

H형강 매입형 합성기둥의 부착강도 및 전단연결재의 전단거동

왕 녕¹ · 이혜림² · 이명재^{3*}

¹박사과정, 중앙대학교, 건축공학과, ²사원, 롯데건설, 롯데월드타워 구조팀, ³교수, 중앙대학교, 건축공학과

Bond Strength between Concrete and Steel and Shear Behavior of Shear Connectors of H-shaped Steel Encased Composite Columns

Wang Ning¹, Lee, Hye Lim², Lee, Myung Jae^{3*}

¹Ph.D Candidate, Dept. of architectural engineering, Chung-ang University, Seoul, 06974, Korea

²Assistant, Lotte World Tower Structural Team, Lotte Engineering & Construction Co., Ltd., Seoul, 05551, Korea

³Professor, School of Architecture and Building Science, Chung-ang University, Seoul, 06974, Korea

Abstract - The objective of this study is to investigate the influence that how does contact surface between concrete and steel influence the steel encased composite column by push-out test. Also nominal bond stress indicated by design standard such as Eurocode 4 is underestimated in small scale steel encased composite column. The other objective of this study is to investigate how does the number and space of shear connector influence the H-shaped steel encased composite column. The shear behavior of shear connectors is investigated by push-out test.

Keywords - Encased composite column, H-shaped, Bond stress, Bond strength, Shear strength, Shear connector, Push-out test

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

강재 매입형 합성기둥은 강재와 콘크리트의 합성효과를 위하여 전단연결재를 사용하고 있다. 국내외 기준 및 연구에서 강재 매입형 합성기둥의 부착강도는 다양하게 평가되고 있다.

KBC2016에서는 매입형 합성기둥에 대해서는 직접부착 강도제시되어 있고, AISC2010에서는 충전형 합성기둥에 대해서만 언급하고 매입형 합성기둥에 대해서는 기준이 제시되지 않았다. Eurocode 4에서는 매입형 합성기둥의 직접부착전단강도가 0.3MPa로 제시되어 있다. Min *et al.*^[1]의 연구에서 Eurocode 4에서 제시된 전단강도의 적용 가능성 및

강재 매입형 합성기둥에서 횡방향 철근에 의한 콘크리트 팽창 억제효과가 부착강도에 영향을 정량화 할 수 있는지를 연구하였다. Steve Kennedy^[5]는 1984년 발표한 논문에서 강재 단면과 콘크리트 단면의 하중 전달이 별도의 물리적인 연결재가 없는 경우에는 크게 네가지 역학적 거동에 의해 전달된다고 구분하였다. Virdi and Dowling^[6]는 1980년 발표한 논문에서 콘크리트 압축 파괴에 해당하는 국부 변형률 3.5%에서 부착이 파괴되고 표면의 불규칙성을 높이면 부착강도를 증가시킬 수 있다고 하였다. 관련 연구에서도 소규모 실험체를 이용한 연구결과만 있어 실제 규모의 구조물에 대한 정확한 평가가 이루어졌다고 보기 어렵다.

이 연구의 목적은 강재 매입형 합성기둥의 콘크리트와 강재의 부착응력에 대한 성능을 파악하고, 각 실험 변수에 대한 비교·분석을 통해 이질재료 접합부의 부착응력 및 전단연결재의 거동을 조사하는 것이다.

1.2 연구방법 및 범위

이 연구에서는 여러 구조형태의 합성기둥 중 매입형 합성

Note.-Discussion open until February 28, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on March 29, 2017; revised September 4, 2017; approved on September 6, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-820-5871 Fax. +82-2-824-1776

E-mail. mjlee@cau.ac.kr

Table 1. Design standard of concrete-encased column^{[3],[4],[9]}

Design code	Load transfer length		Bond strength (MPa)	Shear stud strength
	Top	Bottom		
KBC2016	$\geq 2.5d$	$\geq 2.5d$	0.66	$\phi_v Q_n = 0.65(A_{sa} F_u)$
AISC2010	$\leq 2.0d$	$\leq 2.0d$	N.A	$\phi_v Q_n = 0.65(F_u A_{sa})$
EC4	N.A	$\leq \text{Min}(2d, L/3)$	0.3	$P_{rd} = 0.29\alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}} / \gamma_v$ $\leq 0.8 f_u \pi d^2 / 4 / \gamma_v$

기둥을 대상으로 하였다. 이 연구에서는 강재 매입형 합성기둥의 콘크리트와 강재의 접합면에서의 부착응력과 슬립 거동을 파악하고, 전단연결재가 부착된 경우의 전단응력을 파악하기 위하여 강재 매입형 합성기둥에서 콘크리트와 강판의 부착면적과 전단연결재의 수를 변수로 하여 이에 대한 Push-out test를 수행하였다.

실험체는 건축구조설계기준(KBC2016)을 따라 설계하였으며 H형강은 SM490, 강재앵커는 SS400 강재를 사용하였고 압축강도 30MPa의 콘크리트를 사용하였다. 띠철근과 주철근은 각각 SD500, SD600을 사용하였다.

실험에서는 콘크리트와 강재의 이질재료 간 합성작용을 파악하기 위하여 두 가지 실험을 하였다. 먼저 콘크리트 속에 강판이 매입된 강판 매입형 합성기둥 기준 실험체를 제작하여 강판과 콘크리트의 부착면적을 변수로, 콘크리트와 강재 사이의 부착응력을 조사하였다. 다음으로, 전단연결재가 일정한 간격으로 용접된 H형강이 매입된 H형강 매입형 합성기둥을 실험대 크기 제작하여 전단연결재의 수와 간격을 변수로, 강재와 콘크리트 사이의 부착응력 및 전단연결재의 전단강도를 조사하였다.

수치해석적인 방법은 마찰, 부착등의 정량적인 영향요소를 효과적으로 반영시켜야 하는 과제가 해결되어야 하므로 추후 수치해석을 완성하여 실험결과와 비교, 분석할 예정이다.

1.3 관련 설계기준비교

KBC2016, AISC2010 그리고 Eurocode 4의 설계기준을 비교하였을 때, 매입형 합성기둥의 하중도입부 길이와 직접 부착강도 및 전단연결재의 전단강도는 Table 1과 같다. 이 연구에서는 합성기둥이 보 또는 기타 구조체와 연결되지 않았기 때문에, 실험체의 하중전달길이를 기둥의 전체길이를 가정하였다.

