



# 폭발 후 화재하중 시나리오에 따른 2방향 프리스트레스트 콘크리트 패널부재의 손상도 평가

최지훈<sup>1)</sup> · 최승재<sup>1)</sup> · 김태균<sup>1)</sup> · 김장호<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>연세대학교 사회환경시스템공학부

## Damage Evaluation of Bi-directionally Prestressed Concrete Panels under Blast-fire Combined Loading

Ji-Hun Choi,<sup>1)</sup> Seung-Jai Choi,<sup>1)</sup> Tae-Kyun Kim,<sup>1)</sup> and Jang-Ho Jay Kim<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University, Seoul 13722, Rep. of Korea

**ABSTRACT** Frequent terror or military attack by explosion, impact, fire accidents have occurred recently. These attacks and incidents raised public concerns and anxiety of potential terrorist attacks on important infrastructures. However, structural behavioral researches on prestressed concrete (PSC) infrastructures such as Prestressed Concrete Containment Vessel (PCCV) and Liquefied Natural Gas (LNG) storage tanks under extreme loading are significantly lacking at this time. Also, researches on possible secondary fire scenarios after terror and bomb explosion has not been performed yet. Therefore, a study on PSC structural behavior from an blast-induced fire scenario was undertaken. To evaluate the blast-fire combined resistance capacity and its protective performance of bi-directional unbonded PSC member, blast-fire tests were carried out on 1,400 mm × 1,000 mm × 300 mm PSC specimens. Blast loading tests were performed by the detonation of 25 kg ANFO explosive charge at 1.0 m standoff distance. Also, fire and blast-fire combined loading were tested using RABT fire loading curve. The test results are discussed in detail in the paper. The results can be used as basic research references for related research areas, which include protective design simulation under blast-fire combined loading.

**Keywords** : extreme loading, bi-directional unbonded PSC, blast loading, fire loading, blast-fire combined loading

### 1. 서 론

한국형 표준원전(OPR)을 기반으로 한 수출전략형 신형 원전(APR) 격납건물의 구조적 안전성이 검증되었음에도 불구하고, 구 소련 체르노빌 사고로부터 각인되어 있는 사회적인 불안감과 테러 및 전쟁 발생가능성의 증가로 사회기반 구조물의 높은 안전성에 대한 기대가 점차 증가하고 있다. 특히, 상대적으로 폭발 및 고온에 취약한 2방향 프리스트레스트 콘크리트(Prestressed Concrete, PSC)가 적용된 원전 격납건물(Prestressed Concrete Containment Vessel, PCCV)의 경우 극한하중에 대한 손상 파괴메커니즘 및 안전성 검토에 대한 연구의 중요성이 부각되고 있다. 따라서 원자력 내·외부 폭발 등 폭발하중에 대한 원전격납건물의 붕괴 및 손상으로 인한 사고를 방지하기 위하여 발생 가능한 폭발 및 화재

극한 시나리오에 대하여 방재개념이 도입된 원전 격납 구조물의 설계가 이루어져야 한다. 실제 폭발 및 화재와 같은 극한하중은 집약된 에너지의 급작스런 방출로 인해 높은 압력을 가지는 파(wave)를 형성하고, 이는 주변의 구조물이나 인명에 치명적인 손상을 가하게 된다. 이와 같은 높은 압력을 가지는 극한하중은 구조물에 매우 짧은 시간동안 작용하여 구조물의 갑작스런 붕괴와 함께 대량의 인명피해를 발생시키게 된다.<sup>1-5)</sup>

국내 폭발, 화재 등 인적재해에 대한 연구는 1990년대부터 소방방재청, 방재학회, 국립방재연구소 등의 연구소 및 학계에서 본격적으로 시작되었으나 대부분 재해에 대한 방재대책 및 대피대책에 대한 연구만이 수행되었다. 불확실성을 가지고 있는 폭발, 화재 등의 극한하중의 경우 Fig. 1과 같이 화재에 비하여 발생건수는 1/6 이하로 적게 발생하나, 시설물 파괴 등에 의한 재산피해액은 화재 피해규모와 유사하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구에서 다루고자 하는 폭발, 화재하중을 받는 2방향 PSC 원전격납건물에 대한 복합손상 관련 연구는 몇몇 연구자에 의해 시도되고 있으

\*Corresponding author E-mail : jjhkim@yonsei.ac.kr  
 Received November 16, 2016, Revised January 12, 2017,  
 Accepted March 20, 2017  
 ©2017 by Korea Concrete Institute

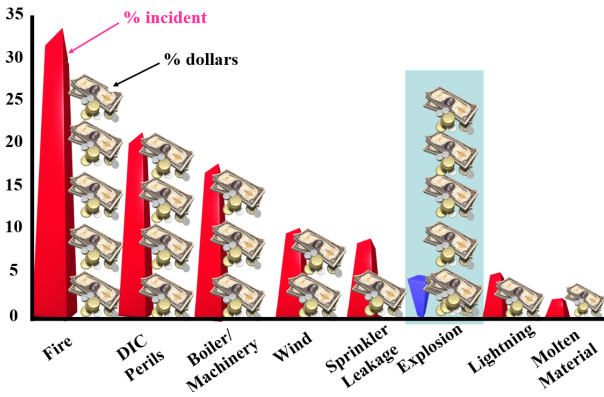


Fig. 1 Damage occurrence by blast and fire load

나 현재까지 지엽적으로만 이루어지고 있으며, 국내 원전 설계 시 극한하중에 대한 방재설계를 고려하고 있지 않는 실정이다. 과거 연구에 의해 도출된 PCCV 극한하중에 관한 실험 데이터는 보안상의 이유로 거의 공개되지 않고 있으며, 구조 요구사항에 대한 민간 구조물 설계기준의 명확한 기준이 나 규격이 없는 실정이다.<sup>6-10)</sup>

PCCV에 폭발 및 화재하중과 같은 특수하중을 가할 경우, 매우 빠른 시간동안 하중이 작용하기 때문에 실제 상황을 모사하는 실험 수행이 불가능하거나 실험이 가능하더라도 높은 변형률 속도로 인하여 데이터 계측이 쉽지 않다. 또한, 고가의 실험 비용, 실험을 수행할 수 있는 장소, 하중 재하 방법 등 실험적 제약조건으로 인해 반복실험이 불가능하고 실험 수행 또한 원활하지 않다. 그러므로 PSC 구조물의 손상도 평가를 수행할 경우 해석적으로 밖에 접근할 수가 없으며, 이를 위해서는 정밀해석기법(High Fidelity Physics Based, HFPB)의 구축이 반드시 필요하다. 정밀해석기법은 high strain rate에 적합한 재료특성, 실제 가해지는 폭발하중과 구조물의 동적 거동과 같은 물리적 현상을 신뢰성 있게 묘사할 수 있으며, 전체 구조물의 고속 변형율에 적합한 경계조건을 선정하여 실제 실험수행이 불가능한 경우, 유일한 가상의 실험도구로 활용할 수 있기 때문에 실제 폭발하중에 대한 콘크리트 구조물의 거동을 예측할 수 있다. 이러한 정밀해석은 LS-DYNA와 같은 explicit time integration을 기반으로 한 해석이 요구되지만 실제 폭발과 화재 실험에 따른 결과를 통해 얻어진 데이터와 calibration이 되지 않는다면 정밀해석의 신뢰성이 떨어지게 된다.

따라서, 본 연구에서는 정밀해석과의 calibration을 위해, 정밀 계측시스템을 구축하고 구조적인 변수제약조건을 최소화하여 원전격납구조물의 벽체를 대상으로 1,400 × 1,000 × 300 mm 크기의 2방향 PSC 패널부재를 제작하여 폭발, 화재, 폭발 후 화재 저항성능을 분석하기 위한 복합극한하중 실험을 수행하고자 한다. PSC 부재에 복합극한하중이 작용할 경우, 시편의 파괴형태, 에너지흡수력, 변위 및 긴장력 손실, 가속도 변화, 화재 시 콘크리트 부재에 전달되는 열전달 분포, 표면 손상 등 시편의 내화성능을 종합적으로 분석하여 FEM에서 사용할 수 있는 정밀데이터를 확보하고자 한다.

## 2. 폭발 후 화재 복합손상실험 구성

### 2.1 다양한 극한화재 시나리오

터널 및 지하구조물에서 다양한 화재가 발생 시 유형을 확인하기 위해 국제적인 연구가 진행되었다. Fig. 2와 같이 Cellulosic curve는 KS F 2257, ISO 834 등에 규정되어 있는 표준시간가열온도곡선으로, 실물 크기의 모형 화재실험을 여러 번 행하여 얻은 온도측정 결과를 기초로 결과시간과 온도변화와의 관계를 나타낸 곡선이다. 5분 이내에 450°C 이상으로 급속도로 올라가나 화재 발생 후 140분까지 완만한 곡선을 보이고 있는 형태이다.

