



## 강재 보-PC 보가 강접합 연결된 하이브리드 보의 휨 거동 평가

서은아<sup>1)</sup> · 양근혁<sup>2)\*</sup> · 홍승현<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 구조융합연구소 <sup>2)</sup>경기대학교 플랜트·건축공학과 <sup>3)</sup>(주)한주에스티

### Evaluation on Flexural Behavior of Hybrid Beams with Rigid Joint Connecting Steel and Precast Concrete Elements

Eun-A Seo,<sup>1)</sup> Keun-Hyeok Yang,<sup>2)\*</sup> and Seung-Hyun Hong<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Structural Engineering Research Institute, Korean Institute of Civil engineering and Building technology, Goyang 10223, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Department of Plant·Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon 16227, Rep. of Korea

<sup>3)</sup>Han-Ju ST Co., Ltd, Seoul 08390, Rep. of Korea

**ABSTRACT** A hybrid precast concrete beam system with a simple rigid connection was proposed to compensate the limitations and shortcomings of the conventional bolt connection associated with the H-beams embedded into concrete beams. Three beam specimens with fixed both ends were tested under one-point top cyclic loading to explore the effectiveness of the developed hybrid beam system in transferring externally applied flexure to a column. The main parameter considered was the length ( $L_s$ ) of H-beam, which was selected to be  $0.25L_t$ ,  $0.5L_t$ , and  $1.0L_t$ , where  $L_t$  is the distance from the support to the point of inflection. All beam specimens showed a better displacement ductility ratio than the reinforced concrete beams with the same longitudinal reinforcement index, indicating that the cyclic load-deflection curve and ductility were insignificantly affected by  $L_s$ . The continuous strain distribution along the beam length and the prediction of the ultimate load based on the collapse mechanism ascertained the structural adequacy of the developed rigid connection.

**Keywords** : hybrid beam, rigid connection, ductility, collapse mechanism

### 1. 서 론

최근 대공간 구조물에서는 구조적 성능을 확보하면서 공기단축, 원가절감을 위한 방법으로 콘크리트 구조와 강구조를 연결한 하이브리드 보의 사용이 증가하는 추세이다. 하이브리드 보는 콘크리트 속에 강재를 매립하거나 강판 거푸집과 콘크리트를 일체화하는 합성의 개념보다는 철근콘크리트 보와 강재 보를 연결하여 두 구조의 장점을 살리는 시스템적 합성이다. 강재 보와 연결되는 콘크리트 보는 공기단축 측면에서 현장타설 보보다는 공장 제작의 사용도 점차 고려되고 있다.<sup>1)</sup> 강재 보와 프리캐스트 콘크리트(precast concrete, PC) 보의 연결절점은 가능하면 단순한 시공절차와 원활한 응력의 전달과 변형저항 능력을 고려해야 한다.

하이브리드 보에서 두 구조부재의 연결은 주로 콘크리트 보의 내부에 매립된 강재 보와 기둥에 연결된 강재 보의 볼트접합에 의하고 있다. 이 볼트접합은 크레인의 양중 소요시간 및 다수의 볼트체결 시 볼트구멍 간의 불일치 가능성 등 시공 상의 불리한 요소가 있다. 특히 구조적 거동의 관점에서 콘크리트에 매립된 강재와 콘크리트 사이의 현저한 강성차이로 인하여 심각한 할렬균열 및 역사인장 균열에 의한 내력과 연성저하의 문제가 나타날 수 있다.<sup>2)</sup> 하지만 하이브리드 보의 기존 연구<sup>3-5)</sup>는 대부분 단순지지 조건에서 수행됨으로서 단부에서의 할렬균열 및 역사인장 균열 문제가 나타나지 않아, 이에 대해 심각하게 다루어지지 않았다.

본 연구에서는 하이브리드 보에서 볼트접합 절점의 문제점을 개선하기 위한 새로운 개념의 강접합 절점상세를 개발하였다. 제시된 강접합 절점상세를 갖는 하이브리드 보의 휨 거동을 양단 고정단의 반복하중 하에서 평가하였다. 보의 길이를 따른 주철근과 강재 보 플랜지에서의 변형률 분포 및 강접합 절점을 고려한 보의 붕괴기구로부터 산정한 최대하중과 실험결과와의 비교로부터 제시된

\*Corresponding author E-mail : yangkh@kgu.ac.kr  
 Received March 30, 2015, Revised September 17, 2015,  
 Accepted September 30, 2015  
 ©2016 by Korea Concrete Institute

절점의 하중전달 및 강접합 절점설계의 적절성을 평가하였다.

## 2. 하이브리드 보 시스템 상세

### 2.1 기술 개요

제시된 하이브리드 보 시스템은 PC 구조와 보 양단부의 강재 구조, 두 구조의 연결절점 그리고 상부 현장타설 콘크리트로 구성된다(Fig. 1). 강재 기둥과 용접으로 연결되는 강재 보의 길이는 기둥의 중심에서부터 변곡점까지의 거리( $L_f$ ) 이하로 설계된다. 강재 보와 PC 보를 연결하기 위한 L형 강판은 강재 보의 끝단에 공장 용접으로 설치된다. L형 강판의 상부는 콘크리트 보의 상부 주철근 정착을 위한 구멍이 설치되며, 강판의 하부는 PC 보의 하부 주철근 정착을 위한 요철형상으로 가공된다. PC 보의 하부 주철근은 PC 보와 강재 보의 연결을 위하여 단부에서 50~100 mm 노출된다. 현장에서 PC 보를 양중하여 PC 보의 하부 주철근을 이용하여 L형 강판에 거치하고 커플러를 이용하여 L형 강판의 요철형상 안쪽에서 주철근을 정착한다. 하부 주철근의 기계적 정착 후 현장에서 배근되는 상부 주철근은 L형 강판의 상부 구멍을 통해 기계적 정착을 한다. 강재 보와 PC 보가 연결되는 절점영역에서는 전단철근의 배근 후 현장 콘크리트 타설로 마감된다. 커플러를 이용한 주철근의 기계적 정착은 연결부에서의 강접합 구현과 주철근의 슬립을 방지하기 위해 나사산이 가공된 주철근에 암나사식의 커플러를 토크에 의해 긴결체결된다. 작용토크에 의해 주철근에 프리스트레스력이 도입되는데, 그 응력은 주철근 항복강도의 약 5% 정도로 한다. 주철근의 정착부에서 프리스트레스력 도입을 위한 커플러의 토크는 고력볼트의 토크법에

