

# 대직경 스티드 전단연결재의 정적거동

## Static Behavior of Large Stud Shear Connectors

이 필 구<sup>1)</sup> · 심 창 수<sup>2)</sup> · 윤 태 양<sup>3)</sup>  
Lee, Pil Goo · Shim, Chang Su · Yoon, Tae Yang

**요약** : 강합성교량에서 19mm 또는 22mm 직경을 갖는 전단연결재가 일반적으로 사용되고 있다. 강교 상세의 단순화와 향후 바닥판 제거의 용이성 및 프리캐스트 바닥판 전단포켓의 효율적인 배치를 위해서는 대직경 스티드 전단연결재가 필요하다. 현재의 전단연결재 설계범위를 넘어서는 대직경 스티드 전단연결재에 대한 push-out 실험을 통해서 정적거동에 관한 항목들을 검토하고 기존 설계식과의 비교를 수행하였다. 25, 27, 30mm 직경의 스티드에 대한 전단실험을 통해서 탄성영역에서의 전단강성을 평가하고 세 개의 직선으로 구성된 하중-상대변위 곡선을 제안하였다. 파괴시의 극한상대변위를 평가하고 극한강도를 유로코드-4의 설계식과 비교하여 설계의 안전율을 평가하였다. 또한 30mm 스티드의 경우는 용접과 콘크리트 지압능력의 개선이 필요한 것으로 나타났다.

**ABSTRACT** : Shear studs with a diameter of 19mm or 22mm are typically used in steel-concrete composite bridge. For the simplification of details in steel bridges, the convenience of removing concrete slab, and the efficient distribution of shear pockets for precast decks, large studs can be an excellent alternative. Through push-out tests on large stud shear connectors that transcend the limitation of current design codes, static behavior was investigated and comparisons with design equations performed. The shear stiffness of the connectors in elastic range and trilinear load-slip curves were proposed after shear tests on 25mm, 27mm, and 30mm studs. The ultimate slip capacity and ultimate strength of large studs were also evaluated, with the test results revealing conservative values for the design shear strength in Eurocode-4. For 30mm stud shear connectors, the welding quality and bearing capacity of concrete slab should be improved.

**핵심용어** : 대직경 스티드 전단연결재, 전단강성, 하중-상대변위 곡선, 극한강도

**KEYWORDS** : Large stud shear connector, shear stiffness, load-slip curve, ultimate strength

### 1. 서론

국내외적으로 최근 강교의 연구 개발 추세는 고성능 재료의 선택, 단면의 단순화, 현장 작업의 최소화, 유지관리비의 최소화, 인력 소요 최소화 등이라고 할 수 있다. 단순한 재료비의 절감이라는 과거 최적화설계의 기본 개념은 Life Cycle Cost(LCC)라는 설계에서 교체까지의 전 기간을 통해 소요되는 경비의 최소화라는 개념으로 전환되고 있다. 이러한 추세의 반영으로 연결부나 용접을 최소화하는 단면의 선택에 관한 연구가 많이 이루어지고 있고 현장 작업을 최소화하기 위해 소요부재를 프리캐스트화 하고 있는 추세이다. 국내에서도 최근의 실무에서 2주형교와 같은 소수주형교나 개구제형 강박스터더교에 대한 관심이 높고 적용하려는 노력들이 많이 이루어지

고 있고 이에 대한 연구도 활발하게 수행되고 있다. 국내에서의 이러한 새로운 형태의 강교 적용의 시도들이 몇 가지 설계 기준 미비나 연구 부족으로 실제 적용하는데 어려움을 겪고 있다. 이러한 형태의 강교의 전단연결재 설계시 기존 교량에 비해서 좁은 영역에 많은 전단연결재를 배치해야 하기 때문에 상세 결정이나 설계에 어려움이 일부 예상된다. 특히, 장시간 바닥판을 채택할 경우 프리캐스트화하는 것이 경제적인데 이를 위해서는 전단연결재의 배치 문제가 가장 까다로운 설계 항목중의 하나가 될 것이다. 현행 설계 규정대로 할 경우 지점부 근처의 전단연결재 배치 규정은 프리캐스트 바닥판으로 해결할 수 없기 때문에 좀 더 큰 내하력을 가진 전단연결재의 설계가 요구된다. 이를 위해서는 선행된 직경 25mm 이상의 전단연결재의 실험적 연구 결과를 최대한 활용하고 앞으로 예

1) 정회원, RIST 토목구조연구팀 선임연구원  
(Tel:031-370-9591, Fax:031-370-9599, E-mail:pg289@rist.re.kr)  
2) 정회원, 중앙대학교 토목학과 전임강사(csshim@cau.ac.kr)  
3) 정회원, RIST 토목구조연구팀장, 공학박사(tyoon@rist.re.kr)

본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

상되는 강교의 적용범위를 포괄할 수 있도록 실험을 수행하여 신뢰성 있는 관련 설계규정을 제안할 필요가 있다. 이를 통해서 설계자들이 좀 더 쉽게 새로운 형태의 강교에 접근할 수 있고 합리적인 근거를 바탕으로 한 강합성교량의 설계 규정 도출에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 일반적으로 강합성 교량에 사용되는 스테드는 19mm와 22mm이고 현행 설계 규정의 적용범위도 동일하다. 수평전단력이 집중되는 영역에는 많은 수의 전단연결재 배치가 불가피하여 용접에 시간이 많이 소요되고 추후 바닥판 제거에 어려움을 주는 요인이 될 뿐 아니라 현장 작업을 하는 인부의 작업공간을 줄여서 안전상의 문제를 야기할 수 있다. 이러한 문제들에 대한 효과적인 대안으로 대직경 스테드 전단연결재를 연구할 필요가 있다.

스테드 전단연결재의 설계 범위 확장을 위해서는 대직경 스테드 전단연결재의 정적강도, 연성, 전단강성 및 피로수명을 평가하여 현재의 설계 규정 항목의 검토와 더불어 확장을 해야 한다. 이를 위해서 이 논문에서는 30mm 직경까지의 대직경 스테드에 대한 정적 실험을 통해서 설계 항목의 근거가 되는 정적거동을 제시하고 정량적인 수치와 해석을 위한 하중-상대변위 관계를 제안하였다.

## 2. 스테드 전단연결부의 역학적 거동

기계적 전단연결재(mechanical shear connector)는 그 사용 목적에 따라 다양하게 존재하고 각각의 특성들은 전단력이 직접 전단연결부에 가해지는 단순한 형태의 push-out 실험에서 경험적으로 구해진다. 이러한 기계적 전단연결재들은 그림 1과 같이 콘크리트속에 묻혀있는 스테드가 이를 받쳐주는 지압부 콘크리트와 함께 전단에 저항한다. 물론, 이 전단연결재들은 발생하는 전단력에 저항하기 위해 콘크리트와 강재사이의 상대변위를 요구하고 스테드의 머리 부분은 강재 부분에서 콘크리트 부분이 떨어져나가는 것을 방지하기 위한 것이다.

