

중심축 하중을 받는 각형 CFT 기둥의 장기거동에 관한 연구

권승희¹⁾ · 김태환²⁾ · 이태규³⁾ · 김윤용^{1)*}

¹⁾ 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 ²⁾ 동부건설(주) ³⁾ 우송대학교 건설환경공학과

(2004년 10월 20일 원고접수, 2005년 3월 7일 심사완료)

Long-Term Behavior of Square CFT Columns under Concentric Load

Seung-Hee Kwon¹⁾, Tae-Hwan Kim²⁾, Tae-Gyu Lee³⁾, and Yun-Yong Kim^{1)*}

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-338, Korea

²⁾ Dongbu Corporation, Seoul, 135-523, Korea

³⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Woosong University, Daejeon, 300-829, Korea

(Received October 20, 2004, Accepted March 7, 2005)

ABSTRACT

This paper presents experimental and analytical studies on long-term behavior of square CFT columns under central axial loading. Two loading cases are considered: (1) the load applied only at the inner concrete of the column and (2) the load applied simultaneously on both the concrete and the steel tube. Four specimens of square CFT columns were tested under the two loading cases, and basic creep test for two concrete specimens was performed to find out the creep properties of the inner concrete. Three-dimensional finite element analysis models were established and verified with the experimental results. The verification shows that the prediction for the long-term behavior of actual square CFT columns is possible from the three dimensional finite element modeling considering the bond behavior between steel tube and inner concrete. Also, experimental results and numerical calculations revealed that the bond stress induced by the confinement pressure as well as the slip between inner concrete and steel tube were increased with time in the first loading case. However, the confinement by the loading plate was decreased with time while increasing confinement effect by the steel tube was observed over time. In contrast no confinement effects occur in the second loading case.

Keywords : CFT column, long-term behavior, experiment, analysis

1. 서 론

CFT(concrete filled steel tube) 기둥은 원형 또는 각형 단면의 강관내부에 콘크리트를 충전한 구조로 강관이 내부의 콘크리트를 구속하고 내부 콘크리트는 외부 강관의 국부좌굴을 방지하기 때문에 강성, 내력, 변형성능, 내화 등의 측면에서 뛰어난 구조적 성능을 발휘하게 된다. 또한 콘크리트를 타설할 때 거푸집이 사용되지 않아 시공기간이 단축되기 때문에 경제성이 우수하다. 이러한 이유로 국내외에서 CFT 기둥을 구조물에 적용하는 사례가 증가하고 있는 추세이다¹⁾. 그러나 내부 콘크리트의 수축(shrinkage) 및 크리프(creep) 특성으로 인해 외부에서 가해지는 하중이 증가하지 않아도 시간에 따라 변형이 증가하고 응력이 재분배되기 때문에 이들을 반드시 고려하여

설계하여야 한다. 특히 CFT 기둥의 경우, 단면의 크기와 가해지는 외부 하중에 따라 장기변형량이 상이하기 때문에 전체 구조시스템 내에서 기둥 간의 부등축소량을 유발하게 된다. 이러한 부등축소량은 구조물의 특정 위치에 응력집중, 균열, 내구성 저하, 누수, 설계할 때 목표한 지내력의 저하, 구조물의 전체적인 뒤틀림 등을 유발하여 사용성과 안전성에 심각한 문제를 일으킬 수 있다.

CFT 기둥의 경우 부재의 효율성을 높이기 위해 강관에 가해지는 하중이 내부 콘크리트에 전달되도록 전단연결재(shear connector)나 격막(diaphragm)을 설치하는 것이 일반적이다²⁾. 이 때 내부 콘크리트의 크리프로 인해 CFT 기둥은 장기간에 걸쳐 변형이 증가하게 된다. 일반 철근콘크리트 부재에 비해 CFT 기둥은 강관에 의해 내부 콘크리트가 외부 대기에 노출되지 않아 건조수축과 건조크리프(drying creep)현상이 없기 때문에 장기변형량이 작다. 그러나 CFT 기둥의 경우 강성이 매우 크기 때문에 작은 변형에도 큰 응력이 유발될 수 있으며, 시간에 따른 장기

* Corresponding author

E-mail : sh_kwon@kaist.ac.kr

©2005 by Korea Concrete Institute

변형을 정량적으로 예측하고 해석하여 구조물에 대한 영향을 파악하는 것이 필요하다.

CFT 기둥에 관한 기존의 연구들은 대부분 강도, 변형 성능 등의 파괴거동에 치중되어왔다³⁻⁶⁾. 몇몇 장기거동에 관한 연구들⁷⁻¹⁰⁾도 실험을 통해 거동 특성만을 분석하였을 뿐 해석에 의한 정량적인 거동의 예측에 관한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 최근 원형 기둥에 대한 해석법을 개발하고 이를 검증하기 위해 실험을 수행한 연구가 있었으나¹¹⁾, 각형 기둥에 관한 해석과 실험에 관한 연구는 보고된 바 없다. 각형 기둥의 경우 원형 기둥에 비해 강관에 의한 내부 콘크리트의 구속 효과가 매우 작으며, 단면 내의 응력분포도 매우 다르다.

이 연구에서 중심축 하중을 받는 두 가지 하중 조건, 즉 내부 콘크리트에만 하중이 가해지는 경우와 강관과 콘크리트에 동시에 하중이 가해지는 경우에 각형 CFT 기둥의 장기거동 예측을 위한 3차원 유한요소모델링과 이를 검증하기 위한 실험이 수행되었다. 또한 실험과 해석결과로부터 얻은 응력과 변형률의 분포 및 시간에 따른 변화에 대한 분석을 통해 장기거동 특성을 파악해 보고자 하였다.

2. CFT 기둥의 장기거동 실험

2.1 실험계획

각형 CFT 기둥의 장기거동 실험변수는 다음과 같다.

- ① S-PC : 충전 콘크리트에 대한 기본 크리프 실험
- ② S-CFT-C : 각형 CFT 기둥에서 콘크리트만 가압한 경우의 장기거동 실험
- ③ S-CFT-E : 각형 CFT 기둥에서 강관과 콘크리트를 동시에 가압한 경우의 장기거동 실험

S-PC 실험변수는 내부 콘크리트의 크리프 특성을 파악하기 위한 실험변수로 실험결과는 유한요소해석에 사용된다.

