

CFT기둥에서 강관과 콘크리트 부착응력의 해석기법 개선에 관한 연구

A study on improved analytic method for the bond stress between concrete and steel tube in CFT column

석근영* 주기수** 최준영*** 채승훈*** 강주원****
Seok, Keun-Yung Ju, Gi-Su Choi, Joon-Young Chae, Seoung-Hun Kang, Joo-Won

요약

건축물의 고층화, 대형화에 따라 기둥이 부담해야 할 하중이 증대되고, 이로 인한 기둥단면적의 증대에 효율적으로 대처하기 위해 CFI(콘크리트 충전강관)기둥의 형식을 개발하게 되었다. CFT기둥은 이질재료로 구성된 복합구조형식으로, 역학적 거동을 규명하기 위해 많은 연구가 이루어지고 있다.

본 연구는 원형과 각형의 CFT기둥에 있어서 콘크리트 코어와 강관, 두 이질재료간의 접촉면 부착응력에 대한 해석적 연구로서 비선형 해석프로그램인 ABAQUS/Standard Version 5.8을 이용하여 shear-connector의 부착형태 및 위치에 따른 부착응력을 비교하고, 접촉면의 역학적 특성에 대한 개선된 해석기법을 제시하고자 한다.

Abstract

Buildings become high and large. CFT(Concrete Filled steel Tube) columns have been developed to manage effectively that loads which columns support and cross sections of columns are increased. Because CFT column is the composite structure made of two different materials, many researches have been performed to look into mechanical behaviors.

This study is an analytic study about bond stress on interface between concrete core and steel tube in circular and rectangular CFT columns. ABAQUS/Standard Version 5.8 is used to analyze bond stress by bond form and position of shear-connector, and improved analytic method about mechanical characters on interface is suggested.

키워드 : 부착응력, CFT기둥, 쉬어코넥트, 접촉면

Keywords : Bond Stress, CFT Column, Shear-connector, Interface

1. 서론

건축물은 고층화, 대형화 되어감에 따라 기둥이 부담해야 하는 하중이 증가하고, 기둥의 단면적이 늘어나게 되었다. 이로 인한 구조체 물량의 증가 및 내부공간 활용의 효율성이 저하되므로 새로운 구조 시스템의 개발이 필요하게 되었다. 이에 철골과 콘크리트의 특성을 이용한 복합구조형식의 CFI(콘크리트 충전강관)기둥이 개발되었다.

리트 충전강관)기둥이 개발되었다.

그러나 이질재료간의 거동이 일체화가 되기 힘든 이유로 콘크리트와 강관은 소요강도를 내기 전에 부착면이 먼저 탈락하는 거동을 하게 된다. 이를 규명하기 위해 부착면의 응력 및 거동에 대하여 많은 실험과 해석이 이루어져왔다.

본 연구에서는 콘크리트 코어와 강관의 부착응력 및 shear-connector의 영향에 대한 기존의 실험과 해석에 대한 연구를 토대로, 원형 및 각형 CFT기둥을 ABAQUS Version 5.8 패키지를 이용하여 비선형유한요소해석을 수행하였다. 해석결과치에 대한 분석을 통해 기존의 콘크리트와 강관의 부착면에 대한 모

