

# HPFRCC, 분절 복합체 및 FRP를 활용한 구조물의 내폭 성능 향상

## Enhancing the Blast Resistance of Structures Using HPFRCC, Segmented Composites, and FRP Composites

윤 영 수\*      양 준 모\*\*      민 경 환\*\*      신 현 오\*\*\*  
Yoon, Young Soo      Yang, Jun Mo      Min, Kyung Hwan      Shin, Hyun Oh

---

### ABSTRACT

The past structures were just required bearing capacity to service load, serviceability, and resistance to corrosion. However this point of view has changed after 9.11 terrorism, capacities which can bear impact loading by explosion, and heat by fire happening at the same time, become to be important as a basic condition. The blast resistance capacity of structures is very important part against all over the world is intimidated by terrorism everyday in current point of time.

The target of this research is a development of segmented composites and layered structures with high blast resistance using cementitious composites, concrete and FRP composites, which has high tensile strength and ductility, to apply in not only existing facilities but also new ones. Through the improvement of blast resistance, casualties and economic loss can be minimized, and it is possible to diminish the structure collapse and delay the time of structure collapse by thermal effect, impact loading, dynamic loading and high strain.

### 요 약

과거 건설 구조물은 사용 하중을 견딜만한 성능과 사용성, 부식에 대한 저항성 정도만이 요구되었다. 그러나 9.11 사건 이후 이러한 관점은 바뀌어, 폭발에 의한 충격 하중 및 그와 동시에 발생할 수 있는 화재로 인한 열에 견딜 수 있는 구조물의 저항 성능이 기본적인 요구 조건으로써 중요시되고 있다. 전 세계가 연일 테러의 위협 아래 놓여있는 현 시점에서 구조물의 내폭 성능은 매우 중요한 부분이라 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 건설 재료로써 폭넓게 사용되고 있는 시멘트 복합체 혹은 콘크리트에 인장 강도 및 연성이 뛰어난 FRP composite을 결합시켜 내폭 성능이 우수하고 기존 구조물 및 신설 구조물에 모두 시공이 가능한 최적화된 분절 복합체(Segmented Composite) 및 층 구조(Layered Structure)를 개발하고, 그 성능을 평가하고자 한다. 이러한 내폭 성능의 향상을 통해, 열과 충격 하중, 동하중 및 high strain에 의한 구조물의 붕괴를 줄이고 붕괴 시점을 보다 늦출 수 있다면, 이로 인해 발생하는 인명 피해 및 경제적 손실을 최소화시킬 수 있을 것이다.

---

\* 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 교수  
\*\* 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 박사과정  
\*\*\* 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학과 석사과정

## 1. 서론

과거 건설 구조물은 사용 하중을 견딜만한 성능과 사용성, 부식에 대한 저항성 정도만이 요구되었다. 그러나 9.11 사건 이후 이러한 관점은 바뀌어, 폭발에 의한 충격 하중 및 그와 동시에 발생할 수 있는 화재로 인한 열에 견딜 수 있는 구조물의 저항 성능이 기본적인 요구 조건으로써 중요시되고 있다. 전 세계가 연일 테러의 위협 아래 놓여있는 현 시점에서 구조물의 내폭 성능은 매우 중요한 부분이라 할 수 있다.