실험체의 형상과 크기는 Fig. 1에 나타내었다. 모든 실험체의 중심부에 콘크리트의 변형률을 측정하기 위한 매립게이지를 설치하였다. 콘크리트 타설 후 습윤양생을 실시하였으며, 재령 28일에 모든 실험체에 245 kN의 지속하중을 가하였다. 모든 실험체는 동일한 형상과 재료로 2개씩 제작하여 실험하였다. 가압 모습은 Fig. 2에 나타내었다. CFT 실험체에 사용된 강관은 150×150 mm의 정방형으로 두께는 5 mm이다. S-PC 실험체의 경우 150×300 mm 원주형 실험체를 제작하였으며, 하중을 가하기 직전에 방수필름과 역청체를 사용하여 외부 공기에 노출되지 않도록 밀폐하였다. S-CFT-C 실험체의 경우 내부 콘크리트를 강관보다 5 mm 높게 타설 하였으며, 재령 28일에 표면을 연마하여 가압하였다. S-CFT-E 실험체는 내부

콘크리트와 강관 사이에 단차가 발생하지 않도록 일체로 연마하여 하중을 가하였다. 각형 CFT 실험체의 표면에 부착한 강재에 붙인 게이지의 위치와 명칭은 Fig. 3과 같다. 같은 위치에서 수직 방향과 수평 방향의 변형률을 동시에 측정할 수 있는 rosette 게이지를 사용하였으며, 대칭인 반대쪽 면의 같은 위치에도 게이지를 부착하여 측정값의 평균을 결과분석에 사용하였다.

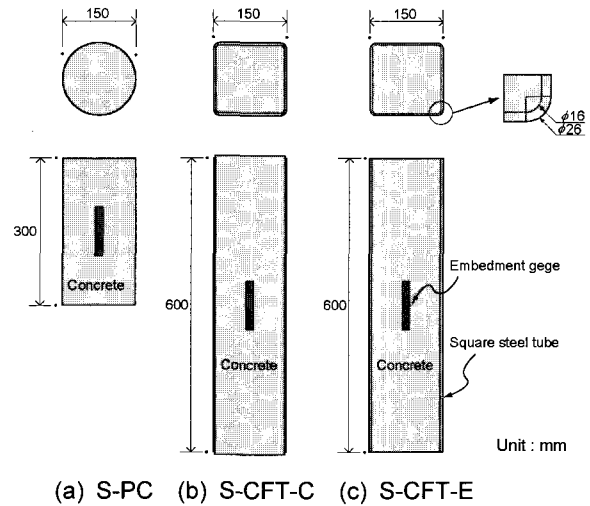


Fig. 1 Specimen geometries

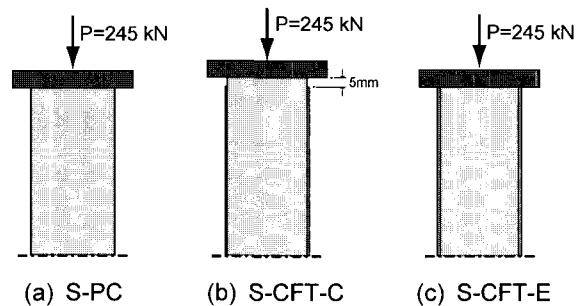


Fig. 2 Loading applications

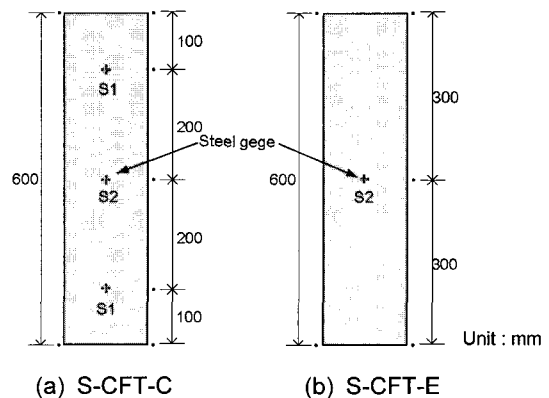


Fig. 3 Steel gage locations of steel tube

2.2 재료

Table 1은 실험에 사용된 콘크리트의 배합설계표이다. 목표 압축강도는 50 MPa이고, 유동성과 충전성을 고려하여 배합을 선정하였다.

강관과 콘크리트의 역학적 특성을 파악하기 위해 탄성계수와 강도실험을 실시하였다. 콘크리트의 경우 재령 28일의 탄성계수는 27.1 GPa이고 극한강도는 47.7 MPa이며, 강관의 경우 탄성계수와 항복강도는 각각 196 GPa와 284 MPa 이다. 강관에 대한 실험에서 푸아송비 또한 측정하였으며 0.30으로 나타났다. 콘크리트 푸아송비는 일반적으로 0.15~0.20의 범위에 놓이며¹²⁾, 콘크리트의 배합, 강도, 탄성계수에 따른 푸아송비의 변화를 총괄적으로 다루고 있는 M. Anson과 K. Newman의 논문¹³⁾에 따라 본 실험에 사용된 콘크리트의 경우 푸아송비는 0.18로 가정하였다. Table 2는 콘크리트와 강관의 역학적 특성을 정리한 것이다.

2.3 실험결과

CFT 기둥의 장기지속하중에 대한 거동을 정확히 분석 및 해석하기 위해 내부 충전 콘크리트에 대한 크리프 특성을 우선 파악해야 한다. S-PC에 대한 기본 크리프 실험에서 측정된 변형률로부터 크리프 계수가 계산되었다. 크리프 계수는 초기탄성변형에 대한 크리프 변형의 비이며, CEB-FIP 1990 모델¹⁴⁾과 형태가 같은 다음 식으로 회귀분석을 수행하였다.

$$\phi(t, t') = \phi_u \left[\frac{(t-t')}{\alpha + (t-t')} \right]^\beta \quad (1)$$

여기서, t' 은 하중 재하시점에서의 재령을 의미하고, t 는 임의의 시간을 의미하며 단위는 일(day)이다. 개념 크리프 계수 ϕ_u 는 시간이 무한히 흘렀을 때 크리프 계수이다. 회귀분석을 통해 얻은 상수 α , β 와 ϕ_u 는 각각 408, 0.30,

Table 1 Mix proportion

W/B (%)	Unit weight(kgf/m ³)					
	Water	Binder		Fine agg.	Coarse agg.	Super-plasticizer
		Cement	Fly ash			
32	172	480	60	780	1000	7.2

Table 2 Mechanical properties

Material	Elastic modulus (GPa)	Strength (MPa)	Poisson's ratio
Concrete	27.1	47.7(at 28days)	0.18
Steel	196	284(at yielding)	0.30

0.86 이었다. Fig. 4는 실험으로부터 구한 크리프 계수와 회귀분석결과이다. 이 회귀분석결과는 각형 CFT 기둥에 대한 유한요소해석에 사용된다.

