance based on unconfined explosions, focusing on military applications. However, there is a paucity of studies considering confined explosions. Given that confined explosions are significantly different from unconfined explosions, full-scale field experiments are necessary for the development of numerical models. Therefore, in this study, the performance of blast resistance panels was evaluated as a method for reducing explosion pressure in facilities such as underground ammunition storage. Two structures were manufactured using normal-strength and high-strength concrete, and 5.9 kg of TNT was blasted internally. The experimental results confirmed that the maximum acceleration could be reduced by 28.87% and 61.65% in the normal-strength and high-strength concrete structures, respectively, when using a blast resistance panel.

Key words : Blast Loading, Confined Explosion, Reflected Pressure, Blast Resistance Panel

요 지

폭발하중은 폭발위치에 따라 구조물에 작용하는 하중이 달라진다. 폭발현상은 크게 비구속 폭발(Unconfined explosion)과 구속 폭발(Confined explosion)로 구분할 수 있다. 외부폭발하중에 따른 방폭성능 평가는 군을 중심으로 많은 연구가 진행되어 왔으나, 내부폭발에 대한 연구는 상대적으로 적게 이루어졌다. 구조물 내부에서의 폭발현상은 외부 폭발현상과 매우 다르기 때문에 수치해석 등 모델 개발에 있어서 실증실험이 반드시 필요하다. 이에 본 연구에서는 군의 탄약고 등 폭발물을 저장하는 시설에 대해 폭압 저감 방법으로 방폭패널의 효과를 평가하였다. 이를 위해 일반 및 고강도 콘크리트를 이용하여 실험체 2개를 제작 후 TNT 5.9 kg을 내부폭파 시켰다. 그 결과 방폭패널을 통해 일반 및 고강도 구조체에서 최대 진동가속도를 각각 28.87%, 61.65% 감소시킬 수 있는 것을 실험적으로 확인하였다.

핵심용어 : 폭풍파, 구속폭발, 반사압력, 방폭패널

*정회원, 육군공병학교 교관(E-mail: simbo70@naver.com)

Member, Instructor, Korea Army Engineer School

**정회원, 육군사관학교 토목환경공학과 조교수(E-mail: klauskim@ufl.edu)

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental Sciences, Korea Military Academy

***중부대학교 토목공학과 교수(E-mail: chkim@joongbu.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Joongbu University

****정회원, 육군사관학교 토목환경공학과 조교수(E-mail: ptstwt@mnd.go.kr)

Member, Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental Sciences, Korea Military Academy

*****육군사관학교 토목환경공학과 조교수(E-mail: baekjw@mnd.go.kr)

Assistant Professor, Department of Civil Engineering and Environmental Sciences, Korea Military Academy

*****교신저자, 정회원, 육군사관학교 토목환경공학과 교수(Tel: +82-2-2197-2955, Fax: +82-50-4087-0507, E-mail: Parky@mnd.go.kr)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Civil Engineering and Environmental Sciences, Korea Military Academy

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

폭발물은 군이나 가스, 소방 등 특수한 업역에서 다루는 분야로 여겨져, 민간에서는 폭발에 대한 위협이나 방호에 대한 경각심이 많이 낮춰진 경향이 있다. 한편, 탄약고 등 폭발의 잠재적 위험이 있는 군사시설은 본래 인구 밀집 지역과 이격되어 도시 외곽에 설치되었다. 하지만, 도시화가 가속화되면서 도시는 점차 커지게 되고, 더불어 군사시설이 도심지역에 위치하게 된 사례가 빈번하게 발생하였다(Choi, 2009). 이에 따라 민간에 대해 군사시설의 우발적 폭발로 인한 피해 발생 위험도 점차 증가하고 있다(Buhin, 2016). 최근 카자흐스탄과 러시아에서 발생한 탄약고 폭발 사고가 민간에 큰 피해를 준 것도 같은 맥락이라 할 수 있다.

