

# Perfobond rib 전단연결재가 설치된 강·콘크리트 합성보의 정적거동

## Static Behavior of Steel-Concrete Composite Beam with Perfobond Rib Shear Connector

안진희<sup>1)</sup> · 정하민<sup>2)</sup> · 김상효<sup>3)</sup>  
*Ahn, Jin Hee Chung, Hamin Kim, Sang Hyo*

**요약**: 본 연구는 perfobond rib 전단연결재를 사용한 합성보의 정적거동 특성을 파악하기 위하여 perfobond rib 전단연결재의 push-out 실험과 perfobond rib 전단연결재를 설치한 합성보의 하중재하 실험을 실시하였다. Perfobond rib의 전단저항성능은 콘크리트 강도 증가에 의한 콘크리트 선단지지력 및 콘크리트 다웰의 전단저항 성능 증가로 콘크리트 강도에 비례하며 횡방향 철근의 휨변형 성능에 대한 제한으로 연성효과를 나타내는 상대슬립은 일정 콘크리트 강도이상에서는 증가하지 않았다. 합성보의 하중재하 실험결과, 합성보에 휨 하중과 휨 전단하중이 동시에 작용하게 되므로 rib 홀에 배치된 횡방향 철근과 콘크리트 다웰부의 전단저항에 따라 합성보 콘크리트 슬래브의 rib 홀의 위치에서 횡방향 균열이 발생하였으며, perfobond rib 배치방법에 따라 합성단면 경계에서의 상대변위로 강성전단연결재의 전단거동 특성을 확인하였다. Perfobond rib와 같이 합성보에 대한 전단저항 성능이 큰 강성 전단연결재의 경우 전단연결재에 의한 합성보의 거동이 변화하므로 합성보 단면설계시 이에 대한 고려가 필요하다.

**ABSTRACT**: In this study, push-out and static loading tests were conducted to evaluate the behavioral characteristics of composite beams with a perfobond rib shear connector. The shear capacity of the perfobond rib was found to be proportional to its concrete strength, which is in turn affected by the increase in the concrete end-bearing strength and concrete dowel action to resist the shear force. The relative slips of the push-out specimen, however, which was used to assess the ductility of the shear connector, increased to some extent, but it no longer increased when it reached the critical concrete strength because of the flexibility of the transverse rebar in the rib hole. The static-loading-test results revealed a crack on the concrete slab in the composite beam with a perfobond rib on the side of the rib hole and transverse rebar for the applied moment and shear force to the rib hole, depending on the static loading. The shear resistance characteristics of the perfobond rib shear connector were found to resist the shear force from the relative slip on the interface of the composite beam. Thus, the sectional effect of the shear connector to the composite beam with a perfobond rib should be considered when designing the composite beam because the behavior of the composite beam can change owing to the shear connector.

**핵심용어**: 합성보, perfobond rib, 전단연결재, 정적거동

**KEYWORDS**: composite beam, perfobond rib, shear connector, static behavior

### 1. 서론

강-콘크리트의 합성구조에서 강재와 콘크리트가 가지는 재료적 장점을 충분히 발휘하기 위해서는 재료간의 일체거동과 효과적인 재료간의 응력전달을 위한 전단연결재가 필수적이다.

현재 국내에서 사용되고 있는 전단연결재는 지름이 19mm, 22mm, 25mm인 스티드 전단연결재만을 표준으로 하여 다양한 합성구조물에 적용되고 있다(도로교설계기준해설 2008). 새로운 형태의 강합성 구조물의 개발 및 대형화에 따라 좁은 영역에 많은 수의 스티드 전단연결재를 배치할 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우 전단연결부의 상세나 설계가 어려우므로 전

1) 연세대학교 사회환경시스템공학부, 박사후 연구원(palanorange@yonsei.ac.kr)

2) 연세대학교 사회환경시스템공학부, 석사과정(haminij@yonsei.ac.kr)

3) 교신저자, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사

(Tel. 02-2123-2804, Fax. 02-364-5300, E-mail: sanghyo@yonsei.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2010년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

단연결재의 전단성능을 향상시킨 대직경 스테드나 rib, block type 등과 같은 강성 전단연결재에 대한 연구들이 진행되고 있다.(정철현 등 2005, 심창수 등, 2004; 이필구 등, 2003). 이중 perfobond rib 전단연결재는 전단성능 및 피로성능이 뛰어나고, 종방향으로 용접하여 설치함으로써 다른 강성 전단연결재들보다 시공상의 장점이 있다. 따라서 CFT 거더나 강합성 바닥판 그리고 지중파일 등의 전단연결재로 적용하기 위한 연구들이 진행되고 있다(정철현 등 2005; 김형렬 등, 2006; 안진희 등, 2007; 구현본 등, 2008).

스테드 전단연결재의 경우, push-out 실험 및 합성보에 대한 하중재하 실험과 함께 다양한 해석적 연구들도 수행되었다. 하지만, perfobond rib 전단연결재와 같이 강성전단연결재에 관한 연구는 push-out을 통한 전단성능평가와 같은 기초적 연구들만이 다수 진행 되었을 뿐 이를 적용한 구조물의 거동에 대한 연구는 스테드와 비교하여 상대적으로 부족하다. 따라서 본 연구에서는 전단강성이 크고 연성이 적은 perfobond rib을 적용한 합성보의 정적거동 특성을 스테드 전단연결재를 적용한 합성보의 거동과 비교하여 평가하였다. 이를 위하여 perfobond rib 전단연결재의 push-out 실험과 perfobond rib 전단연결재의 설치방법 및 적용형태를 구분한 합성보 시험체를 제작하고 하중재하 실험을 실시하여 하중성능 변화 및 파괴형태를 분석하였다.

## 2. Perfobond rib 전단연결재와 합성보 시험체

### 2.1 Perfobond rib 전단연결재와 전단저항

전단연결재에 의한 합성단면에서의 합성거동은 그림 1과 같이 전단연결재의 특성에 따라 경계면에서의 전단력과 상대변위의 관계에 따라 표현할 수 있다.(심창수 등, 2006). 전단하중에 대한 상대변위의 관계에 따라 전단연결재를 연성 전단연결재와 강성 전단연결재로 구분한다. 연성 전단연결재는 스테드 전단연결재와 같이 전단하중에 대한 상대변위가 6.0mm이상인 경우로 그림 1 곡선 (3)과 같은 하중상대변위관계를 가지게 된다. 반대로 강성 전단연결재는 1의 곡선 (2)와 같이 전단저항 성능은 높는데 반하여 전단연결재의 변형에 의한 상대변위가 상당히 적다. 전단연결재가 없이 순수한 두 합성부재 경계면의 부착만이 존재하는 경우는 연성 전단연결재와 강성 전단연결재의 거동과 비교하여 그림 1의 곡선 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

