

# 시공단계를 고려한 콘크리트 프레임 구조물의 해석

## Analysis of Concrete Frame Structures Considering the Construction Sequences

곽 호 경\*  
Kwak, Hyo-Gyoung

서 영 재\*\*  
Seo, Young-Jae

### 요 지

이 논문은 시공단계를 고려한 콘크리트 프레임 구조물의 거동 해석을 다루고 있다. 고층건물의 경우 하루에 시공이 완료되지 않으므로 각 시공단계에 따라 콘크리트의 시간의존적 현상은 다르게 발생된다. 이를 위하여 이 논문에서는 일반적인 프레임 해석기법에 콘크리트의 시간의존적 특성을 고려하였다. 이 연구에 도입된 해석기법은 단면을 가상의 층으로 나누고 각층은 일축상태로 가정한 적층단면을 사용하였다. 요소는 평면 보요소를 사용하였으며 강성행렬은 변위법을 바탕으로 유도하였고 전체적인 구조해석은 비선형 구조해석 방법의 하나인 복합법을 사용하였다. 콘크리트의 시간의존적 특성을 고려하기 위하여 단면의 각 층에서 크리프와 건조수축에 의한 변형률을 계산하였으며 크리프는 크리프 Compliance의 전개에 기본을 둔 1차 순환적 단계 알고리즘을 사용하였다. 끝으로 이 연구에서 제안된 해석모델을 이용하여 프레임해석 및 기둥축소에 관한 예제를 해석하였다.

핵심용어 : 콘크리트 프레임 구조물, 크리프, 건조수축, 시공단계, 해석모델

### Abstract

This paper deals with the analysis of concrete frame structures considering the construction sequences. Because of time-dependent effects of concrete, such as the creep and shrinkage, the structure behaves differently according to the construction sequences in spite of the same configurations of structures. Therefore, the time-dependent effects of concrete must be taken into consideration to simulate the actual structural behavior. The stiffness matrix of a beam element is derived on the basis of the layer approach, dividing a section with imaginary layers. The iteration method adopted for structure analysis is the combined method. Creep and shrinkage strains at each layer are calculated by using the first-order algorithm based on the expansion of creep compliance. Finally, the correlation studies with the purpose of analyzing the time-dependent behavior of building structure are conducted using the analytical model proposed in this study.

*Keywords* : concrete frame structure, creep, shrinkage, construction sequences, analytical model

## 1. 서 론

현재 구조물의 설계는 초기에 가정한 재료성질

및 구조모델링을 바탕으로 구조해석에 의하여 계산된 부재력을 기초로 하여 이루어지고 있다. 이때 구조해석에서 해석 구조물은 완성된 구조체로

\* 정회원·한국과학기술원 토목공학과, 조교수  
\*\* 한국과학기술원 토목공학과, 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 1999년 9월 30일까지 본 학회에 보내주시면 1999년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

가정하기 때문에 실제 시공중 발생하는 시공단계에 따른 구조물의 거동변화를 고려하지 못하고 있다. 특히 콘크리트 구조물의 경우 콘크리트 설계강도인 28일 강도를 기준으로 계산된 재료의 탄성계수를 포함한 모든 재료특성을 토대로 부재력을 산정하게 된다. 그러나 실제 구조물의 시공은 일정 시간 간격을 두고 콘크리트의 타설과 양생을 반복하는 과정을 거치게 되므로 각 층마다, 심하게는 각 부재마다 재료의 특성이 서로 다르게 되며 이러한 부재들 간의 다른 재료특성으로 구조계의 힘의 흐름이 다르게 나타날 가능성이 있다. 또한 콘크리트의 시간의존적 현상에 의하여 콘크리트의 타설후 시간경과가 크지않은 시공과정중에는 콘크리트의 시간의존적 거동에 의한 영향이 크게 나타나므로 구조부재에 초기 힘이 크게 작용하는 기둥 또는 대형 보 부재 등의 경우 크리프에 의한 추가변형이 크게 유발되어 부재의 2차 변형 및 응력의 재분배가 발생하게 된다. 또한 구조물이 대형화 및 고층화가 될 경우 이로 인한 부재의 부동 변형량이 증가하게 되어 구조부재의 2차 부재력을 일으키게 되며, 구조부재의 현장조립이 필요한 구조물의 경우 시공상의 오차로 인해 부재에 추가적인 잔류응력과 사용성에 문제가 발생하고, 궁극적으로 구조물의 사용연한이 줄어드는 결과가 초래된다. 더욱이 시공중 내하력이 확보되지 않은 시점에서 구조부재를 추가 시공할 경우 추가된 하중의 영향으로 인해 구조부재 내부의 손상을 일으키는 물론 심한 경우 시공중 붕괴로 이어지는 상황이 발생하기도 한다<sup>9)</sup>.

이러한 필요에 따라 콘크리트 프레임 구조물의 시공단계에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔으나 기존의 연구는 콘크리트의 시간의존적 거동을 제외하고 단지 시공단계만을 고려하거나 전체 프레임 해석이 아닌 기둥만을 해석함으로써 그 효과를 간접적으로 해석하고 있다<sup>3), 6)</sup>. 콘크리트의 시간의존적 현상을 해석에서 제외하는 경우 콘크리트의 사용량이 적은 철골 구조물에서는 콘크리트가 전체 구조계의 거동에 영향을 적게 나타내므

로 전체 구조계의 거동을 지배하는 것은 시공단계라 할 수 있다. 그러나 철근 콘크리트 구조의 경우 상대적으로 콘크리트의 양이 많이 사용되므로 콘크리트의 시간의존적 효과는 시공단계에 의한 효과와 함께 중요하게 된다. 또한 기둥만을 해석하는 경우 해석은 간편하지만 기둥과 연결되는 보 역시 콘크리트로 제작되므로 시간에 따른 거동이 발생하게 되고 전체 구조계의 거동에 영향을 주게 된다.

따라서 이 연구에서는 콘크리트의 시간의존적 효과를 포함하여 프레임 구조물의 시공단계를 고려한 해석이 가능하도록 해석모델을 제안하였으며 프레임 전체 구조에 대하여 해석을 수행하였다.

## 2. 적층단면

이 연구에서는 단면의 해석을 위하여 단면을 콘크리트와 철근의 가상의 층으로 나누고 각 층을 일축 응력상태로 가정하는 적층단면을 사용하였다. 적층단면을 사용함으로써 단면의 깊이에 따라 변화하는 재료특성을 효과적으로 고려할 수 있다. 단면의 평형관계를 구하는 단면해석은 가상의 각 층에서 비역학적 변형률(non-mechanical strain,  $\epsilon^m$ )인 크리프 변형률과 건조수축 변형률을 구하고, 전체 구조계의 평형관계로부터 변위와 전체 변형률( $\epsilon$ )을 구하여 전체 변형률에서 전체 비역학적 변형률을 제함으로써 각 층의 역학적 변형률(mechanical strain,  $\epsilon^m$ )을 구하게 된다. 이렇게 구한 역학적 변형률과 각 재료의 응력-변형률 관계를 이용하여 각 층에서의 응력을 계산하였다. 이를 위하여 각 재료의 응력-변형률 관계가 먼저 정의되어야 하는데 이 연구에서는 콘크리트의 일축응력-변형률 관계는 현재 널리 사용되고 있는 Hognestad의 제안식을 수정하여 적용하였다<sup>9)</sup>.

