

# 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더의 개발을 위한 실험연구

Experimental Study for the Development of Steel-Confined Prestressed Concrete Girder

김 정 호<sup>1)</sup> · 박 경 훈<sup>2)</sup> · 황 윤 국<sup>3)</sup> · 최 영 민<sup>4)</sup> · 조 호 남<sup>5)</sup>  
Kim, Jung Ho · Park, Kyung Hoon · Hwang, Yoon Koog · Choi, Young Min · Cho, Hyo Nam

**요 약** : 콘크리트와 강판, PS강재의 구조적 장점을 극대화하여 낮은 형고로 경간을 장대화할 수 있는 새로운 교량 상부구조형식으로서 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더(Steel-Confined Prestressed Concrete Girder; SCP Girder)를 개발하였다. 개발된 SCP 합성거더의 효과적인 설계 및 제작을 위하여 설계프로그램을 개발하고 제작절차를 확립하였다. 이를 바탕으로 설계된 SCP 합성거더를 실험체로 제작하여 시공성을 확인하였으며, 재하실험을 통해 설계의 타당성과 구조적 안전성 및 실적용 가능성에 대하여 검증하였다.

**ABSTRACT** : A new type of bridge superstructures referred to as Steel-Confined Prestressed Concrete Girder (SCP Girder) was developed, which is composed of concrete, steel plate, and prestressing tendon. The girder may maximize structural advantages of these components; thus, long span bridges with low height girder may be constructed. For the effective design and fabrication of the girder, the design software program was developed and the process of fabrication established. The experimental girder designed using the program was manufactured in actual size to confirm the fabric ability of the girder. Propriety of design, structural safety, and applicability of the girder were verified through the load test.

**핵심용어** : 강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더, 합성교량, 재하시험, 구속작용

**KEYWORDS** : Steel-Confined Prestressed concrete (SCP) girder, Composite bridges, Load tests, Confinement mechanism

## 1. 서론

교량건설에 있어 최근에는 새로운 복합재료의 도입을 위한 다양한 연구개발이 진행되고 있으며 일부에서는 복합재료를 이용한 실험교량의 제작 및 시공사례 또한 보고되고 있다<sup>(5)</sup>. 그러나 아직까지는 실제교량에 있어 콘크리트와 강재(강판, 철근, PS강재 등)는 가장 보편적인 재료로서 활용되고 있으며, 이 두가지 주재료의 효과적인 조합을 통해 새로운 형태의 교량이 개발되어 왔다.

본 연구에서는 콘크리트와 강판, PS강재의 구조적 장점을 극대화하여 중장경간 교량형식으로 주로 사용되는 강합성거더교, PSC I형거더교, 프리플렉스교 등에서 취약점으로 거

론되는 처짐 및 진동, 큰 고정하중, 강재 단면의 저효율성 등과 같은 문제점들을 개선하고 경간을 장대화할 수 있는 새로운 교량 상부구조형식을 개발하고자 하였다.

개발된 새로운 개념의 합성거더는 '강재로 구속된 프리스트레스트 콘크리트 합성거더(Steel-Confined Prestressed Concrete Girder; SCP Girder)'라하고, 그 해석 및 설계를 위하여 국내설계기준<sup>(2),(3)</sup>을 만족하는 설계프로그램을 개발하였다. 개발된 설계프로그램에 의해 설계된 SCP 합성거더를 실험체로 제작하여 시공성을 확인하였으며, 재하실험을 통해 안전성 및 실적용 가능성에 대하여 검증하였다. SCP 합성거더의 설계, 시공, 재하 등 전과정에 걸쳐 실험교량과 같은 모형을 설계, 제작하고 실험을 수행함으로써 실용화

1) 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원  
2) 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원  
3) 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 수석연구원, 공학박사  
4) 정회원, 한양대학교 BK연구교수, 공학박사  
5) 정회원, 한양대학교 토목환경공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2003년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

를 전제한 연구가 되도록 하였다.

## 2. SCP 합성거더의 개념

SCP 합성거더는 PSC I형거더와 유사한 단면형상을 하고 있으나 I형단면의 외부는 강판으로 싸여있으며, PS강재가 배치된 내부는 무근콘크리트로 채워지게 된다. SCP 합성거더 중앙단면의 일반적인 단면형상은 그림 1과 같다.

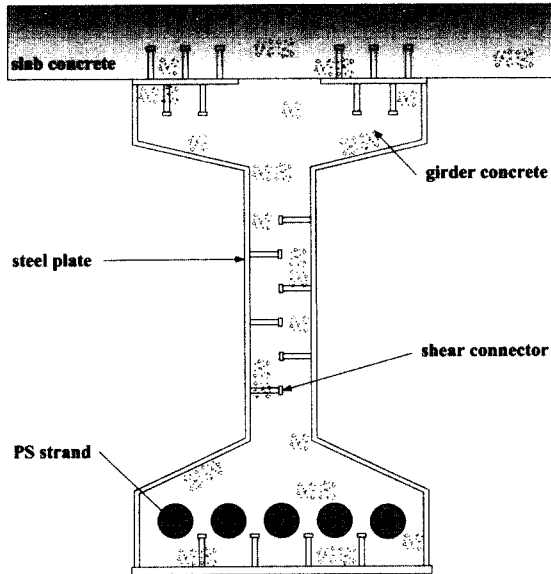


그림 1. SCP 합성거더의 단면형상

콘크리트를 둘러싸고 있는 외부의 강판이 전단연결재에 의해 내부콘크리트와 합성됨에 따라 콘크리트 내부에는 철근 배근이 필요하지 않게 된다. 인장을 받게되는 거더의 최하단에 강재를 배치함으로써 PS강재와 더불어 인장력에 저항하며, 콘크리트의 인장균열로 인한 철근의 부식 등 균열발생 메카니즘의 형성으로 인한 내구성저하의 가능성을 근본적으로 차단할 수 있다. 단순지간에서 압축을 받게되는 거더 상단부의 경우 콘크리트가 대부분의 응력을 분담하게 되지만 형고의 제약이 있는 경우 강재를 추가적으로 배치하여 형고를 낮출 수 있으며, 연속교의 경우 인장응력이 발생하는 내부지점에서 상단부 강재가 인장에 저항하는 역할을 기대할 수 있다. 강재거더 중 측면배치 강재는 절곡가공되고 상하부 수평방향 강재의 연결을 위해서만 용접이 사용되므로 일반 강교에 비해 용접부위가 대폭 감소하여 내피로성이 우수하다. 또한 공장 제작하는 외부강재 내부에 각종 보강재를 설치하지 않아도 되므로 제작공정을 단순화, 자동화할 수 있다. 강재거더는 구조적 역할뿐만 아니라 거더 콘크리트 시공시 거푸집의 역할을 하게되며 시각적인 측면에서도 유리하다.