Fig. 5는 지속하중을 받는 각형 CFT 기둥 실험체에서 측정된 변형률이다. 압축 변형률은 음(-)의 부호로 인장 변형률은 양(+의 부호로 나타내었다. 강관의 변형률 측정 위치는 Fig. 3에 나타난 바와 같다. Fig. 5(a)는 S-CFT-C 실험체의 결과로 내부 콘크리트의 중심부에서 측정된 변형률과 강관의 중심부와 단부에서 100 mm 떨어진 위치에서 측정된 수직방향 변형률은 매우 큰 차이를 나타냈으며, 이는 강관과 콘크리트 사이에 미끄럼(slip)이 발생했음을 의미한다. 강관의 두 위치에서 측정된 수직 변형률도 차이를 나타냈으며, 중심부의 변형률이 단부에서 100 mm 떨어진 위치에서 측정된 변형률보다 크게 나타났다. 이는 콘크리트에만 하중이 가해질 경우 강관에 의해 내부 콘크리트가 구속되고 강관과 콘크리트 사이에 부착응력이 발생하면서 중심부에 가까울수록 강관에 작용하는 수직응력이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 강관의 두 위치에서 측정된 횡방향 변형률은 서로 큰 차이를 나타내지 않았다. 중심부로 갈수록 증가하는 수직 변형의 푸아송 효과로 인해 횡방향 구속압은 중심부에 가까울수록 감소하게 된다. 단부에서 100 mm 떨어진 위치의 경우 횡방향 구속압은 중심에서보다 크고 수직응력은 중심보다 작으며, 수직응력은 반대로 중심부에서 크게 나타나게 된다. 이러한 수직응력과 횡방향 응력의 관계에 의해 두 위치에서 측정된 횡방향 변형률 사이의 차이가 크지 않은 것으로 판단된다. 그러나 각 방향의 변형률과 응력의 정량적 분석을 위해 구속 효과와 부착응력의 작용, 미끄럼 등을 고려한 해석이 요구된다.

Fig. 5(b)는 강관과 콘크리트에 동시에 하중을 가한 실험체의 결과이다. 중심부에서 측정한 콘크리트 변형률과 강관의 변형률은 시간에 따라 거의 일정한 크기로 나타나고 있다. 따라서 강관과 콘크리트에 동시에 하중이 가해질

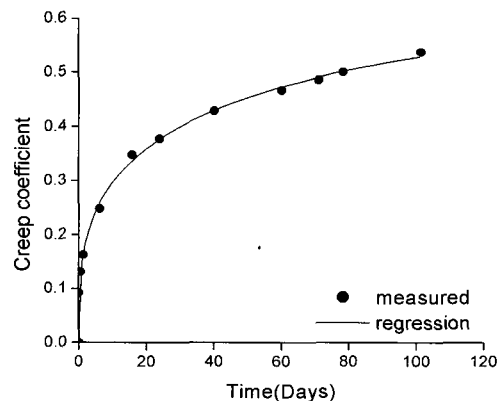


Fig. 4 Creep coefficient plotted based on the test of specimen S-PC

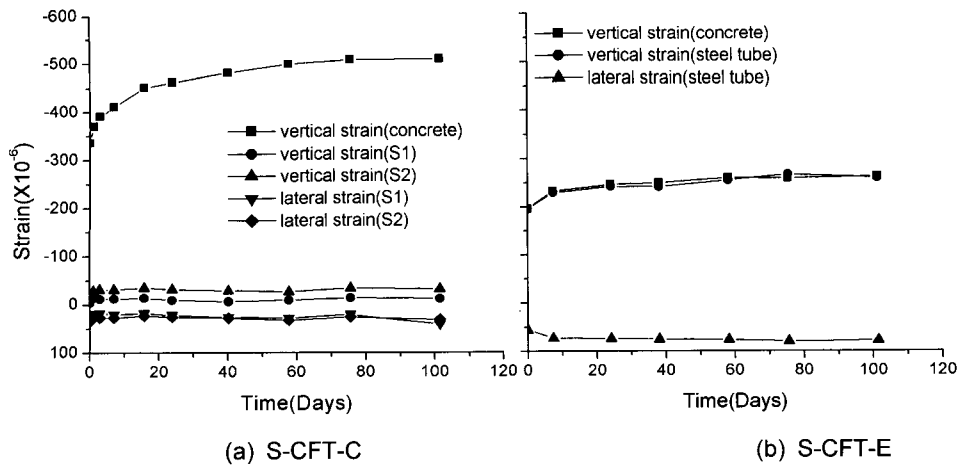


Fig. 5 Test results for square CFT column specimens

경우 콘크리트와 강관 사이에 구속 효과나 부착응력은 작용하지 않으며, 따라서 중심부에서 콘크리트와 강관의 변형률이 거의 같은 크기로 나타난 것으로 판단된다.

3가지 실험체의 크리프에 의한 변형을 비교해 보기 위해 단위응력당 발생하는 크리프 변형을 나타내는 비크리프(specific creep)를 구하였다. 실험체 중심에서 측정된 콘크리트 변형률을 가해진 응력으로 나누어 계산하였으며, S-CFT-E의 경우 강관의 면적은 같은 탄성계수를 갖는 콘크리트 면적으로 환산하여 고려하였다. Fig. 6은 실험을 기초로 계산된 비크리프 결과이다.

지속하중을 가한 후 101일에서 S-CFT-C 실험체의 변형은 S-PC 실험체의 81% 정도이며, S-CFT-E 실험체의 경우는 37%로 나타났다. S-CFT-C 실험체는 강관에 의한 구속과 부착응력의 작용으로 S-PC 실험에 비해 작은 변형을 보였으며, S-CFT-E 실험체의 변형이 가장 작은 것은 강관에 하중이 직접 전달되고 콘크리트와 강관의 수직 변형이 시간에 따라 같은 크기를 유지하면서 크리프가 발생하지 않는 강관이 부담하는 하중의 크기가 다른 실험

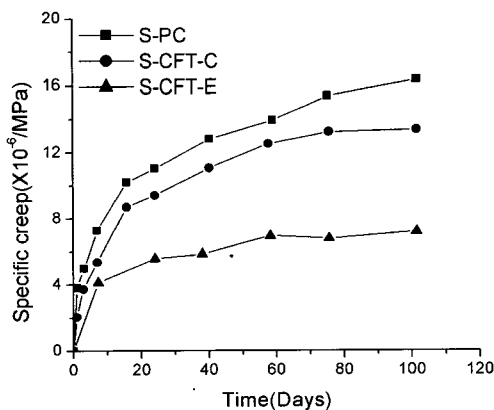


Fig. 6 Specific creep calculated based on the experimental results

체에 비해 현저히 크기 때문이다. CFT 기둥의 시간에 따른 축소량은 단면의 형상, 강재의 비, 내부 콘크리트의 특성, 가해지는 하중의 크기에 따라 다르게 나타나며, 축소량의 정량적 예측을 위해 부착면 거동, 형상에 따른 구속압의 효과 등을 고려한 해석이 요구된다.