뿐만 아니라 수소에너지에 대한 관심과 증가하고 기술이 급격히 발전하면서 향후 군사시설 이외에도 수소탱크 등 잠재적 폭발 위험을 보유한 시설이 도심지역 내에 다수 위치하게 될 것으로 전망된다. 실제로 2019년 대한민국 강릉에서 산소 유입 및 정전기로 인한 폭발사고가 발생하여 8명의 사상자가 발생하기도 하였다. 이에 수소 및 가스 폭발의 특성과 위험성을 수치해석으로 모사하는 연구도 다수 진행된 바 있다(Baek et al., 2016; Pyo and Lim, 2019).

그러나 방폭에 대한 연구는 주로 외부에서 발생하는 폭발에 대해서 편향되어 수행되고 있으며, 탄약고 및 수소탱크 내부에서 발생하는 폭발에 대해서는 많은 연구가 진행되지는 않은 실정이다(Liao et al., 2019; Zhi et al., 2019). 특히, 방폭효과를 확실하게 평가할 수 있는 폭발 실증실험은 폭약 및 부지 확보 등 시험을 수행하기 위한 장벽이 매우 높아 소규모 폭약에 대해서 실험이 진행되거나 주로 방폭문 설계나 성능평가를 위해서 실험이 수행되고 있다(Kim et al., 2016; Shim and Lee, 2019; Yang et al., 2020).

이에 본 연구에서는 탄약고, 수소탱크 등 밀폐된 공간 내부에서 폭발이 발생하였을 때 외부로 전파되는 폭압을 저감시켜 피해를 감소시킬 수 있는 방안을 모색하였다. 이를 위해 구조물 내부 벽면에 강건재로 구성된 방폭패널을 설치하는 방안과 구조물을 고강도 철근콘크리트로 구성하는 방안을 검토하였으며, 각 방안에 대한 내부폭발 저감 효과를 폭발실증 시험을 통해 검증하였다.

1.2 연구범위 및 방법

구조물 내부에서의 폭발을 모사하기 위해 내부공간을 가지는 정육면체의 철근 콘크리트 구조물을 제작하고, 내부 정 가운데에서 TNT를 폭발시켰다. 구조물의 크기는 가로 2.5 m, 세로 1.5 m, 높이 2.5 m이며, 내부 공간의 크기는 가로 1.5 m, 세로 1.5 m, 높이 1.5 m로 구성하였다(Figs. 1, 2 참조). 구조체의 크기는 방폭패널의 크기(가로 1.5 m, 세로 0.75 m)를 고려하여 결정하였다. 철근 콘크리트 구조체

는 총 2개를 제작하였고, 하나는 목표 강도 24 MPa을 가지는 일반 콘크리트, 다른 하나는 목표 강도 80 MPa을 가지는 고강도 콘크리트를 재료로서 사용하였다. 또한 모든 구조체의 한쪽 면에만 방폭패널을 부착하여 내부 폭발 후 구조체 외부면에서 측정되는 가속도를 통해 방폭패널의 유무에 따른 폭압저감 정도를 평가하였다. 따라서 가속도는 총 4개의 외부면에서 측정하였고, 각 면의 조건은 Table 1과 같이 정리할 수 있다.