본 연구에서는 폭발 시 발생하는 충격을 견디고 최소화시킬 목적으로 구조물에 적용시킬 수 있는 다양한 재료 중에서 FRP (Fiber Reinforced Polymer)에 주목하고 있다. 콘크리트나 철이 부식에 상당히 취약한 성질을 지녔던 것에 반해 이 재료는 내구성이 뛰어난 것은 물론이거니와, 경량으로 인해 시공이 편리하며 인장 강도가 높고 변형률이 작기 때문이다. 특히 분사식 FRP (Sprayed FRP, SFRP)는 낮은 toughness로 인해 취성적인 파괴를 보이는 FRP sheet와는 달리 완전 등방성이기 때문에 연성거동을 보이고 충격을 완화할 수 있는 우수한 에너지 흡수율을 보여줄 것이라 기대하고 있다. 따라서 본 연구에서는 섬유 종류 및 길이, polymer의 종류, 보강두께 등의 변수를 고려하여 충격 저항성능이 뛰어난 최적화된 FRP 재료를 개발하고자 한다. 또한, 균열제어, 내구성, 내폭 성능이 매우 우수한 고성능시멘트복합체(High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, HPFRCC)를 개발하여 콘크리트 대체 재료로 활용하거나, 일본 히다타널에서 사용된 것과 같이 세그먼트 충전재 혹은 접착제로 활용하고자 한다.

이에 더하여 Biomimetics로부터 아이디어를 얻어, 분절 복합체(Segmented Composite)로써 층 구조(Layered Structure)의 형태를 가지는 복합 재료를 개발하고자 한다. 그림 1과 같이 얇은 요소들이 생체적인 접착제에 의해서 겹겹이 쌓여 층 구조를 이루는 패각은 정적 하중 및 충격 하중에 대하여 뛰어난 저항 성능을 보이는 것으로 알려져 있는데, 층 구조에 수직으로 힘을 가할 경우, 정적 하중(1-500MPa/s) 재하 시 약 700MPa, 동적 하중(15-25×103GPa/s) 재하 시 약 1000MPa의 놀라운 강도를 가지는 것이 실험을 통해 입증되었다. 이러한 Biomimetics의 관점에서 다양한 층 구조의 복합재료는 두 개의 서로 다를 매질이 적층되면서 단일 재질의 경우보다 충격, 진동 완화 효율이 극대화 될 것이라 판단된다.

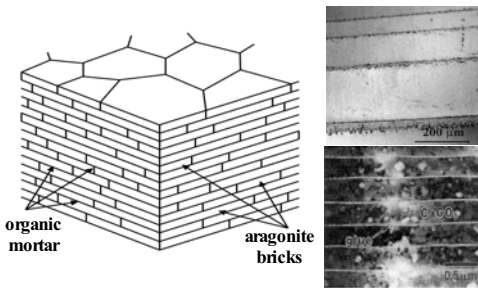


그림 1. 전복 껍질과 진주층의 미세 구조

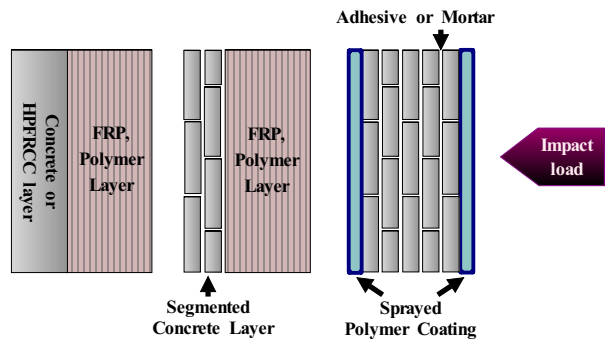


그림 2. 분절 복합체 및 층 구조 모식도

## 2. 연구 내용

### 2.1 분사식 FRP

본 연구에서는 최적화된 분사식 FRP를 개발하기 위해 분사식 FRP의 기본성능 평가 및 최적환경 모색을 위한 연구를 실시하였다. 분사식 FRP의 적용을 위해 그림 3과 같은 분사 장비를 사용하였고,