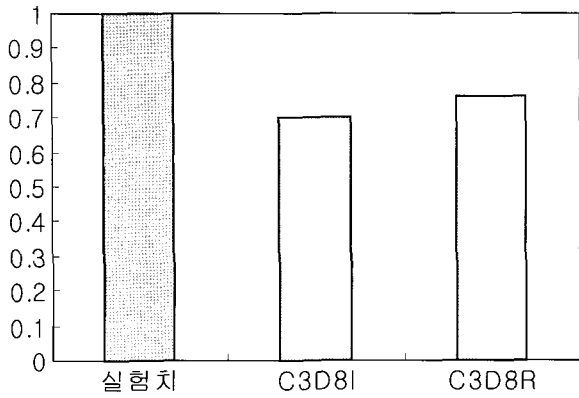
* 학생회원, 영남대학교 대학원 건축공학과 박사과정

** 정회원, (주)동성중공업 기술연구소 소장

*** 정회원, (주)동성중공업 기술연구소 팀장

**** 정회원, 영남대학교 건축학부 교수

Tel : 053-810-2429 E-mail : kangj@ynu.ac.kr



〈그림 1〉 압축부재 요소 비교

3.1.2 접촉면 모델링

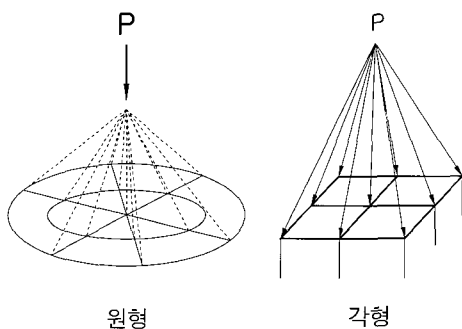
ABAQUS가 제공하는 Contact 요소는 접촉면의 부착형식, 접촉면에서 Slip의 유·무에 따라 Surface Element와 Interface Element가 있다. 본 해석에서는 화학적 부착 및 물리적 부착을 고려하여야 하고 접촉면에서 Slip이 발생하므로 Contact거동을 직접 전달하는 Surface Element를 이용하여 Contact Pair Option에 의해 한 점에 두 개의 절점을 부여하여 접촉면을 모델링 하였다.

3.1.3 가력점

해석 시험체의 가력조건은 콘크리트 상부에 등분포 하중이 작용하도록 실험과 동일하게 적용하였으며, <그림 2>와 같이 ABAQUS에서 제공하는 다중 절점구속법(Muilt-Point Constraints)을 이용하였다.

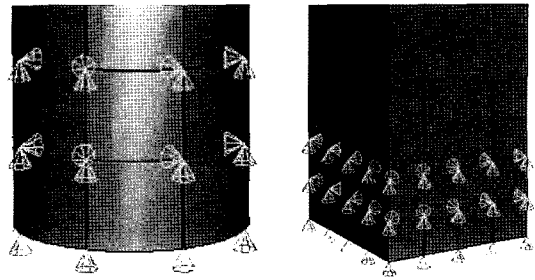
3.1.4 경계조건(Boundary Condition)

시험체에서는 강관하부에 콘크리트 슬립을 유도



〈그림 2〉 CFT기둥의 MPC 개념

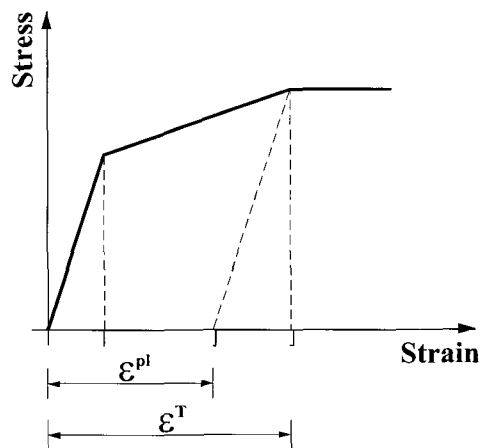
하기 위한 Air Gap을 주고, 강관의 국부좌굴을 방지하기 위한 스티프너가 있으므로 해석경계조건에서 강관의 국부좌굴을 방지하고, 콘크리트의 순수 Slip량과 접촉면에서의 응력변화를 확인할 수 있도록 <그림 3>과 같이 수정된 경계조건을 적용하였다.



(a) (b)
〈그림 3〉 경계조건(원형과 각형)

3.2 비선형 해석을 위한 재료입력

재료의 물성값은 해석의 결과에 미치는 영향이 아주 크다. ABAQUS에서 제공하는 물성값 입력방법은 <그림 4>와 같다.



$$\epsilon^{pl} = \epsilon^t - \epsilon^{el} = \epsilon^t - \sigma/E$$

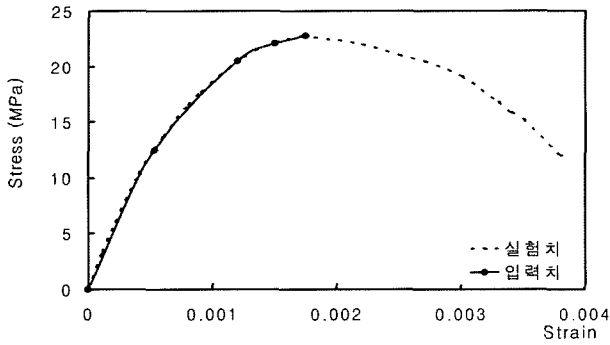
ϵ^{pl} : plastic stain
 ϵ^t : total true strain
 ϵ^{el} : elastic strain

〈그림 4〉 재료의 응력-변형도 관계

해석을 위한 재료의 물성치는 실험에 사용되어진 값을 적용하여 입력하였으며 <표 3>, <표 4>과 <그림 5>, <그림 6>과 같다.