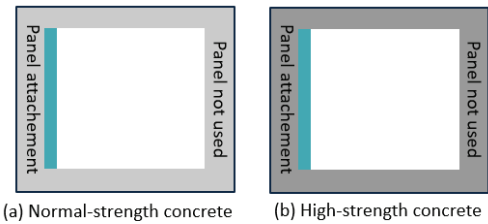


Fig. 1. Parameters of Test Specimens

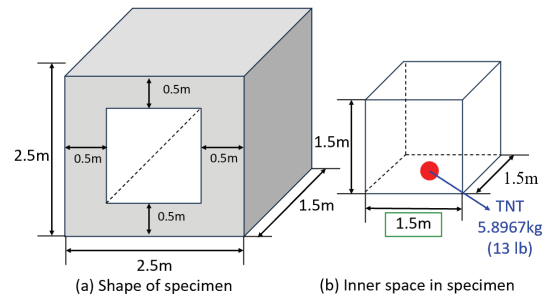


Fig. 2. Geometric Parameters of Test Specimens

Table 1. Experimental Condition of Installation Plane of Accelerometer

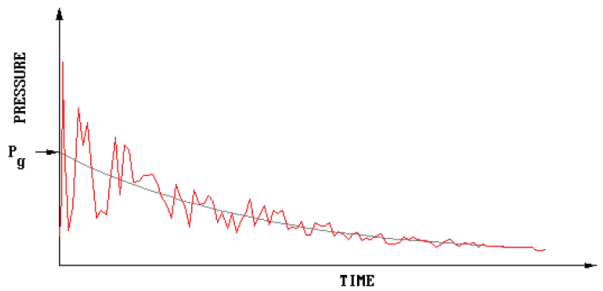
Installation Plane	Target Strength of Concrete	Installation of Explosion Proof Panel
Right side of 1st structure	24 MPa	Installed
Left side of 1st structure	24 MPa	Not installed
Right side of 2nd structure	80 MPa	Installed
Left side of 2nd structure	80 MPa	Not installed

2. 내부폭발압력저감 실험 구성

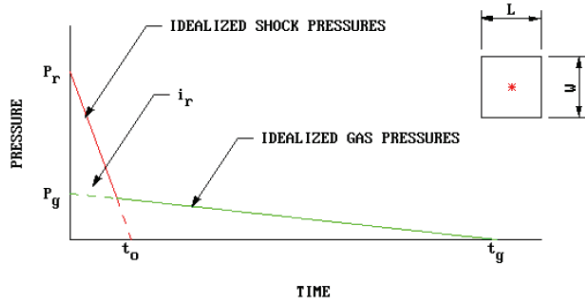
2.1 내부폭발하중 특성

폭발하중은 폭발위치에 따라 구조물에 작용하는 하중이 달라진다. 폭발현상은 크게 비구속 폭발(Unconfined explosion)과 구속 폭발(Confined explosion)로 구분할 수 있다. 여기서, 비구속 폭발은 대기 중 자유폭발, 대기 중 폭발 지표면 폭발로

구분할 수 있다. 구속폭발은 역시 완전배기 폭발(Fully vented explosion), 부분배기 폭발(Partially vented explosion), 완전 구속폭발(Fully confined explosion)로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 방폭패널을 이용한 부분배기 상태의 폭발압력 저감에 대해 실험하는 관계로 구속 폭발에 대해서 보다 자세히 알아보려고 한다. 구조물 내부에서 폭발이 발생할 때 작용하는 폭풍압은 Fig. 3에서 보는 바와 같이 두 단계로 구성된다. 폭발초기 짧은 시간(t_0) 내에 작용하는 반사파에 의해 높은 반사압력이 발생하는 단계와 그 후 구조물 내부의 여러 번 벽면에 반사된 파들의 상호작용으로 생긴 초과압력이 서서히 대기압 상태로 감소하는 단계가 존재하게 된다. 이처럼 밀폐된 공간에서 폭발이 일어날 경우 폭풍파가 구조물에 반사되는 반사압(Reflected pressure)과 입사압(Incident pressure)이 상호 부딪혀 복잡한 형태의 파형이 나타난다. 이러한 파형이 상당히 긴 시간 동안 작용하여 외부폭발과 달리 구조물에 상당한 피해를 유발할 수 있다 (Kim and Park, 2020).



(a) Pressure-time variation for a partially vented explosion



(b) Idealized shock and pressure

Fig. 3. Idealized Pressure-Time for Partially Vented Explosion (U.S. DoD, 2008)

폭발압력은 폭발위치에서부터 멀리 떨어질수록 작아지게 되며 구조물의 벽체, 지붕, 후면벽체 등 작용하는 지점과 입사되는 각도에 따라 상이하게 작용한다. 이러한 폭발하중을 이상화하여 구조물에 일정하게 작용한다고 가정하고 해석하는 것이 공학적으로 타당하다. 특히, Fig. 4와 같이 부분배기 폭발은 폭발압력이 외부로 배출되는 과정에서 내부에 압력이 여러 번 상호작용이 발생하기 때문에 실험적

평가를 통해 구조물이 받는 영향을 실험적으로 평가하는 것이 보다 정확할 것이다.