2. 부착면적에 따른 부착강도실험

2.1 실험개요

실험체는 총 8가지 종류이며 각 종류별로 2개씩 제작되었다. 직사각형 단면의 콘크리트 기둥에 직사각형 단면의 강판이 매입된 합성기둥 실험체로서 강판의 두께와 부착면적을 변수로 하였다. 사용된 강재의 강종은 SM490이며 압축강도 30MPa의 콘크리트를 사용하였다. 강재와 콘크리트 사이의 부착 거동만을 파악하기 위해 콘크리트 내에 보강 철근을 매입하지 않았다. 매입된 강판은 강재와 콘크리트의 부착면적을 변수로 하기 위해 두께와 폭을 일정 크기로 차이나도록 하여 치수를 선정하였다.

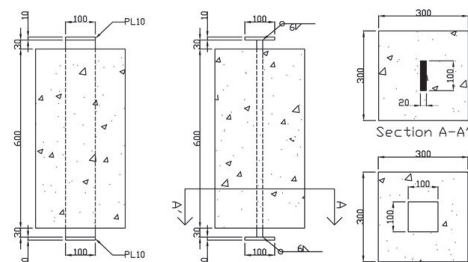
가력방식은 기둥 상단에서 1,000kN 성능의 만능시험기(U.T.M)로 강재 플레이트 중심에 하중을 가하는 단주 압축 가력으로, 강재와 콘크리트 사이의 부착저항능력을 파악해 강판의 부착면적에 따른 부착성능을 조사하였다.

2.2 실험계획

강재와 콘크리트의 부착면 사이에서 발생하는 부착성능 실험을 위하여 단면크기 300mm×300mm 콘크리트 기둥에

Table 2. The list of test specimens

Specimens	Concrete section (mm)	Steel section (mm)	Bond area (mm ²)	Number (EA)
PL10W30	300×300×600	10×30×660	180,000	2
PL10W50		10×50×660	300,000	2
PL10W70		10×70×660	420,000	2
PL10W100		10×100×660	600,000	2
PL20W30		20×30×660	360,000	2
PL20W50		20×50×660	600,000	2
PL20W70		20×70×660	840,000	2
PL20W100		20×100×660	1,200,000	2

**Fig. 1.** Specimen type

매입된 10mm 두께와 20mm 두께의 강판의 폭을 변수로 하여 실험체를 설계하였다. 실험체를 가력하였을 때 밀려나오는 강판의 거동을 확인할 수 있도록 콘크리트 기둥의 길이보다 강판의 길이를 더 길게 제작하였다. 콘크리트 속에 매입되지 않은 강판의 양쪽 단부에는 단면크기 100mm×100mm의 강판 플레이트를 부착하여 하중이 균등하게 작용하도록 하였다. 이 실험에서 사용한 실험체는 Table 2와 같으며 Fig. 1은 PL20W100 실험체이다.

2.3 구조재료시험

부착강도실험체 제작에 사용된 강재의 기계적 성질을 파악하기 위하여 인장강도시험을 실시하였다. 강재의 재질은 모두 SM490을 사용하며 10mm 두께의 강판과 20mm 두께의 강판에서 각각 3개씩 인장시편을 절취하여 시험하였다. 인장강도시험에 사용된 시험편은 한국공업표준의 금속재료 인장시험편(KS B 0801)^[8]에 제시된 시험편 규정에 따라 제작하였다.

콘크리트 재료의 기계적 특성을 알아보기 위하여 압축강도시험을 실시하였다. 콘크리트는 공칭압축강도(f_{ck})를 30MPa로 계획하였으며, 압축강도용 공시체는 지름 100mm, 높이 200mm의 원형 공시체로 제작하였다.

콘크리트 공시체는 실험체 제작 시 사용되었던 동일 재료로 총 10개의 공시체를 제작, 양생을 실시하였다. 압축강도시험은 타설 후 14일과 28일에 각각 5개씩 실시하였으며, 시험결과 콘크리트 공시체의 28일 평균압축강도는 30MPa로서, 계획하였던 콘크리트의 설계배합강도인 30MPa와 동일하였다. 강재와 콘크리트 공시체의 압축시험 결과를 Table 3에 나타내었다.

2.4 계측 및 가력 계획

각 변수에 따른 콘크리트 기둥과 매입된 강판의 구조적 거동을 파악하기 위하여 각 실험체에 가하는 축하중은 강판의

Table 3. Test results of materials

Material		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Yield ratio (%)	Elongation (%)
Steel	10mm	393	577	68	20
	20mm	378	579	65	24
Concrete		No.1	No.2	No.3	No.4
		31	30	30	30
		Mean (MPa)			
		30			

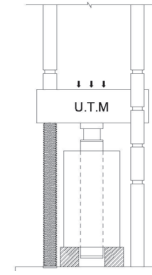


Fig. 2. Loading and measurement plan

상부 중심에 작용시키고, 실험체의 지지는 콘크리트 기둥 하단 양쪽에 지지대를 대칭으로 놓아 강판의 거동에 지장이 없도록 하였다. 가력은 기둥의 축방향으로 일점가력하는 Push-out test를 하였다. 하중과 변위의 측정은 U.T.M에 연결된 Computing Data Logger에 의해 측정하였다. 실험체의 설치 및 가력상황은 Fig. 2에 나타내었다.

