

# 시공 공정에 따른 건축 구조물의 구조해석 및 수직부재의 부등변형

## Structural Analysis for Building Structures reflecting Differential Column Shortening based upon Construction Sequence

조상규 \*                      이형우 \*\*                      최창식 \*\*\*  
Cho, Sang Kyuu              Lee, Hyung Woo              Choi, Chang Sik

### Abstract

The general method of structural analysis for building structures has been based upon the assumption that all dead loads are imposed on a building simultaneously throughout the entire structure. In reality, buildings are built floor by floor or a few floors at a time. The construction dead load is applied gradually onto the structure as the structure is being erected. The prevailing commercial software for structural analysis used to date have resulted in the representation of inaccurate structural behaviors. The actual construction sequence and the loading of the structure were not properly represented in the analysis. This paper identifies the source of the errors and develops the algorithm to account for the differential column shortening due to construction dead load based upon a given construction sequence.

### 1. 서 론

건축 구조물의 일반적인 구조해석 방법은 완성된 전체 구조물에 하중이 동시에 작용한다는 가정을 근간으로 하고 있다. 그러나, 대부분의 건물은 층별 또는 몇 개층 단위로 시공되거나, 같은 층이라 하더라도 경우에 따라서는 공정에 따라 시공순서와 재하조건이 다르기 때문에 구조물의 실제 거동은 상기의 가정과 상당한 차이를 나타내게 된다. 이러한 차이는 다음과 같은 2 가지 요인에 기인한다.

첫째, 구조물 전체 모델에 하중을 동시에 재하할 경우, 재하되는 하중이 실제 시공조건에서와는 달리 아직 시공되지 않은 상부층으로 전달되는데 따른 오차

둘째, 시공단계시 재하되는 시공하중(Construction Dead Load)에 의한 수직부재의 부등변형(Differential Elastic Shortening)에 따른 오차

### 2. 오차원인에 대한 분석

첫 번째 오차의 원인에 대해 살펴보면 다음과 같다. 철근콘크리트 건물의 경우는, 임의층의 수직재가 시공되고 슬래브가 타설되면 해당층이 어느 정도의 양생 기간을 거치면서 시공단계하중에 의한 변형이 상당수준까지 진행된 후, 그 다음 상부층이 시공되기 때문에 상부층은 하부층의 시공단계하중에 의한 영향을 받지 않는다. 그러나, 일반해석시에는 완성된 구조물의 모델상에 하중이 동시에 재하되기 때문에 임의층의 시공하중이 상부층의 부재력과 변형에 영향을 주게 된다.

\* 정회원, (주) 신화 엔지니어링 대표이사, 건축구조기술사

\*\* 정회원, (주) 포스코 개발 CAD/CAE 팀 MIDAS 팀장

\*\*\* 정회원, 대전대 건축공학과 조교수, 공학박사, 건축구조기술사

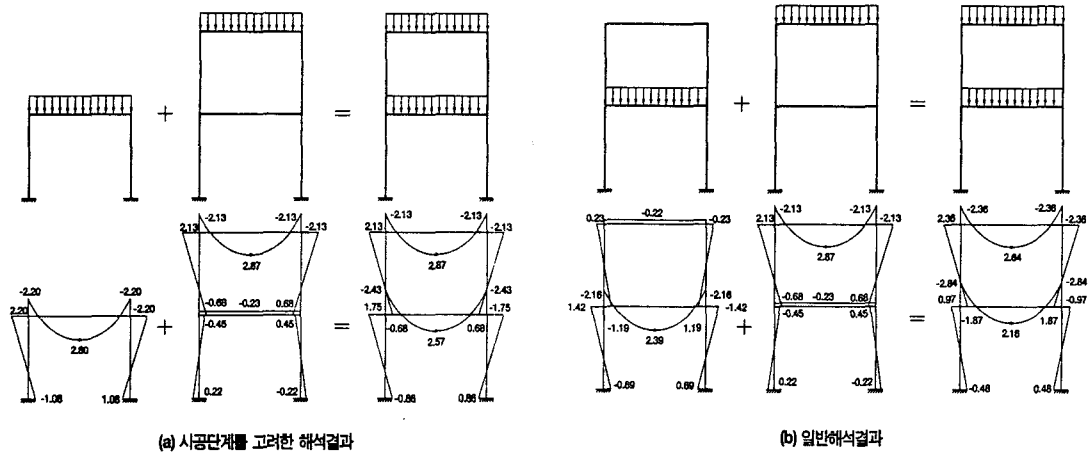
[그림 1]과 <표 1>은 2층 규모의 2차원 평면 콘크리트골조에 대해 일반해석결과와 시공단계를 고려한 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 일반해석이란 ‘완성된 전체구조물의 모델에 하중을 동시에 재하하는 해석’을 의미하고, 시공단계를 고려한 해석이란 ‘구조물의 시공공정에 따른 별도의 모델을 사용하여 각 시공단계에 재하될 수 있는 하중을 순차적으로 가하여 수행한 해석’을 의미한다.

