

# 유공판재형 전단연결재를 갖는 강-콘크리트 합성바닥판의 피로거동에 관한 연구

## Fatigue Behavior of Steel-Concrete Composite Bridge Deck with Perfobond Rib Shear Connector

경갑수\* · 이승용\*\* · 정연주\*\*\* · 권순철\*\*\*\*

Kyung, Kab Soo · Lee, Seung Yong · Jeong, Youn Ju · Kwon, Soon Cheol

### Abstract

Bridge deck is directly influenced by environment and vehicle load, it is easily damaged so that it requires an appropriate repair and retrofit. Therefore, developing a bridge deck with high durability is necessary in order to minimize the maintenance of bridge deck and use it to its design life. In this study, static test was carried out to evaluate a fatigue capacity of steel-concrete composite deck, which was newly developed by supplementing problems of existing reinforced concrete deck. Based on results from the static test, fatigue load was decided, and fatigue test was conducted under the constant amplitude repeated load. From the fatigue tests, the S-N curve regarding principle structural details of composite deck was made, and characteristics of fatigue behavior was estimated by comparing and evaluating it with fatigue design criteria. In addition, fatigue design guideline was presented. As a result, it is found that each structural details of composite deck proposed by this study, such as upper flange of corrugated steel plate and middle section of it, shear connector and lower flange of corrugated steel plate, is satisfying the fatigue strength.

**Keywords** : steel-concrete composite deck, static test, fatigue strength, perfobond rib shear connector

### 요 지

교량 바닥판은 차량하중 및 환경 등의 영향을 직접 받는 부재여서 열화손상에 취약하므로 이에 대한 적절한 보수 및 보강이 필요하다. 그러므로 교량 바닥판의 유지관리를 최소화하고 교량의 설계수명까지의 공용을 위해서는 현재의 바닥판 성능을 개선한 고강도, 고내구성의 바닥판 개발이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 철근콘크리트 바닥판의 문제점을 보완하여 새롭게 개발된 강-콘크리트 합성바닥판의 피로성능을 평가하기 위하여 정적실험을 실시하고, 이를 토대로 피로하중을 선정하고 일정진폭 반복하중 하에서 피로실험을 실시하였다. 이로부터 합성바닥판의 주요 구조상세의 S-N 곡선을 작성하고, 이를 피로설계기준과 비교, 평가하여 피로거동 특성을 규명하고 피로설계지침을 제시하였다. 그 결과 본 연구에서 제안된 합성바닥판의 각 구조상세인 절곡강판 상부플랜지 및 절곡강판 중간부, 전단연결재 및 절곡강판 하부플랜지는 모두 충분한 피로강도를 확보하고 있는 것을 알 수 있었다.

**핵심용어** : 강-콘크리트 합성바닥판, 정적실험, 피로강도, 유공판재형 전단연결재

### 1. 서 론

교량 바닥판은 차량하중 및 기후조건 등의 외부 환경 등의 영향을 직접 받는 부재이므로 교량의 다른 부재에 비하여 열화현상이 발생하기 용이하여 다른 교량부재에 비해 지속적인 유지관리가 필요하다. 또한 이러한 열화현상으로 인하여 경우에 따라서는 공용 중에 구조물의 내하력 및 내구성의 유지 및 개선을 위하여 적절한 보수 및 보강이 필요한 경우가 발생할 수 있다. 교량 바닥판의 유지관리를 최소화하

고 교량 전체로서의 설계수명까지의 공용을 위해서는 현재의 바닥판 성능을 개선한 고강도, 고내구성의 바닥판 개발의 필요성이 증가하고 있다.

일부 교량 바닥판의 경우에는 강성을 높이고 고정하중을 줄이기 위하여 강재를 사용하고는 있으나, 대부분의 바닥판은 철근콘크리트 구조로 가설된다. 바닥판은 교량의 다른 부재에 비하여 단면이 작고, 윗하중을 직접 받기 때문에 쉽게 손상을 받을 수 있는데, 특히 철근콘크리트 바닥판의 경우 우수와 동결기에 사용되는 제설제의 영향으로 바닥판 내부

\*정회원 · 한국해양대학교 건설·환경공학부 부교수 (E-mail : kyungks@hhu.ac.kr)  
\*\*정회원 · 교신저자 · 충주대학교 토목공학부 부교수 (E-mail : sylee@cjnu.ac.kr)  
\*\*\*한국건설기술연구원 선임연구원 (E-mail : yjeong@kict.re.kr)  
\*\*\*\*삼부토건(주) 기술연구원 (E-mail : almight75@naver.com)

의 철근이 부식하기 쉽다. 또한 한번 손상된 바닥판 단면은 지속적으로 작용하는 윤하중 및 충격으로 인하여 손상이 가속화되는 것이 일반적인 현상이다.

따라서 거더교의 바닥판은 유지관리면에서 교면 포장 및 신축이음장치와 함께 교량의 다른 부재에 비하여 보수빈도가 높고 교체주기가 짧은 특성을 갖게 된다. 그러므로 철근 콘크리트 바닥판의 내구성을 획기적으로 개선할 수 있다면, 교량의 유지관리비용은 물론 교량의 수명도 연장시킬 수 있다. 따라서 최근에는 교량 바닥판 가설과정의 시공성을 높이고 시공품질을 높이기 위하여 프리캐스트 바닥판, 복합소재를 이용한 바닥판, 테크플레이트를 이용한 바닥판 등이 설계 및 시공되고 있다(한국건설기술연구원, 2005; Kim *et al.*, 2005).

본 연구에서 제안하는 강-콘크리트 합성바닥판(이하 합성 바닥판이라 함)은 바닥판 하면에 절곡강판을 배치하고 그 위에 철근콘크리트 바닥판을 시공하는 구조이며, 강판과 콘크리트의 합성을 위하여 스테드를 대신하여 유공판재형 전단 연결재(일명 perfobond rib shear connector)를 사용한 구조를 갖는다. 강판은 시공시 가설하중 전제와 공용 중 사용하중의 일부를 지지할 수 있도록 절곡하여 휨강성을 향상시키는 구조를 적용하였다. 또한 기존 바닥판의 가설에 사용되는 테크플레이트의 경우 거푸집으로 활용되었으나, 본 연구에서 제안하는 절곡강판은 영구거푸집으로 콘크리트 구조와 일체로 구성되는 구조이므로 시공성이 향상되는 장점을 갖는다. 그리고 절곡강판은 인장철근의 대체제이므로 기존 철근콘크리트 바닥판 구조에 배치하는 하부 인장철근을 대신하게 된다.

이 합성바닥판에 대해서는 정연주 외(2004)에 의해 정적 구조거동에 관한 실험적 연구와 김상효 외(2003) 및 정연주 외(2005)에 의해 합성바닥판의 피로거동에 대한 연구가 수행된 바 있다. 그러나 이 연구들은 강판과 콘크리트의 합성을 위해 기존의 스테드를 사용하였으며, 그 결과 많은 스테드를 사용함에 따라 시공성 및 비용의 측면에서 비효율적인 문제가 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 이를 개선하기 위한 목적으로 기존의 스테드를 대신하여 유공판재형 전단연결재를 적용하여 연구를 수행하고자 한다. 본 연구에서 사용하고자 하는 유공판재형 전단연결재에 대해서는 정철현 외(2004), 김형열 외(2006), 안진희 외(2007)에 의해 전단실험의 형태로 연구가 수행되었으며, 이로부터 기존의 스테드를 대체할 수 있는 우수한 합성효과를 갖는 것으로 분석된 바 있다.