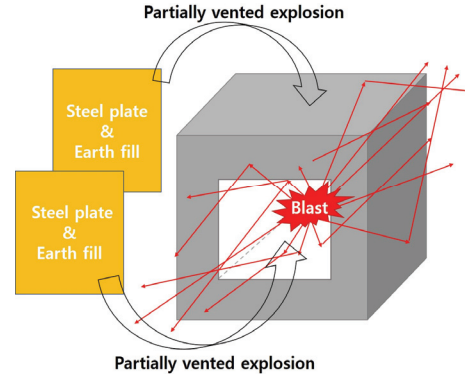


Fig. 4. Experiment Condition for Partially Vented Explosion

미 통합시설기준(Unified Facility Criteria, UFC) 3-340-02에서는 경험적 폭발압력 데이터와 박스형 폐쇄 구조물의 거동실험을 통한 이론적 해석절차를 제시하고 있다(U.S. DoD, 2008). 구조물의 조건과 폭발물의 위치에 따른 인자들이 결정되면(Fig. 5), 평균 폭발압력(Average peak reflected pressure)과 평균 단위 충격량(Scaled averaged unit reflected impulse, $i_r/W^{1/3}$)을 구할 수 있다(Fig. 6).

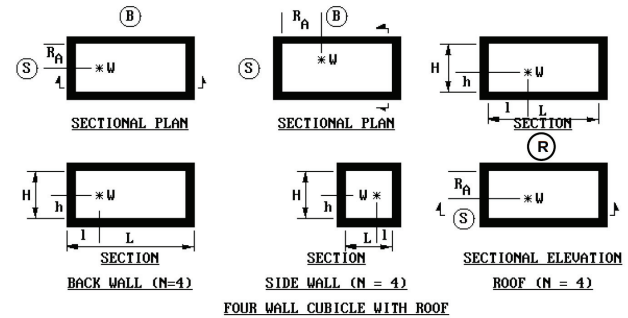
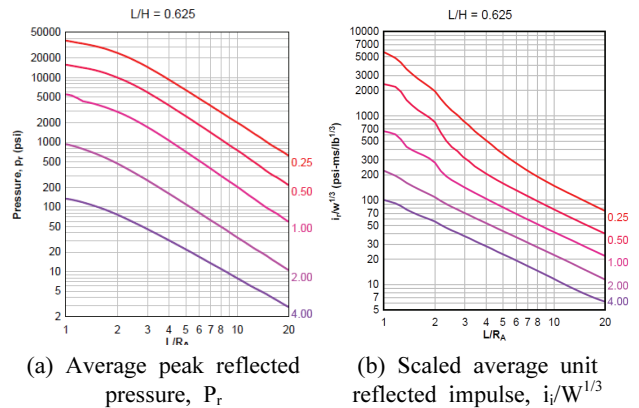


Fig. 5. Cubic Configuration and Parameters (U.S. DoD, 2008)



(a) Average peak reflected pressure, P_r

(b) Scaled average unit reflected impulse, $i_r/W^{1/3}$

Fig. 6. Examples of Average Reflected Pressure and Impulse Under Confined Explosion Condition (U.S. DoD, 2008)

2.2 폭발하중 시나리오 선정

탄약고나 수소탱크 등 본 연구에서 고려하는 잠재적 폭발 시설물들의 크기와 비교하여 실험체의 크기가 상당히 작기 때문에 TNT 양도 그에 따라 감소시켰다. 또한 구조체가 파손되거나 외부면에서 파쇄가 발생할 경우 외부면에 부착된 계측기가 탈락할 위험이 있다. 즉, 축소된 TNT 양과 그에 따라 외부면 파쇄가 발생하지 않도록 하는 두께를 동시에 고려하였다. 먼저 TNT 순폭약량은 152 mm 포탄을 기준으로 약 5.9 kg으로 선정하였으며, Technical Manual (TM)을 기준으로 폭발에 대한 미세균열 피해에 해당하는 두께를 설계하였다(Department of the Army, 1986). 설계 결과 약 0.5 m의 두께로 실험체를 제작하였다.

