

충전각형강관기둥에서 콘크리트와 강관의 부착응력에 관한 해석적 연구

An Analytic Study on the Bond Stress between Concrete and Steel Tube in CFT Rectangular Column

박 성 무* 강 주 원* 김 원 호** 이 형 석***
Park, Sung-Moo Kang, Joo-Won Kim, Won-Ho Lee, Hyung-Seok

Abstract

An analytic study on the bond stress between steel tube and concrete in concrete filled steel(CFT) rectangular column is presented in this paper. Recently buildings need members which are enhanced durability and ductility. Concrete filled rectangular column system is proposed as alternative plan. In this paper, ABAQUS/Standard Version 5.8 which is identified as usefulness for finite element analysis and has various element library is used. The variables in this study are the location and type of shear-connector. The modeling on contact problem practiced by Contact Pair and Contact Pressure method. In the step of physical bond, it is practiced by Change friction option. After yielding of models, analytic results is less than that of experimental results.

keywords : Bond Stress, CFT Rectangular Column, Shear-connector, Contact Pair, Contact Pressure, Finite Element Analysis

1. 서 론

현재의 건축물은 고층화, 대형화되어감에 고층 RC에서는 고층화에 동반되는 응력증대에 대해서 재료의 고강도화와 단면증가를 통해 대처해 왔다. 하지만 저층부 기둥부재의 단면 증가는 실내공간 효율성을 저하시키고 재료의 고강도화에도 한계가 있어 고층화·대스판화의 요구에 대해서는 RC기둥만으로는 충분히 대응할 수 없다. 이에 철골과 콘크리트의 장점을 최대한 발휘할 수 있는 복합구조개발로 콘크리트 충전 강관이 개발되었다.

그러나 콘크리트 충전 강관을 고층 구조물 설계에 적용에 있어서 국내·외적으로 RCS공법에 보-기둥 접합부에 응력전달기구가 명확하지 않을 뿐만 아

니라 이질재료 접합부 접촉면의 전단응력에 의한 슬립거동의 구조적 관계가 명확히 규명되어 있지 않기 때문에 이에 대한 연구를 필요로 한다.

본 연구는 콘크리트 충전 각형 강관의 부착응력을 향상시키기 위한 shear-connector의 영향을 해석하기 위한 것으로 실험과 비교·분석하기 위해 해석 기법과 모델링 기법을 제시하였다. 기존의 연구가 보-기둥 접합부나 기둥 압축실험에 치중하는 경향과 다르게 콘크리트 코어와 강관의 두 이질 재료의 상호작용에 대한 연구로써, 그 중에서 강관에 부착될 shear-connector 부착형태나 위치에 따라 변화되는 부착응력을 비교하고 유한요소해석을 통해 이질재료간의 접촉면에 대한 적절한 모델링 기법을 제시하고 응력 분포를 분석하여 적절한 해석 기법을 제시하였다.

실험에 있어서 슬립을 허용하기 위해 강관 하부를 고정하고 콘크리트 하부에 air gap을 둔다. 콘크

* 정회원·영남대학교 건축학부 교수, 공학박사
** (주)SNS 구조안전기술원 대표, 공학박사
*** 정회원·영남대학교 대학원 박사 수료

리트는 상부를 일점 가력하고, shear-connector가 응력에 도달하기 전에 탈락되는 것을 방지하기 위해 강관과 일체로 거동한다고 가정하고 용접한다. 해석에 있어서는 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS Version 5.8 패키지를 사용하여 수행하였다. 기존 연구를 통하여 콘크리트와 강관의 부착면에 대한 모델링 방법과 요소의 특성을 고찰하고, 각 부재 특성을 잘 나타내는 요소를 선택하여 3차원 해석을 수행하였다.

