

# 이중합성 2거더 연속 철도교의 부모멘트부 거동

## Behavior of Negative Moment Region of Continuous Double Composite Railway Bridges

심 창 수<sup>1†</sup> . 김 현 호<sup>2)</sup> . 윤 광 중<sup>3)</sup>

Shim, Chang Su Kim, Hyun Ho Yun, Kwang Jung

**요약 :** 2거더 철도교량의 사용성, 특히 부모멘트 영역의 휨강성을 증대시키기 위해서 이중합성단면이 제안되었다. 이 논문에서는 제안된 이중합성구조를 갖는 5m-5m의 연속 2거더 교량 모델에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 교량 모델에 대한 실험적 연구를 통해서 유효폭, 전단연결부, 이중합성단면의 극한강도에 대한 설계 고려사항을 연구하였다. 하부 콘크리트 바닥판의 전단연결부는 완전합성 거동을 나타내어 제안된 경험식의 타당성을 검증하였다. 이중합성단면의 휨거동을 통해서 하부 콘크리트 슬래브의 유효폭은 압축을 받는 콘크리트 슬래브의 유효폭으로 계산될 수 있다. 교량모델의 극한 휨 강도 평가에서 이중합성단면의 완전소성해석이 타당함을 밝혔다. 실험결과에 근거한 설계사항들이 제안되었다.

**ABSTRACT :** This study proposes a double-composite section to enhance the serviceability of twin-girder railway bridges, especially in terms of the flexural stiffness of the composite section in negative-moment regions. This paper deals with experiments on continuous twin-girder bridge models with 5m-5m span length with the proposed double-composite action. From results of static tests on the bridge models, several design considerations were investigated including effective width, shear connection and ultimate strength of the double-composite section. The behavior of the shear connection in the bottom concrete slab showed full shear connection, which verified the suggested empirical equation. From the flexural behavior of the double-composite section, the effective width of the bottom concrete slab can be evaluated as that of the concrete slab under compression. The ultimate flexural strength of the bridge models verified the validity of the rigid plastic analysis of the double-composite section. Design guidelines were suggested based on the test results.

**핵심 용어 :** 이중합성단면, 연속2거더 교량, 전단연결부, 극한휨강도, 유효폭

**KEYWORDS :** double composite section, continuous twin-girder bridge, shear connection, ultimate flexural strength, effective width

### 1. 서 론

두 가지 이상의 재료를 혼합하여 적용함으로써 단일 재료가 갖는 단점을 보완하고 그들의 장점이 최대한 발휘될 수 있도록 유도한 복합구조는 건축물은 물론 토목구조물에 대한 적용도 매우 활발한데 특히 교량에 활용함으로써 경제성과 구조적 효율성을 향상시킨 형태의 교량형식을 출현하게 하고 있다. 이러한 합성 교량은 가장 일반적인 합성 거더교에서부터 국내에서도 많이 적용된 프리플렉스 빔은 물론, 합성아치교와 합성라멘

교 등 많은 형태의 교량들로 발전하고 있다. 이러한 합성 교량은 유럽과 일본 등을 중심으로 발전하여 왔지만 최근에 국내에서도 이에 대한 기술개발과 설계가 지속적으로 이루어지고 있다. 장경간 강합성 교량에 관한 가장 주목할 만한 것은 이중합성교량과 복합트러스교, 파형강판 복부교량과 같은 복합교량이라고 할 수 있다.(김광수 등, 2004)

그러나 기존의 강합성 교량은 연속교의 내부 지점부와 같은 부모멘트 구간에서는 AASHTO LRFD(2004)나 Eurocode4 (1994, 2002)에서 규정하고 있는 합성단면의 조밀단면과 등

1) 교신저자, 정회원, 중앙대학교 토목공학과 조교수, 공학박사  
(Tel. 031-670-4707, Fax. 031-675-1387, E-mail: csshim@cau.ac.kr)

2) 정회원, 중앙대학교 건설환경연구소 전임연구원(hhkim@wm.cau.ac.kr)

3) 학생회원, 중앙대학교 토목공학과 공학석사(yun77man@wm.cau.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2006년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

급 1, 2인 경우에 소성모멘트를 발휘할 수 있어야 하고 복부판과 하부플랜지에 좌굴 발생 가능성이 크기 때문에 강재단면이 커지거나 변단면을 적용하고 있다. 또한 철도교의 주요 설계인자인 사용성 측면에서 콘크리트교에 비해 단점이 있기 때문에 현재 국내 고속철도교에 강합성 교량이 적용된 예는 매우 드물다.

이에 국내 고속철도교에 2거더 강합성교의 적용에 관련하여 개선사항에 대한 설계 및 실험적 연구가 진행되고 있다. 2거더 강합성 철도교는 차량의 편재하와 곡률에 대한 저항성이 떨어지고 압축을 받는 단면의 판좌굴로 인해 극한한계상태에서 탄소성 설계에 제약을 가지게 된다. 이러한 단점들을 보완하기 위해 부모멘트 구간에서 합성단면의 휨강성을 증대시키고 전경간에 걸쳐서 소요 비틀강성을 얻을 수 있는 이중합성구조가 적절한 단면으로서 사용되고 있다.

이중합성 구조는 상부바닥판과 강거더 상부플랜지와의 합성과 더불어 하부바닥판과 강거더 하부플랜지를 합성시켜 새로운 전단연결부를 형성하게 되는 구조이다. 변단면을 갖는 거더의 경우 주 경간의 1/5정도 내에는 하현이 압축을 받게 된다. 이 영역에서의 고정하중의 증가는 하중계수법을 사용한 설계에서 지속하중에 대한 하중계수가 작기 때문에 내부 지점부의 모멘트에 미치는 영향은 적고 휨강성의 증대효과를 가져올 수 있다.

이중합성 구조를 채용함으로써 얻어지는 장점으로는 경간의 증대, 강재의 감소를 통한 경제적 단면, 철도교의 처짐에 대한 허용치의 확보, 현장용접 작업량 감소, 단면의 중립축이 하부로 이동하면서 조밀단면의 확보와 하부플랜지와 복부판의 좌굴 방지효과 등이 있다.(大山里 등, 2000)

그림 1에 본 연구에서 제안한 이중합성 단면을 나타내었다.