특히 인장강화효과(tension stiffening effects)를 도입하기 위해 콘크리트 인장축의 변형연화(strain softening)영역을 고려하였는데 이 때 콘크리트 최대 인장변형률은 파괴에너지 개념에 토대를 둔 다음 식에 따라 결정하였다<sup>12)</sup>.

$$\epsilon_{t_0} = \frac{2 \cdot G_f \cdot \ln(3/b)}{f_t \cdot (3-b)} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon_{t_0}$ 는 콘크리트의 최대 인장변형률,  $b$ 는 각 층의 폭 (cm),  $f_t$ 는 콘크리트의 인장강도 (kg/cm<sup>2</sup>)를 각각 나타내고,  $G_f$ 는 파괴 에너지로서 이 연구에서는 0.0894kg/cm를 사용하였다.

또한 강재의 일축응력-변형률 관계는 압축부와 인장부의 거동이 동일한 대칭의 형상을 갖는 선형탄성-완전소성 (linear elastic-perfect plastic) 관계를 사용하였다. 특히 강재의 경우 유일한 비역학적 변형률이 온도변형률이나 이 연구에서는 이를 고려하지 않았으므로 전체 변형률과 역학적 변형률이 같게 되고 따라서 강재의 변형률은 전체 변형률로부터 계산되었다.

### 3. 콘크리트의 시간의존적 변형률

콘크리트의 비역학적 변형률을 구하기 위하여 각 층의 크리프 변형률과 건조수축 변형률이 계산되어야 한다. 이러한 콘크리트의 시간의존적 변형률을 계산하기 위해서 제안된 많은 수치모델 가운데 비교적 간단하면서 응력변화 이력을 효과적으로 나타낼 수 있는 크리프 Compliance 전개에 기본을 둔 1차 순환적 단계 알고리즘 (the first-order algorithm based on expansion of creep compliance)을 도입하였으며 기본식은 다음과 같다<sup>9)</sup>.

$$\Delta \epsilon_n^c = \Delta C(t_n, \tau) \sigma_n = \sum_{i=1}^m A_{i,n-1} (1 - e^{-\Delta t_n / \tau_{n_i}}),$$

$$A_{i,n} = A_{i,n-1} e^{-\Delta t_n / \tau_{n_i}} + a_i(\tau) \Delta \sigma_n \quad (2)$$

여기서  $\tau_n$ 는 지연시간 (retardation time) 이고  $a(\tau)$ 는 재하재령  $\tau$ 에 의존하는 크리프 Compliance 계수이며  $A$ 는 숨겨진 상태변수 (hidden state variables)로서 이 변수를 통해 전 시간단계의 영향이 고려된다. 또한  $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$ 과  $\Delta \sigma_n = \sigma_n - \sigma_{n-1}$ 은 전 해석단계 ( $n-1$ )와 현재 해석단계 ( $n$ )의 시간과

응력증분을 각각 나타내며,  $n=1$ 에서  $A_{i,0}=0$ 이므로  $A_{i,1}=a_i(\tau) \sigma_1$ 이 되고 현 시간단계에서 수정되어 다음 시간단계의 크리프 변형률을 계산하는데 사용된다. 또한 계수  $m$ ,  $a(\tau)$ ,  $\tau_n$ 는 먼저 결정되어야 하는데  $a(\tau)$ 를 제외한 계수의 선택에 있어서는 시행착오법을 사용하였다<sup>11)</sup>. 특히 이 연구에서는 크리프 Compliance를 사용하므로 최소 지연시간을 작은 값으로 가정할 필요가 없기 때문에 다음과 같이  $m$ 은 4와 지연시간은 5, 50, 500, 5000일로 가정되었다. 이 알고리즘은 위의 식에서 알 수 있듯이 시간이력에 대한 모든 정보를 저장할 필요가 없고 전 단계의 하중이력만 저장하면 되므로 계산이 간편하다는 장점이 있다. 또한  $a(\tau)$ 의 값은 Kabir가 제안한 다음 식의 Dirichlet Series Compliance 함수를 이용한 최소 자승법으로 계산되었다<sup>10)</sup>.

$$C(t, \tau) = \sum_{i=1}^m a_i(\tau) [1 - e^{-(t-\tau)/\tau_{n_i}}] \quad (3)$$

건조수축에 의한 변형률의 경우 실제로는 대기와 접하는 단면의 표면에서 크고 중심에서 작은 값을 나타내지만 이 연구에서는 단면의 깊이에 따라 일정하다고 가정하였으며, 응력변화이력에 영향을 받지 않으므로 각 모델식에서 제안된 식을 직접 적용하였다<sup>13)</sup>.

### 4. 요소강성 행렬의 구성

이 연구에서는 그림 1과 같이 단면의 수직축 대칭인 보요소를 이용한 변위법을 바탕으로 요소강성행렬 등 기본적인 식을 유도하였다<sup>11)</sup>. 그림에서 나타낸 바와 같이 각 방향의 변위벡터를 절점변위를 이용하여 표현하면  $\mathbf{u} = \{u_1, u_2\}^T$ ,  $\mathbf{v} =$

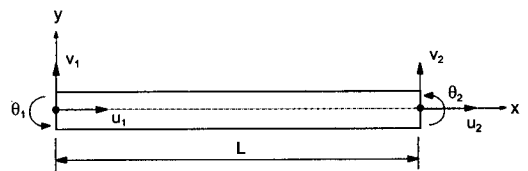


그림 1 평면 보 요소의 변위성분

$\{v_1, v_2\}^T$ ,  $\theta = \{\theta_1, \theta_2\}^T$ 로 나타낼 수 있으며 이를 토대로 보 요소의 전체 변위벡터  $\mathbf{r} = \{\mathbf{u}, \mathbf{v}, \theta\}$ 로 쓸 수 있다.

또한  $x$ -방향의 축방향 변위장  $\mathbf{U}(x)$ 를 선형의 형상함수(shape function)  $\phi$ 로,  $y$ -방향의 변위장  $\mathbf{V}(\mathbf{x})$ 를 3차의 형상함수  $\varphi$ 로 각각 가정하였으며 식으로 나타내면 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{U}(x) = \Phi \cdot \mathbf{u}, \mathbf{V}(x) = \varphi \cdot \begin{Bmatrix} \mathbf{v} \\ \theta \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\Phi = [(1-\xi), \xi], \varphi = [(1-3\xi^2+2\xi^3), (3\xi^2-2\xi^3), L(\xi-2\xi^2+\xi^3), L(-\xi^2+\xi^3)] \quad (5)$$

여기서 무차원 매개변수  $\xi = x/L$ 을 의미하며 보 요소의 임의의 점에서  $x$ -방향 변위  $\mathbf{U}(\mathbf{x}, y)$ 와  $y$ -축 방향의 변위  $\mathbf{V}(\mathbf{x})$ 를 평면단면 가정을 사용하여 절점변위  $\mathbf{r}$ 의 항으로 나타내면 다음 식과 같다.

$$\mathbf{U}(x, y) = [\Phi, -y\varphi_{,x}]\mathbf{r}, \mathbf{V}(x) = [0, \varphi]\mathbf{r} \quad (6)$$

여기서  $\varphi_{,x}$ 는  $\varphi$ 의  $\mathbf{x}$ 에 대한 도함수를 나타낸다. 비선형 변위 효과를 무시한 일반적인 축방향 변형률과 변위와의 관계를 사용하여 변위증분  $\Delta \mathbf{r}$ 에 대한 수직 변형률증분  $\Delta \epsilon$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \epsilon = \frac{d\Delta \mathbf{U}}{dx} = [\Phi_{,x}, -y\varphi_{,xx}] \cdot \Delta \mathbf{r} = \mathbf{B} \cdot \Delta \mathbf{r} \quad (7)$$

여기서  $\mathbf{B}$ 는 변형률-변위 관계 행렬을 나타내며 이를 전개하면 다음 식과 같다.

$$\mathbf{B} = \left[ -\frac{1}{L}, \frac{1}{L}, \frac{6}{L^2}y(1-2\xi), \frac{6}{L^2}y(-1+2\xi), \frac{2}{L}y(2-3\xi), \frac{2}{L}y(1-3\xi) \right] \quad (8)$$

콘크리트 구조물이 시간의존적 거동을 할 때 단면내의 응력변화는 역학적 변형률로부터 계산

되므로 재료의 응력-변형률 관계는 다음의 관계 식으로 나타낼 수 있다.

$$d\sigma = E_T d\epsilon^m = E_T (d\epsilon' - d\epsilon^{mm}) \quad (9)$$

여기서  $E_T$ 는 재료의 탄성계수를, 그리고  $d\epsilon'$ 와  $d\epsilon^{mm}$  및  $d\epsilon^m$ 은 임의의 순간에서 전체 변형률, 역학적 변형률 및 비역학적 변형률의 증분을 각각 표시한다.

