



철근콘크리트 패널의 FRP 보강에 의한 방폭 성능 향상에 관한 실험 연구

하주형^{1,2)} · 이나현¹⁾ · 김성배¹⁾ · 최종권²⁾ · 김장호^{1)*}

¹⁾연세대학교 사회환경시스템공학부 ²⁾현대건설기술연구소 재료팀

Experimental Study on Blast Resistance Improvement of RC Panels by FRP Retrofitting

Ju-Hyung Ha,^{1,2)} Na-Hyun Yi,¹⁾ Sung-Bae Kim,¹⁾ Jong-Kwon Choi,²⁾ and Jang-Ho Jay Kim^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²⁾Material Division, Hyundai Institute of Construction Technology, Yongin 446-716, Korea

ABSTRACT Recently, FRP usage for strengthening RC structures in civil engineering has been increasing. Especially, the use of FRP to strengthen structures against blast loading is growing rapidly. To estimate FRP retrofitting effect under blast loading, blast tests with nine 1,000 × 1,000 × 150 mm RC panel specimens, which were retrofitted with carbon fiber reinforced polymer (CFRP), Poly-urea, CFRP with Poly-urea and basalt fiber reinforced polymer (BFRP) have been carried out. The applied blast load was generated by the detonation of 15.88 kg ANFO explosive charge at 1.5 m standoff distance. The data acquisitions not only included blast waves of incident pressure, reflected pressure, and impulse, but also included central deflection and strains at steel, concrete, and FRP surfaces. The failure mode of each specimen was observed and compared with a control specimen. From the test results, the blast resistance of each retrofit material was determined. The test results of each retrofit material will provide the basic information for preliminary selection of retrofit material to achieve the target retrofit performance and protection level.

Keywords : blast, standoff distance, CFRP, BFRP, Poly-urea

1. 서 론

최근 사고 혹은 테러공격 등으로 인하여 폭발, 충돌, 화재 사고가 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 폭발사고는 구조물에 손상 뿐 아니라 특히 도심지에서는 무고한 인명 피해를 가져오는 결과를 초래하기도 한다. 폭발로 인해 발생하는 폭발하중은 매우 큰 압력과 열을 극도로 짧은 시간에 방출하는 충격하중이므로, 폭발하중을 받는 콘크리트 구조물은 반드시 변형률 속도와 손상 효과를 고려해야한다.¹⁻⁶⁾

일반적으로 콘크리트는 다른 건설 재료와 비교할 때 폭발하중에 대하여 상대적으로 큰 저항 능력을 지니는 것으로 알려져 있으나, 설계 단계에서 폭발하중을 고려하지 않은 기존의 콘크리트 구조물에 대해서는 폭발하중에 대한 저항 성능을 향상시키기 위하여 별도의 보강이 요구된다.^{1-2,6-9)}

구조 부재나 지지 구조물 등을 추가로 설치하여 저항 성능을 향상시키는 방법은 공간의 제약과 비용 증가의

문제 등이 발생하며, 이는 경제적 측면 또는 구조적인 측면에서 효율성이 떨어진다. 반면, 섬유 보강재(fiber reinforced polymer, FRP)를 부착하여 주요 구조 부재의 단면을 보강하는 방법은 부재 자체의 성능을 향상시키고 동시에 별도의 공간을 필요로 하지 않으므로 구조적 성능이나 경제적, 공간적 효율을 높이는데 유리한 대표적인 보강공법이라 할 수 있다.¹⁰⁻¹²⁾

더군다나 FRP는 지난 20년간 토목 구조물에 매우 널리 사용되는 복합재의 하나였으며, 특히 RC 구조물의 보강에 효율적으로 사용되어 왔다. 수많은 연구 결과들이 이러한 사실을 뒷받침하고 있고, 특히 섬유 보강재의 폭발하중에 대한 보강 효과에 대해서는 1999년 미국에서 DTRA/TSWG을 통해 FRP 보강재를 이용하여 현존하는 구조물의 방폭 저항 성능 향상 가능성에 대한 조사 연구가 이뤄졌으며,⁷⁾ 그 외에도 구조물의 붕괴 현상을 묘사할 수 있는 실물 크기의 실험과 복합재 종류에 따른 보강 효과의 차이를 규명하기 위한 연구가 수행되어왔다.¹³⁻¹⁶⁾

그러나 폭발하중에 대한 보강에 있어 단순히 구조물의 강성 증가만으로는 소요 저항성능을 확보할 수 없으며, 오히려 취성적인 파괴모드를 유발하기도 한다. 따라서 폭발하중을 받는 FRP로 보강된 콘크리트 구조물은 폭발하중에 저항할 수 있는 소요 강성을 지니면서 폭발에너지

*Corresponding author E-mail : jhkim@yonsei.ac.kr

Received August 21, 2009, Revised October 1, 2009,

Accepted October 14, 2009

©2010 by Korea Concrete Institute

를 충분히 흡수할 수 있는 성능을 지니고 있어야 한다.¹⁶⁻¹⁹⁾

그러므로 이 연구에서는 보강섬유 종류에 따른 폭발저항성능을 평가하기 위하여, 일반 강도 콘크리트 구조물에 탄소섬유(CFRP), 폴리우레아(Poly-urea), 바잘트섬유(Basalt FRP: BFRP)와 이 논문에서 개발한 탄소섬유와 폴리우레아를 결합한 복합섬유 등의 보강 재료를 부착한 후 폭발 실험을 수행하였으며, 1,000 × 1,000 × 150 mm의 철근콘크리트 패널 구조물을 제작하여 국내 민간에서는 최초로 폭발 실험을 국방과학연구소 다락대 시험장에서 수행하였다.

2. 연구 동향

폭발하중을 받는 섬유 보강재로 보강된 구조물 거동에 대한 실험적 연구로는 Patoary와 Tan⁸⁾이 FRP 보강 재료에 따른 보강성능을 비교하기 위하여 3가지의 섬유 보강재(탄소섬유, 유리섬유 및 2방향 유리섬유)를 사용하여 벽체를 보강한 후, 폭발하중을 묘사하기 위해 에어백(airbag)을 이용한 특수하중 재하 장치를 사용하여 실내에서 실험을 실시하고 단순해석을 통해 실험 결과를 예측한 바 있다.

Ross et al.¹⁵⁾은 탄소섬유로 보강된 보와 슬래브의 거동을 평가하기 위해 ANFO 110.68 kg, 이격거리 4.6 m와 5.18 m로 각각 실험을 수행하여 탄소섬유로 보강된 구조물의 강성이 큰 것을 확인하였다. Razaqpur et al.¹⁶⁾과 Tolba²⁰⁾는 철근콘크리트 패널에 직교성의 유리섬유를 부착하여 이격거리 3 m에서 ANFO 22.68 kg, 35.38 kg의 폭발하중을 받는 콘크리트 부재의 보강 성능을 파악하고자 하였다.

Muszynski et al.¹⁴⁾은 각기 다른 철근콘크리트 벽체 구조물에는 복합 재료로 보강하고, 다른 한 벽체에는 무보강하여 대기 중 폭발하중을 가하여 비교 실험을 하였으며, Nam²¹⁾은 고수준의 변형률 속도에 의존적인 콘크리트 재료모델과 불균등 분포의 실제적인 폭발하중 함수를 적용한 HFPB(high fidelity physics based)기법을 이용하여 Muszynski et al.¹⁴⁾의 실험을 유한요소해석으로 검증하였다. Davison et al.¹⁹⁾와 Oesterle²²⁾은 FRP와 폴리우레아 등의 콘크리트 조적식 벽체의 방호 성능을 해석 및 실험적으로 평가한 바 있으며, Morrill et al.¹⁷⁾은 FRP로 보강되어 있는 콘크리트 기둥 및 벽체에 대하여 폭발 실험을 실시한 후 유한요소해석 결과와 구조물의 거동을 비교 분석함으로써 해석 기법의 타당성을 검토한 바 있다.

