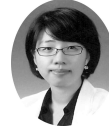


구조물의 방폭성능 향상을 콘크리트 재료 및 외부 보강재료

Retrofit Materials for Improving Blast Resistance of Structures

김성배*
Sung-Bae Kim하주형**
Ju-Hyung Ha조윤구**
Yun-Gu Cho이나현***
Na-Hyun Yi

1. 서언

인류의 역사는 종교적, 이념적 대립과 갈등으로 빚어진 국가 간 혹은 민족간의 분쟁의 역사라고 해도 과언이 아닐 것이다. 지금도 지구촌 곳곳에는 전쟁과 테러로 수많은 인명피해가 끊이지 않고 있다. 미국 뉴욕의 9.11 테러(2001년)와 영국 런던의 지하철 테러(2005년)는 아직도 우리의 뇌리속에서 지워지지 않고 있으며 그 외에도 다양한 폭발사고가 세계도처에서 발생하고 있다<그림 1>.

우리나라에서도 1986년 김포국제공항에서 발생한 폭탄테러로 아픔을 겪은 바 있으며 급변하는 국제정세와 한반도 주변의 안보 위협요소들은 아직도 우리를 불안에 떨게 하고 있다. 특히, 세계에서 유일한 분단국가인 한국에서는 지속적인 국제정세의 변화속에서 북한이나 다른 국가들에 의한 테러 발생 가능성이 항시 존재하며, 몇 개의 대도시에 국가 인구 대부분이 밀집되어 있는 주거 특성을 가지고 있어 테러나 폭발사고가 발생할 때 매우 큰 국가적인 손실이 발생할 우려가 있다.

폭발·테러와 관련된 대표적인 사례는 최근 발생한 북한의 연평도 포격사건에서 잘 알 수 있다. 이 사건으로 대한민국은 연평도에서 복무하던 해병대원 2명이 전사하고, 민간인 2명이 사망하였으며, 민간인 3명과 해병대원 16명이 중경상을 입었다. 이 밖에도 주택 12동이 대파되었고 25동은 불에 탔으며, 차량 3대



그림 1. 세계 도처에서 발생한 폭발사고

와 컨테이너 박스도 여러채 파괴되었다. 연평도의 가옥들 19채가 파손되거나 불에 탔으며, 산불이 발생했다. 이처럼 북한의 연평도 포격사건에서와 같이 폭발에 의한 인명 및 재산 피해 등의 손실이 얼마나 참혹한 결과를 가져오는지 확인할 수 있었다.

이처럼 다양한 폭발사례가 잇따르고 화제가 집중되면서 폭발에 의한 방호의 중요성이 부각되어 구조적 문제와 함께 폭발저항성을 갖는 재료 개량이 집중적인 관심이 모이고 있다. 그러므로 본 고에서는 방호 개념에 입각하여 구조물의 재료적인 측면에서 폭발에 대한 저항성을 향상시킬 수 있는 다양한 보강 재료에 대하여 개략적으로 소개하고자 한다.

2. 방호 구조물의 목적

폭발하중을 받는 구조물은 폭발하중에 저항할 수 있는 충분한 강성을 확보하고 폭발에너지를 충분히 흡수하여 구조물의 파괴를 방지하고 손상을 최소화 하여야 한다. 또한, 폭탄테러에 의한 구조물의 손상 및 구조물 자체의 안전성 확보도 중요하지만 그로 인한 인명피해가 막대하므로 기존건물의 폭탄테러에 대한 피해를 최소화하는 것을 목적으로 한다.

3. 콘크리트 자체의 폭발저항성을 향상시키는 방법

일반적으로 콘크리트는 높은 단위질량과 상당한 에너지 흡수력을 갖는 재료로써 다른 건설재료에 비해 충격압력이나 폭발 등에 의해 발생하는 매우 순간적인 하중에 저항할 수 있는 방호 구조의 설계시 가장 적합하고 경제적인 구조재료로 평가되었다. 그러나 점차 첨단과학기술의 발달과 무기성능의 발전에 따라 더 이상은 안전한 재료로 평가받기가 어려운 실정이다. 따라서 콘크리트 자체의 성능 또한 무기성능의 발달과 함께 향상되고 있다.

