

장기변형 및 시공 단계별 재하를 고려한 고층건물의 구조해석 기법



송진규*



이현호*

1. 서론

콘크리트는 구조재료로서 가장 널리 사용되어 왔으며 이에 대한 많은 연구가 있었으나 콘크리트의 정확한 특성, 특히 재료의 비탄성적인 거동을 정확히 평가하는 것은 매우 어렵고 복잡하다. 비탄성 변형은 탄성변형과는 달리 시간의 함수이며, 콘크리트의 배합, 환경조건 등에 크게 좌우된다. 이러한 철근콘크리트 재료로 이루어진 고층건물에서는 탄성변형 및 비탄성변형으로 인해 발생하는 기동간 부동축소량이 구조물에 구조적 혹은 비구조적인 손상을 유발시킬 수도 있다. 따라서 고층건물의 설계 및 시공시 이를 적절히 고려하기 위해서는 콘크리트 재료의 비탄성적인 성질을 고려하여 시공단계별로 해석이 이루어져야 하는데, 현재까지 국내에는 해 주어야 하지만 현재까지 국내에는 재료적 비탄성 성질과 시공단계를 고려한 해석 프로그램이 개발되어 있지 않

으며 이 분야에 대한 연구도 미미한 실정이다. 본 연구에서는 탄성수축, 크립, 건조수축을 고려하여 시공단계별로 고층건물의 비탄성 거동을 예측할 수 있는 해석 프로그램을 개발하였으며 이에 대한 주요 내용을 정리하면 그림 1과 같다.

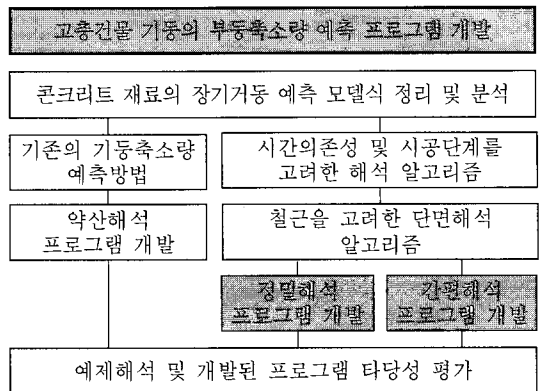


그림 1 Research scope

* 정희원·현대건설 기술연구소, 선임연구원

2. 장기거동 예측 모델식

2.1 ACI 모델식¹⁾

ACI 모델식은 ACI Committee 209에 의해 제시된 것으로 이 위원회의 연구보고서에 수록되어 있다. 이 모델식은 일반적인 환경에 놓인 철근 콘크리트 구조물에 적용할 수 있으며 특수한 환경, 예를 들면 매스 콘크리트 구조물 또는 높은 열을 받는 구조물 등에는 적용할 수 없다.

2.2 CEB-FIP 모델식(1978)²⁾

이 모델식은 CEB-FIP 1970 식을 개선한 것으로 작용응력이 압축강도의 40%보다 작은 경우 적용 가능한 것으로 되어있다. 크리프에 대한 CEB-FIP 모델식은 여러 요인의 합산형태로 되어 있다.

즉 초기탄성변형, 첫 1일간의 회복되지 않은 변형, 지연된 탄성변형 및 회복되지 않은 소성변형 등의 합으로 나타내고 있다.

2.3 CEB-FIP 모델식(1990)³⁾

이 모델식은 압축력을 받는 경우 이용될 수 있는 것이나 인장력에 대해서도 큰 오차없이 적용 가능하다. 이 모델식을 이용하기 위해서 필요한 조건은^{1)~3)}과 같으며, 보다 정확한 보정을 위한 조항은^{4)~5)}와 같다.

- 1) 콘크리트의 평균 압축강도 또는 설계기준 압축강도
- 2) 부재크기 및 주위공기의 평균 상대습도
- 3) 재하시의 재령 및 건조시작 재령, 재하기간
- 4) 시멘트 종류 및 양생온도, 온도변화
- 5) 작용하중이 $0.4f'_{cm}(t')$ 이상 $0.6f'_{cm}(t')$ 이하

2.4 BP 모델식

이 모델식은 BP 모델식들 중에서 가장 초기의 모델식으로 이후 BP-KX 및 B3 모델식으로 바뀌었다. 이 식은 Double Power Model이라고도 하는데 일종의 power form의 형태이다. 현재 ACI Committee 209에서는 이 BP 모델 초기식을 기초로 한 모델식도 사용할 수 있도록 규정하고 있다.