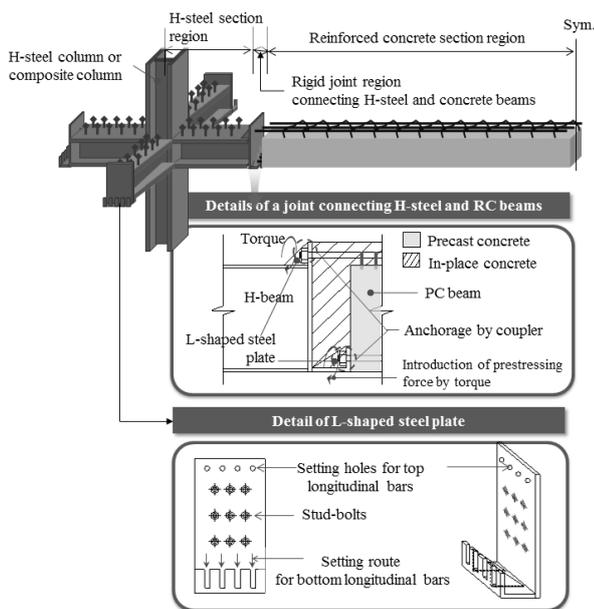


Fig. 1 Details of the developed hybrid beam system

의해 제어된다.

제시된 하이브리드 보 시스템의 구조적 특징은 다음과 같이 요약될 수 있다: 1) PC 보에 작용하는 하중은 L형강에 정착된 주철근-L형강-강재 보-강재 기둥으로 전달된다; 2) PC 보의 상부 주철근과 하부 주철근이 L형강에서 정착되고 주철근의 작용응력은 강재 보로 전달됨으로서 강재 보와 PC 보의 연결절점은 모멘트 저항능력을 갖는 강접합 절점의 거동을 기대할 수 있어 보 전체의 처짐저감에 유리하다; 3) PC 보의 내부에 강성이 큰 강재 보가 매립되지 않음으로서 PC 보 단부에서의 할렬균열 및 역사인장 균열 발생의 가능성을 최소화 할 수 있다. 제시된 하이브리드 보 시스템은 볼트접합에 비해 시공적 장점도 갖는다. 현장 볼트공정이 없으므로 크레인 양중시간을 줄일 수 있으며, 볼트구멍간의 오차로 인한 공정지연도 최소화 할 수 있다.

### 2.2 설계절차

Fig. 1에 나타난 하이브리드 보 시스템에서 강접합 절점에서의 취성파괴를 방지하기 위하여 가능하면 콘크리트 보에서 소성힌지가 발생하도록 계획하였다. 따라서, 하이브리드 보 시스템의 붕괴기구는 Fig. 2와 같이 이상화 될 수 있다. Fig. 1에 나타난 하이브리드 보 시스템의 구성요소 및 연결상세를 고려하면 다음과 같은 사항들이 설계에서 검토될 필요가 있다.<sup>6)</sup>

- 콘크리트 보와 강재 보의 내력 및 L형 강판에 설치되는 스티드 볼트 설계는 관련 설계기준<sup>7)</sup>을 따른다.
- L형 강판의 두께는 정착되는 주철근의 인장력 및 전단에 대해 충분히 저항할 수 있도록 결정한다.
- PC 보의 설치 시 보 자중 및 슬래브 작업하중 등은 주철근의 장부작용에 의해 지지될 수 있어야 한다.
- 프리캐스트 콘크리트와 현장타설 콘크리트의 접합면에서 발생하는 수평전단력과 위험단면에서의 수직전단력을 고려하여 절점영역 및 콘크리트 보에서의 전단철근 양을 결정한다.
- 강접합 절점에서의 전단설계는 전단마찰에 의해 검토하며, 연성거동을 유도하기 위하여 폐쇄형 전단철근

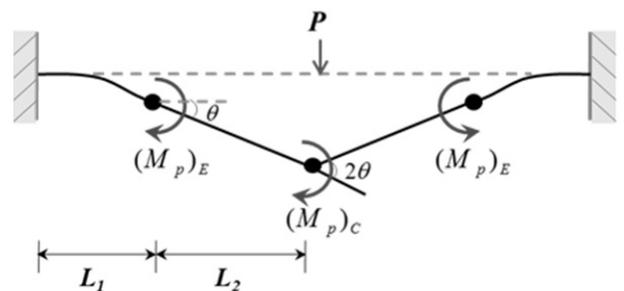


Fig. 2 Intended plastic hinge location of the developed hybrid beam

을 간격 50 mm 이하로 배근한다.

- 보의 처짐은 강재 보 구간과 콘크리트 보 구간으로 구분하여 각각의 탄성계수와 단면2차 모멘트를 이용한다. 콘크리트 보 구간에서는 유효단면2차모멘트 개념을 적용한다.
- 필요에 따라 소요 연성비에 대한 강재 보의 길이와 콘크리트 구속 등을 설계할 수 있으며, 이는 Yang<sup>6)</sup>에 의해 제시되었다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험체 상세

제시된 하이브리드 보 시스템의 휨 거동과 강접합 절점에서의 응력전달을 평가하기 위하여 강재 보의 길이를 변수로 3개의 실험체를 제작하였다. 강재 보의 길이( $L_s$ )는  $0.25L_p$ ,  $0.5L_p$ ,  $1.0L_p$ 로 변화하였다. 실험체의 배근과 단면상세 및 강접합 절점의 상세를 Fig. 3에 나타내었다. 실험체는 실제 설계에 반영되는 보의 크기를 2/3로 축소하였다. 이에 따라 보의 순경간은 6.8m이며, 콘크리트 보 단면의 크기는  $300 \times 400$  mm인데, 단 보 경간 중앙의 가력점에서 단면의 크기는 반복가력 장치의 설치를 위하여  $400 \times 400$  mm로 하였다. 콘크리트 보와 연결되는 강재 보는 H-300 $\times$ 150 $\times$ 6.5 $\times$ 9를 이용하였다. 단부 강재 보는 콘크리트 보의 파괴에 앞서 국부좌굴 등이 발생하지 않도록 설계기준<sup>7)</sup>에 준하여 설계되었다. 양단 고정단 보의 구현을 위하여 실험체 양 단부에 700 $\times$ 700 mm 단면의 H형강 두 개가 연결된 합성 기둥을 설치하였다. 단부 강재 보의 합성기둥의 H형강에서 수평도를 유지하여 용접되었다.

