

## 중심축 하중을 받는 CFT 기둥의 장기거동에 관한 연구

권승희<sup>1)</sup> · 김진근<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국과학기술원 토목공학과

(2000년 12월 4일 원고접수, 2001년 1월 13일 심사완료)

### Long-Term Behavior of CFT Column under Central Axial Load

Seung-Hee KWON<sup>1)</sup>, Jin-Keun KIM<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup> Civil Engineering Department, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, 305-701, Korea

(Received on December 4, 2000, Revised on January 13, 2001)

#### ABSTRACT

Concrete filled steel tubular (CFT) columns are becoming popular in structural applications. The increased popularity comes from their excellent structural properties such as high strength, high ductility, and large energy absorption capacity. However, the disadvantage feature of CFT column is the difficulty in predicting its time dependant characteristic (i.e., creep and shrinkage) of inner concrete. The time dependent behavior of CFT column can cause serious serviceability problems. Therefore, it is necessary to investigate the long term behavior of CFT column.

This paper presents analytical and experimental studies on long-term behavior of CFT-column under a central axial loading. Two loading cases are considered in the research: (1) the load applied only at the inner core concrete of CFT-column and (2) the load applied simultaneously on both concrete and steel tube. Analysis method using the bond strength model is proposed and conclusions on long-term properties of CFT-column can be derived from the results.

**Keywords :** bond stress, triaxial compression, creep, long-term behavior

## 1. 서 론

강관 속을 콘크리트로 채운 CFT 기둥(Concrete Filled Steel Tubular Column)은 대도시의 인구집중, 토지이용의 한계 등의 문제로 인하여 고층건물의 수요가 증가하면서 그 사용 또한 증가하고 있는 추세이다. CFT 기둥은 강관의 구속효과에 의하여 채움 콘크리트의 압축내력이 증가하고 내부의 콘크리트로 인한 강관의 국소 좌굴이 방지되는 우수한 변형성능을 발휘한다. 그러나 이러한 특성을 갖는 CFT 기둥으로 건설된 고층건물에서도 내부 콘크리트의 크리프와 수축과 같은 시간의존적 장기 변형으로 인해 기둥들의 상호 상이한 축변형이 발생하게 되고, 사용성에 문제를 유발하거나 구조물에 과도한 응력을 유발하여 심각한 손상을 줄 수 있다. 따라서 CFT 기둥의 장기거동 특성을 파악하는 연구가 필요하다.

본 논문에서는 중심축 하중이 가해지는 상황에서 CFT 기둥의 단기거동에 대한 해석방법과 이를 바탕으로 장기거동에 대한 해석방법을 개발하였다. 또한 장기거동 실험을 실시하여 해석결과와 비교 분석하였으며, 이를 통해 개발된 해석법을 검증하고 CFT 기둥의 장기거동특성을 파악해 보고자 하였다.

## 2. CFT 기둥의 단기거동 해석법 개발

### 2.1 개요

설계시 고려하는 안전율로 인해 부재에 가해지는 사용하중은 실제로 강도의 30~40% 이내에 있어 부재는 탄성거동을 하기 때문에 강관과 콘크리트 모두 재하 시점에서 탄성범위를 벗어나지 않는 하중에 대해서만 고려하고자 한다. 하중이 가해지는 경우는 두 가지로 고려하였으며, 첫째 CFT 기둥에서 콘크리트에만 하중이 가해지는 경우와, 둘째 강관과 콘크리트 모두에 하중이 가해지는 경우로 일반적인 하중 상태를 고려하기 위해 이와 같이 정하였다.

\* Corresponding author

Tel : 042-869-3614 Fax : 042-869-3610

E-mail : kimjinkleun@kaist.ac.kr

해석은 원형단면의 CFT 기둥에 대해서 수행되며, 해석 시 다음과 같은 기본 가정들이 고려되었다.

- 재하시점에서 콘크리트는 탄성 거동을 한다.
- 콘크리트와 강관은 수직방향의 변형에 대해 각각 평면을 유지한다.
- 강관의 길이방향으로 동일한 부착강도 모델식을 사용한다.

## 2.2 콘크리트에만 하중이 가해지는 경우

Fig. 1은 해석에 사용된 좌표계를 나타낸 것이다. CFT 기둥의 중심축에 하중이 재하될 경우 응력 및 변형률의 분포가 대칭을 이루기 때문에 해석은 한 쪽 끝 단면으로부터 중심( $l/2$ )까지 이루어진다.

우선 한 쪽 끝 단면으로부터 콘크리트가 삼축압 상태에 놓여있는 길이방향으로 임의의 위치  $z$ 에서 적합조건과 평형조건으로부터 구속압의 분포를 유도할 수 있다.  $z$  위치에서 콘크리트와 강관의 횡방향 변형률은 각각 다음과 같다<sup>1)</sup>.

$$\epsilon_{rr,c}(z) = \frac{1}{E_c} [\sigma_{rr,c}(z) - \nu_c \sigma_{\theta\theta,c}(z) - \nu_c \sigma_{zz,c}(z)] \quad (1)$$

$$\epsilon_{rr,s}(z) = \frac{1}{E_s} [\sigma_{rr,s}(z) - \nu_s \sigma_{\theta\theta,s}(z) - \nu_s \sigma_{zz,s}(z)] \quad (2)$$