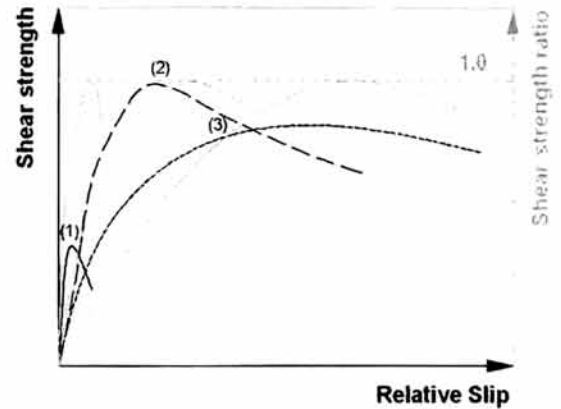


그림 1. 전단연결재의 종류에 따른 전단력과 상대변위

본 연구에서 그 적용성을 평가하고자 하는 perfobond rib 전단연결재는 강성 전단연결재로 그림 2와 같이 다수의 홈을 가지는 강 플레이트(Leonhardt, 1987)이다. 합성부재 경계면에서 perfobond rib은 rib 홈에 채워진 콘크리트 다웰(Dowel, ①), 횡방향 철근(③) 그리고 rib 단부에서의 선단지지(②)에 의하여 강재와 콘크리트 사이의 수평전단력과 수직분리력에 저항하며, 홈에 배근된 횡방향 철근이 연성과 피로 성능을 증가시킨다(김형렬 등, 2006; 안진희 등, 2007). 따라서 perfobond rib 전단연결재의 전단저항성능은 식(1), (2), (3)과 같이 제안되었다(Oguejiofor and Hosain, 1992, 1994; Sara et al., 2002).

$$q_u = 0.590A_c\sqrt{f_{ck}} + 1.233A_{tr}f_y + 2.871d^2\sqrt{f_{ck}} \quad (1)$$

$$q_u = 4.50htf_{ck} + 0.91A_{tr}f_y + 3.31nd^2\sqrt{f_{ck}} \quad (2)$$

$$q_u = 9bh\sqrt{f_{ck}} + 0.9A_{tr}f_y + 20n\pi\sqrt{f_{ck}}\left(\frac{d}{2}\right)^2 + 60b_fL_c \quad (3)$$

여기서,  $h$ 는 rib 높이,  $t$ 는 rib 두께,  $A_c$ 는 전단연결재당 콘크리트의 전단저항 면적,  $A_{tr}$ 은 횡방향 철근 총단면적,  $f_y$ 는 철근 항복강도,  $n$ 은 rib 홈 개수,  $d$ 는 rib 홈의 지름이다.



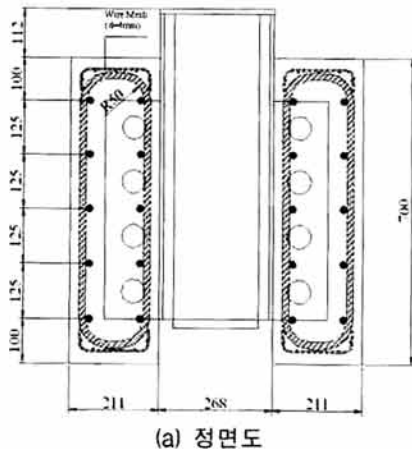
그림 2. Perfobond rib 전단연결재의 전단저항

## 2.2 Perfobond rib push-out 시험체

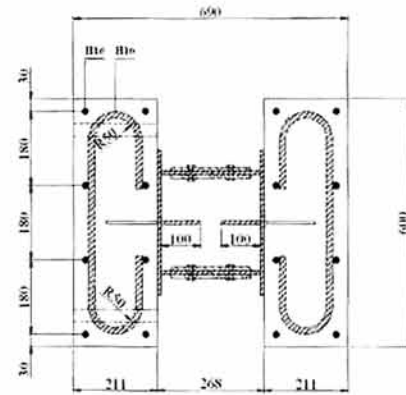
합성보나 합성구조물에 있어 콘크리트의 강도는 전단연결재가 외부하중에 저항하게 되는 지압부 콘크리트의 전단저항 효과(스터드의 경우)나 선단지지 효과와 콘크리트 다웰 효과(perfobond rib의 경우)와 같이 전단연결재의 전단성능과 직접적인 관계를 가지고 있다. 또한 합성구조물에 있어 강재와 콘크리트 단면 및 강도에 의하여 결정되는 합성정도(Degree of shear connection)에 영향을 준다. 따라서 본 연구에서는 합성보의 하중재하 실험이전에 콘크리트 강도에 따른 perfobond rib 전단연결재의 전단강도를 평가하였다. 현재 perfobond rib 전단연결재에 대한 설계기준이 명확하지 않으므로 본 연구에서 기존에 수행되었던 perfobond rib 전단연결재와 동일한 제원의 전단연결재를 적용하여 콘크리트 강도 변화에 대한 영향을 평가하였다. 또한 Push-out 실험결과를 바탕으로 합성보의 합성정도를 결정하였다(안진희 등, 2007). 그림 3은 본 연구에서 적용한 push-out 시험체의 제원이다. 본 연구에서는 높이 129mm, 홀 지름 55mm, 두께 6mm의 perfobond rib이 사용되었다. 콘크리트 강도는 27MPa에서 50MPa로 변화하여 콘크리트 강도변화에 따른 전단강도 변화를 확인하였으며, 모든 rib 홀에는 관통철근을 배근하여 콘크리트 강도만을 변수로 하였다. 하중재하는 3,000kN 만능시험기를 이용하여 0.05mm/sec의 속도로 하였으며, LVDT를 이용하여 강재와 콘크리트 시험체의 상대변위를 측정하였다.

표 1. Push-out 시험체와 콘크리트 강도

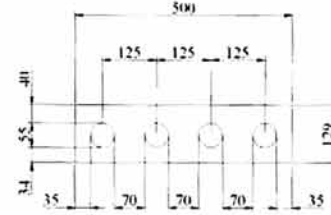
시험체	콘크리트 설계강도(MPa)	28일 강도(MPa)	시험 강도(MPa)
PF-C27	27	27.4	28.1
PF-C30	30	31.1	32.7
PF-C40	40	40.9	41.5
PF-C50	50	51.5	52.6



(a) 정면도



(b) 평면도



(c) perfobond rib 제원

그림 3. Push-out 시험체의 제원 및 형상 (단위: mm)

표 1에 push-out 시험체명과 시험체별 콘크리트 강도 특성을 나타내었다.

## 2.3 합성보 시험체

Perfobond rib 전단연결재는 rib의 분절 없이 합성보에 연속적으로 배치하는 경우와 분절하여 선단지지력을 가지는 경우로 구분하여 평가할 수 있다. 본 연구에서는 합성보에 perfobond rib을 push-out 시험체와 동일하게 제작 용접하여 부분적으로 적용한 경우와 합성보 길이방향으로 연속적으로 배치한 경우에 대한 합성보 시험체를 제작하였다. 또한 perfobond rib을 적용한 합성보의 거동과 스테드 전단연결재를 적용한 합성보의 거동을 비교하기 위하여 지름 16mm인 스테드 전단연결재를 설치한 합성보를 제작하였다. 콘크리트와 강재의 화학적 부착효과를 최소화하기 위하여 콘크리트 타설 전 상부플랜지에 그리스(Grease)를 도포하였다. 합성보 시험체는 길이 5,000mm, 지간거리 4,500mm, 높이 480mm로, 강재부는 높이 300mm, web 두께 6.5mm, 플랜지 폭 150mm 두께 9mm인 H형강을 이용하였으며, 콘크리트 부는 폭 350mm, 두께 180mm로 제작되었다. H형강은 SS400 강종으로 허용응력 140MPa, 항복강도 240MPa, 인장강도 420MPa이며, 콘크리트부의 압축강도는 30MPa로 설계되었다. 재료실험 시 강재의 항복강도는 353MPa, 인장강도는 441MPa로 나타났으며, 콘크리트 슬래브는 32MPa로 평가되었다.