2.5 BP-KX 모델식

초기 BP 모델이 바뀐 것으로 Product model에서 Summation model의 형태로 바뀌었다. 이 모델은 다른 모델과는 달리 크리프함수 J 를 현재의 시간 t 초와 초기 재하의 재령 t' 뿐만 아니라 작용하중 σ 의 함수형태인 $J(t, t', \sigma)$ 로 나타내고 있다.

2.6 B3 모델⁴⁾

B3 모델식은 BP 모델과 BP-KX 모델을 1995년 수정, 제시한 모델식으로 이 모델식의 사용가능한 범위는 다음과 같다.

- 1) 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우
- 2) $2500 \leq f_c \leq 10000 \text{ psi}$
- 3) 물시멘트비가 $0.3 \leq a/c \leq 0.85$
- 4) 단위시멘트량이 $10 \leq c \leq 4516/\text{ft}^3$
- 5) 골재시멘트 중량비 $2.5 \leq a/c \leq 13.5$

3. 독립기둥의 축소량 예측 방법에 의한 약산해석 프로그램

3.1 개요

약산해법의 특징은 보의 영향을 무시하고 각각의 독립된 기둥에 대하여 탄성변형, 크립변형 및 건조수축 변형을 계산한 후에 이를 누적함으로써 축소량을 예측한다. 그리고 대부분의 장기거동 해석에서 채택하고 있는 중첩의 원리를 이 방법에서도 채택하고 있다.

본 연구에서 개발한 약산해법을 이용한 프로그램은 PCA⁵⁾와 CEB-FIP 90코드³⁾를 근간으로 하여 시공단계를 고려한 축소량의 계산 및 기둥간 부등축소량을 계산할 수 있도록 하였으며 Visual C++을 이용하였다.

3.2 프로그램의 흐름도

약산해법에 의한 기둥 부등축소량 예측 프로그램의 전체적인 흐름은 그림 2와 같다.

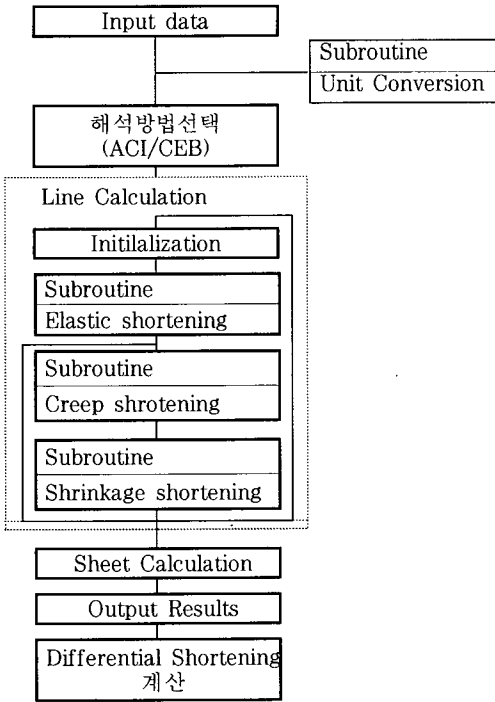


그림 2 Flow chart of simplied method

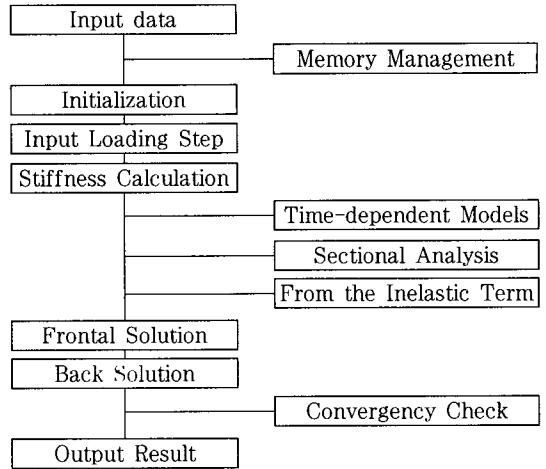


그림 3 Flow chart of exact analytical method

4. 시간의존성 및 시공단계를 고려한 프로그램

4.1 정밀해석 프로그램

정밀해석 프로그램은 철근콘크리트 고층건물의 시공단계부터 구조물 완공 후 사용할 때까지의 모든 단계를 포함하여 정밀한 시간의존성 구조해석을 수행하기 위한 것이다. 정밀해석 프로그램의 구조해석 방법은 2차원 골조의 선 요소 (Line Element)를 사용하며, 철근이 배근된 상태를 고려하여 장기변형에 의한 각 단면의 변형과 응력을 계산하는 단면해석 루틴을 개발, 적용하였다. 그리고 전단벽의 경우에는 등가기둥으로 치환하여 해석한다. 정밀해석 프로그램의 흐름도는 그림 3과 같다.