3.1 고강도 콘크리트

구조물의 폭발 및 충돌 저항성을 높이는 방법으로 가장 보편적

* 정희원, 연세대학교 BK21 박사후 연구원
sztk77@yonsei.ac.kr

** 정희원, 현대건설 R&D센터 첨단산업기술연구부 책임연구원

*** 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사과정

인 방법은 콘크리트의 강도를 높이는 방법이다. 현재의 콘크리트 제조 기술의 비약적인 발달로 인하여 압축강도 40 ~ 60 MPa 수준의 고강도 콘크리트를 제조하는 것은 그리 어렵지 않다. 이러한 고강도 콘크리트는 콘크리트 자체의 강도가 매우 높아 폭발에 의한 충격파를 잘 흡수하고 복합적인 응력 패턴에 의해 유발될 수 있는 균열을 억제하는 효과를 가지고 있다. 또한 구조물의 강도를 유지하고 연쇄붕괴위험을 줄일 수 있다. 그러나 이러한 고강도 콘크리트는 구조물자체의 기능을 유지하고 손상을 줄이는 효과는 어느 정도 확보할 수 있으나 충격파에 의해 구조물이 잘게 파쇄된 파편을 억제하는 효과는 크지 않은 것으로 나타났다.

3.2 단섬유 보강 콘크리트

단섬유 보강 콘크리트는 콘크리트 중에 단섬유를 혼합시켜 섬유를 보강재로 하는 복합재료로서 기존의 보통 콘크리트에 비하여 인장, 휨, 전단강도 및 인성을 현저히 개선하고, 균열에 대한 저항성, 내충격성, 내마모성 및 폭발저항성 등을 크게 증가시킬 수 있는 우수한 특성을 가지고 있어 콘크리트 구조물의 보강재로 많이 사용되고 있다. 특히, 섬유보강 콘크리트는 콘크리트의 인성, 내충격성 및 폭발 에너지 흡수능력이 대단히 우수하여 방호 구조물의 폭발저항성을 향상시키기 위한 재료로 연구 중이다.

보강섬유 중 가장 널리 사용되는 보강섬유는 강섬유로써 1970년대 초 처음으로 무근 슛크리트에 강섬유를 혼합한 시험을 시작으로 현재 다양한 분야에 적용되고 있으며, 최근에는 <그림 2>와 같이 천연섬유와 합성섬유 그리고 재생섬유에 이르기까지 다양한 보강섬유가 개발되고 있다. 이러한 보강섬유는 <그림 3,