그림 4는 콘크리트 타설 전 전단연결재가 설치된 합성보 시

험체 모습이다. 그림 5는 시험체의 제원 및 특징으로 PFS1 시험체는 perfobond rib을 분절 배치한 합성보 시험체이며, PFS2는 perfobond rib을 연속 배치한 합성보 시험체, STS1은 스티드 전단연결재를 배치한 합성보이다. 스티드 전단연결재를 배치한 합성보의 경우 콘크리트 단면의 강도와 강재단면의 강도에 대한 전단연결부 강도에 의하여 결정되는 합성률 관계식 식(4)와 콘크리트 단면과 강재단면간의 변위관계에 따라 결정되는 결합률 관계식 식(5)에 따라 합성률은 1.30으로 결합률은 1.29로 결정할 수 있다(Oehlers, Bradford, 1995). 하지만 perfobond rib을 적용한 합성보의 경우 rib 배치에 따른 전단연결부의 강도가 불명확하므로 이에 대한 이론값을 결정하기 어렵다. 그래서 perfobond rib의 push-out 실험결과를 통해 얻어진 전단강도를 바탕으로 합성보의 합성률과 결합률을 결정하였다. 이때 스티드 전단연결재에 비해 perfobond rib의 전단성능이 월등히 크므로, 합성률과 결합률 모두 1.0이상을 보일 것으로 판단된다. 표 2는 합성보 시험체 명과 특징을 나타낸 것이다.

$$\eta = \frac{\sum P_{sh}}{\sum (P_{sh})_{f,c}} \quad (4)$$

$$\zeta = \frac{\sum (P_{sh})_{max}}{\sum (P_{sh})_{max,fi}} \quad (5)$$

표 2. 합성보 시험체

시험체	전단연결재	배치방법	비고
PFS1	Perfobond rib	분절배치	두께 6mm rib
PFS2	Perfobond rib	연속배치	두께 6mm rib
STS1	Stud	260mm 등간격 배치	지름 16mm



(a) PFS1

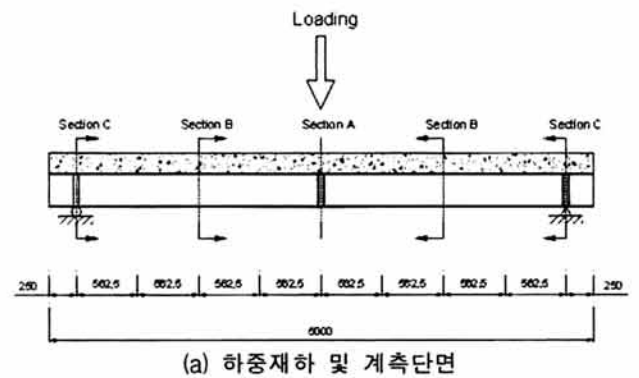


(b) PFS2

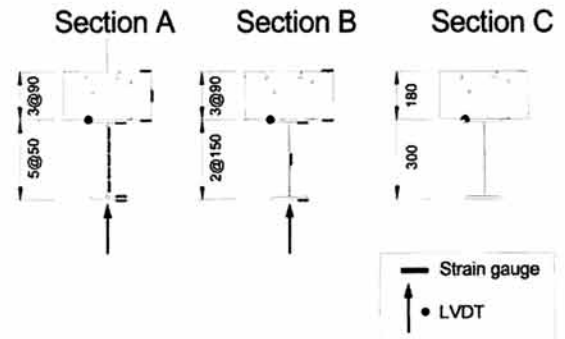
그림 4. 합성보 시험체의 제원 및 형상

## 2.4 합성보 시험체의 재료특성 및 실험방법

합성보는 2,000kN 용량의 actuator를 이용하여 시간중양부에 하중을 재하하는 3점 휨 실험을 수행하였다. 시험체에 대한 하중재하는 선형탄성구간에서는 하중제어, 선형구간 이후에서는 0.033mm/sec의 속도로 변위를 재하 하였다. 하중재하에 따른 합성보의 거동특성을 비교하기 위하여 그림 6에 나타난 것과 같이 시간 중앙부 및 지점부와 L/4지점부 단면에 변위계와 스트레인 게이지를 설치하여 처짐, 상대변위 그리고 변형률의 변화를 계속하였다. 그림 7은 합성보의 하중재하 모습이다.



(a) 하중재하 및 계측단면



(b) 계측단면

그림 6. 하중재하 및 계측위치 (단위: mm)



