

# GFRP 바닥판의 약축방향 피로거동 특성

## Fatigue Behavior of GFRP Bridge Deck in the Transverse Direction

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

Zi, Goangseup · Kim, Byung-Min · Jung, Jinkyu · Hwang, Yoon-Koog · Lee, Young-Ho

---

### ABSTRACT

Fatigue Behavior of a GFRP bridge deck consisting of rectangular unit modules is studied by an experimental method. The experiment focuses on how the damage in the transverse direction influence the overall behavior of the deck. It is proposed filling the space in each module with a soft foam. Using the recent experimental data, the fatigue behavior is discussed. If the space of the deck is filled with the foam, the fatigue life of the deck was increased about 1,000 times for the same level of the stress variation as the reference deck not filled.

*Keywords:* GFRP bridge deck, foam, behavior in the transverse direction, fatigue life

---

### 1. 서론

FRP는 고강도 및 고강성의 특성을 가지고 있고, 콘크리트 및 강재에 비해 가볍고, 내구성이 우수하여 최근 FRP를 건설 재료로서 개발하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 한국건설기술연구원에서는 2002년부터 총 5개년에 걸쳐서 섬유강화플라스틱(FRP)을 소재로 한 사각형 중공 교량 바닥판을 개발하였으며, 바닥판의 전체적인 성능검증과 실용화 연구가 이루어졌다. 최근에는 FRP 바닥판의 이방성 특성으로 인해 강축방향에 비해 구조적으로 취약한 약축방향의 파괴거동 및 그 메카니즘에 대한 연구가 이루어졌다.(한국건설기술연구원, 2005; 지광습 등, 2004; 지광습 등, 2006).

본 연구에서는 기 개발된 중공 FRP 바닥판과 이의 약축방향 거동 개선을 위해서 제안된 내부충전 FRP 바닥판에 대하여, 피로특성을 비교·검토하고 피로강도를 규명하였다.

### 2. 시험체 준비 및 시험방법

표 1에 나타낸 바와 같이 중공 시험체, 내부충전 시험체, 웹 부분제거 시험체로 나누어 각 set당 4회의 실험을 수행하였으며, 시험체의 재원 및 형상은 그림 1과 같다. 피로강도를 규명할 수 있는 S-N선도를 획득

---

\* 정회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 조교수 Email: g-zi@korea.ac.kr

\*\* 학생회원 · 고려대학교 건축사회환경공학과 석사과정

\*\*\* 현대건설 기술개발원 사원

\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원 · 공학박사

\*\*\*\*\* 한국건설기술연구원 구조연구부 선임연구원 · 공학박사

하기 위해서 매 실험마다 하중 범위를 달리하여 파괴까지의 반복횟수를 측정하였다. 하중은 주어진 하중 범위 내에서 정현파를 따라 재하하여 시험체가 완전히 파단 될 때까지 실시하였으며, 피로시 시험의 강성변화를 측정하기 위해서 정해진 횟수에 정적실험을 수행하였다. 또한 열적외선 장비를 활용한 써모그라피 (Thermography) 기법을 사용하여 균열발생에 따른 실험체 각 부위의 온도변화를 확인하였다.

표 1. 피로 시험체의 분류

실험체 구분		재하속도	최대하중	최소하중	하중범위		
충진	웹간격[cm]	[Hz]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	
부	16	AHF55	2	8.21	1.00	7.21	55
		AHF47	2	7.16	1.00	6.16	47
		AHF40	2	6.25	1.00	5.25	40
		AHF35	2	5.59	1.00	4.59	64
유	16	AFF64	2	18.80	1.00	17.80	64
		AFF55	2	16.30	1.00	15.30	55
		AFF47	2	14.08	1.00	13.08	47
		AFF40	2	12.13	1.00	11.13	40
유	32	BFF64	2	15.98	1.00	14.98	64
		BFF55	2	12.94	1.00	11.94	55
		BFF47	2	11.21	1.00	10.21	47
		BFF40	2	9.69	1.00	8.69	40