3. 유한요소해석

3.1 개요

원형 CFT 기둥의 장기변형을 예측하기 위한 해석법은 기존의 연구에서 개발되었으며, 실험을 통해 검증이 이루어 졌다¹¹⁾. 그러나 각형 기둥의 경우 원형 기둥과는 매우 다른 변형형상과 응력 및 변형률 분포를 나타내며, 기존의 원형에 대한 해석법을 적용할 수 없다. 따라서 3차원 유한요소모델링을 통해 각형 CFT 기둥의 장기변형을 예측할 수 있는 방안을 모색하고자 한다. 또한 CFT 기둥의 실험에서 각 위치에서 측정된 변형률만으로는 각 방향의 변형률과 응력의 분포 및 시간에 따른 변화에 대한 정량적인 분석이 어려우며, CFT 기둥에 대한 유한요소해석을 통해 각형 CFT 기둥의 장기거동 특성을 명확히 파악해 보고자 한다. 유한요소 모델링에서 강관과 콘크리트의 계면거동은 Coulomb friction을 모사할 수 있는 interface 요소로 모델링 하였으며, 강관에 의한 콘크리트의 구속 효과를 고려하였다. 실험결과와 해석결과의 비교를 통해 유한요소 모델의 정확성을 검증하였다. 유한요소해석은 상용해석프로그램인 DIANA Ver. 8.1을 사용하였다.

3.2 내부콘크리트와 강관의 모델링

각형 CFT 기둥의 경우 대칭성을 고려하여 단면의 1/4와 길이방향으로 1/2을 모델링 하였다. Fig. 7은 해석에

사용된 각형 CFT 기둥의 유한요소 메시를 나타낸 것이다. Fig. 7(a)에서 모서리부분의 콘크리트와 강관은 1×2의 가우스 적분점을 갖는 6절점 연속체(solid)요소를, 나머지 부분은 2×2×2 가우스 적분점을 갖는 8절점 연속체요소를 사용하였다. 해석에 사용된 내부콘크리트와 강관의 탄성계수와 푸아송비는 Table 2와 같다. 내부 콘크리트의 크리프는 Fig. 4의 회귀분석결과를 사용하여 모사하였다.

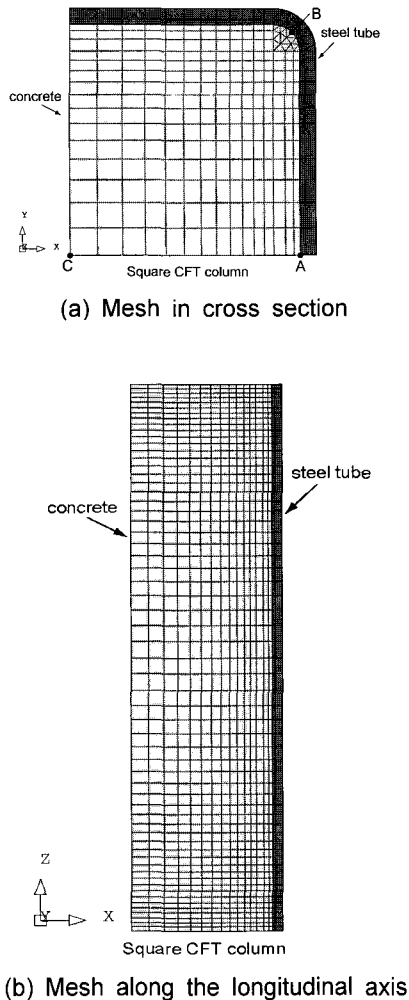


Fig. 7 Finite element mesh

내부콘크리트를 모델링 하기 위한 요소의 수는 14040개였으며, 강관의 요소 수는 4560개였다. 내부 콘크리트의 크리프와 계면거동의 비선형 해석에 Newton-Raphson 방법을 사용하였다.

3.3 강관과 콘크리트 사이의 부착거동 모델링

내부콘크리트와 강관 그리고 가압판과 CFT 기둥 실험체의 계면거동을 모사하기 위해 Coulomb friction 모델이 사용되었다. 이 모델에서 계면의 수직응력과 전단응력의 관계는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\tau_{crit} = a + \mu p \quad (2)$$

여기서, τ_{crit} 은 부착강도를 의미하며, 계면에서 전단응력이 부착강도에 도달하면 미끄럼(slip)이 발생하게 된다. a 는 콘크리트와 강관사이의 점착력을 의미하며, μ 와 p 는 각각 마찰계수와 계면에 수직으로 작용하는 수직응력 즉 구속압을 의미한다. 부착강도는 구속압이 증가할수록 증가하게 되며, 인장응력이 작용할 경우에는 계면이 분리되도록 모델링 하였다. 기존의 연구에 따르면 강관과 콘크리트 사이의 마찰계수는 표면의 매끄러운 정도에 따라 크게 영향을 받으며, 0.2~0.6사이의 범위를 갖는 것으로 보고되었다¹⁵⁻¹⁷⁾. 각형 CFT 기둥 실험체에 대한 해석에서 마찰계수 μ 는 0.2를 사용하였으며, 점착력은 고려하지 않았다⁶⁾.

4. 결과 및 분석

4.1 유한요소 모델의 검증

각형 CFT 기둥 실험체에 대한 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 유한요소 모델이 실제 거동을 정확히 모사할 수 있는지를 검증해 보기 위해 실험결과와 비교해 보았다. Fig. 8은 각형 CFT 기둥 실험체에 대한 실험결과와 유한요소 해석결과를 비교한 것이다.

Fig. 8(a)에서 콘크리트와 강관의 수직변형률에 대한 해석결과도 실험결과와 마찬가지로 큰 차이를 나타냈으며, 강관의 두 위치에 대한 수직변형률도 중심부로 갈수록 증가하는 실제의 거동을 정확히 반영하고 있다. Fig. 8(b)에서 강관의 두 위치에 대한 횡방향 변형률의 측정값과 해석결과는 시간에 따라 거의 같은 값을 나타내었다. Fig. 8(c)와 (d)에서 강관과 콘크리트의 중심부에서 측정된 변형률과 해석결과는 모두 시간에 따라 같은 크기를 갖는 것으로 나타났다.