한편 에너지 보존원리와 미소변형에 따른 가상 일의 원리를 통해 다음의 외부 절점하중 증분 또는 내력증분  $\Delta \mathbf{R}'$ 와 내부 응력변화  $\Delta \sigma$ 와의 관계 식을 구할 수 있으며 유도된 변위-변형률 관계식 (식(7) 참조), 응력-변형률 관계식 (식(9) 참조)을 사용하여 임의의 순간에서의 평형방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} d\mathbf{R}' &= \int_V \mathbf{B}^T d\sigma dV = \int_V \mathbf{B}^T (E_T \mathbf{B} d\mathbf{r} - E_T d\epsilon^{mm}) dV \\ &= \int_V \mathbf{B}^T E_T \mathbf{B} dV \cdot d\mathbf{r} - \int_V \mathbf{B}^T E_T d\epsilon^{mm} dV \quad (10) \end{aligned}$$

이 때 식(10)의 우측에 위치한 비역학적 변형률에 의한 등가 외력항을  $d\mathbf{R}^{mm}$ 으로 표시하여 위의 식을 간략히 나타내면 다음의 힘-변위 평형관계 식을 구할 수 있다.

$$d\mathbf{R} = d\mathbf{R}' + d\mathbf{R}^{mm} = \mathbf{K} d\mathbf{r} \quad (11)$$

여기서  $\mathbf{K} = \int_V \mathbf{B}^T E_T \mathbf{B} dV$ 는 요소 강성행렬을 의미한다.

식(11)을 계산하기 위하여 체적에 대한 적분이 요구되는 데 이 연구에서는 수치적분 방법 중에 하나인 3점 가우스 적분법과 적층단면의 특성을 이용하여 다음 요소강성행렬을 유도하였다.

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} a_1 & a_8 & a_9 & -a_1 - a_8 & a_{10} & \\ & a_2 & a_3 & a_8 & -a_2 & a_7 \\ & & a_4 & a_9 & -a_3 & a_6 \\ & & & a_1 & a_8 & -a_{10} \\ sym. & & & & a_2 & -a_7 \\ & & & & & a_5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

이때 식 (12)에서 사용된 기호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{1}{2L}EA\sum_{k=1}^3w_k & a_2 &= \frac{18}{L^3}EI\sum_{k=1}^3(2\xi_k-1)^2w_k \\
 a_3 &= \frac{6}{L^2}EI\sum_{k=1}^3(2\xi_k-1)(3\xi_k-2)w_k \\
 a_4 &= \frac{2}{L}EI\sum_{k=1}^3(3\xi_k-2)^2w_k \\
 a_5 &= \frac{2}{L}EI\sum_{k=1}^3(3\xi_k-1)^2w_k \\
 a_6 &= \frac{2}{L}EI\sum_{k=1}^3(3\xi_k-1)(3\xi_k-2)w_k \\
 a_7 &= \frac{6}{L^2EI}\sum_{k=1}^3(3\xi_k-1)(2\xi_k-1)w_k \\
 a_8 &= \frac{3}{L^2}EQ(1-2\xi_k)w_k \\
 a_9 &= \frac{1}{L}EQ\sum_{k=1}^3(2-3\xi_k)w_k \\
 a_{10} &= \frac{1}{L}EQ\sum_{k=1}^3(1-3\xi_k)w_k
 \end{aligned} \tag{13}$$

여기서  $k$ 는 가우스 점을 표시하며  $\xi_k$ 와  $w_k$ 는  $k$ -번째 가우스 점의 위치와 가중치를 각각 나타내고  $\xi_1=0.11$ ,  $\xi_2=0.50$ ,  $\xi_3=0.89$ 와  $w_1=5/9$ ,  $w_2=8/9$ ,  $w_3=5/9$ 의 값이다. 또한  $A$ ,  $Q$ ,  $I$ 는 해당 요소에서 단면의 면적, 단면의 1차 모멘트, 단면의 2차 모멘트를 각각 나타내며 그림 2의 적층단면을 이용하여 다음과 같이 계산되었다.

$$\begin{aligned}
 \int_A E_T dA &= EA \\
 &= \frac{1}{2}\sum_{k=1}^3\left(\sum_{i=1}^n E_{c_i} A_{c_i} + \sum_{j=1}^n E_{s_j} A_{s_j}\right) \cdot w_k
 \end{aligned} \tag{14}$$

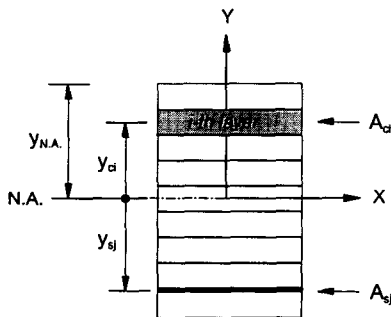


그림 2 적층단면

$$\begin{aligned}
 -\int_A E_T y dA &= EQ \\
 &= -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^3\left(\sum_{i=1}^n E_{c_i} y_{c_i} A_{c_i} + \sum_{j=1}^n E_{s_j} y_{s_j} A_{s_j}\right) \cdot w_k
 \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned}
 \int_A E_T y^2 dA &= EI \\
 &= \frac{1}{2}\sum_{k=1}^3\left(\sum_{i=1}^n E_{c_i} y_{c_i}^2 A_{c_i} + \sum_{j=1}^n E_{s_j} y_{s_j}^2 A_{s_j}\right) \cdot w_k
 \end{aligned} \tag{16}$$

여기서  $c$ 는 콘크리트,  $s$ 는 철근을 각각 표시하며,  $n$ 은 해당 재료의 총 층수를 나타낸다.

### 5. 해석과정

구성된 강성행렬과 절점하중을 이용하여 구조물을 해석함에 있어서 이 연구에서는 하중 증분법과 반복법을 함께 사용하는 복합법 (combined method) 이 적용되었다<sup>4)</sup>. 또한 각 하중단계에서 반복해석의 수렴여부를 판단하기 위해 사용한 수렴규준은 모든 절점 중에서 불균형 하중의 최대 수직력과 최대 모멘트를 구하여 각각의 수렴규준과 비교하는 방법이 적용되었는데 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$|F_{unbal}^{max}| \leq Tol_f, |M_{unbal}^{max}| \leq Tol_m \tag{17}$$

여기서  $|F_{unbal}^{max}|$ 와  $|M_{unbal}^{max}|$ 는 최대 불균형하중의 수직력과 모멘트의 절대값을 각각 표시하고  $Tol_f$ 와  $Tol_m$ 는 각각 수직력과 모멘트의 수렴규준값을 표시한다. 각 하중 단계에서 작용하는 외력은 식 (11)과 같이 절점의 외부하중 (nodal forces)과 비역학적 변형률에 의한 등가하중으로 구성되며, 여기에 이전 해석단계의 수렴후 존재하는 미소의 잔류력 (residual forces)이 추가된다. 이러한 일련의 해석과정을 그림으로 나타내면 그림 3과 같다.