4.1.1 강성행렬의 유도

그림 4와 같은 평면골조요소의 강성행렬을 가상일의 원리를 적용하여 구하면 다음과 같이 축방향 강성(EA), 휨강성(EI), 재료특성에 의한 강

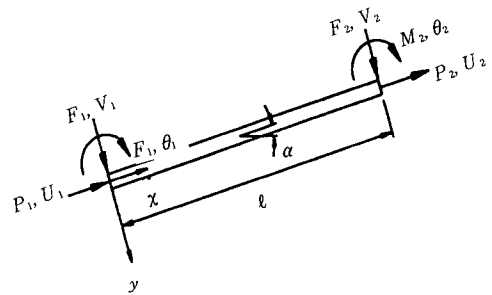


그림 4 Element D.O.F.

성(ER)이 포함된 새로운 강성행렬을 유도하게 된다.

$$\int_v [B]^T \sigma(x, y, t) dV = \{F\} \quad (1)$$

$$\int_v [B]^T E [B] dV \{u(x, y, z)\} - \int_v [B]^T E \eta(x, y, z) dV = \{F\} \quad (2)$$

위 식에서 임의시간에서의 변화율로 나타나 있는 항들을 임의의 시간간격에 따른 증분의 항으로 변화시키면 다음과 같다.

$$\int_v [B]^T E B dV \cdot \{\Delta u\} - \int_v [B]^T E \Delta \eta dV = \{F\} \quad (3)$$

여기서 강성행렬의 대칭성을 활용한 빠른 계산

결과를 얻기 위해 비탄성변형에 의한 항을 하중의 항으로 치환하여 식(4)를 얻는다.

$$[K]\Delta u + \{\Delta R\} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \{\Delta R\} = \int_V [B]^T E \Delta n dV$$

4. 1. 2 크립에 의한 변형도

그림 5와 같은 콘크리트 단면에서 단면중양에서 크립에 의해 발생하는 최종적인 비탄성 변형도는 다음과 같다.

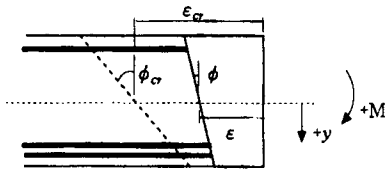


그림 5 Deformation due to creep

$$\epsilon = \frac{E_c A_c \epsilon_{cr} + \frac{ER}{EI} E_c I_c \phi_{cr}}{EA - \frac{ER^2}{EI}} \quad (5)$$

$$\phi = \frac{ER\epsilon_c + EI_c \phi_{cr}}{EI} \quad (6)$$

4. 1. 3 건조수축에 의한 변형도

그림 6과 같은 임의의 콘크리트 단면중양에서의 최종적인 건조수축 변형도의 값은 다음과 같다.

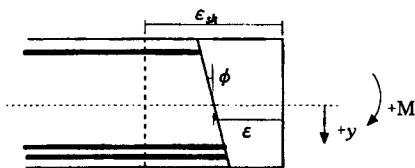


그림 6 Deformation due to shrinkage

$$\epsilon = \frac{E_c A_c \epsilon_{sh}}{EA - \frac{ER^2}{EI}} \quad (7)$$

$$\phi = \frac{ER}{EI} \cdot \epsilon \quad (8)$$

4. 2 간편해석 프로그램

앞 절의 정밀해석 프로그램은 매 시간마다의 반복계산을 수행함으로써 많은 계산시간이 요구된다. 그런데 필요에 따라 대략적인 고층건물의 장기거동을 파악하고자 할 경우에는 해석소요시간이 짧고 사용성이 편리한 해석프로그램이 더욱 유용하다. 따라서 기존의 평면골조해석 프로그램을 바탕으로 이터레이션 과정이 포함되지 않으며 시간의존성 및 시공단계를 고려할 수 있는 간편해석 프로그램을 개발하였다.