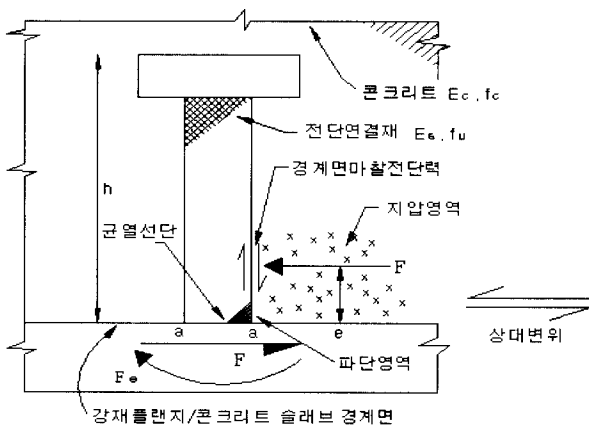


그림 1. 스테드 전단연결부의 거동

스테드 전단연결재에 못 작용(dowel action)에 의해 종방향 전단력을 전달하기 위해서는 스테드를 둘러싼 콘크리트와 스테드가 용접되어 있는 플랜지에 큰 응력을 유발하게 된다. 이 높은 응력은 전단연결재의 지압부를 형성하는 콘크리트가 주위의 콘크리트와 철근, 강재 플랜지에 의해 적절히 구속되어 있기 때문에 존재할 수 있다. 이러한 응력의 분포는 연결재 주변에서 국부적으로 매우 복잡해서 경험적으로 이러한 응력에 의한 조기 파괴를 막기 위한 상세 설계의 지침을 마련해왔고 설계 규정에 반영되어 있다.

스테드 전단연결재의 정적 거동은 세 가지로 구분할 수 있는데 강도, 강성, 그리고 연성이다. 전단연결재의 강성, 강도, 극한 상대변위 능력(slip capacity)은 여러 가지 변수의 영향을 받는 것으로 나타났다. 스테드 줄기 면적, 스테드의 높이, 스테드의 인장강도, 콘크리트의 탄성계수와 압축강도, 그리고 콘크리트 타설방향 등의 영향을 받는다 (Ollgaard, 1971; Slutter, 1962; Menzies, 1971; Mainstone, 1967; Maeda, 1983). 프리캐스트 바닥판의 스테드 전단연결재는 이외에도 채움재, 배당층의 높이에 의해 영향을 받는 것으로 나타났다(Shim, 2000).

전단연결재의 못작용에 의한 수평전단력 전달의 역학적 개념도는 그림 1에 이상화하여 간단하게 도시한 바와 같이 응력발생은 상대변위의 움직임에 의해서 유발되고 전단연결재는 오른쪽으로 움직이려고 하고 이는 지압역할을 하는 콘크리트를 밀게 된다. 못 작용이 제대로 수행되기 위해서는 지압영역 근처의 콘크리트가 콘크리트 압축강도의 7배 정도의 압축응력을 견뎌야 한다. 이것은 주변을 둘러싼 콘크리트와 강재 및 스테드에 의해 이 영역에 가해지는 삼축 구속에 의해서만 달성될 수 있다.

전단연결재의 못작용에 대한 저항강도를 전단연결재의 극한 강도(dowel strength)라고 정의한다. 작은 영역에 집중되는 힘은 콘크리트 단면내로 분산되는데 이 분산이 콘크리트 슬래브에 인장 균열을 유발할 수 있다. 이 인장 균열들은 ripping, 전단, 할렬 작용에 의해 발생할 수 있다. 인장 균열은 또한 못 작용에 의해서도 발생할 수 있는데 특히 전단연결재가 합성보의 경계면에서 수직 분리에 저항할 때인데 이 균열들을 embedment cracks라고 한다. 콘크리트 슬래브에서 이러한 형태의 인장 파괴는 전단연결부의 극한강도와 연성에 영향을 미치게 된다.

전단연결부의 강도에 대한 선행된 연구결과들로부터 극한강도는 콘크리트의 압축강도가 높을수록 강성의 감소나 파괴가 시작되기 전에 더 큰 힘 F에 저항할 수 있기 때문에 압축강도  $f_c$ 에 비례한다. 또한, 전단연결재의 극한강도는 강재의 인장 강도  $f_t$ 와 스테드의 단면적  $A_{sh}$ 에 비례하는데 스테드의 축강

도  $A_{sh} f_c$ 가 클수록 더 큰 전단력과 휨에 저항할 수 있게 된다. 연구결과들을 참고하면 강도는  $E_c/E_s$ 에 영향을 받기 때문에 앞서 제시된 여러 가지 변수들의 영향을 받는 전단연결부 강도(dowel strength)  $D_{max}$ 는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$D_{max} = f(A_{sh}, f_u, f_c, E_c/E_s) \quad (1)$$

전단연결부의 종류가 다양하고 거동이 복잡하기 때문에 전단연결부의 강도와 연성은 지금까지 실험적으로 평가되어서 여러 경험식들이 제안되었다. 이러한 전단연결부의 거동을 합성보 실험에서 평가하는 것은 보의 휨에 의해 간접적으로 발생하는 수평전단력을 가지고 전단연결부를 평가하기 때문에 어렵다. 즉, 보에 작용하는 힘이 전단연결부에 가해지는 힘의 크기가 직접적으로 비례하지 않고 합성보의 여러 구성 부분들의 강성에 따라 달라진다. 게다가 강재의 잔류응력과 콘크리트 부재의 재료 비선형성은 부재에서 발생하는 종방향 변형률을 측정해서 전단연결부에 작용하는 힘을 구하는 것을 실제적으로 불가능하게 한다. 따라서, 보 실험 대신에 일반적으로 전단연결부가 직접 전단을 받도록 구성된 소위 push-out 실험을 수행하여 전단연결부 거동을 평가한다. 그러나 push-out 실험 부재에서 전단연결부에 작용하는 힘은 합성보에서와 일치하지 않는 단점이 있고 이는 파괴 모드와 강도의 차이를 유발한다. 그래서 push-out 실험으로부터 평가된 결과는 몇 가지 고려사항을 가지고 재평가하여야 하고 합성보 실험을 통해서 조정하기도 한다.