그림 7. 시험체의 하중 재하모습

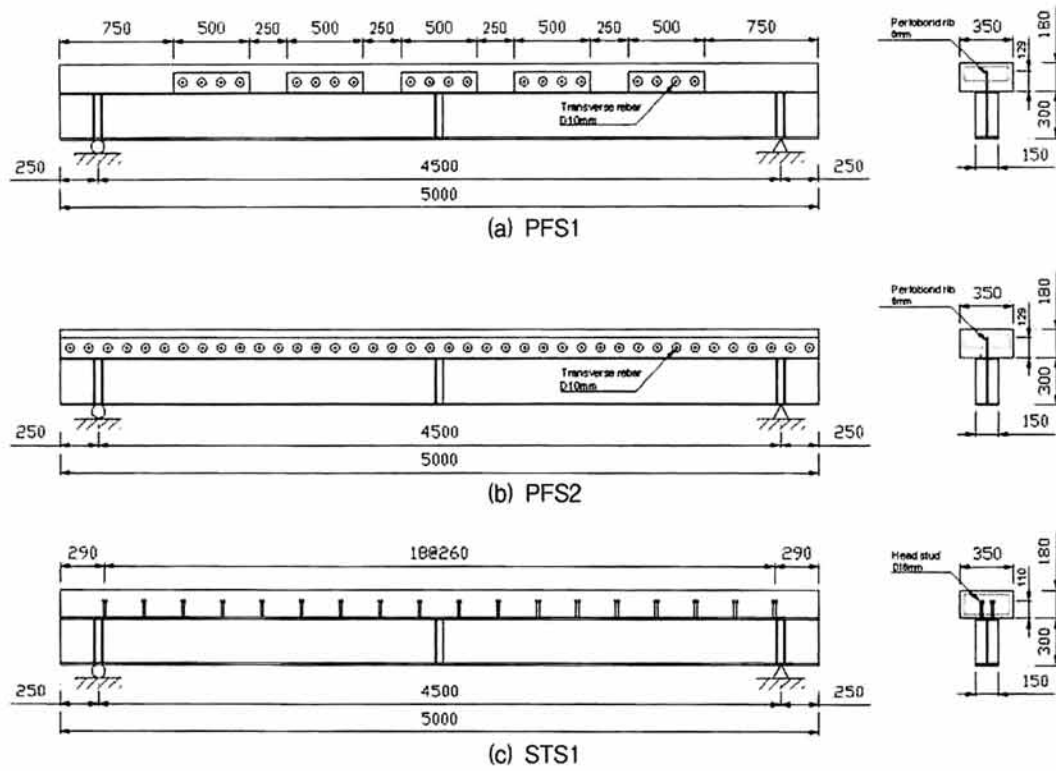


그림 5. 합성보 시험체의 제원 및 형상

### 3. Push-out 실험

#### 3.1 Push-out 실험결과

Perfobond rib 전단연결재가 배치된 push-out 시험체의 파괴는 기존 연구에서 동일한 제원의 perfobond rib 전단연결재를 적용하여 횡방향 철근효과 및 선단지지 효과에 대한 연구에서 나타난 파괴형상과 동일하게 콘크리트 슬래브의 파괴에 의하여 push-out 시험체의 파괴형태가 결정되었다(안진희 등, 2007). 전단하중 재하시 최대전단하중에 도달하기 이전에 콘크리트 슬래브 내측 rib 아래와 측면에서 균열이 발생하기 시작하여 하중증가에 따라 초기 발생된 균열이 확대되었다. 이후 콘크리트 슬래브 외측으로도 균열이 발생하며, 최대전단하중에 도달하고 전단성능의 감소가 나타났다. 모든 시험체에서 steel rib을 기준으로 rib 상면의 콘크리트 슬래브와 하면의 균열을 확인 할 수 있었으며, 슬래브에 배치한 횡방향 철근부와 동일한 위치에서 횡방향 균열을 확인할 수 있었다. 그림 8은 콘크리트 강도가 30MPa인 시험체의 파괴형상이다.



그림 8. Push-out 시험체의 파괴형상(PF-C30)

Push-out 실험결과 나타난 하중-상대변위관계를 그림 9에 나타내었으며, 최대하중, 최대하중에 대한 상대변위, 콘크리트 슬래브의 초기균열 발생하중을 표 3에 정리하였다. 그림 9와 표 3에서 콘크리트 강도가 27MPa인 시험체(PF-C27)의 경우 1065.70kN의 전단저항성능을 가지며 콘크리트 강도가 증가함에 따라 각각의 시험체는 콘크리트 강도 30MPa 시험체

1177.50kN, 콘크리트강도 40MPa 시험체 1234.40kN, 콘크리트 강도 50MPa 시험체 1393.50kN으로 나타나 콘크리트 강도변화에 따라 최대하중이 증가하고 균열하중은 최대하중의 70% 수준으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

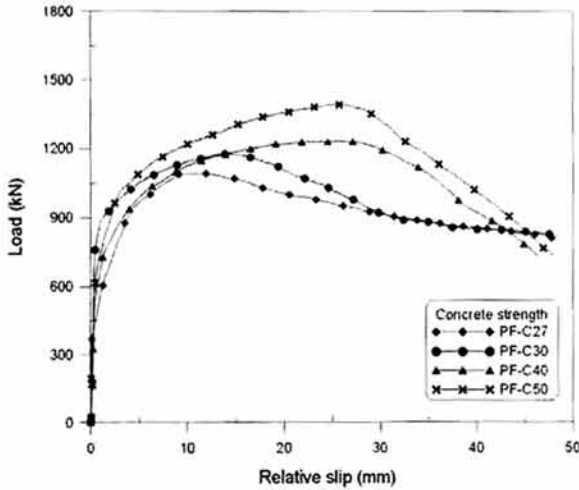


그림 9. Push-out 실험결과

표 3. Push-out 실험 결과 (perfobond 당)

시험체명	최대하중(kN)	상대슬립(mm)	균열하중(kN)
PF-C27	532.85	11.90	373.15
PF-C30	588.75	14.03	424.90
PF-C40	617.20	25.69	431.60
PF-C50	696.75	25.61	498.80
PF-S-C1*	585.83	15.69	432.39
PF-S-C2*	631.98	25.76	449.06

\*안진희 등, 2007

### 3.2 Push-out 실험결과와 분석

그림 9과 표 3에 나타난 push-out 실험결과를 바탕으로 콘크리트 강도변화에 따른 전단저항성능 변화 및 연성거동을 평가하였다. 그림 10은 본 연구결과 나타난 콘크리트 강도와 전단저항성능 변화를 나타낸 것으로 콘크리트 강도 변화에 따라 perfobond rib 전단연결재가 가지는 전단저항은 비례하고 있는 것으로 나타나고 있다. 최대전단성능에 대한 상대슬립의 경우 콘크리트 강도가 27MPa, 30MPa, 40MPa로 증가함에 따라 상대슬립도 증가하고 있으나, 콘크리트 강도가 50MPa인 경우는 40MPa인 경우의 상대슬립과 유사한 상대변위를 나타내고 있음을 확인하였다. 따라서 콘크리트 강도 증가에 따라 전단저항 성능은 증가하더라도 상대슬립의 증가는 한계를 가진다. 또한 콘크리트 강도 증가로 콘크리트 엔드베어링 및 콘크리트 다웰의 전단저항 성능이 증가하나 연성에 영향을 주는 횡

방향 철근의 전단하중에 저항하는 휨 변형 성능은 제한되는 것으로 판단된다. 이는 동일한 시험체로 실시한 기존 연구결과(안진희 등, 2007)와 비교할 때 횡방향 철근이 배근되지 않은 시험체의 경우 최대하중에 대한 상대변위가 미소하여 초기강성만이 급격히 증가하였다. 반대로 횡방향 철근이 배근된 경우에는 최대하중에 도달할 때까지 상대변위가 증가하여 횡방향 철근의 연성효과를 확인할 수 있다. 또한 콘크리트 강도가 증가할수록 최대하중에 도달하기까지의 변위가 증가하므로 콘크리트 강도가 큰 합성구조물에 perfobond rib 전단연결재를 적용할 경우 충분한 전단성능과 연성효과를 동시에 만족할 것으로 판단된다.

기존에 수행되었던 30MPa의 콘크리트 강도를 가진 시험체 중 PF-S-C1 시험체는 본 연구결과와 유사한 전단저항성능을 가지고 있으나 PF-S-C2 시험체의 경우 7.3%의 전단저항성능 차이가 나타났으며, 이는 시험체 제작시 발생할 수 있는 불확실성 등에 의한 것으로 판단되므로, 다수의 시험체를 통하여 불확실성의 범위를 줄이거나 기타 연구자료 등을 통하여 그 영향이 평가되어야 할 것이다.