4. 2. 1 부재에 대한 기본식 유도

탄성체의 포텐셜 에너지법 (Potential Energy Method)을 이용한 부재에 대한 기본식은 다음과 같다.

$$[K]\{d\} - \{F\} + \{F\}^{cr} + \{F\}^{sh} + \{F\}^{th} \quad (9)$$

여기서,

$$[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV \text{ 강성행렬}$$

$$\{F\}^{cr} = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon^{cr}\} dV \text{ 크립 등가하중}$$

$$\{F\}^{sh} = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon^{sh}\} dV \text{ 건조수축 등가 하중}$$

$$\{F\}^{th} = \int_V [B]^T [D] \{\epsilon^{th}\} dV \text{ 온도 등가 하중}$$

4. 2. 2 온도에 대한 등가하중

온도변화에 의한 부재의 도심에서의 축변형도와 곡률변형을 부재의 기본식에 대입하여 각각 구한 등가하중은 다음과 같다.

$$\{F\}_a^{th} = \epsilon^{th}_{cen} \cdot EA \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\{F\}_b^{th} = \frac{EI}{d} x^{th} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

4. 2. 3 건조수축에 의한 등가하중

$$\{F\}_a^{sh} = \frac{EA}{y_1 - y_2} [y_1 \varepsilon_s^h(t) - y_2 \varepsilon_s^h(t)] \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\{F\}_b^{sh} = \frac{EI}{y_1 - y_2} [\varepsilon_s^h(t) - \varepsilon_s^h(t)] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

4. 2. 4 크립에 의한 등가하중

$$\{F\}_a^{cr} = \frac{EA}{y_1 - y_2} [y_1 \varepsilon_i^{cr}(t) - y_2 \varepsilon_i^{cr}(t)] \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\{F\}_b^{cr} = \frac{EI}{y_1 - y_2} [\varepsilon_i^{cr}(t) - \varepsilon_i^{cr}(t)] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

4. 2. 5 간편해석 프로그램의 흐름도

간편해석 프로그램은 기존의 평면골조해석과 유사한 과정을 거치지만 하중에 외력뿐만 아니라 온

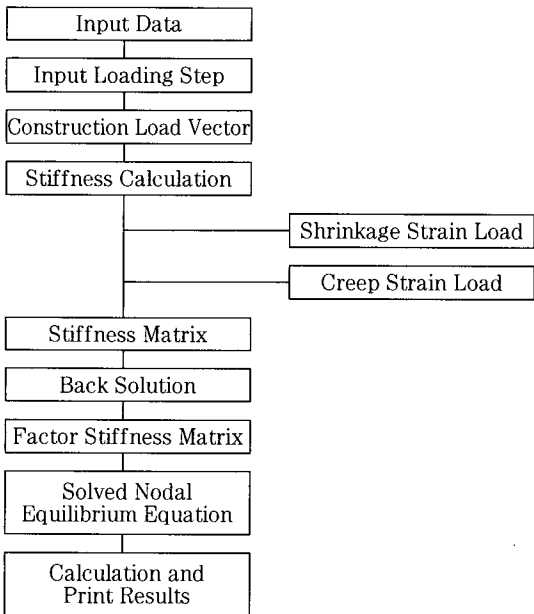


그림 7 Flow chart of program modifying elastic solution

도, 건조수축, 크립에 의한 등가하중이 포함된다는 점에서 차이가 있다.

5. 예제해석

5. 1 5층 1경간 구조물 해석 예

본 예제에서는 5층 1경간 구조물에 대하여 정밀 해석에 의한 ACI, CEB-FIP, B3 모델의 해석결과를 비교하였다. 구조물은 그림 8과 같은 형태이며 좌측기둥과 우측기둥의 철근비를 달리 하였다. 재료 성질 및 단면 성능은 표 1 및 표 2에 나타내었으며 등바리 설치를 고려한 시공단계는 그림 9와 같다.