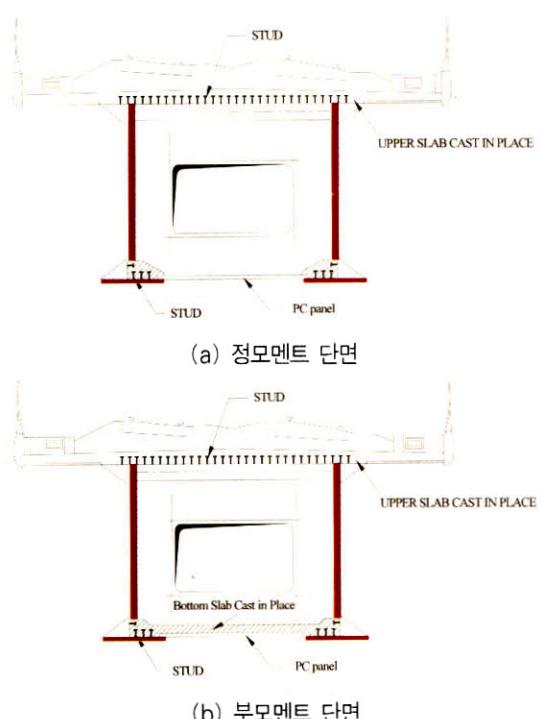


그림 1. 제안된 이중합성 단면

그림 1에서 나타나듯이 이중합성 구조의 하부바닥판 전단연결부에는 기존의 합성형 단면과는 달리 강거더의 복부판에 수평스터드(lying stud)가 배치되는 경우가 발생하면서 수직 및 수평스터드가 혼합 배치되는 복합스터드 전단연결부가 만들어진다. 김현호 등(2005)은 수평 및 복합스터드 전단연결부에 대한 극한거동을 압발실험을 통해 평가하였다. 수평스터드의 경우에는 설계에서 파괴모드가 바닥판의 쪼개인 경우에 정적강도가 상당히 낮은 수준으로 평가되었고 변형능력도 현저하게 감소하는 것으로 나타났으며 파괴모드가 스터드 파단인 경우에

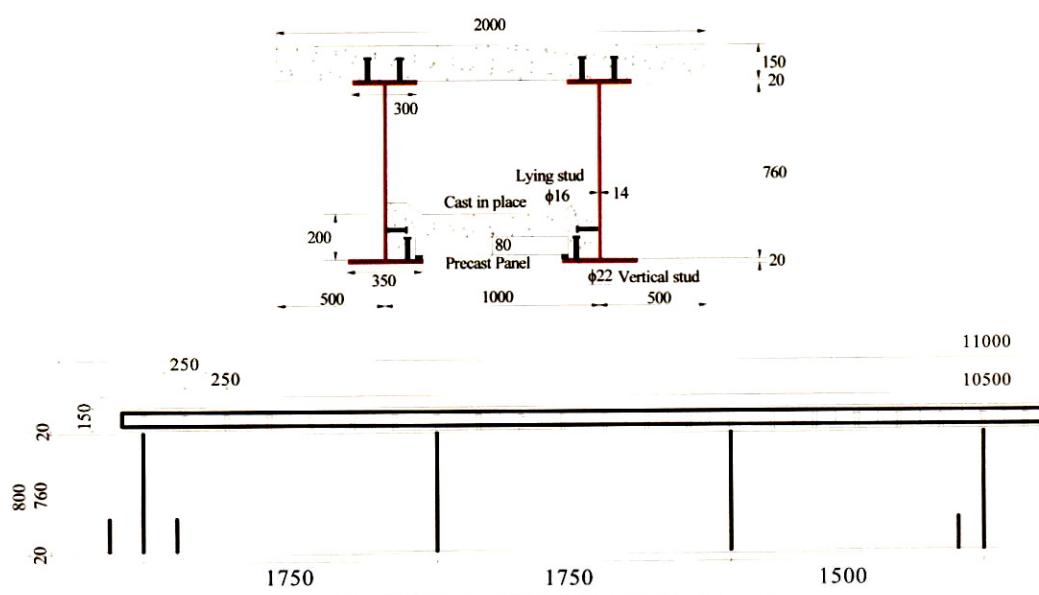


그림 2. 이중합성 연속교 실험부재 상세(unit:mm)

는 기존의 설계식보다 다소 낮은 정적강도를 보였지만 충분한 연성능력을 갖고 있는 것으로 평가되었다. 또한 복합스터드의 경우에는 설계시 바닥판의 파괴가 유도되지 않도록 콘크리트 강도와 철근 배근을 결정해야 하고 스터드 파단이 파괴모드인 경우에는 제안된 수평스터드 강도 평가식과 설계기준에서 제시하고 있는 수직스터드 설계식을 단순하게 합산하여 평가할 경우에 20% 정도의 안전율을 확보할 수 있는 것으로 나타났으며 수평 및 복합스터드의 정적강도 평가식을 제안하였다.

본 연구에서는 수행된 압발실험에서 제안한 수평 및 복합스터드의 정적 강도 평가식의 검증과 하부바닥판 전단연결부에 대한 완전합성 거동 및 이중합성 단면의 극한강도를 2경간 연속교 모델의 정적실험을 통해 평가하였다.

## 2. 실험적 연구

### 2.1 실험 부재

이중합성 단면의 비탄성 거동 및 하부 콘크리트 바닥판 전단 연결부의 거동 평가를 위해 2개의 이중합성 2거더 교량 모델을 제작하였다. 실험에 적용된 이중합성 2거더 연속 합성교량 모델의 단면 형상은 그림 2와 같다. 교량모델은 2경간 연속교로서 길이는 10m이고 거더의 높이는 800mm이다. 상부 바닥판은 폭 2,000mm, 높이 150mm이고 단면의 하부에는 두께 80mm의 프리캐스트 패널을 거더의 사이에 배치하여 하부바닥판 타설 시 거푸집과 수평브레이싱의 역할을 대체할 수 있도록 하였다. 하부바닥판의 타설 높이는 내부지점 부모멘트 구간에 200mm로 하였다. 상부바닥판과 상부플랜지의 연결에 사용된 전단연결재는 22mm 스티드를 사용하였고, 하부바닥판

표 1. 실험 부재 특성

부재	단면구성	철근상세
DCTG1	전단면 - SM490	상부바닥판 철근비 - 2% 하부바닥판 전단철근 무보강
DCTG2	플랜지 - SM520 복부 - SM400	상부바닥판 철근비 - 1.4% 하부바닥판 전단철근 보강

전단연결부에는 수평스터드 16mm, 수직스터드 22mm의 복합스터드 배치를 하였다.