RWS (Rijkswaterstaat) 곡선은 1979년 네덜란드의 TNO에 의해 Rijkswaterstaat tunnel에서 수행된 실험 결과에 의한 것이며, 최악의 상황에 따른 계획안으로 연료나 석유를 채운 유조차에 화재가 발생했을 시 열방출율이 300 MW의 화재하중을 가지며, 120분 동안 지속되는 화재에 바탕을 두고 있다. 이 곡선은 다른 온도곡선처럼 5분 이내 1,000°C 이상 상승하여 단계적으로 1,350°C의 최고온도에 도달 후 천천히 감소하는 형상으로 유조차내의 연료 및 석유에 의한 단계적 화재온도에 기인하고 있다.

마지막으로 RABT (Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) 곡선은 Eureka 499 (1990-1992) 프로젝트의 결과로서 독일에서 개발되었다. 이 RABT 곡선은 5분 내 1,200°C에 도달하여 30분간 지속된 후 110분 동안 냉각되는 형상을 보이고 있으며, 터널 내 자동차, 대형 트레일러 및 기차와 지하철에 대한 실물화재실험에서 얻어진 결과를 토대로 만들어진 시간가열온도곡선이다. Eureka 499 프로젝트에서 실험 대상의 최고 온도는 1,000°C 이하이지만 최고온도가 지속된 시간은 최소 15-80분까지 지속되며, 이러한 결과에 따라 RABT 곡선에서 30분간 지속되는 최고온도는 특정한 경우에 따라 60분까지 연장될 수 있다. 또한, 냉각되는 시간도 상황에 따라 달라지는데 일본에서는 냉각되는 시간을 120분으로 하고 있다.

최근 스웨덴의 Runehamar tunnel (2003)에서의 실물실험

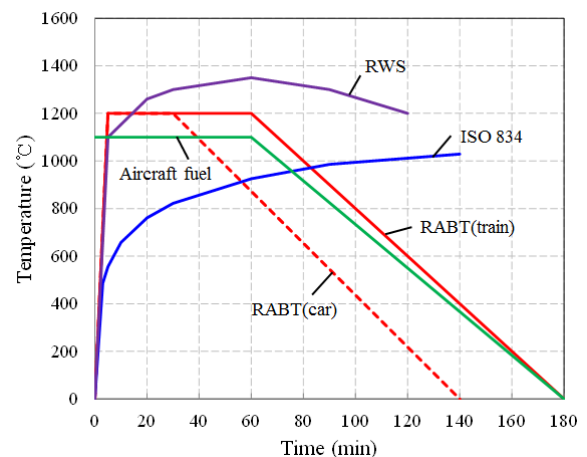


Fig. 2 Fire scenario curves (RABT, RWS, ISO 834)

결과는 Fig. 2에서와 같이 RABT curve와 같은 형상을 보였고, 최고온도는 RWS와 유사한 온도를 보였다. 이와 같이 종류별 시간가열온도곡선 및 Runehamar 실험결과를 살펴보면 온도곡선형상 및 최고온도는 RABT 및 RWS 온도곡선과 유사한 결과를 보이고 있지만 화재시간은 RABT curve와 유사함을 알 수 있다.<sup>4,11,12)</sup>

본 연구에서 폭발로 인한 화재는 발화속도가 매우 빠르고 통상적으로 항공유와 같은 유류는 초기시점부터 최대온도가 1,100°C 이상 달한다고 가정하고 있다.<sup>12)</sup> 따라서 모사하고자 하는 화재시나리오와 유사한 독일 교통성 도로건설부가 규정하고 있는 RABT 화재시나리오로 설정하여 실험을 수행하였다.

### 2.2 폭발 후 화재하중 시나리오 선정

2방향 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 폭발 후 화재에 의한 복합손상을 확인하기 위하여 APR-1400 원전격납구조물을 대상으로 외부 충격압력하중에 대하여 다음과 같은 시나리오를 구성하였다. 국내 원전구조물의 대부분은 극한하중을 고려한 설계가 부족하지만, 프랑스 Flamatom사에서 설계하여 외부 충격압력하중에 대하여 가상의 압력파를 견딜 수 있어야 하며, 350 m/s의 속도와 0.005 MPa, 300 ms 동안 폭발에 대한 극한하중 설계가 이루어진 울진 1, 2호기와 동일한 폭발시나리오를 구성하였다. 초기 충격량은 매우 작으나 300 ms 동안 지속되므로 동일한 충격량에 따른 장약량을 ConWEP 프로그램을 통해 산정하였으며, 실제 폭발하중 시나리오를 실험에 적용시키기 위하여 폭발물의 종류와 이격거리는 실험조건에 맞추어 순수과압을 가하기 위해 ANFO 25 kg을 시편으로부터 1.0 m 높이에서 폭발시키도록 선정하였다.<sup>13)</sup> 또한 동시에 폭발로 인한 화재가 발생한다는 가정으로 폭발 후 화재시나리오를 구성하였다. 실제 발생하는 폭발 후 화재는 극한복합하중이 연속적으로 발생하는 것이 일반적이나, 복합손상실험을 동시에 진행할 경우 실험 측정조건 및 실험장소의 제약과 센서 손상의 우려 등으로 인하여 본 연구에서는 실험적 제약조건으로 인해 폭발하중을 발생시킨 후 화재실험을 추가적으로 진행하는 방식으로 실험을 수행하였다. 다만 폭발실험과 화재실험을 분리진행하였을 경우, 이동 시 시편의 손상여부, 긴장력 손실, 온도, 습도 등 환경요인이 변하기 때문에 외적 요인을 줄이기 위하여 긴장력 측정, 균열 표기, 실험일정 등을 면밀히 확인하였다.

### 2.3 시편제작

폭발 후 화재저항성능을 검토하기 위해 실험적 조건에 맞추어 Fig. 3과 같이 1,400 × 1,000 × 300 크기로 선정하고, 철근콘크리트(RC), 프리스트레스트 텐던으로만 보강된 콘크리트(PSC), 프리스트레스트 텐던과 철근으로 보강된 콘크리트(PSRC, 일반적인 PSC), 세 가지 종류로 2방향 프리스트레스트 콘크리트 슬래브를 제작하였다. 선정된 대상구조물인 원

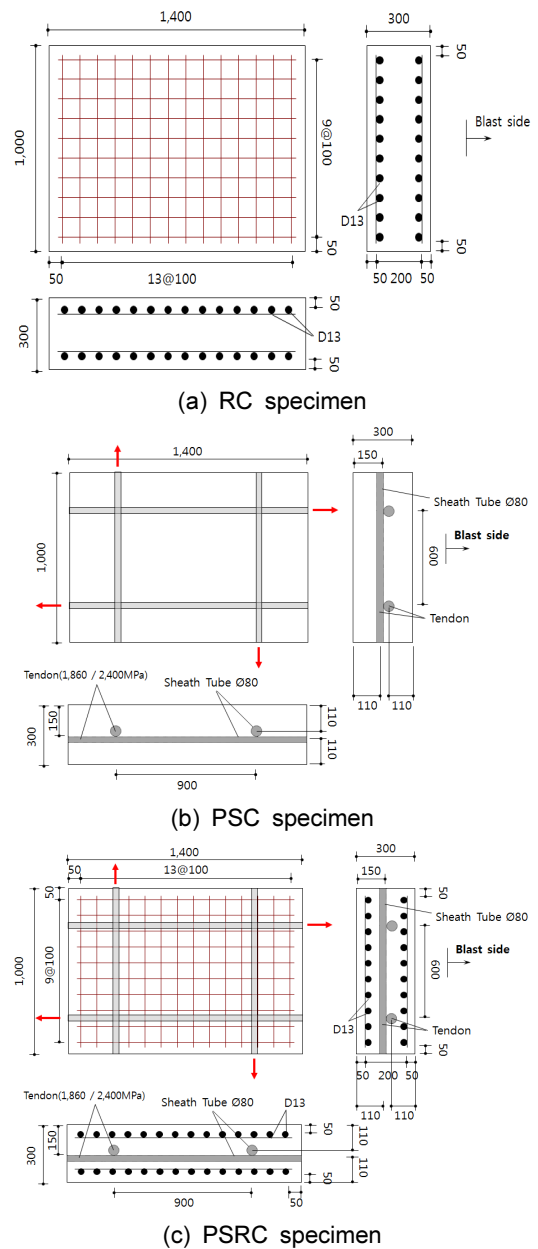


Fig. 3 Specimen geometries (unit: mm)

Table 1 Type of test specimens

Test type	Blast	Fire	Combined blast and fire
RC	1	1	1
PSC	2	2	2
PSRC	2	2	2

전격납건물 벽체를 모사하기 위하여 구조물과 동일한 철근비인 0.024, PS 텐던비는 0.0107을 적용하고, 각 하중별로 손상을 받은 시편을 비교 검토하기 위해 Table 1과 같이 폭발, 화재, 폭발 후 화재시편으로 나누어 제작하였다. 다만, 원전 구조물 설계 시 화재나 방사능 누출방지를 위해 포함되어 있는 라이너플레이트는 본 연구에서는 극한상황에 따른 부재 거동을 모사하기 위하여 제외하였다. RC, PSRC 시편의 경

우 D13 철근을 사용하여 100 mm 간격으로 양단배근 하였으며, 대상구조물의 콘크리트 강도와 동일하도록 40 MPa 강도의 콘크리트 배합을 사용하였다. PS 콘크리트에 사용된 PS 긴장재는 실제 원전격납건물에 적용되어 효율적인 구속효과를 발휘시킬 수 있는 항복강도 1,600 MPa, 극한강도 1,730 MPa, 단위중량 1.101 kg/m<sup>3</sup>의  $\phi$  15.2 mm PS 강연선을 사용하여 긴장하였다. 원전격납건물은 비부착 포스트텐션 콘크리트이므로, 대상구조물 또한  $\phi$  80 mm 쉬스관을 설치하여 긴장 후 그라우팅을 하지 않은 비부착 프리스트레스트 콘크리트로 제작하였다. 긴장 시 PS 강연선의 주요 위치에 변형률게이지를 부착하여 긴장력을 계측하였으며, 실제 계측결과 520-610 kN의 긴장력이 도입되었다.