강재거더 내부에 타설되는 거더 콘크리트는 전체 거더의

강성을 높여 여타 거더형식교량에 비하여 처짐 및 진동을 감소시키고, 거더 내부의 콘크리트는 무근콘크리트이므로 철근 배근작업에 소요되는 노력을 줄일 수 있다. PS 강선에 의해 도입된 프리스트레스트력은 콘크리트에 발생하는 인장응력을 최소화하며, 외부강재의 사용 비율을 높이고 내부 빔콘크리트의 강성 분담비율을 낮춰 고정하중을 감소시키면 타 형식 교량으로는 시공이 어려운 장경간의 교량시공이 가능하게 된다.

SCP 합성거더는 이러한 구조적 장점 외에도 강재거더의 공장 제작 자동화, 현장 철근배근 및 거푸집 설치작업의 생략으로 인한 직접비용의 절감뿐만 아니라 공기단축으로 인한 간접비용의 절감으로 인해 경제성을 확보할 수 있다. 외부 강재에 의해 거더 내부의 콘크리트가 유해환경에 노출되지 않으므로 콘크리트의 내구성이 향상되며, 강재의 부식, 균열 등에 대한 점검과 거더에 대한 내하력 평가가 주기적으로 수행된다면 공용중 안전성에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

## 3. SCP 합성거더의 설계 및 제작

### 3.1 SCP 합성거더의 구조 해석 및 설계

본 연구에서 제안한 SCP 합성거더와 같이 상단부 일부를 제외하고 강재로 둘러싸여 휨과 압축을 받는 거더형상에 대한 설계관련 기준은 찾아보기 어렵다. 따라서 기존 강교 및 콘크리트교의 합성거더와 프리스트레스트 콘크리트와 관련된 국내외 설계기준<sup>(2),(3),(4),(11)</sup>을 준용하여 설계프로그램을 작성하였으며, 내부의 구조해석 루틴으로는 매트릭스구조해석의 직접강도법(direct stiffness method)을 이용한 보해석용 프로그램<sup>(6)</sup>을 사용하였다. 설계프로그램에 의한 시공단계별 해석 및 설계과정은 그림 2와 같다. 콘크리트와 외부강재와의 합성작용에 의해 발생하는 구속작용(confinement mechanism)은 현재 사용상태에서는 설계에 반영되지 않았으나 극한상태에서 구조적 안전성에 기여할 것으로 판단된다. SCP 합성거더는 콘크리트의 크리프, 건조수축변형이 강형에 의해 구속되기 때문에 단면내에서 응력이 재분배된다. 따라서 시공순서와 공정을 충분히 고려하여 시간의존적 변형인 크리프와 건조수축을 반영한 시공단계별 강성계산 및 응력에 대하여 검토하였다. 또한 콘크리트에 대해서는 모든 단계에서 전단면 압축이 발생하도록 설계하여 균열에 대한 안전성을 확보하도록 하였다. 거더의 단부에는 좁은 구역에 커다란 긴장력이 도입되어 국부적인 응력집중으로 인한 내부콘크리트의 손상을 방지하기 위하여 정착부 설계시 강재 단부보강재를 배치하였다.

SCP 합성거더의 거더강재와 내부콘크리트의 합성은 프리스트레스, 하중에 의한 전단력의 수평성분, 건조수축에 의한

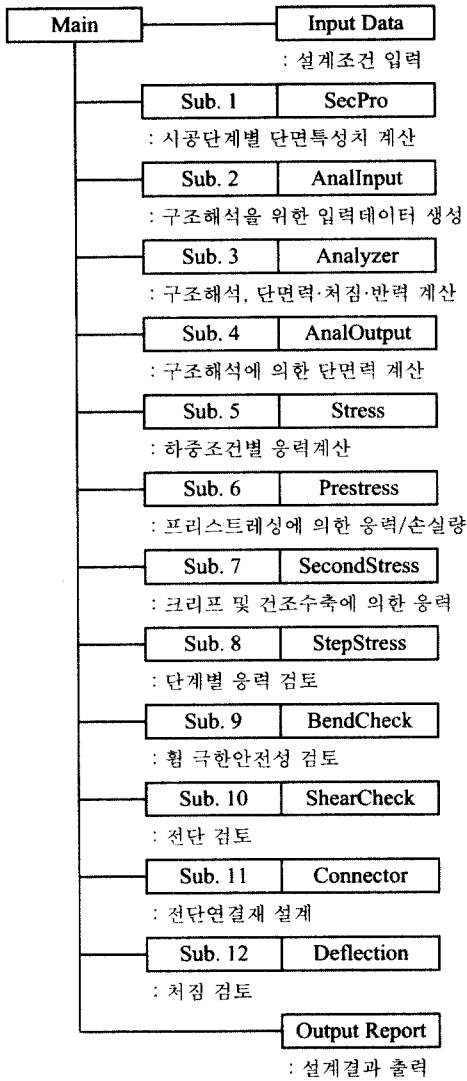


그림 2. SCP 합성거더의 설계흐름도

수평전단력 등을 고려하여 전단연결재(stud)를 배치하여 이루어지도록 하였으며, 거더와 바닥판 콘크리트의 합성은 강교와 콘크리트교의 전단연결재 설계기준에 의해 계산된 값 중 불리한 쪽을 사용하여 이루어지도록 하였다. 처짐에 대한 안전성을 확보하기 위하여 허용처짐량을  $L/1,000(L:지간)$ 로 설정하여 적용하였다.

