

# 폼 충전 FRP 바닥판의 교축방향 거동에 대한 실험적 연구

## An Experimental Study on the Longitudinal Behavior of FRP Bridge Deck Filled With a Foam

김병민\* · 지광습\*\* · 황윤국\*\*\* · 이영호\*\*\*\*

Kim, Byeong Min · Zi, Goangseup · Hwang, Yoon Koog · Lee, Young Ho

### 1. 서 론

섬유강화복합재료(Fiber Reinforced Polymer Composites)를 활용한 교량 바닥판은 획기적인 고정하중의 감소와 더불어 유지관리의 용이성과 뛰어난 내구성을 확보해주기 때문에 최근에 그 연구가 활발하게 진행되고 있다. 한국건설기술연구원에서는 2002년부터 총 5개년에 걸쳐서 섬유강화 플라스틱(FRP) 소재로 제작된 사각형 중공 교량 바닥판을 개발하였으며, 바닥판의 전체적인 성능검증과 실용화 연구가 이루어졌다. 최근에는 대부분의 FRP 바닥판이 내재하는 이방성 특성을 고려하여 취약 방향인 교축(이하 약축이라 칭함)방향 파괴 거동과 그 매커니즘에 대한 연구도 이루어졌다(지광습 등, 2004; 지광습 등, 2006; 한국건설기술연구원, 2005; Park 등, 2005). 그 결과 파괴 직전까지 거의 탄성거동을 보이는 종방향(강축방향)의 탁월한 구조성능과는 달리, 횡방향(약축방향) 변형시 상대적으로 낮은 하중 하에서 웨브가 손상되는 점과 더불어 큰 비선형성이 발견되었다.

그림 1은 중공 FRP바닥판의 웨브-플랜지 연결부가 축차적으로 파괴되는 형상을 나타낸 것이며, 이를 개선하기 위해서 지광습 등(2006)은 바닥판의 중공 내부를 구조용 폼으로 충전하는 방안을 제안하였다. 그 개선 효과를 예측하기 위해 그림 2와 같이 다양한 탄성계수의 폼을 적용하여 바닥판의 거동을 해석하였으며, 그 결과 0.87 MPa의 폼만 사용하여도 약축방향의 강성이 두드러지게 증가함을 확인하였다. 따라서 본 논문은 중공 FRP바닥판을 보완한 내부충전 FRP바닥판의 약축 방향 정적거동 특성을 실험적으로 검증하는 것이 그 목적이다.

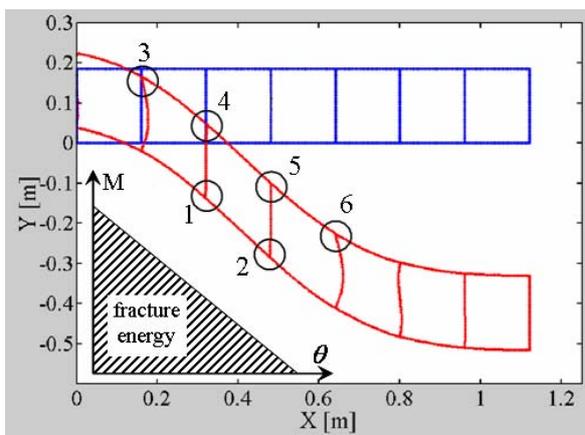


그림 1. 10배 확대된 변형 및 소성흔지 발생순서

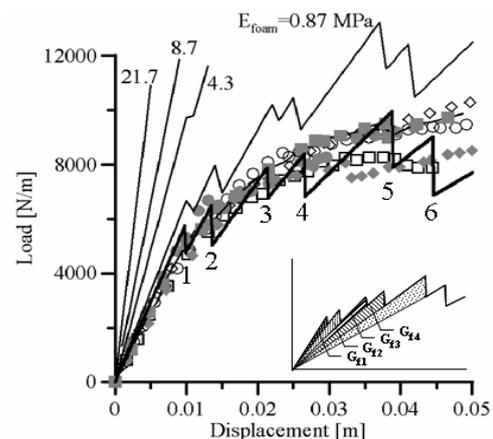


그림 2. 폼의 탄성계수에 따른 약축거동의 개선

\* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 석사과정 - 발표자  
 \*\* 정회원 · 고려대학교 사회환경시스템공학과 조교수 · 공학박사 · E-mail: g-zi@korea.ac.kr  
 \*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원 · 공학박사  
 \*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원 · 공학박사

## 2. 시험체 준비 및 시험 방법

시험체는 그림 3과 같이 중공 시험체, 밀도  $80\text{kg/m}^3$ 과  $120\text{kg/m}^3$ 의 폼으로 내부를 충전한 시험체, 웨브를 부분 제거한 시험체, 웨브를 완전히 제거한 시험체의 5가지로 구성하였다.