## 2.4 폭발실험 구성

폭발저항성능을 검토하기 위한 실험은 국방과학연구소 다락대시험장(ADD)에서 수행하였으며, 대기 중 자유폭발을 유도할 때, 폭발압력의 간섭효과 및 회절효과를 최소화하기 위하여 콘크리트 시편을 Fig. 4와 같이 지면과 동일한

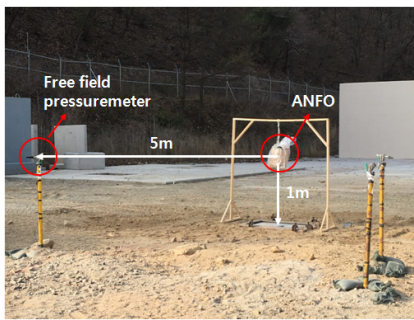


Fig. 4 Blast test setup

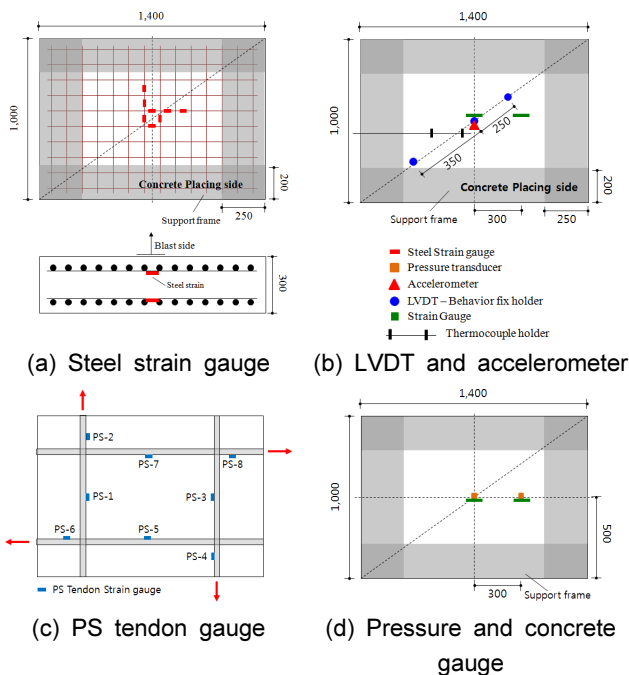


Fig. 5 Sensor locations of the concrete specimen

치에 거치시키고, 시편으로부터 1.0 m 높이에 ANFO 폭약을 설치하였다. 데이터는 Dewe 1201과 Dewe 2600을 통해 50-500 kHz의 샘플링 속도로 계측하였으며, 5 m 거리에서 대기 중 폭발입사압력(free field incident pressure)을 측정하였다. 또한, Fig. 5와 같이 시편의 상·하부면에 LVDT (Dynamic, residual)와 게이지를 설치하여 압력, 가속도, 변위, 변형률을 계측하였다.

## 2.5 화재실험 구성

RABT 화재시나리오는 5분 내에 1,200°C에 도달하여, 60분간 온도를 유지한 뒤, 120분간 온도가 감소하는 특성을 가지고 있다. 본 연구에서는 화재하중 시나리오를 모사하기 위해 RABT 화재시나리오를 적용하여 Fig. 6과 같이 수평 고온가열로를 이용하여 화재 및 폭발 후 화재실험을 수행하였다. LPG 가스로 콘크리트 시편의 한쪽 면에 가열을 가하는 시스템으로 한쪽 벽면에서 가열함과 동시에 냉각팬을 함께 운영함으로써 온도유지 및 온도 증가를 방지하고, 공기순환을 하는 역할을 수행하도록 한다. 콘크리트 시편의 박락 발생으로 인하여 하부 면에서 가열을 하는 방식이 아닌 옆면에서부터 가열이 이루어지는 방식이다. 따라서 폭발을 받은 면에 화재가 가해지도록 가열로 상부에 시편을 거치하였으며, 콘크리트 시편에 전달되는 열전달을 측정하기 위해 Fig. 7과 같이 폭발 면으로부터 50 mm, 100 mm, 150 mm, 250 mm 위치에 k-type 열전대를 시편 제작 시 설치하였다. Data acquisition으로는 Dewetron사의 DS-NET을 통해 측정하였다.

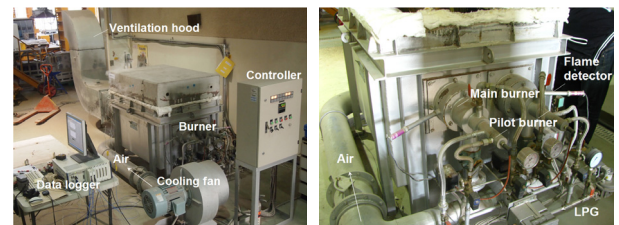


Fig. 6 Heating system

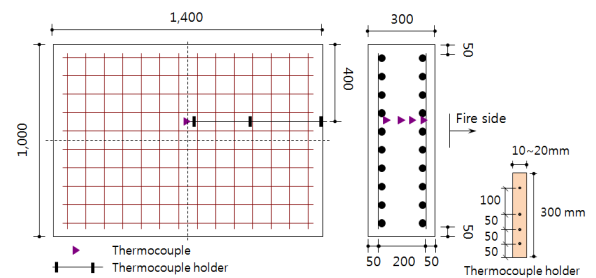


Fig. 7 Thermocouple locations



### 3. 폭발 저항성능 실험

본 연구에서는 폭발 후 화재하중에 의한 복합손상을 분석하기 위해 단일하중에 의한 폭발, 화재하중에 대한 손상도를 함께 비교·분석하고자 한다. 폭발하중은 ANFO 25 kg을 시편으로부터 1.0 m 이격시킨 후 폭발시켜 저항성능을 분석하였다.<sup>13)</sup>

폭발하중은 실험에서 볼 수 있듯이 폭발물이 매우 빠른 속도로 에너지를 분산하는 것을 볼 수 있었다. 특히, ANFO 폭약의 경우 화염의 형태가 비교적 작게 나타났지만 유독가스가 잔여된 것을 통해 주로 고온고압의 가스 형태로 에너지가 발산된다는 것을 알 수 있었다. Table 2는 폭발하중에 따른 결과를 정리하여 나타낸 표이다. UFC3-340-1에 기초한 무기산정프로그램 ConWEP을 이용하여 콘크리트 시편에 가해졌을 것이라 예상되는 폭발압력하중과 시편으로부터 5 m 떨어진 지점의 free field incident pressure 결과를 Fig. 8과 같이 비교한 결과, 대기 중 폭발압력은 ConWEP에 의해 예측된 결과에 비해 압력하중은 4.3%, 충격량은 6.12% 크게 발생하였다. 폭발압력 도달시간은 약 4.708 msec로 ConWEP에서 도출된 3.701 msec와 거의 유사하였으며, 지속시간 또한 폭발 당시 주변 환경이나 기상상황에 따라 미소하게 변화하지만 0.8 msec 이내로 유사하여 사전에 충분히 검증이 가능하다는 것을 알 수 있었다. 시편에 부착된 압력게이지를 통해 측정된 Reflected pressure는 예측결과와 유사한 경향을 보이거나 실제 실험 시 약 11.3 MPa 강한 폭발압력을 받은 것으로 나타났다. 폭발을 받은 시편의 외관을 살펴보면 시편의 상부면은 균열이 거의 발생하지 않은 반면 시편의 하부면은 균열손상이 많이 발생하였다. RC 시편은 방사형 균열이, PSRC 시편은 PS 텐던으로 긴장된 시편의 단방향에 따라 주로 균열이 발생하였다.

Table 2에서 보는 바와 같이 RC 시편의 경우 중앙부의 최대 처짐은 13.80 mm으로 잔류변형으로의 회복률은 0.76mm 회복하는 것을 확인할 수 있었다. PSRC 시편은 RC 시편과 비교하여 최대처짐은 8.79 mm, 회복률은 0.81로 RC 시편에 비하여 최대처짐은 약 57%, 잔류변위량은 28% 정도 효과가 있었으며, PS 텐던으로 구속된 콘크리트 시편이 일반 RC 시편에 비해 폭발저항성능에 효과적인 것으로 나타났다.