2.5 실험결과

강판 매입형 합성기둥 실험체의 실험체별 평균 실험결과를 Table 4에 나타내었다. 대표적으로 PL10W100과 PL20W100

Table 4. Test results

Specimens	Bond area (mm ²)	KBC2016 expected strength (kN)	EC 4 expected strength (kN)	Bond strength (kN)	Bond stress (MPa)
PL10×30-1	48,000	31.7	14.4	141.7	2.95
PL10×30-2				110.8	2.31
PL10×50-1	72,000	47.5	21.6	158.8	2.21
PL10×50-2				153.9	2.14
PL10×70-1	96,000	63.4	28.8	144.2	1.50
PL10×70-2				168.2	1.75
PL10×100-1	132,000	87.1	39.6	201.0	1.52
PL10×100-2				203.3	1.54
PL20×30-1	60,000	39.6	18.0	194.7	3.25
PL20×30-2				217.9	3.63
PL20×50-1	84,000	55.4	25.2	285.1	3.39
PL20×50-2				298.7	3.56
PL20×70-1	108,000	71.3	32.4	307.0	2.84
PL20×70-2				309.0	2.86
PL20×100-1	144,000	95.0	43.2	447.5	3.11
PL20×100-2				392.9	2.73
Bond stress mean					2.58

의 실험결과를 Fig. 3에 나타내었다. Table 4에서 KBC2016의 부착강도는 다음과 같은 식으로 실험체의 부착응력을 구했다.

$$F = U_{in} L_{in} R \quad (1)$$

여기서, F : 콘크리트와 강재 사이의 접촉면의 부착응력

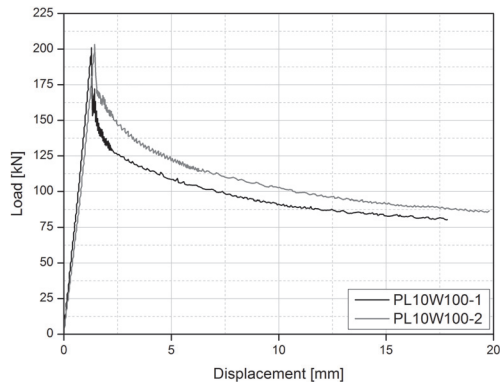
U_{in} : H형강 또는 강관의 둘레길이

L_{in} : 하중도입부의 길이

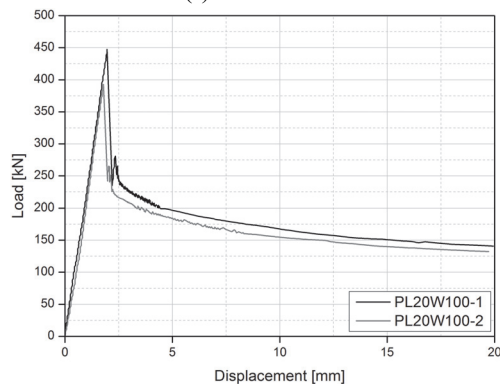
R : 실험에 의해 구해진 부착강도

모든 실험체의 부착강도는 Eurocode 4의 기준식을 이용하여 계산한 예상강도보다 최소 5배에서 최대 11배까지 크게 나타났다. 부착면적이 커질수록 부착강도는 증가하지만, 부착응력은 작아진다.

강관 매입형 합성기둥 실험체의 실험 결과를 나타낸 그래프를 보면, 최대하중 이후 슬립(Slip)의 증가에 따라 하중이 감소된다. 이는 콘크리트와 강관 사이의 화학적 부착력 상실과 마찰에 의한 저항의 시작점으로 판단된다. 그 이후의 거동은 콘크리트와 강재 면의 마찰에 의한 거동으로 판단할 수 있다.



(a) PL10W100



(b) PL20W100

Fig. 3. Load-displacement relationships

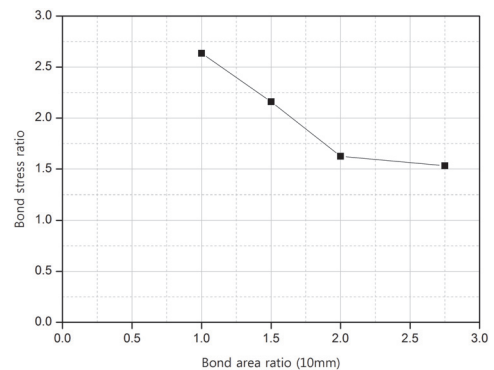
2.5.1 부착면적에 따른 영향

강관 매입형 합성기둥 실험체의 부착면적, 부착강도, 부착응력을 강관의 두께에 따라 구분하고 각각 최소 단면적으로 기준화하여 Table 5에서 비교하였다.

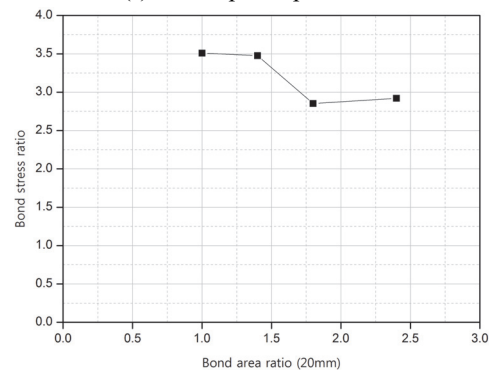
10mm 강관이 매입된 합성기둥과 20mm 강관이 매입된 합성기둥 모두 부착면적과 부착강도는 비례한다. 하지만 부착면적과 부착응력은 서로 반비례하는 경향을 보인다. 부착면적의 비와 부착응력의 비의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

Table 5. Bond strength ratio and bond stress ratio according to the bond area ratio

Specimens		Bond area ratio	Bond strength ratio	Bond stress ratio
1	PL10W30	1.00	1.00	1.00
	PL10W50	1.50	1.23	0.82
	PL10W70	2.00	1.23	0.62
	PL10W100	2.75	1.59	0.58
2	PL20W30	1.00	1.00	1.00
	PL20W50	1.40	1.38	0.99
	PL20W70	1.80	1.46	0.81
	PL20W100	2.40	1.99	0.83



(a) 10mm plate specimens



(b) 20mm plate specimens

Fig. 4. Bond area ratio-bond stress ratio relationship

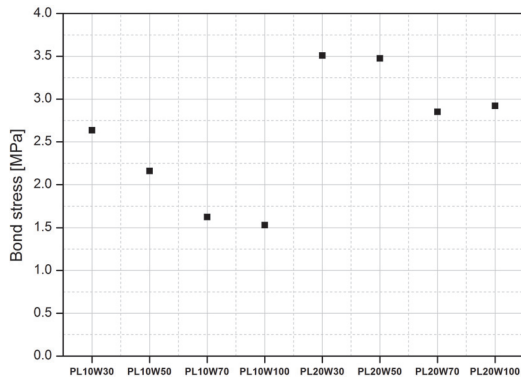


Fig. 5. Bond stress of specimens

2.5.2 강판의 두께에 따른 영향

실험결과 중에서 Table 4의 부착응력을 Fig. 5에 나타내었다. 10mm 강판이 매입된 실험체보다 20mm 강판이 매입된 실험체의 부착응력이 더 크게 나타난다. 여기서 강판의 두께가 두꺼워질수록 부착응력이 더 높게 작용하는 것을 알 수 있다. 그러나 10mm 강판이 매입된 실험체와 20mm 강판이 매입된 실험체 각각에서는 부착면적이 클수록 부착응력은 작아지는 경향을 보인다. 매입된 강판의 두께가 동일한 경우, 부착면적이 커질수록 부착응력은 작아진다는 것을 알 수 있다.