해석에 사용된 CFT 기둥의 부착응력( $\tau_b$ )과 콘크리트와 강관의 길이방향 응력( $\sigma_{zz,c}, \sigma_{zz,s}$ ) 관계를 나타내는 식은 각각 다음과 같다.

$$\sigma_{zz,s}(z) = -\frac{2r_1}{r_2^2 - r_1^2} \int_0^z \tau_b(t) dt \quad (3)$$

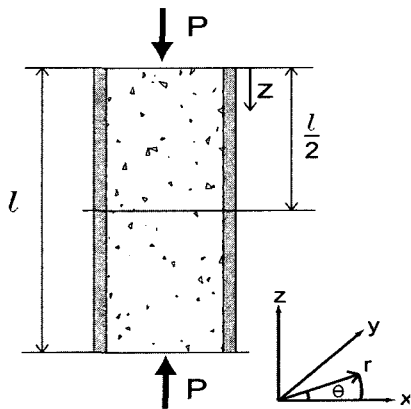


Fig. 1 Coordinates of CFT column

$$\sigma_{zz,c}(z) = \sigma_{zz,c}(0) + \rho \frac{2r_1}{r_2^2 - r_1^2} \int_0^z \tau_b(t) dt \quad (4)$$

CFT 기둥 단면에서 콘크리트와 강관의 응력분포를 나타내는 식은 각각 다음 식(5)와 식(6)과 같다.

$$\sigma_{rr,c} = \sigma_{\theta\theta,c} \quad (5)$$

$$\sigma_{\theta\theta,s} = \frac{r_1}{(r_2 - r_1)} \sigma_{rr,c} \quad (6)$$

식(3)에서 식(6)의 관계와 식(1)과 식(2)의 적합조건, 즉  $\epsilon_{rr,c}(z) = \epsilon_{rr,s}(z)$  으로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\sigma_{rr,c}(z) = \frac{1}{R} \left[ n\nu_c \sigma_{zz,c}(0) + \left( n\nu_c K + \nu_s \frac{K}{\rho} \right) \int_0^z \tau_b(t) dt \right] \quad (7)$$

여기서,  $K = \rho \frac{2r_1}{r_2^2 - r_1^2}$ ,

$$R = n - n\nu_c + \nu_s \frac{r_1}{r_2 - r_1}, \quad n = \frac{E_s}{E_c}$$

식(7)의 양변을  $z$ 에 대해 미분하면 다음 식(8)과 같은  $\sigma_{rr,c}(z)$  에 관한 일차 미분 방정식을 얻는다.

$$\frac{d\sigma_{rr,c}(z)}{dz} = \frac{1}{R} \left[ \left( n\nu_c K + \nu_s \frac{K}{\rho} \right) \tau_b(z) \right] \quad (8)$$

여기서 사용된 부착응력의 항( $\tau_b(z)$ )은 식(9)와 같다. 상수  $a$ 와  $b$ 는 실험상수이다. 이 식은 CFT 기둥에 적용하기 위해 개발된 부착강도 모델식이다.<sup>2)</sup>

$$\tau_b(z) = a - b\sigma_{rr,c}(z) \quad (9)$$

식(8)의 미분방정식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$\sigma_{rr,c}(z) = \frac{a}{b} - ce^{-Tbz} \quad (10)$$

여기서,  $T = \frac{1}{R} \left( n\nu_c K + \nu_s \frac{K}{\rho} \right)$

식(10)에서  $c$ 는 상수로서 식(7)에서의 경계조건 ( $z=0$ )으로부터 구할 수 있으며, 다음 식(11)과 같다.

$$c = \frac{a}{b} - \frac{1}{R} [n \nu_c \sigma_{zz,c}(0)] \quad (11)$$

각 방향의 응력과 변형률은 식(11)을 식(1)에서 식(6)에 대입하여 얻을 수 있으므로 CFT 기둥에서 콘크리트만 하중을 가한 경우의 단기거동이 해석될 수 있다.

### 2.3 강관과 콘크리트를 동시에 가압한 경우

CFT 기둥에서 강관과 콘크리트를 동시에 가압한 경우 하중 재하 시점에서 콘크리트와 강관의 수직 방향 변형률과 수직응력은 각각 아래 식(12), (13) 및 (14)에 나타난 바와 같다.

$$\epsilon_{zz,c} = \epsilon_{zz,s} \quad (12)$$

$$\sigma_{zz,c} = E_c \epsilon_{zz,c} \quad (13)$$

$$\sigma_{zz,s} = E_s \epsilon_{zz,s} \quad (14)$$

식(13)과 식(14)의 수직응력으로부터 각각의 횡방향 변형률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_{rr,c} = -\nu_c \epsilon_{zz,c} \quad (15)$$

$$\epsilon_{rr,s} = -\nu_s \epsilon_{zz,s} \quad (16)$$

콘크리트가 탄성범위에 있을 때, 콘크리트의 포아송비<sup>3)</sup>는 0.15~0.2정도이고 강재의 경우는 0.27~0.3 정도로 콘크리트에 비하여 크다. 따라서 식(15)와 식(16)으로부터 강관과 콘크리트를 동시에 가압한 경우 본 해석과정에서 고려하는 사용하중 상태에선 콘크리트가 삼축압 상태에 놓이지 않으며 ( $\epsilon_{rr,c} < \epsilon_{rr,s}$ ), 부재의 길이방향으로 강관과 콘크리트 모두 동일한 변형률이 발생하게 된다.