시편의 상·하부에 설치한 게이지를 통해 측정된 변형률을 비교한 결과, 세 시편 모두 항복거동 범위 내에 있었지만, 철근의 경우 철근이 보강되어 있지 않은 PSC 시편을 제외하고, PSRC 시편이 RC 시편에 비하여 큰 변형이 발생하지 않았다. PS 강연선의 변형률의 경우 폭발하중에 의한 압력으로 인해 시편의 장방향, 단방향 모두 순간적으로 긴장력이 증가하다 시간이 지남에 따라 평균적으로 약 10 kN 정도 감소하는 경향을 나타내었다.

폭발압력하중을 받은 시편의 가속도는 RC 시편이 31,223 g, PSC 시편이 36,870 g, PSRC 시편이 38,935 g로 시편의 철근비가 클수록 시편이 흡수하는 충격에너지가 더 커짐에 따라 PSRC 시편과 같이 PS 텐던과 철근으로 보강된 시편일수록

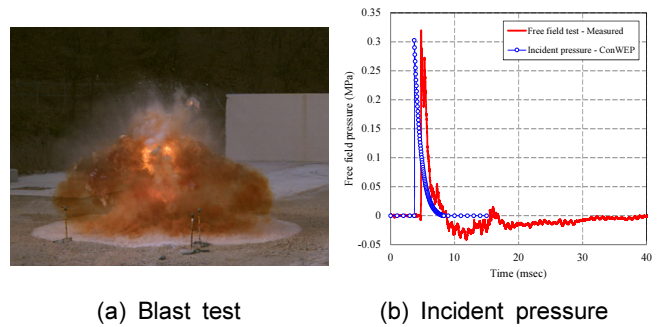


Fig. 8 Blast pressure data from blast test

Table 2 Blast test results

Index		RC	PSC	PSRC	
Free field pressure	Peak pressure (MPa)	0.3159	0.4043	0.3671	
	Duration	3.232	3.236	4.192	
	Impulse (MPa-msec)	0.3206	0.3448	0.3464	
Displacement	Maximum (mm)	13.80	7.14	8.79	
	Residual (mm)	3.32	1.39	1.13	
	interface area	1.0	0.646	1.646	
Strain	Steel	Upper side ( $\mu\epsilon$ )	2290	-	321
		Lower side ( $\mu\epsilon$ )	3485	-	1091
	Concrete	Upper side ( $\mu\epsilon$ )	469.29	-	279
		Lower side ( $\mu\epsilon$ )	-	-	9997
	PS tendon	Center side ( $\mu\epsilon$ )	-	354	450
		Stress side ( $\mu\epsilon$ )	-	448	460
Acceleration (g)		31223.64	36870.52	38935.79	
Environment	Temperature (°C)	18.3	9.6	14.8	
	Humidity (%)	25	38	41	

더 큰 진동가속도를 보이는 것으로 나타났다.

#### 4. 폭발 후 화재 저항성능 실험

본 연구에서 수행하고자 하는 폭발 후 화재실험에 대한 비교·분석을 위해 화재하중 실험을 통한 콘크리트 구조물의 거동을 별도로 분석하였다. 폭발 후 화재하중의 경우 극한하중에 의해 폭발과 화재가 연속적으로 발생하는 것이 일반적이거나, 실험적 제한으로 인하여 폭발을 받은 시편을 화재실험장으로 이동시켜 화재실험을 추가적으로 진행하는 방식으로 수행하였다.

##### 4.1 시편의 외관 분석

화재 및 폭발 후 화재하중을 받은 RC, PSC, PSRC 시편의 표면 손상과 균열도를 Figs. 9~12에 나타내었다. Fig. 9를 살펴보면, 화재하중이 가해진 후 온도가 상승하고 유지되는 동안 폭발발생이 적은 RC 시편에 비하여 PSC 시편은 폭발 발생이 뚜렷하게 증가하였고, PSRC 시편의 경우 시간이 지남에 따라 하부철근이 노출되어 철근이 열에 의해 손상되는 현상을 확인할 수 있었다. Fig. 10(a)에서 보는 것과 같이 화재하중만을 받은 RC-F 시편은 폭발에 의해 하부철근이 드러났으며, 최대 손상깊이는 48 mm로 표면적인 손상이 발생되어 피복부분이 폭발에 의해 손상되었음을 확인할 수 있었

다. Figs. 11(a), 12(a)의 PSC 시편과 PSRC 시편은 RC 시편에 비하여 폭발이 크게 발생하여 손상깊이는 PSC 시편이 199 mm로 하부텐던이 열에 의해 노출되어 쉬스가 손상되었으며, 내부 강연선이 노출되는 현상이 발생하였다. PSRC 시편의 경우 손상깊이는 167 mm로 하부철근은 모두 노출되었으나 쉬스의 손상은 없었으며 상부철근의 일부분이 노출되었다. 화재하중을 가한 시편의 상·하부면의 균열양상을 살펴보면, PSC, PSRC 시편은 Figs. 11~12와 같이 RC 시편에 비하여 시편 상부 면에서의 균열발생은 적었으며, PSC 시편과 PSRC 시편 모두 시편 중앙 일부, 그리고 시편의 단방향을 따라 균열이 발생하였다. 특히 콘크리트에 가해진 압축력으로 인하여 하부철근 또한 압축으로 인한 솟음 현상이 발생하였다.

Figs. 10~12를 통해 각 시편별로 화재하중에 의한 표면 손상면적을 확인하여 Table 3에 나타내었다. 표면에 손상된 면적만을 확인한 결과 RC 시편과 PSC 시편, PSRC 시편 모두  $7.46 \times 10^5 \text{ mm}^2 \sim 8.82 \times 10^5 \text{ mm}^2$ 로 비슷한 손상면적을 가지나, 최대 손상깊이를 고려하여 손상 부피를 구해보면, PSC 시편이  $175.58 \times 10^6 \text{ mm}^3$ , PSRC 시편이  $63.53 \times 10^6 \text{ mm}^3$ 로 PSC 시편은 RC 시편의 약 4.9배, PSRC 시편은 약 1.8배 이상 손상부피가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 여기서, 손상부피는 손상면적에 대하여 최대손상깊이로 손상되었다고 가정하였으며, PSC 시편은 상부철근이 노출된 부분인 중앙부와 하부철근만이 보이는 외부부분으로 나누어 각각에 대한 손상면적과 손상부피를 계산하였고, 손상율은 전체부피에 대한 손상부피의 비율을 계산하였다.

반면, 폭발 후 화재하중을 받은 시편은 화재하중만 받은 시편에 비하여 폭발현상이 적게 발생된 것을 확인할 수 있었다. RC 시편의 최대 손상깊이는 34 mm로 단일하중에 비해 약 14 mm 적은 폭발이 일어났으며, PSC 시편과 PSRC 시편 또한 각각 183 mm, 71 mm로 화재하중만 받은 시편과 비교하여 폭발현상이 적게 일어남을 알 수 있었다. Fig. 10(e)와 Table 3에서 볼 수 있듯이 폭발 후 화재하중을 받은 RC-BF 시편의 손상율은 6.22%로 화재하중만 받은 RC-F 시편의 8.52%에 비하여 0.73배 적은 손상을 보였으며, 폭발 후 화재하중을 받은 PSC 시편과 PSRC 시편의 경우, 마찬가지로 PSRC 시편의 손상율은 12.4%, PSC 시편이 32.58%로, 화재하중만 받은

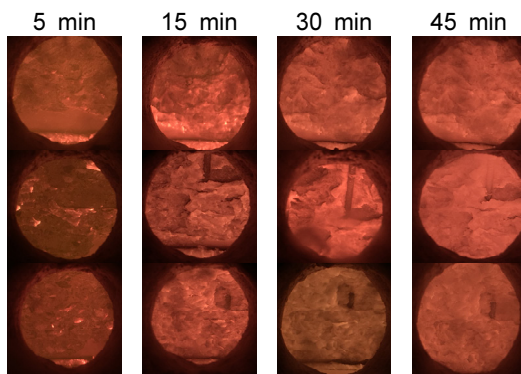


Fig. 9 Damaged surface of blast-fire combined tested concrete panels

Table 3 Approximate calculation of maximum damage surface from fire and blast-fire loading

Specimen		Max. damage depth (mm)	Surface damage area ( $\times 10^5 \text{ mm}^2$ )		Damage volume ( $\times 10^6 \text{ mm}^3$ )	Damage rate (%)
Fire	RC-F	48	7.46		35.79	8.52
	PSC-F	199	8.82		175.58	41.81
	PSRC-F	167	Center	1.68	35.48	6.67
			Exterior	5.82	28.03	8.45
Total			7.50	63.53	15.12	
Blast-fire	RC-BF	34	7.69		26.15	6.22
	PSC-BF	183	7.48		136.82	32.58
	PSRC-BF	71	7.33		52.06	12.40