### 6. 수치예제

#### 6.1 해석모델의 검증

이 연구에서 제안된 해석모델을 검증하기 위하여 그림 4에 나타난 단순보의 장기거동이 해석되었다.

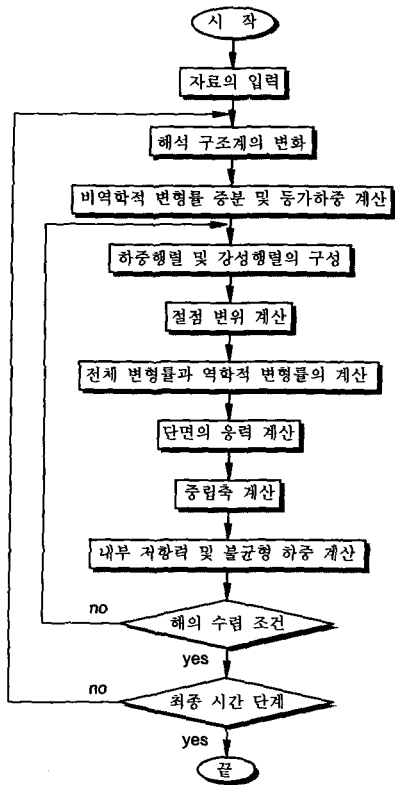
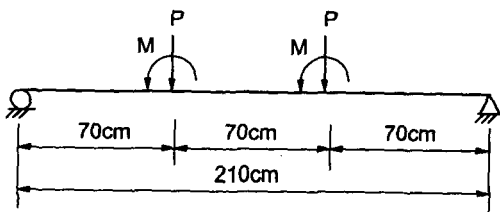
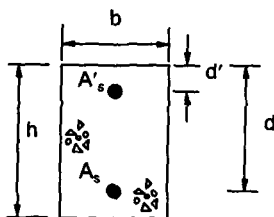


그림 3 해석 흐름도



(a) 실험보



(b) 단면

그림 4 검증용 해설보

이 단순보는 Clarke등이 실험한 것으로 보의 1/3점에 수직 집중하중과 모멘트 하중이 작용하며 180일에서 중앙점 처짐이 측정되었다. 단면치수 및 실험 조건은 표 1에 나타내었다.

표 1의 콘크리트 압축강도, 탄성계수, 극한 크리프계수는 표준 공시체 시험으로부터 측정된 값이 사용되었다. 해석결과 및 실험결과는 하중이 작용할 때 보의 중심에서 순간처짐과 180일 경과후 처짐으로 나타내었으며, 하중은 콘크리트 재령 28일에서 작용되었다. 해석결과의 비교를 위해 다른 연구자의 해석결과도 표 2에 함께 나타내었다.

해석결과를 살펴보면 순간처짐의 경우 이 연구의 해석결과가 실험값과 매우 잘 일치하고 있으나 장기처짐에서는 약간의 차이가 발생하고 있다. 이러한 원인으로서는 실험조건에 건조수축의 영향이

표 1 단면치수

대상구조물	A1	A2	B1	B2
b (cm)	10.0	10.0	10.0	10.0
d' (cm)	2.0	2.0	2.0	2.0
d (cm)	13.2	13.0	13.0	13.2
h (cm)	15.4	15.2	15.2	15.4
A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> )	1.6	1.6	1.6	1.6
A' (cm <sup>2</sup> )	-	-	1.6	1.6
P (kg)	510.2	510.2	510.2	510.2
M (kg-cm)	35714.3	35714.3	35714.3	35714.3
f' (kg/cm <sup>2</sup> )	213.9	213.9	213.9	213.9
E <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	2.2×10 <sup>5</sup>	2.2×10 <sup>5</sup>	2.2×10 <sup>5</sup>	2.2×10 <sup>5</sup>
E <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	2.1×10 <sup>6</sup>	2.1×10 <sup>6</sup>	2.1×10 <sup>6</sup>	2.1×10 <sup>6</sup>
φ <sub>c</sub>	2.26	2.26	2.26	2.26

표 2 해석결과의 비교

		A1	A2	B1	B2
순간처짐 (mm)	This Study	4.77	4.96	4.41	4.20
	Test	4.89	5.09	4.78	4.30
장기처짐 (mm)	Branson	13.96	14.58	9.87	9.45
	Mayer	7.85	8.22	5.94	5.69
	BS 8110	7.80	8.11	5.89	5.67
	Clarke et al.	8.75	9.08	7.07	6.82
	This Study	9.30	9.74	7.01	6.73
	Test	9.28	9.37	8.15	7.93

제시되지 않아 이 연구의 해석에서는 건조수축의 영향을 고려될 수 없었다. 따라서 건조수축에 의한 영향이 실험결과에 포함되었을 것이며 또한 장기처짐의 경우 보의 자중도 지속하중으로 작용하기 때문에 자중에 의한 장기처짐의 영향을 고려하는 방법의 차이 때문으로 판단된다. 참고로 이 연구의 해석에서 보의 자중은 일반적으로 사용되는 철근 콘크리트의 단위중량인 2.5t/m<sup>3</sup>으로 가정되었다. 다른 해석방법에 의한 결과와 비교해 볼 때 이 연구에서 제안한 해석모델이 실험결과와 매우 근접한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다.

6.2 기둥의 부등축소량 예측

구조물의 내측기둥과 외측기둥은 상재하중의 크기와 기둥이 접하는 외기환경이 다르게 된다. 즉 내측기둥의 경우 기둥의 양쪽 슬래브에서 작용하는 하중에 의하여 외측기둥보다 더 큰 하중이 작용하게 되며 또한 실내에 존재하기 때문에 더 건조하고 높은 온도와 접하게 되므로 온도가 높고 건조한 외기조건에서 콘크리트의 크리프와 건조수축량은 더 크게 발생하게 되므로 설계를 위한 크리프와 건조수축변형률을 실내와 실외에 대하여 다르게 적용하고 있다. 즉 실내의 경우 극한 크리프계수와 건조수축 변형률은 3과 300×10<sup>-6</sup>으로, 실외의 경우는 2와 200×10<sup>-6</sup>으로 각각 규정하고 있다<sup>1)</sup>. 따라서 이 연구에서는 외측기둥과 내측기둥의 축소량과 부등축소량을 각각 계산함으로써 그 영향을 알아 보았다.