또한 밀폐된 공간을 모사하기 위해 계측기가 설치되지 않은 면의 개구부를 3 mm 철판을 고정시켜 밀봉하였으며, 내부폭발 하중을 어느 정도 견디기 위해 철판 바깥으로 흙을 성토하였다.

2.3 실험체 제작

내부 폭발에 대한 폭압 저감효과를 파악하기 위하여, 패널 사용여부(패널사용/패널 미사용)와 콘크리트의 강도(일반 강도 콘크리트/고강도 콘크리트)를 변수로 하였다.

콘크리트 구조물의 크기는 2.5 m × 2.5 m × 1.5 m이며, TNT 설치 및 내부 폭발 공간에 해당하는 1.5 m × 1.5 m × 1.5 m 크기의 중공을 가졌다.

주철근은 터널 설계 시에 주로 사용되는 최소철근비로 배근되었다. 최소철근비는 콘크리트 강도의 함수이므로, 일반강도 콘크리트를 사용한 NSC의 철근비는 0.306% (D16@175 mm)이었으며, 고강도 콘크리트를 사용한 실험체 HSC의 철근비는 0.559% (D22@175 mm)이었다. 폭압방향으로 저항하기 위한 전단철근은 NSC와 HSC에 동일하게 D16@175 mm가 배근되었다. 전단철근의 배근을 위해 90°, 135° 교차 갈고리 상세를 사용하였다.

3. 내부폭발압력 저감 실험 절차

3.1 실험 부지 조건

실험은 육군 공병학교가 보유하고 있는 전남장성의 폭파 훈련장에서 수행하였다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 지반을 1.4 m 굴토하여 실험체를 안착하였다. 안착전 지반에 다짐용 모래를 포설 후 다짐을 실시하여 수평을 유지할 수 있도록 하였다. 폭발에 의한 센서의 이탈을 방지하기 위해 콘크리트 타설전 지그(Jig)를 매립하여 정확히 계측 할 수 있도록 하였다. 센서를 지그에 고정 후 보호덮개를 설치하여 센서의 손상 및 이탈을 방지하였다.

구속 폭발 중 부분배기 폭발(Partially vented explosion) 현상을 모사하기 위해서는 구속압력이 실험체 양단에 균등하게 작용하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 실험체 복토간

다짐용 모래를 이용 모래마대를 제작하여 양단에 균등하게 쌓았다. 이후 선별된 복토용 흙을 이용하여 균등한 토압이 발생할 수 있도록 성토작업을 실시하였다(Fig. 8).



(a) Acceleration jig (b) Acceleration location
Fig. 7. Sensor Locations



(a) Normal-strength concrete (b) High-strength concrete
Fig. 8. Explosion Test Setup

3.2 계측개요

계측은 앞서 언급한 바와 같이 총 4개의 외부면에서 폭발 시 발생하는 가속도를 측정함으로써 방폭패널 및 콘크리트 강도에 따른 폭압저감 정도를 평가하였다(Table 1). 가속도계는 DYTRAN사 3200B 모델을 사용하였으며, 최대 ±20,000 g까지 측정이 가능하였다. 가속도계는 총 4면에 2개씩 부착하여 총 8개를 설치하였으며, 각 면에서의 설치 위치는 벽체 중앙 높이의 1/4 지점과 3/4 지점이다. 계측기 설치를 위해 콘크리트 타설 전 고정 지그를 미리 매립하였으며, 지그를 통해 가속도계를 구조체 벽면에 고정하였다.