2. 실 험

2.1 시험체

2.1.1 시험체 계획

본 실험에 시험체는 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> 콘크리트 충전 각형 강관기둥 시험체 계획표

시험체명	강관			콘크리트강도	shear-connector					내면길이
	치수	두께	길이		형태	개수	위치	지름	강도	
R-O					-	-	-	-	-	-
RS-L1	□250 ×250	8	1350	240	관통형	4	상부	10	일반볼트	80
RS-L2						4	하부			
RC-L1					2	상부	-			
RC-L2						2				

R-O : shear-connector가 없는 시험체

RS-L

├── shear-connector 위치 (1 : 상부, 2 : 하부)
├── shear-connector 형태 (S : 관통형, C : 단속형)
└── Rectangular Column

2.1.2 시험체의 주요 변수

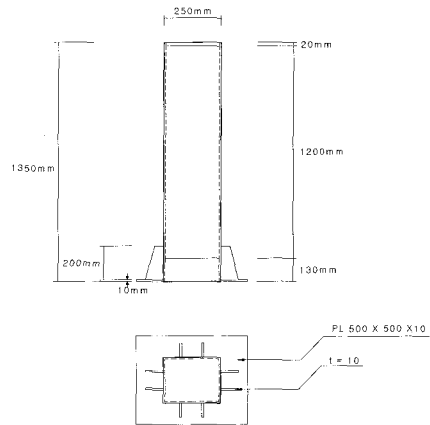
콘크리트 충전 각형 강관기둥 시험체의 주요 변수는 다음과 같다.

① shear-connector의 형태 - 관통형, 단속형

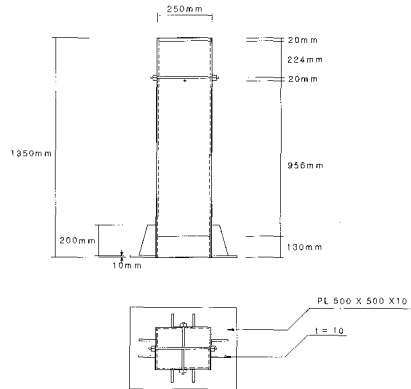
② shear-connector의 위치- 상부, 하부

2.1.3 해석대상 시험체

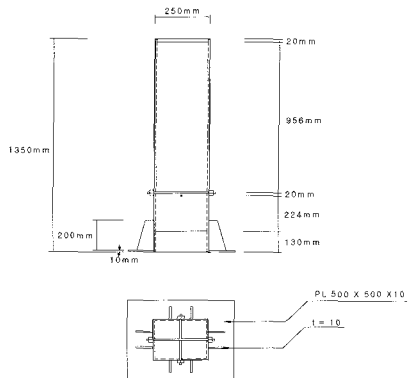
시험체의 기둥은 각형 강관을 사용하여 콘크리트를 충전하였다. shear-connector의 형태에 따라 단속형과 관통형으로 나뉘고 두 가지 모두 강관을 뚫고 단속형의 경우는 볼트를 끼워 용접하고 관통형의 경우는 볼트를 관통시키고 너트를 양쪽으로 조인후 용접하였다.



