

# 초간편 강합성 바닥판 신형식 전단연결재의 전단내력 평가

## An Evaluation on the Shear Strength of New Type Shear Connectors for a Simple Steel-Concrete Composite Deck

윤 기 용<sup>1)</sup> · 김 상 섭<sup>2)†</sup> · 한 득 천<sup>3)</sup>  
Yoon, Ki Yong Kim, Sang Seup Han, Deuk Cheon

요 약 : 초간편 강합성 바닥판은 H형강을 거더로 활용하면서 교량가설시 H형강의 횡-비틀림 좌굴을 방지하고 공기를 단축시키기 위하여 개발하였다. 또한 초간편 강합성 바닥판과 H형강 거더의 합성거동을 확보하기 위하여 사용되는 전단연결재를 초간편 강합성 바닥판의 강판과 H형강 거더의 연결방식에 따라 연결볼트를 길게 뽑아 스티드를 대체하여 전단연결재로 사용하는 방식과 유공I형강을 전단연결재로 활용하는 방식으로 개발하였다. 본 연구에서는 이렇게 개발한 신형식 전단연결재에 대한 전단내력 평가를 위하여 Push-Out 실험을 실시하고, 기존 전단연결재의 전단내력 평가식과 비교 분석하였다. Push-Out 실험을 통하여 연결볼트는 스티드와 같은 거동을 하는 것으로 확인하였으며, 도로교 설계 기준의 전단내력 평가식은 지름이 큰 연결볼트의 전단내력을 과대평가하는 것으로 나타났다. 용접량의 변화에 따른 유공I형강의 Push-Out 실험에서는 용접량이 적은 경우에는 용접부의 전단내력이 지배하였으나, 용접량이 일정정도 이상인 경우에는 일정한 전단내력을 발휘하는 것으로 나타났다.

ABSTRACT : A simple steel-concrete composite deck is developed for preventing the lateral torsional buckling of girders that are under construction and for reducing the term of works using H-shaped rolled beams as bridge girders. A new type of shear connectors is also developed for the composite behavior between a simple steel-concrete composite deck and the rolled beams by the connecting conditions between the deck and the girders. One is a connector bolt that is lengthened and split or tightened with two nuts and the other is an I-shaped rolled beam welded on a steel plate with a number of holes punched through the web. In this study, to estimate the shear strength of those shear connectors the push-out tests are performed and the test results are compared with that of the previous studies and the codes. The result of the push-out tests of the connector bolts showed that the shear performance is similar to that of the stud connector and revealed that the equation for the shear strength in the Korean Specification of Highway Bridge overestimates the shear capacity of the connector bolt whose diameter is larger than 19mm. From the push-out tests of punched I-shaped rolled beams with varying welding amounts, with the small amount of welding, shear capacity is governed by the shear capacity of welding. On the other hand, shear capacity is governed by the size of the punched I-shaped rolled beams, regardless of the amount of welding.

핵심 용어 : 전단연결재, Push-out test, 강합성 바닥판, 유공 I형강, 콘크리트 바닥판, 연결볼트

KEYWORD : Shear connector, Push-out test, Composite deck, Punched I-rolled beam, Concrete deck, Connector bolts

### 1. 서 론

최근 자동차 기술의 발달 및 도로의 확장과 노선의 다양화로 인하여 도로의 파손이 증가하고 있으며, 그 중 교량의 바닥판은 차량의 반복하중을 직접적으로 받고, 날씨의 영향에 노출되어 있어, 교량의 주요 구조 부재중에서 가장 많은 손상을

을 받기 때문에 바닥판의 보수를 최소화하고 수명을 연장하기 위해 바닥판의 높은 하중저항강도와 피로내구성 증진이 필수적이다.

본 연구에서는 앞서 언급된 바닥판의 단점을 보완하고, 다양한 규모의 교량에 적용 가능하고 구조적 합리성과 시공성을 가지는 초간편 강합성 바닥판을 개발하였으며 크게 유공 I

1) 정회원, 선문대학교 토목공학과 부교수, 공학박사(kyoon@sunmoon.ac.kr)

2) 교신저자, 정회원, 한국기술교육대학교 건축공학과 교수, 공학박사  
(Tel. 041-560-1330, Fax. 041-560-1224, E-mail : kimss@kut.ac.kr)

3) 학생회원, 선문대학교 토목공학과 석사과정(deukchon@hanmail.net)

본 논문에 대한 토의를 2009년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

형강, 강판, 배력철근, 연결볼트 및 콘크리트 바닥판으로 구성되어 있다.

그림 1은 초간편 강합성 바닥판에 대한 형상을 나타낸 것이며, 그림과 같이 H형강 거더와 초간편 강합성 바닥판과의 합성작용을 하는 전단연결재 역할은 유공 I형강과 연결볼트를 사용하였다. 강바닥판을 H형강 거더와 연결볼트로 연결한 경우는 유공 I형강이 바닥판의 주철근을 대체하여 휨에 대해서만 저항할 수 있다. 또한 용접으로 강바닥판을 H형강 거더와 연결한 경우, 유공 I형강은 강판에 단속 용접되어 주철근을 대체하여 휨에 저항하고, 동시에 콘크리트 바닥판과의 합성거동을 확보할 수 있어야 한다.

이러한 구조시스템의 개발을 통하여, 공장에서 유공 I형강과 강판이 단속용접으로 직접 제작되고, H형강 거더와 강상판은 용접 또는 연결볼트를 이용하여 체결되어 거더패널로 형성되기 때문에, 기존의 철근 콘크리트 바닥판보다 비교적 시공의 간편성을 확보할 수 있으며, 교량가설 시에는 H형강 거더의 황-비틀림 좌굴을 방지할 수 있으므로 공기단축을 통한 장점을 기대할 수 있다.