따라서 본 연구에서는 유공판재형 전단연결재를 적용한 강-콘크리트 합성바닥판의 피로성능을 평가하기 위하여 유한요소 해석을 실시하여 피로하중의 재하위치를 결정하고, 정적실험을 통하여 얻어진 극한하중을 토대로 피로하중을 선정하여 일정진폭 반복하중 하에서 피로실험을 실시하였다. 이로 부터 합성바닥판의 주요 구조상세의 S-N 곡선을 작성하고, 이를 피로설계기준과 비교, 평가하여 피로거동 특성을 규명하고자 한다.

합을 통하여 얻어진 극한하중을 토대로 피로하중을 선정하여 일정진폭 반복하중 하에서 피로실험을 실시하였다. 이로 부터 합성바닥판의 주요 구조상세의 S-N 곡선을 작성하고, 이를 피로설계기준과 비교, 평가하여 피로거동 특성을 규명하고자 한다.

## 2. 실 험

### 2.1 실험체의 형상 및 치수

본 연구에서 사용된 합성바닥판 실험체의 형상 및 치수를 그림 1에 나타내었다. 이 실험체는 기존의 강-콘크리트 합성 바닥판에 대한 일련의 연구(김형열 외, 2005; 정연주 외, 2005; 정연주 외 2004)에서 사용된 실험체의 제원을 만족하도록 설계하였다.

그림 1에서와 같이 실험체는 강박스 거더교에 적용하기 위한 SF 실험체와 PSC I형교에 적용하기 위한 PF 실험체 두 종류를 제작하였다. SF 실험체의 규격은 3,700×1,000×220 mm이며, PF 실험체는 2,700×1,000×220 mm이다. 실험체의

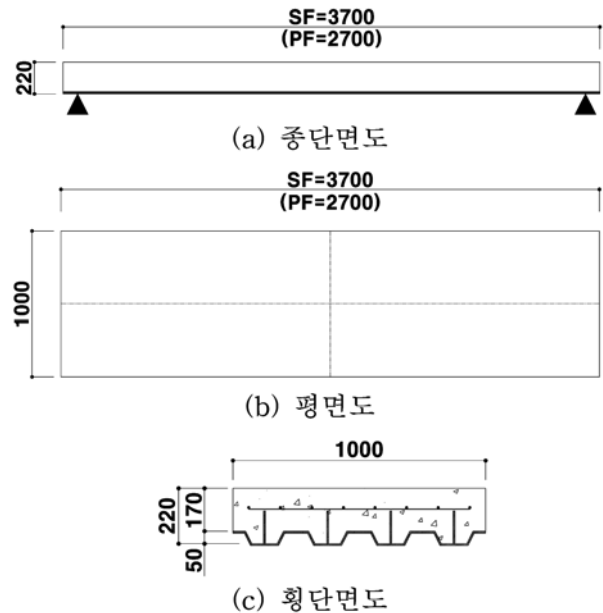


그림 1. 실험체의 형상 및 치수 (단위 : mm)

표 1. 실험체의 재료 물성치

사용재료		재료 물성치
강재	SS400	$E_s=2.1 \times 10^5$ MPa, $f_a=140$ MPa
콘크리트	$f_{ck}=30$ MPa	$E_c=2.6 \times 10^4$ MPa
철근	H16, H19	$E_s=2.0 \times 10^5$ MPa, $f_y=400$ MPa

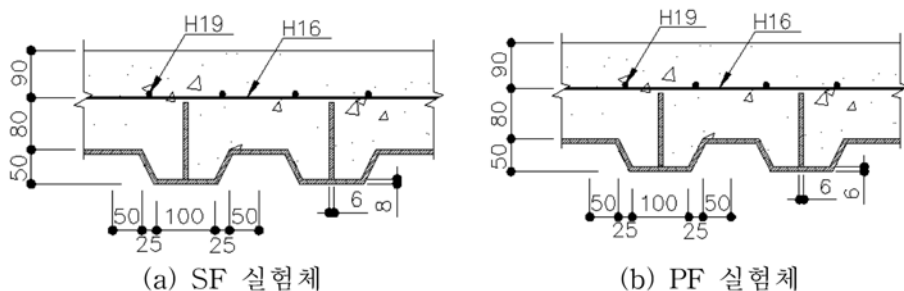


그림 2. 절곡강판 상세 (단위 : mm)

절곡강판은 SS400 강재를 사용하였고, 콘크리트의 설계기준 강도는 30 MPa, 철근의 항복강도는 400 MPa이며, 각 재료의 물성치는 표 1과 같다.

### 2.2 실험체 상세제원

그림 2에 SF 실험체 및 PF 실험체에 사용된 절곡강판의 상세제원을 나타내었다. 절곡강판은 SS400 강재를 사용하였으며, 강판 두께는 SF 실험체는 8 mm, PF 실험체는 6 mm를 적용하였다.

그림 3에 유공판재형 전단연결재의 상세를 나타내었는데, 그림 2에 나타낸 것과 같이 SF 실험체와 PF 실험체의 절곡강판의 두께 차이를 고려하여 유공판재형 전단연결재의 높이를 다르게 적용하였다.

그림 4에 철근콘크리트 바닥판의 철근 배근도를 나타내었다. 그림 4에 나타낸 것과 같이 주철근은 H19를 125 mm 간격으로 배근하였으며, 배력철근은 H16을 사용하여 지점부에 대한 영향을 고려하여 125 mm, 중앙부는 250 mm 간격으로 배근하였다. 콘크리트 설계기준강도는 30 MPa이다.

### 2.3 실험방법

실험은 정적실험과 피로실험으로 나누어 수행하였다. 정적 실험에서는 SF 실험체 및 PF 실험체를 각각 2개씩 총 4개의 실험체를 실험하였으며, 피로실험은 각 3개씩 총 6개의 실험체를 실험하였다. 정적실험 및 피로실험은 그림 5에 나타낸 것과 같이 4점 휨실험을 실시하였으며, 하중재하시 재하면적은 도로교설계기준(2005)에 따라 DB-24의 집지면적인 580×230 mm로 하였다.

정적 및 피로실험시 실험체의 거동을 평가하기 위하여 지간의 1/2 및 1/4 지점에 변위변환기를 설치하여 하중-처짐 관계를 측정하였으며, 그림 6에 나타낸 것과 같이 실험체 중앙부의 유공판재형 전단연결재와 절곡강판에 다수의 변형률게이지를 부착하여 하중-변형률 관계를 측정하였다.