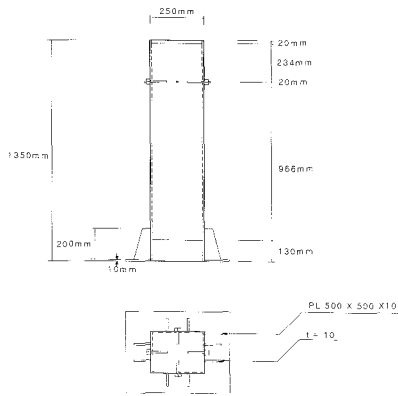
<그림 1> R-O 시험체



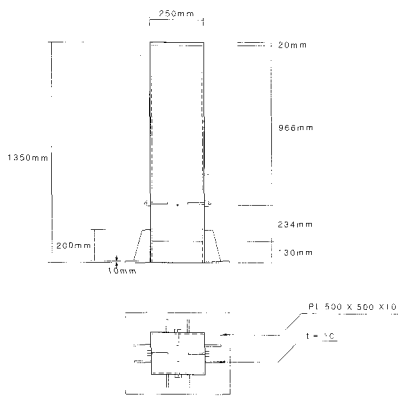
<그림 2> RS-L1 시험체



<그림 3> RS-L2 시험체



<그림 4> RC-L1 시험체



<그림 5> RC-L2 시험체

3. 충전강관의 유한요소해석

3.1 유한요소해석 모델링

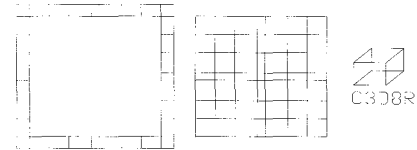
3.1.1 콘크리트와 강관의 모델링

ABAQUS에서 제공하는 Solid 요소로서 콘크리트 모델링에 적합한 요소는 HEX8요소중 C3D8I, C3D8R 요소가 있다. 각각의 요소의 특징은 다음과 같다.

C3D8I는 선형 등매개 변수 요소에 비적합한 모드를 추가함으로써 휨 거동을 개선시킨 요소이다. 이 요소의 기본적인 효과는 보통의 변형요소가 휨 하중을 받을 때 강성이 실제 이상으로 평가되게 하는 소성전단응력을 제거하도록 한다. 또한 Poisson효과에 의한 인위적인 강성도 제거한다.

C3D8R는 감차적분을 이용한 선형 등매개 변수 요소로서 감차적분을 사용하지 않은 요소의 약 1/3.5해석 시간상의 장점을 가지고 있다. 그러나, 오차가 요소의 형상과 수에 민감하고 요소가 단하나의

적분점을 가지고 있기 때문에 적분점에서 계산되는 변형도는 모두 0이 되어 조절할 수 없는 비틀림이 발생할 수 있다. 이전 논문에서 위의 두 요소에 대한 검토를 위하여 휨 부재 및 압축부재에 대하여 해석을 수행하였다. 이 결과 C3D8R이 더 적은 오차를 보였다. 이에 근거하여 HEX8요소 중 C3D8R을 이용하여 모델링 하였다.



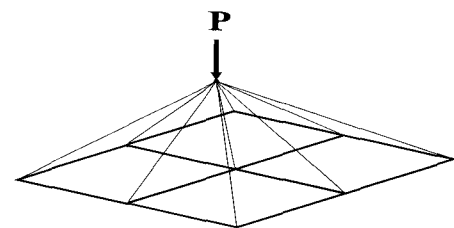
<그림 6> 콘크리트와 강관의 요소 분할도

3.1.2 접촉면 모델링

ABAQUS가 제공하는 Contact 요소는 Contact 거동의 전달에 따라 직접적 요소(Surface), 간접적 요소(Interface Element)로 크게 다음의 두 가지로 나누어진다. 여기서는 Contact 거동을 전달하는 직접적인 요소(Surface)를 Contact Pair Option에 의해 한 점에 두 개의 절점을 부여하여 접촉면을 모델링 하였다. Contact Pair는 접촉면 사이를 부착·마찰의 개념으로 연결시킬 수 있도록 주-종속 알고리즘(Master-Slave Algorithm)의 개념을 사용하고 있으며, 본 해석에서는 두 재료의 매쉬분할이 동일하기 때문에 강도가 큰 강관을 Master Surface, 콘크리트를 Slave Surface로 정의하였다.

3.1.3 가력점

가력점은 콘크리트 상부에 등분포 하중이 작용하도록 가력점을 하나의 그룹으로 묶어 <그림 7>과 같이 기준이 되는 절점에 집중하중을 가하여 전 절점에 등분포 하중이 작용하도록 하였다.