<표 1> 2층 2차원 평면 콘크리트에 대한 일반해석결과와 시공단계를 고려한 해석결과 비교표

구 분	굽힘 모멘트 (t·m)				변위 (mm)	
	1층 기둥 (상부)	1층 보 (중앙부)	2층 기둥 (상부)	1층 보의 중앙	1층 보의 중앙	2층 보의 중앙
시공단계를 고려한 해석	1.75	2.56	2.13	2.87	3.73	4.29
일반해석	0.97	2.16	2.36	2.64	3.01	4.11
비 율	180.4	118.5	90.3	108.7	123.9	104.4

\* 비율 = 시공단계를 고려한 해석결과 / 일반해석결과 × 100%

[그림 1]과 <표 1>에서 일반해석결과 대비 시공단계를 고려한 해석결과와 부재력 비율이 90~180% 정도 차이가 발생하고 있다. 실제 시공시에는 시공단계 고정하중이 1층에 가해질 시점에는 2층이 아직 시공되지 않은 상태이기 때문에 1층의 부재력이 2층의 부재에 의해 영향을 받지 않는다. 그러나, 일반해석의 경우는 [그림 1(b)]에서와 같이 실제로 존재하지 않는 상부층의 수직부재에 의해 회전변위가 제한되고, 1층의 시공단계하중에 의한 부재력을 1층과 2층의 수직부재가 분담하는데 따른 오차가 발생하게 된다. 따라서, 기존의 일반해석방법을 이용할 경우, 설계결과에 상당한 오류가 포함될 수 있다.

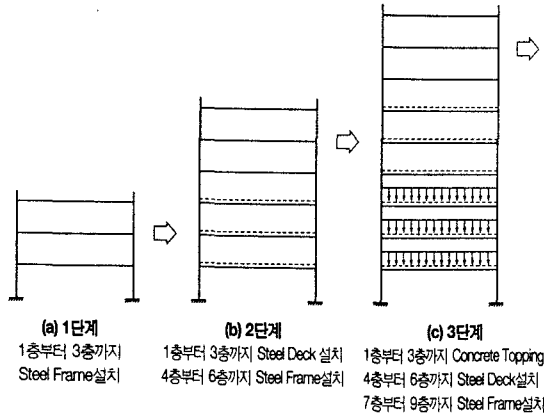


[그림 1] 2층 2차원 평면 철근콘크리트 골조에 대한 일반해석결과와 시공단계를 고려한 해석결과 비교

철골 또는 복합구조(Composite Structure)의 경우는 [그림 2]에서와 같이 먼저 골조를 세운 후, 다음 상부의 골조공사와 해당 Steel Deck 설치공사가 동시에 수행된다. 그리고, 주요 시공하중이 재하되는 Concrete Topping 공정은 다시 그 다음 상부의 골조공사 및 기 시공된 골조의 Steel Deck 설치공사와 동시에 이뤄진다. 따라서, 단계별로 매층 시공을 완료하면서 상부층으로 진행되는 철근콘크리트조 건물과는 달리, 전술한 주요 오차요인 중 첫번째 오차요인은 문제가 되지 않는다.