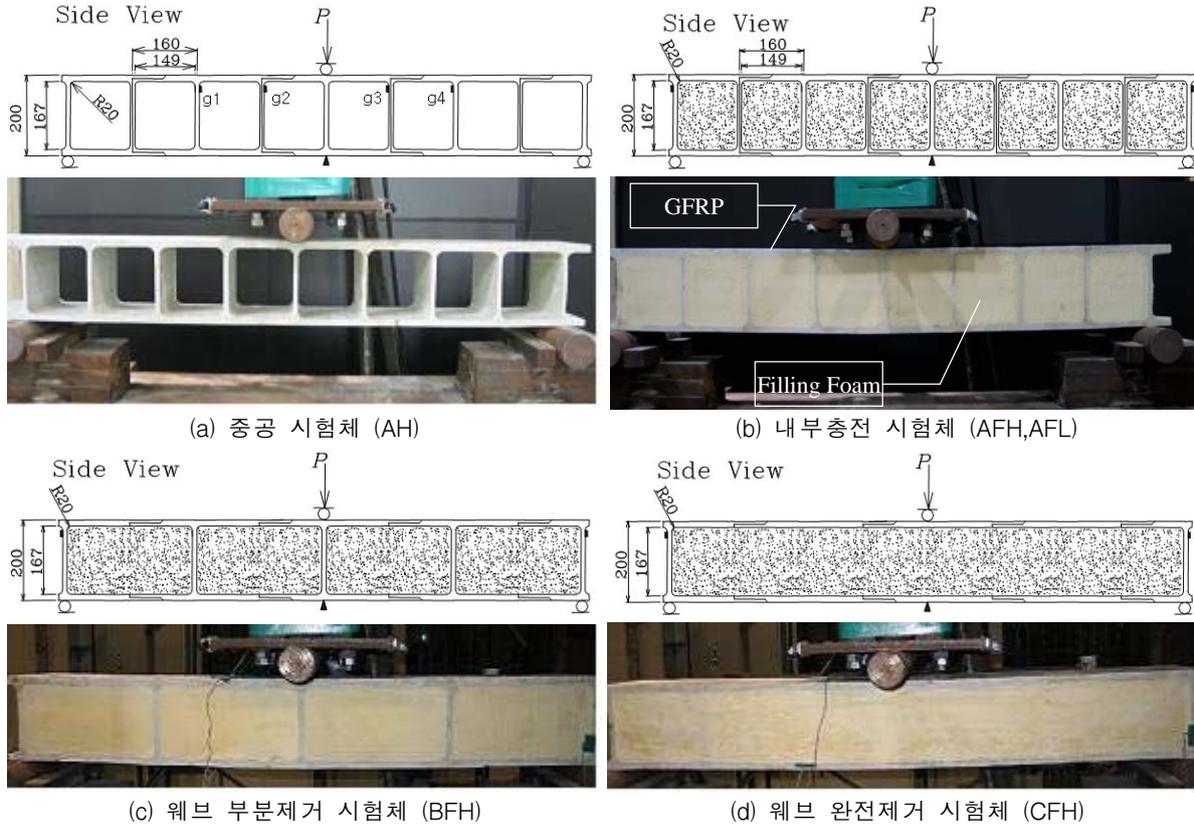


그림 3. 시험체 제원 및 센서 부착 위치

충전 폼은 그 물성이 일반적인 건축 단열재로 쓰이는 경질 우레탄 폼(Rigid Polyurethane Foam)에 해당하며, 실험결과 밀도  $80\text{kg/m}^3$  폼과 밀도  $120\text{kg/m}^3$  폼의 탄성계수는 각각  $8.8\text{MPa}$ 과  $24.6\text{MPa}$ 로서 실험의 목적에 부합하였다. 시험체의 제원, 센서의 위치, 시험 전경 등은 그림 3에 나타난 바와 같다.

FRP 바닥판의 교축방향을 모사한 시험체는 전술한 바와 같이 5세트로 나누어지며, 각 세트당 3회의 실험을 실시하였다. 하중재하는 변위제어(displacement control) 방식으로 보가 완전히 파괴되거나 하중 증가가 없을 때까지  $0.05\text{mm/sec}$ 의 속도로 재하 하였다.  $250\text{kN}$ 용량의 유압식 가력기(actuator)를 사용하여 시험체 중앙부에 집중하중을 가하는 3점 휨(3-Point Bending) 실험이며, 지지조건은  $128\text{cm}$ 간격의 단순지지이다.