〈표 3〉 콘크리트 압축강도 실험결과

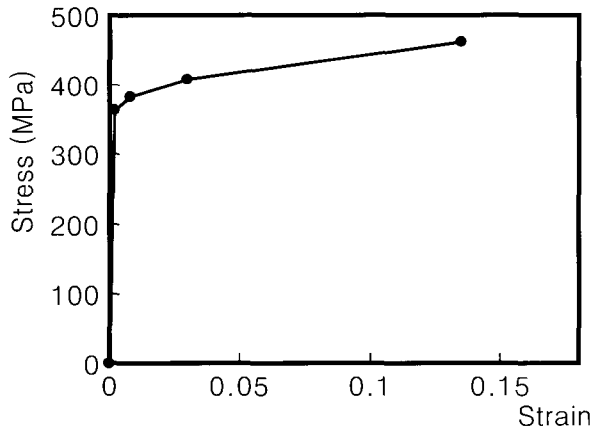
설계기준 강도 (MPa)	f_{ck} (MPa)	E_c (MPa)	골재 최대치수 (mm)	슬럼프 (mm)
24	22.8	2.4×10^4	25	150



〈그림 5〉 콘크리트의 응력-변형도 관계

〈표 4〉 강관강재의 인장강도 시험결과

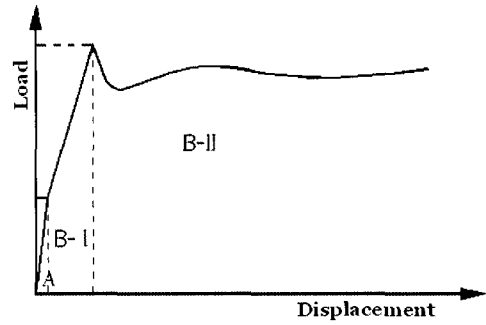
재질	σ_y (항복점) (MPa)	σ_u (인장강도) (MPa)	σ_y / σ_u (항복비)	ϵ_y (항복변형률)
SP5R400	378	416	0.91	$1,923 \times 10^{-6}$



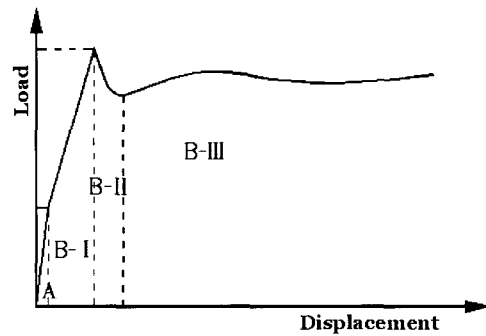
〈그림 6〉 강재의 응력-변형도 관계

3.3 부착면의 해석기법

부착면에 대해 ABAQUS에서 제공하는 Contact 요소 중 Surface Element는 마찰계수 값에 의해 화학적, 물리적 부착을 표현할 수 있고, 또한 접촉면

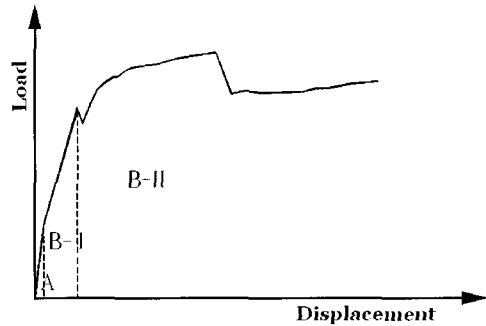


(a) 기존 해석기법

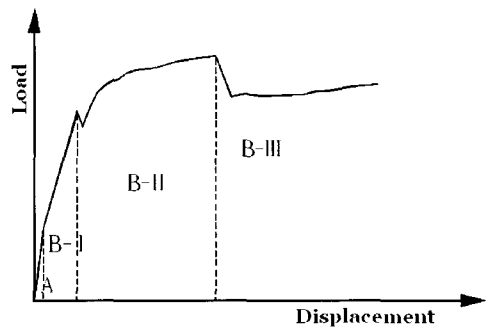


(b) 개선된 해석기법

〈그림 7〉 Shear-connector가 없는 경우의 해석기법 비교



(a) 기존 해석기법



(b) 개선된 해석기법

〈그림 8〉 Shear-connector가 있는 경우의 해석기법 비교

에서의 Slip이 허용된다. 기존 부착면해석에 있어서 <그림 7>과 <표 5>와 같이 Full Interaction 2단계와 Partial Interaction 1단계로 구분하여 초기값을 완전부착상태로 가정하고 하중재하 이후 발생 변위에 따라 부분부착으로 가정하였으나, 본 해석에서는 부착거동을 찾기 위해 <그림 8>과 <표 6>과 같이 5단계로 나누어 가정하였다. 특히 Partial interaction 부분에서의 마찰계수는 반복해석을 통해 근사값을 찾는 방법을 사용하였다.