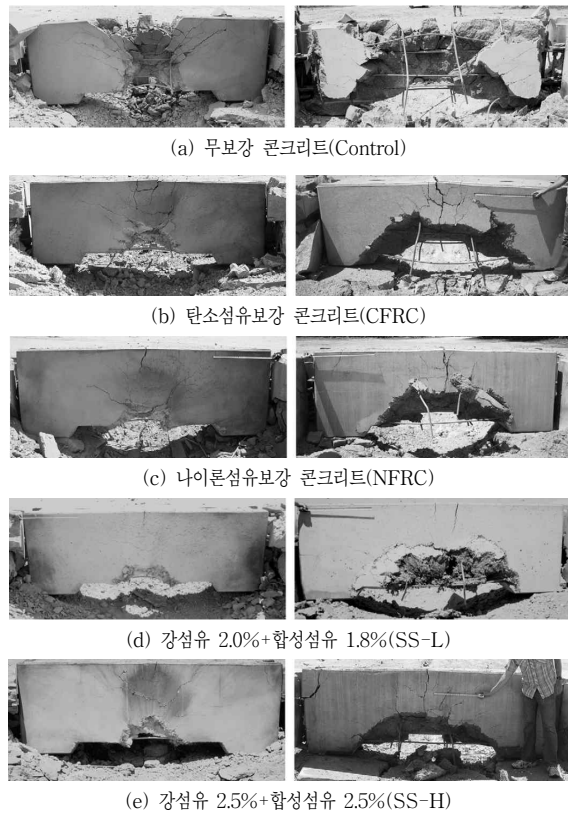


그림 3. 섬유 종류에 따른 시험체 손상도

4>와 같이 폭발하중하에 놓인 경우 매트릭스 사이의 인장강도를 증가시켜 콘크리트 부재의 미세균열의 진전을 제어하는 효과

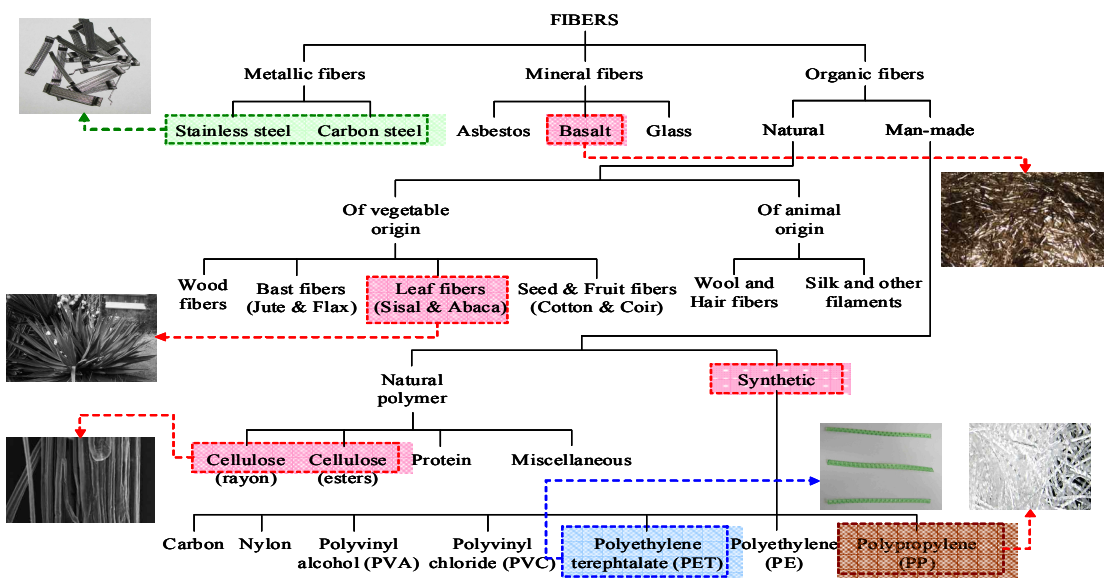


그림 2. 보강섬유의 종류

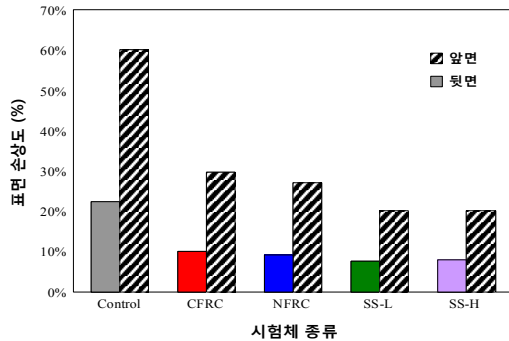


그림 4. 섬유 종류에 따른 표면 손상도

가 우수하여 콘크리트의 손상을 줄이며 파편제어 효과와 연성효과가 뛰어난 것으로 알려져 있다. 그러나 폭발저항성을 향상시키기 위한 가장 경제적이고 효과적인 보강방법으로 인식되는 섬유보강방법은 아직까지 폭발하중 하에서의 섬유의 거동 및 혼입량과 폭발저항성에 대한 역학적인 관계를 명확하게 밝히기 위한 실험데이터 등이 부족하다.