3.3 폭발실험 수행절차

폭발실험은 총 2회에 걸쳐 실시되었다. 1차 실험에서는 일반콘크리트 구조물에 대해서 폭파 후 계측정보를 확인하였다. 주변의 비산물과 지반의 진동이 안정화 된 것을 확인 후에 고강도 콘크리트 구조물에 대해 2차 폭파를 실시하였다. 2차 폭파 역시 주변의 비산물과 지반진동이 안정화 된 것을 확인 후에 폭파 전문교관에 의해 안전성을 확인 후 현장 확인을 실시하였다. Fig 9는 각각 일반과 고강도 콘크리트 구조체에 대한 폭파 현장사진을 보여준다.



(a) Normal-strength concrete (b) High-strength concrete

Fig. 9. Energy Release of Partially Vented Explosion

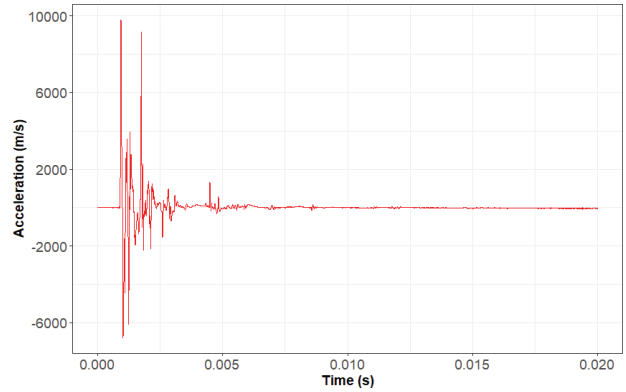
4. 내부폭발압력 저감실험 결과 및 분석

내부폭발하중을 받는 구조체의 거동은 가속도 게이지를 통하여 측정하였다. 현 지하형 탄약고 및 지하발파에 대한 안전기준 역시 지반가속도에 의해 설정되어있는데 내부폭발하중이 발생하는 콘크리트 구조물의 떨림 발생 정도를 분석하는 진동가속도의 개념과 비슷하다. Table 2를 통해 TNT 5.9 kg (13 lb)의 내부폭발하중이 가해질 때 최대 가속도는 일반 콘크리트 구조체의 경우 9,777.45 g의 가속도와 고강도 콘크리트의 경우 11,407.26 g의 가속도가 발생하였다. 반면, 방폭패널로 보강된 경우 일반콘크리트 구조체의 경우 6,945.95 g의 가속도와 고강도 콘크리트의 경우 4,374.89 g의 가속도가 각각 발생하였다. 방폭패널이 설치되었을 때 일반 및 고강도 구조체의 충격가속도량은 각각 28.87%, 61.65% 감소되었다(Fig. 10).

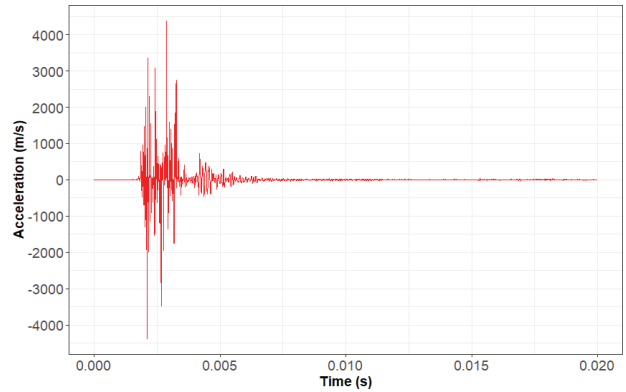
Table 2. Summary of Maximum Acceleration

Type	Acceleration results (g)	
	Panel not used	Panel attachment
NSC	9,777.45	6,654.95
HSC	11,407.26	4,374.89