## 3. CFT 기둥의 장기거동 해석법 개발

### 3.1 크리프 포아송 비

일축 압축 상태에서 콘크리트의 크리프는 축방향 뿐만 아니라 횡방향으로도 일어난다. 전자에 대한 후자의 비를 크리프 포아송 비라고 한다. 일반적인 삼축응력 상태의 경우 어떤 한 방향의 크리프 변형을 생각해 보면 그 방향으

로 작용하는 응력에 의한 크리프가 발생할 것이고, 또 두 개의 직각방향으로 작용하는 응력에 의한 크리프 변형의 포아송 비 효과에 기인하는 크리프도 있을 것이다. 하지만 각기 다른 방향의 변형률은 서로 독립적으로 발생하지는 않는다<sup>4)</sup>. 실제의 경우 어떤 한 방향의 포아송 비는 그 방향에서의 작용응력에 의한 영향을 받거나, 축방향 크리프가 횡방향 작용응력에 의한 영향을 받는다가, 축 방향 크리프와 횡방향 크리프가 상호 작용하게 된다. 따라서 실제로 나타나는 크리프 포아송 비는 작용하는 응력들의 크기에 따라 각 방향에서 서로 다른 값을 갖게 된다. 이렇게 삼축 응력시 실제로 나타나는 크리프 포아송비를 유효 크리프 포아송비(effective creep poisson's ratio)라고 한다. 1969년 Adam M. Neville<sup>5)</sup>은 서로 다른 다축응력 상태에서 콘크리트 실험체에 크리프 실험을 실시하여 응력상태에 따른 유효 크리프 포아송 비의 관계식들을 유도하였다. 해석에 사용된 유효 크리프 포아송 비의 관계식은 다음과 같다.

$$\nu_{cp,i} = 0.16 - 0.074 \frac{\sigma_i}{\sigma_j + \sigma_k} + 0.028 \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_j + \sigma_k} \right)^2 \quad (17)$$

여기서,  $\nu_{cp,i}$ 는 어느 한 방향의 유효 크리프 포아송 비이고  $\sigma_i, \sigma_j, \sigma_k$ 는 각각 그 방향으로 작용하는 응력과 각기 다른 직각 방향으로 작용하는 응력들이다.

### 3.2 콘크리트만 가압한 경우

장기거동의 기본적인 해석방법으로 1972년 Zdenek P. Bazant에 의해 제시된 AEMM<sup>6)</sup>이 널리 사용되고 있으므로, 이 논문에서도 이 방법을 사용하여 단기하중 재하시의 해석결과로부터 시간에 따라 추가적으로 발생하는 콘크리트 크리프에 의한 변형과 이에 따른 응력 및 변형률 변화를 해석하고자 한다.

하중이 가해지는 시간  $t_0$ 에서  $\Delta t$ 만큼의 시간이 지나  $t_1$ 에 도달했을 때 콘크리트 크리프에 의한 추가적인 각 방향의 변형률은 아래의 식(18)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{rr,c}(t_1, t_0) &= \epsilon_{rr,c,cu}(t_1, t_0) \\ &- \nu_{cp,r} [\epsilon_{\theta\theta,c,cu}(t_1, t_0) + \epsilon_{zz,c,cu}(t_1, t_0)] \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{\theta\theta,c}(t_1, t_0) &= \epsilon_{\theta\theta,c,cu}(t_1, t_0) \\ &- \nu_{cp,\theta} [\epsilon_{rr,c,cu}(t_1, t_0) + \epsilon_{zz,c,cu}(t_1, t_0)] \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \Delta \epsilon_{zz,c}(t_1, t_0) &= \epsilon_{zz,c,cu}(t_1, t_0) \\ &- \nu_{cp,z} [\epsilon_{rr,c,cu}(t_1, t_0) + \epsilon_{\theta\theta,c,cu}(t_1, t_0)] \end{aligned} \quad (20)$$

여기서,  $\epsilon_{rr,c.cu}(t_1, t_0)$ ,  $\epsilon_{\theta\theta,c.cu}(t_1, t_0)$ ,  $\epsilon_{zz,c.cu}(t_1, t_0)$  는 각각 그 방향으로만 응력이 가해졌을 때 시간  $t_0$ 에서  $t_1$ 까지 발생한 크리프 변형이고  $\nu_{cp,r}$ ,  $\nu_{cp,\theta}$ ,  $\nu_{cp,z}$ 는 각 방향으로의 유효 크리프 포아송 비이다.

모든 식들은 CFT 기둥의 길이방향에서 한 쪽 끝 단면으로부터 임의의  $z$  위치를 고려하여 전개된다. 식을 표현하는데 있어  $z$ 를 변형률이나 응력의 항에 포함시키지 않았으나 모든 변형률과 응력의 항들은  $z$ 에 대한 함수이다. 위 식들을 구성하고 있는 변형률 함수들은 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{rr,c.cu}(t_1, t_0) = \frac{\sigma_{rr,c}(t_0)}{E_c(t_0)} \phi(t_1, t_0) + \frac{\Delta\sigma_{rr,c}(t_1)}{E_c(t_0)} [1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] \quad (21)$$

$$\epsilon_{\theta\theta,c.cu}(t_1, t_0) = \frac{\sigma_{\theta\theta,c}(t_0)}{E_c(t_0)} \phi(t_1, t_0) + \frac{\Delta\sigma_{\theta\theta,c}(t_1)}{E_c(t_0)} [1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] \quad (22)$$

$$\epsilon_{zz,c.cu}(t_1, t_0) = \frac{\sigma_{zz,c}(t_0)}{E_c(t_0)} \phi(t_1, t_0) + \frac{\Delta\sigma_{zz,c}(t_1)}{E_c(t_0)} [1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] \quad (23)$$

