

## 강재 매입형 합성기둥의 합성작용에 관한 실험

민 진<sup>1)</sup> · 정인근<sup>1)</sup> · 심창수<sup>1)\*</sup> · 정영수<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 중앙대학교 토목공학과

(2004년 12월 9일 원고접수, 2005년 5월 30일 심사완료)

### Experiments on the Composite Action of Steel Encased Composite Column

Jin Min<sup>1)</sup>, In-Keun Jung<sup>1)</sup>, Chang-Su Shim<sup>1)\*</sup>, and Young-Soo Chung<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University, Anseong, 456-756, Korea

(Received December 9, 2004, Accepted May 30, 2005)

#### ABSTRACT

Steel encased composite columns have been used for buildings and piers of bridges. Since the column section for the pier is relatively larger than that of building columns, economical steel ratio needs to be investigated for the required performance. Composite action between concrete and embedded steel sections can be obtained by bond and friction. However, the behavior of the column depends on the load introduction mechanism. Compression can be applied to concrete section, steel section and composite section. In this paper, experiments on shear strength of the steel encased composite column were performed to study the effect of confinement by transverse reinforcements, mechanical interlock by holes, and shear connectors. Bond strength obtained from the tests showed considerably higher value than the design value. Confinement, mechanical interlock and stud connectors increased the shear strength and these values can be used effectively to obtain composite action of Steel Reinforced Concrete(SRC) columns.

**Keywords :** steel encased composite column, composite action, bonding, confinement, shear strength

#### 1. 서 론

강재 매입형 합성기둥 구조는 주로 건물구조에 많이 채용되어 왔고 최근에 교량의 교각구조에 적용하는 예가 늘어나고 있는 실정이다. 교각은 건물의 기둥에 비해서 상당히 큰 규모의 구조물이기 때문에 강재비를 적절한 수준에서 유지하면서 의도하는 성능을 만족하는 단면을 설계해야 한다. 일반적으로 강재 매입형 합성구조는 부착과 마찰에 의해서 합성작용을 확보한다고 가정하고 설계하고 있는데 하중의 전달구조가 Fig. 1에서 보는 바와 같이 콘크리트 단면, 강재단면, 그리고 합성단면으로 각각 다를 경우, 거동의 차이를 가져올 수 있기 때문에 적절한 합성작용을 확보하기 위한 규정이 요구된다<sup>1)</sup>. 이러한 하중의 전달이 별도의 물리적인 연결재가 없는 경우에는 크게 네 가지 역학적 거동에 의해 전달된다고 구분할 수 있다<sup>2)</sup>.

- 1) 수화반응 과정에서 모세관 현상으로부터 유발되는 경계면을 따른 화학적 반응 혹은 흡입력에 의한 부착
- 2) 강재면의 불규칙성으로 인한 강재와 콘크리트의 미세 맞물림

- 3) 수직력에 의한 콘크리트와 강재사이의 마찰
- 4) 전체 변형에 의한 곡률 혹은 결합 효과

이를 다시 두 가지로 구분하면 부착과 미세 맞물림은 미세효과이고 마찰과 결합효과는 좀 더 큰 효과라고 할 수 있다. 부착은 탄성-취성 하중 전달 특성을 갖는데 상대변위가 아주 작은 수준에서만 하중 전달에 기여하게 되는데 상대변위가 0.01mm 이하에서 부착파괴가 발생한다<sup>2)</sup>. 미세 맞물림은 강재 단면의 표면 불규칙성에 의한 것으로 Virdi 와 Dowling<sup>3)</sup>의 연구에 의하면 콘크리트 압축 파괴에 해당하는 국부 변형률 3.5%에서 부착이 깨지게 된다<sup>3)</sup>. 물론, 표면의 불규칙성을 높이면 부착강도를 증가시킬 수 있다. 콘크리트와 강재 단면사이의 마찰력은 수직력에 의해 발생하는데 이 수직력은 축력을 받는 부재의 부피 팽창에 대한 구속력으로 인해 생기게 된다. Baltay등<sup>4)</sup>에 의하면 마찰 계수는 0.2에서 0.6의 값을 가지고 스웨덴의 Olofsson과 Holmgren<sup>5)</sup>에 의해 수행된 실험결과 평균 마찰계수 값은 0.6이 제시되었다.

이번 연구는 강재 매입형 합성기둥의 합성작용을 확보하기 위한 콘크리트와 강재의 부착강도를 측정하였다. 횡방향 철근의 구속효과와 구속정도에 따른 부착강도의 변

\* Corresponding author

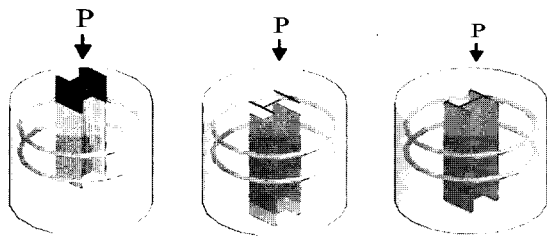
E-mail : csshim@cau.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

화, 강재복부 천공과 전단 연결재의 물리적 효과가 부착강도에 미치는 영향을 평가하기 위해 실험 부재를 설계하였다. Eurocode<sup>6)</sup>에서는 물리적인 연결재의 유무에 따라서 합성기둥에 대한 전단강도의 크기를 제시하고 있다. 즉, 강재와 콘크리트의 순수한 부착강도와 전단 연결재에 의한 전단강도의 크기를 제시하고 있는데, 이를 실험을 통해 Eurocode의 적용 가능성을 평가해 보도록 하였다. 또한, 강재 매입형 합성기둥에서 횡방향 철근에 의한 콘크리트 팽창 억제효과가 부착강도에 영향을 미치는 다른 요인들처럼 그 효과를 수치로 정량화 할 수 있는지의 여부를 판단하였다.