2.5.3 국내외 부착강도 기준과 실험결과 비교

AISC2010에서는 매입형 합성기둥에 대한 공칭부착강도를 제시하고 있지 않다. 여기서 KBC2016과 Eurocode 4에서 제시하는 부착응력 기준값과 실험을 통해 얻은 부착응력값을 비교해보고자 한다.

1) KBC2016과 실험결과와의 비교

KBC2016에서는 완전매입된 H형강 단면의 공칭부착응력 F_{in} 을 0.66MPa로 제시하고 있다. 실험을 통해 얻어진 부착응력을 KBC2016에서 제시하는 공칭부착응력과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. KBC2016에서 제시하는 공칭부착응력과 비교하여 실험값은 2.3배~5.3배 이상 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

2) Eurocode 4와 실험결과와의 비교

Eurocode 4에서는 완전매입된 H형강 단면의 직접부착강도 τ_{Rd} 을 0.30MPa로 제시하고 있다. 실험을 통해 얻어진 부착응력을 Eurocode 4에서 제시하는 직접부착강도와 비교하

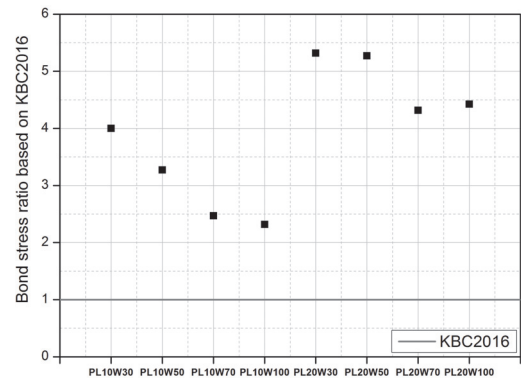


Fig. 6. Bond stress based on KBC2016 of specimens

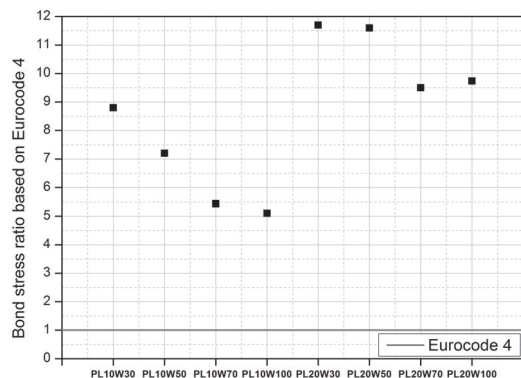


Fig. 7. Bond stress based on KBC2016 of specimens

여 Fig. 7에 나타내었다. Eurocode 4에서 제시하는 직접부착강도와 비교하면 실험값은 5.1배~11.7배 이상 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

3. H형강 매입형 합성기둥 실험

3.1 실험개요

실험체는 총 5가지 종류이며 각 종류별로 2개씩 제작되었다(Table 6). 실험체는 H형강 매입형 합성기둥으로 각 종류마다 다른 개수의 전단연결재를 변수로 갖는다. 실험체의 크기는 콘크리트 단면이 520mm×520mm이고, 매입된 H형강은 용접 H형강으로 치수는 H-300×300×10×15, 강종은 SM490을 사용하였다. 전단연결재는 KS B 1062 머리볼이 스티드 기준에 따라 400MPa급으로 제작하였다.

전단연결재의 수와 간격을 균등하고 비례적으로 배열하기 위해 일부 실험체는 기준의 간격제한(전단연결재의 최대 간격은 400mm 이하로 함)을 무시하고 배치하였으며, 기둥

전 길이를 하중전달영역으로 가정하였다. H형강의 웹에 대칭으로 총 4개가 용접된 실험체부터 총 24개가 용접된 실험체까지 제작하였다.

가력방식은 10,000kN 성능의 만능시험기(U.T.M.)로 H형강 상부에 가력판을 부착하여 가력판에 하중을 가하는 단주압축가력으로, 강재와 콘크리트 사이의 부착저항 및 전단연결재의 전단저항 능력을 파악하고 전단연결재의 수와 간격에 따른 합성기둥의 구조성능을 조사하였다.

3.2 실험체 계획

H형강 매입형 합성기둥의 부착 및 전단강도 실험을 위하여 단면크기 520mm×520mm 콘크리트 기둥에 H-300×300×10×15형강을 매입하고, 여기에 전단연결재의 수와 간격을 변수로 하여 실험체를 설계하였다. H형강은 압축하중을 가할 수 있도록 합성기둥 밑면에서 약 60mm 정도 H형강이 떨어지게 하였다. 하중을 가하는 H형강의 상단에는 단면크기 300mm×300mm의 가력판을 대어 H형강에 균등하게 힘이 작용하도록 하였다. 이 실험에서 사용한 실험체는 Table 5와 같으며 실험체 상세를 Fig. 8에 나타내었다.