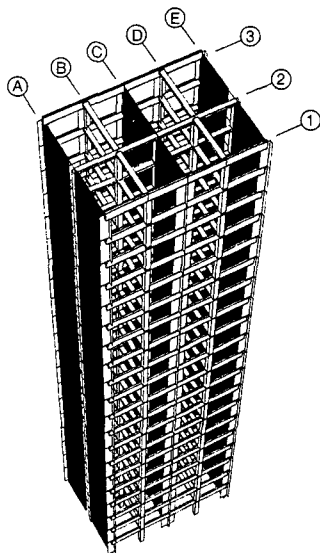
두 번째 오차 요인인 시공하중에 의한 수직부재의 부등변형에 대해 살펴보면 다음과 같다.

고층 철근콘크리트 건물에서 부등처짐은 탄성축소(Elastic Shortening)와 건조수축(Shrinkage) 그리고, 장기 압축하중에 따른 크리이프(Creep) 등에 의해 발생되고, 건조수축과 크리이프에 의한 영향은 콘크리트의 강도, 시공기간, 타설조건, 기후조건 등에 따라 달라진다.



[그림 2] 절골 또는 복합재구조 건물의 시공단계  
(3개층 단위로 절골 구분하여 시공하는 경우)

부등변형이 생기게 된다. 철근콘크리트 구조물의 경우는 콘크리트의 탄성계수가 양생기간 동안 변하기 때문에 이 또한 부등변형의 한 요인이 될 수 있다. 이와 같은 부등변형은 고층건물일수록 크게 나타나며, 보부재에 휨모멘트와 전단력을 추가로 발생시켜, 2차적으로 해당 보부재와 연결된(모멘트 접합) 기둥 또는 기타 부재에도 영향을 주게 된다.



[그림 3] 20층규모 기변형 철근콘크리트 아파트의 모델도

위해서는 해당 수직부재에 부과되는 축력 분담율에 비례하여 부재를 설계하면 되지만, 그 경우 축력에 따라 부재의 크기가 달라지기 때문에 현실적으로 가능하지 않다. 따라서, 실제 구조물의 부등변형을 가능한 한 근접하게 고려하여 설계에 반영하는 것이 고층건물에서 중요한 전제사항이라 할 수 있다.

일반적으로 건조수축에 의한 영향은 탄성축소와 크리이프에 의한 영향에 비해 미소하고, 크리이프 현상은 장기적으로 진행되기 때문에 설계단계에서 정확하게 예견한다는 것은 어려운 작업이다. 따라서, 본 논문에서는 시공단계에 재하될 수 있는 시공하중(부재 또는 Flooring System의 자중)에 의한 탄성축소현상에 대해 주로 서술하고자 한다.

건물의 경우는 기둥의 중력방향 하중에 대한 분담율이 다르더라도 설계편의 또는 사용성 등을 고려하여 유사한 크기의 기둥을 일반적으로 사용하기 때문에, 하중분담율의 차이로 인한 기둥간의 부등변형이 발생하게 된다. 그리고, 기둥과 벽체같이 수직축 강성이 크게 다른 부재들이 인접하여 배치될 경우에도 축강성의 불균형에 따른

실무에서는 부등변형이 시공단계에서 보정되는 것으로 가정하여, 수평부재의 설계를 위한 중력방향 해석시 수직부재의 강성을 임의로 상향조정하거나, 해당 위치의 수직자유도를 구속하는 등의 방법을 이용하여 수직변위를 제한하는 방법을 사용하는 경우도 있다.

