

# 대직경 스티드 전단연결재의 피로거동

## Fatigue Behavior of Large Stud Shear Connectors

심 창 수<sup>1)</sup> · 이 필 구<sup>2)</sup> · 김 현 호<sup>3)</sup> · 윤 태 양<sup>4)</sup>

Shim, Chang Su Lee, Pil Goo Kim, Hyun Ho Yoon, Tae Yang

요 약 : 스티드 전단연결재는 강합성 구조에서 가장 많이 사용되는 전단연결재인데 현재는 주로 22mm 직경까지를 사용하고 있다. 시방 규정에서 제시하고 있는 적용범위의 확대를 위해서 25mm 이상의 대직경 스티드 전단연결재에 대한 연구가 필요하다. 현재의 전단연결재 설계 범위를 넘어서는 대직경 스티드 전단연결재에 대한 push-out 실험을 통해서 피로거동을 검토하고 기존 설계식과의 비교를 수행하였다. 25, 27, 30mm 직경의 스티드에 대한 전단실험을 통해서 탄성영역에서의 전단강성을 평가하여 정적 실험결과와 비교하였다. 피로 하중을 받는 대직경 스티드의 피로거동을 잔류 슬립과 하중-슬립 곡선으로 설명하였다. 용접부 피로균열의 발생시점을 변위진폭으로부터 유추하는 것이 타당한 것으로 밝혀졌다. 기존 시방규정의 S-N 곡선과의 비교를 통해서 대직경 스티드 전단연결재의 피로 수명은 현재의 설계 규정을 준용해도 무방한 것으로 나타났다.

ABSTRACT : Stud shear connectors are the most commonly used shear connectors; up to 22mm studs are usually used in steel-concrete composite structures. To expand the current design codes for stud connectors, large studs with a diameter of more than 25mm should be investigated. Through push-out tests on large stud shear connectors that transcend the limitation of current design codes, fatigue behavior was investigated and comparisons with design equations performed. The shear stiffness of the connectors in elastic range was evaluated through shear tests on 25mm, 27mm, and 30mm studs and compared with those from static tests. The fatigue behavior of large studs was discussed in terms of residual slip and load-slip curves. The initiation of fatigue cracks in the welding part could be detected through the history of displacement range. Test results showed that the design fatigue endurance of S-N curves in current design codes could be applied to large stud shear connectors.

핵심 용 어 : 대직경 스티드 전단연결재, 피로거동, 잔류 슬립, S-N곡선, 전단강성

KEYWORDS : large stud shear connector, fatigue behavior, residual slip, S-N curve, shear stiffness

### 1. 서 론

최근의 강합성교량의 주요 경향이 2거더교, 개구제형 강박스교량, 프리캐스트 바닥판 교량인데 이러한 형태의 교량의 합성작용을 확보하기 위해서는 스티드 전단연결재의 배치가 상대적으로 좁은 영역에서 이루어져야 하기 때문에 작업공간 확보나 상세 설계의 장애가 되고 있다. 또한, 향후 바닥판 교체시에 스티드 연결재의 조밀 배치는 제거 기간을 연장시키고 강거더의 상부플랜지 손상을 유발할 수 있다. 이러한 문제점을

개선하기 위해서는 작은 수의 전단연결재 배치를 가능하게 함과 동시에 연성을 가지는 형태의 전단연결재의 개발이 필요하다. 블록 형태의 전단연결재는 강도는 높지만 연성이 부족하여 콘크리트 바닥판에 문제를 유발할 수 있기 때문에 스티드 형태가 적합하다.

합성형 교량에서의 전단연결재의 거동을 규명하기 위한 실험적인 연구는 크게 두 가지 방법에 의존하고 있다. 첫째는 합성형 시험 공시체를 이용한 것이고, 또 다른 하나는 압발시험(push-out) 공시체를 이용한 것이다[Oehlers 등, 1999].

- 1) 정회원, 중앙대학교 토목공학과 전임강사, 공학박사  
(Tel. 031-670-4707, Fax. 03-675-1387, E-mail:csshim@cau.ac.kr)
- 2) 정회원, RIST 토목구조연구팀 선임연구원(pg289@rist.re.kr)
- 3) 정회원, 중앙대학교 토목공학과 박사과정(kimhh@ms.cau.ac.kr)
- 4) 정회원, RIST 토목구조연구팀장, 공학박사(tyoon@rist.re.kr)

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

이들 방법 중 합성보 시험 공시체가 합성형 교량에서 전단연결재의 실제 거동을 보다 정확히 보여주는 것으로 평가되고 있지만, 합성보 시험에서 전단연결재의 강도를 평가하기 위한 신뢰할 만한 방법은 아직 제시되어 있지 않다. 이는 보의 저항능력이 전단연결재에 민감하지 않기 때문에 보 전체의 거동에서 전단연결재의 부담분을 추출하기 어렵고, 설사 어느 한 전단연결재에 파단 등의 결함이 발생한다 해도 전단지간내 전단연결재들의 하중재분배로 인해 보 전체의 거동에 미치는 영향이 작기 때문이다. 압발시험 공시체는 보 공시체에서 전단연결재의 거동특성을 파악하기 어려운 단점을 보완하기 위해 고안된 것으로 압발시험 공시체에서 전단연결재에 작용하는 하중구조는 매우 단순하다. 기존에 수행된 연구결과에 의하면 압발시험 공시체로부터 얻은 시험결과가 보 시험 공시체에서의 시험결과에 비해서 안전측의 결과를 보이는 것으로 나타났다. 또한, 압발시험 공시체는 제작이 쉽고, 간편하여 작은 비용으로 많은 종류의 시험을 할 수 있다는 장점도 지니고 있다.