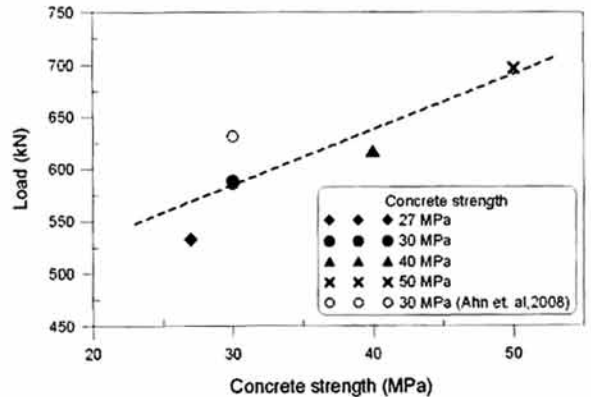


그림 10. 콘크리트 강도 변화에 따른 전단강도 변화

Perfobond rib 전단연결재의 전단강도 실험결과를 현재까지 제안된 전단강도식 중 Oguejiofor와 Hosain이 제안한 perfobond rib의 전단강도 제안식 (1)은 길이방향의 콘크리트 전체가 전단하중에 저항(선단지지)한다는 가정에 의하여 구성된 식으로 콘크리트 선단지지력과 횡방향 철근의 효과가 과다하게 반영되고 있으며, 제안식 (3)의 경우 일반적으로 설계에서 무시되는 강재와 콘크리트의 부착강도를 포함하고 있다. 따라서 본 연구에서는 제안식(1)에서 콘크리트 슬래브의 선단지지효과를 rib 높이와 두께에 대한 rib 하부 콘크리트의 지압저항으로 재평가한 제안식 (2)의 전단강도를 본 실험결과와 비교하여 표 4에 나타내었다.

표 4에 나타난 것과 같이 Oguejiofor와 Hosain이 제안한 perfobond rib의 전단강도식은 본 실험결과와 유사한 결과를

가지는 것으로 나타나고 있다. Oguejiofor와 Hosain이 제안한 perfobond rib의 전단강도식은 콘크리트 슬래브의 활렬저항보다는 rib의 높이와 두께에 의한 지압저항의 영향을 고려하여 횡방향 철근배근 모두를 전단강도에 영향을 미치는 인자로 보고, 전단강도값을 평가하게 됨으로 실험값과 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, Oguejiofor와 Hosain이 제안한 perfobond rib의 전단강도식 식(2)를 이용하여 perfobond rib 전단연결재의 전단강도를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

표 4. 실험 결과와 제안식 비교 (perfobond 당)

시험체명	실험결과(kN)	제안식(kN)	실험/제안
PF-C27	532.85	535.83	0.99
PF-C30	588.75	557.54	1.06
PF-C40	617.20	626.30	0.99
PF-C50	696.75	691.03	1.01
PF-S-C1*	585.83	557.54	1.05
PF-S-C2*	585.83	557.54	1.13

#### 4. 합성보 실험

##### 4.1 합성보의 파괴모드

perfobond rib 전단연결재가 설치된 합성보의 하중재하 실험은 합성보 또한 스티드 전단연결재를 설치한 합성보 거동과 같이 탄성거동 후 강재보의 하부 플랜지의 항복과 상부 콘크리트의 균열이 발생한 후 상부 콘크리트 슬래브의 압축파괴로 시험체의 최종파괴 모드가 결정되었다.

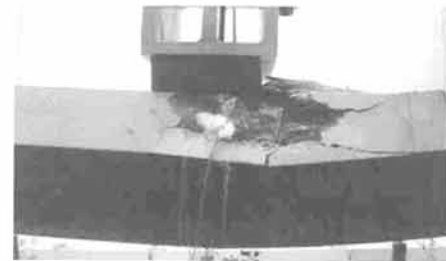
하중재하 위치의 콘크리트 슬래브 파괴가 발생한 스티드 전단연결재를 설치한 합성보와 달리 perfobond rib 전단연결재를 설치한 합성보의 경우 길이방향 콘크리트 슬래브의 rib 홀이 설치된 위치에서 하중재하위치의 지점부로 균열이 발생하여 진전하였다. Push-out 실험의 경우 순수한 전단하중만의 재하로 전단연결재가 설치된 강재보의 길이방향 변위가 발생함에 따른 지압영역에서 발생한 균열과 슬래브에 배치한 횡방향 철근부와 동일한 위치에서 횡방향 균열이 발생하였다. 합성보의 경우에는 push-out 시험체와 비교하여 슬래브의 폭이 작고, 작용하중 또한 순수전단하중이 아닌 휨 하중과 휨 전단하중이 동시에 작용하게 되므로 rib 홀에 배치된 횡방향 철근과 콘크리트 다웰부의 전단저항에 따라 rib 홀 위치에서 균열이 발생한 것으로 판단된다. 그림 11은 시험체 별 파괴 형상을 구분하여 나타낸 것이다.



(a) PFS1



(b) PFS2



(c) STS1

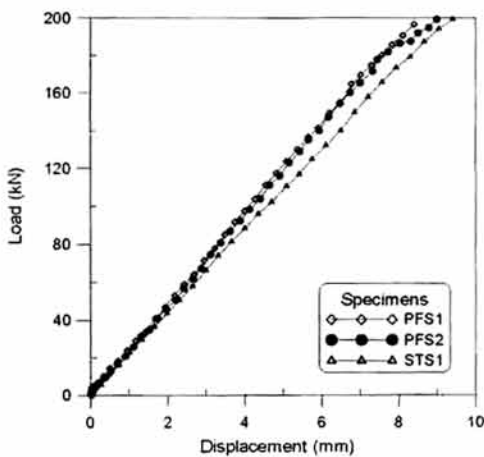
그림 11. 시험체별 최종 파괴 형상

##### 4.2 하중-처짐 및 상대변위 관계

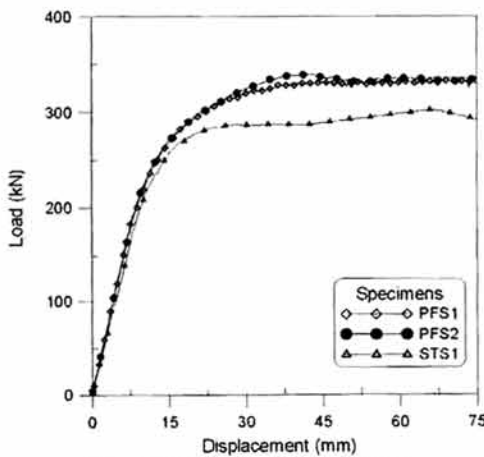
하중재하 실험결과 나타난 합성보의 거동을 평가하기 위하여 하중-처짐 곡선에서 선형구간과 전체 하중재하 구간으로 구분하여 그림 12에 나타내었다. Perfobond rib을 분절 배치한 합성보의 경우 326.4kN, 연속 배치한 합성보는 331.5kN, D16 스티드 전단연결재를 설치한 합성보는 286.0kN의 극한강도를 가지는 것으로 나타났다. 그림 12(a)는 초기강성 변화를 평가하기 위한 선형 탄성구간의 하중-처짐 곡선으로 perfobond rib을 설치한 합성보의 초기 강성(분절배치 23.97kN/mm, 연속배치 23.53kN/mm)이 스티드 전단연결재(21.50kN/mm)를 설치한 경우와 비교하여 9.5% 이상 초기강성이 증가하는 것으로 나타났으며, rib을 분절 배치한 경우와 연속 배치한 경우의 초기강성 차이는 없는 것으로 나타났다.