Morrill et al.¹⁷⁾과 Malvar et al.⁹⁾은 철근콘크리트 기둥을 강(steel)과 FRP로 보강하여 기둥의 단면 형상에 따른 폭발 저항 성능을 파악하였으며, 더불어 준정적 실험을 통하여 구조물의 구조적 기능을 보존하는데 효율적인 방법에 대해 증명하였다. Oswald et al.²³⁾은 아라미드섬유로 보강된 콘크리트 조적식 벽체의 보강 성능을 파악하기 위하여 충격관(shock tube)를 이용하여 한정된 장소에서의 폭발 실험을 수행하였다.

현재 국내에서의 폴리우레아의 사용은 비구조용 보수 재료 또는 코팅 재료로써 사용되고 있으나, 해외에서는 폴리우레아의 높은 연신율로 인해 폭발 저항 성능에 대한 연구가 일부 이루어지고 있다. Porter et al.²⁴⁾과 Davison et al.¹⁹⁾은 조적식 벽체에 폴리우레아의 종류에 따른 폭발하중의 저항 성능을 파악하였다. 또한 바잘트섬유는 현무암에서 추출된 자연적 섬유로써, Chen et al.¹⁰⁾은 새로이 개발된 바잘트섬유의 구조적 성능을 평가하기 위하여, 유리섬유 및 탄소섬유 보강재와 비교 검토하였다.

현재 국내에서는 실험적 제약으로 인해 김호진 등^{1,12)}과 남진원 등^{2,5,21)}이 FRP로 보강한 콘크리트의 벽체 구조물 및 슬래브에 대한 정밀해석을 수행하여, 외국의 실험결과와 비교하는 등의 연구를 수행하였다.

이상의 문헌조사 분석을 통하여 이 연구에서는 기존 해외 연구에 비해 국내의 연구가 전무하다 할 수 있는 섬유 보강재로 보강된 콘크리트 구조물의 방폭 저항 성능 실험을 국내 최초로 수행하였으며, 서로 다른 섬유 보강재로 보강된 구조물의 거동 응답을 고찰하고 섬유 보강재의 재료적 특성 및 보강 기법에 따른 보강 효과를 규명하고자 한다. 또한, 국내외적으로 많이 사용되고 있는 탄소섬유 이외의 폴리우레아 및 바잘트섬유를 보강 섬유로 사용하였으며, 폴리우레아와 탄소섬유를 결합한 신규 방폭 재료를 개발하여, 그들의 폭발 저항 성능을 파악하고자 한다.

3. 방폭 성능 실험의 구성 및 방법

3.1 폭발 실험 개요

이 연구에서는 폭발하중을 받는 보강재에 따른 철근콘크리트 구조물의 방폭 성능 효과를 파악하기 위하여 TNT 15.88 kg의 예비실험과 ANFO 15.88 kg의 실제 실험(main test)으로 나눠 수행을 하였으며, 실험에 사용된 폭발물과 시편 종류는 Table 1과 같이 정리할 수 있다. BFRP 시편을 제외한 각 시편마다 2 세트의 실험으로 수행되었으며, 일반 강도 콘크리트 시편의 1 세트는 예비실험으로 사용되었다. 이 실험에서는 control 시편인 일반 강도 콘크리트 시편과 더불어 탄소섬유(CFRP), 폴리우레아(Poly-urea), 탄소섬유와 폴리우레아를 동시에 보강한 경우(CPU), 바잘트섬유(BFRP)를 각 시편의 하부면에 보강한 시편으로 폭발 실험을 실시하였다. CFRP 시편과 BFRP 시편은 단방향의 섬유시트를 2겹으로 보강하여 직교성의 특성을 지니도록 하였으며, CPU 시편은 CFRP 1겹과 폴리우레아를 다른 시편들과 동일한 두께인 3 mm를 유지하도록 하였다. 한편 예비실험을 통해 TNT는 일정한 모양을 유지할 수 있는 장점을 가지고 있으나, TNT 자체의 철제 파편으로 인해 폭발압력에 대한 신호획득이 어렵다는 것을 파악하였다. 따라서 이 실험에서는 파편 발생이 없는 ANFO를 장약으로 선정하였다. 국내 폭발물 취급의 어려움과 예비실험을 통한 처짐량 및 게이지의

Table 1 Test specimens and explosive charge

Test specimen	Cases	Retrofit method
Preliminary test (TNT 15.88 kg)	NSC 1 case	Non-retrofit
Main test (ANFO 15.88 kg)	NSC 1 case	Non-retrofit
	CFRP 2 cases	2 ply-orthogonal CFRP
	PU 2 cases	Sprayed Poly-urea
	CPU 2 cases	1 ply+sprayed Poly-urea
	BFRP 1 case	2 ply-orthogonal BFRP

* NSC : normal strength concrete
 CFRP : retrofitted with CFRP (carbon sheet)
 PU : retrofitted with Poly-urea
 CPU : retrofitted with CFRP + Poly-urea
 BFRP : retrofitted with BFRP (Basalt sheet)

측정 범위 등을 고려하여 Fig. 1과 같이 시편과의 이격 거리 1.5 m, ANFO 15.88 kg의 폭발압력하중을 받도록 실험을 구성하였으며, 장약으로부터 5 m 떨어진 자유공간에서 대기 중 폭발 압력(free field pressure)을 측정하였다.

3.2 폭파 실험 조건

이 연구에서는 철근콘크리트 패널 구조물을 대상 구조물로 선정하였으며, 콘크리트 시편을 지면과 동일한 위치에 거치시켜 구조물 부근의 대기 중 자유폭발을 유도하였다. 폭발로 인해 발생할 수 있는 회절 및 간섭 효과를 최소화 하여 콘크리트 시편위에서만 폭발압력하중을 받을 수 있도록 하였다.²⁰⁾ 따라서 콘크리트 시편의 거치와 거동 측정을 위하여 Fig. 2와 같은 시편 지지 구조물을 SM-520, 두께 7 mm의 강재로 제작하였다. 지지 구조물에 250 mm 간격으로 stiffener를 설치하여 폭발하중에 의한 지지 구조물의 변형을 최소화하였으며, 별도의 강재 앵글과 클램프를 제작하여 콘크리트 시편과 지지 구조물이 고정될 수 있도록 하였다. 시편 지지 구조물은 2,000 × 2,000 × 300 mm의 기초위에 $\phi 19.02 \times 150$ mm 세트 앵커(set anchor)로 고정하여 기초와 지지 구조물을 강결시켰다. 폭파 실험 후 시편의 파괴 형상 측정과 계측 관련 작업을 용이하게 하기 위해 지지 구조물의 한쪽 면을 개방하여 출입구로 사용할 수 있도록 하였다.