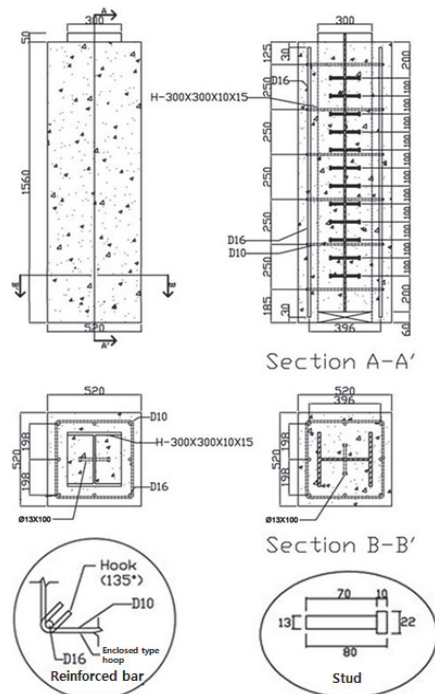


Fig. 8. Specimen type of H-shaped steel encased composite columns

Table 6. The list of test specimens

Specimens	Column cross section (mm)	Bond area (mm ²)	Shear stud (EA)	Shear stud space (mm)
SS00-1	520×520 (H-300×300×10×15)	2.67×10 ⁶	0	600
SS00-2				
SS02-1			4	450
SS02-2				
SS04-1			8	300
SS04-2				
SS08-1			16	150
SS08-2				
SS12-1			24	100
SS12-2				

Remark: Main bar D16×8, Hoop D10×6, Hoop space: 250mm

Table 7. Test results of materials

Material		Yield Strength (MPa)		Tensile strength (MPa)		Yield ratio(%)	Elongation (%)
Steel	Flange	378		555		68	22
	Web	388		566		69	20
	Shear stud	478		564		85	21
Concrete		No.1	No.2	No.3	No.4	Mean (MPa)	
		31	30	30	30	30	

3.3 구조재료시험

실험에 앞서 실험체에 사용된 강재 및 콘크리트의 기계적 특성과 재료적 성질을 파악하여 실험의 가력 및 계측에 활용하기 위하여 구조재료 시험을 실시하였다. 실험결과를 Table 6에 나타낸다.

3.4 계측 및 가력 계획

이 연구에서는 전단연결재의 수와 간격에 따른 H형강 매입형 합성기둥의 구조적 거동을 파악하기 위하여 각 실험체에 가하는 축하중은 강판의 상부에만 작용시키고, 가력은 축방향으로 일점가력하는 Push-out test를 하였다. 실험체의 설치 및 가력상황은 Fig. 9에 나타내었다. 하중과 변위의 측정은 10,000kN 성능의 U.T.M에 연결된 Computing Data Logger와 변위량 측정기(LVDT)에 의해 측정하였다.

3.5 실험결과

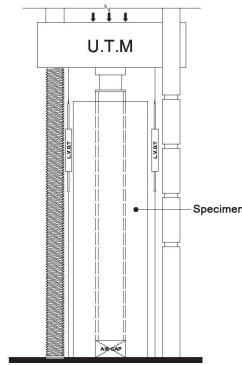


Fig. 9. Loading and measurement plan

실험체의 하중-변위 관계를 각각 Fig. 10에 나타내었다. 그림에서 SS00인 경우, 실험체는 2mm 변위에서 급격한 내력감소를 보이며 부착강도실험결과(Fig. 3)와 비슷한 경향을 보인다.

SS02, SS04인 경우, 실험체는 2mm 변위에서 한번 급격한 내력감소를 보이나 일정치의 내력을 유지하다가 12~13mm 변위에서 급격한 내력감소를 한 번 더 보인다. SS08인 경우, 실험체는 2mm 변위에서 한번 내력감소를 보이나 최대강도에서 크게 감소하지 않은 채로 일정치의 내력을 유지하다가 12~13mm 변위에서 다시 한 번 급격한 내력감소를 보인다.