### 3.2 SCP 합성거더의 제작

SCP거더의 제작은 그림 3과 같이 크게 강제거더 제작, 거더 콘크리트 타설, PS강재 긴장 및 바닥판 콘크리트 타설로 나눌 수 있다. 강제거더 제작의 대부분 공정은 공장에서 자동화 제작을 거쳐, 현장에서는 운반되어온 세그먼트(segment)의 용접연결로 완성된다. 공장제작으로 품질관리가 용이하며, 자동화 제작 및 거더콘크리트의 거푸집역할을 하여 현장작업

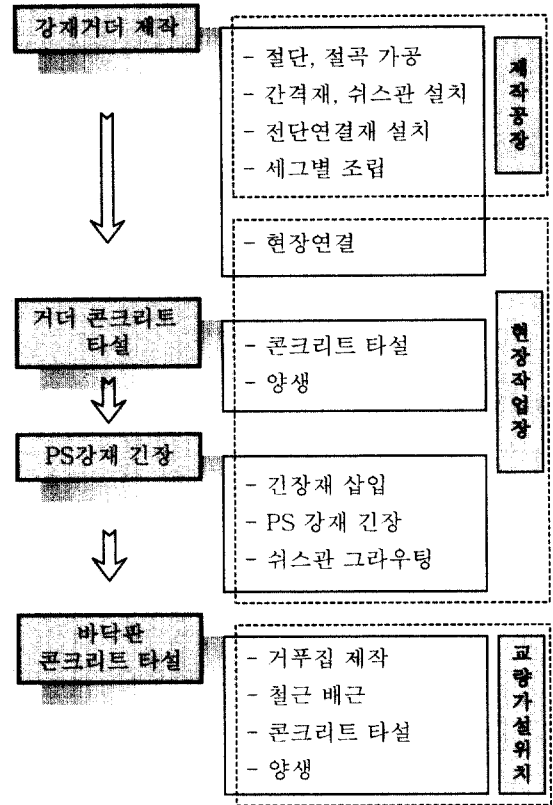


그림 3. SCP거더의 제작절차

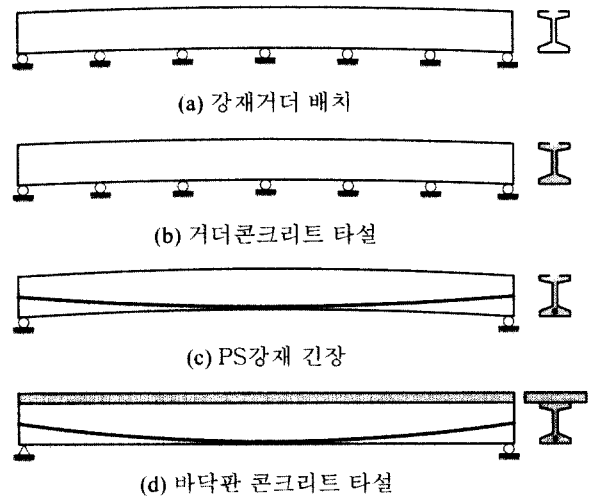


그림 4. SCP거더의 제작단계

량을 현격하게 감소시킬 수 있다. 강제거더의 제작 및 거더콘크리트의 타설까지는 소정의 습음을 주어 제작대에 거치되어 있게된다. 콘크리트가 경화된 후 PS강선을 긴장하면 거더는 추가적인 습음이 발생하고 양단지점에 의해서만 지지된다. 제작된 거더는 가설위치로 옮겨져 바닥판 콘크리트가 타설되며, 경화 후 포장 등 부가적인 고정하중과 활하중을 지지하게된다. 이러한 제작단계를 그림으로 나타내면 그림 4와 같다.

표 1. SCP 합성거더의 응력

단계	재하상태	저항단면	발생응력		누계응력	
			강재 거더	바닥판 con'c 거더 con'c	강재 거더	바닥판 con'c 거더 con'c
1	강재거더 제작 완성		압축 (-)	인장 (+)	압축 (-)	인장 (+)
2	거더 콘크리트 타설					
3	PS 강제 긴장 직후					
4	거더 콘크리트의 초기 크리프 및 건조수축					
5	바닥판 콘크리트 및 가로보 하중					
6	합성후 추가 고정하중					
7	바닥판 및 거더 콘크리트의 크리프 및 건조수축					
8	활하중					

3.3 SCP 합성거더의 단계별 응력

SCP 합성거더는 부재 전단면을 유효한 것으로 보며, 탄성 이론과 평면유지의 법칙에 따라 축방향변형은 단면의 중립축으로부터 거리에 비례하는 것으로 계산한다. 시공단계에 따른 단면형상의 변화로 인하여 응력계산을 위해 고려하여야할 재하상태에 따른 시공단계별 저항단면 및 각 부분의 응력은 표 1과 같다.

4. SCP 합성거더의 실물모형실험

SCP 합성거더는 전례를 찾기 어려운 구조형태로서 발생가능한 문제점의 발견과 해결을 위한 이론적 접근에 앞서 실물 모형의 제작 및 실험을 통해 실제 교량에 대한 적용가능성을 우선 검증하고자 하였다.

본 실험에서는 1등급 교량에 기준하여 지간 49.0m(교장 50.0m)의 거더를 실물크기로 제작하여 설계하중과 극한하중에 따른 처짐과 변형률 등의 구조적 거동을 측정, 분석하였다. 이러한 실험 결과는 이론적인 계산값과 비교, 분석함으로써 SCP 합성거더의 해석 및 설계이론 적용의 타당성을 검증하고 실거동 양상의 분석을 통해 구조적 안전성과 실적용 가능성을 확인하였다.

4.1 시험체 제작

SCP 합성거더의 제작은 기본적으로 '3.2 SCP 합성거더의 제작'에서 기술한 절차와 방법에 의하여 제작하였다. 공장 제작되어온 강형을 실험실에서 용접연결하여 강제거더를 제작하였으며, 시험체 제작의 시간적, 공간적 제약으로 인하여 거더 및 바닥판 콘크리트는 타설 후 증기양생하였고 바닥판의 폭은 2.0m로 하였다. 실험용 합성거더의 제원 및 설계하중은 표 2와 같다.

강재거더의 절곡제작된 측면강재의 두께는 전길이에 걸쳐 8.6mm이며, 상·하부플랜지 강재의 두께는 단부(L<sub>2</sub>)의 경우 모두 10mm이고 지간중양부(L<sub>1</sub>)에서는 각각 18mm와 20mm로 제작되었다. 구체적인 거더의 종단 및 횡단면의 형상 및 치수는 그림 5와 같다. 압축력 도입을 위한 PS강선은 5개의 텐더이 단부의 전단면에 걸쳐 3단으로 배치되고, 포물선 형상을 이루며 중앙부에서는 거더 하단에 집중적으로 배치되도록 하였다. 그림 6은 제작이 완료된 SCP 합성거더 시험체의 모습을 나타내고 있다.