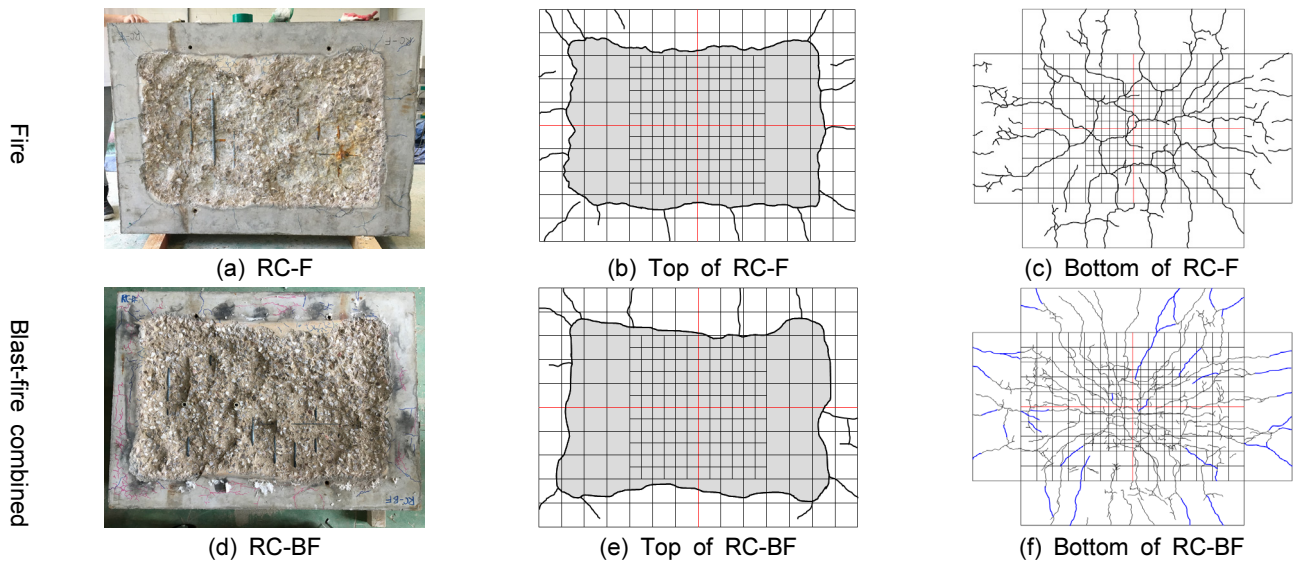


Fig. 10 Damaged surface and crack profile of fire and blast-fire tested RC panel

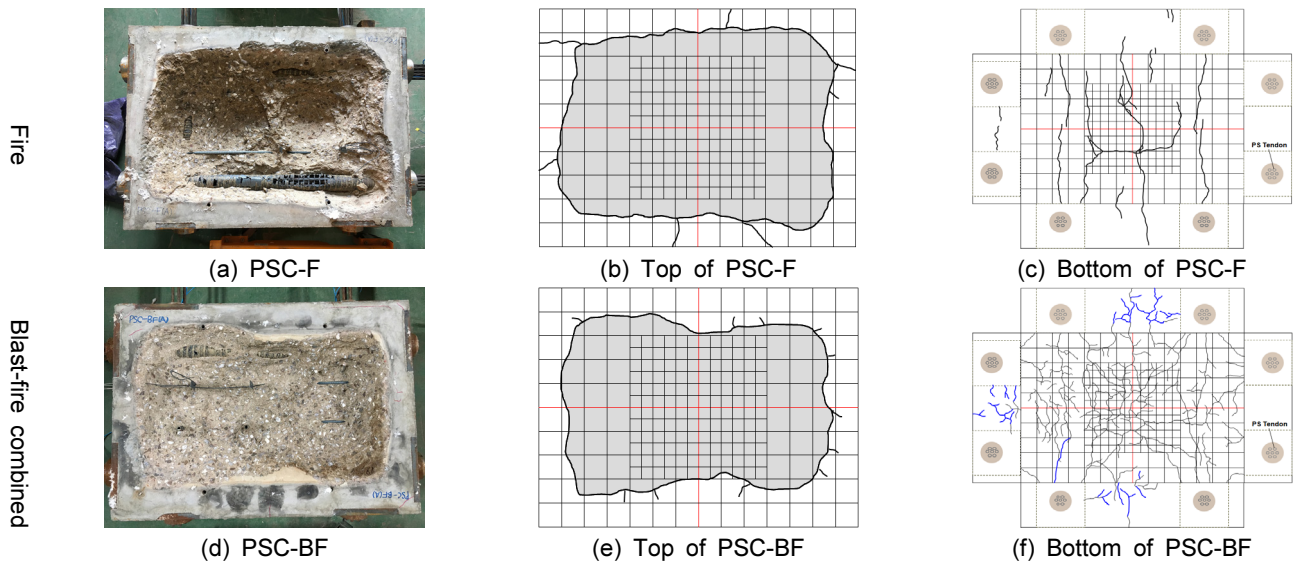


Fig. 11 Damaged surface and crack profile of fire and blast-fire tested PSC panel

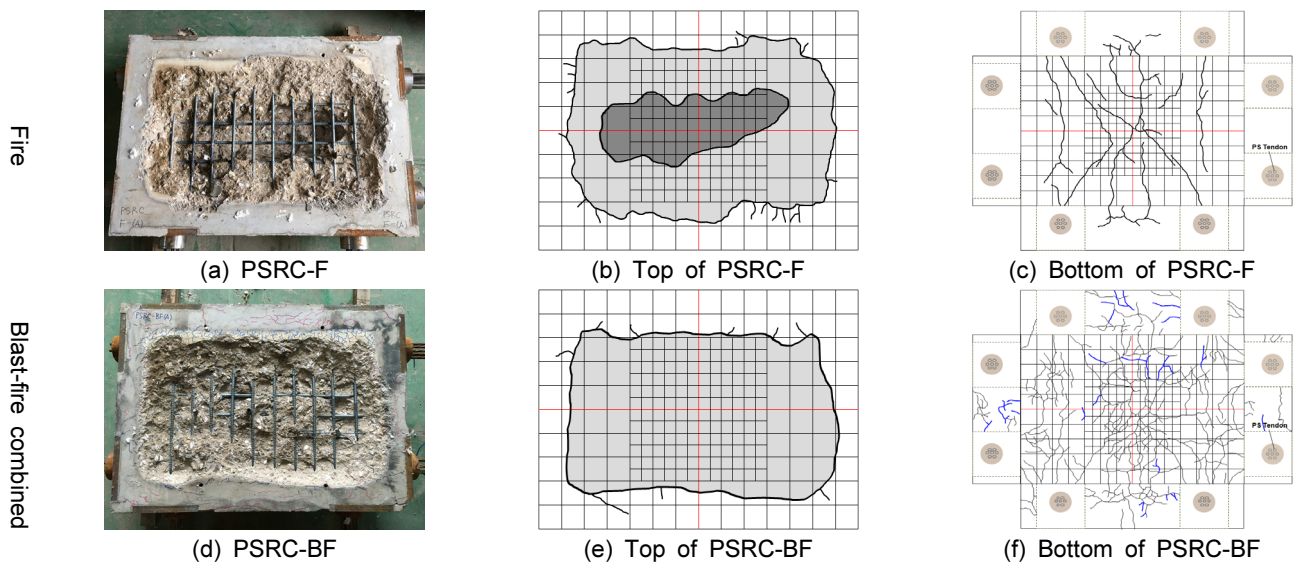


Fig. 12 Damaged surface and crack profile of fire and blast-fire tested PSRC panel



PSRC 시편의 15.12%, PSC 시편의 41.81%의 손상율에 비해 각각 0.77배, 0.82배 더 적은 손상을 받은 것으로 나타났다. 이는 폭발하중에 의해 발생한 균열과 박락된 곳 등으로 고온의 열이 외부로 방출되어 복합극한하중을 받은 시편이 상대적으로 균열 및 폭렬이 적게 발생한 것으로 판단할 수 있다.

## 4.2 시편의 온도 분포

RABT 화재시나리오에 따른 화재 및 폭발 후 화재하중을

받은 2방향 콘크리트 패널부재의 온도이력곡선은 Fig. 13과 같으며, 각 시편에 k-type 열전대를 위치별(50, 100, 150, 250 mm)로 설치하여 화재 발생 시 열전달의 분포를 Fig. 14에 나타내었다.