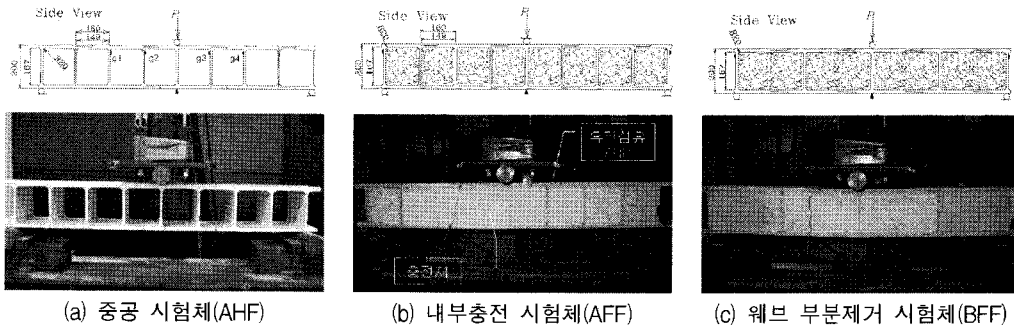


그림 1. 시험체 제원 및 형상

### 3. 시험결과 및 분석

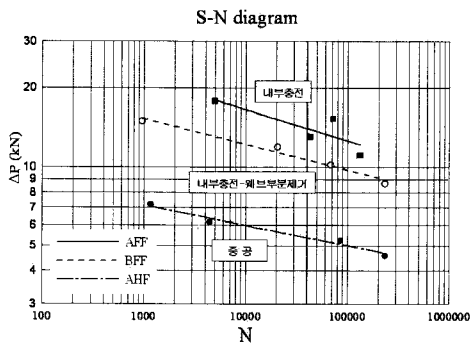


그림 2. 약축방향 시험체의 S-N 선도

### 3.1. 중공 시험체(AHF)

표 2는 중공 시험체의 피로실험 결과를 정리한 것이며, 그림 2은 각 시험체의 하중범위와 주기를 대수좌표(Logarithmic Coordinates)에 도시한 S-N선도이다. 그림 2에서 직선은 네 점을 선형회귀분석(Linear Regression)한 것이며, 식 (1)은 이 직선에서 유도된 중공 시험체(AHF)의 피로강도 추정식이다.

$$\Delta P = 0.934 P_u N^{-0.0778} \quad (1)$$

여기서  $\Delta P$ 는 하중범위,  $P_u$ 는 정적 최대하중,  $N$ 은 반복하중의 주기를 나타낸다. 식의  $R^2$ 값이 0.972이며  $R^2$ 값이 0.972이며, 그림 2에서도 네 점과 직선이 근사하므로 신뢰할 만한 결과라 판단된다.

그림 3은 반복하중의 주기에 따른 강성의 변화를 대수좌표에 도시한 것이다. X축은 반복하중의 주기, Y축은 초기강성에 대한 실제 강성의 비를 나타낸다. 모든 시험체가 초기에는 선형적인 강성의 감소를 보였으며, 일정 횟수를 지나면 하중의 감소정도가 매우 급격해지는 경향을 보였다. 이는 강성의 감소와 변위의 증가가 접착면의 균열을 발생시켰고, 이 균열이 급격히 성장하면서 더불어 강성이 급격히 감소한 것이다.

표 2. 중공 시험체(AHF)의 피로실험 결과

시험체 구분	최대하중	최소하중	하중범위	반복횟수
	[kN]	[kN]	[kN]	[회]
AHF55	8.21	1.00	7.21	1,158
AHF47	7.16	1.00	6.16	4,395
AHF40	6.25	1.00	5.25	84,752
AHF35	5.59	1.00	4.59	231,132

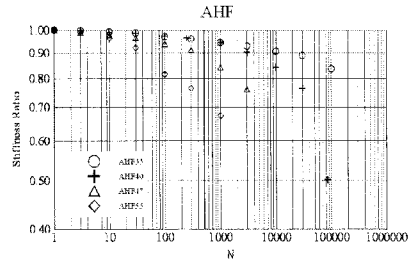


그림 3. 중공 시험체(AHF)의 강성 변화

### 3.2. 내부충전 시험체(AFF)

내부충전 시험체의 피로실험 결과를 표 3과 같이 정리하였고, 그림 2에 피로실험 결과로 획득한 S-N선도 이를 나타내었다. 선형회귀분석한 결과 식 2와 같은 피로강도 추정식을 얻었다.

$$\Delta P = 1.765 P_u N^{-0.1184} \quad (2)$$

$R^2$ 값이 0.7034로서 중공시험체와 비교하여 다소 부정확한 결과를 도출하였는데, 이는 충전 품의 물성이 다소 균질하지 못하기 때문이다.