3.3 초고강도 콘크리트

최근 도목·건축 구조물이 초고층화, 대형화 되어감에 따라 국내의 경우도 150 MPa 이상의 초고강도 콘크리트가 실용화 단계에 이르렀으며, 부재단면의 축소 및 경량화의 장점으로 인해 앞으로 더욱 다양한 용도로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 초고강도 콘크리트는 특유의 높은 강도로 인해 폭발에 대한 최대 처짐, 잔류 변형 및 전반적인 손상도에 있어서 일반강도의 콘크리트에 비해 유리한 장점이 있으나 상대적으로 취성적인 형태의 파괴가 발생하는 것으로 보고되었다. 그러나 초고강도 콘크리트 구조물을 적절한 소재로 보강하여 연성을 증진시킨다면 강성과 연성을 모두 갖춘 고수준의 방호성능 향상을 이뤄낼 수 있을 것으로 판단된다. 하지만 현재는 주요시설이나 방호 구조물에 사용할 수 있는 초고강도 콘크리트의 폭발저항성능에 대한 자료가 매우 부족한 상태이기 때문에 폭발 및 충돌과 같은 특수하중 작용시의 초고강도 콘크리트를 사용한 구조물에 대한 재료개발, 성능시험 및 설계기법 연구 등이 필요한 실정이다.

3.4 SIMCON 및 SIFCON

SIMCON(slurry infiltrated mat concrete)와 SIFCON(slurry infiltrated fiber concrete)는 단섬유를 다량으로 사용할 경우 배합중에 섬유응집현상(fiber ball)이 발생해 유동성 및 시공성이 저하되면서 섬유 혼입량이 한정되는 문제극복을 위해 강섬유 또는 섬유매트를 먼저 거꾸집에 배치한 후 시멘트 슬러

리를 침투시켜 제조하는 방법으로 섬유를 체적으로 최대 20%까지 혼입하는 복합재료이다⁸⁾. 다량의 섬유에 의한 구속효과로 인해 압축강도는 210 MPa에 달하고, 가교효과에 의해 인장응력 하에서 변형경화 거동을 하며, SIMCON과 SIFCON은 내진·내폭 구조물, 보수보가용 재료, 프리캐스트 구조물 등에 사용되고 있으며, 최근 방호구조물로서의 성능평가 및 거동분석에 대한 연구가 많이 수행되고 있는 실정이다.

4. 외부보강을 통한 폭발저항성을 향상시키는 방법

콘크리트는 일반적으로 다른 건설재료와 비교할 때 폭발하중에 대한 저항성능이 상대적으로 우수한 것으로 알려져 있지만 설계단계에서 폭발하중을 고려하지 않은 기존의 콘크리트 구조물에 대해서는 폭발하중에 대한 저항성능을 향상시키기 위하여 별도의 보강이 요구되는 경우가 존재한다. 추가적인 구조부재나 지지구조물 등을 설치하여 저항성능을 향상시키는 방법은 공간의 제약과 추가비용의 문제 등이 발생하며, 부재자체의 성능을 향상시키는 것이 아니기 때문에 경제적인 측면이나 구조적 측면에서 효율이 떨어진다. 최근 세계 각국에서 다양한 폭발사고에 대한 피해가 급증해 폭발 저항성이 설계에 반영되지 않은 기존의 건물에 폭발 저항성을 높여주어야 한다는 요구가 새롭게 등장했으며, 콘크리트를 대체할 다양한 보강재료가 제시되고 있다.

4.1 섬유복합재(FRP)

FRP는 산, 알칼리, 염 등의 부식에 대하여 강한 저항성을 지니고 있어 내식성이 우수하고 알루미늄보다 가벼운 반영구적인 소재로 매우 큰 강도를 지니고 있다. 이러한 FRP의 특성으로 경제적이면서 전통적인 건설재료를 대체할 수 있는 방안으로 FRP복합재료가 제시되고 있다.