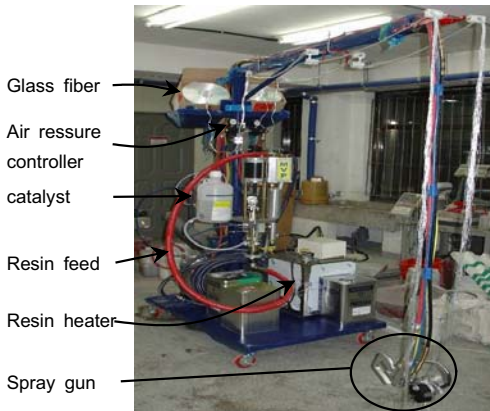


그림 3. 분사식 FRP 장비

보강 섬유로 유리섬유를, 모재(matrix)는 폴리에스테르 수지를 사용하였으며, 본딩 에이전트로는 비닐에스테르 수지를 사용하였다. 섬유 길이(L), FRP 보강 두께(T), 섬유 혼입비(V)에 따른 보강 성능을 비교 평가하였고, 유리 섬유 sheet로 보강된 시편과 비교하였으며, 분사식 FRP의 반발률 저감을 위해 각 변수에 대한 반발률 실험을 실시하였다. 섬유 길이 변수에 대한 실험 결과, 압축 보강의 경우, 섬유 길이가 30mm일 때, 휨 보강일 경우 40mm일 때 가장 보강 효과가 큰 것으로 나타났다. FRP 보강 두께가 두꺼울수록, 휨 및 압축 모두 강도의 증가를 가져왔고, 압축 시편의 경우, 콘크리트 강도가 증가할수록 분사식 FRP의 보강 효율이 감소하는 것으로 나타났다. 섬유 혼입비에 따른 실험 결과, 30%

의 섬유 혼입비일 경우 최대의 보강 성능을 나타내었고, 보강 방법에 따른 실험 결과, 분사식 FRP로 보강된 시편은 강도 및 연성 증가 능력에서 유리섬유 매트로 보강된 시편과 동등하거나 그 이상의 보강 성능을 나타내었다. 분사식 FRP의 반발률 실험 결과, 수직면에 대한 반발률은 만족할만한 값을 나타내었고, 섬유 길이가 짧을 때, 표면이 거칠수록 반발률이 감소하는 것으로 나타났다.

분사식 FRP 공법의 부착성능 향상을 위하여 U형 스트립 보강, 전단기 보강 방법 등을 적용하여 보부재를 제작하고 구조실험을 통해 그 성능 평가를 실시하였다. 실험 결과, FRP 단부에 U형 스트립으로 보강된 시험체는 4개의 시험체 중 가장 큰 극한 모멘트를 나타내었고, 중앙부에만 FRP U형 보강을 실시한 시험체는 가장 낮은 극한 모멘트를 나타내었다. 전단기를 설치한 시험체는 전단기와 접해있는 콘크리트가 탈락하면서 FRP가 박리되었고, FRP 단부에 U형 스트립으로 보강된 시험체보다 작은 극한 모멘트를 나타내었다.

## 2.2 HPRCC

PVA(Polyvinyl Alcohol) 섬유 및 강섬유를 이용한 HPRCC의 최적 배합을 선정하고자 두 종류의 PVA 섬유로 하이브리드 보강된 HPRCC 배합 및 강섬유와 PVA 섬유로 하이브리드 보강된 HPRCC 배합의 성능평가를 실시하였다. 압축강도 실험 결과, HPRCC 배합 대부분의 압축강도는 무보강 모르타르의 압축강도보다 다소 낮게 나타났다. 휨강도 실험 결과, 긴 PVA 섬유(RF4000), 짧은 PVA 섬유(REC 15) 두 종류의 PVA 섬유를 사용하였을 경우, 짧은 섬유 1.6%, 긴 섬유 0.4% 배합에서 가장 높은 휨 성능을 나타내었다. 이는 짧은 섬유가 미소 균열을 제어하는 동안 비교적 긴 PVA 섬유가 다소 큰 균열을 제어함으로써 그 성능이 향상된 것으로 판단된다. PVA 섬유와 강섬유를 함께 사용하였을 경우, 긴 PVA 섬유 2.0% 혼입량에 0.25%의 강섬유 혼입량을 혼입할 경우 휨 성능 측면에서 최대 효과가 발휘되었다.