반복하중의 주기에 따른 강성의 변화를 그림 4와 같이 대수좌표에 도시하였다. 중공 시험체와 마찬가지로 초기에는 선형적인 강성의 감소를 보였으나, 충전 품에 균열이 발생하기 시작하는 시점부터 하중의 감소정도가 매우 급격해지는 경향을 보였다.

표 3. 중공 시험체(AHF)의 피로실험 결과

시험체 구분	최대하중	최소하중	하중범위	반복횟수
	[kN]	[kN]	[kN]	[회]
AFF64	18.80	1.00	17.80	4,916
AFF55	16.30	1.00	15.30	71,751
AFF47	14.08	1.00	13.08	42,911
AFF40	12.13	1.00	11.13	131,883

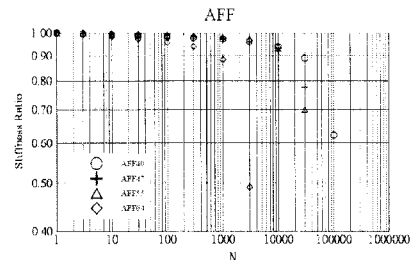


그림 4. 내부충전 시험체(AFF)의 강성 변화

### 3.3. 웨브 부분제거 시험체(BFF)

표 4에 웨브 부분제거 시험체의 피로실험 결과를 정리했으며, 그림 2에 각 시험체의 S-N선도를 도사하였다. 그림의 네 점을 선형회귀분석한 결과 식 (3)과 같은 피로강도 추정식을 얻을 수 있었다.

$$\Delta P = 1.379 P_u N^{-0.0974} \quad (3)$$

R2값이 0.975이며, 그림 2에서도 네 점과 직선이 근사하므로 신뢰할만한 결과라 판단된다.

그림 5는 반복하중의 주기에 따른 강성의 변화를 대수좌표에 도사한 것이다. 내부충전 시험체와 같이 모든 시험체가 초기에는 선형적인 강성의 감소를 보였으며, 충전 폼에 균열이 발생하기 시작하는 시점부터 하중의 감소정도가 매우 급격해지는 경향을 보였다. 특히, BFF64는 하중범위가 크에 따라서 폼 내부의 균열이 폭발적으로 발생했다. 그림 5를 보면 균열이 발생한 60회를 전후하여 강성이 초기강성의 58%로 감소하였으며, 이는 다른 시험체들과 다르게 매 10회마다 강성을 측정하였기 때문에 강성의 급격한 감소를 뚜렷하게 확인할 수 있었다.

그림 6은 웨브 부분제거 시험체(BFF)의 파괴형상이며, 모든 시험체에서 상부플랜지 또는 하부플랜지의 모드 II 접촉파괴가 발생했다. 폼 균열이 웨브를 관통하면서 파괴되었던 기존의 시험편과 달리, 대상 시험체는 파괴전 대부분의 셀 내에서 폼 균열이 진행되었으나 웨브를 관통하지 못했다. 대상 시험체는 모듈간의 접촉면이 위치한 웨브를 제거하였기 때문에 그림 6과 같은 파괴가 발생했지만, 그림 7(b)와 같이 웨브간격이 대상 시험체의 2배인 모듈을 제작하여 모듈간의 접촉면이 웨브에 위치하게 된다면 그림 6과 같은 파괴는 발생하지 않을 것이다. 본 실험을 통해서 내부를 폼으로 충전하면 웨브간격이 길어져도 충분한 소요강도를 얻을 수 있음이 확인되었으므로, 더욱 경제적인 내부충전 FRP바닥판의 개발 가능성을 확인하였다. 추후 경제적인 측면과 구조적인 측면을 고려한 최적의 폼 물성 및 웨브간격, 이에 따른 단면 설계 등의 연구가 요구된다.