섬유복합재를 부착하여 주요 구조부재의 단면을 보강하는 방법은 부재자체의 성능을 향상시키고 동시에 추가적인 공간이 필요하지 않으므로 구조적 성능이나 경제적 및 공간적 효율을 높이는데 유리한 대표적인 보강공법이라 할 수 있다. 이 공법은 표면 부착된 고성능 섬유복합재와 구조물과의 일체성을 도모함으로써 구조물의 강성 및 연성을 증가시켜 폭발저항성을 향상시키는 방법이다. <그림 5>는 실물구조물을 대상으로 FRP 보강 유무에 따른 폭발저항성을 보여주고 있다. 이러한 FRP 부착보강공법은 시공이 간편하고 추가 구조부재를 동반하지 않아 경제성을 갖춘 우수한 공법으로 현재 유리섬유 복합재(GFRP), 탄소섬유 복합재(CFRP), 아라미드섬유 복합재(AFRP) 등이 널리 사용되고 있다.

현재까지 폭발저항성 실험에 사용된 재료는 유리섬유복합재나



그림 5. FRP 보강 유·무에 따른 폭발저항성

탄소섬유복합재가 대부분이며, 일반적으로 폭발저항성에 대한 보강재의 선택에 있어서 탄소섬유시트에 비하여 상대적으로 연성이 뛰어나며 두꺼운 단면특성으로 인하여 에너지 흡수성이 우수한 유리섬유시트가 보강재료로서의 효율성과 보강성능이 보다 우수한 것으로 보고되고 있다. 이러한 이유는 탄소섬유에 비하여 상대적으로 항복강도와 탄성계수가 낮은 유리섬유로 보강한 경우 보강효율성이 더 우수하다는 것에 주목할 만하며, 이러한 결과는 폭발하중에 대한 저항성능을 증가시키기 위해서는 강성 증가뿐만 아니라 그와 더불어 적절한 연성확보가 요구된다는 이론을 입증하고 있다. 일부 연구자는 충격저항성이 높은 아라미드섬유 복합재를 최적의 보강재료로 선정하기도 하였다. 그러나 CFRP에 비해 강성이 떨어지기 때문에 콘크리트의 변형이나 파편을 제어하는 효과가 떨어진다고 보고되고 있다.

4.2 폴리우레아(polyurea)

최근 폭발하중에 대한 구조물의 보강설계의 개념으로 부각되고 있는 에너지 흡수개념의 보강설계(resilient design) 개념에 근거하면, 보강효과는 보강재료의 에너지 흡수정도와 지지구조물의 손상정도로써 파악할 수 있다. 보강재에 따라 성능개선이거나 경제적인 이유로 그 적용두께를 조절하게 되는데, 일반적으로 두께가 두꺼울수록 에너지 흡수율이 높고 전체 구조물의 성능을 개선시킬 수 있다고 알려져 있다. 이러한 개념에 부합되는 재료로 우레탄계열 고분자 화합물인 폴리우레아(polyurea)가 각광받고 있다.

폴리우레아는 광범위한 물성의 조절이 가능할 뿐 아니라 뛰어난 계면접착성과 기계적 물성 등으로 인해 접착제, 코팅제 등을 포함한 각종 바인더형 복합재료로 폭넓게 사용되고 있으며, 철, 나무, 유리, 스티로폼, 콘크리트, 종이, 섬유 등 고체를 유지하는 모든 형태의 표면에 도포가 가능한 재료이다. 폴리우레아는 주계와 경화제를 60~90°C로 가열한 상태에서 고압분사장치(스프레이건)를 이용하여 각각 분사·도포하여 혼합되도록 하며, 폴리우레아의 경화 시간은 20~30초 전·후의 짧은 시간 내에 경화가 되어 탄성피막체를 형성하게 되어 작업된다. 최근에는 이러한 폴리우레아가 가진 내강도성과 뛰어난 연성과 부착 성능으로 인하여 폭발이나 충격에 대해 효과적으로 저항하여 구조물