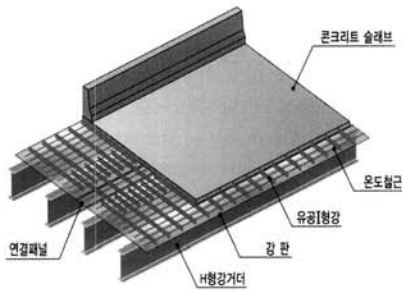


그림 1. 초간편 강합성 바닥판의 형상

따라서 초간편 강합성 바닥판의 전단연결재로 개발된 연결볼트의 전단강도와 유공 I형강의 전단강도, 연결볼트와 유공 I형강이 함께 사용되는 경우에 대해 전단성능 및 파괴형태를 평가하기 위한 실험체를 제작하였고, 전단연결재의 전단내력을 평가하기 위한 일반적인 방법인 Push-out Test를 통하여, 기존에 연구된 전단연결재의 전단내력식과 비교 분석하였다.

## 2. 기존 전단연결재의 전단내력 이론식

### 2.1 스테드

전단연결재의 전단내력에 관한 연구는 1920년대부터 시작

하였으며, 스테드에 관한 연구는 1950년대 I. M. Viest에 의해 처음 시작되었다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 식(1)은 J.W.Fisher 등(1971)가 지수변환을 이용한 회귀분석에 의해 제안된 것이다. 우리나라의 경우 도로교설계기준(2005)에서 현재 적용되고 있는 스테드의 전단내력 평가식(2)는 식(1)의 스테드의 단면적을 스테드의 직경의 제곱으로 표현하고 계수조정을 조정하여 다음과 같이 표현하고 있다.

$$V_{sn} = 0.5A_{sc}\sqrt{f_{ck}E_c} \quad (1)$$

$$V_{sn} = 0.4d^2\sqrt{f_{ck}E_c} \leq A_{sc}f_u \quad (2)$$

여기서,  $V_{sn}$  : (=  $P_{Rd}$ ) 스테드의 종국전단내력(kN)  
 $A_{sc}$  : 스테드의 축단면적( $mm^2$ )  
 $f_{ck}$  : 콘크리트의 설계기준강도(MPa)  
 $E_c$  : (=  $E_{cm}$ ) 콘크리트의 탄성계수(MPa)  
 $d$  : 스테드의 직경(mm)  
 $f_u$  : 스테드의 인장강도(500MPa 이하)

미국을 비롯하여 대부분의 국가에서는 식(1)을 스테드의 전단내력식으로는 채택하고 있으며, 유럽의 경우 ECCS(1983)에서는 식(3)을 사용하여 스테드에 대한 전단내력을 평가하고 있으며, Eurocode 4(1994)에서는 식(4)와 같이 스테드에 대한 설계전단내력식을 사용하고 있지만 스테드의 직경이 22mm 보다 클 경우 사용될 수 없고 규정하고 있다.

$$V_{sn} = 0.46A_s\sqrt{f_{ck}E_c} \quad (3)$$

$$P_{Rd} = \text{Min}[0.8f_u(\pi d^2/4)/\gamma_v, 0.29\alpha d^2\sqrt{f_{ck}E_{cm}}/\gamma_v] \quad (4)$$

여기서,  $V_{sn}$  : (=  $P_{Rd}$ ) 스테드의 종국전단내력(kN)

$\gamma_v$  : 부분안전계수(=1.25)

$\alpha$ :  $3 \leq h_{sc}/d \leq 4$  일때,  $\alpha = 0.2(h_{sc}/d + 1)$

$h_{sc}/d > 4$  일때,  $\alpha = 1$

$h_{sc}$  : 스테드의 길이(mm)

또한, 국내의 연구자들도 13mm 스테드를 사용하여 스테드의 전단내력에 관한 연구를 진행하였으며, 제안식으로 식(5)을 제안하였다(박상철 외, 1983).

J.W.Fisher의 식(1)과 식(2)는 주로 19mm의 스테드를 사용하여 스테드의 전단내력을 평가한 것이기 때문에, 스테드

직경에 따라 스티드의 전단내력이 실험결과와 잘 일치하고 있지 않다.

그 이유는 식(1)의 경우 스티드의 전단내력을 스티드의 축단면적에 직선적으로 비례하기 때문에, 스티드의 직경이 19mm보다 작으면 스티드의 전단내력이 과소평가되고, 19mm보다 크며 과대평가되는 것으로 나타나 있다. 따라서, 스티드의 내력을 스티드 축단면적에 대한 지수함수로 표현하므로써 스티드의 직경이 클수록 축단면적당 스티드의 전단내력이 작게 되도록 식(6)과 같이 제안하고 있다(김규석 외, 1988).

$$V_{sn} = 0.58A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \quad (5)$$

$$V_{sn} = 1.38A_{sc}^{0.89} f_{ck}^{0.3} E_c^{0.52} \quad (6)$$

## 2.2 이형철근

이형철근에 대한 전단내력은 국내의 일부 연구자들에 의해 Push-out Test를 통하여 제안되었다(홍순조, 1982; 한상운 외, 1987). 국내에서 발표된 연구결과는 철근의 배치방향과 직경에 따라 전단내력이 상이하고, 철근의 직경이 증가할수록 내력이 저하되는 것으로 나타났다.