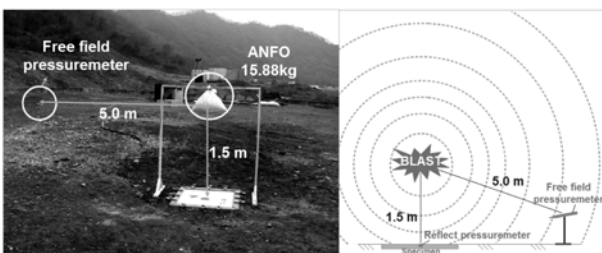


Fig. 1 Test set-up

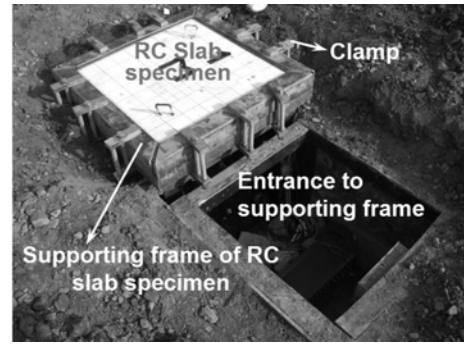


Fig. 2 Supporting frame of RC panel

3.3 시편 제작

총 9개의 1,000 × 1,000 × 150 mm 철근콘크리트 패널 시편은 Fig. 3에서 보는 것과 같이 12-D10 철근으로 격자형 양단배근으로 제작하였다. 사용된 D10 철근은 항복강도 400 MPa, 극한강도 600 MPa의 이형철근을 사용하였다. 콘크리트는 일반 구조물에 사용되는 강도인 24 MPa로 배합하였으며, 실험 수행 당시에는 평균 25.6 MPa의 콘크리트 압축강도를 나타내었다. 일반강도 배합표와 보강재료물성의 특성은 각각 Tables 2와 3에서 나타내고 있으며 콘크리트 시편 제작은 Fig. 4와 같이 이루어졌다. 콘크리트 타설 및 양생이 이뤄지고 나면 표면처리를 하여 에폭시 프라이머를 콘크리트 표면에 도포한 뒤, 에폭시로 함침된 FRP 시트를 부착하거나 혹은, 폴리우레아를 스프레이 타설하였다. 한편 사용된 CFRP는 국내 C사에서 제공되는 외국 F사의 Tyfo S-epoxy로 함침된 Tyfo SCH-41S CFRP를 사용하였으며 사용된 폴리우레아는 일반 토목 구조물의 방수코팅에 사용되는 국내 A사의 PT-200제품을 사용하였다. 또한, BFRP는 국내 S사의 PNC-Basalt 섬유를 사용하였다. 각 FRP시트는 Tyfo S-

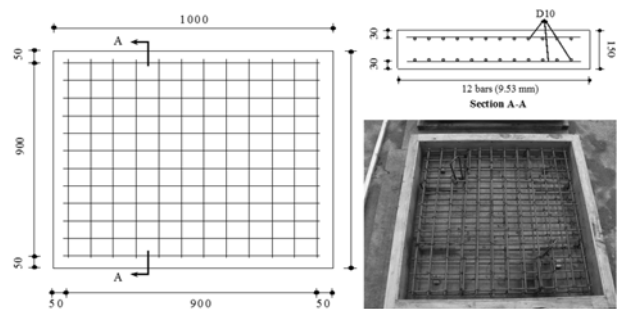


Fig. 3 Test specimen geometry and reinforcement details (unit : mm)

Table 2 Mixed proportion of concrete specimen

MCA ^{a)} (mm)	Slump (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				AE (%)	
				W	Binder		S		G
					C	FA ^{b)}			
25	100	49.8	47.7	163	294	33	880	957	2.45

^{a)}MCA : maximum size of coarse aggregate

^{b)}FA : fly-ash

Table 3 Material properties of retrofitted materials

Property	Carbon fiber	Poly-urea	Basalt fiber
Tensile strength (MPa)	3,790	20	2,500~4,800
Tensile modulus	230 GPa	Bond strength 2.1 MPa	89 GPa
Elongation (%)	1.7	310	3.1
Cost	131,000 won/m ²	7,000 won/m ²	33,000 won/m ²

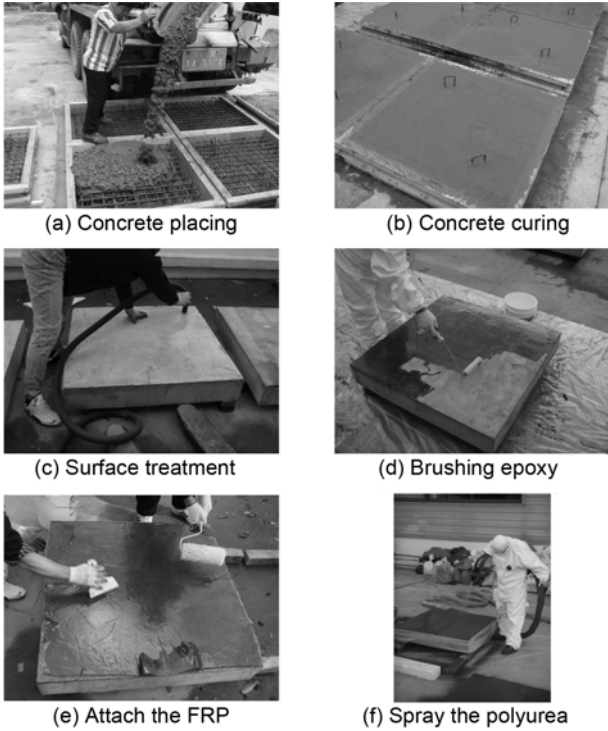


Fig. 4 Procedure of concrete specimen manufacture

epoxy를 사용하여 부착하였으므로, 이 연구에서는 보강재와 콘크리트 사이의 부착 성능이 동일하다고 가정하였다. 폴리우레아는 비교적 낮은 인장강도를 가지고 있는 한편, 높은 연신율을 가지고 있으며, BFRP는 높은 인장강도에 비해 비교적 강성이 작으며, CFRP에 비해 단가가 저렴한 특징이 있다.

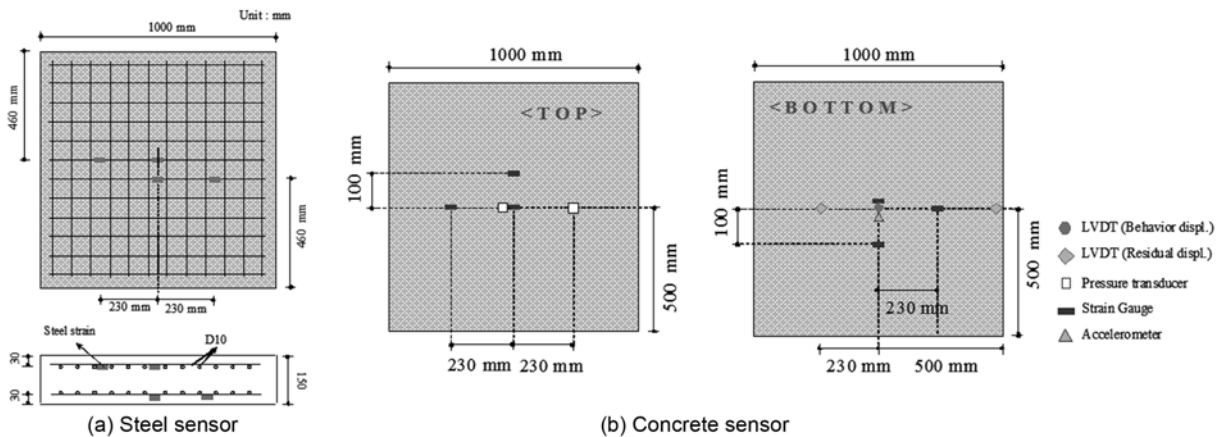


Fig. 5 Sensor location of the concrete specimen

3.4 계측 개요

철근콘크리트 패널 구조물이 받는 폭발압력하중은 Fig. 5에서 보는 것과 같이 시편 상부면의 중앙부와 230 mm (중앙에서 대각선 길이의 1/3지점) 떨어진 위치에서 측정하였다. 폭발하중을 받는 콘크리트 시편의 하부면 중앙부에 unsprunged 방식의 ± 25.4 mm LVDT를 이용하여 기존의 참고문헌에서 쉽게 측정하지 않은 시편의 거동 및 최대 처짐을 측정하였다. 잔류변형(residual displacement)은 폭발압력과 같이 중앙부에서 230 mm 떨어진 곳에서 측정하였으며, 더불어 콘크리트 시편의 단부 부분에 잔류변형 LVDT를 추가적으로 설치하여 단부에서의 처짐 여부를 판단하고자 하였다.

또한 콘크리트 시편 하부면에 가속도 게이지를 부착하여 충격 가속도 및 충격 강도를 측정하고자 하였으며, 철근의 변형률을 측정하기 위해 철근의 인장부에 총 4개의 변형률 게이지를, 콘크리트의 변형률을 측정하기 위해 상하부면의 중앙, 100 mm, 230 mm의 위치에 총 6개의 변형률 게이지를 부착하였다. 그러나 시편의 하부면에 복합 재료로 보강된 경우에는 복합 재료용 변형률 게이지를 이용하여 측정하였다.