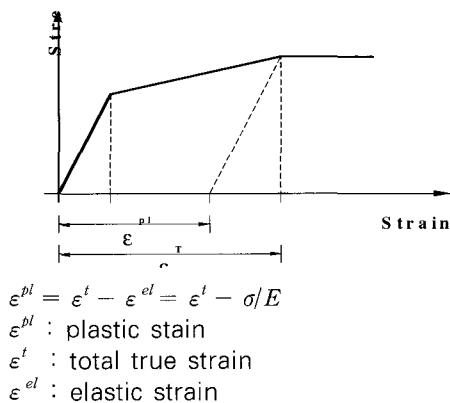


<그림 7> 가력 개념도

3.2 비선형 해석을 위한 재료입력

3.2.1 재료특성의 입력형식

재료 물성값은 중요한 변수의 하나로 본 연구에서 강관과 콘크리트의 재료시험 결과를 비탄성 영역까지 구체적으로 입력한다. 탄성영역은 탄성계수와 포아송비로, 비탄성영역은 True Stress와 Log Strain로 표현하였다. 비탄성영역의 첫 변형도는 0으로 하여 <그림 8>과 같은 계산식에 의해 각각 응력도와 변형도를 최대강도까지 입력하였다.



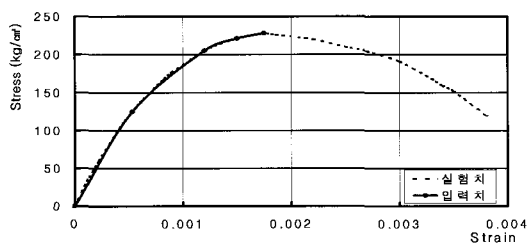
<그림 8> 재료의 응력-변형도 입력 그래프

3.2.2 콘크리트

<표 2>에서와 같은 콘크리트를 ϕ -100×300 mm 인 원주형 공시체를 제작하여 50t용량의 유압식 만능시험기(U.T.M)를 사용하여 압축강도를 실험하여 <그림 9>과 같은 결과가 나타나 있다.

<표 2> 압축강도시험용 공시체

설계기준강도	f_c'	E_c	슬럼프 (cm)	굵은골재 최대치수 (mm)
	(kgf/cm ²)			
240	228	2.4×10^5	15	25



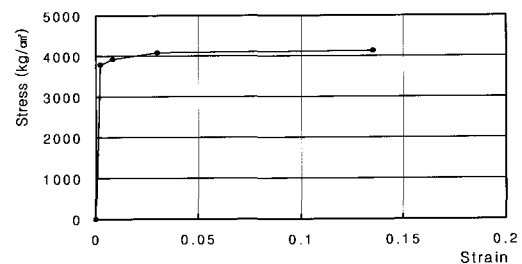
<그림 9> 콘크리트의 응력-변형도

3.2.3 강관

각형 강관의 역학적 성질을 파악하기 위해 KS B 0801의 금속재료 인장 시험편 규정에 따라 강재 인장 시험편을 제작하였다. 강재의 재질은 원형강관 SS400을 사용하였으며, 시험은 유압식 만능 시험기 (U.T.M)를 사용하여 KS B 0802의 금속재료 인장시험편 시험방법에 의해 실시하였다. 시험결과에 의한 항복점, 인장강도, 항복비, 항복변형도를 <표 3>에 나타내었다.

<표 3> 강관기둥 강재의 인장강도 시험결과

σ_y (tf/cm ²)	σ_u (tf/cm ²)	σ_y/σ_u	ϵ_y ($\times 10^6$)
3.78	4.16	0.91	1,923



<그림 10> 강관의 응력-변형도

3.3 부착해석방법

콘크리트와 강관의 접합부에는 화학적 부착과 물리적 부착 구간으로 나누어 생각할 수 있다.

여기서 사용한 Contact 모델링 기법은 화학적 부착을 고려하기 위해 Contact Pair에 Contact Pressure를 가력하는 것으로 하였다. 따라서 한 점에 두 이질 재료의 절점을 부여하여 접촉면을 모델링 하였다.

다음의 3가지 과정에 의해 접촉면의 마찰계수를 구했다.