## 3. 시험결과 및 분석

각 시험체의 하중-처짐 곡선은 그림 4와 같다. 중공 시험체(그림 4(a))는 일정 하중까지 직선관계를 유지하다가 그 이상의 하중이 되면 비선형 관계를 보이는 양상이 기존의 연구와 유사하다(한국건설기술연구원, 2003; 지광습 등, 2006). 그림 4(a)에서 하중이 불규칙적으로 감소하는 지점들은 웨브-플랜지 연결부에서 축차적으로 균열이 발생하는 지점이며, 세 개의 시험체 모두  $7\text{kN}$ 을 전후하여 끝에서 세 번째 웨브의 하단 연결부가 파단되면서 전체적인 파괴를 일으켰다.

내부충전 시험체(그림 4(b), 그림 4(c))는 최대하중 및 강성의 현저한 증가와 더불어 파괴시 급격한 하중의 감소를 나타내었는데, 이는 구속된 충전 폼이 압축에 대한 저항으로 시험체의 전단변형을 효과적으로 억제시킴으로써 목적인 바와 같이 시험체의 파괴거동 특성이 웨브-플랜지 연결부의 파괴에서 모듈간의 접착부 파

피로 바뀌었기 때문이다.

웨브를 제거하고 내부를 폼으로 충전한 시험체(그림 4(d), 그림 4(e))는 중공 시험체에 비해서 상대적으로 큰 강도를 보유했다. 웨브를 부분 제거한 시험체는 폼 균열이후 웨브가 균열의 전파를 막아주면서 전체적인 파괴를 지연시켰으나 웨브를 완전히 제거한 시험체는 급격한 균열증진 때문에 그 취성도가 매우 컸다.