여기서  $\sigma_{rr,c}(t_0)$ ,  $\sigma_{\theta\theta,c}(t_0)$ ,  $\sigma_{zz,c}(t_0)$ 는 하중이 가해지는 시점( $t_0$ )에서의 각 방향 작용응력이고,  $E_c(t_0)$ 는 그 때의 탄성계수,  $\Delta\sigma_{rr,c}(t_1)$ ,  $\Delta\sigma_{\theta\theta,c}(t_1)$ ,  $\Delta\sigma_{zz,c}(t_1)$ 는 시간  $t_0$ 에서  $t_1$ 까지 각 방향 작용응력의 변화량이다.  $\phi(t_1, t_0)$ 는 크리프 계수이고,  $\chi(t_1, t_0)$ 는 재령 보정 계수이다.

식(3)에서 식(6)까지의 단기거동의 해석결과를 고려하여, 단면에서 강관과 콘크리트의 횡방향 변형률의 적합조건을 이용하면 다음과 같은 미분방정식이 유도된다.

$$\begin{aligned} & -n\phi(t_1, t_0)cTb \left[ (1 - \nu_{cp,r}) - \nu_{cp,r} \frac{K}{T} \right] e^{-Tbz} \\ & = [(1 - \nu_{cp,r})n[1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] + \\ & \quad \nu_s \left( \frac{r_1}{r_2 - r_1} \right) \frac{d\Delta\sigma_{rr,c}(t_1)}{dz} \\ & \quad + \left[ n\nu_{cp,r}K[1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] + \nu_s \frac{K}{\rho} \right] b\Delta\sigma_{rr,c} \end{aligned} \quad (24)$$

위 미분 방정식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta\sigma_{rr,c}(t_1) = c_1 e^{-\frac{B}{A}z} + \frac{C}{B - ATb} e^{-Tbz} \quad (25)$$

여기서,

$$A = \left[ (-\nu_{cp,r})n[1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] + \nu_s \left( \frac{r_1}{r_2 - r_1} \right) \right]$$

$$B = \left[ n\nu_{cp,r}K[1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] + \nu_s \frac{K}{\rho} \right] b$$

$$C = -n\phi(t_1, t_0)cTb \left[ (1 - \nu_{cp,r}) - \nu_{cp,r} \frac{K}{T} \right]$$

$$c_1 = \frac{E}{A} - \frac{C}{B - ATb}$$

따라서 시간  $t_1$ 에서  $\Delta\sigma_{rr,c}(t_1)$ 의 값을 기둥의 길이 방향의 모든 위치에서 구할 수 있다. 모든 미지수가  $\Delta\sigma_{rr,c}(t_1)$ 로 표현될 수 있기 때문에 시간  $t_1$ 에서 각 방향의 응력변화 및 변형률변화, 미끄럼의 변화 등을 유도할 수 있다. 시간  $t_1$ 이외의 시간에 대한 해석도 유도되는 각각의 식에  $t_1$  대신 임의의 시간을 대입하면 그 시간에서의 해석이 가능하다.

### 3.3 강관과 콘크리트를 동시에 가압한 경우

단기하중에 대한 해석에서 강관의 포아송비가 콘크리트보다 크기 때문에 하중이 가해지는 시점  $t_0$ 에서는 콘크리트가 삼축압 상태에 놓이지 않으며, 시간의 흐름에 따른 평형조건은 다음과 같다.

$$P = \sigma_{zz,c}(t)A_c + \sigma_{zz,s}(t)A_s \quad (26)$$

$\Delta t$ 만큼의 시간이 흘러  $t_1$ 의 시간에서의 증가되는 콘크리트의 수직과 수평변형률은 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_{zz,c}(t_1, t_0) = \frac{\sigma_{zz,c}(t_0)}{E_c(t_0)} \phi(t_1, t_0) + \frac{\Delta\sigma_{zz,c}(t_1)}{E_c(t_0)} [1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] \quad (27)$$

$$\Delta\epsilon_{rr,c}(t_1, t_0) = -\nu_{cp,u}\Delta\epsilon_{zz,c}(t_1, t_0) \quad (28)$$

$$\Delta\epsilon_{\theta\theta,c}(t_1, t_0) = -\nu_{cp,u}\Delta\epsilon_{zz,c}(t_1, t_0) \quad (29)$$

그리고 각 방향의 강관의 변형률은 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_{zz,s}(t_1, t_0) = \Delta\epsilon_{zz,c}(t_1, t_0) \quad (30)$$

$$\Delta\epsilon_{rr,s}(t_1, t_0) = -\nu_s\Delta\epsilon_{zz,s}(t_1, t_0) \quad (31)$$

따라서 식(26)의 평형조건과 식(30)의 적합조건으로부터 미지수  $\Delta\sigma_{zz,c}(t_1)$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta\sigma_{zz,c}(t_1) = -\frac{n}{H}[\sigma_{zz,c}(t_0)\phi(t_1, t_0)] \quad (32)$$

$$\text{여기서, } H = n[1 + \chi(t_1, t_0)\phi(t_1, t_0)] + \frac{1}{\rho}$$

식(32)로부터 변형률과 응력의 해석이 가능하다.