이 연구에서 사용된 동적 측정 장비는 Dewe 2010과 Dewe 5000으로써, 일반 토목 계측에서 사용되는 정적 측정 장비 또는 일반적인 동적 측정 장비에 비해 5배~10,000배인 50~500 kHz의 상당히 높은 샘플링 속도로 신호들을 수집하였다. 더불어 초고속카메라를 사용하여 1초에 5,000~6,800 frame을 촬영할 수 있도록 하였다.

4. 폭파 실험 결과

4.1 폭파 실험

앞서 언급한 것과 같이 폭발하중을 받는 보강된 철근 콘크리트 구조물의 방폭 성능을 평가하기 위하여 이격거리 1.5 m에서 TNT 15.88 kg의 예비실험과 ANFO 15.88 kg의 실제 실험으로 구성하였으며, Fig. 6은 ANFO를 이용한

실제 폭파 장면이다. 폭발물에 폭원이 점화되면, 폭발물이 매우 빠른 속도로 열, 소리, 압력파의 형태로 에너지를 발산하며, ANFO의 경우에는 주로 고온고압의 가스 형태로 에너지가 발산되는 것을 볼 수 있다.

4.2 측정 결과

4.2.1 폭발압력하중

각 폭발물에서 1.5 m 떨어진 철근콘크리트 시편이 받는 폭발압력하중을 UFC3-340-01에 기초한 무기산정프로그램인 ConWEP을 통해 산정한 결과 Fig. 7과 같이 나타났다.

예비실험에서는 TNT의 철제 외피로 인해 콘크리트 시편에 장착한 압력 게이지가 손상을 받아 폭발압력하중은 측정되지 못하였으나, 대기 중 폭발압력의 압력하중은 0.2064 MPa, 충격량은 0.3396 MPa-msec으로 측정되었다. 이격거리 5 m로 계산한 ConWEP은 압력하중은 0.1970 MPa, 충격량은 0.2326 MPa-msec으로, 측정된 대기 중 폭발압력은 ConWEP에 의한 예측값에 비해 압력하중은 4.77%, 충격량은 46.0% 크게 발생하였다.



Fig. 6 Explosive scene by ANFO 15.88 kg

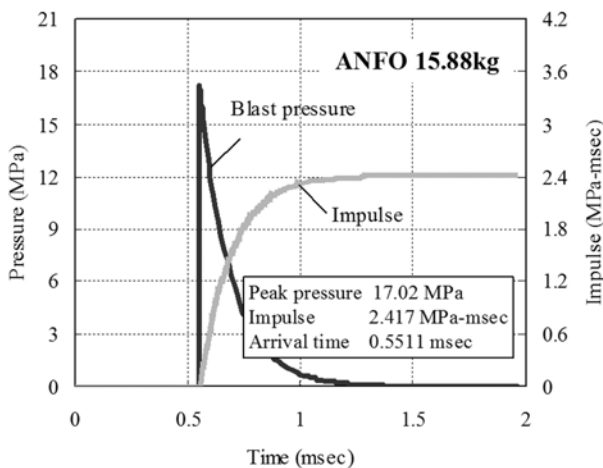
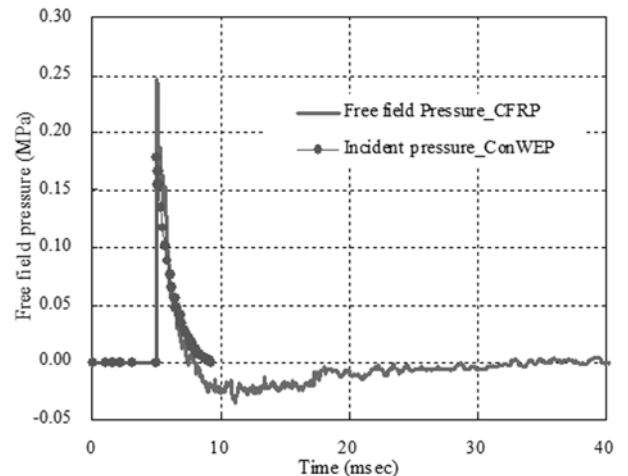


Fig. 7 Time history of reflected pressure on concrete specimen by ConWEP (standoff = 1.5 m)

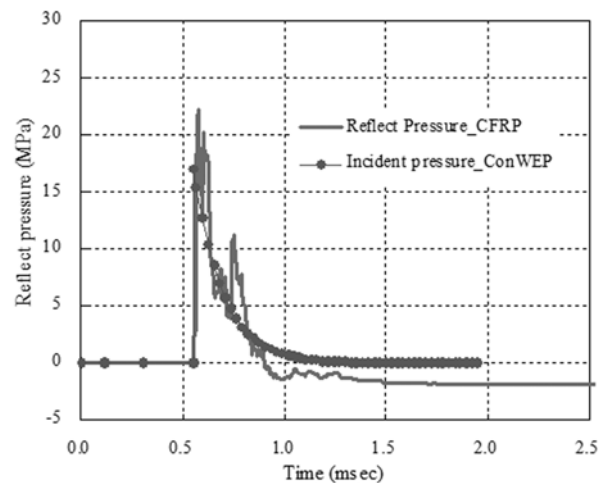
이 실험에서는 콘크리트 시편에 작용하는 폭발압력하중과 대기 중 폭발압력이 Fig. 8과 같은 경향으로 측정되었으며, ConWEP에 의해 예측된 폭발 압력하중과 비교적 유사하였고, 대기 중 폭발압력에 비해 콘크리트 시편에 작용한 반사압력하중이 대략 10배 정도 차이가 발생하였다. 그러나 Table 4에서 볼 수 있듯이 폭발압력하중은 폭파 당시의 바람의 방향, 온도, 습도, 폭발물의 성형 상태에 크게 영향을 받으므로 폭발할 때마다 서로 다르게 압력하중이 발생하였고, 이는 외국실험의 사례들을 통해서도 알 수 있듯이, 폭파 실험에서 충분히 발생할 수 있는 오차로 판단된다. ANFO 15.88 kg을 TNT 등가 환산으로 계산하면 TNT 13.02 kg이며, TNT 15.88 kg와 비교해보면, 대기 중 폭발압력은 약 15.9%, 충격량은 약 13.5% 정도 적은 것을 알 수 있다.

4.2.2 시편의 균열 영상

Fig. 9는 폭발압력하중이 가해진 일반 강도 콘크리트 (NSC)시편의 균열 형상을 나타내었다. Figs. 9(a)와 (c)는 예비실험인 TNT에 의한 시편의 상하부면의 균열 형상이며, Fig. 9(b)와 (d)는 ANFO에 의한 시편의 상하부면



(a) Free field pressure on CFRP



(b) Reflected pressure on CFRP

Fig. 8 Blast pressure on concrete specimen retrofitted with CFRP

Table 4 Measured pressure of each specimen

Specimen		NSC1	ConWEP	NSC2	CFRP1	CFRP2	PU1	PU2	CPU1	CPU2	BFRP	ConWEP	
Type of explosive charge		TNT	TNT	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO	ANFO	
Environment	Temperature (°C)	11	-	5	7	5	7	8	7	9	9	-	
	Humid (%)	31	-	up 51	51	92	37	62	36	up 42	39	-	
Reflect pressure	Center	Pressure (MPa)	NR	20.05	21.23	NR	22.66	22.66	24.07	31.95	24.26	33.17	17.02
		Duration (msec)	NR	1.228	NR	NR	0.352	1.404	0.686	0.896	1.518	2.002	1.412
		Impulse (MPa-msec)	NR	2.83	NR	NR	2.54	4.03	2.91	3.56	3.87	3.9	2.42
	230 mm	Pressure (MPa)	NR	19.48	26.58	NR	21.08	20.62	21.74	20.19	19.6	30.01	16.53
		Duration (msec)	NR	1.271	1.212	NR	1.956	0.892	0.876	0.284	1.034	1.962	1.468
		Impulse (MPa-msec)	NR	2.79	3.26	NR	3.8	2.8	2.91	1.29	3.34	4.64	2.38
Free field pressure	1st peak (MPa)	0.21	0.197	0.16	NR	0.15	0.18	0.17	0.16	0.13	0.11	0.17	
	Duration (msec)	3.516	4.618	3.102	NR	3.054	3.508	3.316	3.336	3.282	3.306	4.628	
	Impulse (MPa-msec)	0.34	0.233	0.23	NR	0.22	0.22	0.2	0.22	0.21	0.21	0.205	