화재하중만을 받은 시편의 경우 가열 면으로부터 철근 피복두께인 50 mm 정도 위치의 단면손실이 발생한 것으로 나타났다, PSC 시편과 PSRC 시편의 경우 150 mm에서 250 mm 사이에서 단면손실이 발생한 것으로 나타났다. 특히 PSC 시편의 경우 가열 면으로부터 200 mm까지 폭렬이 심하게 발

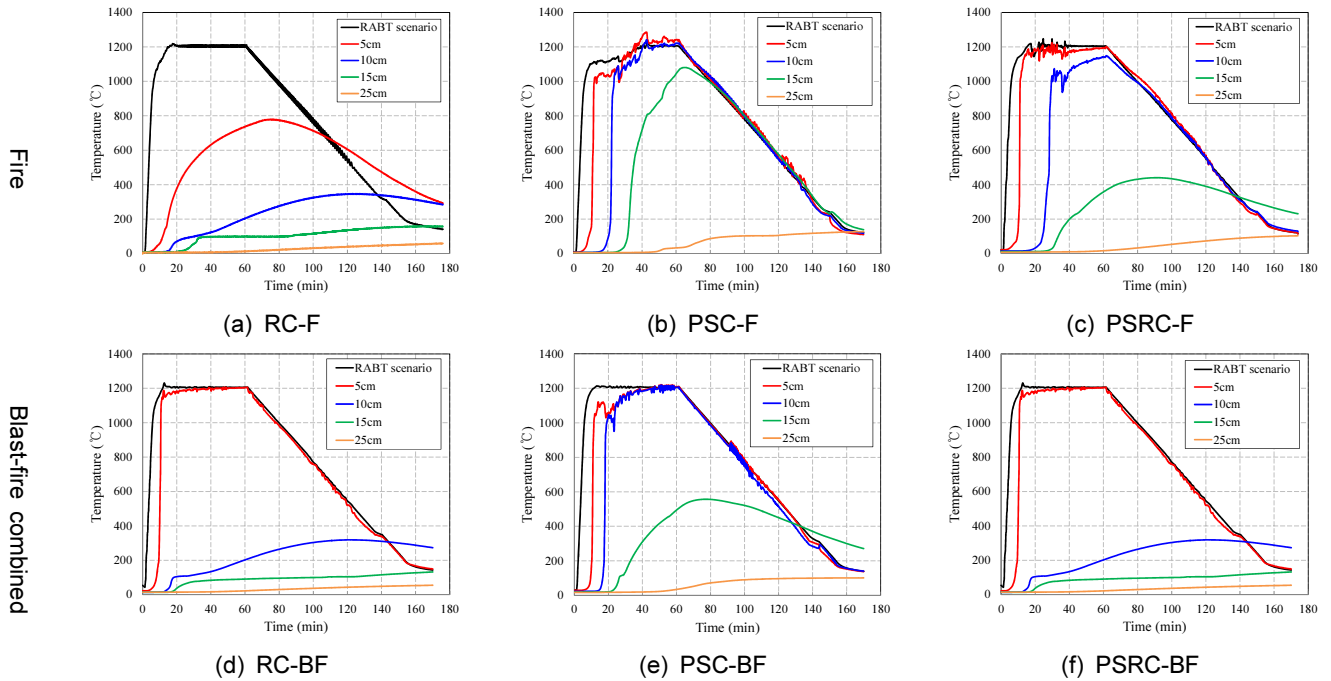


Fig. 13 Temperature-time history curve of fire, blast-fire damaged concrete panels

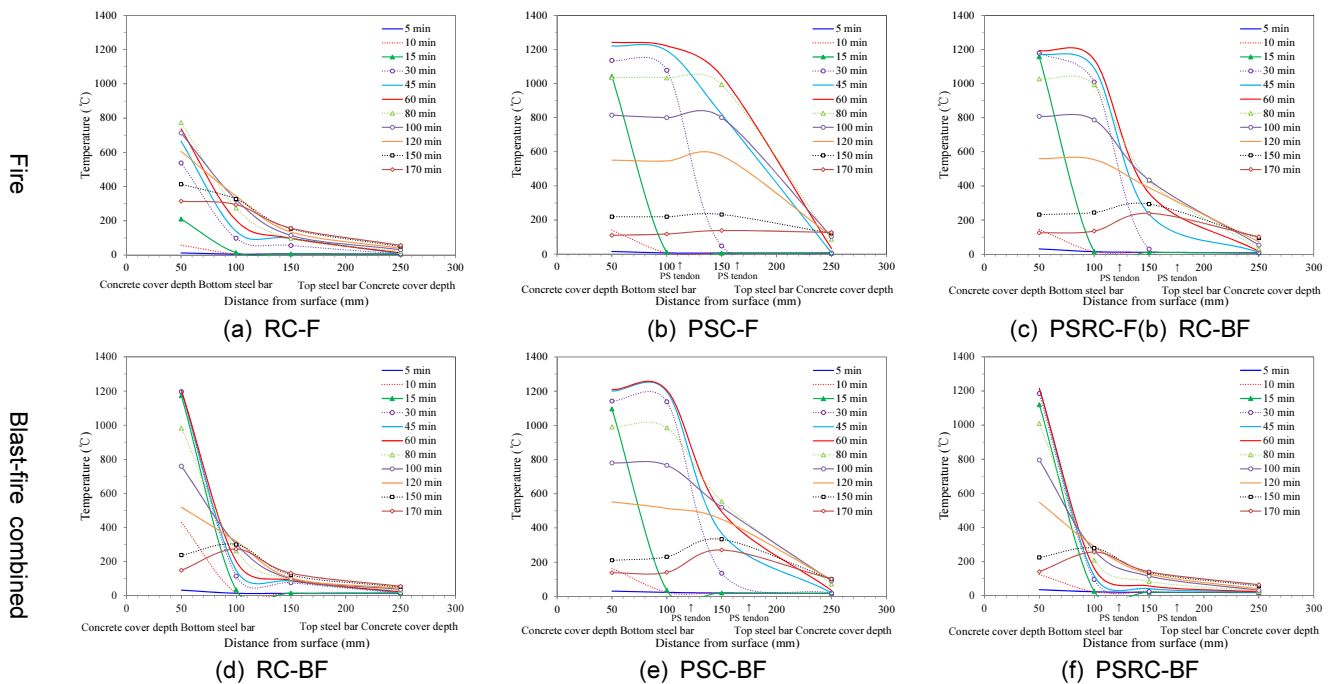


Fig. 14 Temperature-distance from surface history curve of fired and blast-fire damaged concrete panels



**Table 4** Maximum measurement temperature and fire damaged criteria of tunnels and PCCVs (Unit: °C)

Specimen		50 mm	100 mm	150 mm	250 mm	
Max. measuring temperature (°C)	PSC	Fire	1285.72	1241.79	1080.50	127.52
		Blast-Fire	1220.52	1218.17	556.96	101.38
	PSRC	Fire	1224.02	1148.67	440.28	102.27
		Blast-Fire	1225.06	289.90	138.99	62.67
	RC	Fire	777.87	345.72	157.67	58.39
		Blast-Fire	1205.91	318.69	132.03	54.74
Tunnel criteria		JCI (2002)	ITA (2004)	RWS	Swiss	
		Concrete	250-380	380	380	250
		Steel	250-380	250	500	-
Nuclear containment vessel		KSNP		APR 1400	ASME (2004)	
Design temperature (°C)		141		143	175 / 345	

생되어 열전달이 이루어진 것으로 나타났다. 시편 모두 가열 면으로부터 50 mm(철근 피복두께) 떨어진 지점에서는 콘크리트가 폭발과 탈락으로 인해 화재가 가해지는 건조로 내부의 온도와 유사하게 거동하였음을 확인할 수 있었다. 이는 콘크리트 가열 면이 하부철근이 노출될 만큼 손상되었음을 의미하며, RC 부재와 달리 PSC 부재는 열전달이 상부 철근까지 전달되었음을 알 수 있다. PSC 시편은 가열 후 20분 후에도 철근이 폭발에 의해 계속적으로 노출되는 것을 확인할 수 있었으며, 가열이 종료된 후에도 프리스트레싱의 변화로 인한 시편 손상이 발생하였다. 또한 그래프 상에서 1시간 이내의 건조로 온도가 불규칙한 이유는 설정된 RABT 화재 시나리오에 따라 1,200°C까지 온도가 상승되면서 시편에서 발생하는 폭발현상으로 인해 콘크리트가 박락되어 떨어져 나가 발생하는 현상이며, PSC 시편이 폭발현상이 심하다는 것을 그래프를 통해서도 확인할 수 있다. ITA (International Tunnelling Association, 2004)에서는 화재 초기에 폭발은 주로 발생하며, 어느 정도 화재가 진행하게 되면 폭발현상은 중단된다고 언급하였다. 본 실험에서 RC 시편의 경우도 ITA에서 언급한 것처럼 화재 초기에 가열면이 피복두께 정도의 폭발이 진행되다가 약 15분 이후부터는 가열면에서 철근의 노출이 더 이상 일어나지 않았으며 폭발현상 또한 발생하지 않았다. 그러나 프리스트레스 텐던으로 긴장력이 도입된 PSC 시편, PSRC 시편의 경우 가열 초기부터 폭발현상이 시작되어 가열이 지속되는 30분 이후에도 지속적인 폭발현상이 발생하였고, 화재가 끝나는 60분 이후에도 긴장력 변화와 균열 단합 현상 등 시편이 화재에 의해 손상되는 현상을 확인하였다. 이는 앞서 ITA에서 언급된 것과 달리 PS 긴장재에 의한 압축력의 변화에 따라 화재에 의한 프리스트레스 콘크리트 부재의 폭발거동이 추가적으로 발생할 수 있음을 확인하였다.<sup>14)</sup> 폭발 후 화재하중을 받은 시편의 온도 분포를 살펴보면 Fig. 13을 통해 RC-BF 시편 또한 50 mm에 단면손실이 발생하여 RABT 화재시나리오에 따른 건조로의 온도와 유사하게 거동하는 것을 확인할 수 있었다. PSC 시편의 경우 가열 면으로부터 100 mm 이상의 위치까지 콘크리트의 폭발과 탈