<표 5> 기존 해석기법

(a) 기존 해석기법의 단계

분류	Full Interaction		Partial Interaction
	A	B-I	B-II
Step	Step 1	Step 2	Step 3
Load	Contact Pressure	Direct Load	Top Load-1

(b) 개선된 해석기법의 단계

분류	Full Interaction		Partial Interaction		
	A		B-I	B-II	B-III
Step	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Load	Contact Pressure	Direct Load	Top Load-1	Top Load-2	Top Load-3

<표 6> 기존 해석단계별 특성

(a) 기존 해석기법 단계별 특성

Step1	Step2	Step3
완전부착효과 (화학적 부착)	표면에 따른 화학적 부착	물리적 부착, Shear-connector
$\mu=1$	$\mu=1$	$\mu=0.5$

(b) 개선된 해석기법의 단계별 특성

Step1	Step2	Step3	Step4	Step5
완전 부착 (화학적 부착)	표면에 따른 화학적 부착	물리적 부착, Shear- connector	물리적 부착, Shear- connector	물리적 부착, Shear- connect or
$\mu=1$	$\mu=1$	$0.5 < \mu < 1$	$\mu=0.5$	$\mu < 0.5$

4. 해석결과 및 분석

4.1 실험결과와 해석결과 비교

실험 및 기존해석결과와 개선된 해석결과의 비교치는 <표 7>과 <표 8>에서 각각 원형과 각형 CFT기둥에 대해 나타나 있다. 화학적 부착구간(Step1) 및 표면상태에 따른 화학적 부착구간(Step2)에서는 부착항복 하중에 대한 오차가 원형의 경우, 기존해석에서 0.27~3.46%의 분포를 나타내고 개선된 해석에서는 0.06~1.47%의 분포를 나타낸다. 각형의 경우 기존해석에서 2.8~14.1%, 개선된 해석에서는 0.45~9.5%의 오차 분포를 나타낸다. 부착항복시 응력에 있어서는 원형의 경우 기존해석은 0.3~6.42%, 개선된 해석에서 0.03~3.02%의 오차 분포를 나타낸다. 각형의

<표 7> 원형 실험치와 비교

시험체	관통형			단속형			
	CS-O	CS-L1	CS-L2	CC-O	CC-L1	CC-L2	
P_u (kN)	실험	306.4	347.1	318.8	306.4	368.0	326.6
	기존 해석	317	339	325	317	369	329
	개선된 해석	310.9	340.7	319	310.9	367.3	327.4
μ_u (MPa)	실험	0.265	0.31	0.282	0.265	0.329	0.294
	기존 해석	0.282	0.302	0.289	0.282	0.328	0.293
	개선된 해석	0.27	0.311	0.283	0.273	0.33	0.294
P_{su} (kN)	실험	-	340.2	308.3	-	351.3	334.3
	기존 해석	-	335.0	291.0	-	326.0	305.0
	개선된 해석	-	337.2	306.3	-	348.5	332.9

P_u : 부착항복시 하중

μ_u : 부착항복시 응력

P_{su} : shear-connector 항복시 하중

<표 8> 각형 실험치와 비교

시험체	관통형			단속형			
	RS-O	RS-L1	RS-L2	RC-O	RC-L1	RC-L2	
P_u (kN)	실험	221.1	279	227	221.1	253	199
	기존 해석	190.2	271.2	195.0	190.2	287.0	197.4
	개선된 해석	200.1	275.3	220	200.1	260.7	198.1
μ_u (MPa)	실험	0.185	0.22	0.19	0.185	0.238	0.193
	기존 해석	0.167	0.24	0.172	0.167	0.253	0.17
	개선된 해석	0.173	0.232	0.188	0.173	0.243	0.195
P_{sn} (kN)	실험	-	281.3	180.3	-	284.9	205.8
	기존 해석	-	268	174.6	-	269.8	183
	개선된 해석	-	275.8	176.5	-	280	195.1

경우는 기존해석에서 6.3~9.73%, 개선된 해석에서 1.04~6.49%의 오차 분포를 보인다.