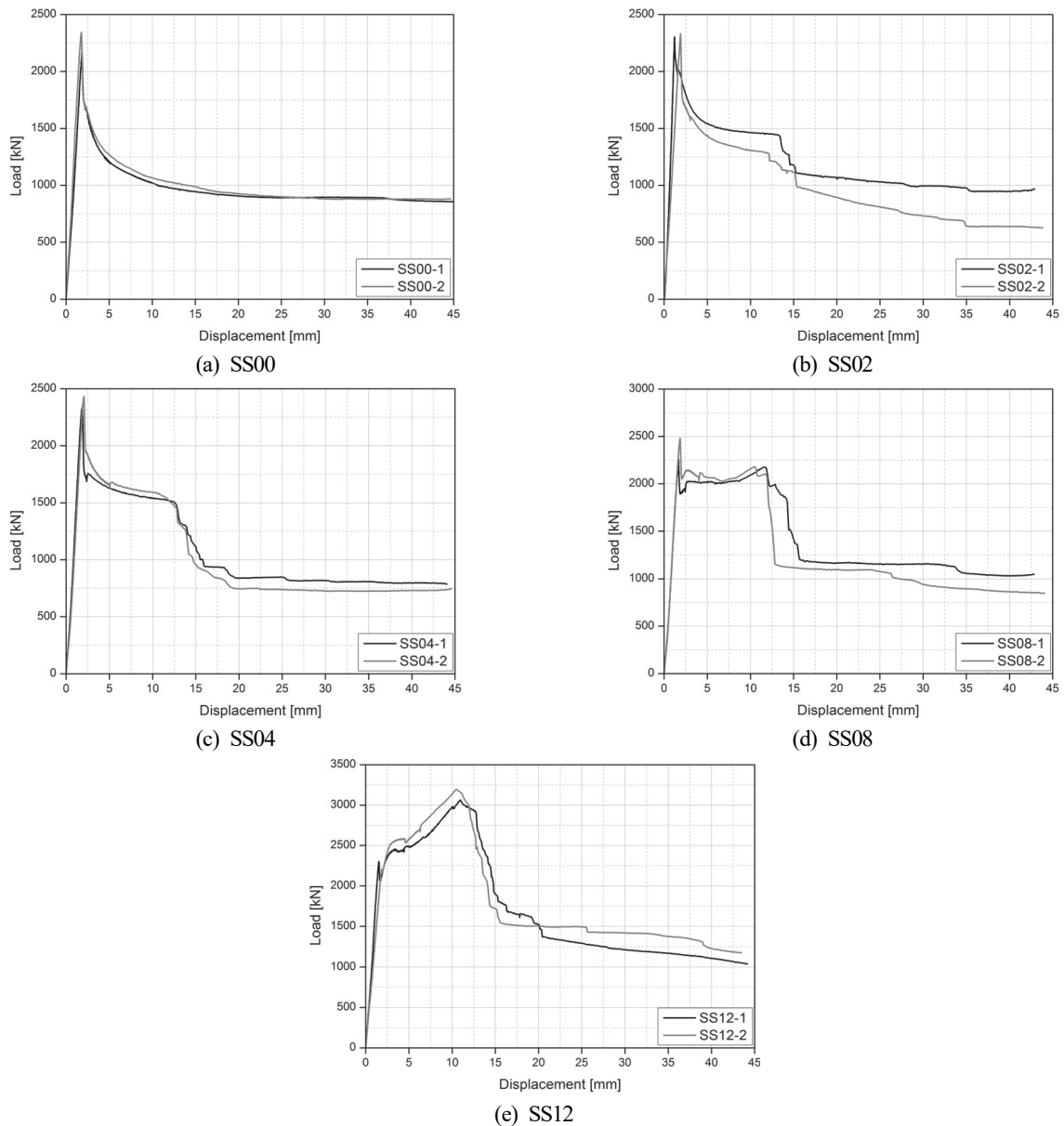


Fig. 10. Load-displacement Relationships

Table 8. Tests results

Specimen	Pb.s. (kN)	Displacement (mm)	Ftest (MPa)	Qnv (Fu) (kN)	Qnv (test) (kN)
SS00-1	2167.0	1.86	0.81	-	-
SS00-2	2343.2	1.78	0.88	-	-
SS02-1	2303.0	1.20	0.86	194.8	396.5
SS02-2	2330.6	1.89	0.87		547.7
SS04-1	2343.8	1.88	0.88	389.6	630.5
SS04-2	2433.7	2.07	0.91		706
SS08-1	2258.9	1.67	0.85	779.2	1292.3
SS08-2	2481.6	1.96	0.93		1295.4
SS12-1	2300.4	1.52	0.86	1168.8	2181.1
SS12-2	2207.3	1.84	0.83		2313.2
Mean	2317.0	1.77	0.87	-	-

SS12인 경우, 실험체는 2mm변위에서 한번 미소한 내력감소를 보이다가 11mm변위까지 내력이 계속하여 증가한다. 실험체의 항복 시 하중과 최대하중 시 변위를 Table 8에 나타내었다.

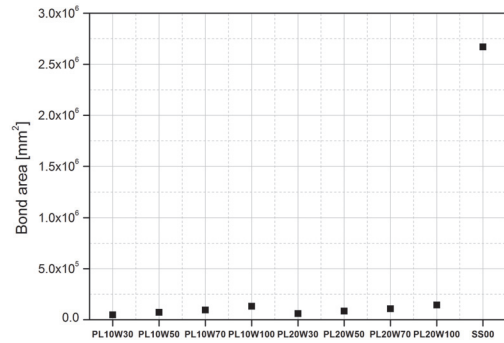
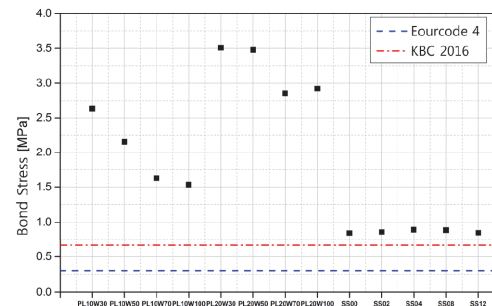
3.6 실험결과 분석

H형강 매입형 합성기둥 실험체의 실험 결과를 분석하면, 전단연결재가 없는 SS00 실험체는 강관 매입형 합성기둥 실험체와 유사한 거동을 확인할 수 있다. SS00실험체는 최대하중 평균 2,200kN에서 H형강과 콘크리트 사이의 부착파괴 이후 내력이 급격하게 떨어지고, 그 후에 이질재료 사이의 마찰에 의해 내력이 완만한 곡선을 그리며 감소하는 것을 알 수 있다.

전단연결재가 있는 SS02, SS04, SS08, SS12 실험체의 경우 부착파괴 이후에도 일정기간 내력이 유지되거나 혹은 더 증가한 후, 다시 급격하게 내력이 감소하는 거동을 보인다. 그 이후에는 SS00 실험체와 마찬가지로 이질재료 사이의 마찰에 의해 내력이 완만한 곡선을 그리며 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 전단연결재의 수와 관계없이 부착이 파괴된 후, 전단연결재로 인한 전단력이 작용하다 일정기간 이후 전단파괴가 일어나는 것으로 볼 수 있다.

3.6.1 부착면적에 따른 영향

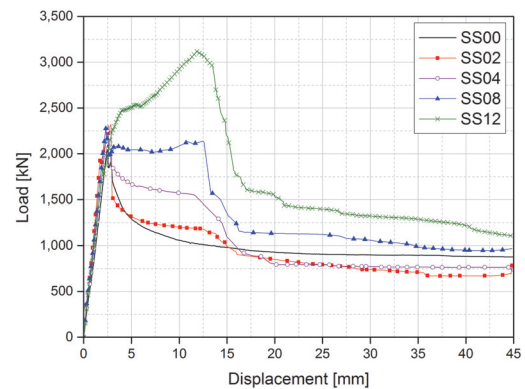
강관 매입형 실험체와 전단연결재가 없는 SS00 실험체의 부착면적에 의한 부착응력을 Figs. 11과 12에서 비교해보았다. 강관 매입형 실험체에 비해 부착면적이 현저하게 높은 SS00실험체는 부착응력 또한 0.84MPa로 가장 낮게 나타났다.

**Fig. 11.** Bond area of specimens**Fig. 12.** Bond stress of specimens

3.6.2 전단연결재의 전단강도

각 실험체의 하중-변위 관계를 Fig. 13에 나타내었다. SS00 실험체를 기준으로 각 실험체들의 전단연결재의 전단강도를 KBC 2016의 식(0709.8.3.)으로 구하여 한국산업표준(KS)에서 제시하는 기계적 성질과 실제 실험에 의한 기계적 성질을 이용해 비교해 보았다. 매입형 합성기둥에 사용된 전단연결재 1개의 공칭강도는 다음과 같이 산정한다.

$$Q_{nv} = F_u A_{sa} \quad (2)$$

**Fig. 13.** Load-displacement relationship of specimens

$$\phi_v = 0.65$$

여기서, A_{sa} : 전단연결재의 단면적, mm^2

F_u : 전단연결재의 설계기준인장강도, MPa

SS02 실험체의 실험결과는 예상전단강도 값은 물론 KBC 2016에 의한 예상강도 최소값에도 미치지 못한다. 이는 SS02 실험체의 전단연결재 사이의 간격이 KBC2016에서 제시한 전단연결재 사이의 최대간격(400mm)보다 넓어 충분한 강도가 발휘되지 않았기 때문이라고 판단된다. 반면에 SS04, SS08, SS12 실험체는 예상되는 전단강도의 최소값보다 높게 나타나며, SS12 실험체는 예상강도 최대값을 훨씬 뛰어넘는 것으로 나타났다. 따라서 설계기준을 만족할 경우 전단연결재의 수가 많을수록, 전단연결재 사이의 간격이 좁을수록 합성기둥은 더 큰 내력을 발휘함을 알 수 있다.