* NR : not recorded, * RP_C : reflected pressure at center point, * RP_2 : reflected pressure at 230 mm point to center

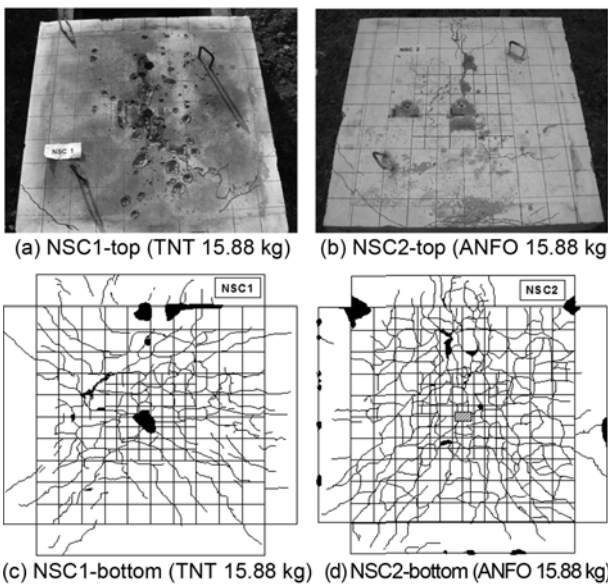


Fig. 9 Damage on normal strength concrete each explosive charge

의 균열을 나타내었다. Fig. 9(a)에서 보는 것과 같이 TNT의 철제 외피로 인해 시편 상부면에 큰 손상이 발생한 것을 볼 수 있다. 일반 강도 콘크리트 시편의 하부면은 콘크리트 항복이론과 같이 거북등 균열과 방사형 균열이 동시에 발생하였으며, 각 옆면에는 보의 전단균열과 같은 형상의 균열이 발생한 것을 볼 수 있다.

보강재료로 보강한 시편의 경우는, 보강된 하부면의 균열형상을 비교할 수 없으므로 상부면과 시편의 옆면의 균열형상을 Fig. 10과 같이 도시하였다.

Figs. 10(b)과 (c)는 CFRP로 보강한 시편으로, 박락과 더불어 부착된 CFRP의 중앙부와 가장자리에 큰 손상을 받은 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 10(d)은 BFRP로 보강된 시편으로 또한 보에서의 전단균열과 같은 형상의 균열이 발생하였으며, 박락이 일부구간에서만 발생된 것을 확인하였다. Figs. 10(e)과 (f)는 폴리우레아로 보강된 시편으로, CFRP에 비해 많은 박락 및 박리가 발생하였으며, 폴리우레아와 CFRP를 함께 보강한 CPU시편(Figs.

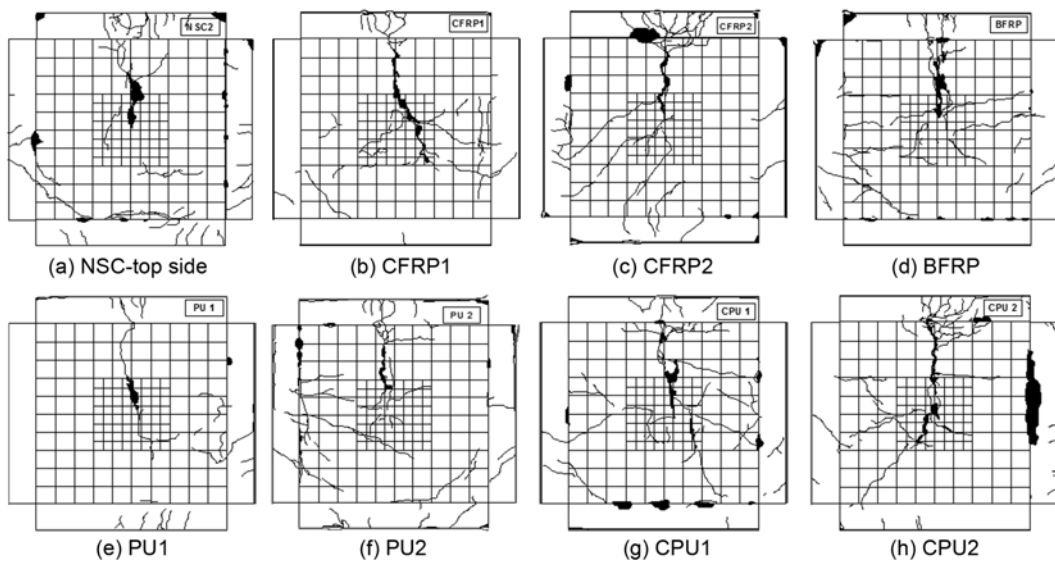


Fig. 10 Crack patterns of blasted specimen top side

10(g)과 (h))은 다른 보강 재료들에 비해 박리, 박락이 크게 발생하지 않았으며, 보강효과가 크기 때문에 다른 시편들에 비해 상부 옆면의 손상이 비교적 큰 것으로 보인다. Fig. 11은 각 시편의 상부 손상 부위를 나타내고 있다. 이와 같이 균열 형상 및 파괴는 폭발하중을 받는 구조물의 사용성 및 보수보강 여부를 판단하게 되는 주요 검토 사항이라 판단된다.

4.2.3 변위 거동 및 변형률

이 연구에서 수행된 폭발하중을 받는 콘크리트 시편의 처짐은 중앙부 하단에 설치한 LVDT를 이용하여 Fig. 12와 같은 거동을 측정하였다. Fig. 12(a)에서 볼 수 있듯이 TNT 15.88 kg로 실험한 일반 강도 콘크리트 시편의 경우에는 LVDT가 측정할 수 있는 범위를 넘었으며, ANFO 15.88 kg의 경우에는 최대 처짐 18.57 mm, 잔류변위 5.79 mm가 발생하였다. CFRP로 보강한 시편의 경우에는 최대 처짐이 17 mm, 12.289 mm로 측정되었으며, 일반 강도 시편에 비하여 +방향(시편 상부면)으로 바운스 되는 경향이 있음을 확인하였다. Fig. 12(b)에서 보는 것과 같이 CPU시편의 경우에는 두 개의 시편중 하나의 경우에만 시편의 거동이 측정되었으며, 다른 시편에 비하여 CPU시편이 11.63 mm의 작은 처짐이 발생하였다. 더불어 BFRP로 보강된 시편의 최대 처짐은 14.889 mm로, 최대 처짐 평균 15.649 mm인 PU시편에 비해 작은 최대 처짐이 발생한 것에 비해, 잔류변형은 10.048 mm로 일반 강도 시편 보다도 크게 발생하였기 때문에 이는 BFRP가 다른 재료로 보강된 시편에 비하여 보강 효과가 미흡하여, 철근의 변형이 과도하게 발생함과 동시에 콘크리트 시편의 중앙부에 큰 잔류변형이 발생하였기 때문에 판단된다. 또한 Fig. 10에서와 같이 CFRP로 보강한 시편과 BFRP로 보강한 시편의 파괴 형상이 크게 차이 나지 않은 것으로 볼 때, BFRP의 낮은 섬유강성으로 인해 섬유파단에 의한 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