표 2. SCP 합성거더의 제원 및 설계하중

교량등급	1등급	
	설계하중	설계활하중
	충격계수	$\frac{15}{40 + L} \leq 0.30$
설계지간	49.0 m	
합성거더	사용강재	SMS 490
	콘크리트 강도	$f_{ck} = 450 \text{ kgf/cm}^2$
	거더 높이	1.85 m
	거더 간격	2.00 m
	PS강재	SWPC7B 15.2mm 22가닥
	쉬스관	$\phi 11.3\text{mm}$
바닥판	전단연결재	stud h=120mm $\phi 22\text{mm}$
	콘크리트 강도	$f_{ck} = 270 \text{ kgf/cm}^2$
	바닥판 두께	0.25 m

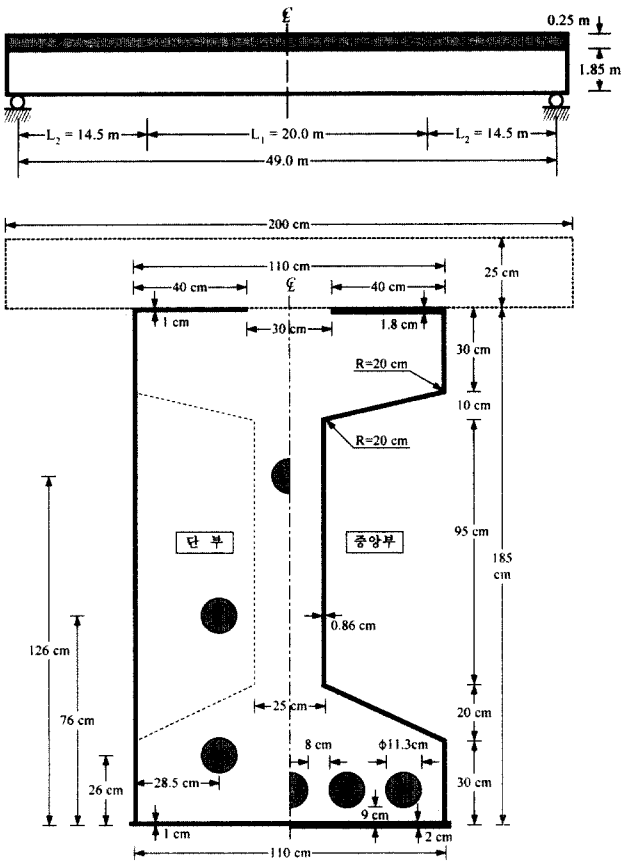


그림 5. SCP 합성거더 시험체 단면형상 및 제원



그림 6. SCP 합성거더 시험체 전경

#### 4.2 하중의 재하

사용하중 상태에서 SCP 합성거더의 거동을 파악하기 위하여 거더 중앙부에 설계활하중(DB-24, DL-24)과 동일한 내력을 발생시키는 집중하중 40tonf를 재하하였다. 또한 거더의 파괴상태를 관측하고 합성작용에 따른 잠재적인 안전여유를 추정하기 위하여 실험시설의 용량이 허락하는 최대하중인 300tonf를 지간 중앙부에 재하(actuator 1)하는 것으로 하

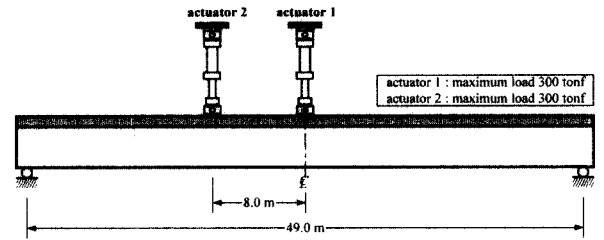


그림 7. 하중재하 위치 및 크기



그림 8. 하중재하 전경

였다. 극한하중 상태에서 SCP 합성거더는 외부에 둘러싸인 강재의 구속효과로 인해 거더보다는 바닥판 콘크리트의 파괴가 우선 발생할 것으로 예측되나 파괴메카니즘을 관측하기 위하여 실험시설의 여건과 용량이 허락하는 최대하중을 재하하고자 하였다. 이러한 목적으로 중앙부 재하지점으로부터 8.0m 떨어진 위치에 300tonf의 추가 하중을 도입할 수 있는 가력기(actuator 2)를 설치하였다. 하중재하 위치를 그림으로 나타내면 그림 7과 같고, 그림 8은 시험체와 가력기가 설치되어 있는 모습을 나타내고 있다.

하중의 제어는 MTS 장비를 이용하여 사용하중(40tonf)까지는 5tonf씩, 이후부터는 매 10tonf씩 증가시켜 재하하였다. 시험체의 가속도를 측정하기 위해서는 경간중앙의 가력기를 이용하여 약 5tonf의 하중을 가한 상태에서 하중을 급속히 제거하여 구조물의 자유진동이 발생되도록 하였다.

#### 4.3 계측방법

SCP 합성거더의 정적거동 계측을 위해서 정적변위계와 변형률 게이지를 설치하였다. 변위계는 하중 재하점인 중앙점과 중앙점에서 8.0m 떨어진 위치에 설치하였다. 또한 L/4 지점과 단부에서 거더의 축방향 변위를 계측하기 위하여 양단부에도 각각 변위계를 설치하였다. 정적변위계의 설치위치는 그림 9와 같다.

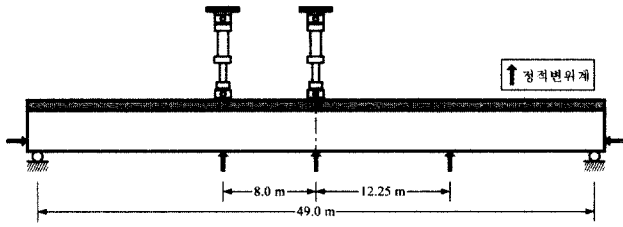
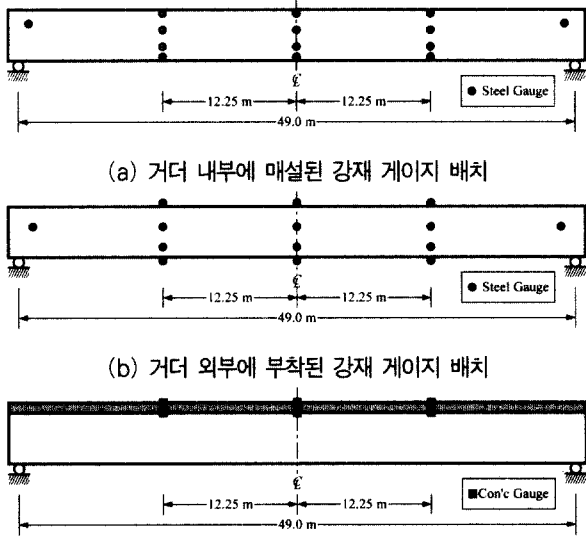