Step1

화학적 부착을 고려하기 위해 Contact Pressure을 가해주는 단계로서 접촉면에서 Slip이 일어나지 않는 완전부착상태를 만들어야 하며 마찰계수와 Contact Pressure의 관계를 고려하여 해석모델의 상·하의 모든 절점에 같은 힘을 가하였다.

Step2

해석모델에 하중을 재하하여 부착항복까지의 하중을 유도하였다.

Step3

마찰계수에 변화를 주어 해석을 수행해서 가장 적절한 마찰계수를 찾는다.

4. 해석결과 및 분석

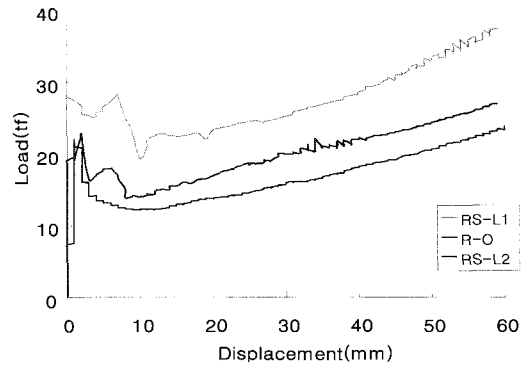
4.1 실험 결과분석

4.1.1 가력

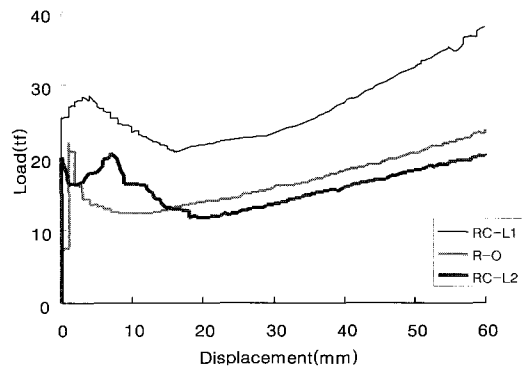
실험은 최대하중 200ton의 U.T.M에서 실시하였으며 실험에는 Computing Data Logger TDS-602, 200mm의 Electric Displacement Transducer, 5mm의 Steel Strain Gauge 등의 장비가 사용되었다. Push-Out Test로서 기둥의 상부에 가력판을 두고 수직재하하여 강관 내부에 충전된 콘크리트가 허용된 Air-Gap에서 60~120mm의 슬립(slip)이 발생할 때까지 가력하였다. 실험체의 설치는 기둥에 일정한 축력을 가하기 위하여 U.T.M의 중앙에 설치하였다. 강관 내부에 충전된 콘크리트의 수직변위를 측정하기 위하여 LVDT를 설치하여 평균값을 이용하였고, 강관의 수평 및 수직변형률을 알아보기 위해 각 실험체마다 9개의 Strain Gauge를 부착하였다. 실험체의 정확한 설치를 위하여 강관의 하부면을 그라인더를 사용하여 평활하게 가공하였고, 시험가력후 강관 기둥의 수직 상태를 확인 후 본 가력을 실시하였다.

4.1.2 실험결과분석

화학적 부착구간과 물리적 저항구간을 뚜렷하게 확인할 수 있고 부착력이 항복하고 나면 2차 항복을 발견할 수 있는데, 이것은 <그림 11>, <그림 12>의 R-O그래프와 비교하면 Shear-connector의 영향임을 알 수 있다. 또한 Shear-connector가 상부에 위치한 시험체가 더 큰 응력을 가지는 것을 알 수 있다.