Ollgaard 등(1971)은 실험을 통해서 전단연결부의 극한강도에 미치는 주요 변수들을 규정하였고 실험결과들의 통계적 분석을 통해서 콘크리트 슬래브가 할렬파괴와 같은 인장파괴를 일으키지 않는 push-out 실험부재에서의 스티드 전단연결부의 평균강도를 계산하는 경험식을 식 (2)와 같이 유도하였다.

$$(D_{max})_{push} = 1.83A_{sh} f_c^{0.3} E_c^{0.44} \quad (2)$$

여기서, 단위는 N, mm이고  $A_{sh}$ 는 스티드 줄기의 단면적,  $E_c$ 는 콘크리트의 탄성계수이다. 그들은 이 경험식을 방정식의 차원이 일치하도록 수정하여 식 (3)과 같은 AASHTO의 설계 규정의 근거가 되는 수식을 제안하였다.

$$(D_{max})_{push} = 0.50A_{sh} \rho f_c E_c \quad (3)$$

push-out 실험부재는 전단연결부에 압축력이 가해지게 되

는데 이 힘이 합성보에서는 존재하지 않기 때문에 push-out 실험에서 구한 강도가 보에서보다 일반적으로 큰 것으로 본다. 하지만 합성보에서 전단연결부의 강도는 합성보의 강도에 결정적인 역할을 하는 요소가 아니라는 사실을 언급할 필요가 있다. 예를 들면 전단연결부의 강도가 25%정도 감소하더라도 합성보에서는 10% 정도의 강도 감소를 가져올 뿐이다. 따라서, push-out 실험에서 구한 전단연결부의 강도에 기준해서 설계를 하더라도 약간의 비안전측의 결과를 가져올 뿐이고 이 정도는 안전율에서 충분히 회복할 수 있다. 일부 연구자들의 연구에 의하면(Oehlers와 Johnson 1987) 축력을 조절하면서 실험을 수행하면 합성보에서의 강도는 push-out 부재에서 구한 강도의 81%정도인 것으로 밝혀졌다. 이론적인 값은 83%로 매우 유사한 결과를 도출하였다. 강도의 평가식은 통계적인 방법으로 결정된 여러 실험결과들의 변수 범위내에서만 사용되어야 한다. 재료 특성값들은 근거가 되는 실험의 재료에 따라 적용의 한계를 가진다. 스티드의 높이는  $4d_{sh}$ 보다 크고 용접목의 높이는 평균  $0.31d_{sh}$ 이다.

스티드 전단연결부의 파괴모드는 그림 2에 나타낸 바와 같이 전단연결부의 파단과 콘크리트 파괴로 크게 나누어 볼 수 있다. 뿔힘(embedment failure)이 일어나는 경우는 스티드가 낮은  $h/d_{sh}$  비를 가질 때이고 슬래브에서의 균열은 슬래브의 하부 철근이 부적절하거나 상대적으로 슬래브 강성이 낮을 때 발생한다. 헨치가 높은 경우는 최대 전단면을 따라 슬래브의 파괴가 발생할 수 있는데 이를 방지하기 위해서 적절한 상세를 채택해야 한다.

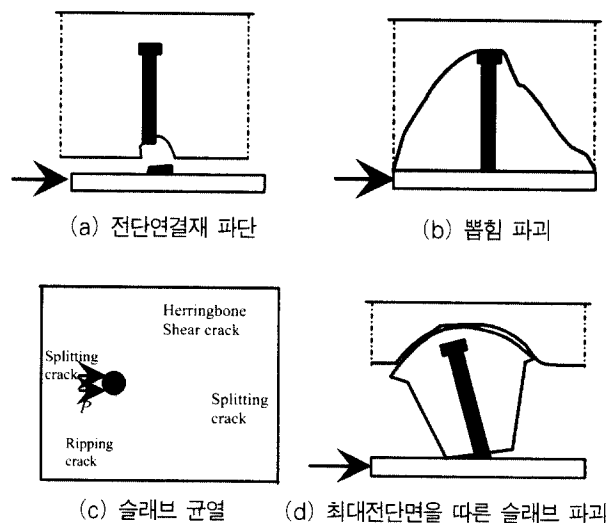


그림 2. 스티드 전단연결부의 파괴모드

유로코드-4에서는 자동 용접된 머리가 있는 스티드

(headed stud)에 대한 설계 전단강도는 식 (4), (5)와 같이 제안하고 있다.

$$P_{Rd} = 0.8 f_{td} (\frac{1}{4} d^2 / 4) / \gamma_s \quad (4)$$

$$P_{Rd} = 0.29 \phi d^2 \rho (\frac{f_{ck} E_{cm}}{\gamma_s}) / \gamma_s \quad (5)$$

두 값 중에서 작은 값을 사용하고 수식에서 기호의 정의는 d: 스테드의 줄기 직경,  $f_{td}$ : 스테드의 극한 인장강도로 500N/mm<sup>2</sup> 보다 작아야 하고  $f_{ck}$ : 콘크리트의 특성 압축강도이다.

극한한계상태(ultimate limit state)에서의 부분안전계수 (partial safety factor)  $\gamma_s$  는 1.25의 값을 사용해야 한다.

전단연결재의 수를 줄이기 위한 대직경 스테드에 대한 연구가 Badie 등(2002)에 의해 수행되었다. 이 연구에서 대상으로 한 대직경 스테드는 31.8mm 스테드로 용접품질 관리, 설계시방서에 있는 설계식 적용여부, 실제 적용 예를 제시하고 있다. 사용한 스테드는 22.2mm 스테드는 SAE 1008이고 31.8mm 스테드는 SAE 1018인데 각각 항복강도가 290MPa, 372MPa이었다. 이 연구에서 수행된 실험은 20개의 push-off 시험편(극한강도시험), 25개의 push-off 시험편(피로시험)이었고 이를 통해 현재의 LRFD 설계 규정을 검토하고 새로운 경험식을 제시하였다. 연구의 주요결론으로는 횡방향 철근의 적절한 배치가 스테드의 인장강도 발현에 중요한 역할을 하고 스테드 제거후 용접시에 잔류응력의 영향은 나타나지 않았다는 것이다. 또한, 31.8mm 스테드의 변형능력이 30%정도 22.2mm에 비해서 떨어지고 2백만회 피로시험시에도 강도의 저하는 없는 것으로 나타났고 스테드의 50%를 머리가 없는 스테드로 교체할 시에는 강도의 17% 감소하는 것으로 밝혀졌다. 이 결과로부터 AASHTO 규정을 적용하는 것이 안전측의 결과를 주는 것으로 나타났고 제안된 식을 이용할 경우 스테드를 30% 정도 줄일 수 있다고 밝혔다.