식(7)과 식(8)은 국내 연구자들에 의해 발표된 것으로 실험결과를 회귀분석한 결과이다(선병택 외, 1981). 식(9)는 실험결과 중 D16에 대한 보 방향 배치와 보 직각 방향 배치에 대한 전체 평균치이다. 보 방향과 보 직각 방향의 평균치로 산정한 것은 본 실험의 경우, 이형철근의 배치가 사선으로 배치되어 두 방향에 대해 평균치로 산정하는 것이 적절할 것으로 판단되었기 때문이다.

$$V_{sn} = 3.472A_s + 4.785 \text{ (보방향배치)} \quad (7)$$

$$V_{sn} = 3.472A_s + 8.535 \text{ (보 직각 방향 배치)} \quad (8)$$

$$V_{sn} = 1.86A_s \cdot \sigma_y \text{ (보방향배치)} \quad (9)$$

여기서,  $A_s$  : 철근의 단면적 ( $mm^2$ )

$\sigma_y$  : 실험에 의한 철근의 항복강도(MPa)

## 2.3 C형강

대한건축학회의 강구조 설계기준 및 해설에서 C형강의 전단내력으로 식(10)을 제시하고 있다. 대한건축학회의 식(10)은 그림 2와 그림 3과 같이 명시된 보 플랜지에 C형강의 플랜지가 접합되는 형상을 가질 때, C형강 웨브와 플랜지의 두

께, C형강의 길이 및 콘크리트의 압축강도에 의해 결정된다.

$$V_{sn} = 36(t_f + 0.5t_w) \sqrt{f_{ck}} \quad (10)$$

여기서,  $t_f$  : C형강의 플랜지 두께(mm)

$t_w$  : C형강의 웨브 두께(mm)

$l$  : C형강의 길이(mm)

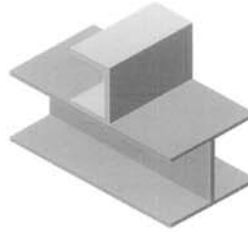


그림 2. C형강 전단연결재의 접합방법

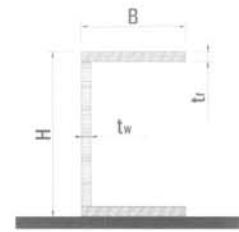


그림 3. C형강의 치수 및 기초 접합방법

## 3. Push-out 실험체의 설계 및 제작

### 3.1 Push-out 실험체의 형상 및 제원

본 연구에서 적용된 Push-out 실험체는 초간편 강합성 바닥판의 전단연결재를 구성하는 연결볼트와 유공 I형강의 결합형태에 따라 총 11개의 실험체를 제작하였다.



그림 4. 실험체 제작과정

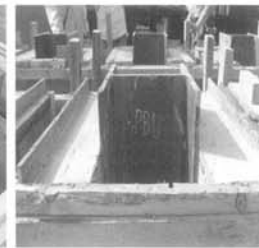


그림 5. 완성된 실험체

그림 4와 그림 5는 Push-out 실험체의 제작과정 및 완성된 실험체이다. Push-out 실험체는 그림 6과 같이 British Standard CP 117(1965)를 근간으로 설계되었다.

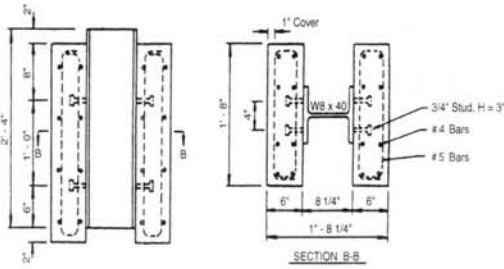


그림 6. Push-out 실험체 (BS CP 117)

그러나 표 1에서 보는 바와 같이 초간편 강합성 바닥판의 기본형상에서 연결볼트나 유공 I형강의 배치간격이 400mm이므로 실험체의 크기를 약간 크게 할 필요성이 제기되었다. 따라서, 실험체는 그림 7과 같이 총 높이가 900mm, 폭이 600mm, 콘크리트의 두께가 150mm인 실험체로 계획하였다.

표 1. 초간편 강합성 바닥판의 구성요소에 대한 제한

구성요소	강종	종류	배치간격
유공 I형강	SS400	I-100×100×6×8	400mm
연결볼트	F10T	M24	400mm
강판	SM490	6mm	

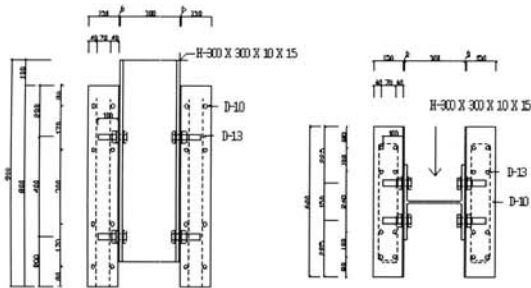


그림 7. Push-out 실험체의 기본형상

또한, 강판이 콘크리트 전면적에 설치된다면 강판 또한 작용 하중을 부담하게 되기 때문에, 순수하게 연결볼트와 유공 I형강만의 전단강도를 측정할 수 없으므로 유공 I형강과 단속 용접되는 강판을 콘크리트의 전면적에 설치하지 않고, 하중이 작용하는 H형강과 끝을 일치시키도록 하였다. 본 실험에서 사용된 소재의 시험결과는 표 2와 같으며, 콘크리트의 압축강도는 30.5MPa이다.