구조물 기둥의 축소는 기둥타설후 보와 슬래브를 설치하기 전에 발생하는 축소와 설치후 발생하는 축소로 크게 나눌 수 있다. 철근 콘크리트 프레임 구조의 경우 보에 대한 거푸집을 설치하기 전에 수평레벨을 조정하기 때문에 보를 설치한 후에 발생하는 기둥축소량이 중요하게 되며 이에 대한 보정이 필요하게 된다<sup>2)</sup>. 이를 위하여 해석에 사용한 기둥으로는 참고문헌 3의 52층 Amatapura Apartment의 세 기둥으로 C3와 C4는 외기에 접하며 C5는 두 기둥사이에 위치하고 있다<sup>3)</sup>. 콘크리트의 해석모델은 ACI모델을 사용하였으며 각 기둥의 단면치수 및 해석조건은 표 3과

표 3 기둥 해석조건

(a) C3 기둥

층	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	전체 면적 (cm <sup>2</sup> )	철근 면적 (cm <sup>2</sup> )	층사 하중 (ton)	추가사 하중 (ton)	극한 크리프 계수	극한건조 수축 변형률
0~1 1~5	596.4	16000.0 12000.0	201.3 161.0	13.7 18.6	4.6 6.2	1.72	0.0008
5~7 7~24 24~26	497.0	12000.0	161.0 120.6 140.8	18.6	6.2	1.88	
26~29 29~31 31~34	397.6	9000.0	201.3 160.1 100.6	17.1	5.7	2.11	
34~39 39~47 47~48	298.2	9000.0	100.6 63.2 63.2	17.1	5.7	2.43 2.43 2.46	
48~49			63.2			2.55	
49~51			63.2			2.72	
51~52			63.2			3.04	
52~HP			63.2			4.01	

(b) C4 기둥

층	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	전체 면적 (cm <sup>2</sup> )	철근 면적 (cm <sup>2</sup> )	층사 하중 (ton)	추가사 하중 (ton)	극한 크리프 계수	극한건조 수축 변형률
0~1 1~2 2~5	596.4	16000.0 12000.0 12000.0	241.5 201.3 161.0	13.7 22.9 19.9	4.7 7.9 6.9	1.72	0.0008
5~10 10~16 16~26	497.0	12000.0	161.0 201.3 241.5	19.9	6.9	1.88	
26~27 27~31 31~34	397.6	9000.0	120.8 120.8 100.6	19.9 17.7 17.7	6.9 6.1 6.1	2.11	
34~39 39~47 47~48	298.2	9000.0	100.6 63.2 63.2	17.7	6.1	2.43 2.43 2.46	
48~49			63.2			2.55	
49~51			63.2			2.72	
51~52			63.2			3.04	
52~HP			63.2			4.01	

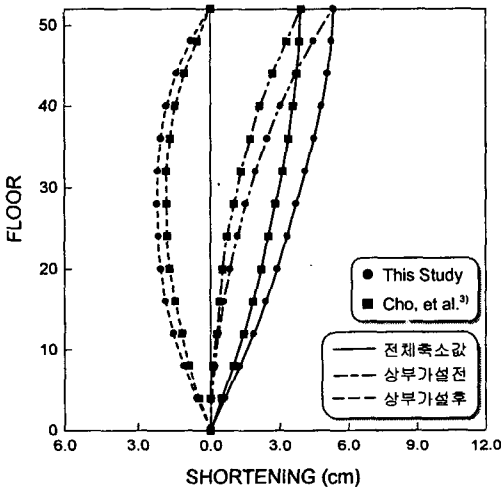
(c) C5 기둥

층	f <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	전체 면적 (cm <sup>2</sup> )	철근 면적 (cm <sup>2</sup> )	층사 하중 (ton)	추가사 하중 (ton)	극한 크리프 계수	극한건조 수축 변형률
0~1 1~2 2~5	596.4	8103.2 5400.0 5400.0	80.5	6.9 20.8 18.8	2.4 7.2 6.5	1.72	0.0008
5~26	497.0	5400.0	60.4	18.8	6.5	1.88	
26~27 27~34	397.6	3503.2	80.5	18.8 17.4	6.5 6.0	2.11	
34~39 39~45 45~46	298.2	3503.2	60.4 34.2 25.8	17.4	6.0	2.43 2.43 2.43	
39~47			25.8			2.43	
46~48			25.8			2.46	
48~49			25.8			2.55	
49~51	25.8	2.72					
51~52	25.8	3.04					
52~HP			25.8			4.01	

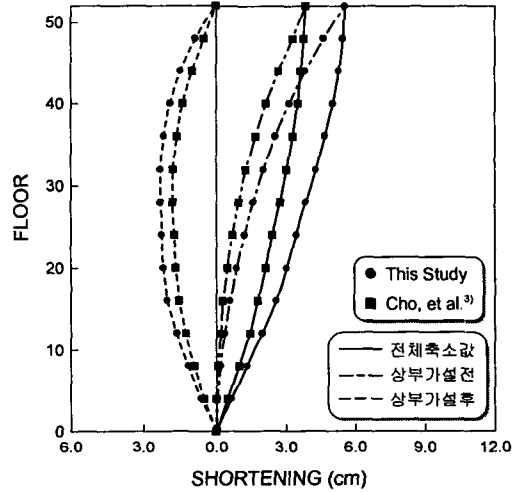
같고 평면도는 참고문헌 3에 표시되었다. 각층의 높이는 3m이고 시공속도는 5일/층이며 추가사하중은 건설 최상층의 20층하부에서부터 적용되었다. 또한 시공활하중은 3.9ton이 적용되었다.

그림 5에 표시된 해석결과를 살펴보면 외측에 위치하는 C3기둥과 C4기둥의 축소량은 거의 일치하고 있으나 내측에 위치하는 C5기둥의 축소량은 상당히 크게 나타내고 있다. 즉 각 기둥의

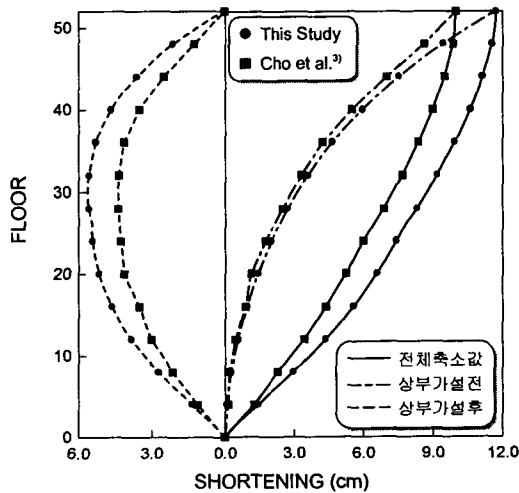
최대 축소량을 살펴보면 C3기둥은 5.35cm, C4기둥은 5.56cm, C5기둥은 11.72cm를 각각 나타내고 있다. 또한 상부 가설후 축소량은 세 기둥 모두 31층에서 최대값을 나타내는데 C3기둥은 2.18cm, C4기둥은 2.29cm, C5기둥은 5.63cm를 각각 갖는다. 이 결과에 따르면 중간 내측기둥이 양 외측기둥보다 최대 약 2.5배정도 크게 나타나는 것으로 양 기둥사이의 부등축소량이 크게 발생함을 알



(a) C3기둥



(b) C4기둥



(c) C5 기둥

그림 5 각 기둥의 축소량



수 있다. 동일한 예제에 대한 다른 연구결과<sup>3)</sup>와 비교해 볼 때 이연구의 해석값이 다소 크게 나타나고 있는데 이 연구에서는 건조수축모델로 ACI 모델을 사용함으로써 건조수축효과가 더 크게 고려된 것으로 판단된다<sup>13)</sup>.