과 인명피해를 최소화 할 수 있으며, 콘크리트 구조물의 보강에 FRP보다 우수한 성능을 발휘한다는 연구결과가 보고된 바 있다. 이러한 결과는 폴리우레아의 높은 부착성능과 파단변형률이 100~300%에 이르는 고인성 재료이기 때문에 계면부착파괴나 폴리우레아의 파단에 의한 파괴가 발생하지 않은 것으로 보고되었다. 또한 보강재의 파단이나 계면 탈락이 발생하지 않기 때문에 파면에 의한 손상을 최대한 방지할 수 있는 재료로

각광받고 있다. 그러나 폴리우레아는 <그림 6>과 같이 도포시 특수한 분사장치가 필요하고 시공시 비산되는 양이 많아 인체에 유해하여 숙련된 기술자에 의해서만 도포가 가능하며 일정한 두께로 도포하기가 매우 어려운 단점이 있다. 또한 현 장비를 이용하여 연속작업을 수행할 경우에 있어서 A액과 B액의 점성차이로 인하여 토출 압력이 달라지는 것이 문제로 지적되고 있다. <표 1>은 일반적인 폴리우레아와 폭발에 대한 저항성을 갖는 폴리우레아의 물성을 정리하여 놓은 것이다.

4.3 다중 혼합 복합재료

앞서 언급하였듯이 구조물의 섬유복합재를 사용하여 폭발하중에 대하여 구조물을 보강하는 경우에는 단순히 구조물의 강성 증가만으로는 소요 저항성능을 확보할 수 없으며, 오히려 취성적인 파괴모드를 유발하기도 한다. 이러한 대안으로 제시되고 있는 폴리우레아는 높은 고인성 재료로 파면에 대한 안전성이 매우 크지만 구조물의 성능을 유지시키는 데에는 적절한 보강이 필요한 것으로 나타났다. 이처럼 강성 증가와 함께 적절한 연성

표 1. 일반적인 폴리우레아와 폭발성능 적합한 폴리우레아의 물성치

재료특성	ASTM	일반 폴리우레아	방폭 폴리우레아
			우레탄-폴리우레아
밀도, lb/ft ³ (g/cm ³)	ASTM D-1622	68(1.09)	70(1.12)
경도(shore D)	ASTM D-2240	60-75	40-46
인장강도, psi(MPa)	ASTM D-412	3,571-4,000 (25-28)	4,000(27.5)
신장률(%)	ASTM D-412	90-130	700(±90)
탄성계수, psi(MPa)	ASTM D-412	25,000 (172.3)	13,000(89.6)




그림 6. 폴리우레아 시공 장면과 시공 장비

을 확보할 수 있는 보강재를 선정하는 것은 매우 중요면서도 어렵다고 할 수 있다.

<그림 7>은 폭발에 대한 저항성을 확보하기 위해 사용되는 보강재료의 특성을 보여주고 있다. 그림에서 보여주는 것과 같이 FRP는 매우 높은 강성을 갖으나 연성능력이 떨어지며, 폴리우레아와 우레탄은 연성능력은 매우 뛰어나지만 낮은 강성을 보이고 있다. 이에 일각에서는 <그림 8>과 같이 서로 다른 특성을 갖는 재료를 혼합 보강하여 폭발에 대한 저항성을 확보하려는 시도를 보이고 있다. 국내에서도 최근 FRP와 폴리우레아의 보강 순서에 따른 보강성능을 규명하려는 연구가 시도되고 있다. 또한 FRP의 단부파괴를 방지하기 위하여 앵커를 설치하는 방법도 고려되고 있다. 그러나 아직까지 대부분의 연구가 재료적인 성능면에 국한되어 있으며 수지와 섬유 사이에 존재하는 계면에 대한 거동 규명이 불명확하여 정성적인 연구에 머무르고 있는 실정이다.