표 2. 소재의 시험결과

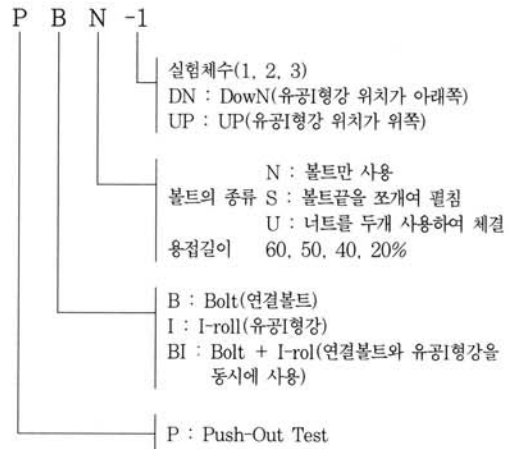
구분	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	압축강도 (MPa)	연신율 (%)
플랜지 (16mm)	358.7	521.9	202.8	-	26.2
웹 (10mm)	340.3	464.3	197.0	-	25.5
강판 (6mm)	339.3	470.1	198.9	-	23.7
고려볼트 (24mm)	1055.9	1103.0	-	-	19.4
콘크리트	-	-	25.9	30.5	-

### 3.2 Push-out 실험체의 변수

본 Push-out 실험의 실험변수는 표 3과 같이 연결볼트의 종류, 강판에 용접되는 유공 I형강의 길이에 대한 단속 용접 길이의 비율, 연결볼트와 유공 I형강을 함께 사용할 경우 연결볼트 사이에서의 유공 I형강의 위치에 대해 연구하였다.

표 3. Push-Out 실험변수

전단연결재 종류	실험변수	실험세명	실험체수
연결볼트 (PB 시리즈)	1. 긴 연결볼트만 사용	PBN	3
	2. 끝을 갈라 펼침	PBS	1
	3. 두개의 너트를 사용	PBU	1
유공 I형강 (PI 시리즈)	4. 단속 용접길이 60%	PI60	1
	5. 단속 용접길이 50%	PI50	1
	6. 단속 용접길이 40%	PI40	1
	7. 단속 용접길이 20%	PI20	1
연결볼트 + 유공 I형강 (PBI50 시리즈)	8. 유공 I형강을 아래쪽	PBI50-DN	1
	9. 유공 I형강을 위쪽	PBI50-UP	1



### 3.2.1 PB 시리즈 실험체

전단연결재로 사용되는 연결볼트의 종류는 그림 8(PBN)과 같이 나사선을 길게 뽑은 고력볼트를 그대로 사용한 경우와 나사선의 끝을 갈라 펼쳐 스테드 전단연결재의 머리를 모사한 경우(PBS), 두 개의 너트를 이용하여 연결볼트를 체결한 경우(PBU)에 대해 제작하였다.

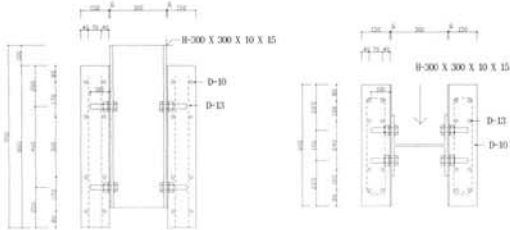


그림 8 . PB 시리즈 실험체

### 3.2.2 PI 시리즈 실험체

전단연결재의 종류는 유공 I형강으로 제작된 경우 그림 9(PI-용접길이)와 같이 강판에 용접되는 유공 I형강의 길이에 대한 단속 용접길이의 비율을 60%, 50%, 40%, 20%로 한 경우로 용접량에 따라 실험체를 제작하였다.

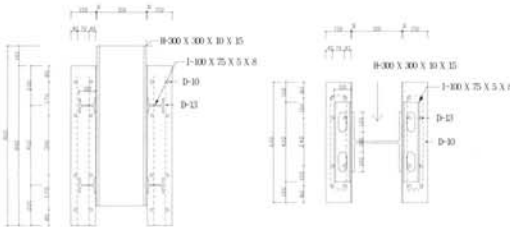


그림 9. PI 시리즈 실험체

### 3.2.3 PBI50 시리즈 실험체

그림 10(PBI50-UP)과 같은 연결볼트와 유공 I형강을 함께 사용하는 경우는 강판과 유공 I형강간의 단속 용접길이를 50%로 고정하고, 연결볼트 사이에 유공 I형강의 위치가 위, 아래인 경우에 대해 제작하였다.

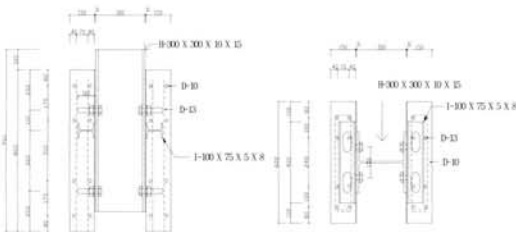


그림 10. PBI50 시리즈 실험체

## 4. 실험방법 및 결과분석

### 4.1 실험 방법

본 연구에서는 초간편 강합성 바닥판 전단연결재의 전단내력을 평가하기 위해 Push-out Test를 실시하였으며, 그림 11과 같이 2개의 콘크리트 바닥판을 강판위에 지지한 후 유압식 만능시험기(U.T.M)을 사용하여 단순 가력하였으며, 가력속도는 분당 2mm이고, 변위제어 하였으며, 변위측정은 그림 12와 같이 줄계이저를 이용하여 중앙부의 철골과 양측의 콘크리트의 상대변위를 측정하였다.

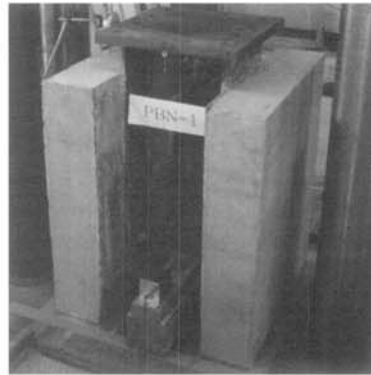


그림 11. Push-out Test

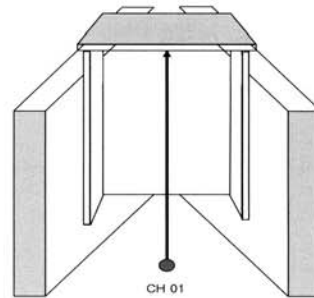


그림 12. 상대변위 측정장치

### 4.2 하중-변위 곡선 및 파괴양상

표 4는 각종 전단연결재에 대한 Push-out 실험결과를 각 실험체의 최대하중 및 파괴양상을 나타낸 것이며, 표 5는 각종 전단연결재에 대한 전단내력 산정을 2장에 서술되어 있는 여러 가지 제안식과 비교하여 나타낸 것이다.