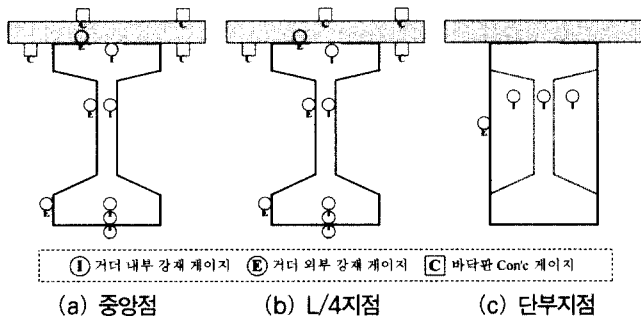
그림 9. 정적변위계 설치위치

변형률 게이지는 강재 게이지(steel gauge)와 콘크리트 게이지(concrete gauge)를 사용하였다. 강재거더의 변형률 측정을 위해서 강재 게이지를 부착하였고, SCP 합성거더의 내부는 무근콘크리트로 채워지므로 거더내부의 변형률을 측정하기 위하여 강재 게이지를 부착한 철근을 매설하였다. 거더 상부에 합성되는 바닥판 콘크리트의 변형률 측정을 위하여 바닥판 상하단에 콘크리트 게이지를 부착하였다. 게이지의 상세한 부착위치는 그림 10과 그림 11에 나타내었다. 하중 단계별 정적 데이터는 정적데이터로거(TDS-303)에 의해 측정, 저장되었다.



(a) 거더 내부에 매설된 강재 게이지 배치  
(b) 거더 외부에 부착된 강재 게이지 배치  
(c) 바닥판에 부착된 콘크리트 게이지 배치

그림 10. 센서의 배치



① 거더 내부 강재 게이지 ② 거더 외부 강재 게이지 ③ 바닥판 Conc 게이지

그림 11. 센서배치 단면도

시험체의 동적거동특성 파악을 위하여 거더 중앙부에 가속 도계를 설치하여 구조물이 자유진동하도록 한 후 동적데이터 로거(Megadac 3415)를 이용하여 동적계측을 수행하였다.

#### 4.4 실험 결과

##### 4.4.1 사용하중 상태에서의 실험결과

SCP 합성거더의 사용상태에서 최대설계활하중에 대응하는 40tonf의 집중하중을 5tonf씩 증가시켜 재하하며 변위와 변형률의 변화를 계측하였다. 그림 12의 하중-변위선도에서 볼 수 있듯이 거더는 사용하중 상태에서 선형거동을 하며, 수차례의 재하 및 제하를 통해 거더의 탄성회복을 확인할 수 있었다.

거더의 실제 처짐과 해석에 의한 처짐 사이의 차이는 계산에 포함되지 않은 합성작용이나 설계값을 상회하는 거더와 바닥판 콘크리트의 높은 실제 강도의 영향인 것으로 추정된다. 이들 두 값 모두 설계기준의 활하중 처짐기준인  $L/1,000$  ( $=49.0\text{mm}$ )과 비교하여 상당히 작은 값을 보이고 있으므로 처짐에 관한 사용성은 충분히 확보하고 있음을 알 수 있다.

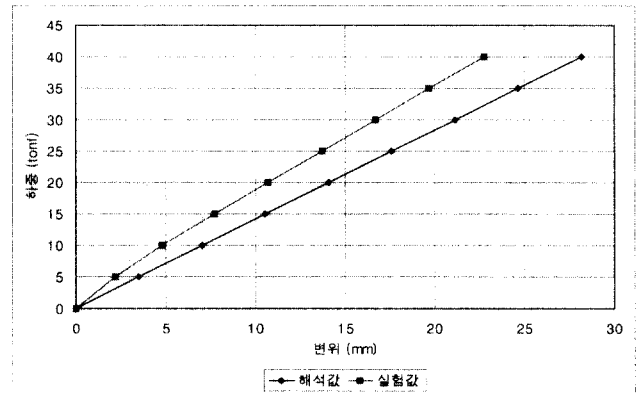


그림 12. 사용하중에 의한 하중-변위선도 (L/2지점)

설계활하중 상태에서 거더 중앙부의 거더강재, 거더 콘크리트, 바닥판 콘크리트 등의 응력은 각 재료의 허용응력에 크게 못 미치는 것으로 나타났다. 시험체 제작시 실험여건상 바닥판의 고정하중 감소와 콘크리트의 고강도 발현 등도 영향을 미친 것으로 판단된다. 표 3에서 볼 수 있듯이 실제 구조물의 계측된 실험값은 설계값보다 낮은 값을 나타내며 허용치 이내에서 변화한다.

##### 4.4.2 사용하중 초과 상태에서의 실험결과

SCP 합성거더의 파괴거동양상 및 파괴메카니즘의 관측을 위해 지난 중앙부에 300tonf를 재하하였으나 바닥판의 균열만이 관측되고 파괴상태에 이르지 않아 추가적으로 260tonf를

표 3. 설계하중 상태에서의 처짐 및 응력변화량 (L/2지점)

구분		설계값	실험값
처짐(mm)		28.15	22.77
응력 (kgf/cm <sup>2</sup> )	거더강재	상단	-1,160.58
		하단	244.03
	거더 콘크리트	상단	-133.26
		하단	-32.60
바닥판 콘크리트		-44.50	-17.50

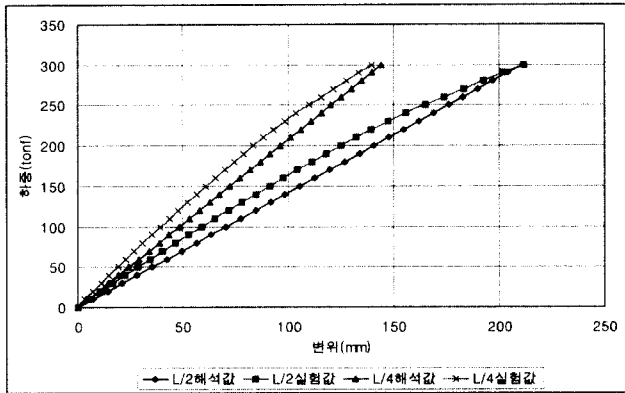


그림 13. 하중-변위선도

표 4. 처짐의 설계값과 실험값의 비교 (L/2지점)

구분	40tonf (설계하중)	100tonf	200tonf	300tonf	560tonf (최대하중)
설계값(mm)	28.15	(70.38)	(140.75)	(211.10)	-
실험값(mm)	22.77	58.60	124.80	211.60	578.60
비교	81.1 %	83.3 %	88.7 %	-	-

\* ( )안의 값은 허용값을 초과한 탄성해석에 의한 가정값임.