기존의 많은 연구자들에 의해 수행되었던 압발시험 공시체들의 형태가 상이한 점이 많았지만 이에 따른 실험결과와의 차이를 무시하고 모든 결과를 취합하여 현재의 설계 규정들이 제시되어 있기 때문에 최근에 이를 개선하기 위해 표준 시험체의 제안이 유로코드에서 이루어졌다[Eurocode 4, 1997]. 또한, 상당히 오래 전에 제시된 실험결과에 근거한 규정들의 경우 적용범위의 확대를 위한 연구들이 다양하게 전개되고 있는 실정이다. 따라서, 스테드 전단연결재에 대해서도 대직경 스테드에 대한 필요성이 증대되고 있어 이에 대한 설계 규정의 확대가 필요한 시점이다. 최근에 대직경 스테드에 대한 실험이 수행되어 일부 실험결과가 제시되었다[Badie 등, 2002].

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 피로 실험을 통해서 설계 항목의 근거가 되는 피로거동을 제시하고 S-N 곡선식을 제시하여 유로코드에서 제시하는 설계 규정과 비교 검토하였다.

## 2. 전단연결재 피로거동 및 설계 규정

전단연결재의 피로실험은 두 가지로 구분해 볼 수 있는데 하나는 현재의 설계 규정의 근거가 되는 피로수명 시험(endurance based test)으로 그림 1과 같이 일정한 응력범위( $R_1$  혹은  $R_2$ )를 갖도록 반복하중을 재하하여 파괴시점의 피로수명( $E_e$ )을 평가하는 것이다. 이 실험으로부터 S-N곡선

을 얻는데 피로수명은 오직 하중 범위에만 의존하고 최대하중과는 무관하다는 가정을 가지고 있다. 두 번째 피로실험은 잔류강도 시험(residual strength based test)으로 일정한 횡수의 반복하중을 재하한 후의 잔류강도를 평가하는 것으로 이로부터 파괴곡선을 얻을 수 있고 피로하중을 받은 전단연결재의 남아있는 강도를 평가할 때 유용하다. 하지만, 피로수명 시험에 비해서 상당히 많은 수의 실험이 필요하다는 단점이 있다.

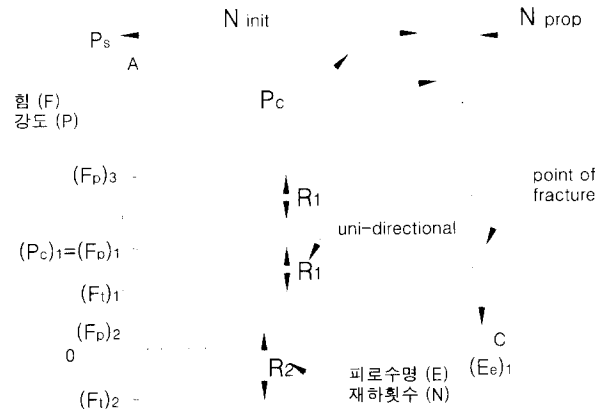


그림 1. 피로수명 실험

스테드 전단연결재의 피로 균열은 주로 용접목과 줄기의 경계에서 거의 수평으로 발생하는데 그림 2에 대표적인 스테드 피로 균열의 형태를 도시하였다. 균열면을 살펴보면 균열 앞부분의 거칠고 부드러운 부분은 피로균열 영역이고 피로 균열은 주로 스테드 앞면 줄기의 아래쪽 끝단에서 시작된다. 피로하중을 받으면 균열 선단이 위로 이동하여 수평을 유지하는데 균열 선단이 위로 이동함에 따라 남아있는 단면이 줄어들어서 강도가 감소하게 된다. 파단은 남아있는 비균열 단면이 더 이상 피로하중의 최대하중을 견딜 수 없을 때 발생한다. 이 형태의 균열이 그림 2의 첫 번째 균열 형태이다.

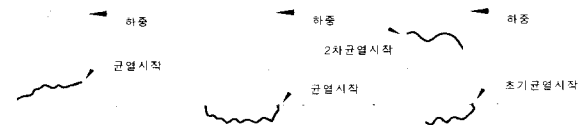


그림 2. 스테드 피로균열

사용하중에서 스테드 전단연결재의 하중-상대변위 곡선은 그림 3에서와 같이 선형으로 가정된다. 스테드 전단연결재에 처음 하중이 가해지면 선형거동을 보이면서 경로 O-A를 따른다. 하중을 제거하면 경로 A-B를 따르게 되고 영구 변형(permanent set) O-B가 생기게 된다. 다시 하중을 가하면 처음에는 변위를 어느 정도 발생시키다가 하중에 저항하기 시작하면서 초기에 도달한 점 A까지 도달하게 된다. 하중이 F1

에서 F2로 증가하면 전단연결재는 원래의 정적 거동 경로인 A-C를 따라 가게 되고 하중을 제거하면 좀 더 영구 변형이 증가된 점 D로 가게 된다.  $K_{si}$ 는 초기 전단강성을 의미하고  $K_{tc}$ 는 이후의 전단강성을 나타낸다.