표 4. 웨브 부분제거 시험체(BFF)의 피로실험 결과

시험체 구분	최대하중	최소하중	하중범위	반복횟수
	[kN]	[kN]	[kN]	
BFF64	15.98	1.00	14.98	961
BFF55	12.94	1.00	11.94	20,488
BFF47	11.21	1.00	10.21	67,992
BFF40	9.69	1.00	8.69	231,423

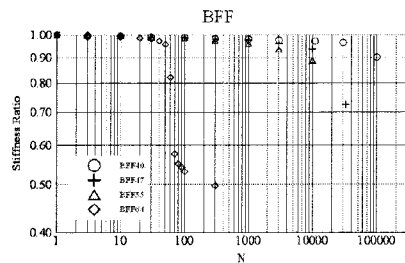
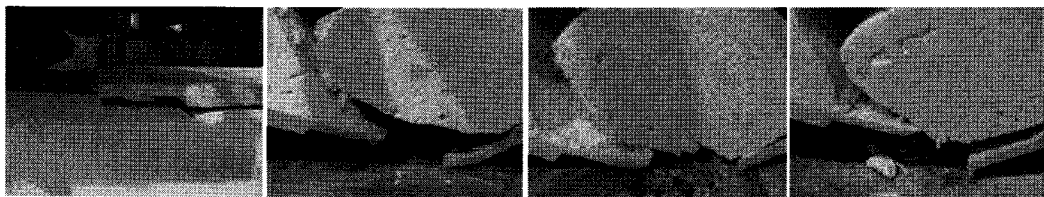


그림 5. 웨브 부분제거 시험체(BFF)의 강성 변화



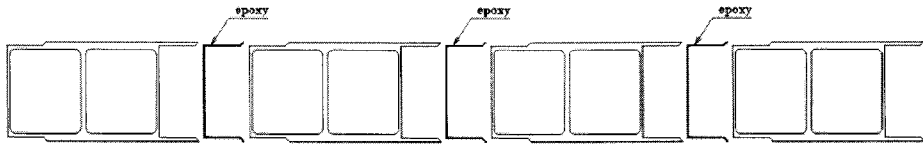
(a) BFF40

(b) BFF47

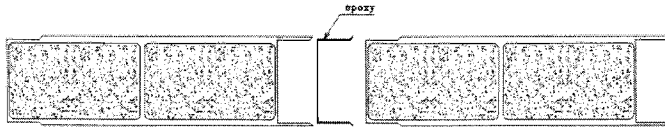
(c) BFF55

(d) BFF64

그림 6. 웨브 부분제거 시험체(BFF)의 파괴형상



(a) 기존 모듈



(b) 제안 모듈

그림 7. 웹간격을 개선한 내부충전 FRP 바닥판의 단위 모듈

#### 4. 내부충전 실험체의 피로에 의한 열변화

그림 8은 온도측정 위치를 나타낸 것이며 각 연결부의 온도를 표기하기 위해서 번호를 부여하였고, 반복횟수 500회에서의 각 연결부 온도는 그림 9와 같다. 전단변형이 상대적으로 작은 실험체의 중앙부는 온도변화가 크지 않지만, 상대적으로 전단변형이 큰 양 끝으로 갈수록 온도가 크게 증가함을 알 수 있다. 이는 실험체의 양쪽 끝 부분의 전단변형이 크므로, 충전된 폼에 균열이 발생하거나 실험체로부터 떨어져나가 마찰을 일으키기 때문에 온도가 크게 증가한 것이다.

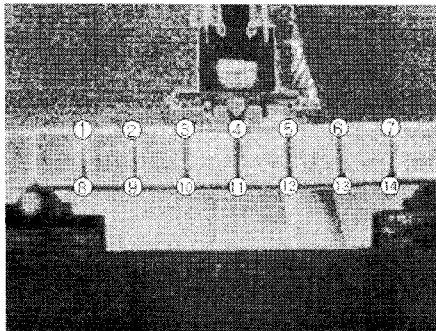


그림 8. 온도측정 위치 및 번호 (재하 전)