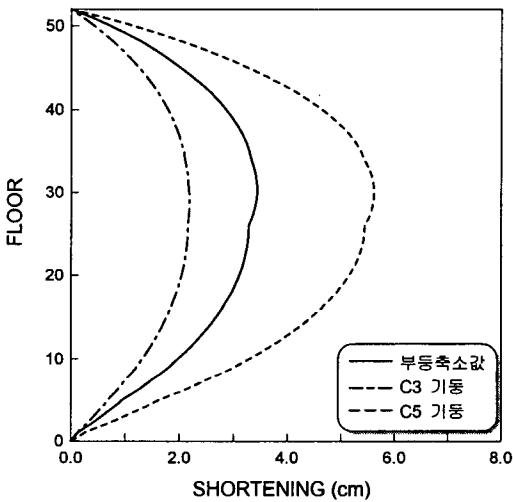
그림 6은 실제 구조계의 시공시 보정되는 축소량인 상부 구조계의 가설후 축소량과 외측기둥과 내측기둥의 부등축소량에 대한 결과이다. 해석결과

에 의하면 31층에서 모두 최대 부등축소량을 나타내는데 C3-C5는 3.45cm, C4-C5는 3.34cm를 각각 나타내고 있다. C4기둥의 경우 C3기둥보다 31층에서 철근량이 더 작으므로 단면의 강성이 더 작게 되고 축소량이 C4기둥의 축소량이 더 크게 되어 C4-C5기둥의 부등축소량이 C3-C5기둥의 부등축소량보다 더 작게 나타나고 있다.

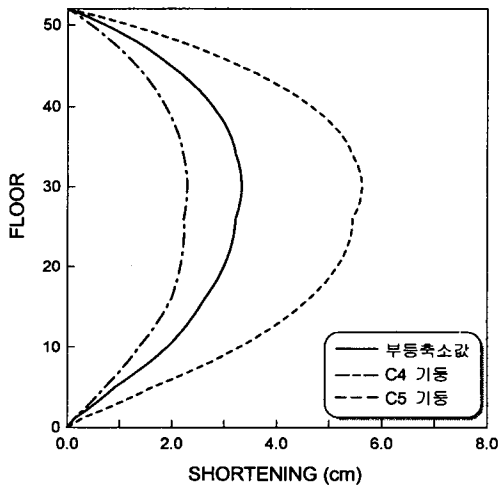
### 6.3 10층 평면 철근 콘크리트 프레임 구조

앞의 예제는 시공단계에 따라 발생하는 기둥축소와 부등축소에 대하여 다루었으나 이 예제에서는 전체 10층 철근 콘크리트 프레임 구조를 현재 설계에서 사용하고 있는 방법과 시공단계를 고려하여 해석함으로써 그 효과를 알아 보았다. 해석 구조계는 그림 7과 같고 보와 기둥단면의 치수는 표 4와 같다<sup>6)</sup>.

보는 복철근 단면으로 콘크리트 피복은 4cm로 가정하였고 기둥의 경우는 단면중심에 철근이 위치한다고 가정되었다. 콘크리트의 설계강도는 400kg/cm<sup>2</sup>, 철근의 강도는 4000kg/cm<sup>2</sup>으로 가정



(a) C3-C5 기둥



(b) C4-C5 기둥

그림 6 내외측 기둥간의 부등축소량

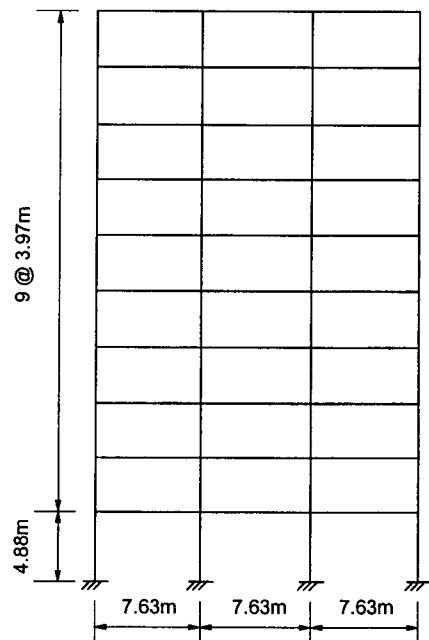


그림 7 10층 평면 철근 콘크리트 프레임 구조

표 4 부재단면 치수

층	폭×높이	전체 단면적	상부철근 면적	하부철근 면적
(a) 보				
10	22.5×57.5	1293.8	29.8	29.8
9~7	22.5×60.0	1350.0	31.1	31.1
6~4	25.0×62.5	1562.5	35.9	35.9
3~1	25.0×65.0	1625.0	37.4	37.4
(b) 기둥				
10~7	25.0×40.0	1000.0	40.0	-
6	25.0×42.5	1062.5	42.5	-
5	25.0×47.5	1187.5	47.5	-
4~3	27.5×50.0	1375.0	55.0	-
2	27.5×52.5	1443.8	57.8	-
1	32.5×60.0	1950.0	78.0	-

되었으며 철근비는 일반적으로 사용되는 값인 기둥의 경우 0.04, 보의 경우는 0.023이 사용되었다<sup>2)</sup>. 콘크리트의 극한 크리프계수와 극한 건조수축 변형률은 실내에 위치하는 보와 내측기둥의 경우 3과  $300 \times 10^{-6}$ 으로, 실외에 위치하는 외측기둥의 경우는 2와  $200 \times 10^{-6}$ 으로 각각 가정되었다. 사하중은 철근 콘크리트의 단위중량을  $2.4t/m^3$ 으로 가정하여 계산되었으며 보의 상부에 설치되는 슬래브의 효과는 분포하중으로 적용되었는데 기둥간격이 7.63m이고 두께가 12cm이므로  $w_{slab} = 763 \times 12 \times 0.0024 = 22.0kg/cm$ 이 적용되었다. 시공속도는 앞의 예제와 같이 5일/층으로 가정되었으며 슬래브는 기둥 타설 후 20일 이후에 시공하는 것으로 가정되었다.

그림 8은 동일한 예제를 해석한 다른 연구결과<sup>6)</sup>와 이 연구의 해석결과를 내측 기둥의 축소량으로 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 이 연구의 해석결과가 더 크게 나타났는데 앞선 연구의 경우 철근비 등이 주어지지 않았으므로 동일한 해석은 불가능하였다. 그러나 전체적인 기둥축소의 경향은 유사하게 나타나고 있다.

그림 9와 10은 해석구조계를 전체 완성된 상태로 가정한 경우와 시공단계를 고려한 경우에 대해 해석한 결과를 비교한 것으로 시공단계 효

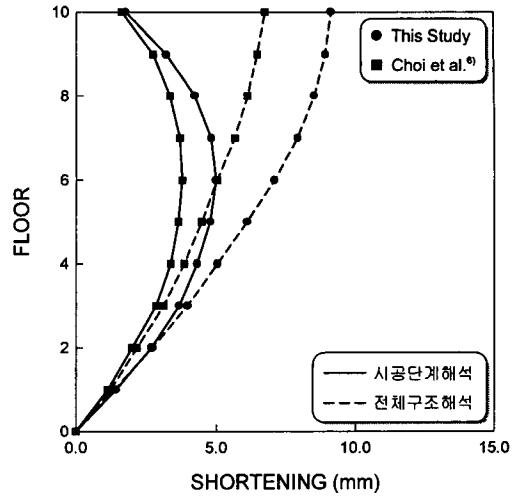


그림 8 앞선 연구와의 비교(내측기둥의 축소) 그림

과만을 알아 보기 위하여 두 경우 모두 콘크리트 재령 28일에 하중이 작용하는 경우에 대하여 해석된 것으로 콘크리트의 시간의존적 변형은 고려되지 않았다. 해석결과를 살펴보면 먼저 그림 9의 경우 각 층에 슬래브가 타설되기 전에 발생하는 기둥의 축소량까지 포함된 전체 기둥축소의 경우를 나타내었다. 전체구조계 해석의 경우 상부에 존재하지 않는 층의 영향이 고려되는 경우로써 이러한 상부층의 기둥으로 인한 강성증가가