해석결과 1층 좌측 기둥 및 보 중앙부에서의 처짐량은 그림 10과 같으며 좌측기둥의 처짐은 하중이 계속 증가하기 때문에 시공단계와 관계없이 증

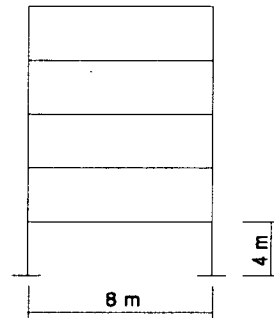


그림 8 1-bay, 5-story model

표 1 Material properties

압축강도 (kg/cm ²)	시멘트	양생조건	양생일 (일)	상대습도 (%)	슬럼프 (cm)	시멘트량 (kg/m ³)	공기량 (%)	잔골재율 (%)	W/C	a/c	대기온도 (°C)
280	1종	습윤	30	60	10	400	5	40	30	280	25

표 2 Section properties

구분	폭 (cm)	높이 (cm)	압축철근량 (cm ²)	인장철근량 (cm ²)
보	30	40	10.0	20.0
좌측기둥	50	50	50.0	50.0
우측기둥	50	50	10.0	10.0

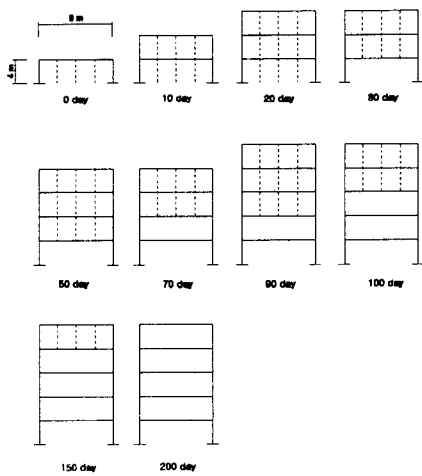


그림 9 Sequence of construction

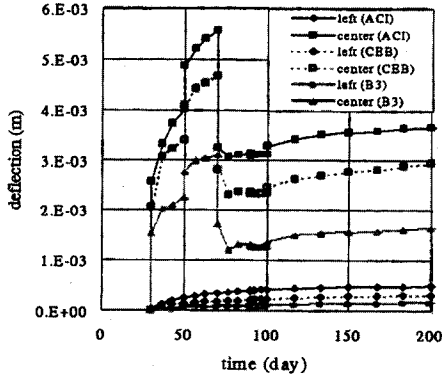


그림 10 Deflection of left end of column and center of beam at 1st story

가되는 추세이다. 그러나 보 중앙부의 처짐은 2층 동바리 제거전까지는 증가하다가 2층 동바리가 제거된 70일 이후에는 하중의 제하(unloading)에 따라 처짐량이 크게 감소되는 것을 볼 수 있다. 그림 11의 전단력도 처짐과 비슷한 양상을 보인다. 1층 보의 시공단계에 따른 우측단부와 중앙부의 모멘트 변화는 그림 13과 같다. 3층까지 타설된 후 1층의 동바리가 제거된 상태인 30일에서는 자중으로 인한 탄성모멘트가 우측단부와 중앙부에서 발생하여, 시간이 경과함에 따라 우측단부 모멘트는 감소되고 중앙부 모멘트는 증가하는 경향을 보인다. 그 후 4층이 타설된 50일에 모멘트량이 탄성적으로 증가되며 2층 동바리가 제거된 70일에는 2층에서도 강