## 2. 전단강도의 평가

강재 매입형 합성기둥에서 강재단면과 콘크리트 단면의 합성은 주로 부착과 마찰에 의해서 전달되는데 이러한 합성설계를 위해서 필요한 전단강도의 평가는 현재 Eurocode



(a) Steel section (b) Concrete section (c) Composite section

Fig. 1 Load introduction mechanism

Table 1 Shear resistance by bond and friction

Model	Composite section	Shear strength
Completely concrete encased sections		0.6 MPa
Concrete filled circular hollow sections		0.55 MPa
Concrete filled rectangular hollow sections		0.4 MPa
Flanges partially encased sections		0.2 MPa
Webs in partially encased sections		zero

에서 Table 1과 같이 주어져 있다. 필요한 전단강도의 확보는 경계면에서의 부착과 마찰 혹은 전단 연결재에 의해서 확보될 수 있고 상대변위가 거의 발생하지 않도록 규정하고 있다.

합성기둥에서 콘크리트와 강재 사이의 전단력의 전달은 부착/마찰과 함께 기계적 전단 연결재에 의해서 상대변위가 크게 발생하지 않도록 해야 한다. 전단저항은 상대변위가 발생하지 않았을 경우, 부착응력, 내부 마찰, 그리고 기계적 전단 연결에 의해 발휘된다. 단면이 콘크리트에 완전히 매입된 사각형 합성기둥의 경우 Eurocode에서는 0.6 MPa의 전단강도를 제시하고 있다. 이때 부재 경계면의 부착력은 상대적으로 그곳에 작용하는 전단력과 비교되지 않을 만큼 작을 뿐 아니라 또한 시공 상의 결함이나 온도, 크리프와 건조수축 등의 현상에 의하여 처음부터 불확실한 크기이기 때문에 일반적인 합성보 설계에서는 고려하지 않는다. 반면, 기둥이나 관 구조와 같은 곳에서 한 부재가 다른 부재의 내부에 있는 경우 합성작용은 매입되는 부재의 기하형상이나 부착강도에 의해서 발생하는 경계면의 전단저항에 의해 확보될 수 있다. 어떠한 경우든, 합성작용에 관한 설계는 강재와 콘크리트 사이의 경계면에서 발생하는 수평 전단력에 저항하도록 이루어져야 한다. 또한, 이러한 합성은 강재와 콘크리트 부재사이의 곡률이 동일하도록 하기 위해 경계면에서 분리가 일어나지 않도록 설계되어야 한다. 즉, 전단 연결재는 경계면에 수직인 방향의 인장력과 경계면에 평행한 전단력에 저항하도록 설계 되어야 한다.

콘크리트와의 부착면인 강재 단면에 전단 스티드를 설치하였을 경우, 스티드의 전단강도는 다음 두 식으로부터 구한 값 중 작은 값을 취하여 사용할 수 있다<sup>6)</sup>.

$$P_{Rd} = 0.8f_u (\pi d^2/4) / \gamma_v \quad (1)$$

$$P_{Rd} = 0.29\alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} / \gamma_v \quad (2)$$

여기서,  $d$ : 스티드의 줄기 직경,  $E_{cm}$ : 콘크리트의 탄성계수(the secant modulus of elasticity of the concrete),  $f_u$ : 스티드의 극한 인장강도 ( $500 \text{ N/mm}^2$ ) 보다 작아야 한다.)  $f_{ck}$ : 콘크리트의 특성 압축강도,

$$\alpha = 0.2 [(h/d) + 1] \text{ for } 3 \leq h/d \leq 4;$$

$\alpha = 1$  for  $3 \leq h/d \leq 4$ ,  $h$ : 높이를 나타낸다. 극한한계상태(ultimate limit state)에서의 부분안전계수(partial safety factor)  $\gamma_v$ 는 1.25값을 사용한다. 이 공식은 22mm보다 큰 직경을 갖는 스티드에 대해서는 사용될 수 없다.

전단 연결재가 매입된 H형 강재의 복부에 용접되어 있는 경우에는 콘크리트의 횡방향 팽창이 인접한 강재 플랜지에 의해 방지되고 이로 인한 마찰력은 종방향 전단력에 대한 추가적인 저항력을 제공하게 된다. 이 추가적인 저항

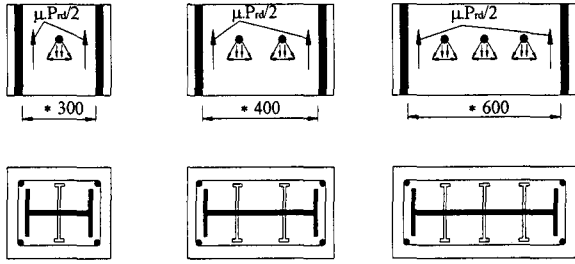


Fig. 2 Stud connectors in composite column (unit: mm)

강도는 각 플랜지에 대해서  $\mu P_{Rd}/2$ 로 볼 수 있다. 여기서  $\mu(=0.5)$ 는 마찰계수이고  $P_{Rd}$ 는 앞에서 제시한 스티드 강도이다. Fig. 2에 나타낸 플랜지 사이의 간격을 만족하는 경우에 이 값을 사용한다.

두께  $t$ 인 H형 강재를 직경  $d$ 만큼 원형으로 천공하여 콘크리트로 메울 경우, 그 강도는 식(3)의 지압강도와 식(4)의 전단강도 중 작은 값을 사용한다.

$$P = f_{ck} \times A = f_{ck} \times d \times t \quad (3)$$

$$P_{allow} = \tau_{allow} \times A = \tau_{allow} \times \left( \frac{\pi d^2}{4} \right) \times 2 \quad (4)$$

여기서,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도이고,  $\tau_{allow}$ 는 콘크리트의 허용 전단응력이다.