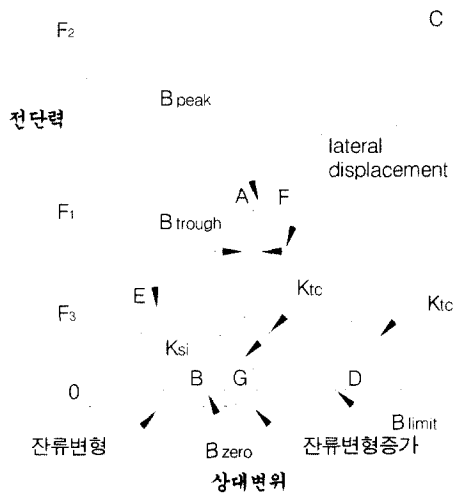


그림 3. 스테드 전단연결재의 하중-상대변위

유로코드-4에서 제시하고 있는 스테드 전단연결재의 피로 강도 곡선은 식 (1)과 같은데 여기서 피로 강도는 그림 4의 곡선을 따른다(Eurocode-4, 1997).

$$\log N = \log a - m \log \Delta \tau_R \quad (1)$$

여기서, N은 하중반복횟수, m은 피로강도 곡선의 기울기로 8의 값을 쓰고 a는 상수로  $\log a = 22.123$ 이다.

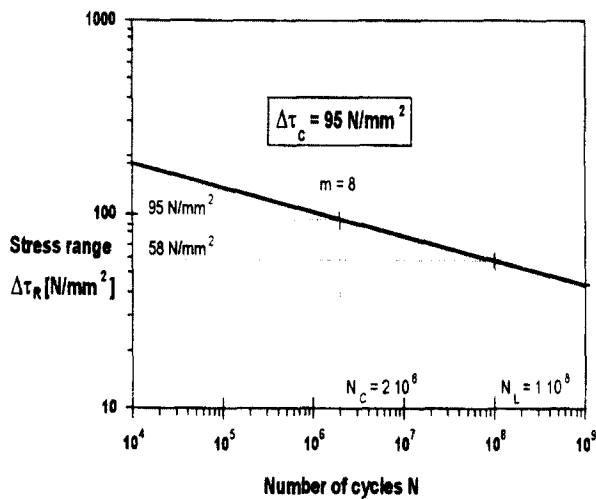


그림 4. 스테드의 피로강도 곡선

### 3. 실험적 연구

#### 3.1 실험 부재 및 재료 성질

전단연결부는 구조물의 형태와 기능에 따라 다양하게 설계 될 수 있지만 이를 현재의 시방규정이 모두 포함할 수는 없다. 따라서 새롭게 제안되어 사용하고자 하는 전단연결부들에 대한 일관성 있는 시험 방안이 제시되는 것이 바람직하다. 실험에서 다루어지는 주된 변수는 콘크리트 슬래브, 전단연결재, 그리고 철근의 역학적 특성값들이다.

이 논문에서 제시하고 있는 실험 시편은 유로코드-4에 제시된 표준 push-out 실험 시편을 근거로 했는데 설계 규정상 콘크리트 슬래브의 두께는 조정될 수 있고 슬래브의 길이는 전단연결재의 배치 간격과 연관되어야 하며 폭은 합성보에서의 유효폭을 넘지 않아야 한다. 또한 슬래브 두께는 합성보에서 최소 두께를 넘지 않아야 한다. 시편의 제작시 콘크리트 타설방향은 실제와 동일하게 이루어져야 하고 부착의 영향을 배제하기 위해서 강형과 콘크리트 사이에 그리스 등을 도포하여 부착을 방지해야 한다. 사용되는 전단연결재의 소재는 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 5에 실험부재의 제원을 나타내었다. 또한, 표 1에 이 연구에서 수행한 실험부재에 대한 요약을 제시하였다.

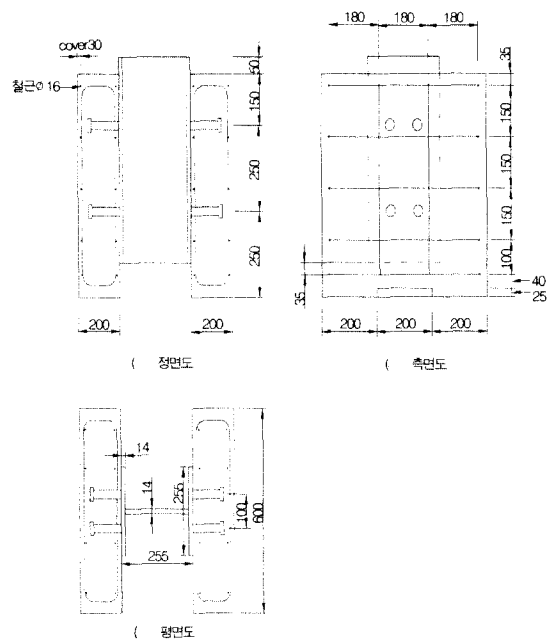


그림 5. 실험부재

표 1. 실험부재 요약

부재명	스터드직경 (mm)	실험종류	콘크리트 설계강도	응력범위 (MPa)
FT25-A1	25	Fatigue	30MPa	100.0
FT25-A2	25	"	"	150.0
FT25-A3	25	"	"	170.0
FT25-B1	25	Fatigue	40MPa	130.0
FT25-B2	25	"	"	150.0
FT25-B3	25	"	"	177.3
FT27-A1	27	Fatigue	30MPa	128.4
FT27-A2	27	"	"	150.0
FT27-A3	27	"	"	170.0
FT30-A1	30	Fatigue	30MPa	130.0
FT30-A2	30	"	"	150.0
FT30-A3	30	"	"	156.1