강관과 콘크리트 사이의 미끄럼과 구속 효과를 고려한 3차원 유한요소해석은 실제의 거동을 정확히 모사하고 있으며, 유한요소 모델링의 정확성이 검증되었다. 따라서 이

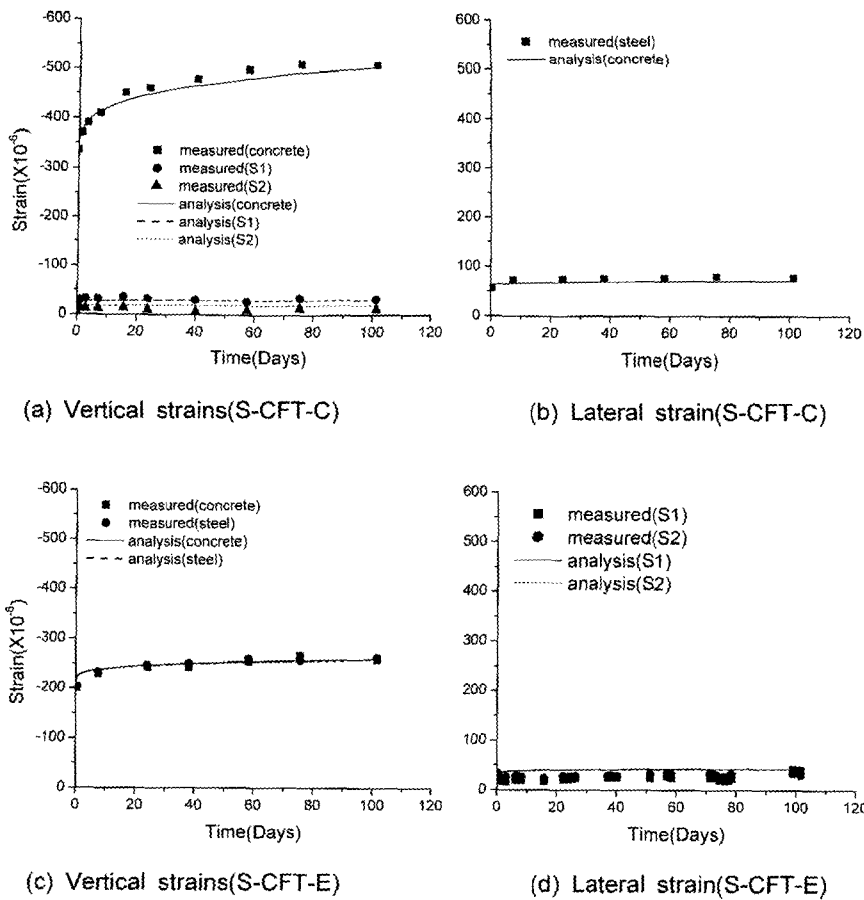


Fig. 8 Comparison of test results with F.E. analysis results for square CFT column specimens

러한 유한요소 모델링을 통해 콘크리트 재료 특성의 변화, 강재량의 변화, 마찰계수의 변화 등을 고려한 장기거동 예측이 가능할 것으로 판단된다. 그러나 이 연구에서 각형 CFT 기둥의 장기거동 특성을 파악하기 위해 해석결과로부터 실험체의 구속압, 강관과 콘크리트 사이의 미끄럼과 부착응력, 강관과 콘크리트 사이의 응력 재분배에 대해 분석하고자 하며, 장기거동에 영향을 미치는 인자들에 대한 parameter study는 추후 이루어질 예정이다.

4.2 콘크리트의 구속 효과

CFT 기둥 실험체에서 콘크리트에 대한 구속 효과는 두 가지 원인에 의해 나타나게 된다. 첫째는 축방향 하중에 의해 유발된 수직 변형의 푸아송 효과로 발생하는 횡방향 변형이 강관에 의해 구속되는 것이며, 둘째는 가압판과 접촉하는 실험체의 가압면이 가압판에 의해 구속되는 것이다.

구속압의 발현과 단면 내 구속압의 분포는 기둥의 변형 형상에 따라 다르며, 이를 파악해 보기 위해 가압 시점의 유한요소 해석결과로부터 얻은 CFT 기둥 실험체의 변형 형상을 Fig. 9에 나타내었다. Figs. 9(a), (b)는 CFT 기둥 실험체의 단부, 1/4 위치, 중심에서 횡 방향 단면의 변형

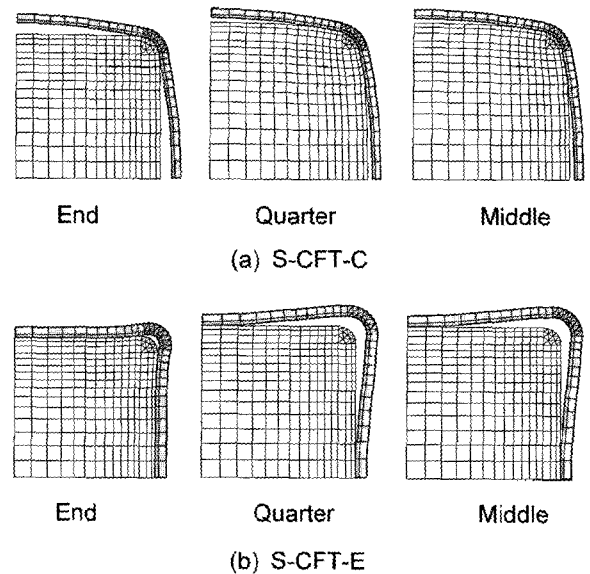


Fig. 9 Deformed shape of square CFT column specimens

형상을 3,000배 확대한 것이다. 실험체에서 콘크리트에만 하중이 가해진 경우(Fig. 9(a)) 모서리 부분에서 콘크리트가 강관에 의해 구속되며, Fig. 7(a)의 A위치에서 강관과

콘크리트가 서로 분리되는 것을 알 수 있다. 이는 모서리 부분에 구속압이 집중되고 내부 콘크리트가 강관에 비해 강성이 약하기 때문에 모서리 부분에서 콘크리트의 변형 형상에 따라 강관의 변형의 나타나기 때문으로 판단된다. 반면, 각형 실험체에서 콘크리트와 강관이 동시에 가압된 경우(Fig. 9(b)) Fig. 7(a)의 A 위치에서 강관과 콘크리트는 서로 맞닿아 있으며 B 위치에서 분리되는 것을 알 수 있다. 강관의 푸아송비가 내부 콘크리트의 푸아송비보다 크며, 따라서 횡방향 변형의 크기도 강관이 크게 나타나게 된다. 또한 가압판에 의해 Fig. 7(a)의 A 위치에서 강관의 변형이 구속되어 B 위치에서 콘크리트와 강관이 분리되는 것으로 생각된다. Fig. 9(b)의 경우 Fig. 9(a)와는 달리 내부 콘크리트의 길이방향에 따른 변형형상은 원래의 모양을 유지하고 있는 것으로 보이며, 이는 콘크리트와 강관이 동시에 가해진 경우 구속 효과가 없다는 것을 의미한다. Figs. 9(a), (b)에서 단부 변형의 크기가 1/4위치와 중심에서 변형의 크기에 비해 작았으며, 이는 가압판에 의한 구속 효과 때문으로 판단된다.