5. 맺음말

폭발에 대한 저항성을 향상시키기 위해 많은 연구자들이 다양한 보강재료를 대상으로 폭발저항성을 시험하였으나 구조물의 차이, 폭약의 사용량 등에 따라 다양한 견해를 보이고 있어 연구의 상호비교는 매우 어려운 상황이다. 특히, 가장 많은 보강재료로 선택되고 있는 FRP의 경우 연구자들에 따라 연구 결과가 매우 상이하여 현 상황에서 한 재료에 대한 우수성을 주장하기 매우 어렵다. 따라서 추후 상이한 보강재료와 기법들의 특성을 정확히 분석하고 효율성을 고려한 보강재료를 선택하기 위한 체계적인 연구가 필요하다. 

참고문헌

1. 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, Vol. 38, 2007, pp. 509 ~ 522.

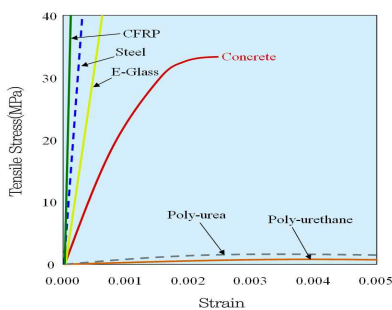
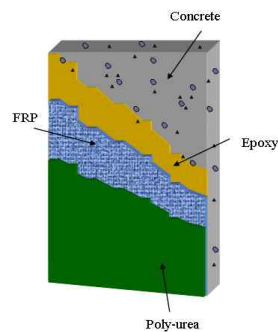
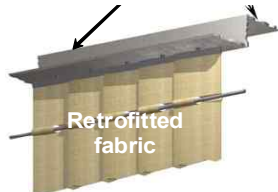


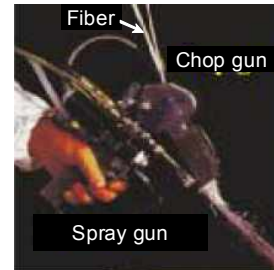
그림 7. 보강 재료의 특성 비교



(a) 폴리우레아와 FRP 적층보강
Anchorage bracket attachment to building



(b) 앵커를 이용한 부착파괴 방지



(c) 단섬유와 폴리우레아의 혼합보강

그림 8. 혼합 보강 재료

2. Coughlin, A.M., Musselman, E.S., Schokker, A.J., Linzell, D.G. "Behavior of portable fiber reinforced concrete vehicle barriers subject to blasts from contact charges", International Journal of Impact Engineering, Vol. 37, 2010, pp. 521 ~ 529.

3. Davidson, J.S, Porter, J.R, Dinan, R.J, Hammons, M.I, and Connell, J.D. "Explosive testing of polymer retrofitted masonry walls", J Perform Constructed Facilities, Vol. 18, No. 2, 2004, pp. 100 ~ 106.

4. Muszynski, L.C and Purcell, M.R. "Composite reinforcement to strengthen existing concrete structures against air blast", J Compos Constr, Vol. 7, No. 2, 2003, pp. 93 ~ 97.

5. 연세대학교 건설공학연구소, 고성능 복합재료를 적용한 Protective Structure System의 개발, 2007.

6. 이나현, 김성배, 김장호, 조윤구, '폭발하중을 받는 콘크리트 구조물의 실험적 거동분석: (2)초고강도 콘크리트 및 RPC슬래브의 실험결과', 대학토목학회논문집, Vol. 29, No. 5A, 2009, pp. 565 ~ 575.

7. 하주형, 이나현, 김성배, 최종권, 김장호, '철근콘크리트 패널의 FRP 보강에 의한 방폭 성능 향상에 관한 실험 연구', 한국콘크리트학회논문집, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 93 ~ 102.

8. 한국건설기술연구원, 초고성능 시멘트 복합재료를 활용한 교량 거더 개발, 건설핵심기술연구개발사업 최종보고서, 건설교통부, 2005.

담당 편집위원 : 정해문(한국도로공사 도로교통연구원) haimoon@ex.co.kr