대직경 스테드 사용시 품질관리에서 가장 중요한 부분이 용접이라고 할 수 있다. 스테드 건을 이용한 용접은 순간적으로 높은 전류를 이용해서 스테드의 아래 부분을 녹여서 붙이는 것이기 때문에 현재 일반적으로 사용되고 있는 용접기의 최대 용량을 기준으로 했을 때 25mm 직경까지는 용접이 무난하고 그 이상의 직경에 대해서는 적절한 전류와 시간을 찾기 위한 시험이 필요했다. 용접시험을 통해서 2300A~2400 A의 최대전류를 사용하고 용접시간을 기존의 22mm 이하 스테드 용접보다 길게 1.3초 내외로 조정하여야 45도 굽힘 시험의 기준을 통과하는 품질의 용접을 얻을 수 있었다(이필구 등).

용접시험이 완료된 후 push-out 시험의 반쪽 T형보에 스테드를 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. 하중재하를 위한 재하판을 플랜지 절단면에 용접하여 균등한 하중 분배를 가능하도록 하였다.

### 3.2 재료성질 및 측정

실험의 대상이 되는 스테드 전단연결재의 소재는 SS400을 사용하였고 그 인장시험을 스테드 제작 전에 수행하였다. 세 개의 시편에 대한 실험 결과 평균 인장강도는 426MPa이고 연신율은 34%를 나타내어 스테드 재료로 사용되기에 적합한 것으로 판단되었다.

실험시편을 위한 콘크리트의 설계강도는 각각 30MPa, 40MPa이었다. 표준양생 28일 압축강도는 각각 6개씩의 시험을 수행하였고 정적실험을 수행하는 시기에 실험부재와 동일한 조건에서 대기 양생된 시편에 대해 압축강도 시험을 수행하였

다. 각각의 시험결과를 표 2에 평균값으로 정리하였다.

표 2. 콘크리트 재료성질

실험시기	A series(30MPa)	B series(40MPa)
28일 표준양생	33.2	45.3
피로실험시기/대기양생	35.5	46.8

피로실험은 1000 kN 피로시험기를 이용하여 수행하였고 실험부재 하면의 하중 분산을 원활히 하기 위해서 석고를 이용하여 수준을 조절하였다. 상대변위의 측정은 상부 스테드 위치인 상면에서 150mm 떨어진 위치에 4개의 1/1000mm 정밀도의 LVDT를 각각 설치하였다. 실험장면을 그림 6에 나타내었다. 피로하중은 하한값을 50kN으로 고정하고 표 1에서 주어진 응력범위를 갖도록 상한값을 설정하여 반복하중을 재하하였다.

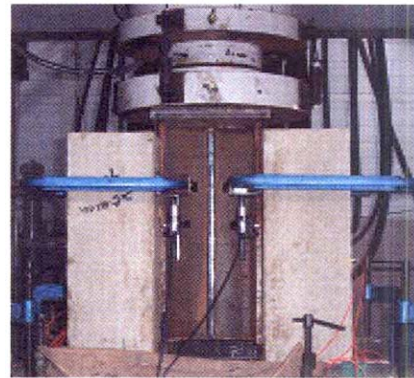


그림 6. 실험장면

## 4. 대직경 스테드 전단연결재의 피로거동

스터드 전단연결재의 피로거동은 탄성영역에서의 전단강성을 정적실험 결과와 비교하여 실험의 신뢰성을 높이고 하중-상대변위 곡선의 변화로부터 피로거동을 검토하였다. 또한, 피로파괴의 형태를 분석하고 실험에서 구한 피로수명을 설계 규격과 비교하였다.

### 4.1 초기 전단 강성 평가

수행된 대직경 스테드 전단연결재에 대한 정적실험으로부터 전단력이  $0.5 D_{max}$  에서의 상대변위로부터 초기 전단강성 ( $K_{sj}$ )을 평가하였는데[이필구 등, 2003] 피로 실험에서도 초기 재하시 피로하중 범위의 최대 하중까지 재하한 하중-상대변위 관계로부터 이를 비교하여 전단강성의 신뢰도를 높였다. 스테드 직경이 동일하고 콘크리트의 압축강도가 유사하기