실험 부재는 상·하부 플랜지 및 복부판에 SM490 강재를 적용한 이중합성 2거더 고속철도교 연속보와 상·하부 플랜지에는 SM520 강재를 적용하고 복부판에는 SM490 강재를 적용한 하이브리드 이중합성 2거더 고속철도교 연속보의 2가지로 구성되었다.(심창수 등, 2005) 바닥판의 철근비는 현행 2.0% 설계기준과 균열폭제어를 위해 필요한 정도의 철근비 1.4%를(심창수 등, 2005) 반영하였다. 교량 모델의 설계는 이미 수행된 실험적 연구로부터 구한 복합스터드 전단연결부의 강도 특성을 이용하여 강도설계에 의해 완전합성보로 하였다. 표 1에 실험부재의 특징을 기술하였다.

실험부재의 제작과정은 그림 3에 나타내었다. 먼저 그림 3(a)와 같이 프리캐스트 패널을 제작한다. 강재 거더의 상부플랜지에 스터드 전단연결재를 용접하고 하부플랜지와 복부에 복합스터드 배치를 하는 것을 그림 3(b)에 나타내고 있다. 탄성재를 배치한 강재 거더의 하부 플랜지의 사이에 프리캐스트 패널을 그림 3(c)에 나타낸 것과 같이 전 구간에 걸쳐 거치한다. 다음으로 그림 3(d)에 보이는 것처럼 부모멘트 구간에는 200mm 높이로 현장 타설을 하고, 정모멘트 구간에는 강재 거더와 프리캐스트 패널의 연결부에만 부분 타설을 하여 하부바닥판을 구성한다. 마지막으로 그림 3(e)에 나타낸 바와 같이

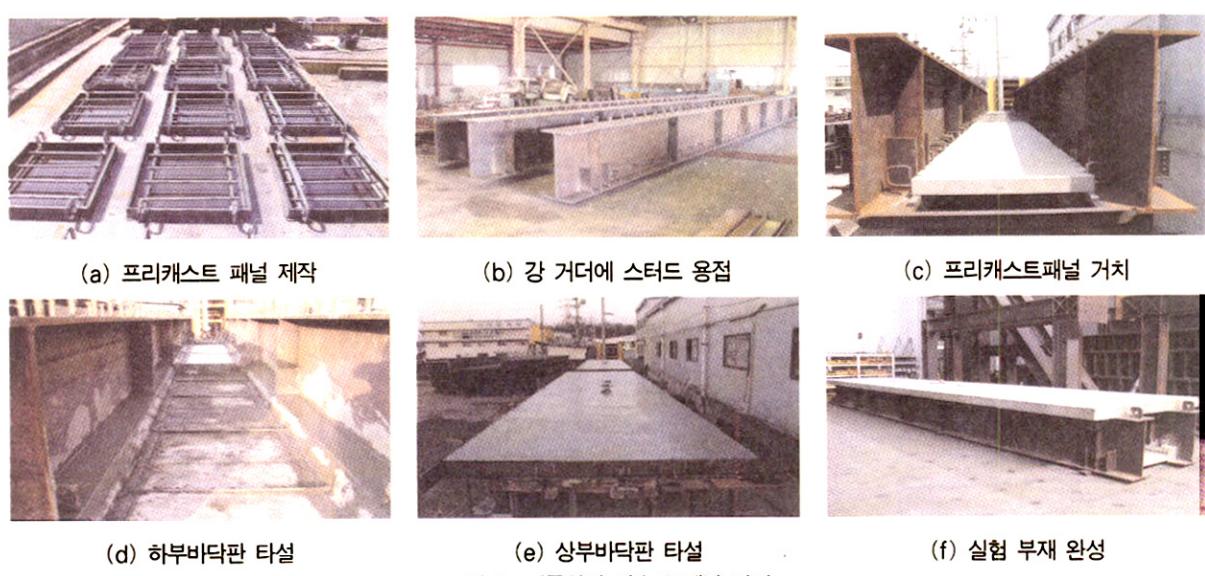


그림 3. 이중합성 연속보 제작 과정

표 2. 콘크리트 재료강도

재료	현장양생 압축강도 (MPa)	수중양생 압축강도 (MPa)
상부바닥판 (현장타설)	40.8	43
하부바닥판 (현장타설)	27.7	-
프리캐스트 패널	39.8	32.6

상부바닥판을 현장타설 한다. 그림 3(f)에 완성된 이중합성 2 거더 고속철도교 연속보를 나타내었다.

## 2.2 재료 특성

실험부재에 사용된 재료의 성질은 콘크리트 바닥판의 경우 상·하부 바닥판과 프리캐스트 패널 모두 설계 강도는  $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ 로 하였고 철근의 항복강도는  $f_{ry} = 400 \text{ MPa}$ 이며 스터드 전단연결재의 소재는 SS400을 사용하였다. 하중 재하 시점에 상·하부 바닥판과 프리캐스트 패널의 압축강도를 측정한 결과는 표 2와 같다. 하중 재하 시점에서의 상부바닥판의 강도는 타설 시점으로부터 30일강도이며 하부바닥판의 강도는 37일강도이다. 프리캐스트 패널의 경우 수중양생한 공시체는 28일 강도를 측정한 것이고 현장양생 공시체는 하중 재하 시점인 59일 강도를 측정하였기 때문에 수중양생 28일 강도보다 약간 더 높은 강도가 발현되었다. 실험부재에 적용된 강재 거더의 재료특성은 표 3에서 제시하였다. 실험결과 분석에서는 여기서 제시된 재료 특성값들을 사용하였다.