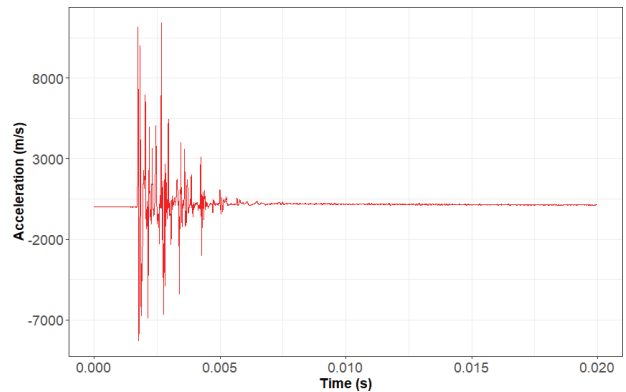
충격가속도가 0으로 수렴하는 시간은 대략 5 msec로 비구속 폭발보다 작용시간이 매우 긴 것을 확인할 수 있으며, 실험체 내벽을 통해 강한 충격력이 작용한 것으로 추정할 수 있다. 특히, 방폭패널이 설치된 벽체에는 첫 번째 peak보다 그 이후에 발생하는 peak가 더 크게 발생하는 것을 확인할 수 있어 초기 폭발하중을 감소시켜 주는 것을 확인할 수 있다. Fig. 11은 최종 실험결과를 보여주는데 일반콘크리트의 경우 구속폭발압력에 의해 상부 구조물이 완전히 파괴된 반면 고강도 콘크리트의 경우 사인장 균열과 휨균열은 발생하였으나 붕괴에 이르지 않았다.



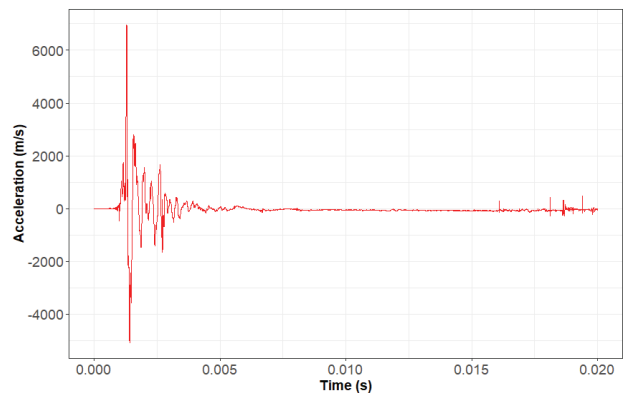
(a) NSC without blast panel



(b) NSC with blast panel



(c) HSC without blast panel



(d) HSC with blast panel

Fig. 10. Acceleration Results



(a) Normal-strength concrete (b) High-strength concrete

Fig. 11. Test Results

5. 결론

본 연구에서는 군의 탄약고나 민간의 수소탱크 저장소 등 폭발물을 저장하는 구조물의 폭발에 대한 안전성을 확보하기 위한 실험을 실시하였다. 각종 폭발물을 저장하는 구조물 내부폭발을 모사하기 위해 정육면체의 철근 콘크리트 구조물을 제작하고, 내부 정 가운데에서 TNT를 폭발시켰다. 구조물의 크기는 가로 2.5 m, 세로 1.5 m, 높이 2.5 m이며, 내부 공간의 크기는 가로 1.5 m, 세로 1.5 m, 높이 1.5 m로 구성하였다. 구조체 내부 한쪽 면은 방폭패널을 이용하여 보강하였으며, 방폭패널의 크기는 가로 1.5 m × 세로 0.75 m로 제작하였다. 철근 콘크리트 구조체는 총 2개를 제작하였으며, 콘크리트 구조체의 강도는 일반 및 고강도 콘크리트로 각각 24 MPa, 80 MPa를 사용하였다. 폭약량은 TNT 5.9 kg으로 152 mm 포탄의 순폭약량을 기준으로 선정하였다. TNT 5.9 kg은 미군 기술교범 Technical Manual (TM)을 기준으로 폭발에 대한 미세균열 피해에 해당하는 폭약량이다. 폭발하중에 따른 충격가속도는 가속도계를 이용하여 측정하였으며, 방폭패널에 의한 폭압 저감능력을 평가하였다. 이번 실증 내부 폭발실험을 통하여, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 방폭패널에 의한 최대 충격가속도 저감효과는 일반 및 고강도 구조체에서 각각 28.87%, 61.65%로 평가되었다.
- (2) 방폭패널이 설치되지 않았을 경우에는 첫 번째 peak에서 최대 진동가속도가 측정되었으나, 방폭패널이 설치된 곳에서는 2회 이상의 peak에서 최대 진동가속도가 측정되었다.
- (3) 콘크리트 구조체의 방폭능력은 미군 TM 기준으로 미세균열 영역에 해당하게 설계하였으나, 일반콘크리트 구조체는 상부구조물이 완전파괴 되었다. 이를 통해 지하나 반 지하상태의 구속폭발 위험성을 다시 한 번 확인 할 수 있었다.
- (4) 충격가속도가 0으로 수렴하는 시간은 방폭패널의 유무에 따라 증감을 특정할 수 없었다. 이는 구조체 자체의