### 3. 실험적 연구

H형 강재가 원형 콘크리트 단면에 매입된 합성단면에 대한 합성 작용 확보를 위해서는 콘크리트와 H형 강재 전단강도를 평가하기 위해 직접 부착 파괴 실험체를 제작하였다. 실험체 단면은 Fig. 4과 같다. 콘크리트는  $24 \text{ N/mm}^2$ -120 mm-25 mm의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 강재와 철근의 강종은 각각 SS400과 SD30을 사용하였다. 각 실험체의 주요특징 및 설계 부착 파괴 하중을 Table 2와 같이 나타내었다. 기준 실험체(SPA-S)는 콘크리트와 강재의 상대 변위로 인한 콘크리트의 팽창을

횡방향 철근의 구속력을 이용하여 억제함으로써 전단 저항의 증가를 꾀하였다. 횡방향 철근의 콘크리트 팽창 억제 효과에 대해 제안된 식이 존재하지 않기 때문에 횡방향 철근비를 0.53%에서 1.06%까지 변화시켜 횡방향 철근의 팽창 억제 능력을 비교하도록 설계하였다. 횡방향 철근을 배근하지 않은 무근실험체(SPA-NS)는 합성 기둥일 경우, Eurocode에서 제안한 완전 매입형 단면의 부착강도(0.6 MPa)와 비교하여 콘크리트와 H형 강재의 부착에 의한 순수 전단 저항능력을 평가하도록 설계하였다. 강재의 복부 단면을 25mm 직경으로 천공한 실험체(SPA-WP)는 복부의 구멍과 이를 메운 콘크리트와의 물리적인 맞물림 효과를 기대하여 설계하였다. 이 때 설계 강도는 구멍을 메운 콘크리트 원형 단면의 지압 응력 크기만큼 증가시켜 기준 실험체의 실험결과와 부착강도를 비교하였다. 길이 52 mm, 직경 15 mm의 F8T고장력 볼트를 강재 복부 단면에 용접한 전단 연결재 실험체(SPA-WC)는 연결재에 의한 강도 증가 효과와 Eurocode에서 제안한 연결재 전단강도 식과 비교를 위해서 설계 제작하였다. H형 강재 복부단면의 물리적 영향의 변수는 Fig. 3에 나타내었다.

계산된 각 실험체의 전단강도는 부착과 마찰의 영향을 고려한 무근 실험체인 SPA-S는 0.6 MPa이었고, 콘크리트의 맞물림을 고려한 천공 실험체인 SPA-WP는 0.64 MPa이었다. 이 실험체의 경우 콘크리트의 허용전단응력에 의한 전단강도(11.5 kN)보다 천공의 직경과 강재 복부의 두께를 갖는 콘크리트의 지압강도(7.1 kN)가 더 작은 값을 보여, 지압강도 크기만큼 증가시켰다. 그리고 스티드에 의한 구속 효과를 고려한 전단 연결재 실험체의 경우 0.77 MPa의 크기를 보였다.(Table 2)

Fig. 5는 실험 장면을 나타내며, 실험체는 로드셀이 장착되어 있는 UTM을 사용하여 가력하였다. 실험체의 정착을 위하여 490 N/sec의 속도로 196 kN까지 초기 재하를 하였으며, 이 후 같은 속도로 콘크리트와 H형 강재 사이의 상대 변위(slip)가 최대도 발생하여 콘크리트와 H형 강재 사이의 합성 작용에 의한 내하력이 더 이상 발생하지 않을 때까지 재하 하였다. 강재의 변형을 측정 위치는

Table 2 Test specimens

Specimen	Steel section	Connection	Confinement steel ratio (%)	Longitudinal reinforcement ratio (%)	Calculated shear strength (kN)	Calculated shear stress (MPa)
SPA-S1	100×100×6×8	Bond	1.06	2.69	105.84	0.6
SPA-S2			0.71			
SPA-S3			0.53			
SPA-NS1		Bond + mechanical interlock	0	1.74	105.84	0.6
SPA-NS2						
SPA-WP		Bond + mechanical interlock	1.06	2.69	111.71	0.64
SPA-WC1	Bond + stud	1.06	2.69	135.2	0.77	
SPA-WC2						