\* SCP 합성거더의 허용처짐 = 49.0mm

재하하였으나 역시 거더는 파괴되지 않았다. 일반적인 거더의 거동분석은 중앙점에 재하된 300tonf에 대해서 실시하였다.

중앙점에 300tonf의 하중이 작용할 때 거더 중앙점(L/2) 및 L/4지점의 하중-변위선도를 나타내면 그림 13과 같다. 약 200tonf의 하중이 작용할 때까지 하중-변위 곡선은 선형 거동을 하고 있으며 200tonf이 초과하면서 처짐의 큰 변화를 나타낸다. 그러나 200tonf의 하중이 작용할 때까지 바닥판 콘크리트를 포함하여 거더의 외관상으로는 어떠한 균열이나 국부적인 손상도 관측되지 않았다.

SCP 합성거더의 하중에 따른 변형률의 측정결과는 거더의 강재 및 콘크리트와 바닥판 콘크리트의 세부분에 대해서 분석하였으며, 인장변형률은 (+)로 압축변형률은 (-)로 표시하였다. 변형률의 계측은 그림 10에서 볼 수 있듯이 거더의 경우 중립축, 거더 상하연 및 텐던위치의 4개소에 대해서, 바닥판의 경우 상하연 2개소에 대해서 실시하였다.

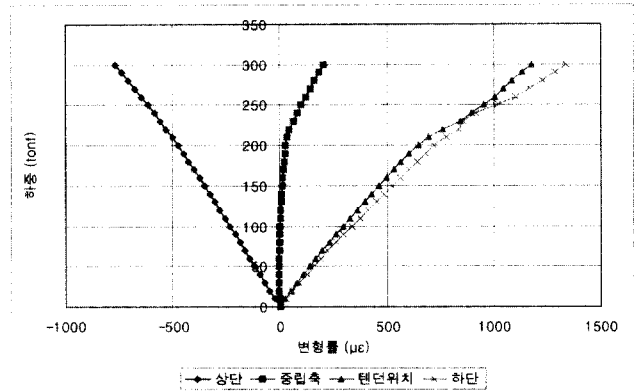


그림 14. 거더 콘크리트의 하중-변형률선도 (L/2지점)

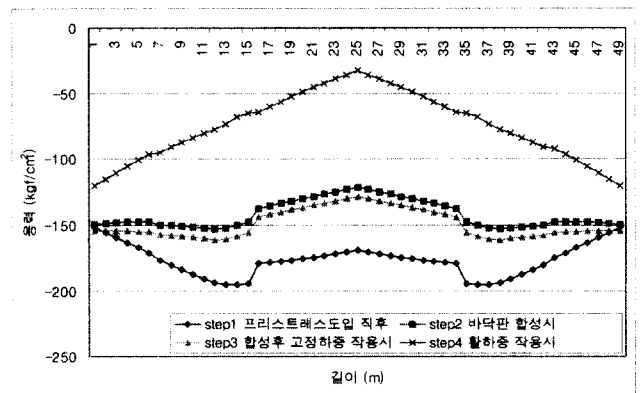


그림 15. 거더 콘크리트 하단의 단계별 응력 (활하중 40tonf)

그림 14는 거더 콘크리트에 매립된 철근에 부착된 강재계 이지를 통해 하중이 증가함에 따라 상부플랜지는 압축변형, 하부플랜지는 인장변형의 발생을 보여주고 있다. 그림 13. 하중-변위선도와 같이 변형률도 200tonf의 하중에서부터 급격한 변화를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 제작된 거더는 하중 200tonf 까지 탄성거동하는 것으로 가정하여 실험값과 비교를 위한 설계값을 제시하였다. L/4 지점에서 관측된 변형률 측정 결과 또한 중앙점의 측정결과와 비교하여 크기만 작을 뿐 유사한 경향을 나타내었다. 거더 콘크리트는 그림 15의 해석에 의한 단계별 응력변화에서 볼 수 있듯이 설계활하중 재하시(step4)에도 전단면 압축을 받고 있는 상태이다. step3의 합성후 고정하중은 시험체이므로 작용하지 않으며, 크리프 및 건조수축만에 의한 응력변화이다. 시험체에서 활하중 재하 전단계에서의 실응력을 해석에 의한 응력과 같게 가정하여, 해석에 의한 응력값과 비교하면 그림 16과 같다. 표 5에는 거더 콘크리트 내부 응력의 설계값과 실험값을 비교하였으며, 설계활하중 40tonf까지의 실제측 응력의 변화량은 약 27.75kgf/cm<sup>2</sup>(상단), 36.27kgf/cm<sup>2</sup>(하단)으로 설계값 27.79kgf/cm<sup>2</sup>(상단), 44.02kgf/cm<sup>2</sup>(하단)과 유사한 추세를 보이고 있다.

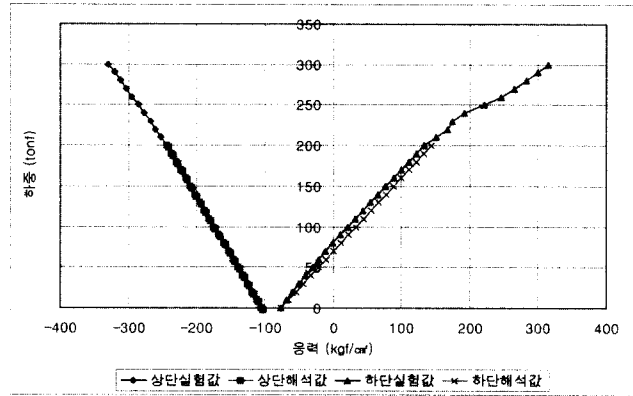


그림 16. 거더 콘크리트의 하중-응력선도 (L/2지점)

표 5. 거더 콘크리트 응력의 설계값과 실험값의 비교(단위: kgf/cm<sup>2</sup>)

구분	0tonf	40tonf (설계하중)	200tonf	300tonf	560tonf (최대하중)
상단	설계	-105.47	-133.26 (-244.38)	-	-
	실험	-	-133.22	-244.26	-330.03
하단	설계	-76.62	-32.60 (143.5)	-	-
	실험	-	-40.35	133.36	314.80

\* ( )안의 값은 허용값을 초과한 탄성해석에 의한 가정값임.  
\* 거더 콘크리트의 허용휨압축응력=186.3kgf/cm<sup>2</sup>, 허용인장응력=0