피로실험에 앞서 실시한 정적실험에서 얻어진 극한하중을 고려하여 표 2에 나타낸 피로하중 조건을 결정하였다. 각 실험체의 최대하중은 극한하중의 약 30%, 35% 및 50% 수준에서 결정하였으며, SF 실험체와 PF 실험체의 성능비교를 위하여 동일한 하중조건에서 피로실험을 실시하였다. 이로부터

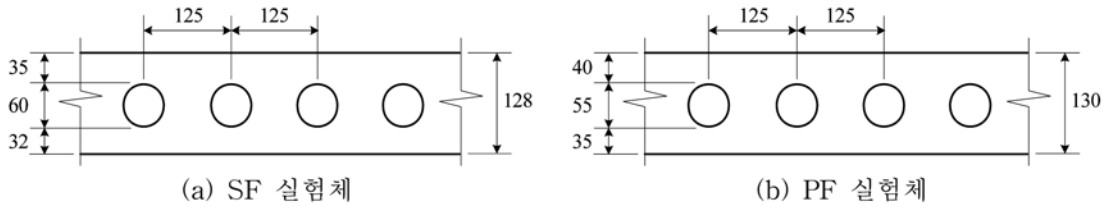


그림 3. 유공판재형 전단연결재의 상세 (단위 : mm)

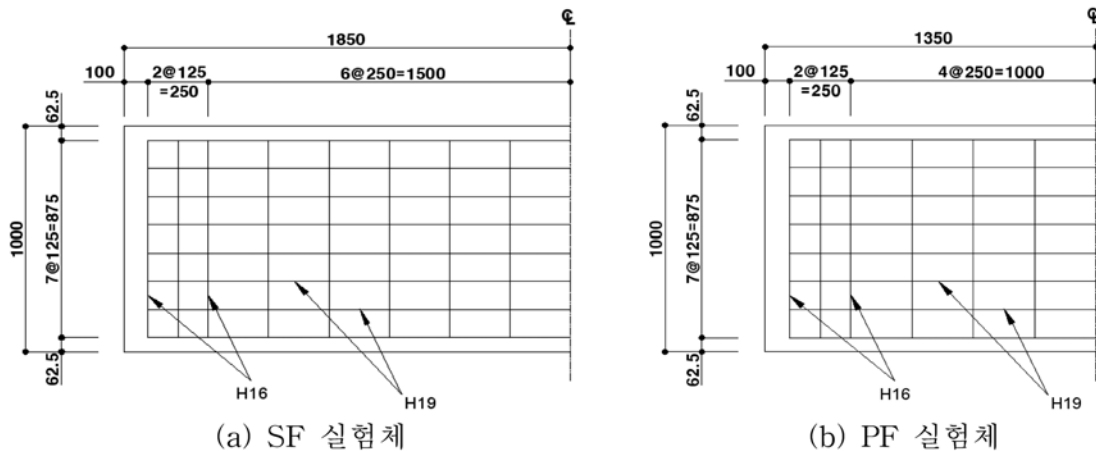
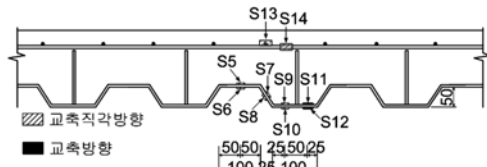


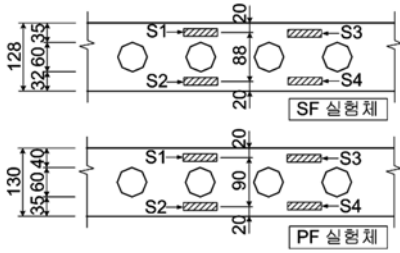
그림 4. 철근 배근도(단위 : mm)



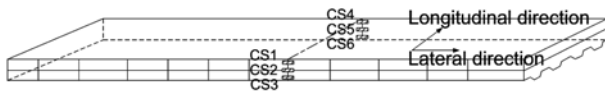
그림 5. 실험 전경



(a) 철근강판



(b) 유공판재형 전단연결재



(c) 콘크리트

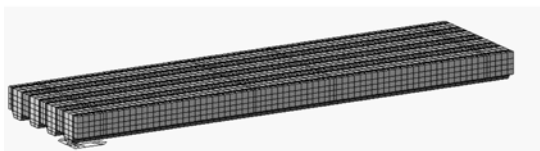
그림 6. 변형률계이지 부착위치 (단위 : mm)

표 2. 피로하중 조건

실험체명	SF 실험체			PF 실험체		
	SF-F-1	SF-F-2	SF-F-3	PF-F-1	PF-F-2	PF-F-3
최소하중	20	20	20	20	20	20
최대하중	220	270	370	220	270	370
하중범위	100 (기준)	125 (25%↑)	175 (75%↑)	100 (기준)	125 (25%↑)	175 (75%↑)

터 결정된 피로하중범위는 각각 100 kN, 125 kN 및 175 kN으로 이들 작용하중은 모두 도로교설계기준(2005)에서 규정하고 있는 DB-24 설계 활하중의 최대 축하중인 96 kN를 초과한다. 따라서 이와 같은 하중조건에서 피로실험을 수행하면 도로교설계기준의 설계 축하중에 대한 피로거동을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

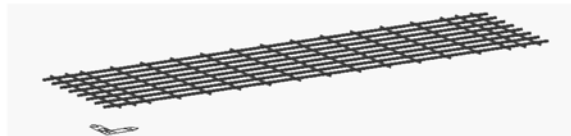
한편 피로실험에서는 도로교설계기준(2005)의 자료를 기초로 반복회수 200만회까지 피로균열이 발생하지 않은 경우에는 실험체의 수명을 무한수명으로 간주하여 피로실험을 종료하였다. 여기서 SF-F-3 및 PF-F-3 실험체에 재하된 최대 하중은 각 실험체 정적실험에서의 극한하중의 52% 및 48%에 상당하는 하중인데, 이는 피로실험시 피로균열의 발생여



(a) 콘크리트



(b) 철근강판



(c) 철근

그림 7. 구조해석 모델링

부 및 위치를 파악하기 위한 것이다. 또한 실험체의 거동특성 및 콘크리트의 균열발생 여부를 판단하기 위하여 최초 1회부터 피로실험 종료회수인 200만회까지 일정반복회수마다 각 실험체에 대한 피로하중을 최대하중으로 하여, 20 kN 단위로 하중을 재하(load) 및 제하(unload)하여 하중변화에 따른 합성바닥판의 거동특성을 조사하였다.

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 유한요소해석 모델

합성바닥판 실험체의 정적실험 및 피로실험에 앞서서 개략적인 구조거동을 분석하고, 하중재하 위치를 결정하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다. 유한요소해석은 범용구조해석 프로그램인 Midas 6.3(2006)을 사용하여 선형 탄성해석을 실시하였다.

합성바닥판 실험체의 구조요소인 콘크리트, 철근강판 및 철근의 모델형상을 그림 7에 나타내었다. 각 구조요소의 요소 모델은 구조요소의 특성을 고려하여 콘크리트는 8절점 Solid 요소, 철근강판은 4절점 Plate 요소, 철근은 Beam 요소를 사용하여 모델링하였다.

#### 3.2 구속조건 및 하중재하조건

구조해석시의 구속조건은 그림 5(b)의 실제 실험시의 지점조건을 고려하여 그림 8과 같이 양쪽 지점을 Z방향만을 구속한 양단롤러로 적용하였다. 그러나 지점조건에 따른 영향을 검토하고자 롤러-힌지에 대한 구조해석을 수행한 결과 동일한 결과가 얻어져 이후의 해석은 실제 지점조건과 유사한 양단롤러를 적용하여 구조해석을 수행하였다.