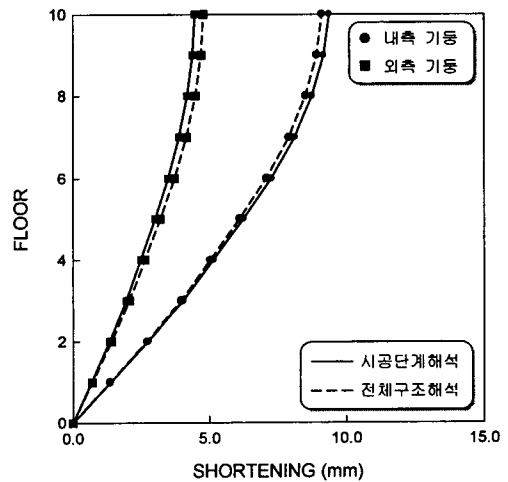


그림 9 전체 기둥축소량의 비교

외측기둥의 경우가 상대적으로 내측기둥보다 크기 때문에 하중분배가 더 크게 되므로 기둥의 축소도 시공단계를 고려한 경우보다 크게 되고 이와 반대로 내측기둥의 경우는 더 작게 된다. 그러나 실제의 구조계 시공에 있어서는 각 층의 슬래브가 타설되기전에 발생하는 기둥축소량은 보정되므로 기둥축소에 의해 발생하는 응력에는 영향을 나타내지 않는다. 이에 대한 효과를 나타내기 위하여 그림 10에 해석결과를 나타내었다. 해석결과를 살펴 보면 시공단계를 고려한 경우의 축소량이 전체 구조계를 해석한 경우보다 작게 나타나고 있다. 또한 최대 처짐의 경우에 있어서 전체 구조계를 해석하는 경우 각 층의 축소량이 누적되므로 최상층에서 가장 크게 나타나지만 시공단계를 고려한 해석에서는 7층에서 최대 축소량이 발생하고 있다. 이는 7층의 경우 기둥의 단면이 작은 데 비해 7층 기둥과 연결되는 보의 단면이 상대적으로 크므로 기둥에 작용하는 응력이 상대적으로 크기 때문이다.

콘크리트의 시간의존효과를 고려한 해석결과인 그림 11을 살펴보면 시공단계가 고려되는 경우 콘크리트 재령 5일에서 하중이 재하되므로 기둥의 탄성축소량은 증가하게 되며 크리프 변형은 탄성변형에 비해하므로 크리프에 의한 기둥축소도 증가하게 된다. 따라서 그림 10과는 반대로

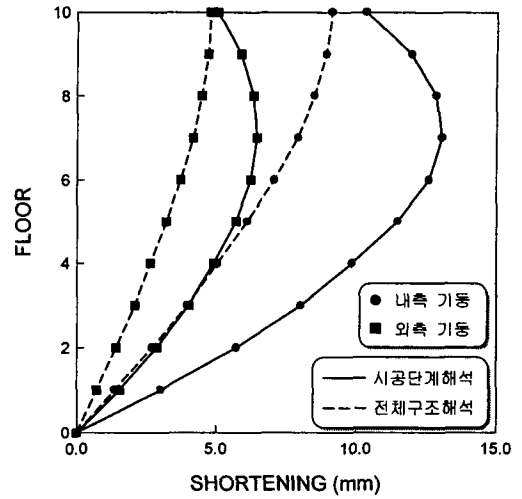


그림 11 시간의존효과를 고려한 기둥축소

시공단계를 고려한 해석의 기둥축소가 증가함을 나타내고 있다. 또한 전체 구조계로 해석하는 경우 그림 10의 결과를 사용하였기 때문에 콘크리트의 시간의존효과는 포함되지 않았다. 따라서 그림 12에는 시공단계를 고려한 해석에서 구조계가 완성되는 시간 65일까지 전체 구조계의 해석에 대하여 시간해석을 수행한 결과를 나타내었다.

그림 12는 전체구조를 가정한 해석의 경우 모든 부재는 28일에 하중이 작용하여 65일까지 지

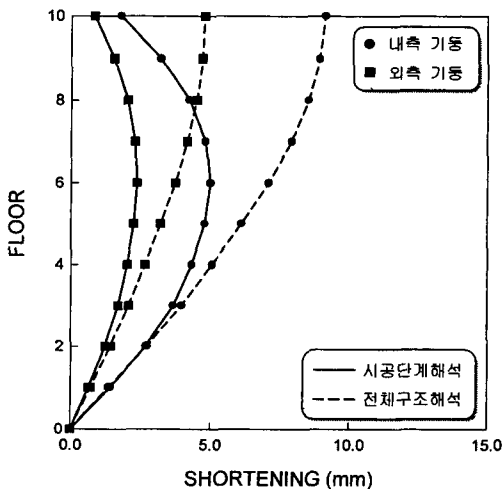


그림 10 시공단계 효과만을 고려한 기둥축소

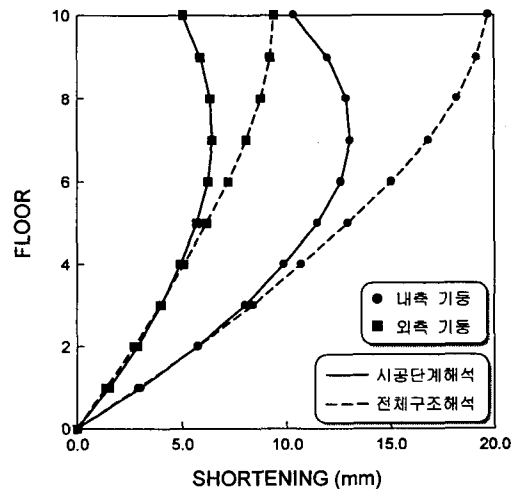


그림 12 시공이 완료될 때 기둥축소

속되게 되므로 37일의 재하기간을 갖게 된다. 반면에 시공단계를 고려한 해석의 경우 각 기둥이 시공되는 시간이 다르기 때문에 1 층의 경우 최대 65일의 재하기간을 갖으나 최상층에서는 최상부 슬래브가 타설되는 시간간격인 20일을 갖게 된다. 또한 전체 구조계로 해석하는 경우 보의 자중과 슬래브 하중이 동시에 작용하므로 한번에 작용하는 지속 사하중은 더 크게 된다. 따라서 재하기간의 큰 하부 층에서는 시공단계를 고려한 해석의 기둥축소가 더 크게 나타나는 반면 재하기간의 작은 상부 층에서는 재하기간이 더 큰 전체 구조계 해석의 기둥축소가 더 크게 나타나고 있다.

그림 13에는 시공단계를 고려한 내측 기둥의 축소를 콘크리트의 크리프만 고려할 때, 건조수축만 고려할 때, 모두 고려할 때, 모두 고려하지 않을 때로 각각 해석한 결과를 나타내었다. 콘크리트의 시간의존효과를 고려하는 경우가 고려하지 않은 경우에 약 2.5배정도 큰 기둥축소가 발생하고 있다. 특히 콘크리트의 시간의존효과 중에서도 크리프의 경우가 건조수축보다도 기둥축소에 지배적임을 나타내고 있다.