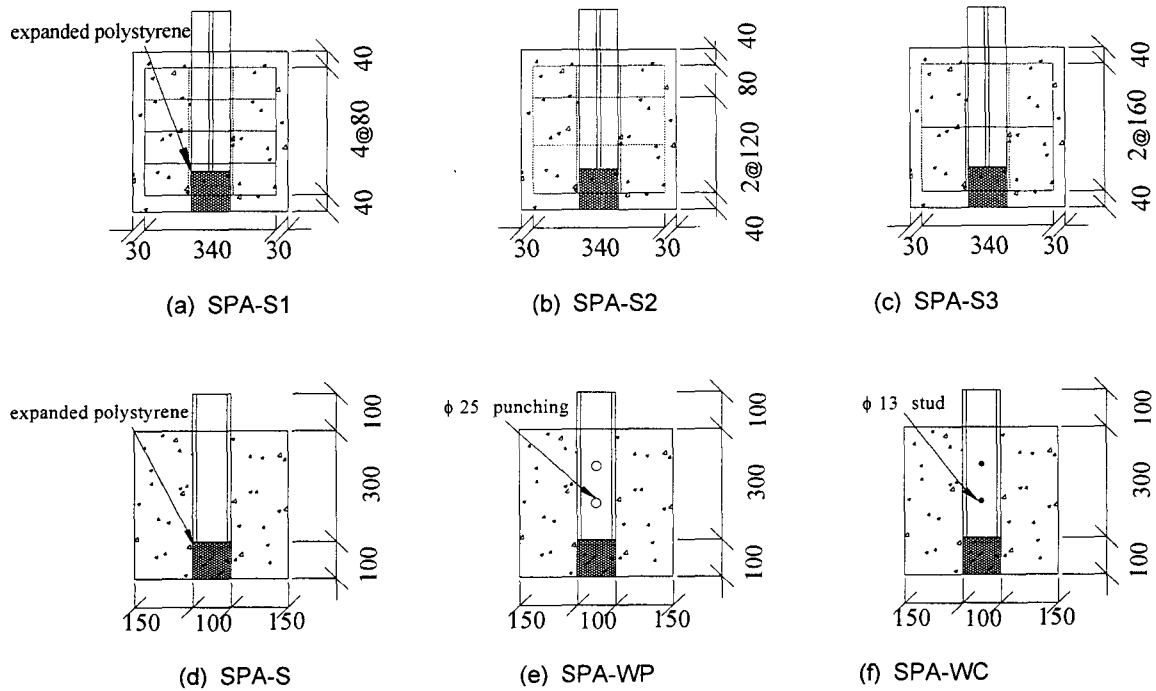


Fig. 3 Test specimen (unit:mm)

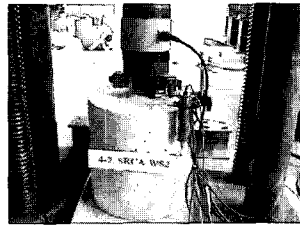
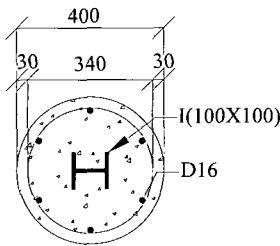


Fig. 4 Section (unit:mm) Fig. 5 Test setup

#### 4. 실험결과

##### 4.1 부착 강도

Table 3에서는 콘크리트와 H형 강재의 상대변위가 발생 이후 하중이 감소하기 전의 최대하중과 부착강도/설계부착강도의 비를 나타내었다.

횡방향 철근의 콘크리트 구속 정도를 평가하기 위한 기준 실험체(SPA-S)의 경우 횡방향 철근비를 감소시켜 부착파괴 하중의 크기를 비교하였다. 횡방향 철근비를 50% 줄인 실험체의 경우에도 부착강도 크기의 변화는 크지 않았다. 철근비가 일정정도 이상이 되면, 횡방향 철근에 따른 구속 정도의 변화가 콘크리트와 H형 강재의 부착강도 증가에 큰 영향을 미치지 않고 있음을 보여준다. 이는 횡방향 철근의 구속정도가 부착강도에 미치는 영향은 미미하지만, 횡방향 철근의 구속 효과는 콘크리트의 팽창을 억제함으로써 일정한 부착강도의 증가를 이끌어내고 있음을 보여 준다.

무근실험체(SPA-NS)의 경우 Eurocode에서 제시한 부착과 마찰로 인한 전단강도(completely concrete encased sections)와 그 크기를 비교하였다. 콘크리트와 강재의 순수 부착만으로 전단강도를 평가한 결과, 한 실험체는 Eurocode에서 제시한 부착강도의 1.4배 크기를 보여 큰 차이를 보이지 않았지만 다른 한 실험체는 부착강도의 크기가 제시한 값보다 2.1배의 크기를 보였다. 이는 앞에서 언급했던 바와 같이 콘크리트와 강재 접촉면의 불확실성

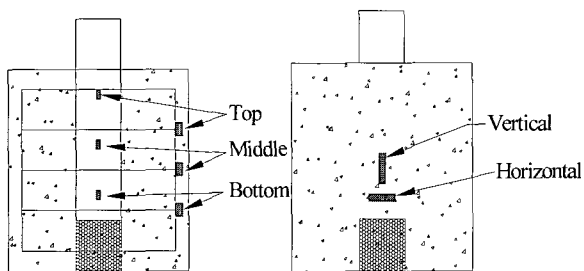


Fig. 6 Location of measuring gauges

Fig. 6과 같이 콘크리트 상 단면에서 40mm떨어진 곳으로 80mm간격으로 복부의 중심과 띠철근에 변형률 게이지를 부착하여 거동을 측정하였다. 콘크리트 표면에는 수직과 수평으로 변형률 게이지를 부착하여 합성작용시의 콘크리트의 거동을 측정하였다.

실험체 게이지 배치도는 Fig. 6에 나타내었다.

**Table 3 Test results**

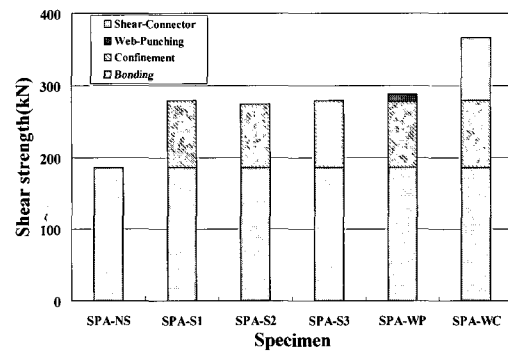
Specimen	Connects	Confinement steel ratio (%)	Longitudinal reinforcement ratio (%)	Failure load (kN)	Shear strength (MPa)	Test / result
SPA-S1	Bond	1.06	2.69	279.10	1.58	2.63
SPA-S2		0.71		274.19	1.55	2.58
SPA-S3		0.53		279.59	1.58	2.63
SPA-NS1	Bond	0	1.74	151.07	0.85	1.41
SPA-NS2				222.69	1.26	2.1
SPA-WP	Bond+mechanical interlock	1.06	2.69	288.41	1.63	2.54
SPA-WC	Bond+stud	1.06	2.69	381.61	2.07	2.69
				350.22		

이 부착강도에 큰 영향을 미치고 있음을 보여준다. 하지만 이 둘 모두 Eurocode에서 제시한 전단강도 보다 큰 값을 보여 주고 있어 콘크리트와 강재의 불확실성을 고려한 Eurocode의 제안값은 안전측이라고 볼 수 있고, 원형 단면 형상에 의한 효과도 반영된 것으로 판단된다.