합성바닥판 실험체의 하중재하는 표 3의 하중크기 및 교량등급 1등급의 접지면적(580×230 mm)을 고려하여 면적하

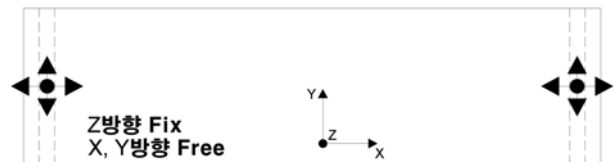


그림 8. 해석모델의 구속조건

표 3. 하중재하 크기

재하하중(kN)	300	400	500	600
면적하중(N/mm <sup>2</sup> )	2.2	3.0	3.7	4.5

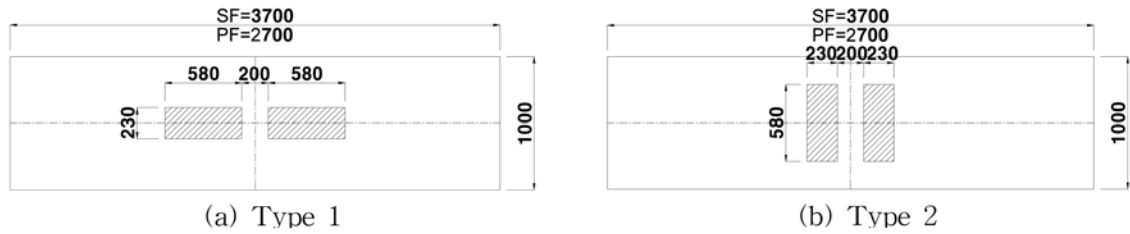


그림 9. 하중재하 위치(단위 : mm)

표 4. 유한요소해석 결과

하중 (kN)	SF 실험체				PF 실험체			
	콘크리트(MPa)		철근강판(MPa)		콘크리트(MPa)		철근강판(MPa)	
	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2
300	-20.5	-23.1	118.5	133.5	-13.9	-16.7	87.0	104.2
400	-27.4	-30.9	158.1	178.1	-18.5	-22.2	116.0	139.1
500	-34.3	-38.6	197.6	222.6	-23.2	-27.8	145.0	173.8
600	-41.0	-46.3	237.1	267.0	-27.8	-33.3	174.0	208.5

중을 그림 9와 같이 Type 1(도로교설계기준 재하조건)과 Type 2(실험 재하조건)의 두 가지의 재하위치에 대하여 적용하였다. 재하위치를 Type 1과 Type 2의 두 가지 경우로 고려한 것은 피로실험시 차륜의 위치에 따른 영향 정도를 파악하여 보다 불리한 조건에서 피로실험을 수행하기 위한 것이다.

### 3.3 유한요소해석 결과

하중 300 kN, 400 kN, 500 kN 및 600 kN 재하시의 SF 실험체와 PF 실험체의 콘크리트와 철근강판에서 발생하는 응력을 정리하여 표 4에 나타내었다.

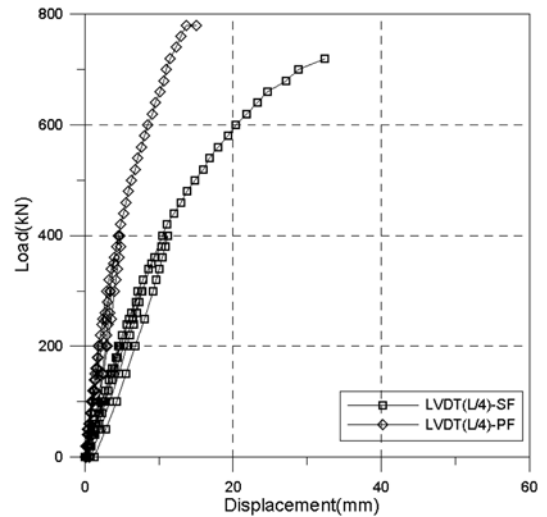
표 4를 보면 SF 실험체는 하중 400 kN에서 콘크리트의 기준강도(30 MPa)와 강재의 허용응력(140 MPa)을 초과하는 응력이 발생하였고, PF 실험체는 하중 500 kN에서 콘크리트 기준강도 및 강재의 허용응력을 초과하는 응력이 발생하였다. 피로실험에서의 재하하중은 이들 값보다 작게 발생하도록 하였다. 또한 하중재하 위치에 대해서는 Type 1보다 Type 2에서 더 큰 응력이 발생하므로 피로실험에서는 Type 2의 하중재하 형식을 적용하여 피로실험을 실시하였다.

## 4. 결과 분석 및 고찰

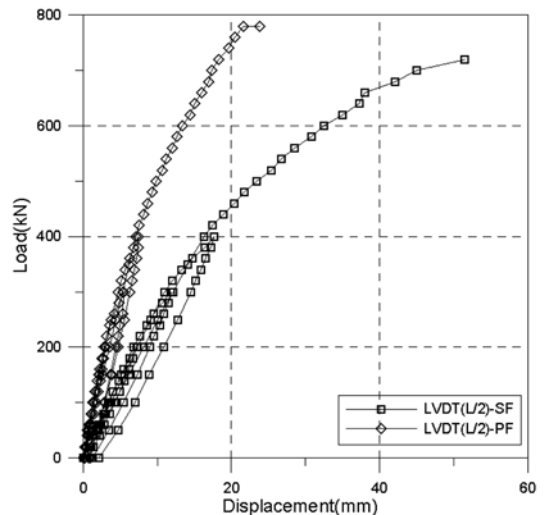
### 4.1 정적실험 결과

정적재하실험 결과 얻어진 하중-변위 곡선과 철근강판 주요 부위의 하중-변형을 곡선을 그림 10 및 그림 11에 나타내었다. 한편 각각의 실험체에 대한 균열발생하중 및 극한하중을 표 5에 나타내었다.

그림 10에 나타낸 하중-변위 곡선으로부터 상대적으로 지간이 길고 강재 두께가 얇은 SF실험체에서 변위가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 선형 구간을 지나 비선형 구간에서는 더욱 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 그림 11에 나타낸 철근강판의 하중-변형을 곡선으로부터 철근강판의 변형률값은 변위와 동일하게 SF실험체가 크게 나타났으며, 전반적으로 하중 300 kN까지는 선형으로 거