### 3. 실험적 연구

#### 3.1 실험 부재 및 재료 성질

전단연결부는 구조물의 형태와 기능에 따라 다양하게 설계될 수 있지만 이를 현재의 시방규정이 모두 포함할 수는 없다. 따라서 새롭게 제안되어 사용하고자 하는 전단연결부들에 대한 일관성있는 실험 방안이 제시되는 것이 바람직하다. 실험에서 다루어지는 주된 변수는 콘크리트 바닥판, 전단연결재, 그리고 철근의 역학적 특성값들이다.

이 논문에서 제시하고 있는 실험 시편은 유로코드-4에 제시된 표준 push-out 실험 시편을 근거로 했는데 설계 규정상 콘크리트 바닥판의 두께는 조정될 수 있고 바닥판의 길이는 전단연결재의 배치 간격과 연관되어야 하고 폭은 합성보에서의 유효폭을 넘지 않아야 한다. 또한 바닥판 두께는 합성보에서 최소두께를 넘지 않아야 한다. 시편의 제작시에는 콘크리트 타설방향은 실제와 동일하게 이루어져야 하고 부착의 영향을 배제하기 위해서 강형과 콘크리트 사이에 그리스 등을 도포하여 부착을 방지해야 한다. 사용되는 전단연결재의 항복강도, 인장강도 및 최대 연신율이 시험을 통해 제시되어야 한다.

시험체는 대직경 스테드의 사용으로 인해 콘크리트 바닥판 부분의 상대적인 강도를 높이기 위해서 바닥판의 두께를 200mm로 조정하였다. 그림 3에 실험부재의 제원을 나타내었다. 또한, 표 1에 이 연구에서 수행한 실험부재에 대한 요약을 제시하였다.

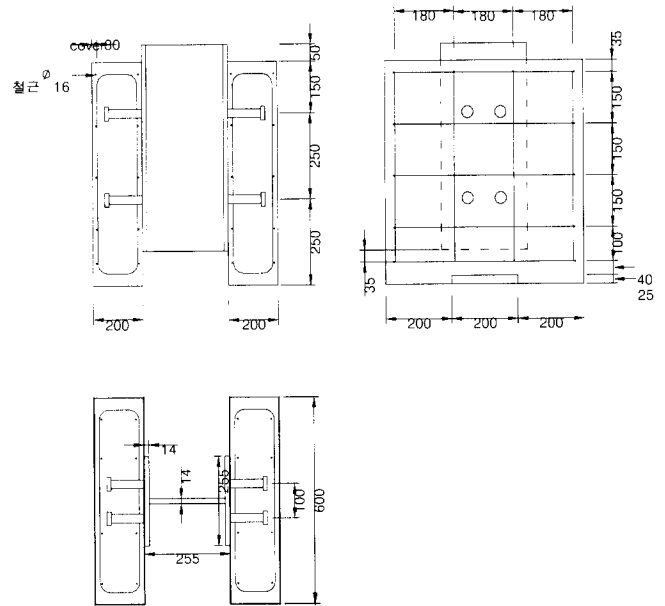


그림 3. 실험부재

표 1. 실험부재 요약

부재명	스테드직경	실험종류	콘크리트 설계강도	기타
ST25-A1	25mm	Static	30N/mm <sup>2</sup>	Strain측정
ST25-A2	25mm	•	"	
ST25-A3	25mm		"	
ST25-B1	25mm	Static	40N/mm <sup>2</sup>	
ST25-B2	25mm		"	
ST25-B3	25mm		"	
ST27-A1	27mm	Static	30N/mm <sup>2</sup>	Strain측정
ST27-A2	27mm		"	
ST27-A3	27mm		"	
ST30-A1	30mm	Static	30N/mm <sup>2</sup>	Strain측정
ST30-A2	30mm		"	
ST30-A3	30mm		"	

대직경 스티드의 품질관리에서 가장 중요한 부분이 용접이라고 할 수 있다. 스티드 건을 이용한 용접은 순간적으로 높은 전류를 이용해서 스티드의 아래부분을 녹여서 붙이는 것이기 때문에 현재 일반적으로 사용되고 있는 용접기의 최대용량을 기준으로 했을 때 25mm 직경까지는 용접이 무난하고 그 이상의 직경에 대해서는 적절한 전류와 시간에 대한 시험이 필요했다. 그림 4에 나타난 바와 같은 용접시험을 통해서 2300A~ 2400A의 최대전류를 사용하고 용접시간을 기존의 22mm 이하 스티드 용접보다 길게 1.3초 내외로 조정하여야 45도 굽힘 시험의 기준을 통과하는 품질의 용접을 얻을 수 있었다.

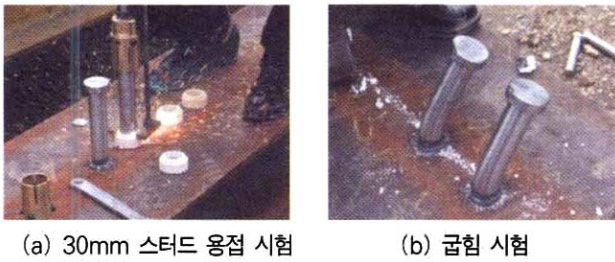


그림 4. 스티드 용접 시험

용접시험이 완료된 후 push-out 시편의 반쪽 T형보에 스티드를 용접하고 표면의 부착을 방지하기 위해 경계면에 그리스를 도포하였다. 이후 철근조립과 콘크리트 타설 후 습윤양생을 실시하였다. 양생이 완료된 후에 나누어진 시편을 강형의 용접을 통해서 조립하여 부재를 완성하였다.

### 3.2 재료성질 및 측정

실험의 대상이 되는 스티드 전단연결재의 소재는 SS400을 사용하였고 그 인장시험을 스티드 제작 전에 수행하였다. 그림 5에 인장시험 장면을 나타냈고 세 개의 시편에 대한 실험 결과를 그림 6과 표 2에 정리하여 나타내었다. 표 2의 인장강도는 변형률 게이지의 측정범위로 인하여 그림 6에 나타나지 못하였고 인장시험기의 최대하중을 근거로 하였다.

스티드의 재료로 사용되는 강재는 인장시험에서 일반적으로 명확한 항복점이 나타나지 않기 때문에 0.2%변형률에 해당하는 하중을 항복하중으로 산정하였다. 스티드가 적절한 연성을 확보하기 위해서는 연신율이 중요한데 이 시험결과 34%로 높은 값을 보여주었다. 따라서, 이 연구에서 제작한 대직경 스티드는 전단연결재로 적절한 것으로 판단된다.

실험시편을 위한 콘크리트의 설계강도는 각각 30MPa, 40MPa 이었다. 표준양생 28일 압축강도는 각각 6개씩의 시

험을 수행하였고 정적실험을 수행하는 시기에 실험부재와 동일한 조건에서 양생된 압축강도 시험을 수행하였다. 각각의 시험결과를 표 3에 평균값으로 정리하였다.