H형 단면의 복부를 천공한 실험체(SPA-WP)의 경우 복부를 천공하지 않은 같은 조건의 실험체(SPA-S1)와 그 크기를 비교하였다. 10 kN 정도의 부착하중의 증가를 나타내고 있다. 천공의 직경과 H형 강재 복부의 두께를 갖는 콘크리트의 지압강도(7.1 kN)와 큰 차이를 보이지 않고 있다. 이는 H형 강재 복부단면의 천공이 부착강도의 증가를 가져오며 천공에 따른 증가분을 파악할 수 있음을 보여 준다.

H형 강재의 복부에 전단 연결재를 배치한 실험체(SPA-WC)는 기준 실험체(SPA-S)에 비하여 30%가량 부착강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 식 (3), (4)에서의 전단 연결재의 강도와 복부에 부착된 연결재의 추가 저항을 고려한 부착강도의 증가분과 비슷한 수치를 나타낸다. 기준 실험체(SPA-S)의 부착과 마찬가지로, 그리고 구속에 의한 부착강도는 평균 1.57 MPa 이었고 현재 설계 규정의 값인 0.6 MPa보다 2.6배 큰 값을 보여주고 있다. 우리나라의 도로 설계기준이나 대부분의 설계기준이 기둥에 횡방향 철근의 배치가 필수적이기 때문에 강재 매입형 합성기둥에서 콘크리트와 강재의 구속을 고려한 부착정도는 Eurocode 규정의 2배 이상의 안전율을 갖고 있는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 무근 실험체의 평균 부착 파괴 하중을 콘크리트와 강재의 부착효과로 보고 각 변수 별 부착강도의 기여도를 나타내었다. 횡방향 철근비의 변화를 주어 구속 정도를 평가한 3개 실험체와 H형강재의 복부를 천공한 실험체는 구속효과가 부착강도에 일정한 기여를 하고 있음을 보여 준다. 전단 연결재를 배치한 실험체의 경우 상대적으로 구속효과가 작게 나타났다. 여기서 전단 연결재의 강도는 식 (1), (2)에 의한 값을 적용하였다. 부착효과는 근사값에 지나지 않고 전단 연결재 역시 실험값과의 차이를 고려한다면, 전 실험체에 걸쳐 신뢰할 수 있는 일정량의 구속효과 증가를 보인다.



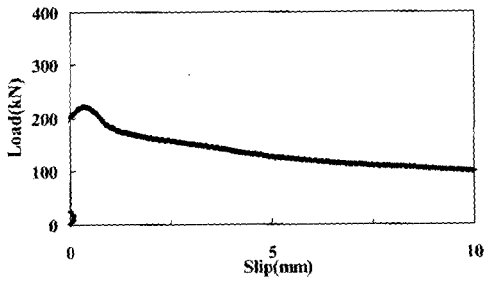
**Fig. 7 Shear strength**

Fig. 8에서는 콘크리트와 H형 강재의 상대 변위를 나타내었다. 아무런 물리적 효과 없이 콘크리트와 H형 강재의 접촉면에 부착만으로 상대 변위를 측정할 실험체는 상대 변위 발생과 함께 파괴에 도달하였다(Fig. 8(a)). 횡방향 철근으로 구속한 실험체와 H형 강재의 복부를 천공한 실험체의 경우, 상대 변위 0.1~0.4 mm 사이에서 최대 부착 파괴 하중을 보였고, 그 후 급격한 하중 감소를 보였다(Fig. 8(b),(c)). 하지만 전단 연결재 실험체의 경우 일정한 상대변위(1.5 mm)에 도달하자 하중의 감소가 완만하게 나타났다. 이는 콘크리트와 강재의 부착이 완전히 탈락하면 급격히 상대변위가 증가하는 다른 실험체와 달리 전단 연결재를 사용한 경우, 전단 연결재에 의한 연성의 확보가 가능함을 보여 준다. 상대변위가 아주 작은 수준(0.01 mm)에서만 하중 전달에 기여하는 부착 실험체와는 달리 구속과 천공, 그리고 전단 연결재로 부착강도를 증가시킨 실험체의 경우 상대 변위가 40~100배 증가한 상태에서도 콘크리트와 강재 사이의 단면은 전단에 저항하고 있음을 보여준다.

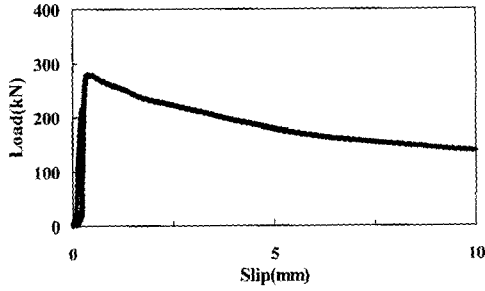
**4.2 국부거동**

각 실험체의 H형 강재와 횡방향 철근, 그리고 콘크리트에 높이 별로 게이지를 부착하여 그 응력분포를 평가하였다.