하중재하 구간의 하중-변위관계에서 rib을 연속 배치한 합성보와 분절 배치한 합성보의 극한강도 및 항복강도는 크게 차이 나지 않고 거의 유사한 거동을 가지는 것으로 나타났으며, 연속 배치한 합성보의 극한강도는 미소하게 증가하였다. 하지만 스티드 전단연결재를 설치한 합성보의 극한하중과 비교한 결과 perfobond rib 전단연결재를 설치한 합성보의 극한하중이 14%

(분절배치), 16%(연속배치) 증가하는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 합성보에 있어서 전단연결재의 단면이 합성보 단면에 비하여 미소하기 때문에 전단연결재에 의한 강재보의 단면변화는 고려하지 않고 단면계수를 계산하게 되지만, perfobond rib와 같이 전단연결재의 단면이 기존 스티드 전단연결재의 단면보다 크고 보의 길이방향으로 배치된 경우 전단연결재의 단면이 합성보 단면계수를 증가시키게 됨에 따라 perfobond rib을 설치한 합성보의 초기강성 및 극한강도가 크게 나타난 것으로 판단된다. 표 5는 실험결과 나타난 시험체의 초기강성, 항복하중 및 극한하중을 정리하여 나타내었다.



(a) 선형구간의 하중-변위관계



(b) 하중재하 구간의 하중-변위관계

그림 12. 합성보의 하중-변위 관계 곡선

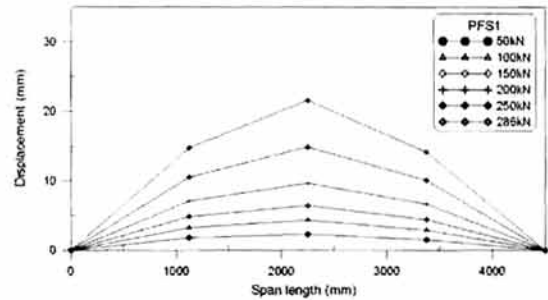
표 5. 합성보의 하중재하 실험결과

	PFS1	PFS2	STS1
	Perfobond 분절배치	Perfobond 연속배치	D16 스티드
초기강성(kN/mm)*	23.97	23.53	21.50
항복하중(kN)**	215.29	213.20	199.50
극한하중(kN)	326.40	331.50	286.00

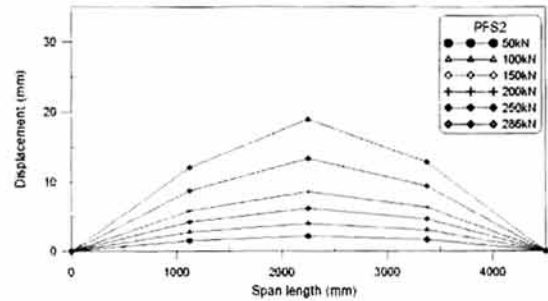
\*초기강성 : 시험체 항복이전 선형 탄성구간의 강성

\*\*항복하중 : 하부플랜지의 응력이 공칭항복강도에 도달한 하중

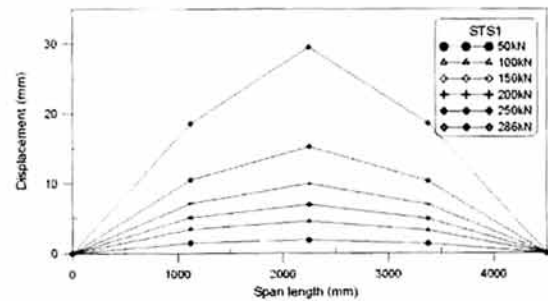
그림 13은 지간의 처짐 분포를 하중단계에 따라 나타낸 것으로 선형구간에서는 전단연결재에 관계없이 처짐의 분포는 유사하게 나타나나 스티드 전단연결재를 설치한 합성보의 경우 항복하중에 이후 동일하중 수준에서 처짐의 변화량이 크게 나타나고 있다.



(a) PFS1



(b) PFS2



(c) STS1

그림 13. 하중단계별 처짐 분포

그림 14는 하중재하에 따른 합성보 지점부에서의 상대변위를 시험체별로 나타낸 것이다. 하중-변위관계보다 상대변위관계에서 각각의 합성보 시험체에 적용한 전단연결재의 전단저항 특징이 나타나고 있음을 알 수 있다. 스티드 전단연결재의 경우 전단력에 저항하는 스티드 단면적이 작으므로 전단력에 대하여 상대슬립이 하중초기(약 25kN)부터 발생하고 하중 증가에 따라 급격히 상대슬립이 증가함을 알 수 있다. Perfobond rib 전단연결재를 분절 배치한 PFS1 시험체의 경우, perfobond rib 전단연결재의 초기강성이 매우 크므로 재하하중이 약 80kN까지는 상대변위가 발생하지 않았으나, 이후 상대변위가 미소하게 발생한 후 180kN의 하중이 재하된 후 상대



변위가 급격히 증가하기 시작하였다. PFS2 시험체의 경우 전단연결재가 길이방향으로 연속적으로 배치됨에 따라 재하하중이 165kN까지 상대변위가 발생하지 않았으며, 이후 상대슬립이 발생하고 있음을 확인할 수 있다.

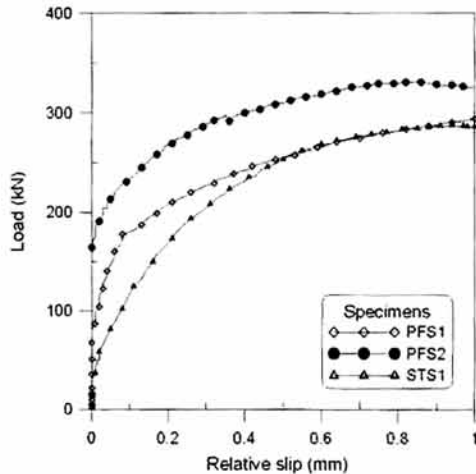


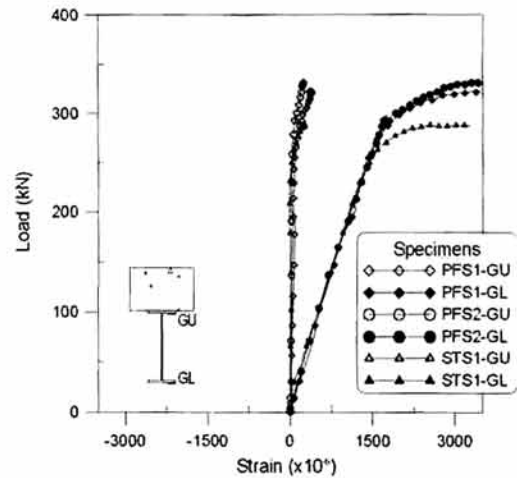
그림 14. 합성보 지점부의 하중-상대변위 관계 곡선

### 4.3 하중-변형을 관계

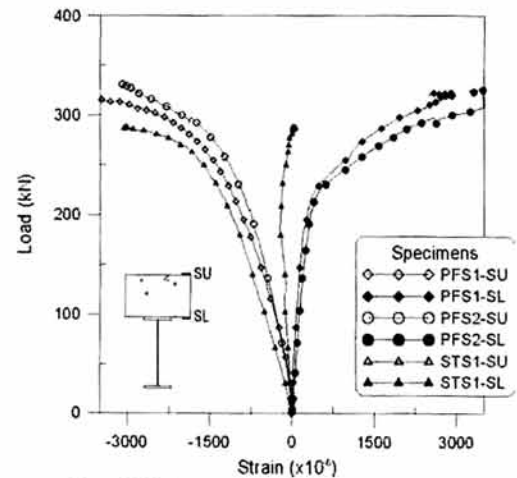
하중재하 실험결과 나타난 합성보 단면의 응력분포를 확인하기 위하여 하중에 따른 합성보 중앙 단면의 강재보와 콘크리트 슬래브의 변형을 분포를 그림 15에 나타내었다.