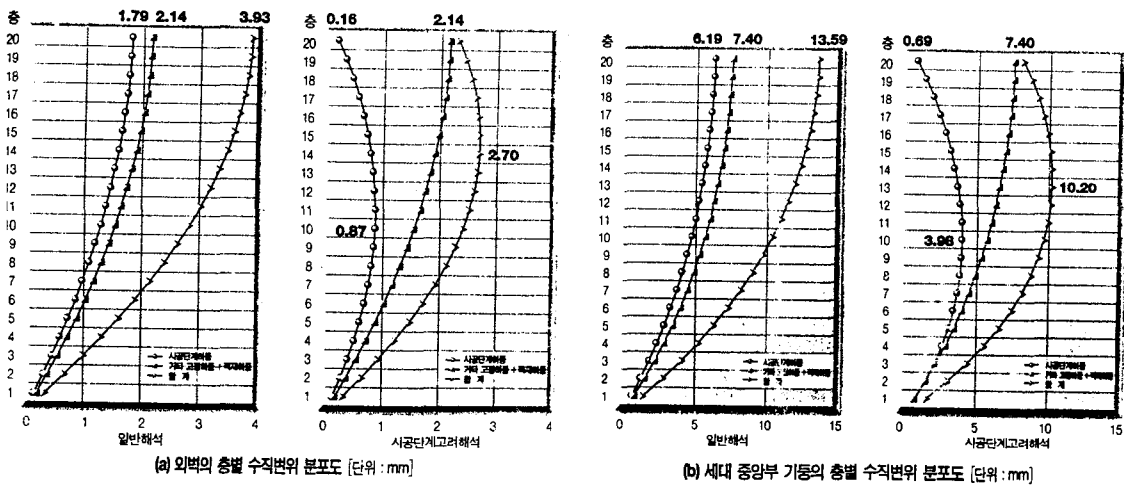
그러나, 시공단계에서 부등변형을 정밀하게 보정하더라도 층높이가 외견상 균등하게 되는 것이지, 실제 구조적인 부등변형은 존재하므로 그에 따른 부가 휨모멘트나 전단력 또한 해소되지 않는다. 따라서, 부등변형을 무시하고 설계할 경우, 그와 같은 부재력(특히 수평부재의 부재력)을 과소평가하는 문제를 내포하게 된다. 그리고, 매층 시공시 임의층의 높이를 균등하게 조정하더라도 상부층이 추가로 설치되면, 상부층의 하중때문에 하부층의 부등처짐은 다시 누적되어 발생된다.

시공단계의 하중에 의한 부등변형을 피하기

[그림 3]은 최근에 일부 건설사에서 연구되고 있는 가변형 철근콘크리트 아파트의 모델도이다. 가변형 철근콘크리트 아파트의 경우는 일반 벽식아파트에서 세대간 벽은 그대로 두고, 세대 내부의 벽체 대신 기둥을 배치하는 구조시스템이 일반적으로 사용된다. 이와같은 축강성의 차이가 큰 수직부재들이 인접 배치될 경우에는 그에 따른 부등처짐을 가능한 한 정확하게 파악하여 설계하여야 한다.

### 3. 구조해석 예

[그림 4]는 [그림 3]의 가변형 아파트에 대해 일반해석과 시공단계를 고려한 해석결과를 나타낸 것이다. 중력방향 하중조건은 시공단계 고정하중(Construction Dead Load)에 대해 슬래브하중  $360 \text{ kgf/m}^2$ 가 적용되었고, 골조시공 후의 하중은 마감, 온돌, 천정 등의 고정하중(Superimposed Dead Load)과 적재하중(Live Load)을 포함하여  $430 \text{ kgf/m}^2$ 가 적용되었다

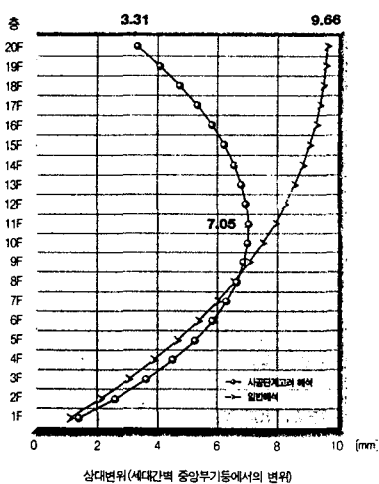


[그림 4] 20층 규모 가변형 철근콘크리트 아파트의 수직변위 분포

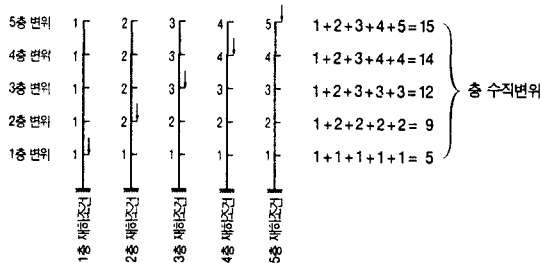
[그림 4]의 층별 수직변위 분포도는 일반해석의 경우, 수직변위가 상부층으로 가면서 점차 증가하여 최상층에서 최대(13.59mm)가 되고, 시공단계를 고려할 경우에는 시공단계 하중에 의한 중앙층 부근에서 최대치를 갖는 특성과 골조 시공 후의 하중에 기인한 일반해석의 특성이 조합되어, 13층 부근에서 정점(수직변위 10.20mm)에 이르렀다가 그 이상 상부층으로 가면서 점차 감소하고 있음을 나타내고 있다. 따라서, 부등변형량도 수직변위의 분포도와 마찬가지로 [그림 5]와 같이 층별로 나타난다.