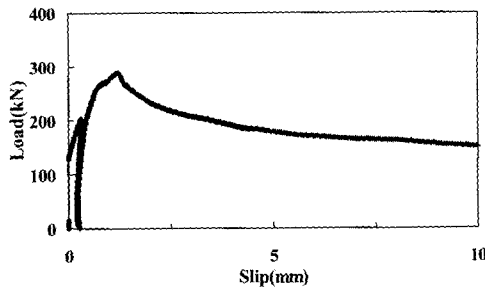
Fig. 9에서는 초기 재하 시, 탄성 영역을 벗어나지 않는 범위인 하중 200 kN에서의 높이 별 응력분포를 나타내었다.



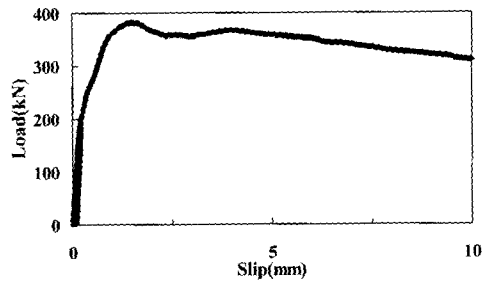
(a) SPA-N



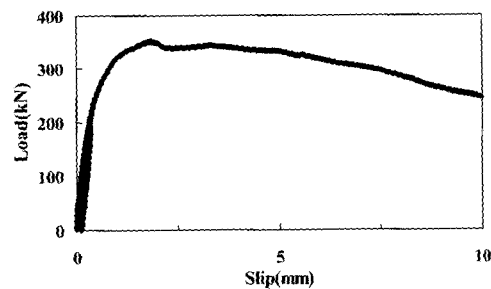
(b) SPA-S



(c) SPA-WP

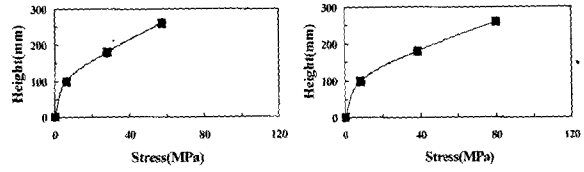


(d) SPA-WC1



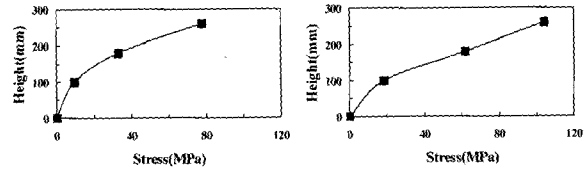
(e) SPA-WC2

Fig. 8 Load-slip curve



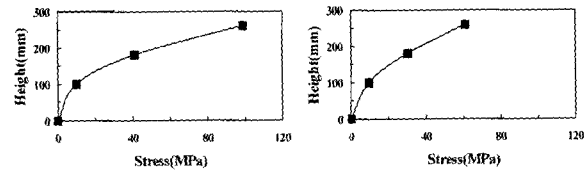
(a) SPA-S1

(b) SPA-S2



(c) SPA-S3

(d) SPA-WP



(e) SPA-NS2

(f) SPA-WC

Fig. 9 Stress distribution of steel beams

H형 강재에 직접 작용하는 하중에 의한 H형 강재의 높이 별 응력 변화량은 가장 위에 붙인 콘크리트 상 단면에서 40 mm 떨어진 게이지로부터 80 mm 아래에서는 40~50%의 응력 감소를 보였고, 160 mm 아래에서는 80~90%의 응력 감소를 보였다. 이는 전 단면에 걸쳐 부착응력의 분포가 일정하지 않으며, 하중이 가해지는 쪽의 상부 강재 단면이 응력의 대부분을 받고 있음을 보여준다. Fig. 9와 같은 부착응력분포를 얻음으로써, 콘크리트의 구속에 대한 영향은 상부의 횡방향 철근에 크게 영향을 주는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 실험 변수에 따른 응력분포를 나타낸다. 횡방향 철근의 구속, 복부천공의 지압효과, 그리고 전단 연결재에 의해 강재가 받는 부착응력이 감소함을 알 수 있다. 그리고 특히 전단 연결재 실험체의 경우 가장 큰 H형 강재의 응력 감소를 볼 수 있는데, 이는 전단 연결재의 사용으로 콘크리트 내부 강재의 응력을 분산시키는 효과가 있으며, 강재의 변형을 최소화 할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 11에서는 H형 강재단면의 가장 위에 부착한 변형률 게이지로부터 하중에 따른 변형률 증가량을 변수별로 나타내었다. H형 강재의 구속 정도에 따른 변형률은 횡방향 철근비가 낮을수록 큰 변형률을 보였고, 대부분의 경우 H형 강재가 받는 변형률은 탄성 구간내에서 하중에 비해 하였다. 무근 실험체의 경우 가장 큰 변형률을 보였고, 전단 연결재 실험체의 경우 가장 작은 변형률을 보였다. 앞의 실험결과와 마찬가지로 하중에 따른 변형률도 합성 효과가 클수록 감소하고 있음을 보여준다.