표 4. 실험체의 최대하중 및 파괴양상

실험체	최대하중 (kN)	최대하중시 변위(mm)	파괴양상
PBN-1	1500	9.27	전단연결재 주변의 콘크리트 압괴
PBN-2	1463	10.36	
PBN-3	1439	9.38	
PBS	1586	9.68	
PBU	1606	10.30	
PI20	1609	4.40	전단연결재 용접부 파괴
PI40	2793	6.74	하부 콘크리트 바닥판의 압괴
PI50	2643	9.81	
PI60	3468	9.18	
PBI50-DN	2209	13.98	전단연결재의 전단 파괴
PBI50-UP	2260	12.63	

4.2.1 PB시리즈 실험체

고력볼트를 연결볼트로 이용한 PBN, PBS, PBU의 실험체는 연결볼트의 형상과 너트를 변수로 하여 실험하였으며, PBN-1실험체는 그림 13과 같이 최대하중 1500kN에 도달한 후, 하중이 저하되면서, PBN-1,2,3 실험체는 그림 15와 같이 전단연결재 파괴 이전에 전단연결재가 콘크리트 바닥판으로부터 뿔쳐 나오는 현상이 나타나면서 파괴되었다. PBS 실험체는 그림 13과 같이 최대하중 1586kN에 도달한 후, PBN실험체와 같이 하중이 저하되면서 파괴되었다. 그림 16은 PB시리즈 실험체의 파괴 메카니즘을 나타낸 것인데 이는 나사선의 끝을 갈라 펼쳤기 때문에, 그림 16과 같이 PBN실험체의 경우보다 전단연결재에 수평전단력에 의해 작용되는 인장력에 대해 저항할 수 있었기 때문에 내력이 증가한 것으로 판단된다.

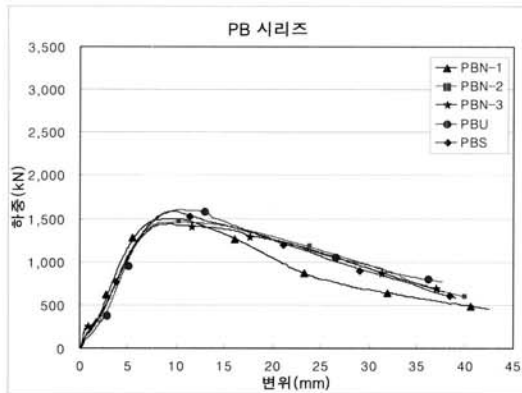


그림 13. PB 시리즈 실험체

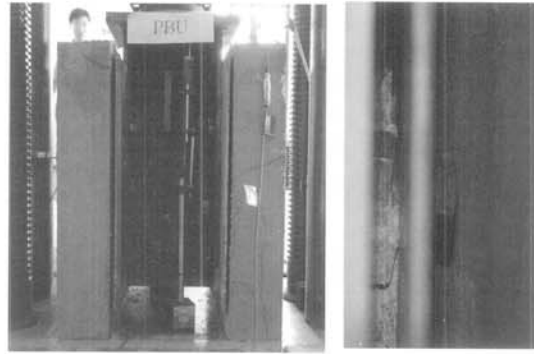


그림 14. Push-out 실험종료 후 전경

그림 15. 전단연결재 주변 콘크리트 압괴

PBU실험체는 그림 13과 같이 최대하중 1606kN에 도달한 후, 상기의 두 실험체와 마찬가지로 하중이 저하되면서, 그림 15와 같이 전단연결재 파괴 이전에 전단연결재가 콘크리트 바닥판에서 전단연결재가 뿔치는 현상이 발생하면서 파괴되었다. 그리고 PBU실험체는 연결볼트의 나사선 끝부분에 너트를 체결하였기 때문에, 나사선 끝부분을 갈랐던 PBS실험체보다 수평전단력에 의해 작용하는 인장력에 대해 저항하는 능력이 크기 때문에 내력이 증가된 것으로 판단된다.

그림 13에서와 같이 PB시리즈 실험체의 하중-변위 곡선 및 파괴양상은 기존의 전단연결재로 많이 사용하고 있는 스티드와 거의 유사한 하중-변위 곡선 및 파괴양상으로 나타내고 있으며, 고력볼트를 사용한 연결 볼트만으로도 충분한 전단내력을 가지고 있는 것으로 판단된다.

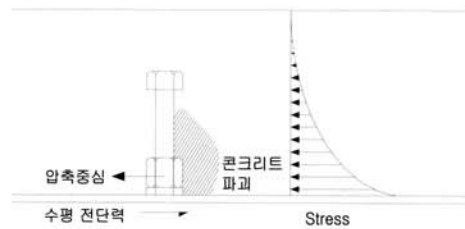


그림 16. PB시리즈 실험체의 파괴메카니즘

4.2.2 PI시리즈 실험체

PI시리즈 실험체는 전단연결재를 유공 I형강을 이용하여, 강판에 용접되는 유공 I형강의 길이에 대한 단속 용접길이의 비율을 변수로 한 실험체이다.