표 3. 강재 거더의 재료특성

재료	탄성계수 (GPa)	항복응력 (MPa)	인장강도 (MPa)
DCTG1	플랜지 (SM490)	210	377
	복부판 (SM490)	210	432
DCTG2	플랜지 (SM520)	210	369
	복부판 (SM400)	210	315

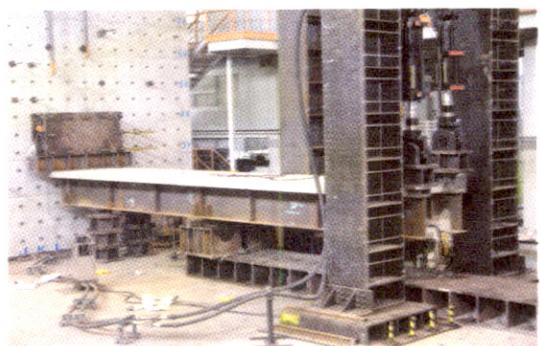


그림 4. 연속보 실험장면

## 2.3 하중재하 및 측정

하중의 재하는 그림 4와 같이 내부지점부를 기준으로 첫 번째 경간의 끝단을 고정단으로 하고 두 번째 경간인 캔틸레버부에서 1,000kN 가력기 두 대를 이용하여 변위제어로 재하하였다. 하중의 재하단계는 좌·우측거더의 편재하, 휨재하, 파괴까지의 휨재하를 통해 거동을 평가하였다. 내부지점부의 지점조건은 교축방향의 변위와 회전을 허용하는 이동단을 사

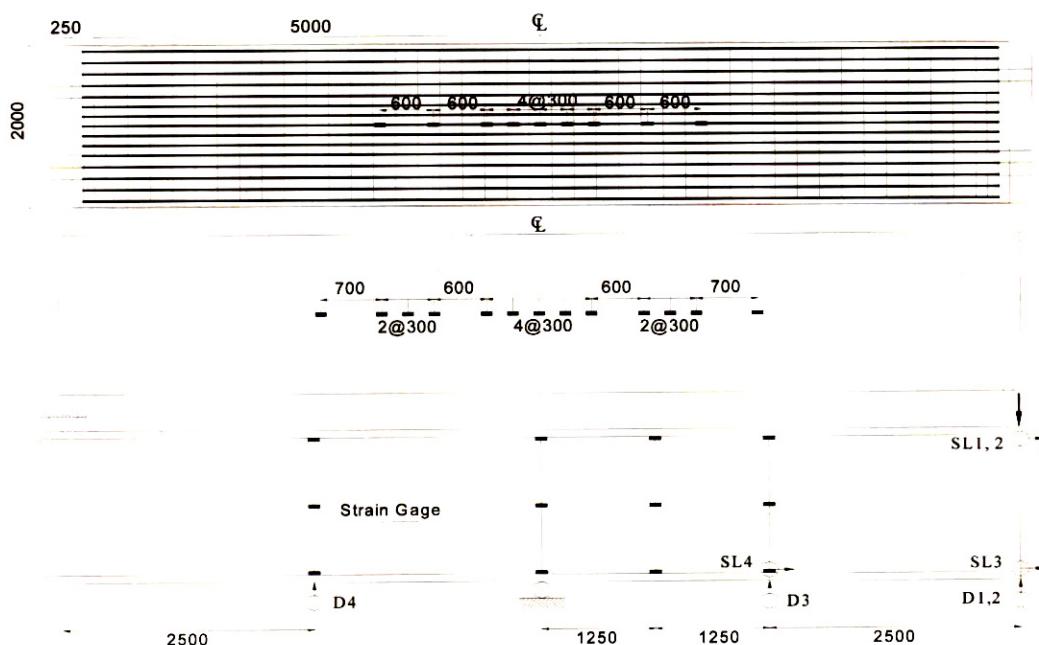


그림 5. 측정내용(unit:mm)

용하였다.

정적 실험의 측정내용은 그림 5와 같다. 처짐은 1/200mm 변위계를 사용하여 각 거더의 하중 재하점 위치와 각 경간의 중앙부에서 측정하였다. 상부바닥판과 각 거더의 상대변위인 슬립은 하중 재하점에서 측정하고 하부 프리캐스트 패널과 거더의 슬립은 하중 재하점과 경간 중앙에서 측정하였다. 콘크리트 바닥판의 인장응력에 의한 균열발생 시기와 응력분포를 측정하기 위해 내부지점부를 중심으로 300mm 간격으로 2개, 이후에는 600mm 간격으로 각각 총 9개의 콘크리트 변형률 게이지와 철근게이지를 통해 교축방향 변형률을 측정하였다. 균열이 발생한 후에는 처음 균열이 발생한 바닥판 중앙과 교축 방향 양쪽으로 총 6개의 균열 게이지를 사용하고 디지털 균열 폭 측정기를 함께 이용하여 균열폭을 측정하였다. 합성단면의 변형률 분포를 보기 위해 경간 중앙단면과 내부지점부, 하중이 재하되는 경간의 중앙단면과 내부지점부의 중앙점에서 콘크리트 상부바닥판 상, 중, 하부와 강거더의 상, 중, 하부에 각각 변형률 게이지를 부착하였다. 프리캐스트 패널 및 하부바닥판의 비틈 및 휨 거동을 평가하기 위해 부재 내부의 하부바닥판 및 프리캐스트 패널의 상면에 교축방향 및 교축직각방향으로 총 9개의 콘크리트 변형률 게이지를 부착하였다. 프리캐스트 패널 제작시 정모멘트부와 부모멘트부 패널 각각 한 개에 교축 방향 및 교축직각방향에 철근게이지를 부착하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 합성거동 평가

합성보의 거동은 강재와 콘크리트 경계면의 전단연결부에서의 상대변위에 의해 직접적인 영향을 받는다. 상대변위의 특성은 합성보의 해석방법이나 휨강도 모두에 영향을 미치기 때문에 중요하다. 합성보에 하중이 재하되면 단면은 휨을 일으키는 하중에 의해 콘크리트와 강재의 상부면은 줄어들고 하면은 늘어나게 되어 경계면에서 미끄러짐, 즉 상대변위가 발생된다. 이러한 상대변위를 슬립이라 한다.