때문에 표 3에서 나타낸 바와 같이 직접 비교가 가능하여 이를 평균하여 새로운 초기 전단강성 값을 제시하였다. 대직경 스티드 전단연결부에 대한 전단강성을 수식화하기 위해서는 좀 더 많은 실험이 필요하지만 전단강성의 변동성을 고려하면 제시된 값을 해석에서 사용해도 무방할 것으로 판단된다. Oehlers에 의해 제시된 전단강성 수식(Oehlers, 1999)의 결과를 대직경 스티드에 대해 그대로 적용하여 실험결과와 비교하면 그림 7과 같은데 대부분의 실험결과가 상한 95% 특성 값 근처에 분포하는 것을 알 수 있다. 25mm 스티드에 대해서 콘크리트 강도가 큰 B시리즈의 강성이 크게 나온 것은 콘크리트 지압부의 저항증가로 예상된 결과였으나 30mm 스티드의 경우에는 스티드 직경별 경향과 차이를 보여주고 있어 직경에 따른 일반화된 전단강성 경험식을 제시하는 것은 무리가 있다. 초기 전단강성을 전단강도의 50% 수준에서 결정할 때 스티드의 직경이 증가할수록 지압부 콘크리트에 작용하는 하중이 크기 때문에 선형구간으로 보기 어려울 수 있다. 따라서, 대직경 스티드의 경우는 초기 전단강성의 산정을 이보다 낮은 수준의 하중에서 결정하는 것이 바람직할 것이다.

표 3. 초기 전단강성

	전단강성(kN/mm)		평균값(kN/mm)
	정적실험	피로실험시 정적1회	
FT25-A1	231	303	278
FT25-A2	272	277	
FT25-A3	322	263	
FT25-B1	356	268	326
FT25-B2	400	332	
FT25-B3	343	254	
FT27-A1	396	331	327
FT27-A2	298	301	
FT27-A3	331	303	
FT30-A1	*	336	305
FT30-A2	306	265	
FT30-A3	279	337	

### 4.2 피로거동

대직경 스티드 전단연결재의 피로실험에서는 모든 부재가 전단연결재 파단에 의한 피로파괴를 보여주었다. 대부분의 실험부재가 기존의 피로실험에서 보여주는 파괴 단면 양상을 보여주었는데 그림 8에 나타난 바와 같이 몇몇 부재의 경우 피로 파괴가 강재 단면 플랜지 내로 진전되어 플랜지가 스티드와 함께 떨어지는 모습을 보여주었다. 이는 용접 조건을 설정하면서 대직경 스티드의 경우 용접시 전류의 크기와 용접시간이 기존의 스티드에 비해 많아서 플랜지 부분의 용융 정도가 더 많았기 때문으로 판단된다.

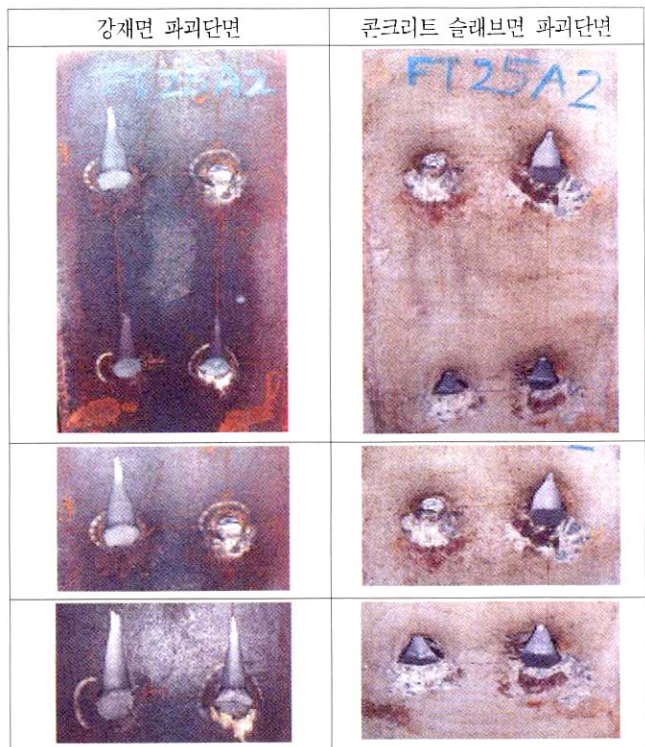


그림 8. 피로파괴 단면

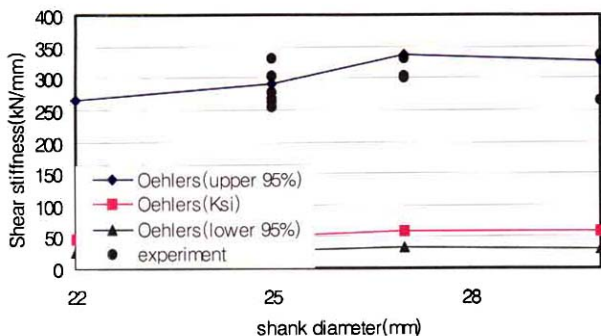
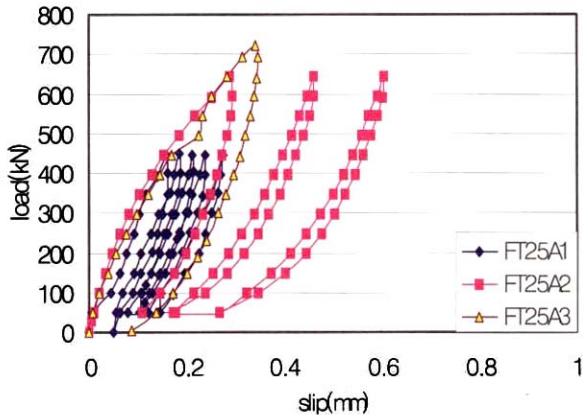