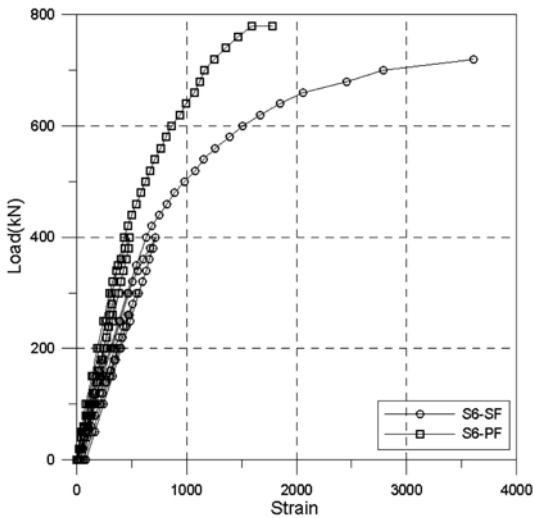
(a) L/4 지점



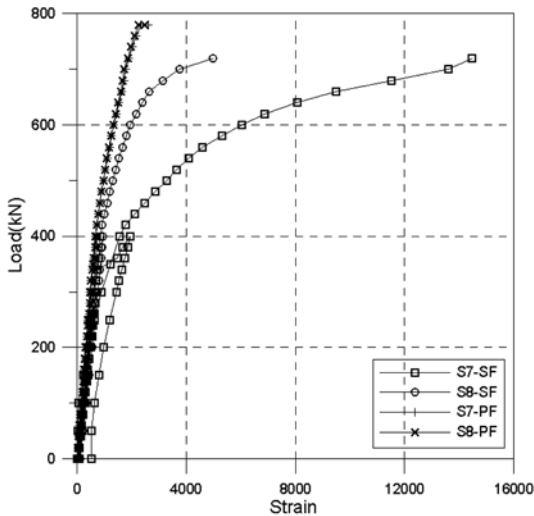
(b) L/2 지점

그림 10. 정적실험시 하중-변위 곡선

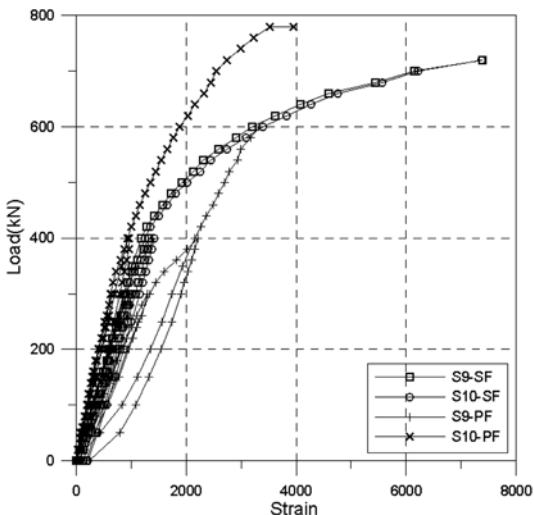
동하는 것을 알 수 있다. 한편 그림 11(c)의 철근강판 수직 보강재의 하중-변형을 곡선에서 PF실험체의 경우 동일 위치의 철근강판 내부 및 외부에서의 변형률값의 차이가 크게



(a) 중앙부(S6)



(b) 경사부(S7, S8)



(c) 수직보강재(S9, S10)

그림 11. 절곡강판의 하중-변형률곡선



그림 12. 구조상세의 피로등급

표 5. 정적실험시 균열발생하중 및 극한하중

하중	실험체명		실험체	
	SF-S-1	SF-S-2	PF-S-1	PF-S-2
균열발생하중(kN)	260	280	280	300
극한하중(kN)	700	720	760	780

표 6. 구조상세의 피로등급 비교

적용구조상세	피로등급 및 허용피로응력범위(MPa)		
	국내 및 AASHTO	JSSC	ECCS
유공판재형 전단연결재	-	C(125)	-
절곡강판 상부플랜지	A(168)	B(155)	160
절곡강판 중간부	A(168)	B(155)	160
절곡강판 하부플랜지	B'(91)	D(100)	100

나타나 면외변형의 영향이 큰 것을 알 수 있는데, 이는 절곡강판과 전단연결재와의 연결부의 국부변형의 영향에 의한 것으로 판단된다.

표 5로부터 SF 실험체는 각각 재하하중 260 kN 및 280 kN에서 콘크리트에 균열이 발생하였으며, 각각 700 kN 및 720 kN에서 합성바닥판이 파괴되었다. 한편 PF 실험체는 각각 재하하중 280 kN 및 300 kN에서 콘크리트에 균열이 발생하였고, 각각 760 kN 및 780 kN에서 바닥판이 파괴되었다. 이로부터 PF 실험체는 SF 실험체에 비해 지간이 짧기 때문에 균열발생하중 및 극한하중이 증가하는 것을 알 수 있으나, 그 증가폭이 크지 않은 것은 PF 실험체의 절곡강판의 두께가 SF 실험체에 비해 얇기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.2 피로상세 기준

합성바닥판 실험체의 각 구조상세에 대한 피로등급 및 허용피로응력범위를 각국의 설계기준을 조사하여 표 6 및 그림 12에 나타내었다.

표 6으로부터 각국의 설계기준에 대한 각 구조상세의 허용피로응력범위는 설계기준별로 차이를 나타내고 있으나, 그 차이는 그다지 크지 않은 것을 알 수 있다. 국내의 도로교 설계기준에서 제시된 피로등급에 의하면 압연면 또는 매끈한 표면을 갖는 모재인 절곡강판 상부플랜지 및 절곡강판 중간부는 A등급, 연속 필렛용접으로 만들어진 용접부의 모재와 용접금속인 절곡강판 하부플랜지는 B등급을 적용할 수 있다. 다만 유공판재형 전단연결재의 구멍 주변에 대해서는 도로교설계기준(2005), AASHTO(2002) 및 ECCS(1992)의 기준에는 적절한 규정이 제시되어 있지 않아 일본 JSSC(1993)의 설계기준을 적용하여 C등급으로 하였는데, 이는 도로교설계기준과 비교하면 허용피로응력범위가 유사한 B등급으로 적

표 7. 피로실험시 최소, 최대응력 및 응력범위

(단위: MPa)

구분	게이지 번호		S2		S4		S6		S8		S10	
	최대응력	최소응력										
SF-F-1	최대응력	최소응력	109.8	7.8	80.2	5.4	62.4	5.2	91.4	9.4	136	17.2
	응력범위		102.0		74.8		57.2		82.0		118.8	
SF-F-2	최대응력	최소응력	320.6	4.6	91.6	1.8	81.6	2.2	118.4	3.6	152.2	4.6
	응력범위		316.0		90.0		79.4		114.8		147.6	
SF-F-3	최대응력	최소응력	78.2	1.2	168.0	8.6	149.6	4.8	8.2	160	248.2	12.0
	응력범위		77.0		159.4		144.8		151.8		236.2	
PF-F-1	최대응력	최소응력	75.2	6.2	24.4	4.4	41.8	3.4	64.2	5.6	93.2	8.6
	응력범위		69.0		20.0		38.4		58.6		84.6	
PF-F-2	최대응력	최소응력	108.0	-5.0	27.8	-3.2	60.8	3.6	91.6	6.8	125.4	10.2
	응력범위		113.0		31.0		57.2		84.8		115.2	
PF-F-3	최대응력	최소응력	504.4	14.7	42.2	4.8	85.1	3.6	112.0	5.0	193.4	8.2
	응력범위		489.7		37.4		81.5		107.0		185.2	

용할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 S-N 곡선

표 7에 SF 실험체 및 PF 실험체에 대한 피로실험에서 각 구조상세별 위치에 부착된 센서로부터 측정된 최소, 최대 응력 및 응력범위를 나타내었다. 표 7에서의 응력범위는 반복회수 200만회 재하시의 값이다. 여기서, 게이지번호 S2는 유공판재형 전단연결재 중공단면, S4는 유공판재형 전단연결재 폐합단면, S6은 절곡강판 상부플랜지, S8은 절곡강판 중간부, S10은 절곡강판 하부플랜지 구조상세에 부착된 변형률 게이지를 나타낸다.

표 7에 나타난 응력범위를 기초로 SF 실험체 및 PF 실험체의 피로실험 결과를 각 구조상세별로 분류하여 그림 13의 S-N 곡선으로 나타내었다.