물리적 부착구간(Step3~step5)에서의 실험결과는 기존해석과 개선된 해석 모두, 하중이 감소하였다가 증가하기 전에 해석이 조기 종료되었다. 이는 shear-connector와 콘크리트가 접합되는 부분에 응력집중현상으로 인한 조기 종료라고 판단된다.

4.2 Shear-connector에 따른 부착응력 검토

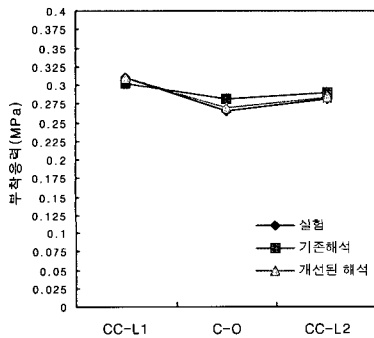
Shear-connector의 위치와 형태에 따른 부착응력의 차이와 기존해석과 개선된 해석방법에 따른 부착응력값에 대한 오차에 대한 경향을 <그림 9>~<그림 12>에서 알 수 있다. Shear-connector의 위치에 따라서는 상부에 위치할 경우에 하부에 위치한 경우보다 부착응력이 전반적으로 크게 나왔다. 또한 관통형보다는 단속형이 조금 더 큰 부착응력값을

내타내고 있다. 또한, 해석의 오차에 있어서는 원형의 경우는 Shear-connector가 없는 경우에 있어서는 제외하고는 기존해석과 개선된 해석이 큰 차이가 없다. 그러나 각형의 경우는 기존해석결과의 오차가 크게 나타나지만, 개선된 해석의 결과는 그 오차를 줄이는 것으로 나타난다.

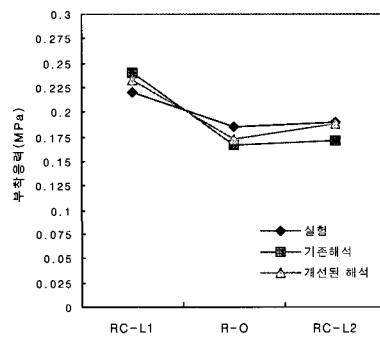
5. 결론

본 연구는 ABAQUS/Standard 5.8 패키지를 이용하여 원형 및 각형 CFT기둥의 두 이질재료간의 항복 전 화학적 부착, 항복 후 Shear-connector에 의한 물리적 부착에 대한 실험에 근거하여 기존의 부착응력에 대한 해석을 개선하고자 하였으며, Shear-connector의 형태 및 위치에 따른 부착응력의 차이를 비교하고자 하였다.

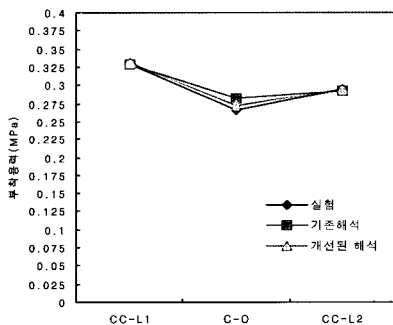
기존 연구 자료들을 보완하고 문제점을 제시하



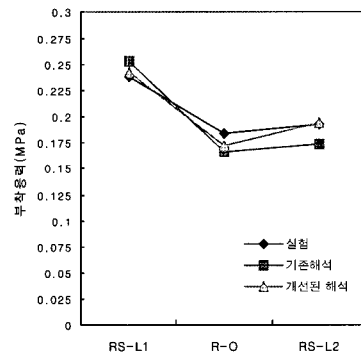
<그림 9> 원형 CFT기둥의 Shear-connector가 관통형인 경우 부착응력



<그림 11> 각형 CFT기둥의 Shear-connector가 관통형인 경우 부착응력



<그림 10> 원형 CFT기둥의 Shear-connector가 단속형인 경우 부착응력



<그림 12> 각형 CFT기둥의 Shear-connector가 단속형인 경우 부착응력

기 위해 여러 가지 방법으로 해석을 시도하였으며 반복적인 해석 과정을 통해 다음의 결론을 얻었다.