폭발하중을 받은 최대 처짐과 잔류변형의 평균값을 도

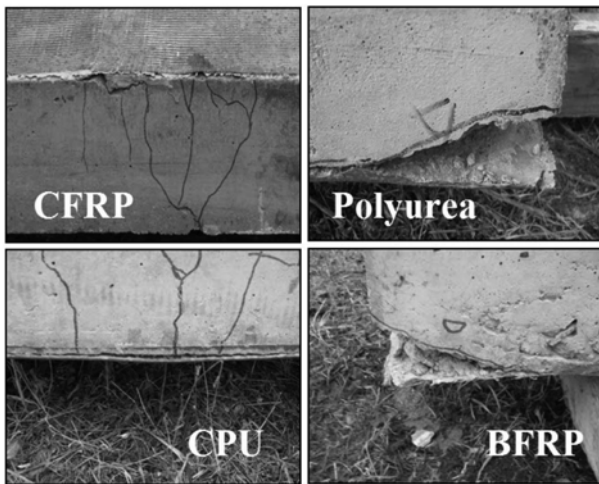


Fig. 11 Failure of each retrofitted specimen

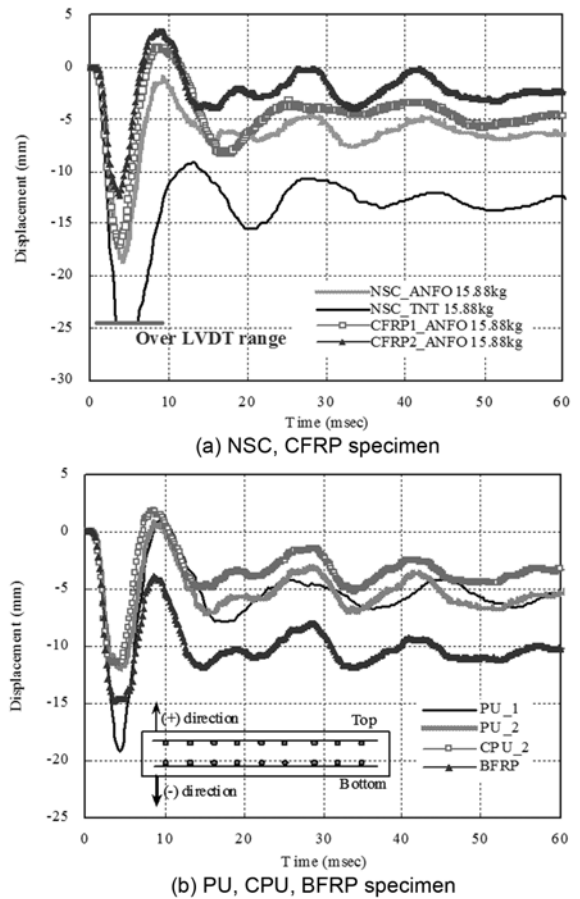


Fig. 12 Behavior of concrete specimen

식화하면 Fig. 13과 같다. 이를 통하여 보강 재료에 따른 최대 처짐에 대한 보강 효과는 CFRP는 21.4%, PU는 15.7%, CPU는 37.4%, BFRP는 19.8%이며, 잔류변형에 대해서는 각 시편별로 67.4%, 43.0%, 63.7%, -11.3%의 보강 효과가 있다. 최대 처짐에 대한 최대 변형과 잔류 변형 차이의 비율로써 콘크리트 및 보강 재료에 의한 에너지 소산 능력을 살펴보면, NSC는 51.4%, CFRP는 79.9%, PU는 67.14%, CPU는 71.8%, BFRP는 32.5%와 같다. 즉 CFRP와 CPU의 시편의 경우 비교적 큰 에너지 소산 능력이 있음을 확인할 수 있다.

Table 5에서 보는 것과 같이 시편중앙부에서의 철근과

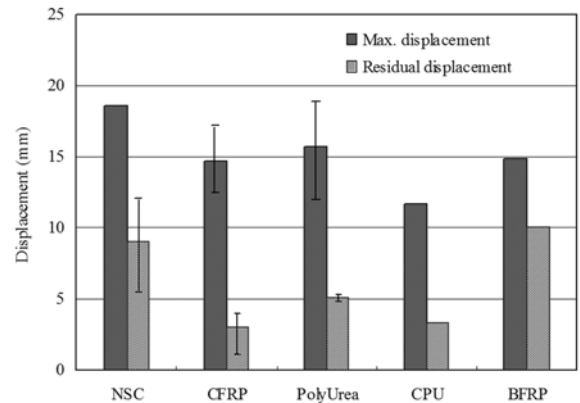


Fig. 13 Average maximum and residual displacements

Table 5 Blast test results of displacements and strain

Specimen		NSC1	NSC2	CFRP1	CFRP2	PU1	PU2	CPU1	CPU2	BFRP
Max. displacement (mm)		over 25	18.565	17.000	12.288	19.265	12.033	NR	11.630	14.889
Average max. disp. (mm)		18.565		14.644		15.649		11.630		14.889
Residual displacement (mm)		12.260	5.790	4.152	1.738	5.285	5.000	NR	3.280	10.048
Average resi. disp. (mm)		9.025		2.945		5.143		3.280		10.048
Ratio of max. to resi. disp. (%)		51.4		79.9		67.1		71.8		32.5
Maximum strain (center), $\mu\epsilon$	Steel top	16012	5964	5035	3603	9553	6014	8224	4601	11096.5
	Steel bottom	15998	over 28113	9683	7434	30803	28230	28324	28783	33638
	Concrete top	-	11848	16005	25568	10338	10654	22042	9235.9	16919
	Conc/FRP bottom	over 16007	-	over 16012	13119	28304	28255	16514	21377	28272

* NR : not recorded, * resi. : residual, * - : dead gauge

콘크리트/복합재의 최대 변형률을 살펴보면, 모든 시편의 하부철근이 항복할 정도의 폭발압력하중을 받는 것을 확인할 수 있다. 또한 콘크리트 및 FRP의 중앙의 하부 최대변형률 또한 전반적으로 10,000 $\mu\epsilon$ 을 넘는 것으로 보아 큰 손상 및 대변형이 발생한 것으로 판단된다. 그러나 변형률 게이지의 허용변형률 이상으로 콘크리트가 변형 하더라도, 잔류 변형률은 대략 1,000~5,000 $\mu\epsilon$ 으로 다시 회복하는 것을 통해 이 연구에서 사용된 복합 재료가 충분한 연성 및 보강 효과 있다고 판단된다.

4.2.4 가속도

폭발압력하중이 가해지는 콘크리트 구조물의 거동 분석은 LVDT를 통해 파악할 수 있으며, LVDT를 통해 콘크리트 구조물의 거동 분석이 불가능한 경우, 가속도를

통해 측정된 결과를 분석할 수 있다. 그러나 이 연구에서 얻어진 가속도는 Fig. 14와 같이 구조물의 거동뿐 아니라, 충격에 의한 가속도도 동시에 측정되었다. 그러므로 1,000~2,000 g 이상의 가속도가 발생하였으며 NSC에 비해 보강 재료로 보강된 시편의 경우 더 큰 진동수를 보인다. 이는 보강 재료로 인한 강성의 증가로 인해 발생한 것으로 판단된다. 또한 CFRP1의 경우는 가속도 게이지와 시편 접합면의 불연속으로 인해 신뢰성이 떨어진 값이 측정된 것으로 판단된다.