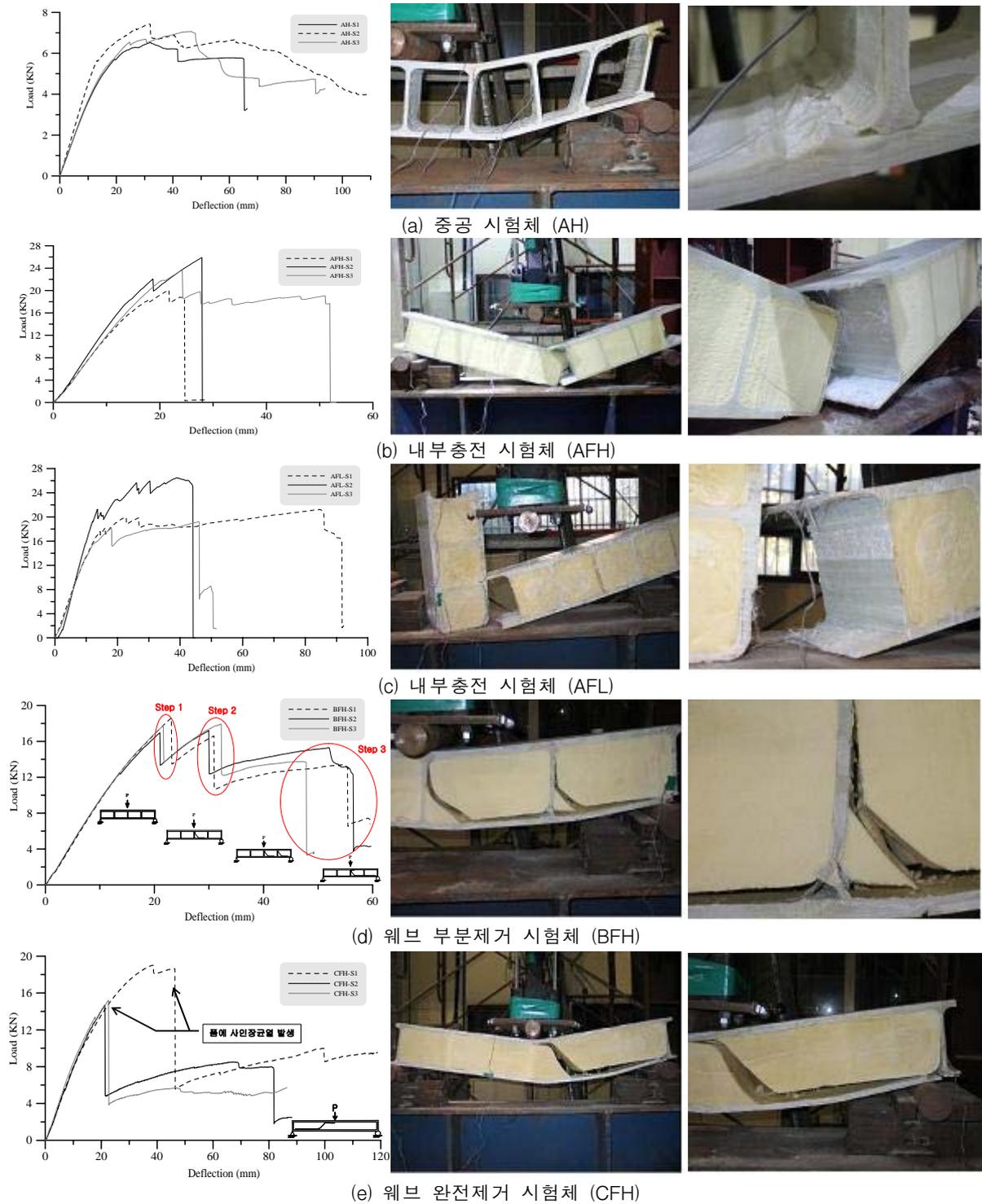


그림 4. 하중-처짐 곡선 및 파괴 형상

표 1은 각 시험체의 최대하중 및 강성을 정리한 것이다. 충전재의 탄성계수가 유리섬유 FRP에 비해서 1000분의 1에도 못 미치지만 3배 이상의 강도 증가가 실현되었으며, 내부충진 FRP바닥판의 총 중량이 기존

의 중공 FRP바닥판에 비해서 약 13% 증가하여 FRP바닥판의 장점인 경량성을 유지하였다. 높은 밀도의 폼을 사용한 경우 약간의 강성증가를 보이고 있으나 전체적인 최대하중의 증가의 증가는 큰 차이를 보이지 않았다. 이러한 폼 탄성계수의 증가와 바닥판 강도 증진의 비선형성은 그림 2에서도 확인되었다.

그러므로 비용이 저렴한 낮은 탄성계수의 폼을 사용하여도 약축방향 거동이 현저하게 개선되는 점, 경제성, 자중증가 등을 고려한다면 80kg/m<sup>3</sup>의 폼이 120kg/m<sup>3</sup>의 폼보다 더 효과적일 것이라 판단된다.

표 1. 약축방향 시험체 결과값 비교

시험체 종류		최대하중 (kN)	중공시험체 대비 최대하중	강성 (kN/mm)	중공시험체 대비 강성
형상	충진밀도(kg/m <sup>3</sup> )				
중공	-	7.01	1	0.39	1
내부충진	80	23.19	3.31	1.27	3.26
내부충진	120	22.31	3.18	1.65	4.23
웹부분제거	80	17.9	2.55	0.91	2.33
웹브완전제거	80	16.3	2.33	0.77	1.97

#### 4. 결 론

본 논문에서는 기존에 개발된 사각형 중공 FRP 바닥판의 취약방향인 교축방향 거동개선을 위해서 내부충진 방안을 제시하고 그 거동특성을 실험적으로 검증하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 선행된 해석 결과 약 21 MPa만 사용하여도 소성파괴모드의 강도가 접착부 박리파괴모드의 강도 수준까지 향상시킬 수 있다는 것을 확인하였다.
2. FRP에 비하여 탄성계수가 1000분의 1에도 못 미치는 구조용 폼을 바닥판 내부에 충전하여도 본래의 경량성을 유지하면서 약축방향의 강도가 3배 이상 증가하였다.
3. 바닥판의 자중과 생산의 경제성을 고려한다면 본 연구에서 고려한 내부충진 FRP 바닥판의 충전재로서는 밀도 80kg/m<sup>3</sup>의 폼과 120kg/m<sup>3</sup>의 폼 중에서 밀도 80kg/m<sup>3</sup>의 폼이 적합하며, 경제성 측면이 더욱 강조되면 약 60kg/m<sup>3</sup>의 폼을 사용해도 바닥판의 강성과 강도를 약 2배 증진시킬 수 있는 것으로 예상된다.
4. 본 연구에서 고려한 내부충진 FRP 바닥판의 웹브가 전체적인 강도의 증진에 크게 영향을 미치지 않지만 폼 내부의 균열 전파를 막아주어 일시적인 취성파괴를 억제시킴을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년 한국건설기술연구원과 고려대학교 방재연구소 간의 연구계약 및 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 건설기술기반구축사업인 (05기반구축D04-01)에 의해서 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 지광습, 김병민, 황운국, 이영호, 강영중 (2006) FRP 바닥판의 약축방향 파괴모드에 관한 연구, **한국전산구조공학회는문집**, 제19권, 1호, pp. 73-83.
2. 지광습 등 (2004) **FRP 바닥판의 파괴모드에 관한 연구**, 한국건설기술연구원 위탁연구보고서.
3. 한국건설기술연구원 (2003) **장수명 합리화 바닥판 개발 II (2차년도)**, 한국건설기술연구원 연구보고서 2003-050.
4. 한국건설기술연구원 (2005) **장수명 합리화 바닥판 개발 II (4차년도)**, 한국건설기술연구원 연구보고서, 2005-059
5. Park. K. T, Kim. S. H, Lee. Y. H, Hwang. Y. K (2005). Pilot test on a developed GFRP bridge deck, *Composite Structures*, Vol. 70, pp. 48-59.