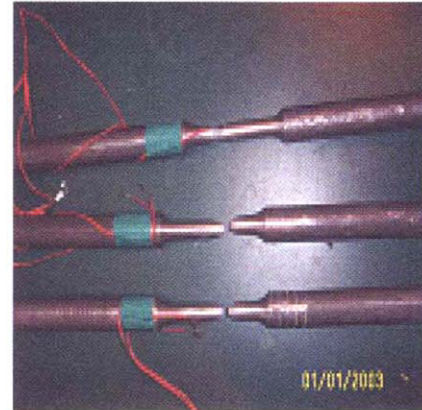


그림 5. 스티드 인장시험

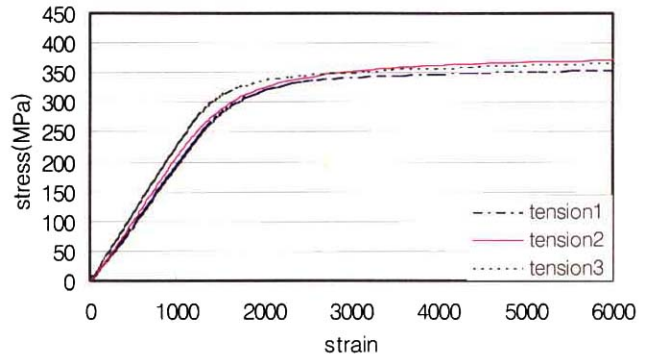


그림 6. 스티드 인장시험 결과

표 2. 스티드 인장시험 결과

	항 복 (0.2%변형률)	인장강도 (N/mm <sup>2</sup> )	연신율 (%)	탄성계수 (N/mm <sup>2</sup> )
시편 1	346	415	34	2.126×10 <sup>5</sup>
시편 2	357	441	35	2.126×10 <sup>5</sup>
시편 3	356	423	33	2.126×10 <sup>5</sup>
평균값	353	426	34	2.126×10 <sup>5</sup>

표 3. 콘크리트 재료성질

실험시기	A series(30N/mm <sup>2</sup> )	B series(40N/mm <sup>2</sup> )
28일 표준양생	33.2N/mm <sup>2</sup>	45.3N/mm <sup>2</sup>
정적실험 시기	35.3N/mm <sup>2</sup>	49.4N/mm <sup>2</sup>

정적실험은 10000 kN 만능시험기를 이용하여 수행하였고 실험부재 하면의 하중 분산을 원활히 하기 위해서 석고를 이용하여 수준을 조절하였다. 상대변위의 측정은 상부 스티드 위치인 상면에서 150mm에 4개의 1/1000mm 정밀도의 LVDT를 각각 설치하였다. 실험장면을 그림 7에 나타내었다.

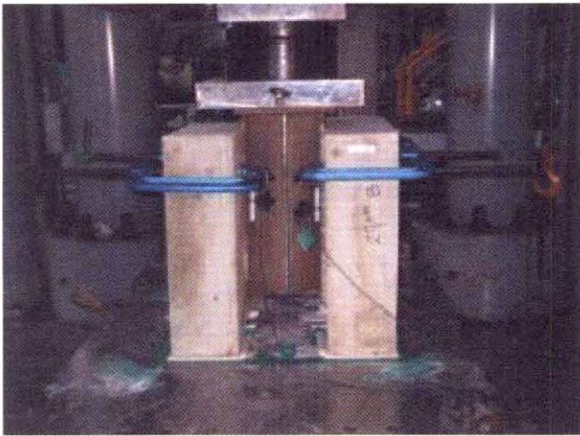


그림 7. 실험장면

#### 4. 대직경 스티드 전단연결재의 정적거동

스티드 전단연결재의 정적거동은 실험 결과로부터 탄성영역에서의 전단강성, 하중-상대변위 곡선, 극한하중 및 극한상대변위를 제시함으로써 설명할 수 있다. 전단연결재의 설계를 위해서는 정적강도가 필요하고 설계의 기본 가정으로 사용되는 연성의 확보는 극한상대변위를 통해 확인할 수 있고 해석을 위해서는 전단강성과 함께 비탄성 구간의 전단연결재 거동을 반영하기 위해서 하중-상대변위 곡선이 필요하다.

##### 4.1 전단강성 및 하중-상대변위 곡선

Oehlers와 Coughlan(1986)에 의해서 116개의 콘크리트 부분의 선행 파괴가 없는 push-out 실험에 대한 하중-상대변위 곡선의 통계적인 분석결과로부터 극한상대변위  $S_{u,k}$ 와 초기 접선강성  $K_{si}$ 가 다음과 같이 제안되었다. 이 값은 전단력이  $0.5D_{max}$ 에서의 상대변위로부터 구해졌다.

$$S_{0.5D_{max}} = (80 \times 10^{-3} - 86 \times 10^{-5} f_c) d_{sh} \quad (6)$$

여기서, 단위는 N, mm이고 표준편차는  $0.026d_{sh}$ 이다. 전단력이  $0.5D_{max}$ 에서의 강성으로 가정되는 초기접선강성  $K_{si}$ 는 다음 식으로 주어졌다.

$$K_{si} = \frac{D_{max}}{d_{sh}(0.16 - 0.0017f_c)} \quad (7)$$

이 식에서 단위는 N, mm이고 상위 95% 특성 강성값은 수식에서 0.16 대신에 0.08을 사용하면 구할 수 있고 하위

특성 강성값은 0.16 대신에 0.24를 대입하면 된다. 하중 제거시의 접선 강성  $K_{tc}$ 는  $2.8K_{si}$ 와 같은 값을 갖는 것으로 나타났다. 전단연결부의 극한 변형능력을 나타내는  $S_{u,k}$ 의 평균값은 다음 식으로 주어졌다.

$$S_{ult} = (0.48 - 0.0042f_c) d_{sh} \quad (8)$$

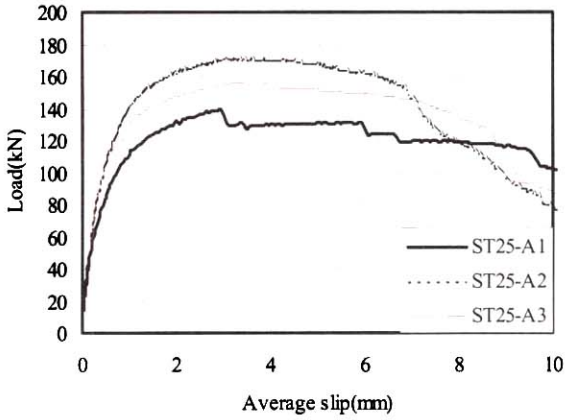
이 실험에서 수행한 변수의 범위가 다른 연구자들에 의해 제안된 수식의 적용범위를 넘어서지만 주요 영향 인자는 동일하기 때문에 이를 상호 비교하여 표 4에 정리하였다. 비교 결과에서 알 수 있듯이 탄성영역으로 판단되는 구간의 강성은 실험 결과가 이전의 제안식에 비해 상당히 크게 평가되었다. 이는 낮은 하중수준에서의 변위가 매우 작은 값을 가지고 push-out 실험 조건과 경계면의 마찰 수준 등에 의해 많은 영향을 받기 때문에 변동성이 큰 값이기 때문이며 이를 활용한 합성보의 부분해석의 결과에서는 큰 영향을 미치지 않는 범위에 있게 된다. 대직경 스티드 전단연결부의 연성을 판단할 수 있는 극한 상대변위의 값은 제안된 식의 값과 유사한 결과를 보여주고 있다.