구속압의 분포를 파악해 보기 위해 Fig. 7(a)의 C 위치에서 x 방향의 응력(σ_{xx}) 대한 유한요소 해석결과를 z 축을 따라 실험체의 중심에서 단부까지 Fig. 10에 나타내었다. 두 가지 실험체에서 모두 단부의 구속압이 매우 크게 나타났으며, 이는 가압판의 구속 효과에 의한 것으로 사료된다. 가압판에 의한 구속 효과는 실험체 단부에서 75mm 정도까지 영향을 미치는 것으로 나타났다. 강관에 의한 구속 효과로 인해 콘크리트에만 하중이 가해지는 S-CFT-C의 구속압이 S-CFT-E보다 크게 나타났으며, 길이 방향으로 비선형적 분포를 보였다. 콘크리트에만 하중이 가해진 경우(S-CFT-C)는 시간에 따라 구속압이 증가하는 반면, 콘크리트와 강관에 동시에 하중이 가해진 경우(S-CFT-E)는 감소하는 경향을 나타냈다. 콘크리트에만 하중이 가해지는 경우 크리프의 푸아송 효과에 의해 증가

하는 횡방향 변형이 강관에 의해 구속되어 구속압이 증가하며, 강관과 콘크리트에 동시에 하중이 가해지는 경우 가압판에 의한 구속압이 콘크리트 크리프의 영향으로 이완(relaxation)되기 때문인 것으로 판단된다. S-CFT-E 실험체의 경우 약간의 인장응력이 발생하고 시간에 따라 다소의 증가 경향을 나타낸다. 이는 강관의 푸아송비가 콘크리트보다 크고 Fig. 9(b)에서 나타난 것과 같이 Fig. 7(a)의 A 위치에서 강관과 콘크리트가 맞닿아 있어 콘크리트보다 횡방향 변형이 큰 강관이 내부 콘크리트의 횡방향 변형을 증가시키기 때문으로 판단된다.

4.3 강관과 내부 콘크리트 사이의 미끄럼(slip)

Fig. 8에서 콘크리트에만 하중이 가해진 경우 강관과 콘크리트의 수직 변형률은 큰 차이를 나타내었으며, 이는 미끄럼(slip)이 발생한 것을 의미한다. 미끄럼은 강관과 콘크리트 사이의 변형률 차이를 길이 방향으로 적분하여 계산할 수 있으며 다음의 식과 같이 표현된다.

$$S(z) = \int_0^z \epsilon_c dt - \int_0^z \epsilon_s dt \quad (3)$$

여기서, S 는 미끄럼, ϵ_c 와 ϵ_s 는 각각 콘크리트와 강관의 수직변형률, z 는 길이방향 임의의 위치를 의미한다. Fig. 11은 실험체 각각에 대해 Fig. 7(a)의 A 위치에서 중심부에서 단부까지 강관과 콘크리트 사이의 미끄럼 분포를 나타낸 것이다. 콘크리트에만 하중이 가해진 경우 초기 가압시점부터 미끄럼이 발생하여 시간에 따라 증가하였으며, 콘크리트와 강관에 동시에 하중이 가해지는 경우 가압판에 의한 구속으로 단부에서 매우 미미한 미끄럼이 발생하나 중심부로 가면서 미끄럼은 발생하지 않는 것으로 나타났다.