PC 보의 주철근을 정착하기 위한 L형 강판에는 콘크리트와의 일체화를 위하여 19 mm 직경의 스티드 볼트 9개가 설치되었다.

콘크리트 보의 상·하부 주철근 양은 Fig. 2에 나타난 소성힌지 위치를 고려하여 결정하였다. 소성힌지 위치가 절점영역의 콘크리트 보에서 형성될 수 있도록 절점영역 및 지점에서의 강재 보가 항복에 도달하기 이전에 콘크리트 보의 주철근이 항복에 도달 할 수 있도록 하였다. 이는 각 위치에서의 외력에 의한 모멘트와 각 부재의 내력의 비의 산정을 통해 검토될 수 있다. 즉,  $L_s$ 가  $0.5L_p$ 와  $1.0L_p$ 인 보에는 상·하부 주철근으로서 19 mm 직경의 철근 4본( $\rho_s=0.01$ )이 배근되었으며,  $L_s$ 가  $0.25L_p$ 인 보에서는 19 mm 직경의 철근 6본( $\rho_s=0.015$ )이 배근되었는데, 여기서  $\rho_s$ 는 상부 또는 하부 주철근 비이다. 콘크리트 보에서의 전단철근 배근은 할렬균열 제어 및 수직과 및 수평 전단력 분포를 고려하여 직경 10 mm 철근을 이용하여 강접합 절점으로부터  $1.0d$  구간은 50 mm,  $1.5d$ 까지의 구간은 200 mm, 이외 구간은 가력영역에서의 콘크리트 구속을 위하여 100 mm 간격으로 배근하였는데, 여기서  $d$ 는 콘크리트 보의 유효단면 깊이이다.

#### 3.2 재료

콘크리트 설계 압축강도는 프리캐스트의 경우 35 MPa이며, 현장타설의 경우 24 MPa이다. 현장타설 콘크리트는 기건상태에서 양생하였다. 표준형 실린더( $\phi 100 \times 200$  mm)로부터 측정된 프리캐스트 및 현장타설 콘크리트의 압축강도는 각각 36.7 MPa와 26.6 MPa이다.

콘크리트 보 실험체에 사용된 철근 및 강재 보의 역할

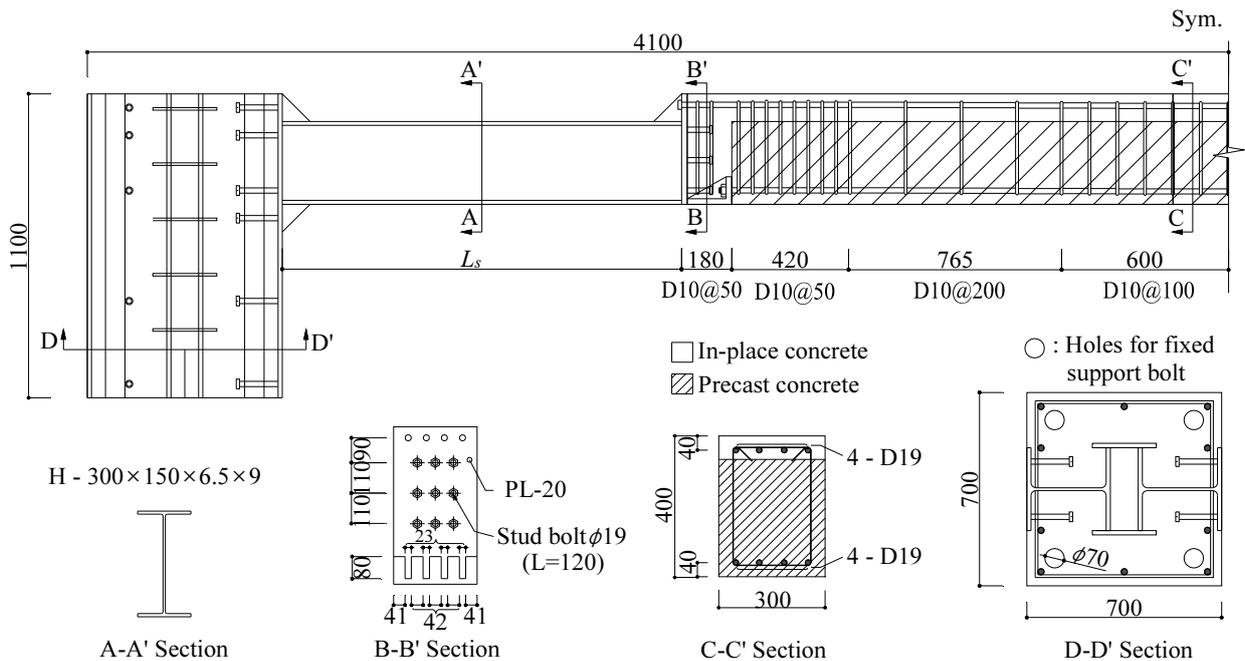


Fig. 3 Details of section dimension and reinforcing bar arrangement in beam specimens H0.5

적 특성을 Table 1에 나타내었다. 주철근으로 이용된 직경 19 mm 철근과 전단철근으로 이용된 직경 10 mm 철근의 항복강도는 518 MPa와 500 MPa이다. 강재 보의 항복강도는 332 MPa이며 인장강도는 529 MPa이다.