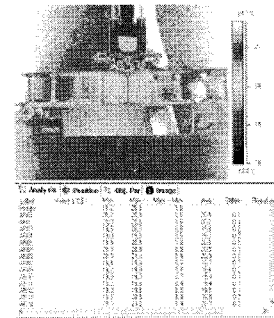
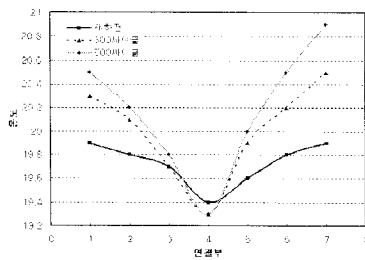
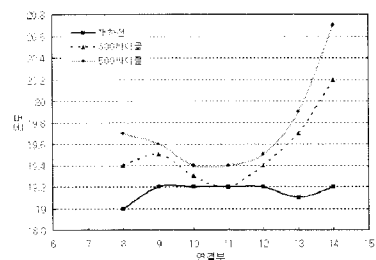


그림 9. 써모그래피 (500회 반복 후)



(a) 상부



(b) 하부

그림 9. 반복횟수에 따른 각 연결부의 온도변화

#### 4. 결 론

본 논문에서는 중공 FRP바닥판과 중공 내부를 충전한 내부충진 FRP바닥판에 대해서 약축방향의 피로거동 특성을 파악하였으며, S-N선도를 획득하여 피로강도 추정식을 제안하였다. 모든 실험변수의 S-N선도는 그림 4.41에 도시하였으며, 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 중공 바닥판의 중공 내부를 폼으로 충전할 경우, 같은 피로하중 하에서 약축방향 피로수명이 약 30,000배 이상 증진되었다.

(2) 중공 바닥판의 웨브를 부분적으로 제거하더라도 내부를 폼으로 충전할 경우, 같은 피로하중 하에서 약축방향 피로수명이 약 3,000배 이상 증진되었다.

(3) 기존의 중공 시험체에서는 웨브-플랜지 연결부의 균열이 웨브를 관통하면서 전체적인 파괴가 발생하였지만, 대상 중공 시험체에서는 웨브-플랜지 연결부의 균열이 성장하지 못하고 모듈간의 접촉균열이 전체적인 파괴를 가져왔다. 이는 웨브-플랜지 연결부의 보강이 전체적인 강성 및 최대하중의 증가를 가져왔기 때문이다. 그러나 바닥판 전체의 강도가 모듈간의 에폭시 접착강도에 의해서 지배됨에 따라서 그 파괴경향이 매우 취성적이므로 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

(4) 내부충진 시험체는 폼 내부에서 초기균열이 발생했으며, 이후 각 셀의 내부에서 축차적인 폼 균열이 발생하였다. 그러나 폼의 균열은 웨브를 관통하지 못하였으며, 파괴모드는 모듈간의 박리였다. 실험초기부터 선형감소를 보이던 강성은 폼 내부의 균열이 발생함과 동시에 급격한 감소를 나타냈다.

(5) 웨브를 부분제거한 경우, 모든 시험체에서 상부플랜지 또는 하부플랜지의 모드II 접촉파괴가 발생했다. 폼 균열이 웨브를 관통하면서 파괴되었던 기존의 시편과 달리, 대상 시험체는 파괴전 대부분의 셀 내에서 폼 균열이 진행되었으나 웨브를 관통하지 못했다. 내부를 폼으로 충전하면 웨브간격이 길어져도 충분한 소요강도를 얻을 수 있음이 확인되었으며, 추후 경제성, 구조안정성, 제작의 용이성 등을 고려한 최적단면의 개발 및 연구가 요구된다.

(6) 내부충진 실험체의 피로에 의한 열변화를 실험을 통해 살펴본 결과, 상대적으로 전단변형이 큰 양 끝으로 갈수록 온도가 크게 증가하여 손상이 크게 됨을 알 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년 한국건설기술연구원과 고려대학교 방재연구소 간의 연구계약 및 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하는 첨단융합건설기술개발사업인 (05첨단융합B01)에 의해서 이루어진 것으로, 이에 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

- 지광습, 김병민, 황윤국, 이영호, 강영종 (2006) FRP 바닥판의 약축방향 파괴모드에 관한 연구, 한국전산구조공학회 논문집, 19(1), pp.73~83.
- 지광습 등 (2004) FRP 바닥판의 파괴모드에 관한 연구, 한국건설기술연구원 위탁연구보고서.
- Zi, G., Kim, B. M., Hwang, Y. K., and Lee, Y. H. (2007) An experimental study on static behavior of a GFRP bridge deck filled with a polyurethane foam., *Composite Structures -online*.