## 4. 실험 및 해석결과

### 4.1 실험계획 및 해석조건

중심축 하중을 받는 CFT 기둥의 단기거동에 대한 실험 및 해석에 대한 변수는 다음과 같다.

- ① CASE I : 충전 콘크리트에 대한 크리프 실험
- ② CASE II : CFT 기둥에서 콘크리트만 가압한 경우
- ③ CASE III : CFT 기둥에서 강관과 콘크리트를 동시에 가압한 경우

실험에 사용된 시멘트, 잔골재, 굵은골재의 물리적 성질은 Table 1과 같으며, 사용된 원형강관의 치수는 외경이 140mm이고, 두께가 2.9mm이다. 그리고 강관을 제작할 때 발생할 수도 있을 잔류응력을 없애기 위해 미리 열처리를 하여 실험을 수행하였다.

Table 2는 이 실험에 사용된 콘크리트의 배합설계표이다. 배합강도는 실제 CFT 기둥의 경우에 고강도 콘크리트를 사용하는 것을 고려하여 목표 압축강도를  $600\text{kgf/cm}^2$ 으로 하였다.

강관과 콘크리트에 대한 탄성계수와 강도실험을 실시하

Table 1 Properties of materials

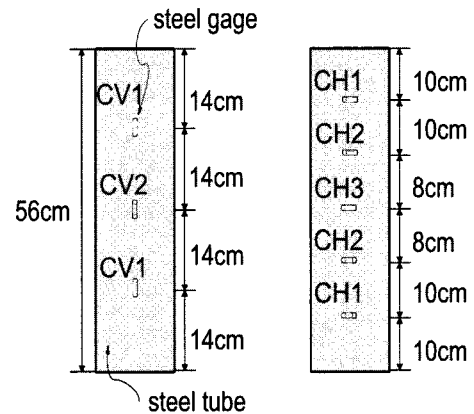
Type	Cement (Type I)	Fine aggregate (River sand)	Coarse aggregate (Crushed aggregate)
Specific surface( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	3315	-	-
Specific gravity	2.15	2.55	2.58
Fineness modulus	-	2.95	7.23

Table 2 Mix proportion of concrete

Water-cement ratio(%)	Fine aggregate ratio(%)	Unit weight( $\text{kg/m}^3$ )				
		Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Super plasticizer
30	42	160	533	726	1003	5.33

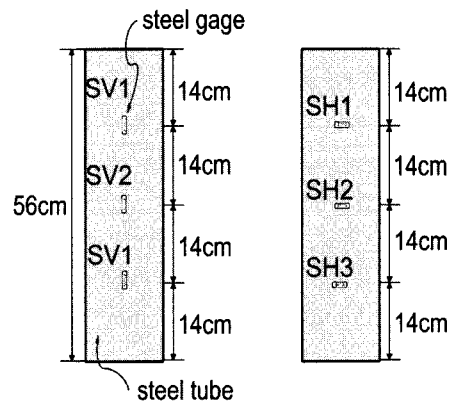
였으며, 콘크리트의 경우 가압시점인 재령 28일의 탄성계수는  $385,000\text{kgf/cm}^2$ 이고 극한강도는  $583\text{kgf/cm}^2$ 이었다. 강관의 경우 탄성계수와 항복강도는 각각  $2,170,000\text{kgf/cm}^2$ 과  $2,700\text{kgf/cm}^2$ 이다. 강관과 콘크리트의 하중 재하시 포아송비는 각각 0.29와 0.16이었다. 해석에 사용된 부착강도 모델식(식(9))의 상수 a와 b는 각각 0.78과 -0.50로 하였다<sup>2)</sup>.

각 실험변수에 대하여 2개의 실험체를 만들어 실험을 수행하였으며, CFT 기둥 실험체에서 원형강관의 치수는  $\phi 150 \times 600\text{mm}$ 이고 강관의 중심부에 매립게이지를 묻어 타설하였다. Fig. 2(a)는 CASE II의 강관에 부착한 변형률 게이지의 위치를 나타내고 있다. 수직 게이지는  $180^\circ$ 를 이루는 두 면에 부착하였고, 수평 게이지는  $120^\circ$ 를 이루는 세 면에 부착하였다. CASE III의 경우 강관에 부착한 게이



Vertical Horizontal

(a) CASE II



Vertical Horizontal

(b) CASE III

Fig. 2 Gages attached on CFT

지의 위치는 Fig. 2(b)와 같으며, 수직 게이지와 수평 게이 지 모두 180° 를 이루는 두 면에 부착하였다.

Fig. 2에서 게이저 옆의 명칭들은 게이저의 위치를 나타 내는 것으로 대칭을 이루는 위치는 같은 명칭으로 하였다. 중심부 콘크리트에 설치된 매립게이저의 명칭은 CASE II 의 경우는 'CM', CASE III의 경우에는 'SM'으로 정하였다.

가압 하중은 실제 CFT 기둥의 사용하중을 고려하여 산 정 하였다. 재령 28일에 CASE II의 경우는 33tonf, CASE III는 38tonf의 하중을 가하였다. 하중 재하 장비로는 60 tonf 용량의 유압잭을 사용하였다. 가압시 콘크리트에 묻어 두었던 매립게이저의 전선을 보호하기 위해 중간에 구멍이 있는 원형의 판을 제작하여 실험체의 단부와 가압판 사이 에 넣어 실험하였다.