### 3.3 실험 및 측정방법

양단고정 조건인 보의 경간 중앙에서 일점 집중 반복 하중의 가력상세를 Fig. 4에 나타내었다. 모든 보의 전단 경간비( $a/d$ )는 9.4이다. 지점의 고정조건 구현을 위하여 강재 보가 용접연결 된 합성 기둥을 4개의 직경 50 mm인 강재 볼트를 이용하여 가력 슬래브에 고정하였다. 하중은 1,000 kN 용량의 액츄레이터를 이용하여 보의 경간 중앙에서 1점 집중하중으로 변위제어 하에 가력하였다. 변위제어는 FEMA 356<sup>8)</sup>에서 제시하는 이력에 따라 각 증분변위에서 3 사이클(Cycle)씩 반복하였으며, 각 사이클 당 수직변위의 크기는 부재 항복변위( $\Delta_y$ )의 0.75~5배로 증분하였다(Fig. 5). 실험체 중앙부의 처짐은 300 mm 용

Table 1 Mechanical properties of metallic materials

Type	$f_y$ (MPa)	$f_u$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$\epsilon_y$ (%)	$\epsilon_f$ (%)
HD10	500	604	190	0.26	10.6
HD19	518	619	196	0.26	12.5
SM490	332	529	215	0.15	28.2

$f_y$ ,  $f_u$ ,  $E_s$ ,  $\epsilon_y$ , and  $\epsilon_f$  are yield strength, tensile strength, modulus of elasticity, yield strain, and extensibility, respectively, of metallic materials.

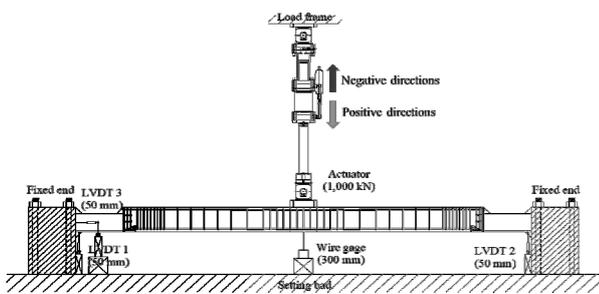


Fig. 4 Test set-up for cyclic one-point top loading

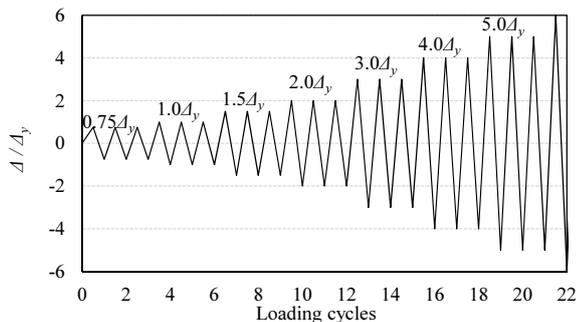


Fig. 5 Specified deflection history

량의 와이어 게이지를 이용하여 측정하였다. 하중가력에 따른 단부 기둥의 미끄러짐 발생은 50 mm 용량의 LVDT를 이용하여 측정하였다. 압축 및 인장영역, 그리고 보 중앙부, 단부 및 절점영역에서 주철근, 강재 보 및 L형 강판의 응력전달은 전기저항 와이어게이지를 통하여 측정하였다. 실험은 콘크리트의 압괴 또는 하중이 보 최대 내력의 80% 이하로 떨어졌을 때 종료하였다.

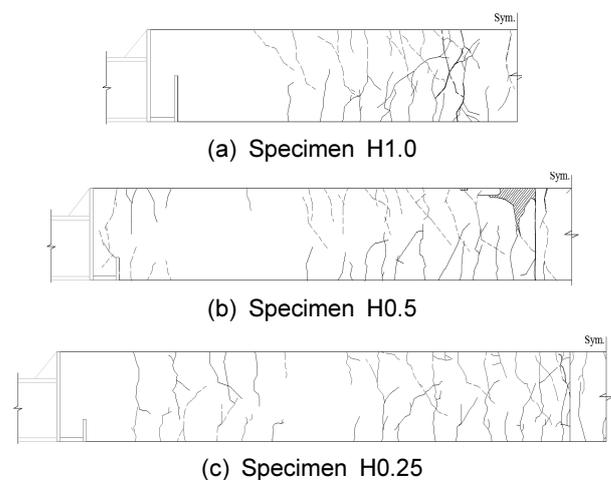
## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 균열진전 및 파괴모드

각 실험체의 균열진전 및 파괴영역을 Fig. 6에 나타내었으며, 균열 및 최대내력 시 하중과 연성비는 Table 2에 요약하였다. 제시된 강접합 절점을 갖는 H-시리즈 보들은 모두 휨 파괴에 의해 지배되었으며, 콘크리트 보에서 전단균열은 발생하지 않았다.

H1.0 실험체의 휨 균열은 하중이력이  $0.75\Delta_y$ 일 때 경간 중앙부에서 발생하였는데, 하중의 증가와 함께 휨 균열 발생영역은 단부방향을 향해  $3d$  구간까지 분포하였다. 하중이력이  $2\Delta_y$ (9 cycle)일 때 휨 균열의 진전 높이는 약  $0.85d$ 까지 달하였으며,  $3\Delta_y$  (12 cycle)에서는 가력점에서 균열 폭의 현저한 증가와 함께 콘크리트 박리가 나타났다. H1.0 실험체의 최종 파괴는 가력점의 압축측 콘크리트의 심각한 파괴( $5\Delta_y$ )에 의해 결정되었으며, 강접합 절점은 변곡점에 위치하기 때문에 절점에서의 휨 균열은 발생하지 않았다.

H0.5 실험체의 휨 균열 진전 및 파괴모드는 H1.0 실험체와 비슷하였다. 단, 하중이력이  $0.75\Delta_y$ 일 때 절점 영역에서 프리캐스트 콘크리트와 현장타설 콘크리트 계면을 따라 수직균열이 발생하였다. 이 수직균열은 하중이력이  $2\Delta_y$  이후에서는 그 폭 및 영역의 진전 등은 나타나지 않



(The cracks developed at the positive and negative loading directions are marked by using the solid and dotted lines, respectively.)

Fig. 6 Crack propagation and failure mode

**Table 2** Summary of test results

Specimen <sup>1)</sup>	$P_{cr}$ (kN)		$P_y$ (kN)		$P_n$ (kN)		$\Delta_y$ (mm)	$\Delta_n$ (mm)	$W$	$\mu_{\Delta}$	$(P_n)_{Pre.}$ (kN)	$(P_n)_{Exp.}$ (kN)
	Positive <sup>2)</sup>	Negative <sup>2)</sup>	Positive	Negative	Positive	Negative						
H1.0	48.85	-44.38	213.01	-193.53	251.04	-248.18	23.3	69.9	296.3	3.0	259.2	1.04
H0.5	39.20	-29.92	201.92	-154.10	251.78	-246.30	26.1	80.1	470.7	3.07	247.6	0.99
H0.25	50.41	-44.76	214.32	-190.30	252.24	-238.26	24.8	66.2	269.3	2.67	234.4	0.96

Note) 1. The beam specimens with the developed connection details are identified using the length of steel beams. For example, H0.5 indicates a hybrid beam with steel beam length of 0.5LI.