5. 결론 및 분석

이 연구는 국내 최초로 민수목적에 의해 수행된 폭발 실험이며, 폭발압력하중을 받는 구조물의 영향과 CFRP,

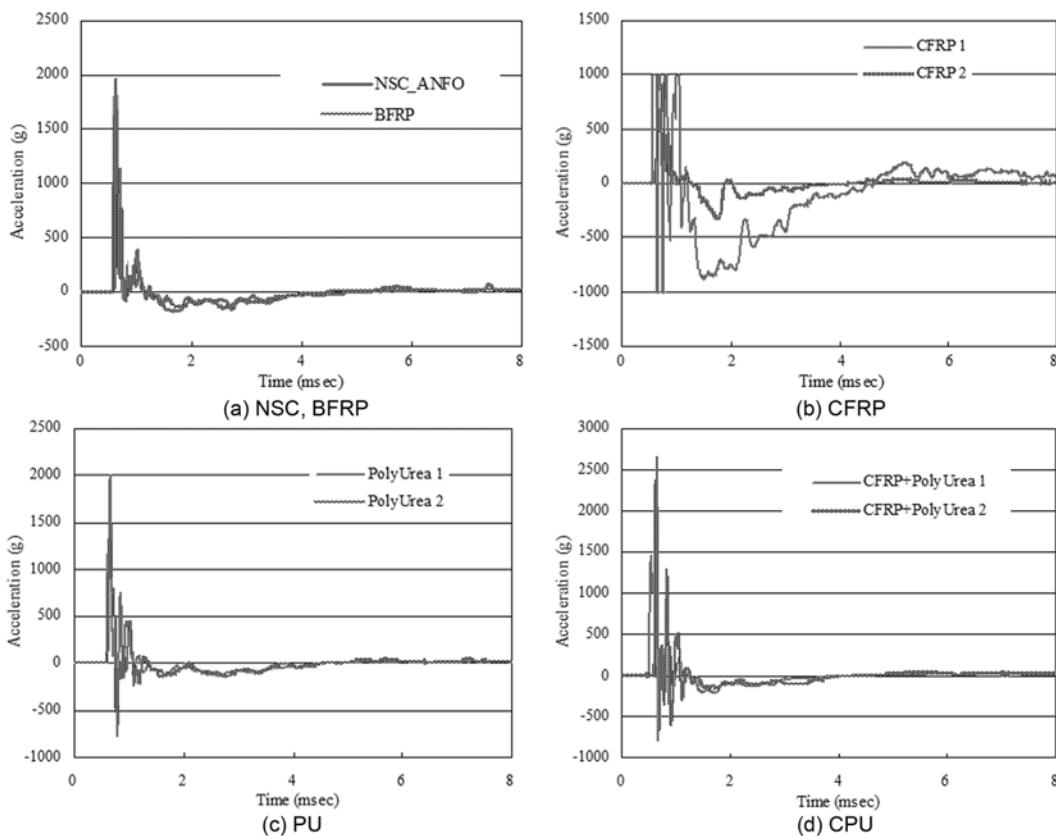


Fig. 14 Each specimen acceleration under blast loading

폴리우레아, CFRP와 폴리우레아, BFRP의 보강 재료로 각각 보강된 철근콘크리트 패널 시편의 보강 효과 및 방호성능을 검토하였다. 그러나 국내의 제한된 여건으로 인해 실험 빈도 및 폭약량 산정 등의 충분한 변수 확보가 이뤄지지 않았다. 그렇지만 이 연구를 통해 확보된 실험 결과를 토대로 CFRP, PU, CPU, BFRP로 보강된 구조물이 일반강도 콘크리트 시편에 비해 강성 및 연성 증가로 인한 에너지 흡수 및 에너지 소산 능력이 증대되었으며, 구조물의 방호 성능과 방호도에 따라 적절한 보강 재료의 사용이 가능하다고 판단되었다. 더불어 추후 향상된 방호 시스템 구축을 위한 콘크리트 패널의 제원 및 정확한 매개변수 등에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다. 이 연구의 폭발 실험 결과를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 폭발압력하중을 산정하기 위해 $1,000 \times 1,000 \times 150$ mm의 철근콘크리트 패널 구조물의 1.5 m 떨어진 거리에 TNT 15.88 kg의 예비실험으로 구성하였으며, TNT의 경우에는 철제 외피로 인해 구조물의 파손 및 반사압력의 데이터 손실이 발생하였다. 그러므로 이 실험에서는 외피에 의한 손상이 없고, 성형이 가능한 ANFO 15.88 kg으로 이 실험을 구성하였다. 1.5 m에서의 반사압력과, 5 m 떨어진 대기 중 폭발압력 모두 ConWEP과 유사하게 예측하였으나, 실제 폭발할 당시의 온도, 습도, 바람 등의 환경조건과 다짐 등의 구속조건, 장약량의 형태 및 기폭제의 위치 등의 기폭조건에 따라 각 시편에서 받는 압력하중 및 충격량이 서로 상이한 것을 확인할 수 있었다. 이는 외국의 폭발 실험 문헌자료를 통해 충분히 발생할 수 있는 오차라 판단되므로, 최대처짐 및 잔류변형량의 절대값을 통해 콘크리트의 방호 성능을 평가하는 것뿐만 아니라, 균열 패턴 및 구조물의 거동에 중점을 두고 판단하는 것이 바람직하다고 판단된다.
- 2) ANFO 15.88 kg의 폭발압력하중을 받는 일반 강도 콘크리트 시편은 콘크리트 항복선의 형태에 따라 시편의 하부면에 방사형 균열이 발생하였으며, 휨 균열 및 전단균열의 형태 또한 발생하였다. 그러나 각 복합재료로 보강된 시편의 하부면은 측정할 수 없으므로 상부면 및 옆면을 검토하였다. CFRP로 보강된 시편은 시편 중앙부와 모서리 부분에 박락 및 박리현상이 발생하였으며, 폴리우레아만으로 보강된 시편은 다른 시편들에 비해 많은 박락과 더불어 보강재만 남은 정도의 박락이 발생하기도 하였다. CFRP와 폴리우레아를 함께 보강한 CPU보강시편은 일부구간의 미소한 박락만이 발생하였으며, 상대적으로 큰 보강 효과로 인해 상부 옆면의 보강되지 않은 부분의 콘크리트의 손상이 크게 발생하였다. BFRP로 보강한 경우에는 박락 및 박리현상이 뚜렷하게 발생하였다. 이와 같은 균열 형상 및 파괴는 폭발하중을 받는 구조물의 사용성 및 보수보강 여부를 판단하게 되는 주요 검토사항이라 판단된다.
- 3) 실험 결과를 통해 일반 강도 콘크리트 시편에 대한

CFRP, PU, CPU, BFRP 보강시편의 평균 최대 처짐은 이 폭발 실험의 조건에서는 21.4%, 15.7%, 37.4%, 19.8%, 평균 잔류변형에 대해서는 각 시편별로 67.4%, 43.0%, 63.7%, -11.3%의 보강효과가 있음을 확인하였다. 즉 최대 처짐의 경우 폴리우레아와 CFRP를 동시에 보강한 CPU가 폴리우레아의 큰 연신율과 CFRP의 큰 인장강도로 다른 시편에 비하여 높은 보강 효과를 보이고 있으며, 잔류변형에 대한 보강 효과를 판단해보면, CFRP 및 CPU의 보강 효과가 뛰어난 것을 확인할 수 있다. 즉 폴리우레아는 강성의 증가보다는 파편 및 연성증가에 효과적인 것으로 판단된다. 그에 비해 BFRP로 보강된 시편의 잔류변형은 오히려 일반 강도 콘크리트 시편에 비하여 큰 변형이 발생하였다. 이는 BFRP가 다른 보강 재료에 비하여 보강효과가 미흡하여, BFRP의 낮은 섬유 강성으로 인해 섬유 파단에 의한 파괴가 발생하였기 때문으로 보이며, 실제로 구조물에 BFRP로 보강한 경우라면, 폭발하중 후의 구조물에 대한 사용성이 떨어질 것이라고 판단된다.

- 4) 최대 처짐과 잔류변형 차이율을 비교해 보면 NSC, CFRP, PU, CPU, BFRP는 각각 51.4%, 79.9%, 67.14%, 71.8%, 32.5%와 같다. 즉 CFRP와 CPU 시편의 경우 비교적 큰 에너지 소산 능력이 있음을 확인할 수 있다. 그러므로 최대 처짐, 잔류변형 및 에너지 소산 능력에 따른 적절한 보강 재료를 선택하여 각 구조물의 사용도 및 보수보강 여부, 가격대비 보강 성능에 따라 사용해야 할 것으로 판단된다.