<그림 11> 贯通형 실험 결과



<그림 12> 단속형 실험 결과

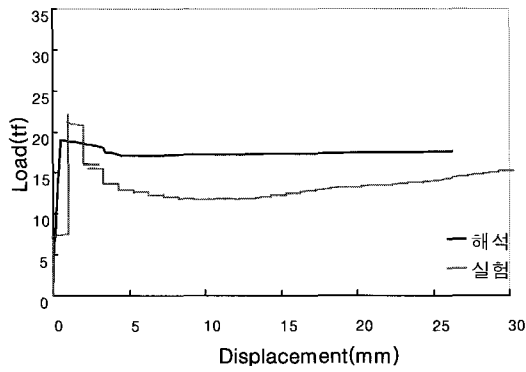
4.2 해석결과분석

해석에 의한 각 시험체의 결과는 <표 4>와 같으며 실험치와의 비교는 <그림 13>~<그림 17>에 나타난다.

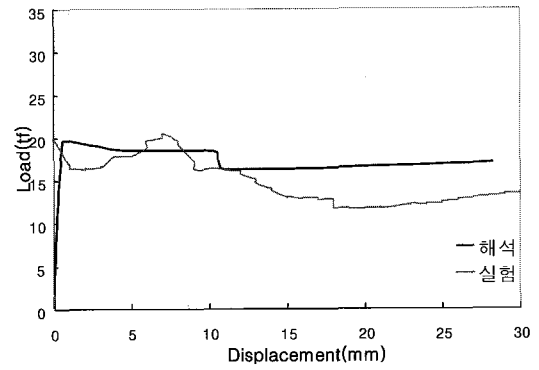
<표 4> 해석결과표

시험체	贯通형			단속형		
	R-O	RS-L1	RS-L2	R-O	RC-L1	RC-L2
L	1350					
l	1200					
P_u (tf)	19.02	27.12	19.5	19.02	28.7	19.74
μ_u (kg/cm ²)	1.67	2.4	1.72	1.67	2.53	1.7
δ_u (mm)	0.553	0.51	0.482	0.553	0.5	0.668
P_{su} (tf)	-	26.8	17.46	-	26.98	18.3
δ_{su} (mm)	-	10.2	8.42	-	9.39	10.5

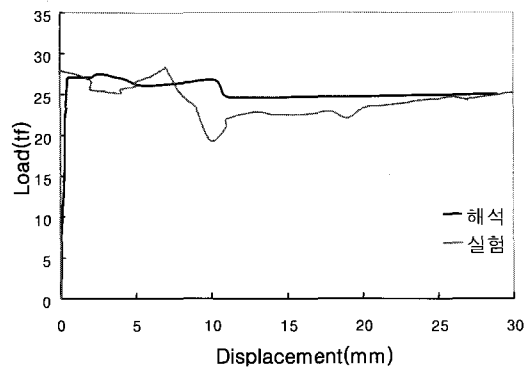
L : 강관의 길이 l : 콘크리트와 강관의 부착길이
 P_u : 부착항복시 하중 μ_u : 부착항복시 응력
 δ_u : 부착항복시 변위 P_{su} : shear-connector 항복시 하중
 δ_{su} : shear-connector 항복시 변위