$P_{cr}$  = initial flexural cracking load,  $P_y$  = yield load,  $P_n$  = ultimate load,  $\Delta_y$  = beam deflection at the yielding of longitudinal reinforcement,  $\Delta_n$  = beam deflection at the ultimate load,  $W$  = work damage index, and  $\mu_{\Delta}$  ( $=\Delta_n/\Delta_y$ ) = displacement ductility ratio.

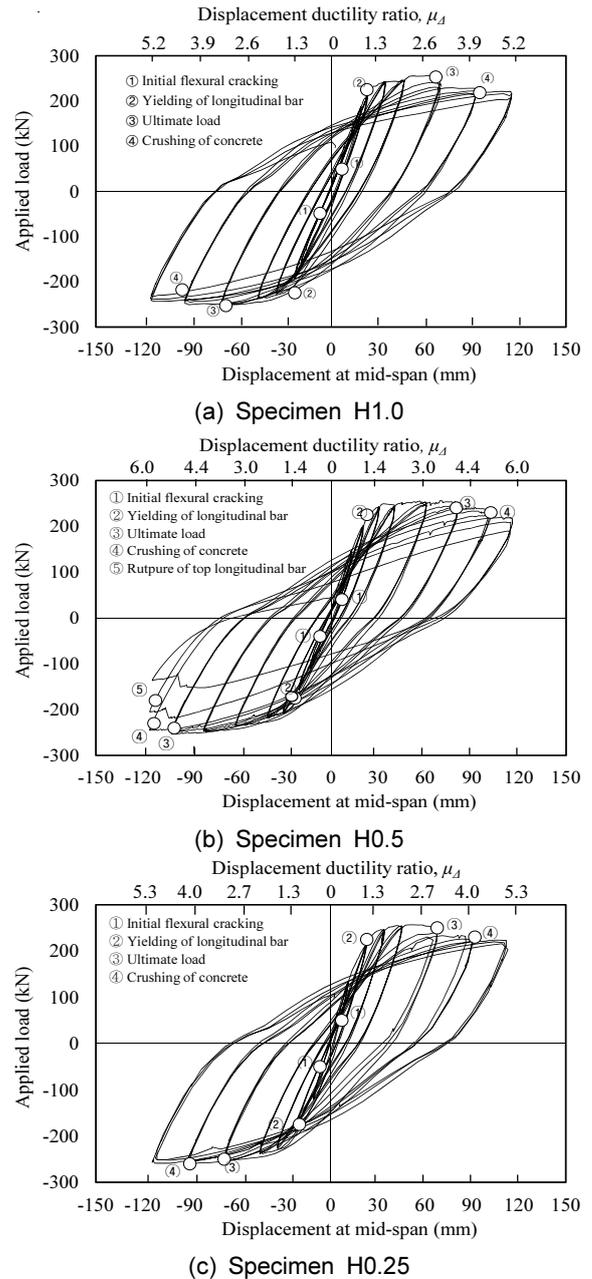
았다. 기등면에서부터의 절점위치는 변곡점까지의 거리보다 작기 때문에 모멘트를 받으며, 이에 따라 절점영역 부근의 RC 보에서 휨 균열들이 발생하였다. 하중이력이  $5\Delta_y$  일 때 가력점의 압축측 콘크리트가 압괴되기 시작하면서  $6\Delta_y$  (21 cycle)에서 상부 주철근의 파단과 함께 실험이 종료되었다.

H0.25 실험체의 휨 균열진전은 H0.5 실험체와 비슷하였는데, 접합 절점영역에서 프리캐스트 콘크리트와 현장 타설 콘크리트 계면을 따른 수직균열은 발생하지 않았다. 하중이력의 변위가  $3\Delta_y$  일 때 절점영역에서 주철근의 항복이 발생하였으며,  $4\Delta_y$  (17 cycle)에서 내력의 저하와 함께 실험이 종료되었다.

### 4.2 하중-처짐 관계

Fig. 7에는 각 실험체의 하중-처짐 관계를 나타내었다. 모든 실험체는 정·부 방향에서 거의 대칭의 거동을 보였다. 최초 휨 균열의 발생과 함께 보의 처짐은 급격히 증가하며, 주철근의 항복 후 하중의 증가가 완만하게 이루어지면서, 최대하중 이후에는 서서히 하중이 감소하는 경향을 보였다. 작용하중은 압축측 콘크리트의 압괴 또는 주철근의 파단과 함께 급격히 떨어졌다.

H1.0 실험체는  $3\Delta_y$  (15 cycle)에서 최대하중에 도달하였으며  $5\Delta_y$  (20 cycle)에서 최대하중의 80.5%로 저하되었다. 최대하중 도달 이전의 동일 처짐에서 첫 번째 사이클의 최대강도 대비 두 번째 및 세 번째 사이클의 최대강도 저감률은 1% 이하였다. 하지만 최대하중의 도달 이후에는 동일 처짐에서 하중이력의 증가와 함께 강도저감율이 점차 증가하였다. H0.5 실험체는  $3\Delta_y$  (15 cycle)에서 최대내력에 도달하였으며 정방향 하중에 대해  $6\Delta_y$  (23 cycle)에서 최대하중의 75%로 저하되었다. 부방향 하중에서는  $5\Delta_y$  (20 cycle) 이전까지는 하중의 심각한 감소는 나타나지 않았으며,  $6\Delta_y$ 의 두 번째 사이클에서 가력점 상부 주철근의 좌굴 및 파단으로 인해 내력은 급격히 감소하였다. H0.25 실험체의 하중-처짐 거동은 위 두 실험체와 매우 유사하지만, 초기강성은 다소 낮았으며, 최대내력 도달 이후 하중감소는 약간 컸다. H0.25 실험체는 정방향 하중에 대해  $4\Delta_y$  (17 cycle)에서 압축측 콘크리트의 압괴