락으로 인해 열전달이 이루어졌으며, 이는 화재하중에 의해 콘크리트 가열면이 하부철근이 노출된 만큼 손상되었음을 의미한다. 다만, Fig. 13과 Table 4에서 보는 바와 같이 위치별 발생된 최대온도를 비교한 결과를 통해 화재하중만을 받은 시편에 비하여 폭발 후 화재하중을 받은 시편의 최대온도가 적음을 확인할 수 있었다. PSRC 시편의 경우 피복두께를 제외한 100 mm 구간에서 발생된 온도는 화재시편이 1,148.67°C 인 반면, 폭발 후 화재시편은 289.9°C로 콘크리트의 온도상승이 적게 발생했으며, PSC 시편의 경우 가열 면으로부터 150 mm 구간에서 화재시편이 1,080.5°C, 폭발 후 화재시편이 556.96°C로 온도가 적게 발생했음을 확인하였다. 이를 통해 폭발로 인해 발생된 균열을 통해 고온의 열이 외부로 방출되면서 시편 내부의 온도가 다소 낮아지는 효과가 있는 것으로 판단된다. Fig. 14에서도 볼 수 있듯이 열전대가 설치된 위치별 온도분포를 살펴본 결과, 폭발 후 화재시편이 화재시편에 비하여 폭발에 의해 발생한 균열 및 손상부위를 통해 열이 방출됨으로 인해 적은 단면손실이 발생한 것으로 판단할 수 있다. 또한, Table 4에 나타난 것과 같이 터널구조용 부재의 사용한계온도와 원전격납구조물에 적용하는 설계온도를 함께 비교해보면, 터널구조용 부재에 대해 각국에서 제시하는 사용한계온도에 대하여 RC 및 PSC 시편 모두 내 화재 없이는 위험하다고 판단되며, 원전격납건물 사고 시 제시하는 설계온도와 비교해보면 PSC 및 PSRC 시편이 약 3.12~8.68배 높게 측정되었다. 원전격납건물 설계 시 적용하는 화재시나리오는 ISO 834이지만, PSC 구조물의 화재 사고에 대응하는 설계를 할 때에는 내화재의 사용 또는 설계온도에 대한 검토가 추후 연구를 통해 필요하다고 판단된다.

### 4.3 긴장력 변화

비부착 프리스트레스 콘크리트 구조물에 사용되는 PS 강연선에서 사용되는 냉간압연강(cold-rolled steel)은 일반 철근(mild steel)에 비하여 온도상승에 더 예민하기 때문에 화재하중에 대한 긴장력 손실에 대한 검토가 필요하다. 따

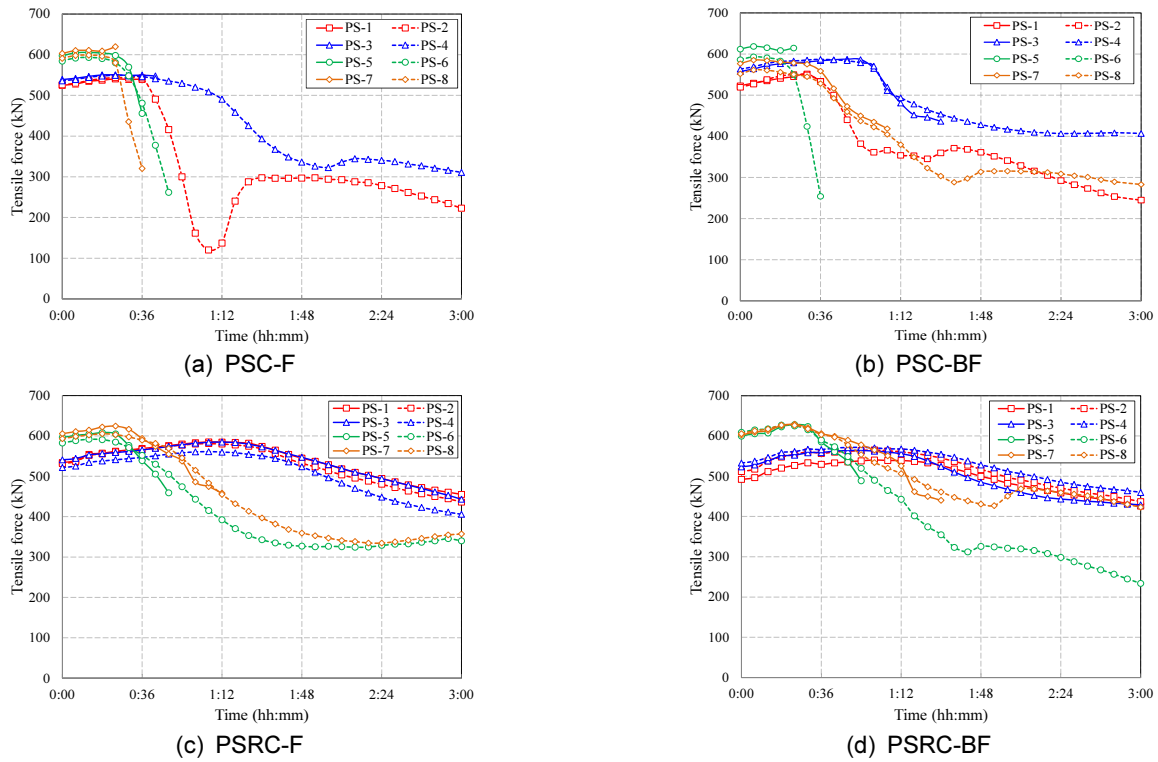


Fig. 15 Tensile force history curves under RABT fire loading

Table 5 Prestress losses of PSC specimens

Value		PSC-F				PSC-BF			
		Before	After			Before	After		
		Load (kN)	Load (kN)	$\Delta\epsilon$ (kN)	Loss rate (%)	Load (kN)	Load (kN)	$\Delta\epsilon$ (kN)	Loss rate (%)
Lateral	PS-1	524.95	N	N	N	522.95	N	N	N
	PS-2	526.12	302.26	-223.86	57.45	519.46	318.40	-201.06	61.29
	PS-3	538.60	N	N	N	557.41	N	N	N
	PS-4	535.94	229.52	-306.42	42.83	563.40	172.43	-390.97	30.61
Longitudinal	PS-5	597.52	N	N	N	612.00	N	N	N
	PS-6	584.54	N	N	N	586.53	N	N	N
	PS-7	603.18	N	N	N	576.88	N	N	N
	PS-8	591.03	N	N	N	551.92	314.90	-237.01	57.06

Table 6 Prestress losses of PSRC specimens

Value		PSRC-F				PSRC-BF			
		Before	After			Before	After		
		Load (kN)	Load (kN)	$\Delta\epsilon$ (kN)	Loss rate (%)	Load (kN)	Load (kN)	$\Delta\epsilon$ (kN)	Loss rate (%)
Lateral	PS-1	533.94	455.38	-78.56	14.71	492.16	421.59	-70.57	14.34
	PS-2	531.61	456.71	-74.90	14.09	511.97	430.41	-81.56	15.93
	PS-3	540.60	446.72	-93.87	17.36	523.29	417.27	-106.02	20.26
	PS-4	521.79	403.45	-118.34	22.68	532.77	454.38	-78.39	14.71
Longitudinal	PS-5	596.19	N	N	N	599.68	N	N	N
	PS-6	582.54	329.05	-253.49	43.51	609.00	189.24	-419.76	68.93
	PS-7	605.51	N	N	N	602.51	N	N	N
	PS-8	593.03	338.37	-254.65	42.94	605.68	408.44	-197.23	32.56

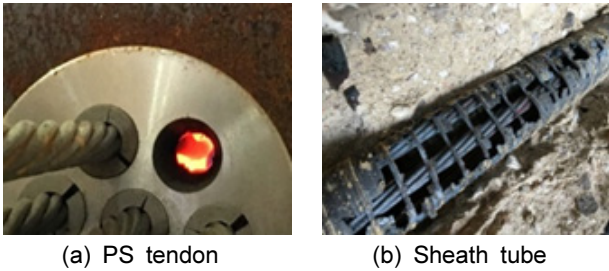


Fig. 16 Fire damage of PS tendon and sheath tube

라서 본 연구에서 선정된 RABT 화재시나리오에 따른 PS 강연선의 긴장력을 검토하였으며, 시간에 따른 긴장력 변화는 Fig. 15와 같이 나타났다. 화재하중만을 받은 시편의 경우, 철근이 보강되어 있지 않은 PSC 시편은 긴장력이 상승하는 1시간 동안 시편이 강한 압축력으로 인해 폭발현상이 발생하면서 Fig. 16과 같이 강연선을 보호하고 있는 쉬스가 손상이 되어 시편에 부착된 strain gauge가 대부분 손상이 되면서 측정이 불가능하였다. 하지만 PSRC 시편의 경우 PSC 시편과 달리 철근으로 보강되어 있어 폭발현상은 PSC 시편보다 적게 발생하여 화재가 발생하는 180분 동안 긴장력 측정이 가능하였다. 1,200°C의 화재하중이 가해지는 1시간 동안 강연선이 열에 의해 팽창하면서 긴장력이 미소하게 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 1,200°C가 지속된 후 온도가 하강하는 2시간동안 긴장력이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. Tables 5~6에서 보는 바와 같이 PSC 시편의 경우 시편의 단방향(PS-1~4)에 위치한 강연선의 인장부(PS-2, 4)는 평균 223 kN~306 kN 손실되었으며, 단방향의 중앙부(PS-1, 3)와 장방향(PS-5~8)의 센서는 화재하중으로 인해 손상되었다. PSRC 시편의 단방향 강연선의 중앙부는 78 kN~93 kN, 인장부에는 75 kN~118 kN의 긴장력 손실이 발생된 것을 확인하였다.