그림 7. 대직경 스티드의 전단강성

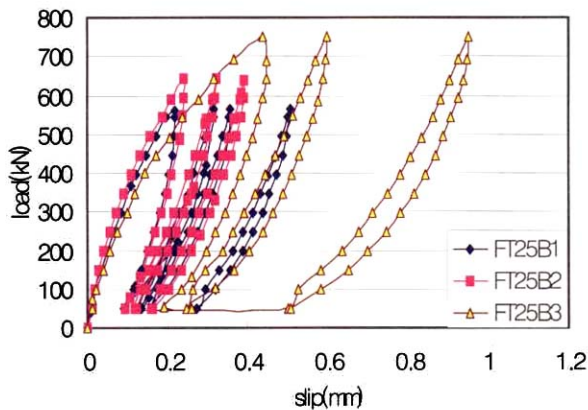
피로실험에서 일정횟수의 피로 하중 재하 후에 정적으로 피로하중의 최대값까지 재하하여 거동을 측정하였다. 이는 로그 단위로 재하된 피로하중에 의한 손상정도를 정적실험을 통해서 확인하는 절차이다. 이 때 측정된 하중-상대변위 곡선을 각 실험 종류별로 그린 것을 그림 9에 나타내었다. 그래프에서 좌측부터 우측으로 1회, 100회, 1000회 등으로 로그 단위로 증가되면서 표시된 하중-변위곡선이다. 최초의 정적재하 때의 곡선과 피로하중을 재하하고 정적으로 다시 재하할 때의 곡선의 형상이 하중 증가에 따라 기울기가 커지는 형태를 보이는 것은 초기 재하에서 지압부 콘크리트의 일부 손상으로 인해 어느 정도 변형을 일으킨 후 손상되지 않은 콘크리트가 지압

역할을 하기 시작하면서 전단강성이 증가하기 때문이다.

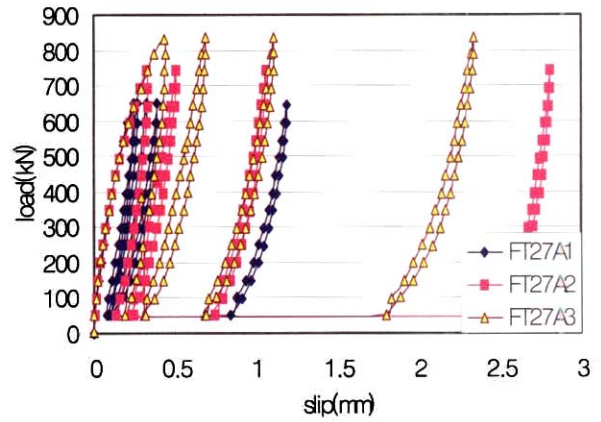
스터드 전단연결부에 대한 피로실험에서 손상의 정도를 평가할 때 잔류 상대변위의 크기를 보거나 동일하중에서 최대 상대변위의 크기를 비교한다. 그림 10에 피로반복재하 실험 후에 각각 실시한 정적실험에서 구한 최대 상대변위의 이력을 나타내었는데 재하하중의 범위가 클수록 상대변위가 급격히 증가되는 시점이 빠른 것은 그만큼 피로수명이 낮다는 것을 설명해준다. 그래프의 기울기가 완만하게 증가하는 구간은 지압부 콘크리트의 부분적인 손상의 증가로 판단할 수 있고 그래프가 급격하게 증가되기 시작하는 것은 스테드 용접부의 균열이 발생하여 진전되기 시작함을 의미한다. 스테드 균열의 발생시점을 좀 더 명확히 판정하기 위해서는 가력장치의 변위 진폭을 관찰하면 알 수 있다. 이는 하중재하가 하중제어에 의한 것이기 때문에 일정한 하중 폭을 가지고 재하되어 손상이 발생할 경우에 변위 진폭이 증가하기 때문이다. 그림 11에 재하시험기로부터 기록된 일정 하중 범위를 가력했을 때의 변위진폭을 나타낸 그래프를 도시하였다. 이 측정결과에서 좀 더 명확하게 스테드 용접부 균열의 발생시점을 유추할 수 있다.