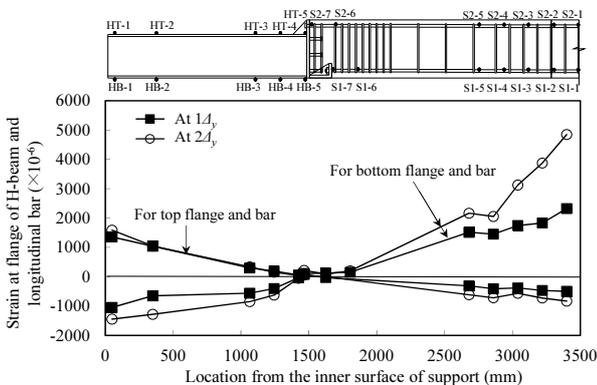
**Fig. 7** Cyclic load-deflection curve of beam specimens

및 심각한 박리와 함께 최대내력의 80% 이하로 하중이 저하되면서 실험을 종료하였다.

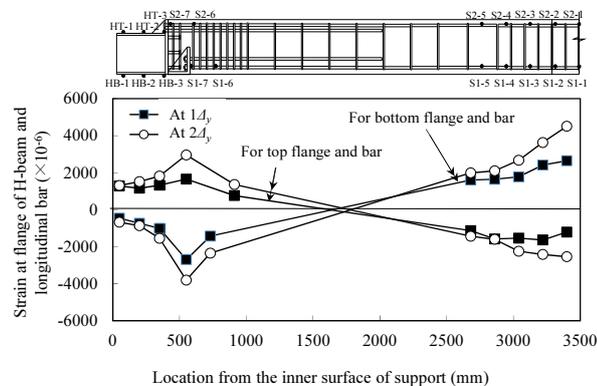
### 4.3 주철근 및 강제 보와 절점에서의 변형률 분포

각 하중이력에서 보 길이를 따른 주철근 및 강제 보의 플랜지에서 계측된 변형률 분포를 Fig. 8에 나타내었다. 소성힌지를 콘크리트 보에 발생하도록 계획하였기 때문에 최대내력까지 단부 강제 보의 플랜지는 항복에 도달하지 않았다. H1.0 실험체의 강접합 절점은 변곡점에 위치하기 때문에 절점부근에서의 주철근, L형 강관 및 H형 강 플랜지의 변형률은 0에 가까운 반면, 보 경간 중앙에서 주철근의 변형률은 급격히 증가하였다. H0.25 실험체의 절점영역은 정하중 방향에서는 부 모멘트 영역에 있으며, 부하중 방향에서는 정모멘트 영역으로 존재한다. 이에 따라 절점영역에서의 주철근은 부하중 방향에서 상부 주철근이 항복에 도달하였다. 즉, H0.25 실험체는 가력점과 강접합 절점 영역에서 주철근이 항복에 도달함으로써 소성힌지 영역이 형성되었다.

보 길이 방향을 따른 주철근 및 강제 보 플랜지에서의 변형률 분포는 휨 모멘트도의 형상을 따랐다. 또한 강접합 절점에서의 변형률 분포도 보 길이 전체 측면에서 급격한 변화를 갖는 불연속보다는 연속거동을 보였다. 이는 절점영역에서 주철근은 적절하게 정착되고 있으며, 응력흐름도 원활하게 이루어지고 있음을 의미한다. 또한 Yang<sup>9)</sup>은 강제 보에서 측정된 변형률 값으로부터 연결절



(a) Specimen H1.0



(b) Specimen H0.25

Fig. 8 Typical strain distribution of H-beam flange and longitudinal reinforcing bars along the beam length under positive loads

점의 강접합 구현 여부를 검토하였는데, 절점이 강접합인 경우, 강제보 변형률의 예측값과 실험값의 차이는 약 10% 이내로 잘 일치함을 보였다.

### 4.4 연성

하중이력에 따른 각 실험체의 일손상지수( $W$ )를 Fig. 9에 나타내었다. 각 실험체의 하중이력에서  $W$ 는 Sheikh and Khoury<sup>10)</sup>의 모델을 통해 산정하였다. 모든 실험체의  $W$  값은 최대하중(12~15 cycle)까지는 동일한 경향으로 점진적으로 증가하였지만 최대하중 이후  $W$  값은 H0.25 실험체에서 두 실험체에 비해 다소 낮았다(하지만 그 차이는 3% 이내로서 미미하였다). H1.0과 H0.25 실험체는 20사이클에서 실험이 종료된 반면 H0.5 실험체는 23사이클에서 실험이 종료되었으며, 이에 따라 파괴 시  $W$  값과 변위 연성비 값(Table 2)은 H0.5 실험체에서 높았다.

일반적으로 철근콘크리트 보의 연성은 주철근지수( $\rho_s f_y / f_{ck}$ )에 의해 중요한 영향을 받는다.<sup>11)</sup> 제시된 하이브리드 보의 변위연성비를 단순지지 철근콘크리트 보의 실험결과와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 일반적으로 주철근지수가 증가할수록 보의 변위연성비는 감소한다. 이에 따라 주철근 양이 많은 H0.25 실험체가 H1.0 및 H0.5 실험체에 비해 다소 낮은 변위연성비 값을 보였다. 한편, 동일 주철근 지수에서 제시된 하이브리드 보의 변위연성비

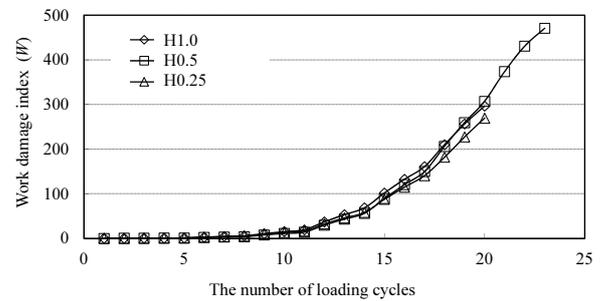


Fig. 9 Work damage index at each loading cycle

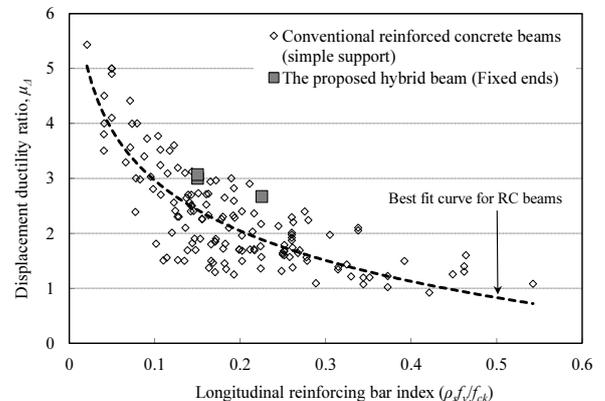


Fig. 10 Comparisons of displacement ductility ratio between proposed hybrid beams and conventional reinforced concrete beams

값은 단순지지 철근콘크리트 보에서 측정된 변위연성비 값보다 동등 이상으로 제시될 수 있었다.