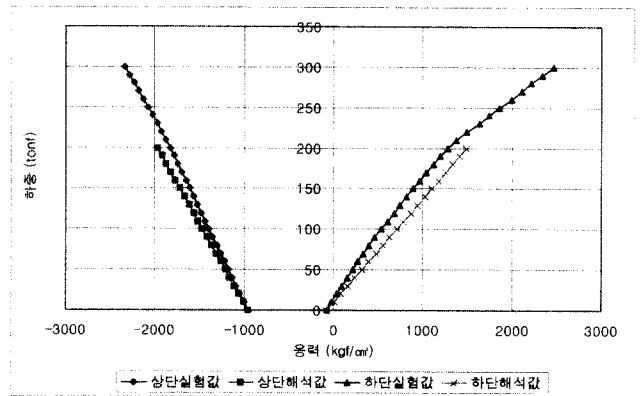


그림 18. 거더 강재의 하중-응력선도 (L/2지점)

표 6. 거더 강재 응력의 설계값과 실험값의 비교(단위: kgf/cm<sup>2</sup>)

구분	0tonf	40tonf (설계하중)	200tonf	300tonf	560tonf (최대하중)	
상단	설계	-956.93	-1,160.58 (-1,975.18)	-	-	
	실험	-	-1,134.38	-1,828.43	-2,337.26	-3,258.11
하단	설계	-68.34	244.03	1,493.51	-	-
	실험	-	154.47	1,284.27	2,463.42	4,181.01

\* ( )안의 값은 허용값을 초과한 탄성해석에 의한 가정값임.  
\* 거더 강재의 허용인장(압축)응력=1,900kgf/cm<sup>2</sup>

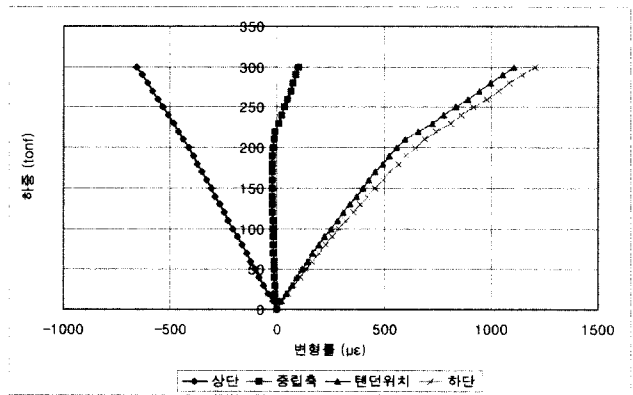


그림 17. 거더 강재의 하중-변형률선도 (L/2지점)

그림 17에서는 거더 강재의 하중-변형률선도를, 그림 18에는 거더 강재의 하중-응력선도를 나타내었다. 표 6에는 대표적인 하중에서의 거더 강재의 실험에 의한 응력값과 해석에 의한 응력값의 비교를 나타내었는데 설계하중 내에서의 응력변동은 해석에 의한 값보다 작으며 약 177kgf/cm<sup>2</sup>(상단), 223kgf/cm<sup>2</sup>(하단)으로 허용응력 이내의 충분히 안전한 값을 보여주고 있다.

그림 19에서는 바닥판 콘크리트 상단의 하중-변형률선도를 나타내고 있으며, 표 7에서는 바닥판 콘크리트 응력의 설계값과 실험값을 비교하고 있다. 바닥판 콘크리트의 변형률은

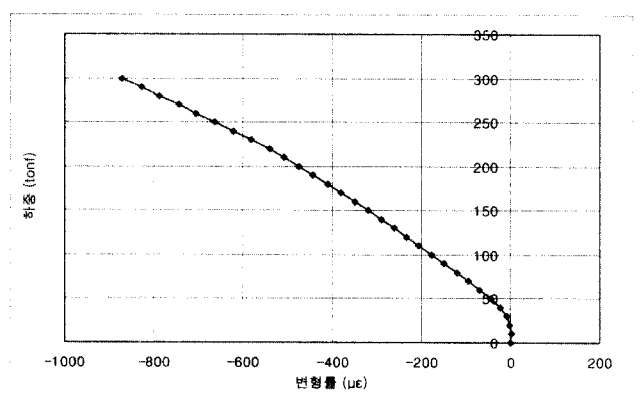


그림 19. 바닥판 콘크리트의 하중-변형률선도 (L/2지점)

표 7. 바닥판 콘크리트 응력의 설계값과 실험값의 비교(단위: kgf/cm<sup>2</sup>)

구분	0tonf	40tonf (설계하중)	200tonf	300tonf	560tonf (최대하중)
설계값	-11.47	-44.50 (-176.62)	-	-	-
실험값	-	-17.50	-13.96	-236.12	-572.17

\* ( )안의 값은 허용값을 초과한 탄성해석에 의한 가정값임.  
\* 바닥판 콘크리트의 허용휨압축응력=111.8kgf/cm<sup>2</sup>, 허용인장응력=0

콘크리트 게이지의 특성상 측정값의 신뢰성이 부족하여 정상적인 데이터가 계속된 바닥판 상부면의 결과이다. 바닥판도



거더의 경우와 마찬가지로 사용하중상태에서 충분히 안전한 것으로 판단된다.

표 4~7에서 알 수 있듯이 본 실험을 위해 제작된 SCP 합성거더는 사용하중 상태뿐만 아니라 극한하중 상태에서도 상당한 여유가 있어 구조물의 안전성은 상당히 큰 것으로 나타났다.

#### 4.4.3 동적실험 결과

SCP 합성거더의 동적거동특성을 확인하기 위하여 진동실험을 실시하였다. 측정된 가속도를 분석한 결과 고유진동수는 약 2.0Hz로 나타났으며, 50m 내외의 경간을 갖는 박스형태 교량의 고유진동수가 2.0~3.0Hz인 것에 비추어 I형단면의 SCP 합성거더의 고유진동수는 기존교량형태의 공용 수준과 유사한 것으로 판단된다. 그러나 SCP 합성거더 한 개의 시험체에 국한된 결과이므로 향후 실제 교량의 가설 후 진동실험을 실시하여 실제 동적거동특성을 확인할 수 있을 것이다.