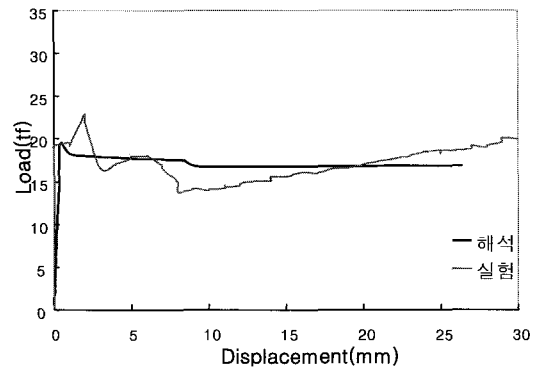
〈그림 13〉 R-O 비교



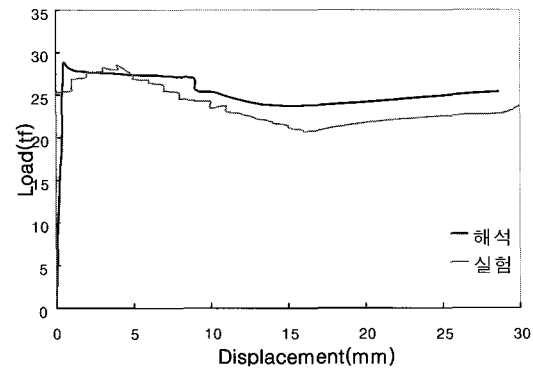
〈그림 17〉 RC-L2 비교



〈그림 14〉 RS-L1 비교



〈그림 15〉 RS-L2 비교



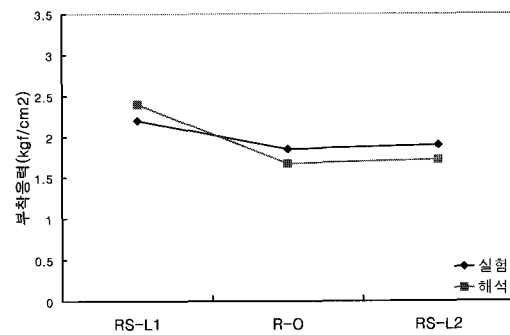
〈그림 16〉 RC-L1 비교

〈표 5〉 실험치와 비교

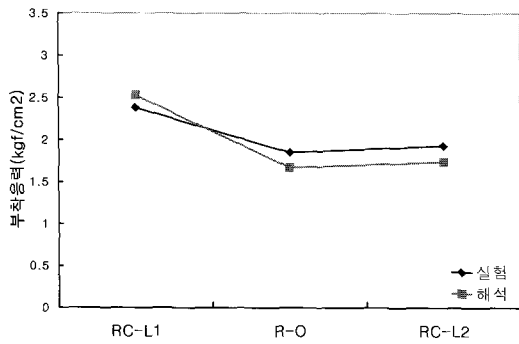
시험체		관통형			단속형		
		R-O	RS-L1	RS-L2	R-O	RC-L1	RC-L2
$P_u(t)$	실험	22.11	27.9	22.7	22.11	25.3	19.9
	해석	19.02	27.12	19.5	19.02	28.7	19.74
	오차 (%)	14	2.7	14	13.9	13.4	0.8
μ_u (kg/cm ²)	실험	1.85	2.2	1.9	1.85	2.38	1.93
	해석	1.96	2.4	1.72	1.96	2.53	1.74
	오차 (%)	5.9	9	9.4	5.9	6.3	9.8
$P_{su}(t)$	실험	-	28.13	18.03	-	28.49	20.58
	해석	-	26.8	17.46	-	26.98	18.3
	오차 (%)	-	4.7	3.1	-	5.3	11

4.2.1 Shear-connector의 형태에 따른 부착응력 비교

〈그림 18〉, 〈그림 19〉에서 보여주듯이 관통형이든 단속형이든 Shear-connector가 상부에 위치할 경우 높은 부착 응력을 가진다.



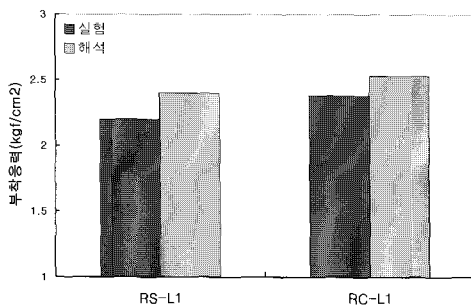
〈그림 18〉 Shear-connector가 관통형인 경우 부착응력



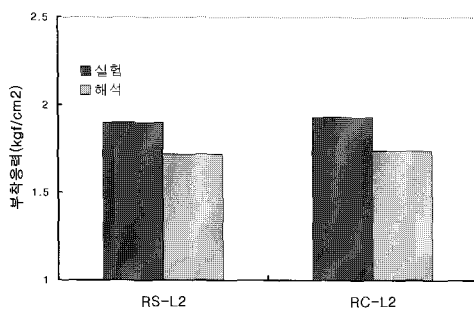
〈그림 19〉 Shear-connector가 단속형인 경우 부착응력

4.2.2 Shear-connector의 위치에 따른 부착응력 비교

〈그림 20〉, 〈그림 21〉를 보면 Shear-connector의 위치가 어느 곳이든 단속형이 더 큰 부착응력을 보인다. 해석치와 실험치가 비슷한 양상을 보이고 있다.