그림 13(a) 및 (b)에 나타난 SF 실험체 및 PF 실험체의 S-N 곡선에서 각 구조상세별 허용피로응력범위는 앞에서 기술한 표 5에 기초하여 절곡강판 상부플랜지(S6) 및 중간부(S8)는 A등급, 절곡강판 하부플랜지(S10)는 B등급, 유공판재형 전단연결재(S4)는 JSSC C등급을 적용하였다. 그림 13(a)

의 SF 실험체의 경우, 중공단면 유공판재형 전단연결재 하부와 절곡강판 하부플랜지를 제외한 모든 구조상세에서 측정된 작용응력범위가 허용피로응력범위 미만이며, 또한 최대 반복회수 200만회에서 피로균열이 발생하지 않은 것으로부터 피로수명은 무한수명으로 예상된다. 반면에 유공판재형 전단연결재 하부와 절곡강판 하부플랜지의 SF-F-2 실험체에서는 허용피로응력범위 이상의 응력이 발생하고 있는데 이것은 절곡강판과 유공판재형 전단연결재 용접이음부에서의 국부적인 변형에 의한 영향 때문으로 판단된다.

한편 그림 13(b)의 PF 실험체는 모든 구조상세에서 측정된 작용응력범위가 허용피로응력범위 미만이고, 최대반복회수 200만회에서 피로균열이 발생하지 않은 것으로부터 피로수명은 무한수명으로 예상된다. 다만 PF-F-2 실험체의 절곡강판 하부플랜지에서의 응력범위가 허용피로응력범위보다 약간 크게 나타나고 있으나, 최대반복회수 200만회에서 피로균열이 발생하고 있지 않으므로 피로수명은 무한수명일 것으로 판단된다.

또한 SF-F-1 실험체에 비해 하중을 75% 증가시켜 실험을 실시한 SF-F-3 실험체는 절곡강판 중앙부의 유공판재형 전

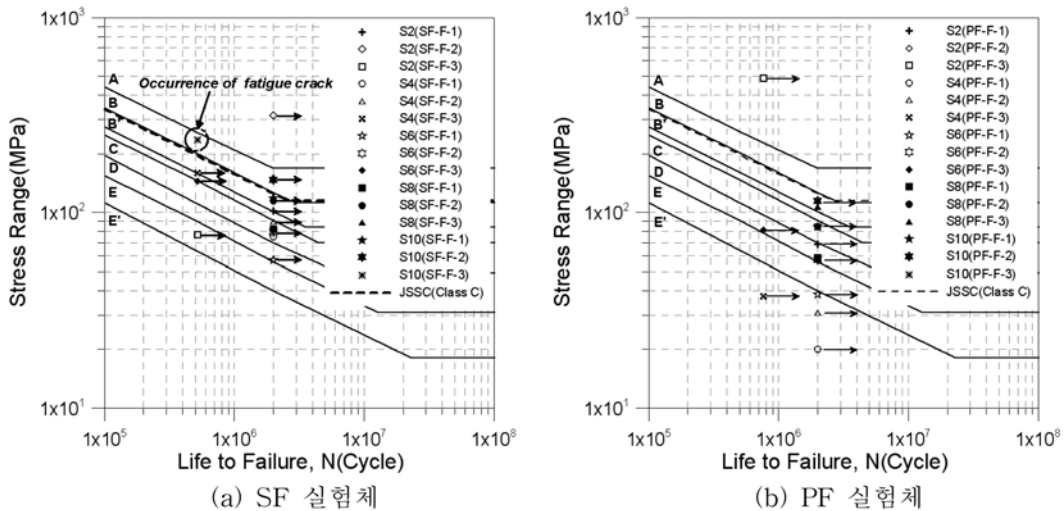


그림 13. S-N 곡선

단연결재와 하부플랜지의 필렛용접 이음부에서 피로균열이 발생하여 교축방향으로 균열이 진전하다 반복회수 52만회 정도에서 파괴되었다. 이러한 파단양상으로부터 본 실험체의 피로특성은 단재하경로 구조로 판단된다. 그러나 SF-F-3 실험체의 경우, 하부플랜지에서 발생한 피로균열에 의해 실험체가 파단되었으나, 절곡강관 하부플랜지는 피로등급(B등급)을 만족하고 있는 것으로부터 충분한 피로강도를 확보하고 있는 것을 알 수 있다.

이상과 같이 SF 실험체와 PF 실험체의 피로실험 결과, 본 연구에서 제안된 합성바닥판의 각 구조상세인 절곡강관 상부플랜지 및 절곡강관 중간부, 유공판재형 전단연결재 및 절곡강관 하부플랜지는 모두 충분한 피로강도를 확보하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 향후 강-콘크리트 합성바닥판의 피로설계시 각각의 구조상세에 대해 제안된 피로등급으로 피로설계를 하는 것은 충분한 타당성을 갖는 것으로 판단된다.

#### 4.4 피로강도의 비교

기존의 합성바닥판에서 사용한 스티드형 전단연결재와 본 연구에서 적용한 유공판재형 전단연결재의 피로강도를 비교하여 표 8 및 그림 14에 나타내었다. 기존 연구 A(김상효 외, 2003)에서 사용한 실험체는 폭 0.75 m, 길이 2.2 m, 두께 9 mm의 절곡강관 위에 직경 16 mm, 높이 75 mm의 스티드형 전단연결재를 150 mm 간격으로 배치하였다. 한편 기존 연구 B(정연주 외, 2005)에서 사용한 실험체는 기존 연구 A에서 사용한 실험체와 제원은 동일하나 스티드형 전단연결재의 간격을 150 mm 및 250 mm로 2종류로 배치하였다. 또한 기존 연구 A 및 B의 실험체는 모두 콘크리트 압축강도가 30 MPa이며, 절곡강관 및 T형강은 SS400 강재를 사용하였다.

표 8 및 그림 14로부터 유공판재형 전단연결재를 사용한 본 연구의 피로실험 결과와 스티드형 전단연결재를 사용한 기존의 연구결과를 비교하면, 유공판재형 전단연결재를 사용한 경우가 스티드형 전단연결재를 사용한 경우보다 피로수

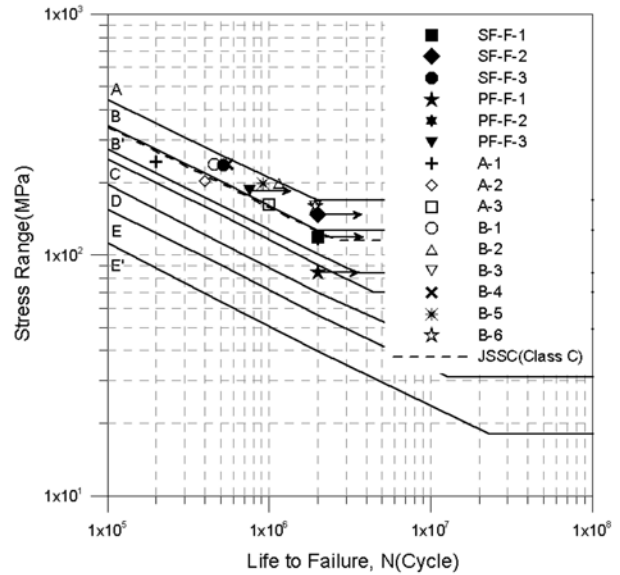


그림 14. 기존 연구결과와의 피로수명 비교

명이 동등하거나 그 이상의 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이로부터 본 연구에서 적용한 유공판재형 전단연결재는 충분한 피로강도를 확보하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4.5 반복회수별 하중-변위 및 하중-변형률 관계

합성바닥판 실험체에 대해 변위변환기 및 변형률게이지 부착위치에서의 반복회수에 따른 하중-변위 및 하중-변형률 관계를 분석하였는데, 그 일례로 SF-F-1 실험체에 대한 하중-변위 및 하중-변형률 곡선을 각각 그림 15 및 그림 16에 나타내었다.