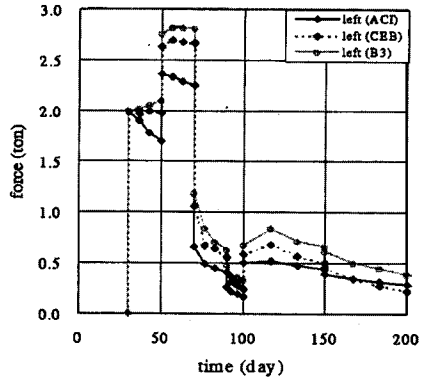


그림 11 Shear force of 1st story

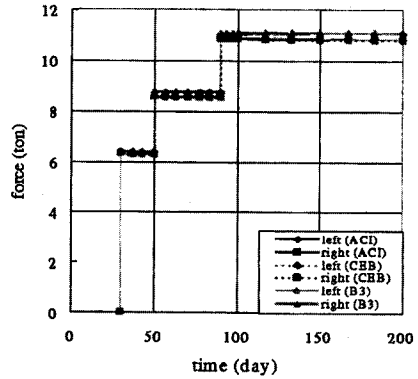


그림 12 Axial force of column at 1st story according to construction sequence

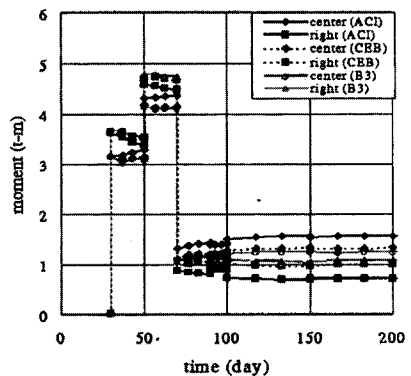


그림 13 Beam moment of 1st story according to construction sequence

성을 발휘하여 1층의 저항모멘트는 급격히 감소하게 된다. 또한 모델식의 선택에 따른 모멘트 값의

차이는 약 20%정도로 그다지 큰 차이는 보이지 않고 있다.

5.2 아마타푸라 아파트 해석 및 실측비교

현대건설에 의해 실제 시공된 아마타푸라 아파트 건물(51층)에 대하여 약산해석에 의한 결과와 정밀해석 결과 및 실측결과를 비교하고 차이를 분석하였다. 그림 14는 아마타푸라 아파트의 해석 대상 기둥을 나타낸 것이다.

그림 15~그림 18은 골조가 완성되었을 때의 각 기둥의 크립과 건조수축을 포함한 누적 처짐량과 기둥간 부등축소량을 비교한 것이다. 그림에서 보

면 외측기둥인 C4의 처짐량은 약산해법과 정밀해석의 결과가 큰 차이없이 비슷하게 나타나고 있다. 실측 처짐량과의 비교에서도 현장조건등을 감안한다면 해석결과와 실측결과가 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 내부축 기둥인 C5와 코아축 기둥인 C3를 살펴보면 C5에서는 정밀해석결과가 약산해석보다 작게 나타나며 C3에서는 반대로 약산해석의 결과가 정밀해석보다 더 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 정밀해석에서는 C5의 하중이 C3로 전달되지만 약산해석의 경우에는 슬래브를 통한 하중의 전달이 고려되지 않기 때문인 것으로 판단된다.