전단연결재의 극한강도와 완전합성단면의 소성단면력과의 비는 다음 식 (1)과 합성정도로서 정의할 수 있다. (Oehlers, 1995)

$$\eta = P_{sh} / (P_{sh})_{fsc} \quad (1)$$

여기서,  $P_{sh}$ 는 전단지간내의 N개의 전단연결재의 각각의 강도를 합한 값이고,  $(P_{sh})_{fsc}$ 는 합성단면의 소성력(압축력

또는 인장력) 중 작은 값으로 한다.

실험부재의 하부바닥판의 전단연결재 배치는 선행된 압발실험의 복합스터드 전단연결부의 결과로부터 제안된 경험식을 이용하여 합성정도가  $\eta = 1.01$ 로서 완전합성이 되도록 이루어졌다. 따라서 합성단면이 전소성(full plasticity)영역에 도달할 때까지 전단연결재는 극한강도 수준까지 이르지 않을 것으로 예상되었다.

식 (2)에 복합스터드 전단연결부의 제안된 경험식을 나타내었다.(김현호 등, 2005; Kuhlmann 등, 2001)

$$P_m = \alpha(P_L + P_{Rd}) \quad \alpha = 1.206 \quad (2)$$

여기서,  $P_L = 0.725 f_u (\pi d^2 / 4) / \gamma_v$ 은 수평스터드의 전단강도이고  $P_{Rd} = 0.8 f_u (\pi d^2 / 4) / \gamma_v$ 은 수직스터드의 전단강도이다.

하부바닥판 복합스터드 전단연결부의 제안된 경험식을 검증하기 위하여 상대변위를 측정하였고 실험체의 파괴모드와 극한휨강도를 평가하였다. 그림 6에 나타낸 최종 변위제어시 하중-슬립 곡선을 살펴보면 최대슬립이 매우 작은 값을 보였고 전단연결재의 파괴는 발생하지 않았다. 이는 하부바닥판 전단연결부의 전단연결재가 극한하중 수준에는 이르지 못하였고 전단연결부의 파괴가 실험 최종 단계에서 관찰되지 않았기 때문에 완전합성 거동을 하는 것으로 판단된다.

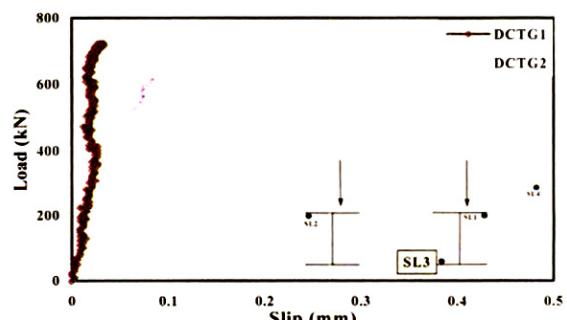


그림 6. 하중-슬립곡선

#### 3.2 모멘트-곡률관계

부모멘트를 받는 합성단면의 경우 콘크리트 바닥판에 발생하는 균열로 인해서 강재단면과 비슷한 거동을 보인다. 즉 곡률이 증가하면서 강재가 부담하는 모멘트를 증가시킨다. 이 연구에서는 이중합성 2거더 연속보의 부모멘트부에 대한 휨강성을 평가하기 위하여 모멘트-곡률관계를 이용하였다. 탄성영역의 휨재하에 대한 강재 거더의 상·하부 플랜지와 복부의 변형률

표 3. 등가지간장과 유효폭 적용식 (도로교설계기준, 2005)

유효폭의 변화 상태	구간	등가지간장	적용식
1      2 3 4      5      6 7 8	①	$\lambda_{L_1}$ (지간중앙부) : $l = 0.8L_1$	(3)
$\lambda_{L_1}$ $\lambda_{S_1}$ $\lambda_{L_2}$ $\lambda_{S_2}$	⑤	$\lambda_{L_2}$ (지간중앙부) : $l = 0.6L_2$	(3)
$0.2L_1 \quad 0.2L_2$	③	$\lambda_{S_1}$ (중간지점) : $l = 0.2(L_1 + L_2)$	(4)
$0.2L_2 \quad 0.2L_3$	⑦	$\lambda_{S_2}$ (중간지점) : $l = 0.2(L_2 + L_3)$	(4)
$L_1 \quad L_2 \quad L_3$	② ④ ⑥ ⑧	양단의 유효폭을 사용하여 직선적으로 변화한다.	

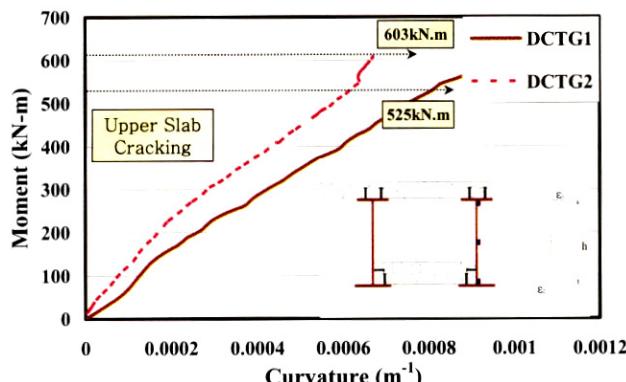


그림 7. 모멘트-곡률곡선

을 이용하여 모멘트-곡률 곡선을 구하고 다시 강재의 탄성계수를 이용하여 비균열단면의 휨강성을 구하였다. 이때 단면모멘트는 비균열단면으로 가정하여 기해진 하중에 의한 모멘트로 계산하였다. 곡률의 계산은 그림 7에 나타낸 것처럼  $\chi = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/h$ 으로 계산하였다. 여기서,  $\chi$ : 곡률,  $\varepsilon_1$ : 강재 거더의 인장변형률,  $\varepsilon_2$ : 강재 거더의 압축변형률,  $h$ : 측정점 사이의 거리이다.