이 예제의 경우 Bay수가 3이므로 내측기둥과 외측기둥의 차이가 곧 부재력의 차이를 나타내게 되므로 그림 14는 지금까지 해석결과를 토대로

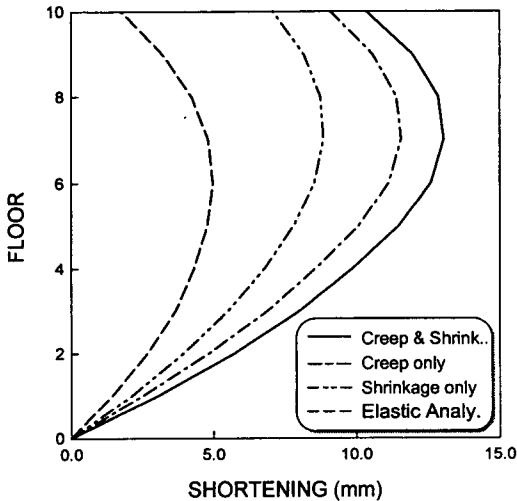


그림 13 콘크리트의 시간의존적 효과에 따른 기둥축소의 비교

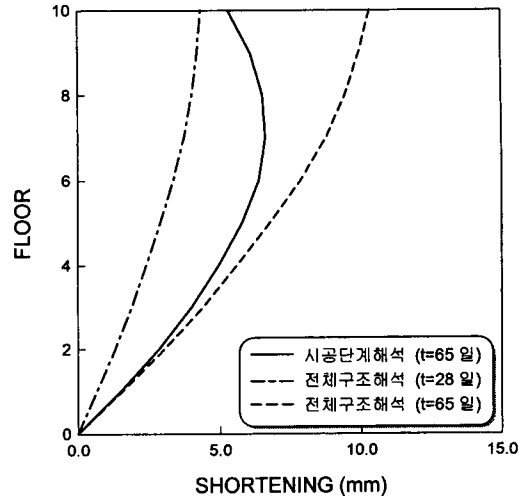


그림 14 내, 외측 기둥의 부등축소

내측 기둥과 외측 기둥의 부등축소량에 대하여 나타내었다. 해석결과를 살펴보면 시간효과를 고려하지 않고 전체구조계로 해석하는 경우 기둥의 부등축소량을 과소평가하게 되며 구조계가 완공된 후 콘크리트의 시간의존효과에 의하여 매우 큰 부등축소량이 발생하게 됨을 알 수 있다. 이러한 내측 기둥과 외측 기둥의 축소량 차이로 인해 발생하는 기둥의 부등축소량은 기둥과 연결된 보 및 슬래브, 벽체 등에도 부등변위를 발생시키게 되고 부재내 2차 응력을 유발하여 균열뿐만 아니라 사용성에도 문제를 일으키게 되므로 특별한 관리가 필요한 부분이 된다.

끝으로 그림 15에는 전체 프레임을 해석할 때의 기둥축소와 기둥만을 해석한 경우의 기둥축소를 나타내었다. 해석결과를 살펴보면 기둥만을 해석하는 경우의 축소량이 더 작게 나타나고 있다. 이는 프레임 해석의 경우 시공중 발생하는 내측기둥과 외측기둥의 부등축소에 따른 영향이 고려되므로 기둥의 부재력이 기둥해석보다 증가하게 된다. 즉 기둥해석의 경우 외력이 일정하면 콘크리트의 시간의존 효과는 단면내 응력재분배를 발생시키나 부재력의 변화는 유발시키지 않기 때문이다.

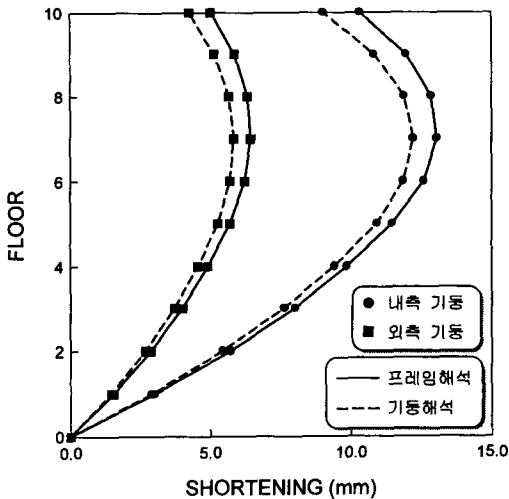


그림 15 기동만을 고려한 해석과의 비교

### 7. 결 론

지금까지 콘크리트 프레임 구조물의 해석에 있어서 시공단계를 고려하는 효과에 대하여 알아보았다. 이를 위하여 먼저 고층 건물의 기동을 해석함으로써 내측과 외측에 존재하는 기동의 축소와 부등축소의 양이 해석되었다. 다음으로 10층 콘크리트 구조물을 시공단계를 고려한 경우와 고려하지 않고 전체구조계로 해석하는 경우에 대하여 각 해석결과가 비교, 검토되었다. 이 해석의 결과로부터 콘크리트의 시간의존적 거동을 고려하지 않는 전체구조계 해석의 경우 각 기동의 축소는 물론 내측 기동과 외측 기동의 축소량차이에 의해 발생하는 부등축소량을 과소평가하는 것으로 나타나고 있다. 또한 전체 구조계를 해석하는 경우 기동축소의 누적으로 최상부 층에서 최대 축소량과 최대 부등축소량이 발생하였으나 시공단계를 고려한 해석에서는 중간 층에서 각각의 최대값이 발생하였다. 특히 시공단계를 고려한 해석일지라도 콘크리트의 시간의존적 거동을 고려하지 않는다면 전체구조계로 가정한 해석보다 더 작은 기동축소가 발생되었다.

따라서 이 논문에서는 콘크리트의 시간의존적 거동과 시공단계를 고려한 콘크리트 프레임 구조의 해석의 타당성과 필요성을 나타내었으며 고층

건물과 같이 이러한 효과들이 더 크게 나타나는 구조물에서는 설계 및 해석에서 이들 효과를 반드시 고려해야 한다.

### 감사의 말

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 : 971-1203-012-2) 지원으로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

1. 문한영, 건설재료학, 동명사, 1994
2. 변동균, 신현묵, 문제길, 철근콘크리트, 동명사, 1994
3. 조창휘, 송진규, 이현호, 조석희, 고층건물 기동의 부등축소량 예측 및 시공오차 보정에 관한 연구, 한국전산구조공학회 가을 학술발표회 논문집, 1996, pp.258~266
4. 최창근, 유한요소해석, 집문당, 1992
5. ASCE, *State-of-Art Report on Finite Element Analysis of Reinforced Concrete*, New York, 1982
6. Choi, C. K. and Kim, E. D., "Multistory Frames under Sequential Gravity Loads", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol. 111, No.11, Nov., 1984, pp.2373~2384
7. Clarke, G. S., H. Scholz, and M. Alexander, "New Method to Predict the Creep Deflection of Cracked Reinforced Concrete Flexural Members", *ACI Materials Journal*, 1988, pp.95~101
8. Fintel, M. and Ghosh, S. K., High-Rise Design: Accounting for Column Length Change, *Civil Engineering, ASCE*, 1984, pp. 55~59
9. Hognestad, E., "A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Member", *Bulletin No. 399*, Engineering Experiment Station, UNIV. of Illinois, Urbana, Illinois 49 (22), 1951

10. Kabir, A. F., "Nonlinear Analysis of Reinforced Concrete Panels, Slabs and Shells for Time Dependent Effects", *Report No. UC-SEEM 76-6*, UNIV. of California, Berkeley, 1976
11. Kang, Young-Jin, "Nonlinear Geometric, Material and Time Dependent Analysis of Reinforced and Prestressed Concrete Frame", *Report No. UC-SEEM 77-1*, UNIV. of California, Berkeley, 1977
12. Kwak, H. G. and Filippou, F. C., "Nonlinear FE Analysis of R/C Structures under Monotonic Loads", *Comput. Struct.*, Vol. 65, No.1, 1997, pp.1~16
13. Neville, A. M., Dilger, W. H. and Brooks, J. J., *Creep of Plain and Structural Concrete*, Construction Press, London, 1983  
(접수일자 : 1999. 2. 12)