전체 강도 중 전단연결재에 의한 전단강도만큼의 내력을 제외하면 나머지는 이질재료 간의 부착응력에 의해 발휘되는 부착력과 마찰력으로 볼 수 있다.

3.6.3 가력 후 콘크리트 표면 상태

가력 후 실험체의 플랜지와 웹 방향 모습과 설계도면을 비교하여, 각 실험체의 전단연결재와 철근의 위치와 균열 모습을 확인하였다. 대표적으로 SS08 실험체와 SS12 실험체의 상황을 Fig. 14에 나타내었다. 전단연결재의 수가 많고 간격이 좁아질수록 균열이 더 강하고 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

실험체의 H형강 플랜지 방향에서는 주로 축방향 균열이, 웹 방향에서는 주로 횡방향 균열이 발생하는 것을 알 수 있다. 축방향 균열은 주철근의 위치에 근접하여 발생하고, 횡방향 균열은 띠철근의 위치에 근접하여 발생한다. 따라서 콘크리트의 균열은 전단연결재 보다 철근의 배근에 따라 나타남을 알 수 있다. 또한 전단연결재의 수가 많고 전단연결재의 간격이 좁을수록 콘크리트의 균열이 크고 많아진다. 실험체 대부분에서 균열이 기둥 중상부에 집중하여 발생하는 것을 보아 실험체의 상부에 응력이 강하게 작용하는 것을 알 수 있다.

3.6.4 가력 후 전단연결재 및 용접면 상태

가력 실험 후, 각 실험체 내 H형강의 전단연결재 용접부위와 전단연결재의 변형 모습을 파악하기 위해 콘크리트를

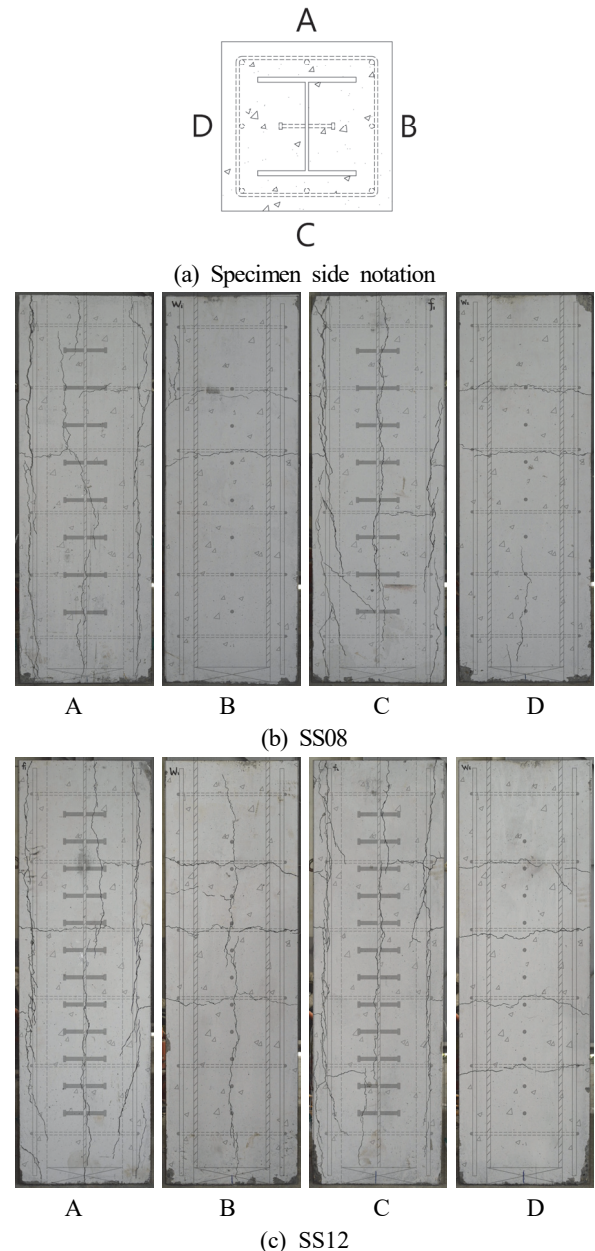


Fig. 14. Specimen surface concrete crack after loading

파쇄하였다. 각 실험체의 콘크리트 파쇄한 후 H형강과 전단연결재의 모습을 Fig. 15에 나타내었다.

대부분의 실험체는 용접부위에 전단파괴가 일어나 전단연결재가 전부 분리되었으며, 전단연결재는 단부가 상당히 변형되어 많은 힘을 버티지 못한 것으로 판단된다. 실험체 하단에 가깝게 위치한 전단연결재일수록 변형이 큰 것을 보아 하단에 위치한 전단연결재가 가장 오래 저항한 것으로 보인다. 특히, SS12 실험체의 최하단에 용접된 전단연결재는 용접부위의 변형은 크지만 전단파괴는 일어나지 않았다. 여