표 4. 스티드 전단연결부의 강성/연성 평가

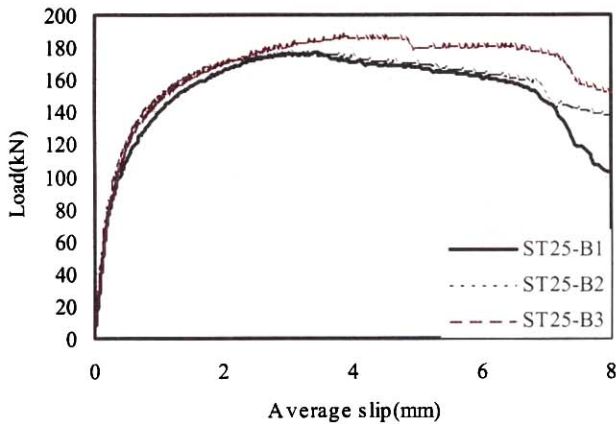
	탄성슬립(mm)		강성(kN/mm)		연성(mm)	
	실험	식(6)	실험	식(7)	실험	식(8)
ST25-A1	0.27		231		6.07	
ST25-A2	0.27	1.14	272	78	6.68	7.80
ST25-A3	0.21		322		7.45	
ST25-B1	0.23		356		6.33	
ST25-B2	0.18	0.93	400	96	6.72	6.75
ST25-B3	0.23		343		7.31	
ST27-A1	0.21		396		8.30	
ST27-A2	0.31	1.23	298	75	8.55	8.42
ST27-A3	0.24		331		8.12	
ST30-A1	*		*		7.29	
ST30-A2	0.30	1.37	306	70	9.63	9.36
ST30-A3	0.28		279		7.76	

탄성영역에서의 전단연결재의 거동은 실제 강합성교량과 같은 구조물에서는 부차과 마찰의 영향으로 인해 그 영향이 매우 미미하다. 따라서, 실제 전단연결재의 거동이 중요하게 되는 영역은 하중수준이 아주 높은 비탄성영역이기 때문에 이 구간의 거동을 모사할 수 있는 하중-상대변위 곡선이 제시되어야 한다. 부분합성 해석이 필요한 경우는 비탄성 영역이고 콘크리트와 강재의 재료 비선형 곡선과 함께 전단연결부의 비선형 곡선이 제시되어야 한다. 그림 8에서는 실험 결과로부터 하중-상대변위 곡선을 평균값을 기준으로 세 개의 직선으로 모사하여 평가하였다. 그림 9에 세 개의 직선으로 모사하는

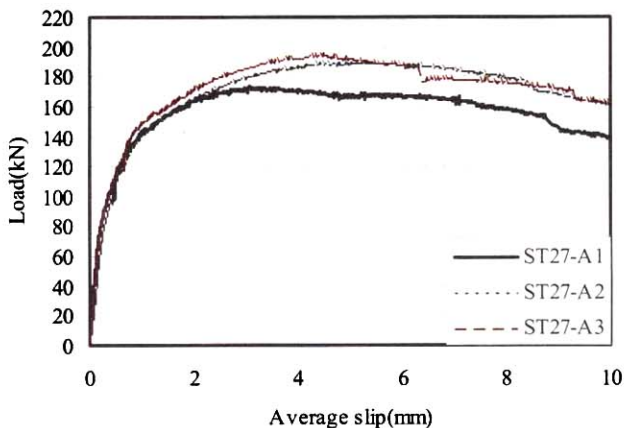
개념을 나타내었고 이를 각각의 경우에 대해 평균적으로 평가한 값을 표 5에 정리하였다. A점은 탄성영역(0.5Dmax), B점은 최대하중(Dmax), C점은 최대하중에서 10% 하중감소가 된 점을 나타낸다. 제시된 값은 부분합성 이론을 적용하는 합성보의 비선형 해석에 유용하게 적용될 수 있다.



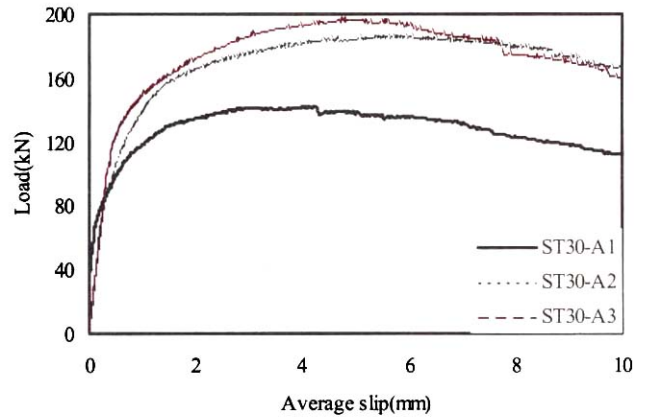
(a) 25mm-30MPa



(b) 25mm-40MPa



(c) 27mm



(d) 30mm

그림 8. 하중-상대변위 곡선

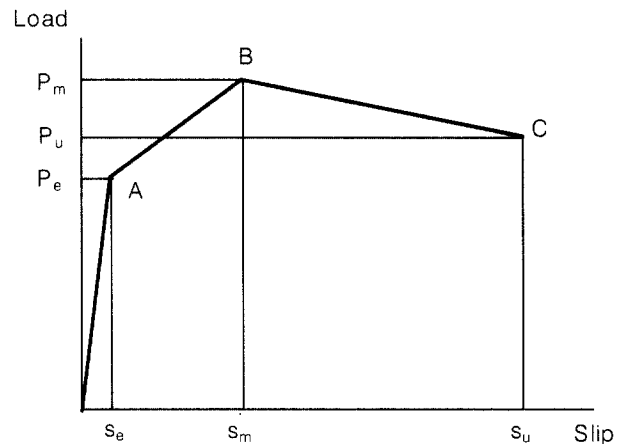


그림 9. 이상화된 하중-상대변위 곡선

표 5. 하중-상대변위 곡선값

	A점		B점		C점	
	$P_e$	$s_e$	$P_m$	$s_m$	$P_u$	$s_u$
25mm-30MPa	78.02	0.25	156.05	3.33	140.4	6.73
25mm-40MPa	90.07	0.21	180.14	3.52	162.1	6.79
27mm-30MPa	93.12	0.25	186.23	4.22	167.6	8.32
30mm-30MPa	95.96	0.29	191.19	5.33	172.7	8.70