그림 15 및 그림 16에 나타난 SF-F-1 실험체의 하중-변위 및 하중-변형률 곡선으로부터 구조상세에 관계없이 최초 1회 반복회수에서는 변위 및 변형률은 초기부정 등에 의하여 잔류변형이 발생하였으나, 이후의 거동에서는 반복회수가 증가하여도 잔류변형이 나타나지 않는 안정된 선형거동을 하

표 8. 기존 피로실험 결과와의 비교

구분		응력범위(%)	응력범위(MPa)	피로파괴회수	
본 연구	SF-F-1	30	118.8	2,000,000*	
	SF-F-2	35	147.6	2,000,000*	
	SF-F-3	50	236.2	520,000	
	PF-F-1	30	84.6	2,000,000*	
	PF-F-2	35	115.2	2,000,000*	
	PF-F-3	50	185.2	760,000*	
기존 연구 A	A-1	90	243.0	200,000	
	A-2	75	202.5	400,000	
	A-3	60	162.0	1,000,000	
기존 연구 B	S=150	B-1	75	238.1	455,000
		B-2	60	198.5	1,152,000
		B-3	50	158.8	1,920,000
	S=250	B-4	75	238.1	550,000
		B-5	60	198.5	920,000
		B-6	50	158.8	1,920,000

\*200만회까지 피로파괴 되지 않아 피로실험을 중단함



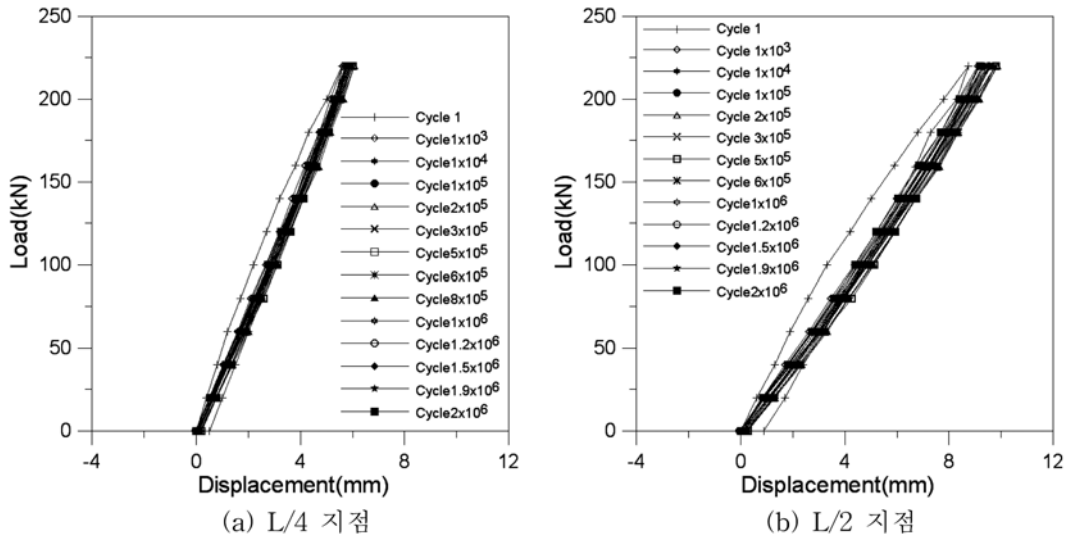
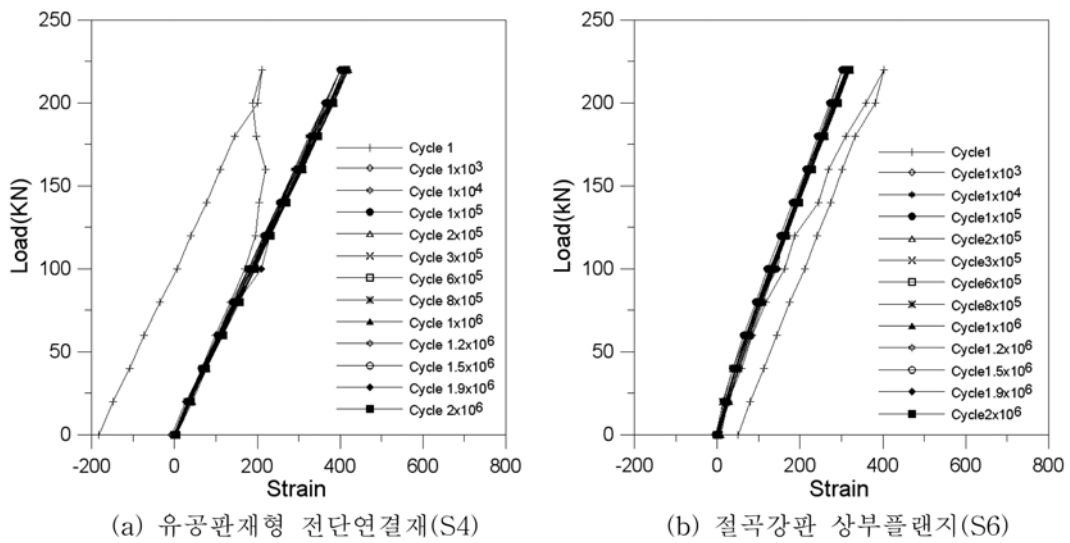
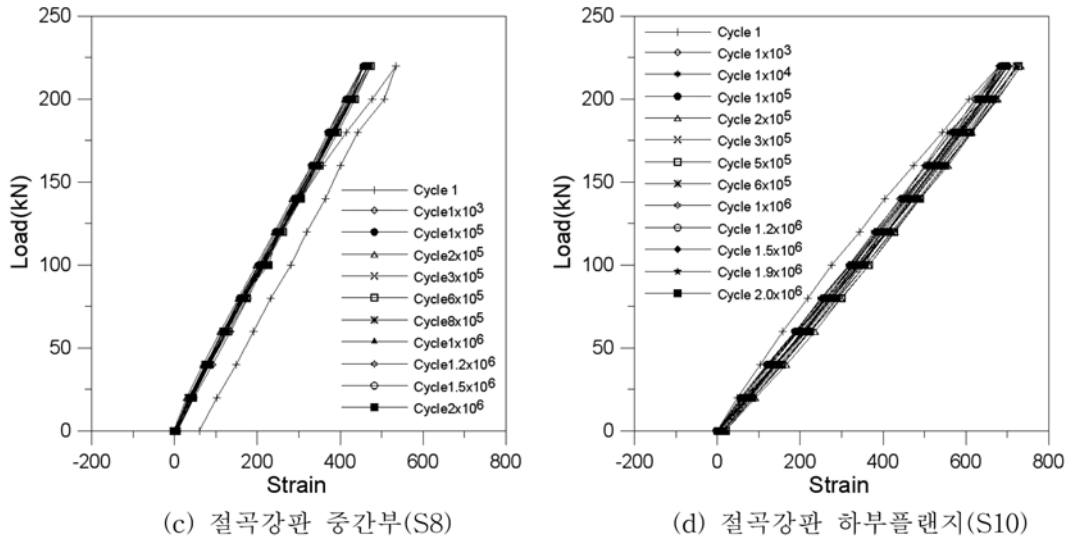


그림 15. SF-F-1 실험체의 반복회수별 하중-변위 곡선



(a) 유공판재형 전단연결재(S4)

(b) 절곡강판 상부플랜지(S6)



(c) 절곡강판 중간부(S8)

(d) 절곡강판 하부플랜지(S10)

그림 16. SF-F-1 실험체의 반복회수별 하중-변형률 곡선

고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 거동은 나머지 실험체인 SF-F-2, PF-F-1 및 PF-F-2 실험체에서도 동일한 양상으로 나타났다. 이상의 그림에 나타난 것과 같이 200만회 반복재하 후에도 변형률 변화가 나타나지 않는 것으로부터 모든 실험체의 각 구조상세에서는 피로균열이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있었다.