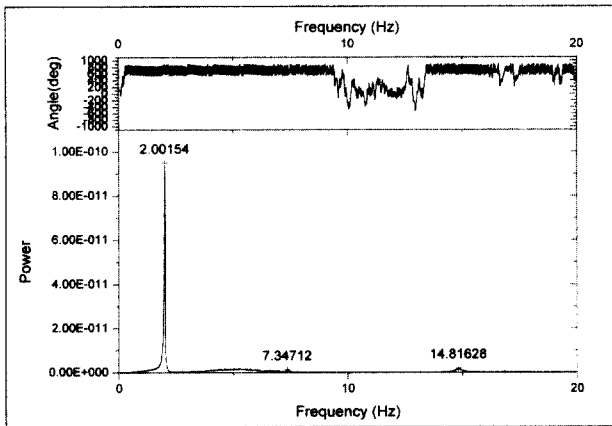


그림 20. SCP 합성거더의 고유진동수 해석결과

#### 4.4.4 하중재하에 따른 구조물의 상태

거더 중앙점의 300tonf과 8.0m 떨어져 260tonf의 하중을 재하하였을 때의 중앙부 처짐은 578.6mm로 측정되었다. 하중증가에 따른 구조물의 육안 관찰 결과 최초의 손상은 중앙점에 위치한 가력기의 하중이 약 300tonf에 도달했을 때 가력지점부인 지간 중앙부 바닥판 콘크리트의 균열이 관측되었으며, 560tonf의 최고재하하중 상태까지 바닥판의 압축과 피양상 이외에는 어떠한 손상도 관찰할 수 없었다. 하중을 제거하자 약 99.0mm의 잔류변형을 남기고 하중재하시 발생되었던 처짐은 회복되었다. 이러한 결과는 본 거더가 항복에 도달할 때까지 상당한 처짐을 나타내므로 충분한 연성을 확보하고 있으며, 하중 재하로 발생되었던 처짐의 대부분이 하중이 제거되면 회복되므로 안전성 면에서도 유리한 특성을 나타내고 있다.

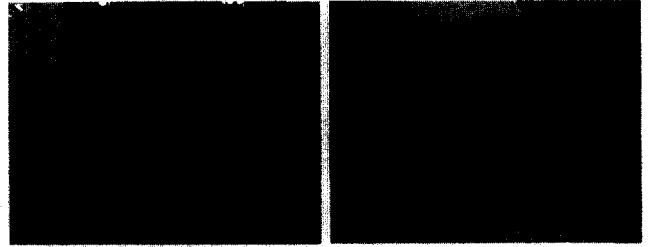


그림 21. 콘크리트 바닥판의 파괴

실험 종료후 시험체를 10등분(5m)하여 단면상태를 관찰하였다. 거더 콘크리트가 강재 내부에 채워짐으로서 육안 관찰할 수 없었던 수분의 잔류, 공극의 생성, 재료의 분리, 균열의 발생 등 제작전 우려했던 문제들은 관찰되지 않았다.

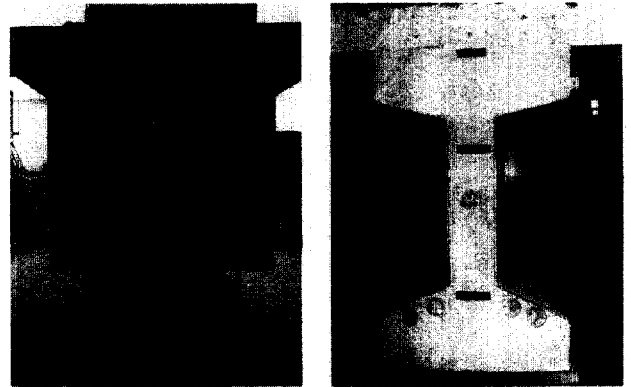


그림 22. SCP 합성거더의 절단면

## 5. 결론

본 연구에서는 강재와 콘크리트의 합성을 통해 새로운 교량 상부구조형식인 SCP 합성거더를 개발하였다. SCP 합성거더의 구조설계 및 제작과정에 대한 연구와 실적용성 확보를 위한 실물모형의 제작과 재하실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, SCP 합성거더는 외부 강재와 내부 콘크리트를 합성시켜 강성을 키움으로서 효율적으로 처짐 및 진동을 감소시키고, 콘크리트의 인장응력에 대응하기 위하여 PS 강선을 도입함으로써 낮은 형고의 장경간 교량에 적용이 가능하다.

둘째, 실물모형실험을 통해 처짐, 응력 등 사용하중 상태에서의 구조적 안전성은 매우 높은 것으로 나타났으며, 실교량에 부합할 수 있는 보다 유연한 설계가 가능할 것으로 판단된다. 또한 극한하중에 대해서도 외부강재의 구속작용에 의해 구조물의 안전성이 매우 높은 것으로 나타났다.

셋째, 합성거더의 내부콘크리트가 강재에 둘러싸여 육안관찰이 불가능함으로 제작시 우려되는 공극발생, 수분잔류, 재료분리 등의 문제는 발생되지 않았으며, 사용하중상태에서

콘크리트는 전단면 압축 상태이므로 균열은 발생되지 않으며 콘크리트가 대기중에 노출되지 않으므로 균열진전메카니즘 또한 형성되지 않을 것으로 판단된다.

넷째, SCP 합성거더는 설계자동화, 공장자동화 제작에 의한 대량생산과 강재보강재, 철근배근, 주형거푸집 등에 소요되는 재료 및 노무비의 절감을 통해 새로운 대안 교량형식으로 경제성을 확보할 수 있을 것이다.

마지막으로 정착부, 전단연결, 피로 검토 등 보다 세부적인 사항에 대한 연구검토와 최적설계를 통한 시간별 표준단면의 개발, 생애주기비용분석(Life Cycle Cost Analysis)을 통한 경제성 검토 등이 단계적으로 수행될 것이다.

### 참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, "도로설계편람(III)", 건설교통부, 2000
2. 한국도로교통협회, "도로교설계기준", 건설교통부, 2000
3. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준", 건설교통부, 1999

4. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges (16th Edition)", 1996
5. Lei Zhao, Rigoberto Burgueño, Henriette La Rovere, Frieder Seible, and Vistsp Karbhari, "Preliminary Evaluation of the Hybrid Tube Bridge System", University of California, San Diego, Report No. TR-2000/04, 2000
6. William Weaver, Jr. and James M. Gere, "Matrix Analysis of Framed Structures (3rd Edition)", Chapman & Hall, 1990
7. NCB研究會編, "合成構造と橋", 山海堂, 1996
8. 保坂鐵矢, 杉本一朗, "鐵道における最近の鋼・コンクリート複合橋梁", 橋梁と基礎, pp.31~40, 2000. 7
9. 野村國勝, 梶川靖治, "複合構造橋梁", 技報堂出版, 1994
10. 園田惠一郎, "複合構造", 橋梁と基礎, pp.23~29, 1997. 8
11. 日本道路協會, "道路橋 示方書・同解説", 1997
12. 日本土木學會, "鋼・コンクリート 合成構造の 設計ガイドライン", 1994

(접수일자 : 2002년 7월 18일)