국내 도로교 설계기준의 유효폭에 대한 기준은 표 3에 나타낸 바와 같다. 여기서 주거더 사이에 있는 플랜지의 폭을  $b$ , 주거더의 등가지간장을  $l$ 로 놓는다. 등가지간장  $l$ 과 실제의 지간장  $L$ 과의 관계 및 적용식을 표시하였다. 여기서 중간지점과 지간중앙부 사이의 유효폭은 직선적으로 변화한다고 본다.

$$b/l \leq 0.05 \quad \lambda_L = b$$

$$0.05 < b/l < 0.30 \quad \lambda_L = 1.1 - 2(b/l) \cdot b \quad (3)$$

$$b/l \geq 0.3 \quad \lambda_L = 0.15l$$

$$b/l \leq 0.02 \quad \lambda_S = b$$

$$0.02 < b/l < 0.30$$

$$\lambda_S = [1.06 - 3.2(b/l) + 4.5(b/l)^2] \cdot b \quad (4)$$

표 4. 휨강성 비교

부재	단면이차모멘트
DCTG1	설계기준
	실험값
DCTG2	설계기준
	실험값

$$b/l \geq 0.3 \quad \lambda_S = 0.15l$$

여기서,  $\lambda$ : 플랜지의 한쪽 유효폭(cm),  $b$ : 복부판 간격의 1/2 또는 플랜지 돌출폭(cm),  $l$ : 등가 지간장(cm)이다.

부모멘트 구간에 대한 휨강성은 상부바닥판은 인장을 받는 단면에 대한 유효폭 설계기준을 그대로 따르고, 하부바닥판은 압축구간에 대한 유효폭 설계기준을 고려하여 계산하였다.

실험값에서 구한 휨강성을 설계기준에 따른 유효폭을 적용한 휨강성과 비교하여 표 4에 나타내었다. DCTG1의 경우는 휨강성 산정시 설계기준보다 유효폭이 줄어들었고 DCTG2의 경우 강재의 변형률 크게 측정되어 휨강성의 산정값이 약간 크게 나타났다. 재료의 변동성을 고려할 때 최대 7%이내의 오차를 보여서 하부바닥판의 강성산정시 유효폭은 압축구간에 대한 현재의 기준을 적용해도 무방할 것으로 판단된다.

### 3.3 극한거동

합성거동 및 극한휨강도를 평가하기 위해 좌·우측 경간의 중앙단면과 최대 부모멘트부인 내부지점부의 상·하부 플랜지 및 복부의 단면위치별 변형률 분포를 하중단계별로 측정하여 하중-변형률 관계를 그림 8과 그림 9에 나타내었다. 양쪽의 경간중앙 단면에서는 강재의 항복 또는 좌굴이 발생하지 않았고 최대부모멘트부에서만 항복점에 도달하였다.

복부판의 경우 최대하중에 도달하기 직전까지 선형거동을 나타내고 있으며 이는 하부바닥판과 강재 거더의 합성작용에 의해 좌굴에 대한 저항성을 갖고 있는 것으로 판단된다. DCTG2

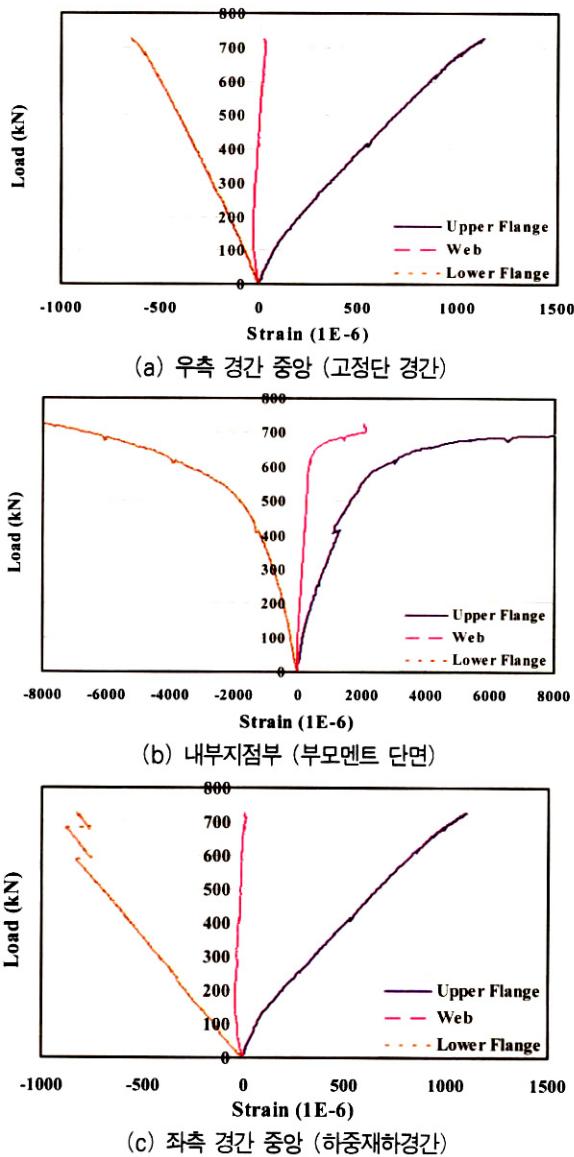


그림 8. 강재 거더의 하중-변형률 곡선(DCTG1)

의 경우에는 하중이 약 230kN에서 상부플랜지의 급격한 변형률 변화를 보이고 있는데 이는 실험적인 오류인지 측정센서의 문제인지에 대한 추가적인 확인이 요구된다.

표 5에 완전소성해석 개념에 의한 극한휨강도(AASHTO LRFD, 2004)의 계산값과 실험값을 나타내었다. 계산시 사용한 각 재료의 강도는 실제 측정값을 사용하였다. 극한휨강도는 실험값이 5%이내의 오차범위에서 크게 나타났으며 그림 10에 나타낸 본 연구에서 제시한 극한휨강도 산정을 위한 소성응력 분포가 적절한 것으로 나타났다.