## 5. 붕괴기구에 의한 보의 최대내력 산정

### 5.1 붕괴기구

양단 고정 보의 붕괴기구에 의한 최대내력은 에너지 평형법에 의해 산정될 수 있다. 소성힌지는 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 보 경간의 중앙 및 절점영역의 철근콘크리트 보에서 발생하도록 설계되었으므로 소성힌지에서의 내부 일( $w_I$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_I = 2(M_p)_E \cdot \theta + (M_p)_C \cdot 2\theta \quad (1)$$

여기서  $(M_p)_E$ 와  $(M_p)_C$ 는 절점 영역과 보 경간 중에서 철근콘크리트 보의 극한 모멘트이며,  $\theta$ 는 소성힌지 위치에서 회전각이다. 보의 경간 중앙에서 집중하중에 의한 외부 일( $w_E$ )은 절점에서  $(M_p)_E$ 가 작용할 때의 강제 보에서의 처짐량을 함께 고려하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_E = P_n \left( (L/2 - L_s)\theta + \frac{(M_p)_E L_s^2}{2E_s I_s} \right) \quad (2)$$

여기서  $E_s$ 와  $I_s$ 는 강제 보의 탄성계수와 단면2차모멘트이다. 절점영역에서 강제 보와 콘크리트 보의 처짐각은 거의 같다고 가정하면,  $(M_p)_E$ 에 대한 처짐각은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta \approx \frac{(M_p)_E L_s}{E_s I_s} \quad (3)$$

식 (3)을 식 (2)에 대입하고, 내부의 일은 외부의 일과 같다고 하면, 붕괴기구에 대한 최대 하중( $P_n$ )은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n = \frac{4[(M_p)_E + (M_p)_C]}{L - L_s} \quad (4)$$

단, H1.0 실험체는 변곡점에 절점이 형성되므로 소성힌지는 보 경간 중앙 및 기둥과 연결되는 양 단부에서 형성된다. 이를 고려한 붕괴하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_n = \frac{4[(M_p)_S + (M_p)_C]}{L} \text{ for specimen H1.0} \quad (5)$$

여기서  $(M_p)_S$ 는 강제 보의 소성모멘트이다.

### 5.2 극한 모멘트( $M_p$ )의 산정

철근콘크리트 보의 극한모멘트는 프리캐스트 부분과 현장타설 부분의 강도차이 등을 고려하여 Fig. 11에 나타낸 단면분할법을 이용하여 산정할 수 있다. 단면분할법에 의한 해석의 기본 가정은 다음과 같다:<sup>3)</sup> 1) 평면은 휨 변형 후에도 평면을 유지한다; 2) 콘크리트의 인장응력은 휨 균열의 발생 이후에는 무시한다; 3) 철근과 콘크리트는 완전부착이다; 4) 부재는 전단파괴를 방지할 수 있는 전단철근이 충분히 배근되었다. 보의 경간 중앙에서 임의의 변형률에 대한 곡률 및 휨 모멘트 내력( $M(i)$ )은 수치해석 기법으로부터 결정된 중립축에 대해 각 재료의 응력-변형률 관계를 이용하여 산정될 수 있다. 강제 보 및 주철근의 응력-변형률 관계는 완전 탄소성으로 가정하였으며, 콘크리트의 응력-변형률 관계는 Yang 등<sup>12)</sup>의 모델을 이용하였다. 보의 경간 중앙에서 변형률 값의 증분에 따라 모멘트와 곡률 값을 얻을 수 있으며, 최대 모멘트 값을 단면의 극한모멘트로 결정한다. 이들 단면분할법은 보 경간 중앙의 정모멘트 내력 및 절점영역에서의 부모멘트 내력에 대해 적용한다. 참고로, 강제보의 소성모멘트는 단면의 완전소성상태를 고려하여 산정할 수 있다.

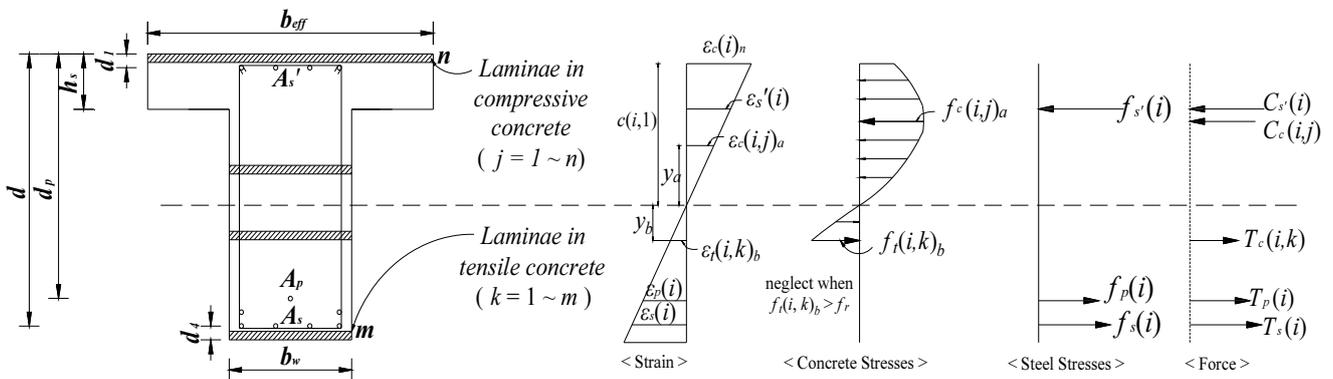


Fig. 11 Distributions of strains and stresses in the section lamina method

### 5.3 실험결과와의 비교

제시된 하이브리드 보의 붕괴기구와 단면분할법으로부터 산정된 극한하중의 예측값과 실험값의 비교를 Table 2에 나타내었다. 절점이 변곡점에 위치한 실험체 H1.0의 경우 예측값은 실험결과 대비 약 1.04이었으며, 소성힌지가 절점영역에서 형성되도록 계획된 실험체 H0.5와 H0.25의 경우 예측값은 실험결과 대비 약 0.99와 0.96으로 나타났다. 즉, 붕괴기구와 단면분할법을 이용한 극한하중의 산정 식은 실험결과와 잘 일치하였다. 따라서 붕괴기구에서 가정된바와 같이 제시된 절점상세는 강접합으로서 고려될 수 있다고 판단된다.