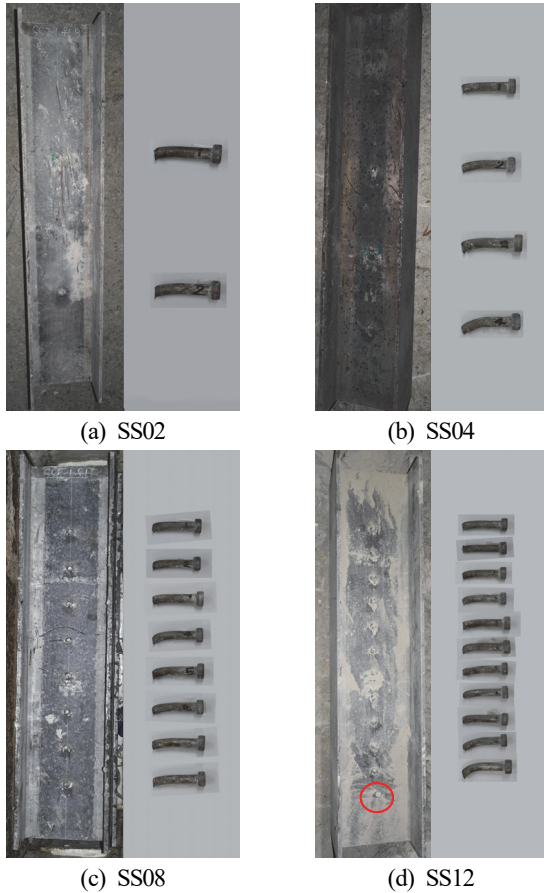


Fig. 15. Deformation of welded joint of shear stud of specimens

기서 상단에 가깝게 위치한 전단연결재부터 하중을 받아 파괴된 것으로 볼 수 있다.

4. 결 론

이상과 같이 강판 매입형 합성기둥에서 강재와 콘크리트의 접촉면의 부착강도와 전단연결재의 전단 거동을 실험을 통하여 알아보았다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강재와 콘크리트 사이의 접촉면에서 발생하는 부착응력에 관한 실험에서, 부착에 의한 최대강도가 발현된 후 부착이 파괴되면서 마찰에 의한 거동을 하는 것이 확인되었다.
- (2) 콘크리트에 매입된 강판의 두께가 두꺼울수록 부착응력이 커지는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 강판 매입형 합성기둥과 H형강 매입형 합성기둥의 부착응력은 부착면적에 영향을 받으며, 부착면적이 넓을수록 부착응력은 작아진다.

- (4) 강판 매입형 합성기둥 각 실험체의 부착응력 평균값은 2.59MPa로 KBC2016에서 제시된 매입형 합성기둥의 공칭부착응력 0.66MPa과 Eurocode 4에서 제시된 매입형 합성기둥의 공칭부착응력 0.30MPa보다 높게 나타났다.
- (5) (4)로부터 소규모 매입형 합성기둥의 경우에는 설계기준에서 제시하는 부착응력 값은 과소평가되고 있다고 할 수 있다.
- (6) 모든 실험체에서 초기에 약 2000kN의 부착에 의한 강도가 발현된 후 부착파괴가 일어나는 것을 알 수 있었다.
- (7) 콘크리트의 균열은 철근의 배근에 영향을 받으며, 하중을 받는 상부에 가까운 곳에 나타나는 것을 확인할 수 있었다.
- (8) 실험체 하단에 가깝게 위치한 전단연결재일수록 변형이 크고, 하중을 받는 실험체 상단에 가깝게 위치한 전단연결재부터 용접부에서 파괴되기 시작하는 것으로 관찰되었다.
- (9) H형강 매입형 합성기둥 실험체 부착응력의 평균값은 0.84MPa로 KBC2016과 Eurocode 4에서 제시된 매입형 합성기둥의 공칭부착응력보다 높게 나타났다.

감사의 글

이 연구는 연구재단(과제번호: 2015R1D1A1A01058973)의 지원을 받아 수행된 연구이므로 이에 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌(References)

- [1] 민진, 정인근, 심창수, 정영수(2005) 강재 매입형 합성기둥의 합성작용에 관한 실험, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회, 제17권, 제3호, pp.393-400.
Min, J., Jung, I.-K., Shim, C.-S., and Chung, Y.-S. (2005) Experiments on the Composite Action of Steel Encased Composite Column, *Journal of the Korean Concrete Institute*, KCI, Vol.17, No.3, pp.393-400 (in Korean).
- [2] 우해성, 김진호, 최성모(2002) 단순가력실험을 통한 콘크리트충전 강판기둥의 부착응력에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제14권, 제4호, pp.481-487.
Woo, H.S., Kim, J.H., and Choi, S.M. (2002) An Experimental Study on the Bond Strengths for Concrete Filled

- Steel Tube Columns Using a Push-out Test, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.14, No. 4, pp.481-487 (in Korean).
- [3] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [4] European Committee for Standardization (2004) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Building* (EN 1994-1-1: 2004), Belgium.
- [5] Kennedy, S.J. (1984) *End Connection Effects on the Strength of Concrete Filled HSS Beam Columns*, Master's Thesis, University of Alberta, Canada.
- [6] Viridi, K.S., and Dowling, P.J. (1980) Bond Strength in Concrete Filled Steel Tubes, *IABSE Proceedings*, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol.4, pp.125-139.
- [7] Wang, Q., Liu, Y., Luo, J., and Lebet, J.-P. (2011) Experimental Study on Stud Shear Connectors with Large Diameter and High Strength, *Proceedings of 2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering*, Institute of Electrical and Electronics Engineers, China, pp.340-343.
- [8] 국가기술표준원(2007) 금속재료 인장시험편(KS B 0801: 2007).
Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [9] 대한건축학회(2016) 건축구조기준, 대한건축학회.
Architectural Institute of Korea (2016) *Korean Building Code - Structural* (KBC 2016), AIK, Korea (in Korean).

요 약 : 이 연구에서는 강판 매입형 합성기둥의 Push-out Test를 통해 강재와 콘크리트의 부착면적에 따른 영향을 알아보았다. 이로써 부착면적이 넓을수록 부착응력은 작아진다는 경향이 조사되었다. 또한 소규모 매입형 합성기둥의 경우에는 설계기준에서 제시하는 공칭부착응력값이 과소하게 적용되는 것을 확인하였다. 다음으로 H형강 매입형 합성기둥의 Push-out Test를 통해 전단연결재의 수와 간격에 따른 영향을 알아보았다. 이로써 전단연결재의 전단거동을 파악할 수 있었다.

핵심용어 : 매입형 합성기둥, H형강, 부착강도, 부착응력, 전단강도, 전단연결재, Push-out test