#### 4.6 중립축 위치의 측정

합성바닥판 실험체의 피로실험시 반복회수의 누적에 따른 중립축의 위치변화를 바닥판 하단으로부터의 거리로 정리하여 SF-F 및 PF-F 실험체의 결과를 표 9에 나타내었다. 중립축의 위치는 콘크리트에 부착된 변형률게이지(CS1~CS6)의 변형률 값으로부터 산정한 결과이다. 중립축의 위치는 반

표 9. 반복회수의 누적에 따른 중립축의 위치변화

(단위:mm)

반복회수	실험체	SF-F 실험체			PF-F 실험체		
		SF-F-1	SF-F-2	SF-F-3	PF-F-1	PF-F-2	PF-F-3
1		76.18	99.66	91.73	120.20	116.66	88.42
1,000		76.91	107.72	102.21	126.95	123.20	102.21
10,000		77.80	111.20	120.52	132.80	129.79	123.91

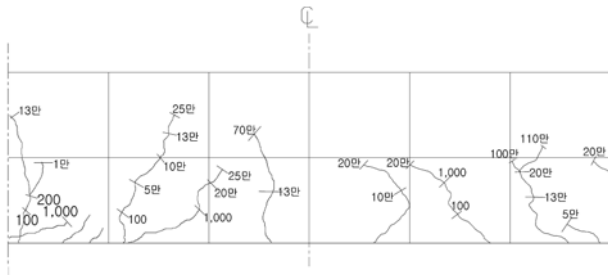


그림 17. 반복회수의 누적에 따른 균열도

복회수 1회에서 반복회수가 누적됨에 따라 중립축의 위치가 바닥판 하단으로부터 상단으로 점차적으로 이동하는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 최초 반복회수인 1회에서는 콘크리트의 균열이 발생하지 않았으나, 반복회수 1,000회에서 하중 180 kN 재하시에 최초의 피로균열이 발생하였고, 그 후 반복회수가 증가할수록 균열이 진전하게 되어 이에 따라 중립축이 상단으로 이동한 것에 기인하는 것으로 판단된다. 이러한 균열 발생의 대표적인 예를 SF-F 실험체에 대하여 그림 17에 나타내었다. 또한 콘크리트의 균열은 최초 반복회수 1회에서는 발생하지 않았으나, 반복회수 1,000회의 하중 180 kN에서 최초 균열이 발생하였다. 이는 도로설계기준의 설계축하중(96 kN)에 상당하는 하중에서 균열이 발생하고 있으므로 향후 이에 대한 검토가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

### 5. 결 론

강-콘크리트 합성바닥판에 대한 정적실험 및 피로실험을 실시하여 얻어진 결과를 정리하면 아래와 같다.

1. 정적실험 결과 SF 실험체는 평균 재하하중 270 kN에서 콘크리트에 균열이 발생하고, 평균 710 kN에서 합성바닥판이 파괴되었다. 한편 PF 실험체는 평균 재하하중 290 kN에서 콘크리트에 균열이 발생하고, 평균 770 kN에서 바닥판이 파괴되었다.
2. 피로실험 결과 절곡강판과 유공판재형 전단연결재의 용접이음부의 구조상세에서 응력집중에 의한 국부응력이 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있었으나, 이를 제외한 대부분의 구조상세에서 허용피로응력범위 미만의 응력이 발생하였다. 또한 모든 구조상세에서 200만회 재하시까지 피로 균열이 발견되지 않아 합성바닥판은 도로교설계기준의 기준반복회수인 200만회에 대해서 충분한 피로강도를 확보하는 것으로 판단된다.
3. 각국의 피로설계기준 조사 및 기존 연구결과의 검토를 토대로 합성바닥판의 각 구조상세에 대한 피로상세범주를 제안하였으며, 그 결과 본 연구에서 제시한 상세범주 A등급 및 B등급에 대하여 허용피로응력범위 미만이므로 본 연

구에서 제시한 피로등급은 타당한 것으로 판단된다.

4. 유공판재형 전단연결재를 사용한 본 연구의 피로실험 결과와 스티드형 전단연결재를 사용한 기존의 연구결과를 비교하면, 유공판재형 전단연결재를 사용한 경우가 스티드형 전단연결재를 사용한 경우보다 피로수명이 동등하거나 그 이상을 나타내고 있음을 확인할 수 있었다.
5. 피로실험시 대부분의 구조상세에서 최초 반복회수 1회에서는 잔류변형이 발생하였으나 반복회수가 누적될수록 안정화된 선형거동을 하는 것을 알 수 있었다.
6. 합성바닥판의 콘크리트에서는 최초 반복회수 1회에서는 균열이 발생하지 않았으나, 반복회수 1,000회 재하시 도로교설계기준의 설계축하중 96 kN에 상당하는 하중에서 최초 균열이 발생하고 있으므로 향후 이에 대한 보완연구가 필요할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

김상효, 이용선, 정연주, 안진희(2003) 신형상 강합성 교량 바닥판의 피로거동 분석을 위한 실험적 연구. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 420-425.

김형열, 구현분(2006) 강-콘크리트 합성 바닥판용 전단연결재의 합성거동 연구. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권, 제1A호, pp. 91-97.

김형열, 정연주, 양동석, 박선규(2005) 정적하중을 받는 강-콘크리트 합성 바닥판의 구조거동. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 1691-1694.

마이디스아이티(2006) Midas Online Manual

안진희, 김상효, 구현분, 강근희(2007) Perfobond rib 전단연결재의 전단강도 및 잔류강도 평가. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제2A호, pp. 237-245.

정연주, 정광희, 구현분, 김병석(2004) 교량용 강·콘크리트 합성 바닥판의 실험적 정적거동 특성. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제1A호, pp. 17-25.

정연주, 김상효, 안진희, 심정욱(2005) 합성정도와 피로하중에 따른 강-콘크리트 합성 바닥판의 피로거동. **대한토목학회 정기학술대회논문집**, 대한토목학회, pp. 1518-1521.

정철현, 이홍수, 박종면, 김영호(2004) 합성작용을 위한 새로운 Perfobond 전단연결재. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제3A호, pp. 525-532.

한국건설기술연구원(2005) **장수명 합리화 바닥판 개발, 강-콘크리트 합성바닥판**, 한국도로교통협회(2005) **도로교설계기준**, Kim, H.Y., Jeong, Y.J., Koo, H.B., and Kim, J.H. (2005) Behavior of steel concrete composite bridge decks with perfobond ribs. Proc. 3rd Intl Sym on Steel Structures, Seoul, Korea.

AASHTO (2002) *Standard Specification for Highway Bridges*.

ECCS (1993) Eurocode 3 Design of Steel Structure-Fatigue strength of steel structures.

日本鋼構造協會(JSSC) (1993) 鋼構造物の疲勞設計指針・同解説. 技報堂出版, pp. 5-12.

(접수일: 2009.10.27/심사일: 2009.11.12/심사완료일: 2009.11.12)