## 6. 결 론

강재 보와 PC 보가 강접합 연결된 하이브리드 보의 양단고정 하에서 휨 거동을 평가하였다. 주요 실험변수는 단부 강재 보의 길이( $L_f$ )로서  $0.25L_f$ ,  $0.5L_f$ ,  $1.0L_f$ 로 변화하였는데, 여기서,  $L_f$ 는 지점에서부터 변곡점까지의 거리이다. 반복 휨 하중-처짐 거동으로부터 부재의 연성 및 강접합 절점에서의 하중전달 등을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 강재 보의 길이가  $0.5L_f$ 인 실험체의 경우 절점영역에서 프리캐스트와 현장타설 콘크리트 경계면을 따라 균열이 발생하였지만 이는 부재의 내력 및 연성에 영향을 미치지 않았다.
- 2) 보 길이 방향을 따른 주철근 및 강재 보 플랜지에서의 변형률 분포는 휨 모멘트도의 형상을 따랐으며, 강접합 절점에서의 변형률 분포도 급격한 변화 없이 연속적인 거동을 보였다.
- 3) 모든 실험체의 하중-처짐 관계는 비슷한 거동을 보였다. 이에 따라 각 실험체의 하중이력에 따른 일손상지수는 최대하중까지는 동일한 값으로 점진적으로 증가하였으며, 최대하중 이후에는 강재 보의 길이가  $0.25L_f$ 인 실험체는 높은 주철근 양으로 인해 일손상지수 값이 강재 보의 길이가  $1.0L_f$ 인 실험체에 비해 약 10% 낮았다.
- 4) 동일 주철근 지수에서 제시된 하이브리드 보의 변위연성비 값은 단순지지 철근콘크리트 보에서 측정된 변위연성비 값보다 동등 이상으로 있었다.
- 5) 붕괴기구와 단면분할법으로부터 산정된 하이브리드 보의 극한하중에 대한 예측값은 실험결과와 잘 일치하였다.

## 감사의 글

이 연구는 2015년도 산업통상자원부의 재원으로 중소기업청의 지원을 받아 수행한 연구임(No. S2287119).

## References

1. Moon, J. H., and Oh, Y. H., "Evaluation of Design Method and Shear Transfer Capacity on the Horizontal Interface of PC Composite Beams", *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.25, No.1, 2013, pp.81-90.
2. Kim, O. J., Moon, J. H., and Lee, L. H., "Shear Strength of RS Hybrid Steel Beam with Reinforced Concrete Ends", *Journal of Architectural Institute in Korea*, Vol.17, No.5, 2001, pp.27-34.
3. Yang, K. H., Oh, M. H., Kim, M. H., and Lee, H. C., "Flexural Behavior of Hybrid Precast Concrete Beams with H-Steel Beams at Both Ends", *Engineering Structures*, Vol.32, No.9, 2010, pp.2940-2949.
4. Roeder, C. W., "Overview of Hybrid and Composite Systems for Seismic Design in the United States", *Engineering Structures*, Vol.20, No.4, 1998, pp.353-363.
5. Kim, S. E., and Nguyen, H. T., "Finite Element Modeling and Analysis of a Hybrid Steel-PSC Beam Connection", *Engineering Structures*, Vol.32, 2010, pp.2227-2569.
6. Yang, K. H., Evaluation of Structural Performance and Establishment of Design Guideline of HRC-2 Beams, Technical Report(KCI R 15-002), Korea Concrete Institute, 2014.
7. KBC 2009, Korean Building Code, KBC, Architectural Institute of Korea, 2009.
8. FEMA 356, Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA, Washington DC., 2000.
9. Yang, K. H., "Evaluation of Structural Performance and Establishment of Design Guideline of HRC-2 Beams", *Technical Report KCI R 15-002*, Korea Concrete Institute, 2015.
10. Sheikh, S. A., and Khoury, S. S., "A Performance-Based Approach for the Design of Confining Steel in Tied Columns", *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.4, 1997, pp.421-431.
11. Mattock, A. H., "Discussion of 'Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beam' by W. G. Corley", *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.94, 1967, pp.519-522.
12. Yang, K. H., Mun, J. H., Cho, M. S., and Kang, T. H. K., "A Stress-Strain Model for Various Unconfined Concrete in Compression", *ACI Structural Journal*, Vol.111, No.4, 2014, pp.819-826.

---

**요약** 기존의 강재 보가 콘크리트에 매립되어 볼트접합 연결되는 기존 하이브리드 접합법의 한계와 단점을 개선하기 위하여 단순한 강접합 절점을 갖는 하이브리드 PC 콘크리트 보 시스템을 개발하였다. 개발된 하이브리드 시스템의 원활한 하중전달을 파악하기 위하여 양단 고정단의 보 실험체 3개를 반복 집중하중 하에서 실험하였다. 주요 변수는 강재 보의 길이로서 지점에서 변곡점까지의 거리의 0.25, 0.5 및 1.0배로 변화였다. 모든 실험체는 동일 주철근 지수를 갖는 철근콘크리트 보에 비해 높은 변위 연성비를 나타냈는데, 보의 반복하중-처짐 관계 및 연성은 강재 보의 길이에 영향을 받지 않았다. 보 길이에 따른 연속 변형률 분포 및 붕괴하중에 기반한 극한하중 예측으로부터 제시된 강접합 절점은 구조적 효율성을 갖는다고 판단된다.

**핵심용어** : 하이브리드 보, 강접합, 연성, 붕괴기구