표 5. 극한휨강도의 비교

부재	극한휨설계강도	실험값	오 차
DCTG1	3604.79 kN · m	3773.18 kN · m	4.5%
DCTG2	3189.42 kN · m	3234.26 kN · m	1.4%

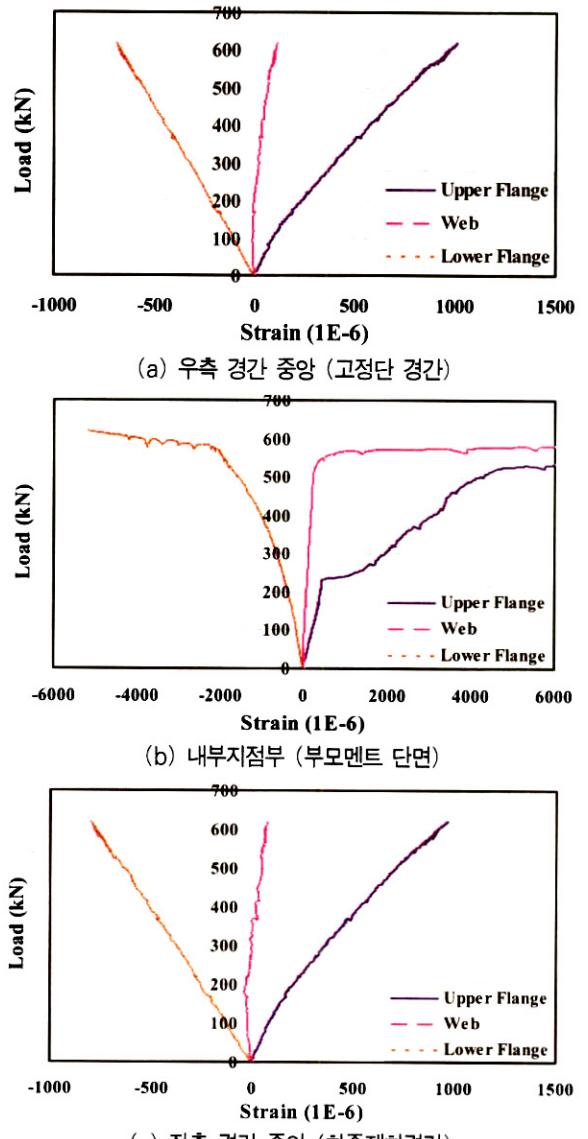


그림 9. 강재 거더의 하중-변형률 곡선(DCTG2)

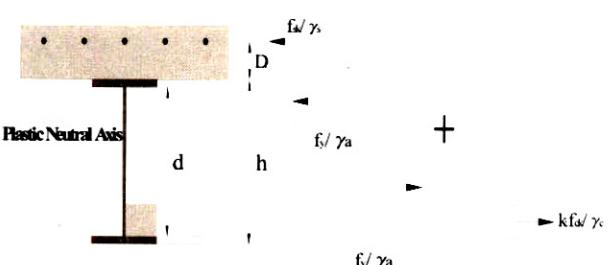


그림 10. 이중합성 단면의 극한휨강도 산정

### 3.4 비선형 유한요소해석

실험 결과의 평가 및 비교를 위한 합성보의 유한요소해석을 재료 비선형을 고려한 유한요소해석 프로그램인 DIANA를 통하여 3차원 비선형 거동해석으로 수행하였다. 해석에 사용된

요소는 그림 11과 같이 상부바닥판 및 하부바닥판과 프리캐스트 패널은 8절점 Solid를 사용하였으며, 강재 거더는 4절점 shell 요소를 이용하였다. 철근은 embedded reinforcements element를 사용하였다. 경계 조건은 실험체와 동일하게 헌지와 고정단을 고려하였으며 콘크리트와 강재의 거동을 일체화할 수 있도록 Multi-point constraints를 사용하였다. 각각의 요소의 재료특성은 재료실험 결과를 사용하여 재하단계별로 해석을 수행하였다. 그림 11과 12에 해석요소 및 3차원 유한요소해석 모델을 나타내었다.

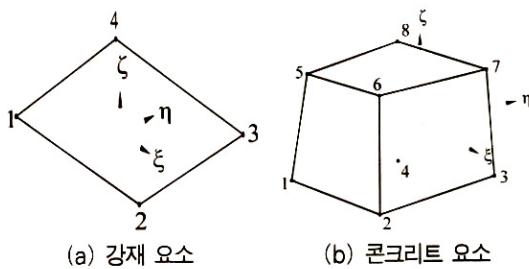


그림 11. 해석 요소

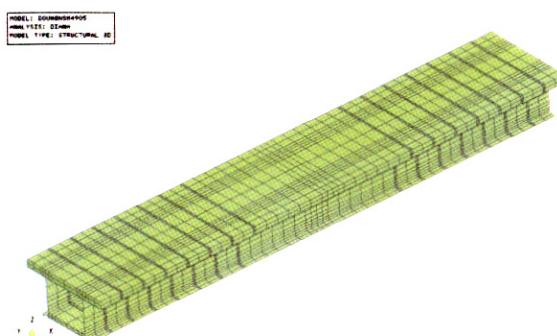
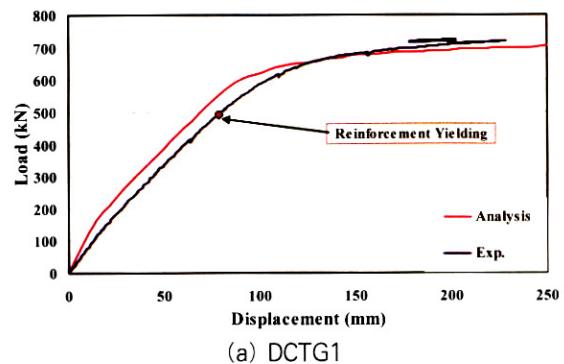


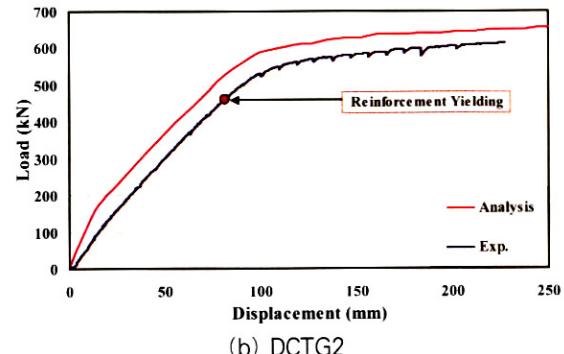
그림 12. 유한요소해석 모델

비선형해석을 위한 파괴기준은 콘크리트의 경우 smeared cracking 모델을 사용하였다. 강재 거더의 경우에는 Von-Mises 파괴기준을 사용하였다.