Damping 효과뿐만 아니라 구조체가 설치되어 있는 지반의 영향이 반영된 결과로 분석된다.

본 연구는 실물폭과 데이터를 구축하기 위해 실시한 매우 귀중한 연구결과로 향후 국방·군사시설 및 민간의 폭발안전에 효과적으로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 육군사관학교 핵·WMD 방호연구센터 연구지원(2020년 군사학술과제지원사업)과 육군공병학교의 실험 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- Department of the Army. (1986). *Fundamentals of protective design for conventional weapons*. Technical manual (TM) 5-855, Washington D.C., U.S.
- Baek, J.H., Lee, H.J., and Jang, C.B. (2016). Comparison of H₂, LNG, and LPG explosion characteristics in a limited space using CFD simulation. *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 20, No. 3, pp. 12-21.
- Buhin, L. (2016). Integrated cooperation on explosive hazards program in central Asia. *Journal of Conventional Weapons Destruction*, Vol. 20, No. 2, Article 8. Retrieved from <https://commons.lib.jmu.edu/cisr-journal/vol20/iss2/8>
- Choi, M.J. (2009). *Direction of military environment and construction project regarding moving corps*. Master thesis, Kyong Won University.
- Kim, K.J., and Park, Y.J. (2020). Development of design considerations as a sustainability approach for military protective structures: A case study of artillery fighting position in South Korea. *Sustainability*. Vol. 12, No. 16, 6479. doi:10.3390/su12166479
- Kim, N.H., Park, K.J., and Lee, K.O. (2016). A study on structural stability of blast door by blast pressure. *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 31, No. 3, pp. 8-15.
- Liao, Z., Tang, D., Li, Z., Xue, Y., and Shao, L. (2019). Study on explosion resistance performance experiment and damage assessment model of high-strength reinforcement concrete beams. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 133, 103362. doi: 10.1016/j.ijimpeng.2019.103362
- Pyo, D.Y., and Lim, O.T. (2019). A study on explosive hazardous areas in hydrogen handling facility. *Trans.*

- of *Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 30, No. 1, pp. 29-34.
- Shim, K.B., and Lee, T.S. (2019). Standard procedure for blast doors product certification using numerical simulation. *Journal of Standards, Certification and Safety*, Vol. 9, No. 4, pp. 1-17.
- U.S. Department of Defense (DoD). (2008). *Structures to resist the effects of accidental explosions*. Unified Facilities Criteria (UFC) 3-340-02, US Army Corps of Engineers, Naval Facilities Engineering Command (ed) Air Force Civil Engineer Support Agency, Dept of the Army and Defense Special Weapons Agency, Washington DC.
- Yang, G., Huang, W., and Feng, S. (2020). Antiexplosion performance of engineered cementitious composite explosion-proof wall. *Advances in Materials Science and Engineering*, Vol. 2020, Article ID 1921960. doi:10.1155/2020/1921960
- Zhi, X.D., Qi, S.B., and Fan, F. (2019). Temporal and spatial pressure distribution characteristics of hemispherical shell structure subjected to external explosion. *Thin-Walled Structures*, Vol. 137, pp. 472-486.

<i>Received</i>	September 3, 2020
<i>Revised</i>	September 4, 2020
<i>Accepted</i>	September 18, 2020