폭발 후 화재하중을 받은 시편도 마찬가지로 긴장력 손실량은 거의 유사하였으나, 최대 60% 이상까지 손실이 발생한 PSC 시편과 비교하여 PSRC 시편의 단방향(PS-1~4) 손실율은 20% 내외로 적게 발생되었다. 장방향(PS-5~8)의 손실율은 PSC 시편과 PSRC 시편 모두 32~68%까지 높게 발생하는 것으로 나타났다. 긴장력 변화를 통해 화재하중이 가해진 콘크리트 구조물의 긴장재는 열이 가해졌을 때 긴장력 회복이 발생하지 않으며, 고온에 취약하다는 것을 본 실험을 통해 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구는 PSC 원전격납구조물을 대상으로 폭발 후 화재 복합손상을 받는 2방향 프리스트레스트 콘크리트 패널 부재에 대해 축소부재를 제작하여 실험적으로 검토하였으며, 다음과 같은 연구결과를 도출하였다.

- 1) 복합극한하중의 실험적 평가 결과, 긴장력 유무, 철근 보강 유무에 따라 RC 및 PSC, PSRC 시편의 손상정도가 상이하였으며, RC 시편의 손상깊이는 48 mm 인 받

면, 긴장력이 도입된 PSC, PSRC 시편의 경우 최대 199 mm 깊이까지의 콘크리트의 탈락현상이 발생하여, 시편의 구속효과에 따라 폭발현상 또한 크게 발생함을 확인하였다.

- 2) 복합극한하중을 받은 시편은 화재하중만 받은 시편에 비해 폭발현상이 적게 발생되었으며, 단면이 받는 온도 역시 적게 발생함을 확인하였다. 이는 폭발하중에 의해 발생한 균열로 인하여 화재 시 발생하는 고온의 열이 균열과 박락된 부분을 통해 외부로 방출됨에 따라, 상대적으로 폭발이 적게 발생하게 된 것으로 판단된다. 폭발현상에 의해 상·하부 철근이 모두 노출된 화재하중만 받은 시편에 비해 콘크리트 단면이 받는 온도변화 또한 적게 발생한 것으로 판단된다. 다만, 본 연구는 폭발 후 화재를 동시에 적용한 것이 아닌 분리되어 진행된 실험이기 때문에, 폭발과 화재 사이에 발생하는 시편의 물리적 성질 변화에 대한 부분은 추가적인 연구가 이루어져야 한다고 판단된다.
- 3) 각 국가별 터널 구조용 부재의 사용한계온도와 원전격납구조물의 설계온도를 비교하였고, 본 실험에서 화재하중을 가한 시편의 경우 쉬스 및 강연선이 손상되어 긴장력이 급격히 감소되는 결과를 통해 PSC 원전구조물에 대한 설계 시, 설계온도에 대한 검토가 반드시 필요하다고 판단된다. 또한 폭발 후 화재 복합극한하중 손상연구를 통한 데이터 확보를 통해 향후 폭발 및 화재해석을 위한 정밀해석기법 기초자료로 활용이 가능하다고 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구개발사업의 연구결과입니다(No. 1403010). 또한 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(중견연구자-도약연구사업, No. 2016R1A2B3009444). 이에 감사드립니다.

## References

1. Shin, S. W., Kwon, Y. J., Kim, W. J., Song, H., Shin, Y. S., Yoo, S. H., Lee, S. H., Lee, K. D., Choi, K. H., and Hong, S. G., *Fire Safety Design Guidelines of High Strength Concrete Structures*, Architectural Institute of Korea, Ki Moon dang, Korea, 2008, pp. 1-50.
2. Ha, J. H., Yi, N. H., Kim, S. B., Choi, J. K., and Kim, J. H. J., "Experimental Study on Blast Resistance Improvement of RC Panels by FRP Retrofitting", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 93-102.
3. Won, J. P., Choi, S. W., Park, C. G., and Park, H. K., "Temperature Distribution of Wet-mixed High Strength Sprayed



- Polymer Mortar for Fire Resistance of Tunnel”, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 4C, 2006, pp. 283-290.
4. Chang, S. H., Choi, S. W., Kwon, J. W., and Bae, G. J., “Evaluation of Fire-Induced Damage to Structural Members in Tunnels”, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 26, No. 3C, 2006, pp. 219-228.
  5. Kang, J. Y., Yoon, H. A., Kim, W. S., Kodur, V., Shin, Y. S., Kim, H. S., “Effect of Wall Thickness on Thermal Behaviors of RC Walls Under Fire Conditions”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol. 10, No. 3, 2016, pp. S19-S31.
  6. Hyde, D. W., *Fundamental of Protective Design for Conventional Weapons*, CONWEP (Conventional Weapons Effects), TM5-8511-1, United States Army Waterway Experiment Station, Vicksburg, Miss., 1992.
  7. Baker, W. E., *Explosions in Air*, Wilfred Baker Engineering, San Antonio., 1973.
  8. TM5-855-1 / AFPAM32-1147 / NAVFACP-1080 / DAHSCWEMAN-97 *Design and Analysis of Hardened Structures to Conventional Weapons Effects*, Joint Departments of the Army, Air Force, Navy and the Defense Special Weapons Agency, Washington, DC., 1997.
  9. Kakogiannis, D., Pascualena, F., Reymen, B., Pyl, L., Ndambi, J. M., Segers, E., Lecompte, D., Vantomme, J., and Krauthammer, T., “Blast Performance of Reinforced Concrete Hollow Core Slabs in Combination with Fire: Numerical and Experimental Assessment”, *Fire Safety Journal*, Vol. 57, 2013, pp. 69-82.
  10. Huo, J., Zheng, Q., and Chen, B., “Tests on Impact Behaviour of Micro-Concrete-Filled Steel Tubes at elevated Temperatures up to 400°C”, *Materials and Structures*, Vol. 42, 2009, pp. 1325-1334,
  11. Schmeider, U., “Properties of Material at High Temperatures-Concrete”, 2nd edn, RILEM Report, Gesamthochschule Kassel, Germany, 1986, pp. 39-41.
  12. Jeon, S. J., Jim, B. M., and Kim, Y. J., “Assessment of the Fire Resistance of a Nuclear Power Plant Exposed to Jet Fuel Fire”, *Civil Expo 2011, Korean Society of Civil Engineers*, Il-San KINTEX, 2011, pp. 419-422.
  13. Choi, J. H., Choi, S. J., Cho, C. M., Kim, T. K., and Kim, J. H. J., “Experimental Evaluation of Bi-directionally Unbonded Prestressed Concrete Panels Blast resistance Behavior under Blast Loading Scenario”, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 28, No. 6, 2016, pp. 673-683.
  14. International Tunnelling Association, “Guidelines for Structural Fire Resistance for Road Tunnels”, Working Group, No. 6, ITA, 2004, pp. 1.1-2.9.

**요 약** 각종 사고 및 테러로 인한 폭발, 충돌, 화재 사고가 발생함에 따라 사회적인 안전 불감증이 더욱 고조되고 있으나, 실제 극한하중에 대한 구조물의 방호 설계가 반영되지 못하고 있는 실정이다. 특히, 원전격납구조물, 가스탱크 등과 같은 주요 시설물에 적용되고 있는 2방향 프리스트레스트 콘크리트(PSC) 구조물에 대한 폭발, 그리고 폭발로 인한 2차적으로 발생 가능한 화재에 대한 연구가 미흡함에 따라 복합손상 시나리오에 대한 구조물의 검토가 필요하다. 따라서, 본 연구에서는 폭발 후 화재하중 복합손상을 분석하기 위하여 1,400 mm × 1,000 mm × 300 mm의 2방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트를 제작하여, 폭발하중은 ANFO 25 kg의 장약량을 1.0 m 이격거리로 실험을 구성하고, 화재하중은 5분 이내에 1,200°C의 화재하중을 가할 수 있는 RABT 화재시나리오를 적용하여 극한저항성능을 검토하였다. 본 연구는 향후 국내외 프리스트레스트 콘크리트에 대한 방호설계 및 폭발해석 등 관련 연구분야의 중요한 자료가 될 것이라 판단된다.

**핵심용어** : 극한하중, 2방향 비부착 프리스트레스트 콘크리트, 폭발하중, 화재하중, 폭발 후 화재하중