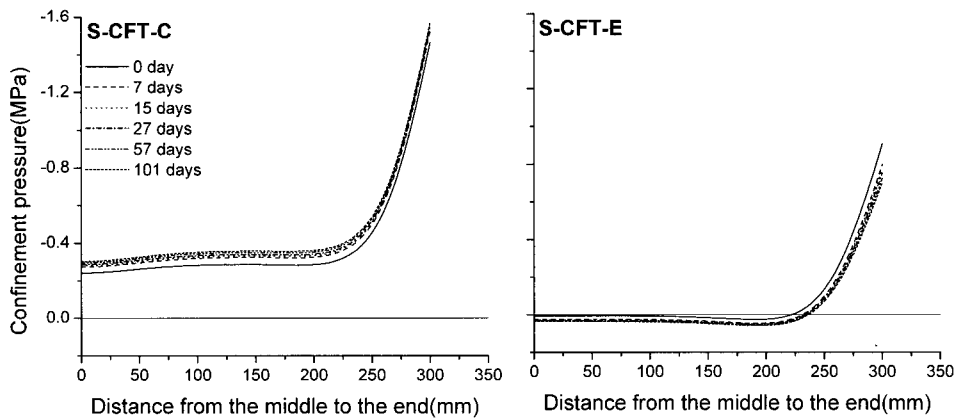


Fig. 10 Confinement pressure at the center of the specimens

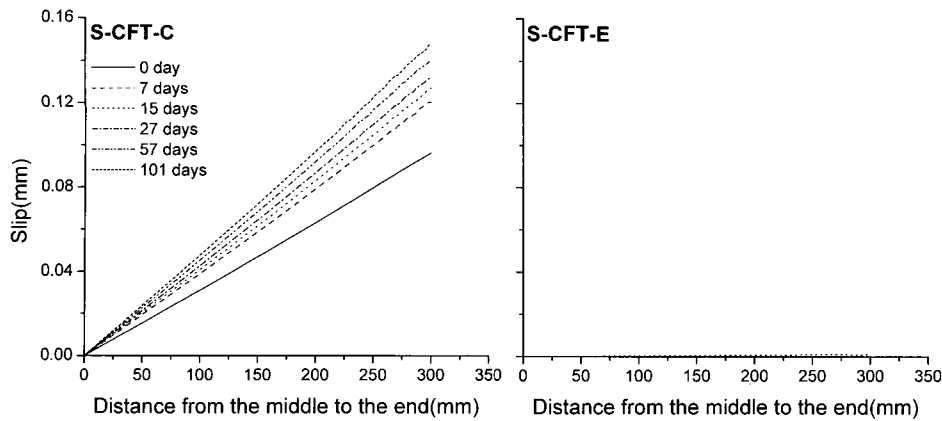


Fig. 11 Slip between inner concrete and steel tube

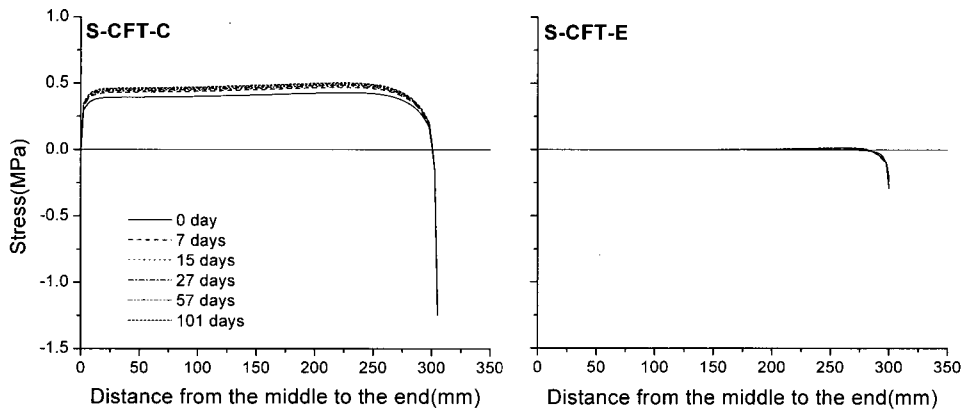


Fig. 12 Shear stress at the interface between inner concrete and steel tube

4.4 강관과 콘크리트 사이의 부착응력

유한요소 해석에서 강관과 콘크리트 사이의 부착 거동은 식(2)로 표현되는 Coulomb friction으로 모델링 하였으며, 부착응력의 분포를 파악해 보기 위해 Fig. 7(a)의 B위치에서 내부 콘크리트의 z방향 전단응력(σ_{zz})의 분포를 z축을 따라 중심부부터 단부까지 Fig. 12에 나타내었다. S-CFT-E 실험체의 경우 가압판의 구속에 의해 단부에서 음의 방향으로 전단응력이 나타났으며, 그 외의 구간에서 전단응력은 발생하지 않았다. S-CFT-C의 경우 단부에서 가압판에 의한 구속압이 콘크리트와 강관을 동시에 가압한 경우에 비해 매우 크게 나타났으며, 이는 콘크리트에 가해지는 응력이 S-CFT-E의 경우보다 크기 때문이다.

또한 중심부부터 단부까지 양의 방향 전단응력은 강관에 의한 구속과 미끄러움이 동시에 발생하면서 유발된다. 부착응력은 식(2)에서 구속압에 비례하며, Fig. 10에서 나타난 바와 같이 S-CFT-C의 경우 구속압은 중심에서 단부까지 비교적 일정한 분포를 나타낸다. 따라서 부착응력 또한 비슷한 경향으로 나타나고 있는 것으로 판단된다.

4.5 강관과 콘크리트의 응력 재분배

강재와 콘크리트의 합성부재는 콘크리트의 크리프 특성으로 인해 시간에 따라 응력이 재분배 된다. CFT 기둥 실험체에서 내부 콘크리트와 강관의 응력분포와 시간에 따른 변화를 파악해 보기 위해 내부 콘크리트의 경우 Fig. 7(a)의 C위치에서, 강관의 경우 A위치에서 수직응력(σ_{zz})의 길이방향 분포를 Figs. 13, 14에 각각 나타내었다.

Fig. 13에서 S-CFT-C의 실험체의 경우 수직응력은 길이방향의 중심부로부터 단부로 가면서 증가하다 단부에서 다시 감소하는 분포를 보이고 있다. 이러한 수직응력의 변화는 강관의 구속에 의해 발생한 부착응력과 단부의 구속 효과에 의한 것을 볼 수 있다. 부착응력은 단부에서 중심부까지 콘크리트에 가해지는 수직응력을 감소시키며, 반대로 강관의 수직응력은 증가시킨다¹¹⁾. 단부에서 가압판에 의한 구속압은 단면의 중심에서보다 외측에서 크게 나타나고 구속압의 푸아송 효과에 의해 수직응력 또한 단면의 외측보다 중심부가 작다. S-CFT-E 실험체의 경우 강관의 구속 효과가 없으므로 중심부에서 단부방향으로 일정한 분포를 유지

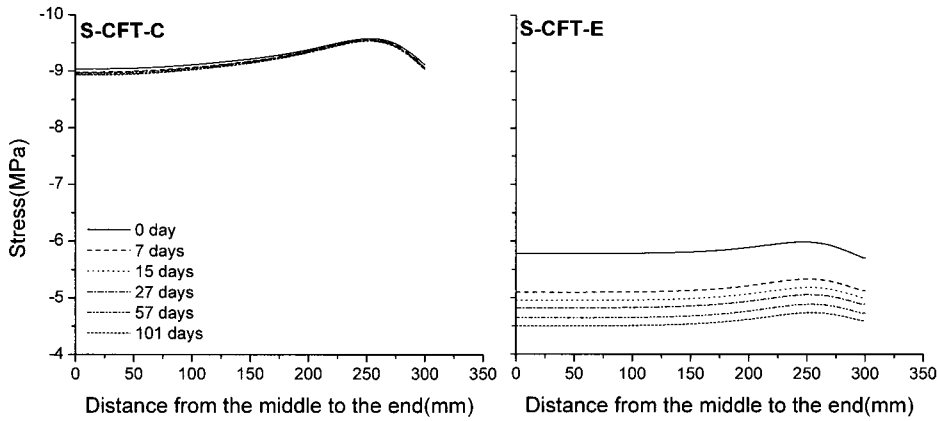


Fig. 13 Vertical stress at the center of the inner concrete

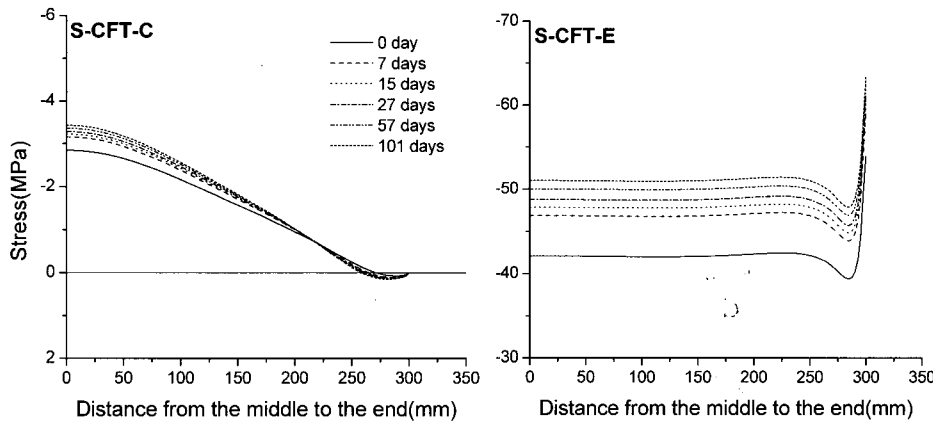


Fig. 14 Vertical stress of steel tube

하다가 단부에서 가압판의 구속 효과로 인해 감소하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 10에서 S-CFT-C의 구속압은 시간에 따라 증가하며, 따라서 Fig. 12에서 부착응력 또한 증가하게 된다. 부착응력의 증가는 내부 콘크리트의 수직응력 감소를 유발하게 된다. 또한 가압판에 의한 구속 효과는 크리프로 인해 시간에 따라 감소하며, 단부에서 수직응력 분포는 가압시점보다 일정한 분포를 갖게 된다. 따라서 단면의 중심에서 수직응력은 다소 증가하게 된다.

Fig. 14에서 강관의 수직응력은 시간에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 콘크리트만 가압하는 경우 중심부에서 단부까지 감소하며, 강관과 콘크리트를 동시에 가압하는 경우는 가압판에 의한 구속 효과가 영향을 미치는 구간을 제외하고는 일정한 응력 분포를 나타내고 있다.