## 4.2 단기하중에 대한 분석

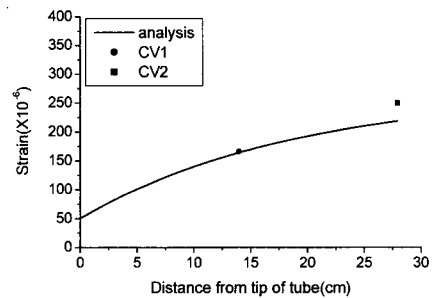
### 4.2.1 콘크리트만 가압한 경우

Fig. 3(a)는 CASE II 강관의 수직 변형률 분포에 대한 해석과 측정된 수직 변형률 값을 나타낸 것이다. 해석결과 수직 변형률 분포는 끝단에서 중심부까지 비선형적으로 증 가하는 모습을 보였으며, 실험결과도 이것과 거의 일치하는 것으로 나타났다. Fig. 3(b)는 CASE II 강관의 횡방향 변 형률 해석과 측정값을 나타내고 있는데 해석결과는 끝단에 서 중심까지 비선형적으로 감소하였으며, 측정값들도 같은 경향과 크기로 나타났다. Fig. 3(c)는 CASE II의 콘크리트 변형률에 대한 해석과 실험결과이다. 측정된 콘크리트의 변 형률을 점선으로 표현하였는데 이것은 매립게이저(12cm)가 위치한 구간에서 측정된 것으로 구간내의 평균값이 측정되 는 것으로 보았다. 강관과 콘크리트 사이의 부착응력과 강 관의 구속효과로 인해 끝단에서 중심까지 변형률의 크기가 감소하는 것으로 나타났다.

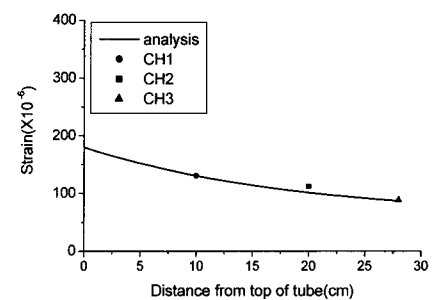
### 4.2.2 강관과 콘크리트를 동시에 가압한 경우

Fig. 4(a)는 CASE III에 대한 수직 변형률 해석과 실험 결과이다. 해석상에서 강관과 콘크리트의 변형률 크기가 같 으므로 콘크리트와 강관의 측정값을 동시에 나타내었다. Fig. 4(b)는 CASE III의 횡방향 변형률에 대한 해석과 실험결과이다.

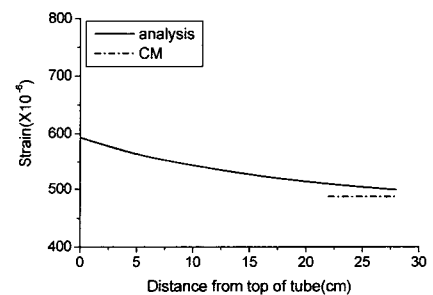
CASE II과 CASE III의 하중이 가해지는 시점에서의 변 형률 및 응력에 대한 해석은 실험결과를 상당히 정확히 예 측하는 것으로 보이며, 단기하중에 대한 해석방법은 사용된 여러 가지 가정사항들과 유도과정 등이 합리적인 것으로 판단된다. 따라서 CFT 기둥의 장기거동 해석에 초기값으 로 사용되는 단기거동에 관한 해석적 연구는 충분한 신뢰 성과 정확성을 확보한 것으로 생각된다.



(a) Vertical strain in steel tube



(b) Horizontal strain in steel tube



(c) Horizontal strain in concrete

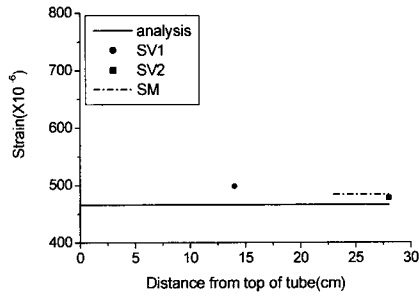
Fig. 3 Instantaneous strain in CFT column - CASE II

## 4.3 장기하중에 대한 분석

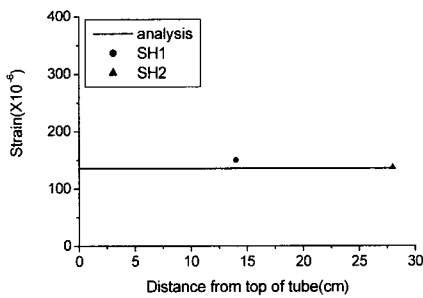
### 4.3.1 크리프 계수

장기 지속하중에 대한 해석에 적용된 크리프 계수는 다 음과 같은 쌍곡선 형태의 식이다.

$$\phi(t, t') = \frac{(t - t')^\alpha}{\beta + (t - t')^\alpha} \phi_u \quad (34)$$



(a) Vertical strain in steel tube



(b) Horizontal strain in concrete

Fig. 4 Instantaneous strain in CFT column - CASE III

CASE I의 실험 결과로부터 구한 크리프 계수를 위의 식으로 회귀분석하여 해석에 사용하였는데, Fig. 5는 크리프 계수의 실험값과 회귀분석 결과이다. 이 결과에 의하면 극한 크리프 계수는 0.81, 상수  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 각각 0.64와 6.02이었다.