단속 용접길이의 비율이 20%인 PI20 실험체는 최대하중 1609kN에 도달한 후, 그림 17과 같이 급속히 하중이 저하되면서 파괴되었다. 그림 18과 그림 19는 PI20 실험체의 파

괴형태를 나타낸 것이며, 그림과 같이 용접량의 부족으로 용접부위에서 전단파괴가 발생하면서 파괴되었다. PI40실험체는 그림 17과 같이 최대하중이 2793kN으로 나타났으며, PI50실험체의 경우는 최대하중이 2643kN으로 PI40실험체의 경우보다 최대하중이 작게 나타났다. 이는 제작과정 또는 실험체 설치과정의 편차로 판단된다.

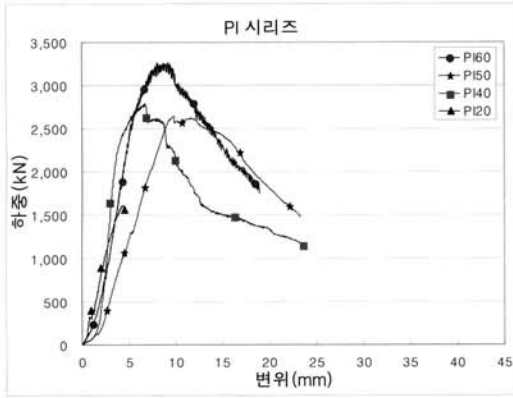


그림 17. PI 시리즈 실험체

PI60실험체는 그림 17과 같이 최대하중이 3468kN으로 나타났으며, 최대하중 이후 그림 20 및 그림 21과 같이 콘크리트 바닥판과 유공 I형강의 전단변형과 하부 콘크리트 바닥판 일부에 압괴가 발생하면서 파괴되었다.



그림 18. PI20실험체의 강판과 콘크리트의 분리



그림 19. 용접길이 부족으로 인한 취성파괴

그림 17과 같이 용접량이 부족한 PI20 실험체를 제외한 나머지는 전단연결재의 파괴가 아닌 콘크리트 바닥판 하부가 압괴되면서 최대하중 이후 내력이 저감되는 것으로 나타났다.



그림 20. 하부 콘크리트 바닥판의 압괴에 의한 파괴



그림 21. 유공 I형강의 전단변형

#### 4.2.3 PBI50 시리즈 실험체

PBI50시리즈 실험체는 연결볼트와 유공 I형강을 함께 사용하면서 강판에 용접되는 유공 I형강 길이에 대한 단속 용접길이에 비율을 50%로 고정하고, 연결볼트 사이에 유공 I형강의 위치가 위, 아래인 경우의 실험체이다.

PBI50-DN 실험체는 그림 22와 같이 최대하중 2209kN에 도달한 후, 하중이 갑자기 감소되었다. 또한, 그림 23 및 그림 24와 같이 H형강 거더와 콘크리트 바닥판이 분리되는 현상이 발생하면서 유공 I형강의 파괴가 아닌 연결볼트가 전단력에 먼저 파괴되었다. PBI50-UP 실험체도 그림 22와 같이 최대하중이 2260kN에서 하중이 갑자기 감소되면서, PBI50-DN 실험체와 동일한 파괴형상으로 파괴되었다.

그림 22에서와 같이 유공 I형강과 연결볼트로 이루어진 PBI50 시리즈 실험체는 최대하중에 도달한 후에 하중이 저하되었고, PB시리즈 실험체보다 연성은 작았지만 충분한 전단내력을 가지는 것으로 판단된다.

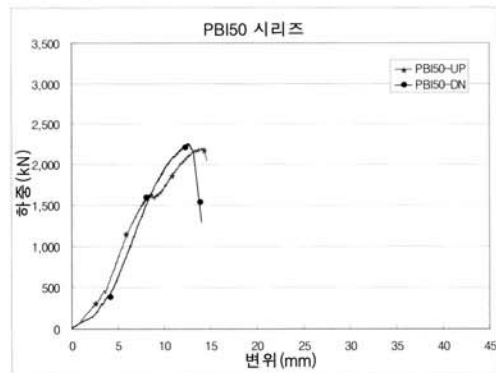


그림 22. PBI50 시리즈 실험체

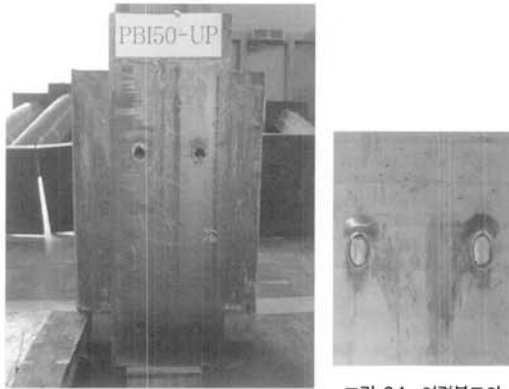


그림 23. H형강과 콘크리트의 분리

그림 24. 연결볼트의 취성파괴

그림 25는 각 시리즈의 대표적인 실험체의 하중-변위곡선을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 전단연결재로서 고력볼트를 연결볼트로 이용한 PB시리즈 실험체는 다른 실험체에 비해 연성은 크지만 비교적 최대내력이 작은 것으로 나타났다.

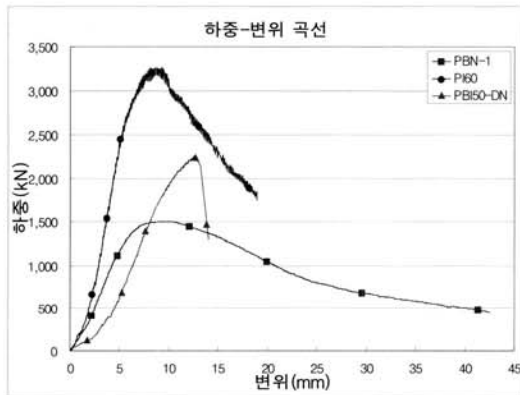


그림 25. 하중-변위 곡선

그리고, 그림 25와 같이 전단연결재로서 유공 I형강을 사용한 PI시리즈 실험체는 단속 용접길이에 의한 비율에 따라 전단내력에 상당히 영향을 많이 미치는 것으로 나타났다.