#### 4.2 극한거동

대직경 스테드 전단연결재의 극한상태설계를 위해서는 정적 강도를 위한 설계식이 실험을 통해 검토되어야 하고 적절한 연성의 확보가 확인되어야 한다. 실험으로부터 구한 스테드 전단연결부의 극한강도와 파괴모드를 표 6에 정리하였다. 현재의 설계 규정의 근거가 되는 실험결과들은 스테드 파단과 지압파괴가 혼합되어 존재하기 때문에 실험에서 지압파괴로 나

타난 결과도 인용할 수 있지만 이는 전단연결재의 설계를 위해서 적합하지 않기 때문에 스테드가 파괴된 부재만을 정적강도 산정시 활용하기로 한다. 파괴된 부재의 파단면을 그림 10에 나타내었고 그림 11에 30mm 스테드의 경우에 용접 불량으로 판단되는 시편의 파단면과 지압파괴된 양상을 대표적인 경우에 대해서 나타내었다. 25mm와 27mm 스테드의 경우는 용접 상태가 대체로 양호하고 기존의 실험결과에서 제시된 파괴 형태와 유사한 파괴 양상을 보였다. 그러나 30mm 스테드는 그림 11(a)에서 보듯이 파단면에서 곰보 형태가 보이는 것으로 보아 현재의 자동용접용 스테드 건을 이용한 용접의 균일한 품질 확보를 위해서 좀 더 용접 장비와 함께 용접면 모따기 정도를 조정할 필요가 있는 것으로 판단된다. 또한 지압파괴를 보이는 것은 실험부재의 콘크리트 슬래브의 상대적 강도가 부족하기 때문으로 현재 강합성교량에서 주로 사용되는 두께인 220mm를 기준으로 다시 평가할 필요가 있고 실제 합성보에서는 횡방향 철근에 의한 구속효과가 실험부재에 비해서 높기 때문에 지압파괴로 인한 전단연결부 파괴는 발생하지 않을 것으로 예상되지만 실험을 통한 확인이 추가로 요구된다. 또한 대직경 스테드 전단연결재의 극한 상대변위의 값이 일반적인 직경의 스테드의 값과 동일한 수준에서 나왔기 때문에 직경 증가로 인한 취성파괴에 대한 염려는 없는 것으로 판단된다.

표 6. 정적실험 결과

부재명	극한강도	극한변위	파괴모드	기타
ST25-A1	1116kN	6.07mm	스테드파단	곰보발견
ST25-A2	1373kN	6.68mm	스테드파단	
ST25-A3	1257kN	7.45mm	스테드파단	
ST25-B1	1412kN	6.33mm	스테드파단	
ST25-B2	1414kN	6.72mm	스테드파단	
ST25-B3	1498kN	7.31mm	스테드파단	
ST27-A1	1388kN	8.30mm	스테드파단/ 하부지압파괴	
ST27-A2	1521kN	8.55mm	스테드파단/ 하부지압파괴	
ST27-A3	1561kN	8.12mm	스테드파단/ 하부지압파괴	
ST30-A1	1138kN	7.29mm	지압파괴	파단면 곰보발견
ST30-A2	1494kN	9.63mm	스테드파단/ 하부지압파괴	파단면 곰보 발견
ST25-A3	1579kN	7.76mm	스테드파단/ 하부지압파괴	

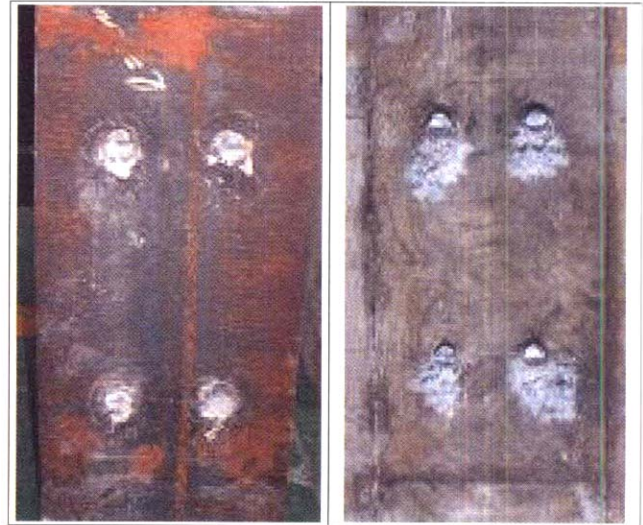


그림 10. 스테드 전단연결부의 파괴 단면



(a) 30mm 스테드의 용접 불량 파단면



(b) 지압파괴

그림 11. 용접결합부 파단면 및 지압파괴

### 5. 대직경 스테드 전단연결재의 극한강도 설계

스테드 전단연결재 실험결과를 이용한 설계식 제안을 위해서는 몇 가지 정의를 필요로 한다. 세 개의 실험 결과에서 특



성 강도  $P_{Rk}$ 는 최소 파괴하중을 10% 감소시킨 값으로 하고 설계 강도값  $P_{Rd}$ 는 식 (9)와 같이 계산한다(Eurocode-4, 1997).

$$P_{Rd} = \frac{f_u}{f_{tc}} \frac{P_{Rk}}{\gamma_c} \leq \frac{P_{Rk}}{\gamma_c} \quad (9)$$

여기서  $f_u$ 는 전단연결재 재료의 최소 극한강도값으로 410MPa이고  $f_{tc}$ 는 시험시편에 사용된 연결재 재료의 실제 극한강도로 이 실험에서 426MPa이다. 부분안전계수  $\gamma_c$ 는 1.25의 값을 사용할 수 있다. 또한 전단연결재의 연성을 나타내는 극한 상대변위  $\pm_u$ 는 특성 강도 수준에서 측정된 최대 상대변위로 결정하고 최대 상대변위의 특성값  $\pm_{uk}$ 는 최대 상대변위  $\pm_u$ 의 최소값을 10% 줄인 값으로 한다. 제시된 방법으로 분석된 결과를 표 7에 정리하였다.