#### 4.3.2 콘크리트만 가압한 경우

Fig. 6(a)와 (b)는 CASE II 강관의 수직 방향의 게이지 위치 CV1과 CV2에 대한 해석과 실험결과이다. 강관의 수직 변형률에 대한 해석과 실험과의 비교에서 변형률의 크기는 거의 일치하였으나, 해석상 약간 증가하는 경향은 측정값에선 명확하게 나타나지 않았다.

Fig. 7(a), (b)와 (c)는 강관에 부착된 횡방향 변형률 게이지 중 CH1, CH2와 CH3 위치에서 측정된 변형률 변화와 이 위치에서의 해석결과이다. 해석상에서 나타난 증가 경향이 매우 작아서 측정값의 경향과 비교하기에는 어려움이 있지만, 변형률의 크기는 해석결과와 잘 일치하고 있다. CM 위치(콘크리트 매립게이지)에서 얻은 실험결과와 해석으로부터 얻은 매립게이지가 위치한 구간에서의 평균변형률과의 비교는 Fig. 8과 같다. 측정값과 해석결과의 경향과 크기가 거의 일치하고 있는 것으로 나타났다.

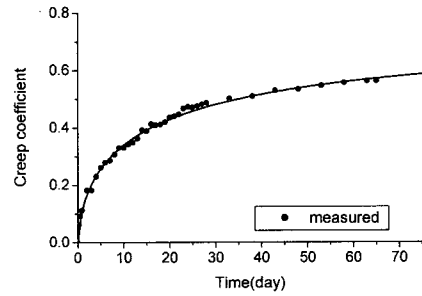
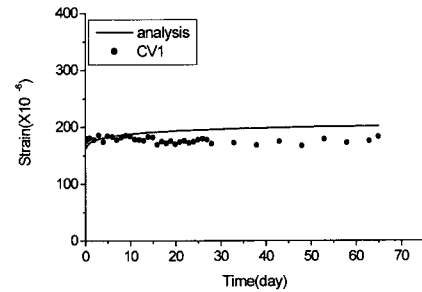
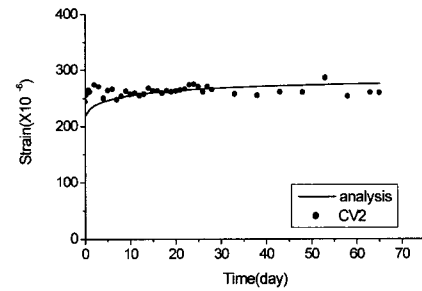


Fig. 5 Creep coefficient-CASE I



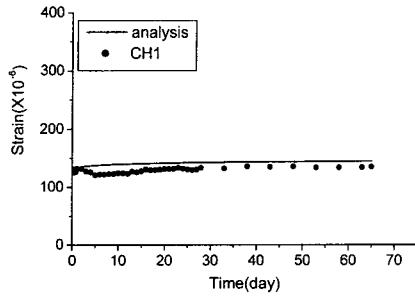
(a) Strain variation in CV1



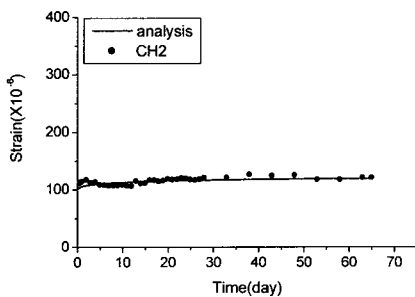
(b) Strain variation in CV2

Fig. 6 Vertical strain under sustained load-CASE II

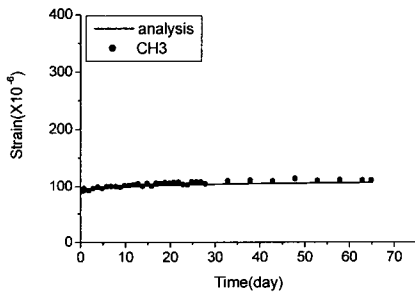
CASE II의 단기하중과 장기하중에 대한 실험과 해석 결과로부터 다음과 같은 사항을 알 수 있었다. 초기 하중 재하시 강관과 콘크리트 사이에 미끄럼(slip)이 발생하며, 강관의 변형률 분포도 길이 방향으로 비선형적으로 나타나게 된다. 콘크리트 크리프의 변형에 비해 강관의 수직변형률 변화는 매우 작아서 추가적인 미끄럼이 일어나게 된다. 또 강관은 콘크리트의 초기 변형과 크리프를 억제하는 역할을 하였다.