또한, 그림 25와 같이 유공 I형강과 전단연결재로 고력볼트를 연결볼트로 동시에 사용한 PBI50시리즈 실험체의 경우 유공 I형강의 위치에 크게 영향을 받지 않고 전단연결재로 사용한 연결볼트가 전단파괴되는 것으로 나타났다.

### 4.3 실험결과 분석 및 고찰

#### 4.3.1 PB시리즈 실험체

본 연구에서는 고력볼트를 연결볼트로서 전단연결재로 사용한 경우, 전단연결재로서의 전단내력 및 구조성능을 평가하기 위해 표 5와 같이 기존 전단연결재로 사용된 스테드의 전단내력 평가식과 비교하였다.

먼저, 현재 도로교설계기준(2005)에서 사용되는 있는 스테드의 전단내력식인 식(2)는 J.W.Fisher(1971)의 실험식인 식(1)에 근거하여 산정하고 있다.

따라서, 식(1)에서 스테드의 전단내력은  $A_{sc}$  (스테드의 측면면적)에 직선적으로 비례하는 식으로 되어 있으므로 제2장에서 서술한 바와 같이 스테드의 직경이 19mm이하의 경우만 적용이 가능하다고 보고되고 있다(김규석 외, 1988).

그러므로 기존의 많은 Push-out 실험결과를 지수함수로 회귀분석한 식(6), ECCS의 식(3) 및 기존의 제안식을 본 Push-out 실험의 PB시리즈 실험체의 실험결과와 비교 분석하여 표 5에 나타내었다.

본 실험에서 사용한 전단연결재는 24mm의 고력볼트를 연결볼트로서 사용하였기 때문에 도로교설계기준을 적용한 식(2)로 평가하여 실험결과와 비교하면 표 5와 같이 평균치가 0.93으로 나타나 적용하기가 어렵다.

또한 식(4)인 Eurocode4인 경우도 스테드 지름이 22mm 이하에서만 적용되므로 비교할 수 없다. 표 5와 같이 나사선을 길게 뽑은 고력볼트를 그대로 연결볼트로 사용한 PBN 실험체를 식(6)로 평가하여 실험결과와 비교하면 평균치가 1.05로 나타났다. 또한, 나사선의 끝을 갈라 펼쳐 스테드의 머리를 모사한 경우와 두 개의 너트를 이용하여 연결볼트를 체결한 경우의 PBS 및 PBU 실험체를 식(3)으로 평가하여 실험결과와 비교하면 평균치가 1.08로 나타났다.

따라서, 고력볼트를 그대로 연결볼트로 사용한 전단연결재는 식(6)으로, 스테드와 같이 머리가 있는 고력볼트는 식(3)으로 평가하는 가장 적합한 것으로 나타났다. 고력볼트를 연결볼트로 사용한 PB시리즈 실험체는 스테드의 전단내력이상의 충분한 내력을 가지고 있으며, 이것은 기존의 스테드에 비해 시공의 간편성으로 공기단축 및 경제성에 유리하다고 판단된다.

#### 4.3.2 PI시리즈 실험체

본 연구에서는 강판에 유공 I형강을 용접하여 전단연결재로 사용한 경우, 전단연결재로서 전단내력을 평가하기 위해 표 5와 같이 대한건축학회의 강구조 설계기준 및 해설에 명시된 I형강의 전단내력 실험식인 식(10)과 비교 분석하였다.



그리고, PI시리즈 실험체중 PI20실험체는 전단연결재로 사용한 유공 I형강이 전단력에 의해 파괴되었으므로 유공 I형강의 전단내력은 용접부의 유효면적을 구하여 식(11)과 같이 산정하였다.(William T. Segui 2008)

$$V_{sn} = 0.6 \cdot f_u \cdot t \cdot l \quad (11)$$

여기서,  $f_u$  : 모재의 인장강도(MPa)  
 $t$  : 모재의 두께(mm)  
 $l$  : 용접길이(mm)

표 5에서의 전단내력 산정방법은 C형강의 제원을 I형강으로 치환하였으며, 용접거리  $l$ (mm)은 유공 I형강의 길이에 단속 용접길이를 계산하여 비교하였다. 표 5와 같이 식(10)과 비교한 결과 용접길이에 대해 비례하는 전단강도 평가식으로는 상당히 과소평가하였으며, 식(11)로 비교결과 PI20 실험체의 경우 약 1.20배 정도 낮게 평가하였는데 이는 용접 과정에서 시단과 종단으로 인한 용접량 증가로 판단된다. 또한 용접량 40% 이상일 경우 유공I형강은 전단강도를 발휘하는 것으로 나타났다. 따라서, I형강을 전단연결재로 사용한 경우 전단내력에 대한 평가는 추후 구조적 거동을 포함하여 개선될 필요가 있다고 판단된다.