표 7. 스테드 전단연결재의 정적 특성값

스테드직경 (mm)	콘크리트 강도(MPa)	강도(kN)		연성(mm)	
		$P_{Rk}$	$P_{Rd}$	$\pm_u$	$\pm_{uk}$
25	35.4	125.5	96.9	6.07	5.5
25	49.3	158.8	122.6	6.33	5.7
27	35.4	156.1	120.5	8.12	7.3
30	35.4	168.1	129.7	7.76	7.0

현재의 설계규정과 비교하기 위하여 LRFD와 유로코드-4에서 제시하고 있는 스테드 전단연결재의 극한강도 평가식을 실험결과와 비교하여 그림 12에 나타내었다. 비교를 위하여 현재 설계 규정의 범위를 넘어가는 대직경이지만 설계 공식에 대입하여 산출한 값을 이용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 LRFD와 유로코드의 전단연결재 강도 평가식은 차이를 보이는데 이는 push-out부재와 실제 합성보에서의 전단연결재 거동의 차이를 보는 시각이 약간 다르기 때문이다(장승필 외 1999). 실험의 결과를 시방규정의 값들과 함께 그려본 결과 LRFD의 현재 설계식을 적용할 경우 전단연결재의 극한강도를 과다평가하고 유로코드-4의 평가식은 다소 큰 안전율을 갖지만 안전측의 결과를 나타내고 있다. 따라서, 대직경 스테드 전단연결재를 실제 교량에 적용하여 설계할 경우에는 유로코드-4에서 제시하고 있는 평가식이 적절하며 향후 좀 더 많은 실험적 연구를 통해서 일정한 안전율을 갖도록 극한강도 평가식을 대직경 스테드에 대해서 별도로 제시할 필요가 있다.

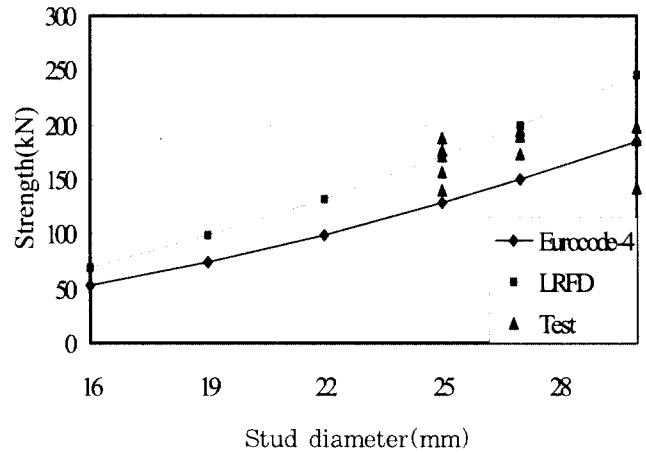


그림 12. 시방규정과 실험값 비교

## 6. 결론

현재의 전단연결재에 대한 설계 규정의 적용범위를 넘어서는 대직경 스테드에 대한 실험을 통해서 정적 거동을 평가하였다. 기존의 스테드 용접기를 그대로 적용하기 위해서 용접시험을 통해서 적절한 조건을 찾아서 용접하였고 이를 통해 제작된 표준 push-out 실험 부재에 대해서 정적 실험을 수행하였다. 실험결과로부터 판단할 때 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 27mm 스테드 전단연결재까지는 현재의 용접기로 충분히 용접가능하고 양호한 극한거동 및 연성거동을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.
- (2) 30mm 스테드 전단연결재는 용접기의 최대전류와 용접 시간 및 스테드 하단 모따기 정도를 조정할 필요가 있다.
- (3) 정적실험으로부터 탄성영역의 전단연결부 전단강성을 평가한 결과 기존의 제안식에 비해 전단강성이 상당히 높은 것으로 나타났고 극한 상대변위의 값은 유사하게 나타났다.
- (4) 극한 거동에서 대직경 스테드 전단연결재의 취성파괴에 대한 염려는 없는 것으로 판단된다.
- (5) 대직경 스테드 전단연결재의 극한강도에 대한 설계식은 유로코드에서 제시하고 있는 설계식이 안전측의 값을 주는 것으로 나타났다.

일정한 안전율을 갖는 전단연결재의 강도식을 제안하기 위해서는 추가적인 실험적 연구가 필요하고 강도설계와 더불어 피로설계를 위한 피로수명식이 실험을 통해서 제시되어야 한다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실(NRL)사업의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

장승필, 심창수, 윤석구(1999), 합성교량 스티드 전단연결부의 극한한계상태, 대한토목학회논문집, 제19권, 제 I-4호, pp.613~621.

Badie, S.S., Tadros, M.K., Kakish, H.F., Splittgerber, D.L., Baishya, M.C.(2002), Large Shear Studs for Composite Action in Steel Bridge Girders, *J. of Bridge Engineering*, Vol. 7, No. 3, May, pp.195-203

Eurocode 4 (1997): Design of composite steel and concrete structures, Part 2: Composite bridges (ENV 1994-2), CEN.

Maeda, Y and Matsui, S(1983), Effects of concrete placing direction on static and fatigue strengths of stud shear connectors. Tech. Rept. Osaka University, Vol.33, No. 1733, Oct., 397-406.

Mainstone, R. J., Menzies, J. B. (1967), Shear connectors in steel-concrete composite beams for bridges. 1: Static and fatigue tests on push-out specimens, *Concrete*, Sept., pp.291-302.

Menzies J. B. (1971), CP117 and shear connectors in steel-concrete composite beams with made

with normal-density and lightweight concrete, *Structural Engineer*, 49, Mar., pp. 137-153.

Oehlers, D.J. Bradford, M.A. (1995), *Composite Steel and Concrete Structural Members, Fundamental Behavior*, PERGAMON.

Oehlers, D.J. and Coughlan, C.G. (1986), The shear stiffness of stud shear connections in composite beams, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.6, 273-284.

Oehlers, D.J. and Johnson, R.P. (1987), The strength of stud shear connectors in composite beam, *The structural Engineer*.

Ollgaard J. G. et al (1971)., Shear Strength of stud connectors in light-weight and normal-weight concrete, *Engineering Journal of American Institute of Steel Construction*, 8, Apr., pp. 55-64.

Shim, C.-S., Kim, J.-H., Chung, C.-H. and Chang, S.-P. (2000), The Behavior of Shear Connection in Composite Beam with Full-Depth Precast Slab, *Structures and Buildings*, The Institution of Civil Engineers, Jan., Vol.140, pp.101-110.

Slutter, R.G., Driscoll, G.C. (1962), Test Results and Design Recommendations for Composite Beams, Fritz Engineering Laboratory, Lehigh University, Report 297.10.

(접수일자 : 2003. 8. 13 / 심사일 2003. 9. 5 / 심사완료일 2003. 10. 13)