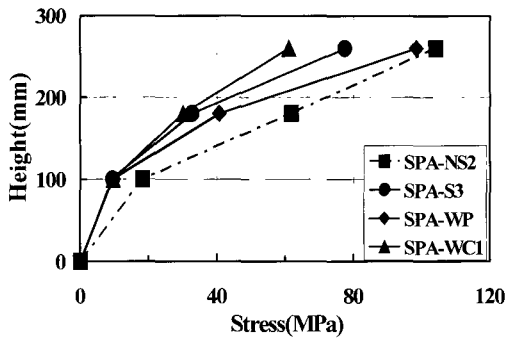


Fig. 10 Stress distribution

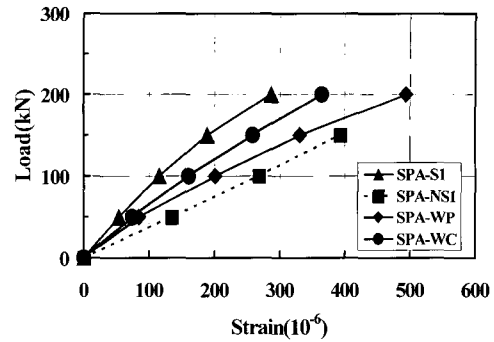


Fig. 11 Strain of steel beam according to various details

Fig. 12에서는 H형 강재의 전체적인 변형모습을 나타내었다. Fig. 13 콘크리트의 표면에 수직과 수평으로 부착한 게이지의 변형률을 나타낸다. 그래프의 왼쪽은 수직 변형률을 오른쪽은 수평 변형률을 각각 나타내고 있다. 콘크리트에 직접 작용하는 축방향 하중에 의해 발생하는 축방향 변형률과 종방향 변형률의 관계는 Poisson's ratio에 의해 대략 0.15~0.2으로 주어진다. 하지만 이번 실험의 경우 콘크리트는 H형 강재와의 부착과 상대 변위로 인한 팽창 응력 등 간접적인 하중을 받고 있으므로 기존 Poisson's ratio와의 연관성은 나타나지 않았다. 변수 별 변형률의 크기에 있어서는 무근 실험체의 경우 같은 하중하에서 다른 조건의 실험체보다 더 큰 콘크리트의 변형률을 보였고, 나머지 실험체는 유사한 변형률의 크기를 보이고 있다. 이는 횡방향 철근의 구속으로 축방향과 횡방향 모두 변형률이 감소했음을 보여준다. 축방향 변형률과 횡방향 변형률

에 있어서는 모든 실험체에서 축방향 변형률이 횡방향 변형률보다 1.5~2배 이상 크게 나타나고 있다.

Fig. 14는 기존 실험체와 전단 연결재 부착 실험체의 하중 증가에 따른 횡방향 철근의 팽창 변형률을 나타낸다.

콘크리트와 강재의 부착이 완전히 탈락되기 전까지 횡방향 철근의 팽창변형은 선형으로 증가하고 있음을 보여준다. 콘크리트와 강재의 부착 강도가 최대가 되는 순간 변형률이 급격히 증가하다가 그 순간이 지나면 횡방향 철근은 다시 수축하게 되는데, 이는 콘크리트와 H형 강재의 부착이 탈락되는 순간 횡방향 철근의 구속 응력이 가장 크게 작용하고 완전히 탈락되고 난 후에는 횡방향 철근의 구속 응력이 급격히 감소하고 있음을 보여준다. 특히 전단 연결재를 연결한 실험체의 경우 횡방향 철근의 변형 거동이 명확하게 나타나고 있다. 이는 다른 실험결과와 마찬가지로 콘크리트와 강재의 부착만으로는 확실한 부착특성을

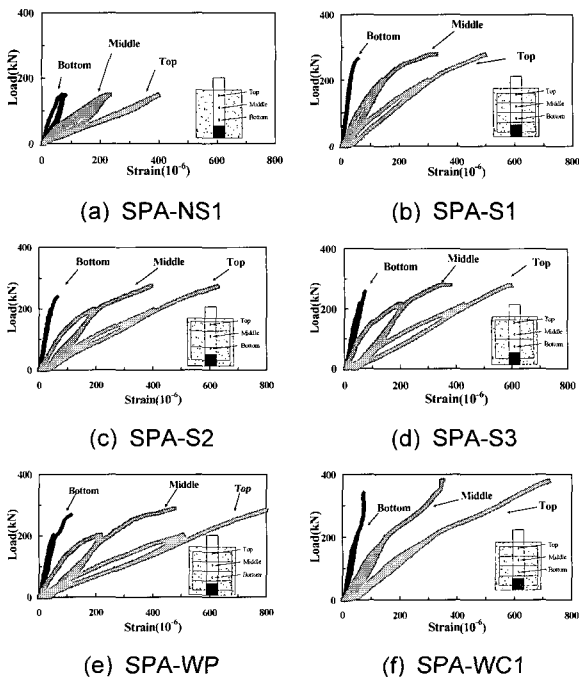


Fig. 12 Strain of steel beams

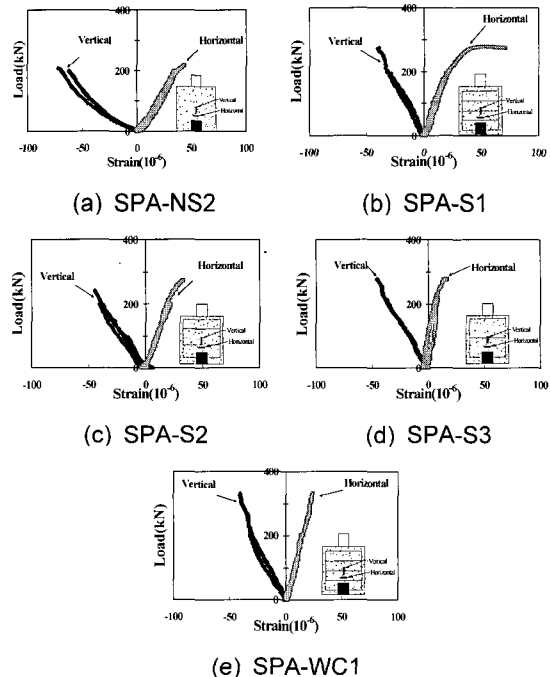
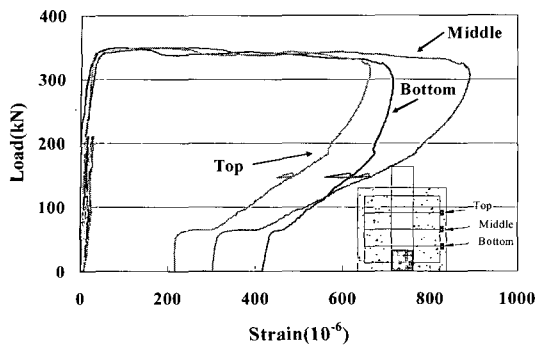
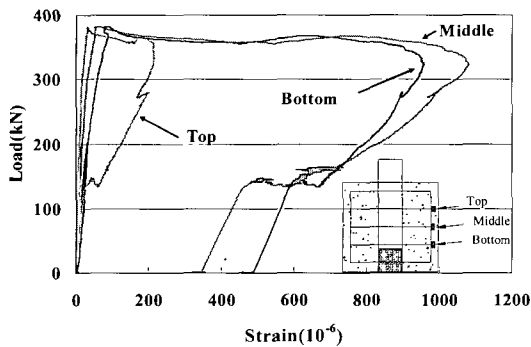