(a) Strain variation in CH1



(b) Strain variation in CH2



(c) Strain variation in CH3

Fig. 7 Horizontal strain under sustained load-CASE II

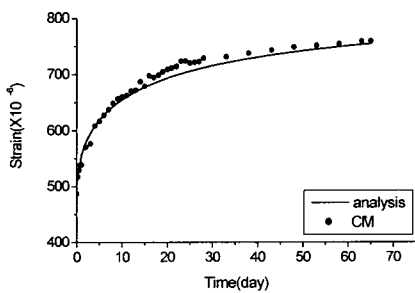
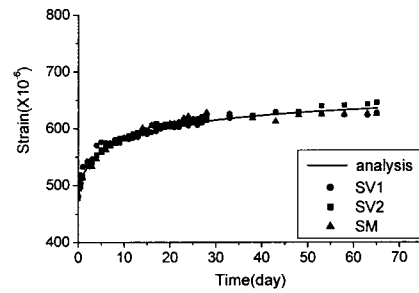


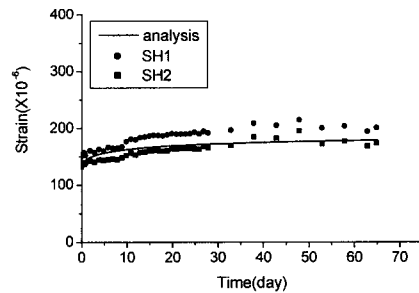
Fig. 8 Concrete strain under sustained load-CASE II

### 4.3.3 강관과 콘크리트를 동시에 가압한 경우

Fig. 9(a)는 수직방향의 변형률에 대한 것으로 강관의 게이지 위치 SV1, SV2와 콘크리트 매립게이지(SM)의 실험 측정값과 해석결과이다. Fig. 9(b)는 강관의 SH1과 SH2에서 측정된 횡방향 변형률에 대한 결과이다. 해석 수행시 사용한 콘크리트의 크리프 포아송비는 강관의 포아송비에 비해 작아, 해석결과에는 장기하중에 의한 변형에도 강관은 콘크리트에 대한 구속효과가 없게 된다. Fig. 9(a)에서 시간에 따른 강관과 콘크리트의 변형률의 변화가 거의 동일하였고, 해석결과와도 일치하는 것으로 보아 강관이 콘크리트를 구속하는 효과는 나타나지 않은 것으로 보인다. Fig. 9(b)에서 SH1과 SH2는 강관의 수직변형률의 변화에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 해석결과도 이를 반영하고 있다. 가압 시점에서 SH1과 SH2의 차이는 시간에 따라 거의 일정하게 유지되는 것으로 나타났으며, 이것 역시 콘크리트가 강관에 의해 구속되지 않는 것을 의미하고 있다.



(a) Vertical strain under sustained load



(b) Horizontal strain under sustained load

Fig. 9 Strain under sustained load-CASE III

## 5. 결론

본 논문에서는 CFT 기둥의 장기거동에 대한 특성을 파악하기 위해 해석방안을 제시하고 이를 검증하기 위한 실험을 수행하였으며, 해석과 실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.



- 1) 본 논문에서 제시한 해석방안은 실험결과를 비교적 정확히 예측하였다. 따라서 해석방안에 사용된 여러 가지 가정사항들과 유도과정이 합리적이었으며, 정확성 또한 입증되었다.
- 2) CFT 기둥에서 콘크리트만 가압한 경우, 콘크리트와 강관 사이에 미끄럼(slip)이 발생하여 콘크리트와 강관의 수직 변형률은 많은 차이를 보였으며, 강관과 콘크리트의 길이방향에 대한 변형률 분포는 비선형적으로 나타났다. 시간이 경과함에 강관의 수직 변형률 감소에 비해 콘크리트 크리프에 의한 변형률 감소의 크기가 매우 큰 것으로 보아 추가적인 미끄럼이 발생하는 것으로 나타났다.
- 3) CFT 기둥에 강관과 콘크리트를 동시에 가압하는 경우 강관과 콘크리트의 수직 변형률은 가압 시점부터 시간의 증가에 따라 일치하는 것으로 나타났다. 또 시간이 증가하면서 횡방향 크리프 변형이 강관의 횡방향 변형을 초과할 때 발생하는 구속효과는 나타나지 않았다.

### 감사의 글

본 연구는 건교부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

1. Fung, Y.C., "Foundations of Solid Mechanics : Elastic and Plastic Behavior of Materials", Prentice Hall, 1965, pp.127~153.
2. 권승희, "CFT 기둥의 장기거동 특성에 관한 연구", 석사학위 논문, 한국과학기술원 토목공학과, 2000.
3. Neville, A. M., "Properties of Concrete: Elasticity, Shrinkage, Creep", Longman, 1995, pp. 412~481.
4. Neville, A. M., "A Hypothesis on Mechanism of Creep of Concrete With Reference to Multiaxial Compression", *ACI Structural Journal*, No.67-3, 1970, pp.29~35.
5. Neville, A. M., "Creep Poisson's Ratio of Concrete Under Multiaxial Compression", *ACI Structural Journal*, No.66~90, 1969, pp.1008~1019.
6. Bazant, Z. P., "Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method", *ACI Structural Journal*, No.69-20, 1972, pp.212~217.

### 요 약

CFT 기둥은 뛰어난 구조적 성능으로 사용이 증가하고 있는 추세이다. 하지만 CFT 기둥을 사용하여 건설된 구조물도 내부 콘크리트의 시간의존적 변형으로 사용상태에 이상 응력집중이나 과다 처짐 등의 구조적 문제를 초래할 수 있다. 따라서 이에 대한 연구가 필요하다. 본 논문에서는 CFT 기둥에 하중이 가해지는 시점에서의 해석법과 이를 기초로 한 장기거동 해석법을 제안하였다. 또한 이에 대한 실험을 실시하여 해석결과와 비교·분석하였다. 이를 통해 제안된 해석법을 검증하고 아울러 해석에 적용된 부착강도 모델식의 정확성 또한 평가하였다.

**핵심용어** : 부착응력, 삼축 압축, 크리프, 장기거동