그림 13에 하중-변위 곡선을 나타내었고 그림 14에 콘크리트 바닥판의 손상진행을 나타내었다. 하중-변위 곡선에서 해석모델이 실험결과를 잘 모사하고 있음을 보여주는데 DCTG2의 경우 실험결과에서(그림 9.b) 상부 플랜지의 거동이 예상과 다른 측면이 있어 약 6.5% 오차를 나타내고 있다. 손상의 진행에서 하부바닥판의 중간지점 상부와 함께 단면이 변하는 영역에서도 응력집중에 의한 압축파괴 양상을 보이기 때문에 이중 합성 단면의 강성변화를 원만하게 할 필요가 있음을 알 수 있다. 즉 단면의 변화구간을 설정하고 바닥판의 두께를 점차적으로 줄여나가는 설계 고려가 요구된다.

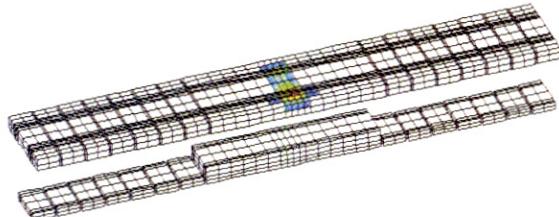


(a) DCTG1

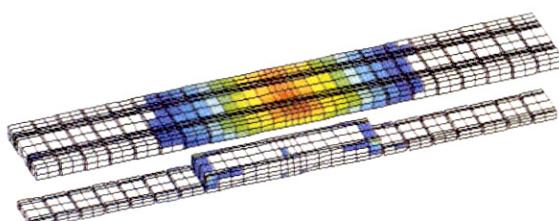


(b) DCTG2

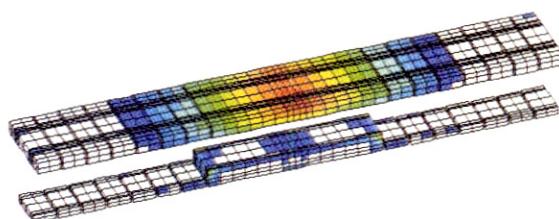
그림 13. 하중-변위 관계 곡선



(a) 70kN-상부바닥판 균열발생



(b) 163kN-하부바닥판(지점부) 균열발생



(c) 235kN

그림 14. 균열양상

## 4. 결 론

강합성 고속철도교의 부모멘트 구간의 휨강성의 증대와 조밀 단면의 확보 및 형고의 감소를 위한 이중합성 단면을 제안하였다. 선행된 하부바닥판 전단연결부의 강도 제안식을 이용하여 완전합성으로 설계된 이중합성 2거더 연속보의 정적실험을 통해 부모멘트 구간의 정적거동을 평가하였다. 주요 결론으로는 다음과 같다.

- (1) 최종적인 파괴모드를 보면 내부 지점부 최대모멘트 단면에서만 상·하부 플랜지가 항복하였다. 그리고 최대하중 도달시점까지 전단연결재의 파단이 발생하지 않았으며 하부바닥판과 강거더의 상대변위가 매우 작은 값으로서 완전합성 거동의 확보와 하부바닥판의 제안된 경험식을 검증할 수 있었다.
- (2) 모멘트-곡률관계에서 평가한 하부바닥판의 휨강성에 대한 유효폭은 기존의 상부바닥판의 설계기준을 적용한 값과 유사하였다.
- (3) 이중합성 연속보의 극한휨강도는 완전합성인 경우의 소성 해석에 의해 산정할 수 있고 이중합성을 위한 하부 콘크리트 단면에 의해 조밀단면을 확보가 용이한 것으로 나타났다.

## 감사의 글

이 논문은 2005년도 중앙대학교 학술연구비 지원에 의한 것임.

## 참 고 문 헌

- 김광수, 정광희 (2004), *파형강판 복부를 갖는 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 교량의 설계와 시공단계 해석*, 한국전 산구조공학회지, 제17권 4호, pp. 29-34  
 김현호, 심창수, 윤광중, 이필구 (2004), *이중합성 구조를 갖*

- 는 강합성고속철도교의 설계에 관한 연구, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, pp. 4624-4627  
 김현호, 심창수, 윤광중, 이필구 (2005), *이중합성 교량의 복 핵스터드 전단연결부의 정적강도 평가*, *한국강구조학회 논문집*, 제17권 5호, pp 549-559  
 심창수, 김현호, 윤광중 (2005), *연속합성보의 균열폭 제어와 휨거동 평가*, *한국강구조학회 논문집*, 제17권 2호, pp 195-206  
 도로교설계기준, 도로교통협회, 2005.  
*AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, Third Edition, 2004  
*Eurocode 4 (1994), Design of composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1 : General rules and rules for buildings*, ENV 1994-1-1.  
*Eurocode 4 (2002), Design of composite steel and concrete structures, Part 2: Composite bridges* (ENV 1994-2), CEN.  
 Kuhlmann, U.: Kurschner, K.(2001), *Design of Lying Studs with Longitudinal Shear Force*, *Symposium on Connections between Steel and Concrete*, 55th Rliem Annual Week in Stuttgart, Germany.  
 Kuhlmann, U.: Kurschner, K.(2001), *Behaviour of Lying Shear Studs in Reinforced Concrete Slabs*, *Symposium on Connections between Steel and Concrete*, 55th Rliem Annual Week in Stuttgart, Germany.  
 Oehlers, D.J., Bradford, M.A (1995), *Composite steel and concrete structural members*, PERGAMON  
 大山 里, 栗田 章光 (2000) 鋼・コンクリート二重合成連續箱桁橋の乾燥収縮挙動に関する解析および実験的研究, 日本鋼構造論文集, 第7卷 第27號, pp. 71-84

(접수일자 : 2005. 12. 12 / 심사일 2005. 12. 22 /  
 심사완료일 2006. 3. 27)