Fig. 13 Strain of concrete



(a) SPA-WC1



(b) SPA-WC2

Fig. 14 Strain of transverse reinforcement

도출하기가 쉽지 않지만 전단 연결재를 이용한 실험체의 경우 그 전단 거동이 명확함을 보여준다.

### 5. 결 론

띠철근비 변화, 콘크리트와 부착된 강재 단면변화, 강재 단면 전단스텝드 부착 등의 실험변수를 적용하여 실험체의 부착강도와 변형률 특성에 대해서 실험을 수행하였다. 강재 매입형 합성기둥의 합성작용을 확보하기 위한 이번 부착강도 실험에서 부착과 마찰, 횡방향 철근에 의한 구속, 강재 복부 천공에 의한 맞물림, 그리고 전단 연결재의 전단강도에 의한 부착강도 증가와 거동 변화를 확인 할 수 있었다. 주요 결론은 다음과 같다.

- 1) 무근 실험체의 경우 Eurocode에서 제시한 부착강도보다 큰 값을 보여 주었다.
- 2) 강재 복부 천공의 경우 천공의 직경과 복부의 두께를 갖는 콘크리트의 지압강도만큼 부착강도가 증가한다.
- 3) 횡방향 철근을 이용한 콘크리트의 구속은 콘크리트와 강재의 부착강도를 일정량 증가시키지만 강재비가 일정정도 이상이면 더 이상 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.
- 4) 합성효과가 클수록 축방향 압축력에 대한 콘크리트 단면의 기여도가 증가하여 강재 단면의 하중 분담이 감소한다.
- 5) 전단 연결재를 합성기둥에 사용할 경우 부착강도를 증가시키고 합성단면의 하중 저항 구간을 조정할 수 있게 된다.

### 감사의 글

이 연구는 교량설계핵심기술연구단을 통하여 지원된 건설교통부 건설핵심기술연구개발사업에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 장승필, 심창수, 합성구조론, 구미서관, 2004,
2. Kennedy, S. J., *End Connection Effects on the Strength of Concrete Filled HSS Beam Columns*, MS. Thesis, Department of Civil Engineering, Edmonton, Alberta, Canada,
3. Viridi K. S. and Dowling P.J., "Bond Strength in Concrete Filled Steel Tubes", *LABSE Proceedings P-33/80*, Zurich, Switzerland, Aug. 1980, pp.125~139.
4. Baltay P. and Gjelsvik A., "Coefficient of Friction for Steel on Concrete at High Normal Stress", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.2, No.1, 1990, pp.46~49.
5. Olofsson U. and Holmgren M., *Using a Servo Hydraulic Tension-Torsion Machine for Measurement of Friction at Low Sliding Speed*, Swedish National Testing and Research Institute, Sweden, 1992,
6. Eurocode 4, *Design of composite steel and concrete structures*, Reported by The European Committee for Standardization(CEN), 1994, pp.72~108.

### 요 약

강재 매입형 합성기둥 구조는 주로 건물구조와 교량의 교각구조에 적용되어 왔고, 최근에는 교량의 교각구조에 적용하는 예가 늘어나고 있는 실정이다. 교각은 건물의 기둥에 비해 상당히 큰 규모의 구조물이기 때문에 강재비를 적절한 수준으로 유도하면서 의도하는 성능을 만족하는 단면을 설계해야 한다. 그러나 합성구조의 기본원리가 구조물을 구성하는 구조재료의 일체화된 거동에 근거하므로, 강재 매입형 합성기둥 구조의 적용에 앞서, 먼저 콘크리트와 강재 단면의 합성 작용에 대한 명확한 정의가 필요하다. 일반적으로 강재 매입형 합성구조는 부착과 마찰에 의해서 합성작용을 확보한다고 가정하고 설계하는데, 콘크리트 단면, 강재 단면, 그리고 합성 단면으로 각각 다를 경우, 거동의 차이를 가져올 수 있기 때문에 적절한 합성작용을 위한 규정이 요구된다. 이 논문에서는 횡방향 철근에 의한 콘크리트의 구속 효과, H형 강재 복부의 천공에 의한 기계적 맞물림, 그리고 전단 연결재에 의한 영향을 고려하여 실험을 수행하였다. 실험을 통해 계산된 값보다 큰 부착 강도를 얻을 수 있었다. 구속효과, 기계적 맞물림, 그리고 전단 연결재를 통해 전단 강도의 증가를 유도할 수 있었고, 이는 강재 매입형 합성 기둥에서 합성 작용을 확보하는데 효과적으로 이용될 수 있다.

핵심용어 : 강재 매입형 합성기둥, 합성 작용, 부착, 구속, 전단 강도