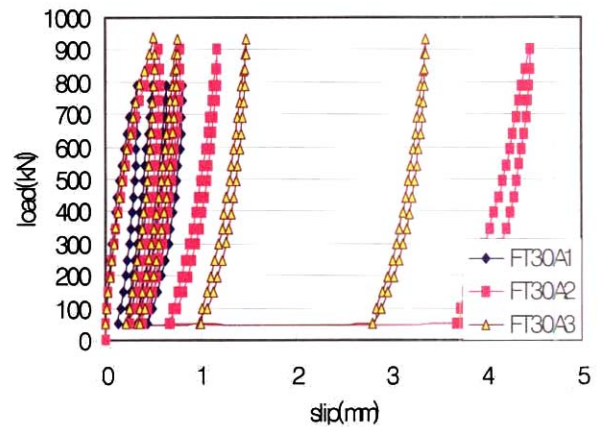
(a) 25mm A series



(b) 25mm B series



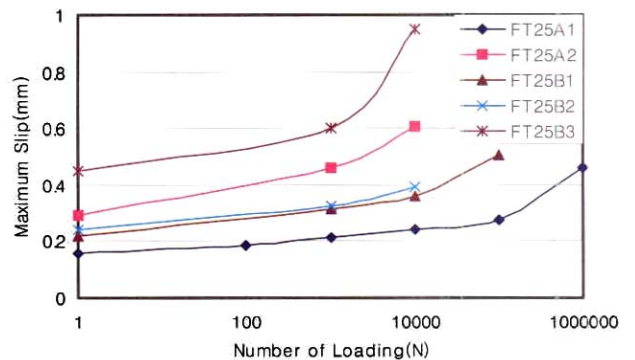
(c) 27mm



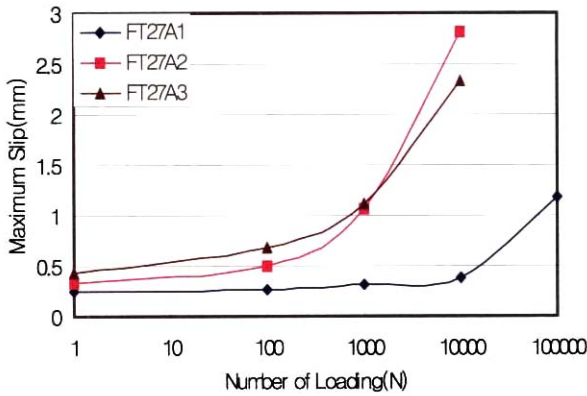
(d) 30mm

그림 9. 하중-상대변위 곡선

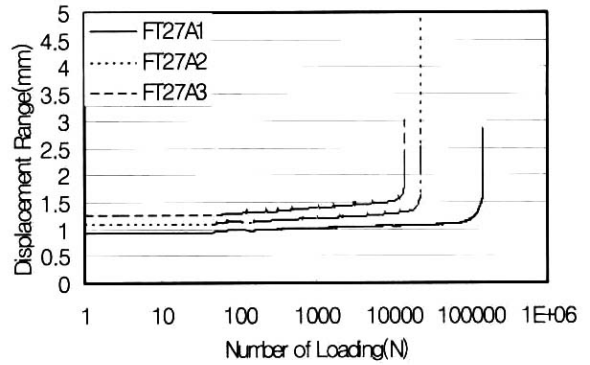
지압부 콘크리트의 부분적인 파쇄는 지속적으로 변위진폭을 일정수준으로 증가시키고 용접부 균열의 발생은 이러한 증가폭을 키우게 된다. 이를 근거로 변위진폭이 변하는 시점을 용접부 균열의 발생시점으로 판단하여 정리한 것을 표 4에 나타내었다.



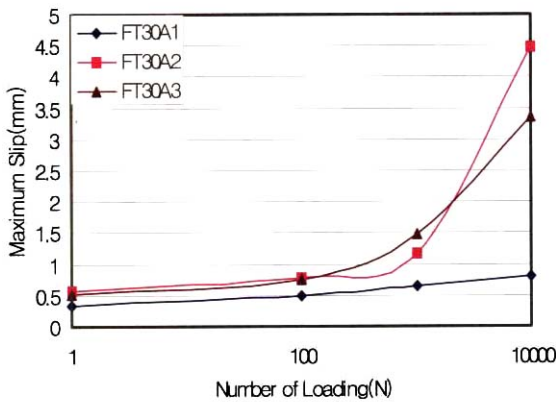
(a) 25mm 스테드



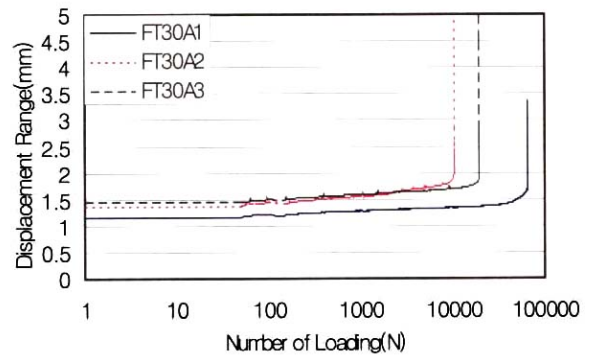
(b) 27mm 스테드



(b) 27mm 스테드 변위범위 이력



(c) 30mm 스테드

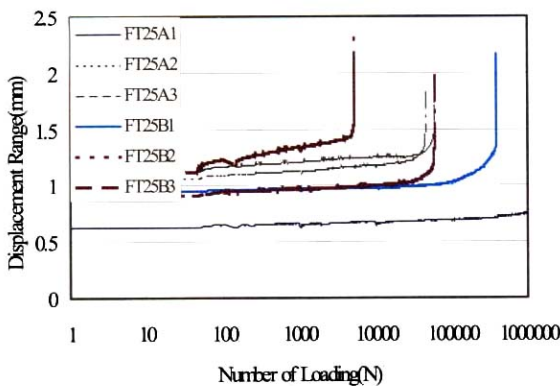


(c) 30mm 스테드 변위범위 이력

그림 11. 가력기의 변위범위 이력곡선

그림 10. 최대 상대변위 이력곡선

피로파괴의 시점은 파괴 발생시 가진기가 자동적으로 멈추게 되고 이때의 하중 재하 횟수를 기록한 값이다. 이로부터 판단할 때 피로실험에서 하중범위가 일정오차 이내로 제어될 때 변위진폭으로부터 심각한 손상의 발생시점을 좀 더 명확하게 예측할 수 있을 것이다.