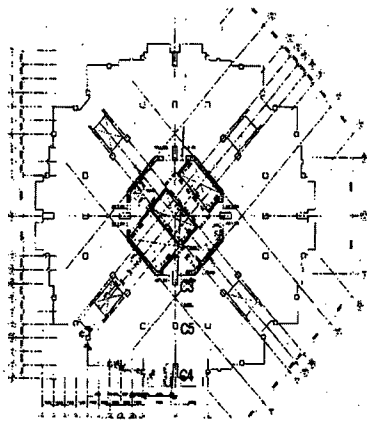


그림 14 Plan of amatapura apartment

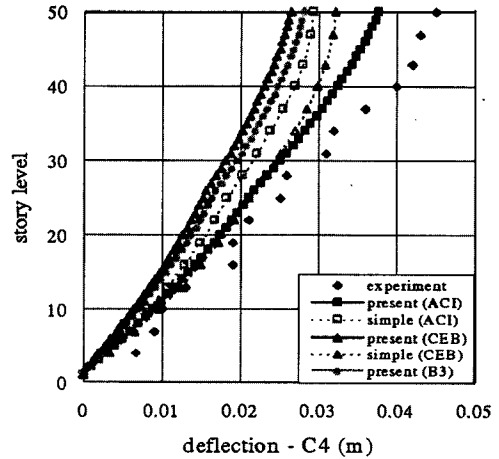


그림 16 Accumulated shortenings of C4 column

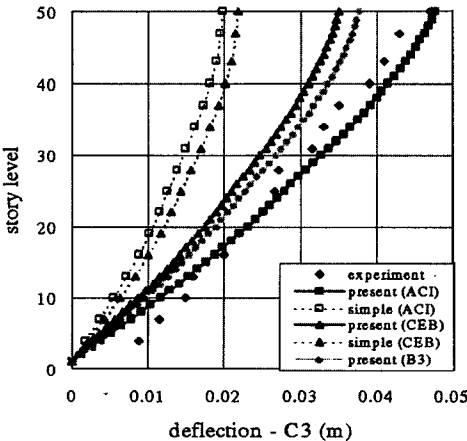


그림 15 Accumulated shortenings of C3 column

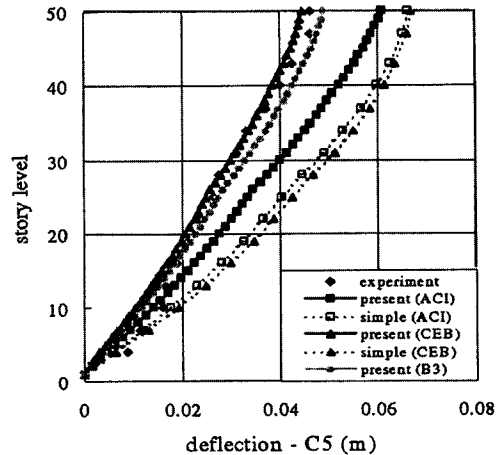


그림 17 Accumulated shortenings of C5 column

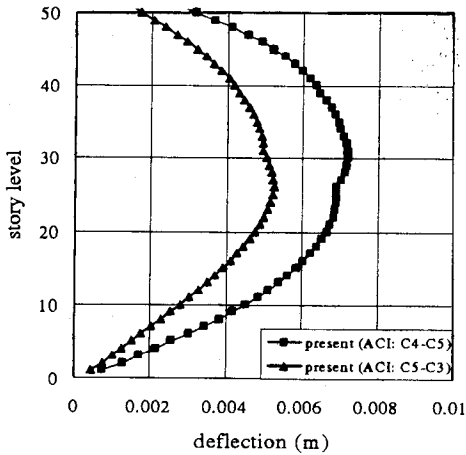


그림 18 Differential shortenings

따라서 정밀해석의 결과가 더 실측결과와 유사함을 알 수 있다. 인접기둥간의 부등축소량을 살펴보면, 최대 부등축소량은 25층으로 건물의 중앙층 부근에서 발생함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구는 철근콘크리트 고층건물의 시공단계 및 완공후에 발생하는 기둥의 부등축소량을 보다 정확히 예측할 수 있는 해석프로그램을 개발하는데 그 목적이 있다. 본 연구를 통하여 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 본 연구에서는 널리 사용되고 있는 콘크리트의 장기거동 예측 모델식을 정리하고 각각의 모델식의 특징을 비교, 검토하였다.

2) 철근콘크리트 부재는 탄성변형뿐 아니라 크립과 건조수축에 의한 비탄성 변형이 발생한다. 이러한 비탄성변형은 시간의 함수이며 각각의 기둥에 작용하는 하중 및 환경조건등의 차이로 구조물의 기둥간에 축소량의 차이가 발생할 수 있다. 이러한 기둥간 부등축소량은 고층건물인 경우 구조적/비구조적인 문제를 야기시킬 수 있으며 설계시 이를 적절히 고려해 주어야 한다.

3) 본 연구에서는 기존방법을 이용한 약산해석, 정밀해석, 간편해석에 따른 예측 프로그램을 개발하였다.

4) 개발된 해석프로그램의 검증을 위하여 예제 해석을 수행하였으며 이로부터 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 정밀해석 프로그램은 시간중분의 영향을 받지 않으나 간편해석 프로그램의 경우, 시간중분의 크기를 작게 할수록 정해에 가까워짐을 알 수 있다.
- 시공단계 및 등바리 설치에 따라 구조계와 하중이 변하므로 이를 고려한 비탄성 해석은 매우 복잡하다. 본 연구에서 개발된 정밀해석 및 간편해석 프로그램은 이를 고려할 수 있도록 하였다.
- 아마타푸라 아파트를 대상으로 해석결과와 실측결과를 비교하였다. 전체적으로 실측결과와 유사한 경향의 예측결과를 얻을 수 있었으며 특히 정밀해석 방법이 고층건물 기둥의 장기거동을 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다.

본 기술기사는 현대건설기술연구소에서 한국과학기술원과 공동으로 개발한 연구과제('96년~'97년)를 요약한 것임을 밝힙니다.

참 고 문 헌

1. ACI committee 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures", ACI 209 R-92.
2. "CEB-FIP Model Code", 1978
3. "CEB-FIP MODEL CODE", *Comite Euro International Du Beton*, Tomas Telford, 1991
4. RILEM 107-GCS, "Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures-model B3", *Mater. Struct.* 28 (1995) pp. 357-365.
5. Mark Fintel, S.K. Ghosh and Hal Iyengar, "Column Shortening in Tall Structures-Prediction and Compensation", PCA, 1987