〈그림 20〉 Shear-connector가 상부에 있는 경우 부착응력



〈그림 21〉 Shear-connector가 하부에 있는 경우 부착응력

5. 결론

본 연구는 ABAQUS/Standard 5.8 패키지를 이용하여 콘크리트 충전 각형 강관 기둥의 부착응력과

Shear-connector의 영향에 대한 적절한 해석기법을 제시하고자 시작되었다. 기존에 연구자료들을 보완하고 문제점을 제시하기 위해 여러 가지 방법으로 해석을 시도하였으며 해석의 결과 다음의 결론을 얻었다.

1. Solid요소로서 감차적분을 이용한 선형 등매개 변수 요소인C3D8R을 사용하였다.
2. 이질재료 간에 화학적 부착력을 해석하기 위해서는 CONTACT PAIR를 사용하여 Contact Pressure를 가해주는 방법을 이용하였다.
3. 반복적인 해석을 통해서 Contact Pressure값을 찾아내고 BOUNDARY를 사용해서 부착하중을 유도하였다.
4. 화학적 부착력이 항복하면 콘크리트가 Slip하는 거동을 해석하기 위해 마찰변동계수를 사용하여 환경에 변화를 주어야 하고 마찰계수를 0.5로 하였다.
5. 위에 과정을 통해서 화학적 부착 항복 하중이나 부착응력과 같은 값을 나타내는 화학적 부착 구간에서는 거의 정확한 해석 값을 볼 수 있다 그러나 물리적 부착 구간에 관한 해석에 더 많은 연구가 필요하다고 본다.

참 고 문 헌

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. Martin D. O'Shea, Russell Q. Bridge, "Design of circular thin-walled concrete filled steel tubes", Journal of Structural Engineering, Vol.126, No.11, 2000, p.1295-1303

5. H. Shakir-Khalil, "Pushout strength of concrete-filled steel hollow sections", *The Structural Engineer*, Vol.71, No.13, 1993 p.230-233
6. Charles W. Roeder, "Composite action in concrete filled tubes", *Journal of Structural Engineering*, Vol.125, No.5, p.477-484
7. Andrew E. Kilpatrick, B. Vijaya Rangan, "Influence of interfacial shear transfer on behavior of concrete-filled steel tubular columns", *ACI Structural Journal*, Vol.96, No.4, p.642-648
8. Stephen P. Schneider, "Axially loaded concrete-filled steel tubes", *Journal of structural engineering*, Vol.124, No.10, 1998, p.1125-1138
9. H. Shakir-Khalil, "Resistance of concrete-filled steel tube to pushout forces", *The Structural Engineer*, Vol. 71, No.13, 1993, p.234-243
10. M. Tomii, K. Yoshimura and Y. Morishita, "A method of improving bond strength between steel tube and concrete core cast in circular steel tubular columns", *Transactions of the Japan concrete institute*, Vol.2, [IV - 15], 1980
11. 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
12. 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]
13. 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]
14. 신 현, "철근콘크리트 충전 강관기둥-철근 콘크리트보 접합부의 해석적 연구", 영남대학교 석사학위논문, 1999. 8
15. 김윤태, "마찰계수에 따른 합성슬래브의 휨 거동에 관한 해석적 연구", 영남대학교 석사학위논문, 1999. 12
16. 김영환, "콘크리트 충전 각형강관의 부착응력에 관한 해석적 연구", 영남대학교 석사학위논문, 2000. 12