하부 플랜지의 하중-인장변형을 관계와 상부 콘크리트의 하중-압축변형을 관계 또한 하중-처짐관계와 유사하게 전단연결재 rib을 연속 배치한 합성보와 분절 배치한 합성보가 스티드 전단연결재를 배치한 합성보의 변형률보다 동일수준의 하중에서 적은 변형률 분포를 가지는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트 슬래브에 작용하는 변형을 관계에서 합성보의 단면산정에 있어 전단연결재의 단면을 고려하지 않고 이를 고려하여 합성 단면의 중립축이 강재보 상부플랜지에 위치하게 되나, perfobond rib을 전단연결재로 설치한 합성보의 경우 전단연결재의 합성보에 대한 단면기여로 콘크리트 슬래브 하부에서 인장응력이 작용하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 16은 합성보 시험체 단면의 하중단계별 변형을 분포를 나타낸 것으로 하중-변형률관계에서와 같이 스티드 전단연결재를 설치한 합성보의 단면변형률은 하부플랜지의 항복이전까지 선형적으로 단면 변형률이 변화하고 있으며 중립축 또한 단면계산과 동일한 위치인 강재보에 위치하고 있다. 반면 perfobond rib을 설치한 합성보의 경우 전단연결재의 단면효과에 의한 하중수준 증가에 따른 슬래브 하면의 인장응력으로 콘크리트 슬래브의 변형을 변화가 크게 나타나고 있다.

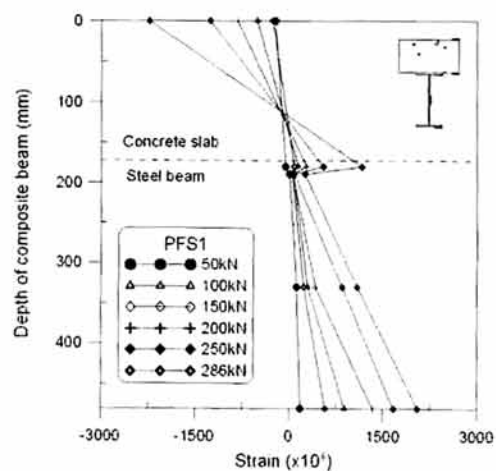


(a) 지간중앙 강재보의 변형을 분포



(b) 지간중앙 콘크리트 슬래브의 변형을 분포

그림 15. 합성보의 변형을 분포

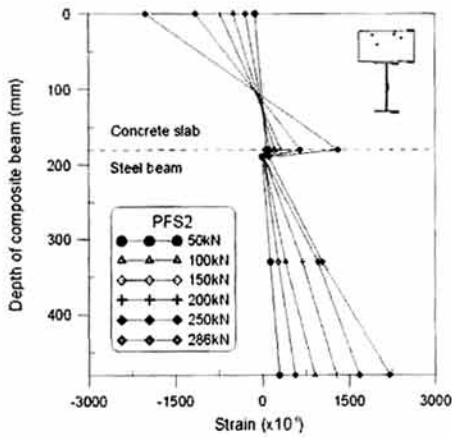


(a) PFS1 단면 변형을 분포

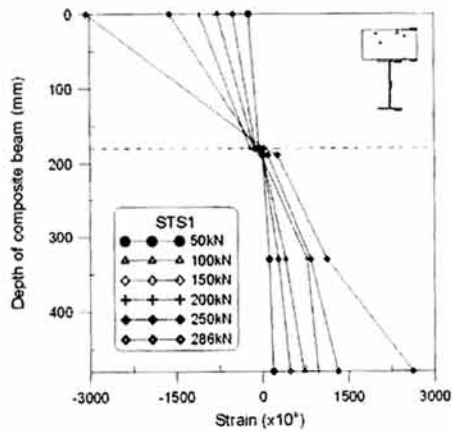
표 6. 합성보의 실험결과와 이론해의 비교

	설계 단면				실험 결과			
	합성률	결합률	중립축 (mm)	극한하중 이론해 (kN)*	소성모멘트 이론해 (kN·m)	실험결과 극한하중(kN)	극한하중 이론해(kN)** (실험/이론해)	극한하중 이론해(kN)*** (실험/이론해)
PFS1	2.51	1.32	293.35 (합성보 하면기준)	190.70	431.74	326.40	216.20 (1.51)	219.56 (1.49)
PFS2	5.03	1.36				331.50	216.20 (1.53)	220.18 (1.50)
STS1	1.30	1.29				286.00	216.20 (1.32)	216.20 (1.32)

\* 극한하중 : 설계 재료특성으로 산정  
 \*\* 극한하중 이론해 : 시험체의 재료특성을 고려한 극한하중  
 \*\*\* 극한하중 이론해 : 시험체의 재료특성과 전단연결재의 단면특성을 고려한 극한하중



(b) PFS2 단면 변형률 분포



(c) STS1 단면 변형률 분포

그림 16. 합성보 단면의 하중단계별 변형률 분포

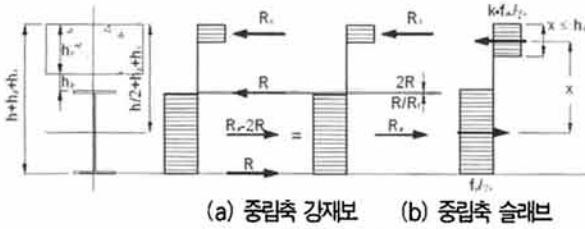
#### 4.4 합성보의 극한강도

스터드 전단연결재를 배치한 합성보 STS1의 합성률과 결합률은 식(4)와 식(5)에 따라 합성률 1.30, 결합률 1.29로 결정되었으며 perfbond rib 전단연결재를 배치한 합성보 PFS1(perfbond rib을 분절 배치)과 PFS2(perfbond rib

을 연속배치)의 합성률과 결합률은 PFS1의 경우 합성률 2.51, 결합률 1.32, PFS2의 경우 합성률 5.03, 결합률 1.36으로 결정되어 완전합성으로 평가할 수 있다. 따라서 전단연결재가 콘크리트와 강재간의 하중전달에 필요한 전단력에 충분히 저항할 수 있을 경우 합성보의 휨강도를 완전소성해석(rigid plastic analysis)을 통하여 평가할 수 있다 (Eurocode-4,2002).