(a) 25mm 스테드 변위범위 이력

표 4. 균열발생시점

부재명	응력범위 (MPa)	정적데이터 (그림 10)	변위진폭 (그림 11)	파괴시점
FT25-A1	100.0	100만회 정도	*	2133970
FT25-A2	150.0	1만회 정도	43000	44827
FT25-A3	170.0	*	57000	60000
FT25-B1	130.0	10만회 정도	359000	387209
FT25-B2	150.0	1만회 정도	60000	61063
FT25-B3	177.3	1만회 정도	5000	5320
FT27-A1	128.4	10만회 정도	141000	142641
FT27-A2	150.0	1만회 정도	20000	22488
FT27-A3	170.0	1만회 정도	13000	13766
FT30-A1	130.0	*	61000	75484
FT30-A2	150.0	1만회 정도	10000	10436
FT30-A3	156.1	1만회 정도	19000	19333

실험에서 구한 전단응력 범위에 따른 피로수명을 식 (1)에서 제시한 유로코드의 설계식과 비교를 수행하여 표 5에 정리하였다. 실험결과에서 알 수 있듯이 대체로 기존의 설계식과 유사한 결과를 보여주고 있지만 모두 안전측에 속하지 않기 때문에 기존의 피로설계식을 다소 수정할 필요가 있다. 이는

특히 30mm 스테드의 경우 설계식에 비해 낮은 피로수명을 나타내었다.

표 5. 피로실험 결과

부재명	응력범위 (MPa)	피로반복횟수		Log(①) / Log(②)
		실험-①	유로코드-②	
FT25-A1	100.0	2133970	1341000	1.03
FT25-A2	150.0	44827	52323	0.99
FT25-A3	170.0	60000	19224	1.12
FT25-B1	130.0	387209	164392	1.07
FT25-B2	150.0	61063	52324	1.01
FT25-B3	177.3	5320	13609	0.90
FT27-A1	128.4	142641	179258	0.98
FT27-A2	150.0	22488	52228	0.92
FT27-A3	170.0	13766	19060	0.97
FT30-A1	130.0	75484	162300	0.94
FT30-A2	150.0	10436	51841	0.85
FT30-A3	156.1	19333	37746	0.94

### 5. 대직경 스테드 전단연결재의 피로 설계

피로실험에서 구한 응력범위와 피로수명과의 관계를 식 (1)에서 제시한 유로코드의 설계식과 비교하면 그림 12와 같다. 그림에서 볼 수 있듯이 기존의 피로설계에서 제시하고 있는 S-N 곡선과 평균적인 의미에서 상당히 잘 일치하는 것을

보여주고 있다. 따라서, 실험에서 수행한 30mm 직경까지의 스테드 전단연결재의 피로설계는 기존 시방규정을 적용해도 무방하다. 다만, 시방규정에서 요구하는 일정한 안전율을 확보하기 위해서 필요한 S-N 곡선은 확률론적인 접근이 필요하기 때문에 추가적인 실험을 통한 정량적 분석이 요구된다.

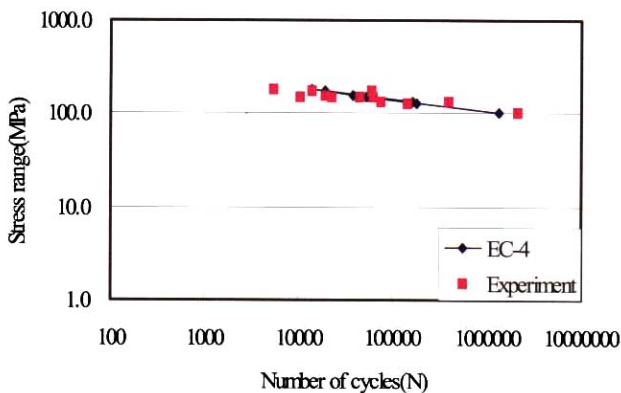


그림 12. 시방규정과 실험값 비교

### 6. 결 론

현재의 전단연결재에 대한 설계 규정의 적용범위를 넘어서는

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

- (1) 스테드 전단연결부의 피로손상은 지압부 콘크리트의 손상과 용접부 균열로 구분할 수 있는데 용접부 균열 시점은 일정하중범위에서 변위진폭으로부터 좀 더 명확하게 구할 수 있다.
- (2) 피로실험으로부터 구한 피로수명은 유로코드에서 제시하고 있는 S-N 곡선의 값과 매우 유사한 결과를 보여주었다.
- (3) 30mm 직경까지의 대직경 스테드 전단연결재의 피로 설계는 용접의 신뢰성을 확보하기 위한 추가 실험을 통한 확률론적인 분석에 기반하면 기존 시방규정을 적용해도 무방하다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌

이필구, 심창수, 윤태양(2003), 대직경 스테드 전단연결재의 정적거동, 한국강구조학회 논문집, 제출

D. J. Oehlers (1992), Residual strength of structural component subjected to cyclic loads, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.118, No. 10, 2645-2659.

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

D. J. Oehlers, M. A. Bradford (1999), *Elementary Behaviour of Composite Steel & Concrete Structural Members*, Butterworth-Heinemann.

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

(접수일자 : 2003. 9. 17 / 심사일 2003. 9. 24 / 심사완료일 2003. 10. 31)