1. 적합한 Contact Pressure의 값을 찾기 위해 원형 및 각형 CFT기둥의 각 해석모델에 대하여 반복해석을 수행하였으며, 주요 변수인 마찰계수를 찾아 실험치에 근사한 해석결과를 도출하였다.
2. 하중단계별 부착응력의 변화에 대응하기 위해 기존 해석에서는 Step1(화학적 부착 구간)-마찰계수 $\mu=1$, Step2(표면상태에 따른 화학적 부착구간)-마찰계수 $\mu=1$, Step3(물리적 부착구간)-마찰계수 $\mu=0.5$ 로 해석을 실시하였다. 해석결과, 특히 각형 CFT기둥에서, 그 오차의 범위를 줄이기 위해, 개선된 해석 방법에서는 Step1(완전부착)-마찰계수 $\mu=1$, Step2(표면상태에 따른 화학적 부착)-마찰계수 $\mu=1$, Step3(물리적 부착)-마찰계수 $0.5 < \mu < 1$, Step4(물리적 부착)-마찰계수 $\mu=0.5$, step5(물리적 부착)-마찰계수 $\mu < 0.5$ 로 해석을 수행하였다.
3. 해석결과와 실험결과의 비교 그래프에서 알 수 있듯이 실험결과에 대한 기존해석결과의 오차보다 개선된 해석의 오차의 폭이 감소된 것으로 나타난다. 특히 각형의 경우에서, 기존 해석에서 6.3~9.73%가 개선된 해석에서 1.05~6.49%으로 오차폭이 크게 감소하는 것으로 나타났다.
4. shear-connector의 형태와 위치에 따라서는, 개선된 해석에서도 상부 단속형인 경우가 부착성능이 가장 큰 것으로 나와, 실험결과에 근접한 결과가 도출되었다. 각형의 경우 shear-connector에 의한 부착응력의 증가에 있어 해석결과에서 현저하게 개선된 것으로 나타났다. 그러나 물리적 부착상태에서 shear-connector에 응력집중 현상으로 해석이 조기종료에 대한 문제점 개선을 위한 연구가 더 필요하다고 본다.

본 연구에서는 실험의 결과를 토대로 보다 실제적인 부착응력을 파악하기 위해 부착의 상태를 세분화하여 기존해석을 개선하는데 중점을 두었다. 향

후, 개선된 해석기법을 토대로 실제 CFT기둥의 부착응력 및 거동을 미리 예측할 수 있는 해석모델링 및 해석기법에 대한 연구가 필요하다고 본다.

감사의 글

본 연구는 (주)동성중공업 연구개발사업(206C000297) 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

1. Deric, J. Oehlers and Mark A. Bradford, "Composite Steel and Concrete Structural Members", PERGAMON, 1995
2. M. Shams and M. A.Saadeghvaziri, "Nonlinear response of concrete-filled steel tubular columns under axial loading", ACI Structural Journal, Vol.96, No.6, 1999, p.1009-1017
3. M. Ala Saadeghvaziri and Mohammad Shams, "Nonlinear modeling and evaluation of concrete-filled steel tubular columns", ABAQUS Users' Conference, Milan, Italy, June 1997
4. H. Shakir-Khalil, "Pushout strength of concrete-filled steel hollow sections", The Structural Engineer, Vol.71, No.13, 1993 p.230-233
5. Charles W. Roeder, "Composite action in concrete filled tubes", Journal of Structural Engineering, Vol.125, No.5, p.477-484
6. M. Tomii, K. Yoshimura and Y. Morishita, "A method of improving bond strength between steel tube and concrete core cast in square and octagonal steel tubular columns", Transactions of the Japan concrete institute, Vol.2, [IV - 16], 1980
7. Y. Morishita, M. Tomii and K. Yoshimura, "Experimental studies on bond strength in concrete filled circular steel tubular columns subjected to axial loads", Transactions of the Japan concrete institute, [V-12]
8. Y. Morishita, M. Tomii and K. Yoshimura, "Experimental studies on bond strength in

- concrete filled square and steel tubular columns subjected to axial loads”, Transactions of the Japan concrete institute, [V-13]
9. 김대희, “충전각형강관기둥에서 콘크리트와 강관의 부착응력에 관한 해석적 연구”, 영남대학교 석사학위논문, 2001. 12.
10. 김옥희, “충전원형강관기둥에서 콘크리트와 강관의 부착응력에 관한 해석적 연구”, 영남대학교 석사학위논문, 2001. 12.