5. 결 론

중심축 하중을 받는 각형 CFT 기둥에 대한 장기 거동 실험과 3차원 유한요소해석을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 강관과 콘크리트 사이의 부착 거동을 고려한 3차원 유한요소 해석은 실제의 거동을 정확히 모사하고 있으며, 이러한 유한요소 모델링으로부터 실제 CFT 기둥의 장기거동을 정확히 예측할 수 있는 것으로 나타났다.
- 2) 가압방법에 따라 변형 형상은 매우 다르게 나타났으며, 이로 인해 각 방향의 응력 및 변형률 분포도 매우 다르게 나타났다.
- 3) 콘크리트에만 하중이 가해지는 경우 모서리 부분은 강관에 의해 구속되며, 구속압으로 인해 유발되는 부착응력은 시간에 따라 증가하게 된다. 강관과 콘크리트 변형률 분포의 차이로 인해 미끄럼이 발생하며 시간에 따라 증가하게 된다. 부착응력으로 인해 내부 콘크리트의 수직응력은 단부에서 중심으로 갈수록 감소하며, 강관의 응력은 증가하게 된다. 시간에 따라 내부 콘크리트의 응력은 감소하고 강관의 응력은 증가한다. 또한 강관에 의한 구속 효과는 시간에 따라 증가하는 반면, 가압판에 의한 구속 효과는 시간에 따라 감소한다.
- 4) 강관과 콘크리트가 동시에 가압되는 경우 강관에 의한 구속 효과는 나타나지 않으며, 미끄럼 또한 발생하지 않는다.

5) 3차원 유한요소 해석과 검증 실험을 통해 콘크리트 재료 특성의 변화, 강재량의 변화, 강관과 콘크리트 사이의 마찰계수의 변화가 장기 거동에 미치는 영향을 파악하는 추후 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 건교부와 한국과학기술평가원(KISTEP)의 국가지정 연구실 사업(National Research Lab)의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

1. 한국강구조학회, "특집기사-CFT 과거·현재·미래," 강구조학회지, 14권 2호, 2002, pp.10~56.
2. Roeder, C. W., Cameron, B., and Brown, C. B., "Composite Action in Concrete Filled Tubes," *Journal of Structural Engineering*, Vol.125, No.5, 1999, pp.477~484.
3. Shams, M. and Saadeghvaziri, M. A., "State of the art of Concrete-filled Steel Tubular Columns," *ACI Structural Journal*, Title no.94-S51, 1997, pp.558~571.
4. Gourley, B., Tort, C., Hajjar, J. F., and Schiller, P. H., "A Synopsis of Studies of the Monotonic and Cyclic Behaviour of Concrete-Filled Steel Tube Beam-Columns," *Structural Engineering Report No. St-01-04, Version 3.0*, Department of Civil Engineering, Institute of Technology, University of Minnesota, Dec. 2001.
5. O'shea, M. D. and Bridge, R. Q., "The Effects of Local Buckling and Confinement in Concrete-Filled Circular Steel Tubes," *Mechanics of Structures and Materials*, Balkema, Rotterdam, 1999, pp.321~525.
6. Johansson, M. and Gulltoft, K., "Structural Behavior of Slender Circular Steel-Concrete Composite Columns under Various Means of Load Application," *Steel and Composite Structures*, Vol.1, No.4, 2001, pp.393~410.
7. Terry, P. J., Bradford, M. A., and Gilbert R. I., "Creep and Shrinkage in Concrete-Filled Tubes," *Tubular Structures VI. Proc. 6th Int. Symp. On Tubular Structures*, Balkema, Rotterdam, 1994, pp.293~298.
8. Morino, S., Kswaguchi, J., and Cao. Z. S., "Creep Behaviour of Concrete-Filled Steel Tubular Members," *Composite Construction in Steel and Concrete III, Proc. Engineering Foundation Conf.*, Irsee, Germany, 1996, pp.514~525.
9. Nakai, H., "An Experimental Study on Creep of Concrete-Filled Steel Tubes," *Proc. 3rd Int. Conf. on Steel-Concrete Composite Structures*, 1991, pp.55~60.
10. Bradford, M., "Service-load deformations of concrete-filled RHS columns," *Eighth Int. Symposium on Tubular Structures*, Balkema, Singapore, 1998, pp.425~423.
11. 권승희, 김진근, "중심축 하중을 받는 CFT 기둥의 장기거동에 관한 연구," 콘크리트학회논문집, 13권 1호, 2001, pp.77~85.
12. Neville, A. M., "Properties of Concrete: Elasticity, Shrinkage, Creep," Longman, 1995, pp.412~481.
13. Anson, M. and Newman, K., "The Effect of Mix Proportions and Method of Testing on Poisson's Ratio for Mortars and Concretes," *Magazine of Concrete Research*, Vol.18, No.56, 1966, pp.115~130.
14. CEB-FIP, "Model Code for Concrete Structures," Thomas Telford, 1990, pp.53~58.
15. Baltay, P. and Gjelsvik, A., "Coefficient of friction for steel on concrete at high normal stress," *Journal of Materials in Civil Eng.*, Vol.2, No.2, 1990, pp.46~49.
16. Boverket, "Boverket's Hand Book for Concrete Structures," BBK 94, Vol.1, 1994(in Swedish).
17. 권승희, 김진근, "CFT 기둥의 부착응력에 관한 연구," 콘크리트학회논문집, 13권 2호, 2001, pp.93~98.

요 약

이 연구에서 중심축 하중을 받는 각형 CFT 기둥의 장기거동에 관한 실험과 해석을 수행하였으며, 이를 통해 각형 CFT 기둥의 장기거동을 예측할 수 있는 방법을 모색하고 그 거동 특성을 파악해 보고자 하였다. 중심축 하중에 대해 두 가지 가압 방법이 고려되었다. 첫째는 콘크리트에만 하중이 가해지는 경우이고, 둘째는 콘크리트와 강관에 동시에 하중이 가해지는 경우이다. 각형 CFT 기둥 실험체에 대한 삼차원 유한요소 모델로 해석을 수행하였으며, 해석결과는 실험결과를 매우 정확히 모사하였다. 따라서 강관과 콘크리트의 부착거동을 고려한 3차원 유한요소 모델링으로부터 실제 각형 CFT 기둥에 대한 장기거동 예측이 가능할 것으로 판단된다. 또한 실험과 해석결과로부터 다음의 거동 특성을 파악하였다. 콘크리트에만 하중이 가해지는 경우 구속압에 의해 유발되는 부착응력은 시간에 따라 증가하며, 강관과 콘크리트 사이의 미끄럼 또한 시간에 따라 증가한다. 강관에 의한 구속압은 시간에 따라 증가하는 반면, 가압판에 의한 구속압은 시간에 따라 감소한다. 강관과 콘크리트에 동시에 하중이 가해지는 경우 강관에 의한 콘크리트의 구속 효과와 미끄럼은 발생하지 않는다.

핵심용어 : CFT 기둥, 장기거동, 실험, 해석