## 2.3 분절 복합체

충격을 견디고 최소화시키기 위한 분절 복합체를 개발하기 위해 일반 모르타르와 일반 콘크리트 블록을 이용한 보 형태의 분절 복합체 부재를 제작하여 정적하중 및 충격하중 실험을 실시하였다 (그림 3, 4). 정하중 실험 결과, 분절 복합체의 접착제로 사용된 일반 모르타르의 강도가 콘크리트 블록 강도보다 작고, 모르타르와 콘크리트 사이의 부착력이 작기 때문에 분절 복합체 부재가 일반 콘크리트 보 부재보다 낮은 극한하중과 에너지 흡수력을 가지는 것으로 나타났다. 그러나, 충격하중 실험에서는 분절 복합체 부재가 일반 콘크리트 보 부재보다 유사하거나 다소 큰 충격에너지 흡수력을 보여주었다.

내폭 성능이 향상된 분절 복합체 개발을 위해 높은 부착력과 충격저항성을 가진 고성능 모르타르의 개발이 필요하다고 판단된다.



(a) 1방향 분절 복합체 (b) 2방향 분절 복합체

그림 4. 분절 복합체 형상



그림 5. 분절 복합체 충격하중 실험

표 1. 분절 복합체 정하중, 충격하중 실험 결과

|           | Specimen | Max. load (kN) | Deflection at max. load (mm) | Energy to max. load (J) | Total energy (J) |
|-----------|----------|----------------|------------------------------|-------------------------|------------------|
| SL series | SL-NC    | 37.0           | 1.63                         | 22.36                   | 22.73            |
|           | SL-1SC   | 15.4           | 0.99                         | 5.97                    | 17.51            |
|           | SL-2SC   | 10.9           | 0.86                         | 4.80                    | 20.17            |
| IL series | IL-NC    | 73.5           | 1.70                         | 90.04                   | 179.35           |
|           | IL-1SC   | 73.6           | 1.85                         | 92.17                   | 186.61           |
|           | IL-2SC   | 73.6           | 1.20                         | 50.20                   | 176.14           |

### 3. 결 론

본 연구에서는 기존의 건설 재료로써 폭넓게 사용되고 있는 시멘트 복합체 혹은 콘크리트에 인장 강도 및 연성이 뛰어난 FRP composite을 결합시켜 내폭 성능이 우수하고 기존 구조물 및 신설 구조물에 모두 시공이 가능한 최적화된 분절 복합체 및 층 구조를 개발하고자 한다. 이에 대한 기초 연구로써, 분사식 FRP의 기본성능 평가 및 최적화, 분사식 FRP 공법의 부착성능 향상을 위한 연구를 수행하였고, 내충격 섬유 보강 콘크리트 제조 기술 개발을 위해 PVA 섬유 및 강섬유를 이용한 HPFRCC의 최적 배합을 선정하였으며, 분절 복합체의 기본적인 성능 평가를 위해 일반 모르타르를 접착제로 사용한 분절 복합체 부재의 정하중, 충격하중 실험을 수행하였다. 향후, FRP 재료의 최적화, 고성능 폴리머 및 코팅제의 개발, 고성능 모르타르의 개발, HPFRCC, FRP, 분절 복합체의 최적 조합을 통한 층 구조의 개발, 분절 복합체 및 층 구조의 해석 기법 개발 등의 연구를 수행하고자 한다. 이러한 내폭 성능의 향상을 통해, 열과 충격 하중, 동하중 및 high strain에 의한 구조물의 붕괴를 줄이고 붕괴 시점을 보다 늦출 수 있다면, 이로 인해 발생하는 인명 피해 및 경제적 손실을 최소화시킬 수 있을 것이다.

### 감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. ROA-2007-000-20031-0)

### 참고문헌

1. Menig, R., Meyers, M. H., Meyers, M. A., and Vecchio, K. S., "Quasi-static and Dynamic Mechanical Response of Haliotis Rufescens (Abalone) Shells," *Acta Materialia*, Vol.48, No.9, 2000, pp.2383-2398.