이 연구의 제한된 실험 결과만으로 다양한 역학적 특성을 갖는 복합 신소재 구조의 거동을 결론짓기는 미흡하다고 판단되므로, 추가적인 방폭 실험과 정밀실험 조건을 검토해야 하며, 추후, 정밀 폭발 해석(HFPB)을 수행하여 실험 결과를 분석해야 할 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국연구재단(과제번호 R01-2008-000-1117601), 한국콘크리트학회의 Construction Core Technology Program D11, “Center for Concrete Corea”의 재정적인 지원을 통해 이뤄졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김호진, 남진원, 김성배, 이우철, 변근주, “폭발하중을 받는 콘크리트 벽체 구조물의 보강 성능에 대한 해석적 분석,” 콘크리트학회 논문집, 19권, 2호, 2007, pp. 241~250.
2. 남진원, 김호진, 김성배, 변근주, “폭발하중을 받는 콘크리트 벽체구조의 해석기법,” 대한토목학회 논문집, 27권, 3호, 2007, pp. 433~442.
3. Nam, J. W., Kim, J. H. J., Kim, S. B., Yi, N. H., and Byun, K. J., “A Study on Mesh Size Dependency of Finite Element Blast Structural Analysis Induced by Non-uniform Pressure Distri-

- bution from High Explosive Blast Wave,” *KSCCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 12, No. 4, 2008, pp. 259~265.
4. Nam, J. W., Kim, H. J., Kim, S. B., Kim, J. H. J., and Byun, K. J., “Analytical Study of Finite Element Models for FRP Retrofitted Concrete Structure under Blast Loads,” *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 18, No. 5, 2009, pp. 461~490.
 5. Nam, J. W., Kim, H. J., Yi, N. H., Kim, I. S., Kim, J. H. J., and Choi, H. J., “Blast Analysis of Concrete Arch Structures for FRP Retrofitting Design,” *Computers and Concrete*, Vol. 6, No. 4, 2009, pp. 305~318.
 6. Krauthammer, T., *Modern Protective Structures*, CRC Press, 2007.
 7. DTRA/TSWG Program, *Blast Mitigation for Structure, Status Report, Commission on Engineering and Technical Systems*, National Research Council, National Academy Press, Washington, DC, USA, 1999.
 8. Patoary, M. K. H. and Tan, K. H., “Blast Resistance of Prototype In-built Masonry Walls Strengthened with FRP Systems,” *6th Int. Conf. on Fibre-Reinforced Plastics for Reinforced Concrete Structures*, Singapore, 2003, pp. 1189~1198.
 9. Malvar, L. J., Crawford, J. E., and Morrill, K. B., “Use of Composites to Resist Blast,” *Journal of Composites for Construction*, Vol. 11, No. 6, 2007, pp. 601~610.
 10. Chen, Z. F. and Wan, L. L., “Evaluation of CFRP, GFRP, and BFRP Material Systems for the Strengthening of RC Slabs,” *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 27, No. 12, 2008, pp. 1233~1243.
 11. Buchan, P. A. and Chen, J. F., “Blast Resistance of FRP Composites and Polymer Strengthened Concrete and Masonry Structures-A State-of-the-art Review,” *Composites: Part B Engineering*, Vol. 38, No. 5-6, 2007, pp. 509~522.
 12. Kim, H. J., “Blast Analysis of FRP-retrofitted Concrete Structures Considering FRP Failure Mechanism,” Doctoral Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea, 2007.
 13. Mosalam, K. M. and Mosallam, A. S., “Nonlinear Transient Analysis of Reinforced Concrete Slabs Subjected to Blast Loading and Retrofitted with CFRP Composites,” *Composite Part B : Engineering*, Vol. 32, Issue 8, 2001, pp. 623~636.
 14. Muszynski, L. C. and Purcell, M. R., “Use of Composite Reinforcement to Strengthen Concrete and Air-Entered Concrete Masonry Walls against Air Blast,” *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 7, No. 2, 2003, pp. 98~108.
 15. Ross C. A, Purcell M. R., and Jerome E. L., “Blast Response of Concrete Beams and Slabs Externally Reinforced with Fibre Reinforced Plastics (FRP),” *In Proceedings of the Structure, Congress, XV-Building to Last*, Portland, USA, 1997, pp. 673~677.
 16. Razaqpur, A. G., Tolba, A., and Contestabile, E., “Blast Loading Response of Reinforced Concrete Panels Reinforced with Externally Bonded GFRP Laminates,” *Composite Part B : Engineering*, Vol. 38, 2007, pp. 535~546.
 17. Morrill, K. B., Malvar, L. J., Crawford, J. E., and Ferritto, J. M., “Blast Resistant Design and Retrofit of Reinforced Concrete Columns and Walls,” *Structures-Building on the Past: Securing the Future Proceedings of Structures Congress 2004*, Nashville, Tennessee, USA, 2004, pp. 1~8.
 18. Myers, J. J., Belabi, A., and El-domiaty, K. A., “Blast Resistance of Unreinforced Masonry Walls Retrofitted with Fibre Reinforced Polymers,” *In Proceedings of the 9th North American Masonry Conference*, Clemson, USA, 2003, pp. 312~323.
 19. Davidson, J. S., Porter, J. R., Dinan, R. J., Hammons, M. I., and Connell, J. D., “Explosive Testing of Polymer Retrofit Masonry Walls,” *Journal of Performance of Constructed Facilities, ASCE*, Vol. 18, No. 2, 2004, pp. 100~106.
 20. Tolba, A., “Response of FRP-Retrofitted Reinforced Concrete Panels to Blast Loading,” Doctoral Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada, 2001.
 21. Nam, J. W., “Blast Analysis of RC Wall Structure Using High Strain Rate Dependent Concrete Damage Model and Non-uniform Peak Pressure Distribution Model,” Doctoral Thesis, Yonsei University, Seoul, 2007.
 22. Oesterle, M. G., “Blast Simulator Wall Tests: Experimental Methods and Mitigation Strategies for Reinforced Concrete and Concrete Masonry,” Doctoral Thesis, University of California, San Diego, USA, 2009.
 23. Oswald, C. J. and Wesevich, J. W., “Structural Retrofits to Increase the Blast Capacity of Roofs and Masonry Walls,” *In Proceedings of the SAME National Symposium on Comprehensive Force Protection*, Charleston, USA, 2001.
 24. Porter, J. R., Dinan, R. J., and Hammons, M. L., “Polymer Coatings Increase Blast Resistance of Existing and Temporary Structures,” *AMPTIAC, Special Issue: Protecting People at Risk*, Vol. 6, No. 4, 2002, pp. 47~67.

요 약 최근, 토목 분야에서의 RC 구조물의 보강을 위한 FRP 사용이 증대되고 있다. 특히, FRP로 보강된 구조물의 폭발저항성능에 대한 관심이 증가하면서 폭발하중에 대한 FRP의 보강 효과에 대한 검토가 필요하게 되었다. 폭발하중을 받는 FRP의 보강 효과를 측정하기 위해 9개의 $1,000 \times 1,000 \times 150$ mm의 RC 패널 시편을 제작하였으며, 각 시편에는 탄소섬유복합재(CFRP), 폴리우레아, 폴리우레아와 CFRP의 동시 보강한 경우와 현무암 섬유 복합재(BFRP, basalt fiber reinforced polymer)로 보강하여 각 보강 섬유의 폭발 저항 성능을 검토하고자 하였다. 폭발하중은 ANFO 15.88 kg의 장약량을 1.5 m 이격거리로 적용하였으며, 측정하고자 한 데이터는 초기 압력폭발압력하중 뿐만 아니라, 반사압력, 충격량, 중앙부의 처짐, 철근, 콘크리트 및 FRP의 변형률을 측정하였다. 각 시편의 파괴모드는 control 시편인 일반 강도 시편과 비교하였다. 실험을 통해 보강 재료에 따른 방폭 성능을 파악하였으며, 이 실험 결과는 구조물에 요구되는 방호 성능 및 방호도에 따라 보강 재료를 선택하는 기초자료로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 폭발, 이격거리, CFRP, BFRP, 폴리우레아