본 연구에서 설계된 합성보의 경우 소성중립축이 강재보의 상부플랜지에 위치하게 되므로 그림 17(a)에 의하여 합성보의 휨강도를 평가 하려면 하나 perfbond rib 전단연결재를 설치한 합성보의 경우 소성중립축이 강재보의 상부플랜지가 아닌 콘크리트 슬래브에 위치하므로 그림 17(b)와 같이 합성보의 휨강도를 평가하였으며, 극한하중은 Eurocode-4에서 제시하고 있는 합성보의 극한강도 이론해를 이용하였다.

표 6은 본 연구에서 수행된 합성보 시험체의 하중재하 결과를 완전소성이론에 따른 이론값과 비교하여 평가한 것이다. 완전소성이론에 따른 합성보의 이론해를 실험결과와 비교한 결과, 실험값이 시험체 설계재료 특성을 고려한 극한하중, 실제 재료특성으로 고려한 극한하중, 전단연결재의 단면을 고려한 극한하중 보다 크게 평가되었으며, 합성보 실험의 항복하중과 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 전단연결재의 단면을 고려한 합성보의 극한하중은 perfbond rib 전단연결재의 단면을 합성보 단면으로 적용하여 합성보의 극한하중을 결정하였다. Perfbond rib 전단연결재를 적용한 합성보와 같이 전단연결재의 단면이 스테드 전단연결재와 같은 연속전단연결재의 단면보다 큰 경우 단면설계 시 이에 대한 영향을 고려하여야 할 것이며, 지간거리가 길고 단면이 커진다면 극한하중에 대한 이론해의 비가 감소할 것이다.



(a) 중립축 강재보 (b) 중립축 슬래브  
그림 17. 합성보 휨강도

### 5. 결론

본 연구는 스티드 전단연결재와 비교하여 전단강성이 큰 perfobond rib 전단연결재를 사용한 합성보의 정적거동 특성을 파악하기 위하여 perfobond rib 전단연결재의 push-out 실험과 perfobond rib 전단연결재를 설치한 합성보의 하중재하 실험을 실시하였다. 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) Perfobond rib의 전단저항 성능 평가를 위한 push-out 실험결과, perfobond rib의 전단저항성능은 콘크리트 강도 증가로 콘크리트 선단지지력 및 콘크리트 다웰의 전단저항 성능 증가로 콘크리트 강도에 비례하는 것으로 나타났다. 연성효과를 나타내는 상대슬립은 일정 콘크리트 강도(본 연구 40MPa)까지는 증가하나 연성에 영향을 주는 횡방향 철근의 전단하중에 저항하는 휨 변형 성능에 대한 제한으로 임계 콘크리트 강도(40MPa)의 상대슬립을 초과하지 않는 것으로 평가되었다. Perfobond rib을 콘크리트 강도가 크고 횡방향 철근의 휨변형의 구속이 적은 합성구조물의 전단연결재로 적용할 경우 전단성능과 연성을 동시에 만족할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) Oguejiofor와 Hosain이 제안한 perfobond rib의 전단강도 제안식을 push-out 실험결과와 비교하여 평가한 결과, 제안식이 rib의 높이와 두께에 의한 지압저항의 영향을 고려하고 횡방향 철근배근 모두를 전단강도에 영향을 미치는 인자로 보고 전단강도값을 평가한다. 그러므로 실험결과와 유사한 결과를 가지며 제안식을 이용하여 perfobond rib의 전단강도 예측 및 설계가 가능할 것으로 판단된다.
- (3) Perfobond rib 전단연결재를 설치한 합성보 하중재하 실험결과, 휨 하중과 휨 전단하중이 동시에 작용으로 rib 홀에 배치된 횡방향 철근과 콘크리트 다웰부의 전단저항에 따라 합성보 콘크리트 슬래브의 rib 홀의 위치에서 횡방향 균열 발생의 파괴모드를 확인하였다.

(4) 합성보에 설치된 전단연결재의 종류와 설치방법에 따라 경계면에서의 상대변위 관계에서 전단연결재의 전단특성을 확인할 수 있다. 합성보에 있어서 전단연결재의 단면이 합성보 단면에 비하여 미소하기 때문에 전단연결재에 의한 강재보의 단면변화는 고려하지 않으나, 본 연구에서와 같이 강재단면의 높이가 낮고 상대적으로 perfobond rib 전단연결재 단면이 큰 합성보의 경우 전단연결재에 의하여 합성보의 거동이 변화하게 되므로 합성보 단면계수의 변화에 대한 고려가 필요하다.

### 감사의 글

본 연구는 산학협동재단과 유호산업개발(주)의 학술연구비 지원 및 교육과학기술부 BK21사업의 일환인 연세대학교 사회환경시스템공학부 미래기반시설 산학연공동사업단의 지원으로 수행된 것으로, 본 연구를 가능케 한 산학협동재단과 유호산업개발(주) 및 교육과학기술부에 감사드립니다..

### 참고 문헌

건설교통부 (2005) 도로교설계기준.  
 구현본, 김영호, 강제운 (2008) 퍼포본드로 보강된 강관말뚝머리의 압발저항성능 평가, 한국콘크리트학회 2008년도 가을 학술발표대회 논문집, 한국콘크리트학회, pp.77~80.  
 김형렬, 구현본 (2006) 강-콘크리트 합성바닥판용 전단연결재의 합성 거동 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 26권 1A호, pp.91~97.  
 대한토목학회, 교량설계핵심기술연구단 (2008) 도로교설계기준 해설.  
 신현섭 (2005) 합성보 전단연결부의 구조거동에 대한 비교 분석, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제17권 6호, pp.737~747.  
 신현섭 (2007) 전단스티드의 변형특성에 관한 유한요소해석-고강도 콘크리트를 사용한 합성보, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제19권 5호, pp.473~482.  
 심창수, 이필구, 하태열 (2004) 부분합성보를 이용한 대직경 스티드의 구조거동 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제16권 4호, pp.425~432.  
 심창수, 김현호, 한정훈, 이필구 (2006) 강재매입형 합성거더 전단연결부의 극한강도 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제18권 4호, pp.405~415.  
 안진희, 김상효, 구현본, 강근희 (2007) Perfobond rib 전단연결재의 전단강도 및 잔류강도 평가, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제 27권 2A호, pp.237~245.

- 이필구, 심창수, 윤태양 (2003) 대직경 스티드 전단연결재의 정적거동, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제15권 6호, pp.611~620.
- 정철현, 이홍수, 유성근, 최외호 (2005) 원형강관 거더와 콘크리트 바닥판 사이 ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재의 실험적 연구, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제25권 1A호, pp.201~212.
- 정철현, 이홍수 (2005) ㄱ형 perfobond 리브 전단연결재의 전단강도 평가, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제25권 5A호, pp.879~888.
- Eurocode 4 (2002) Design of Composite Steel and Concrete Structures Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels.
- Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1992) Behaviour of Perfobond Rib Shear Connectors in Composite Beams: Full Size Test, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 19, No. 2, pp.224-235.
- Oguejiofor, E.C. and Hosain, M.U. (1994) A paramatic study of Perfobond rib shear connectors, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 21, pp.614-625.
- Sara, B.M. and Bahram, M.S. (2002) Perforbond Shear Connector for Composite Construction, Engineering Journal, First Quarter, pp.2-12.  
(접수일자 : 2009. 2. 14 / 심사일 2009. 2. 18 / 게재확정일 2009. 7. 22)