#### 4.3.3 PBI50시리즈 실험체

PBI50시리즈 실험체는 유공I형강의 파괴이전에 연결볼트의 전단파괴가 발생하였다. 따라서 식(12)와 같이 볼트의 전

단내력식과 실험결과를 비교하면 표 5에서와 같이 평균값이 약 0.93배인 것으로 나타났다.(William T. Segui 2008)

이는 고력볼트가 순수하게 전단력만 받은 것이 아니라 콘크리트에 뿔혀 나오려는 인장력을 함께 받았기 때문이라 판단된다.

$$V_{sn} = 0.6 \cdot f_u \cdot A_{sc} \quad (12)$$

여기서,  $A_{sc}$  : 고력볼트의 축단면적( $mm^2$ )  
 $f_u$  : 볼트의 인장강도(MPa)

### 5. 결론

초간편 강합성 바닥판에서는 현재 전단연결재로 사용되고 있는 스티드가 아닌 고력볼트를 사용한 연결볼트와 유공 I형강을 사용하였다. 따라서, 본 연구에서는 Push-out 실험을 통해서 고력볼트를 사용한 연결볼트와 유공 I형강에 대한 전단내력과 구조적 성능을 평가하였다.

또한 기존의 스티드의 내력평가식을 바탕으로 실험결과와 비교 분석하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 스티드 전단연결재의 전단내력 평가식은 본 실험에 사용된 연결볼트의 Push-Out 실험결과 직경의 크기에 제한을 받는 것으로 판단된다.
- (2) 고력볼트를 전단연결재로 사용한 연결볼트의 실험결과를 스티드의 전단내력에 대해 각종 제안식과 비교한

표 5. Push-out 실험결과 및 기존 전단연결재의 전단내력 평가 비교

단위 : kN

실험체명	실험결과		전단내력 평가식에 의한 내력					전단연결재의 전단내력 비교 분석					
	최대하중 / 개당 (A)	도로교 설계 기준 식(2) (B)	ECCS 식(3) (C)	김규식 외 식(6) (D)	C형강 식(10) (E)	용접부의 전단 내력 식(11) (F)	고력볼트의 전 단내력 식(12) (G)	A/B	A/C	A/D	A/E	A/F	A/G
PBN-1	187.5	204.9	185.1	175.3	-	-	-	0.92	1.01	1.07	-	-	-
PBN-2	182.9							0.89	0.99	1.04	-	-	-
PBN-3	179.9							0.88	0.97	1.03	-	-	-
PBS	198.2							0.97	1.07	1.13	-	-	-
PBU	200.7							0.98	1.08	1.14	-	-	-
PI20	402.2	-	-	-	-	335.5	-	-	-	-	-	1.20	-
PI40	698.3	-	-	-	349.9	671.08	-	-	-	-	2.00	1.04	-
PI50	666.6	-	-	-	437.4	838.85	-	-	-	-	1.51	0.79	-
PI60	847.1	-	-	-	524.9	1006.62	-	-	-	-	1.65	0.86	-
PBI50-DN	276.2	-	-	-	-	-	299.2	-	-	-	-	-	0.92
PBI50-UP	282.2	-	-	-	-	-		-	-	-	-	-	0.94

결과, 스티드 지름 19mm 이상 적용시 도로교설계기준은 전단내력을 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서, 19mm 이상의 경우는 식(3) 또는 식(6)으로 전단내력을 평가하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

- (3) 유공 I형강을 사용한 PI시리즈 실험체는 ㄷ형강 전단내력식과 비교한 결과, 상당히 상회하는 것으로 나타나, 추후 구조적 검토와 함께 전단내력에 대한 산정방법이 개선되어야 할 것으로 판단되며 소정의 용접량을 확보한다면 전단강도는 일정한 경향을 보이는 것으로 판단된다.
- (4) 강상판에 유공 I형강을 용접하고 고력볼트를 연결볼트로 사용하여 전단연결재로 사용한 PBI50시리즈 실험체는 연결볼트로 사용한 고력볼트의 축부에서 전단과 파괴되었으므로 식(12)로 전단내력을 평가하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(06건설핵심C17)에 의한 것임.

### 참 고 문 헌

건설교통부(2005), 도로교설계기준  
 구미서관(2005), 합성구조론  
 김성배, 김상섭(2006), T형 합성보의 시어 커넥터 형상에 따른 전단내력 평가에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 제18권 2호, pp.279~288

대한건축학회(1983), 강구조설계기준 및 해설  
 박상철, 김필중, 김규석(1983), 스티드의 내력에 관한 실험적 연구(1), 대한건축학회지, 제27권 113호, pp.47~51  
 정철현, 이홍수, 박종면, 김영호(2004), 합성작용을 위한 새로운 Perfobond 전단연결재, 대한토목학회논문집, Vol.24, pp.525~532  
 정영주, 정광희, 구현본, 김범석(2004), 교량용 강-콘크리트 합성 바닥판의 실험적 정적거동 특성, 대한토목학회논문집, Vol.24, pp.17~25  
 이필구, 심창수, 윤태양(2003), 대직경 스티드 전단연결재의 정적거동, 한국강구조학회 논문집, 제15권 6호, pp.611~620  
 한국건설기술연구원(2002,2003), 장수명 합리화 교량바닥판의 개발  
 한국건설기술연구원(2004,2005), 장수명 합리화 교량바닥판의 개발 - 강-콘크리트 합성 바닥판  
 金圭石, 金相燮(1988), 스태드코넥타의せん断耐力と合成ばりのに挙動に關する實驗的研究, 日本建築學會構造系論文報告集, 第389號, pp.79~87, 1988. 7.  
 British Standard Code of Practice, CP 117(1965): Part 1: Composite Construction in Structural Steel and Concrete Part 1: Simply Supported Beams in Buildings  
 Eurocode 4(1994), Design of Composite Steel and Concrete Structures: Part 1.1, EN1994-1-1  
 European Convention for Constructional Steelworks(1983), Constrado, London  
 J.G.Ollgaard, R.G.Slutter and J.W.Fisher(1971), Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete, AISC, Vol.8, No.2  
 (접수일자 : 2008. 2. 12 / 심사일 2008. 3. 10 / 게재확정일 2008. 8. 10)