[그림 6]은 이와 같은 변위분포 경향의 개념적인 설명이다. 예를 들어, 5층건물의 단위 기둥열에서 각 층별로 수직부재의 상단에 재하되는 집중하중과 층고, 수직부재의 탄성계수 그리고, 단면적이 모두 1.0 이라고 가정하면, 임의층의 상대 수직변위는 1.0 이 된다.

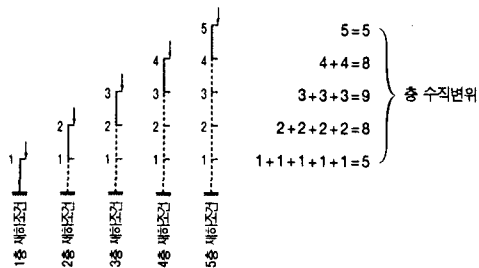
[그림 6(a)]와 같이 5층까지 완성된 단위 기둥열 모델에 각층별로 단위 수직하중을 재하하여 그 결



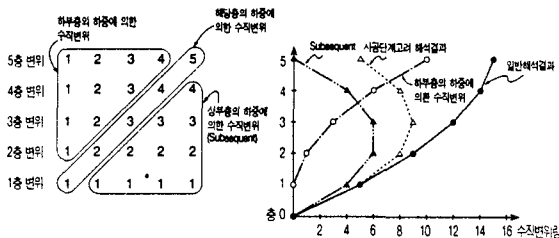
[그림 5] 20층규모, 가변형 철근콘크리트 아파트의 수직 부등변형 분포



(a) 일반해석결과



(b) 층별 시공단계를 고려한 해석결과



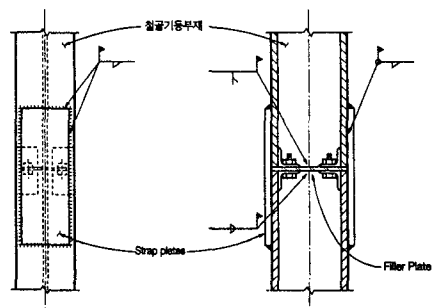
(c) 종류별 수직변위 비교표

[그림 6] 일반해석과 시공단계해석에 의한 수직부재의 수직변위 비교

과를 합하면 일반해석의 결과와 같고, 매 층별 시공단계를 고려하여 적층개념으로 수직하중을 가하여 합하면 [그림 6(b)]와 같다.

[그림 6(b)]는 시공단계를 고려하여 부재력을 산출하는 해석과정에서 계산된 변위결과이며, 골조 시공후 설치될 Partition 이나 Cladding 과 같은 비구조체에 대한 수직보정량을 구하기 위해서는 별도의 과정이 필요하다. 철근콘크리트 건물의 경우, 임의층의 수평 레벨은 거푸집 설치시 매층 보정(Up to Slab:하부층의 하중에 의한 수직변위+해당층의 하중에 의한 수직변위)이 되기 때문에 필요한 보정량은 후행공정에 의해 설치될 상부층의 하중에 의한 수직변위량이 된다.

그리고, 철골건물의 경우는 일반적으로 제작 공장에서 단위기둥부재를 설계도면대로 제작한 다음, 현장에서 탑재될 때 기둥절의 연결부위에 [그림 7]과 같이 Filler Plate 를 삽입하여 부등처짐을 보정하게 된다. 이때 보정량은 하부층의 하중에 의한 변위와 해당층의 하중에 의한 변위, 후행공정에 의해 설치될 상부층의 하중에 의한 수직변위를 더한 값이 된다.



[그림 7] 철골빌딩의 수직부등변위 보정을 위한 Splice Detail

[그림 6(c)]의 탄성처짐에 의한 수직변위량을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\text{일반 해석결과: } \Delta n = \sum_{k=1}^n \frac{L_k}{E_k A_k} \sum_{i=k}^N P_i$$

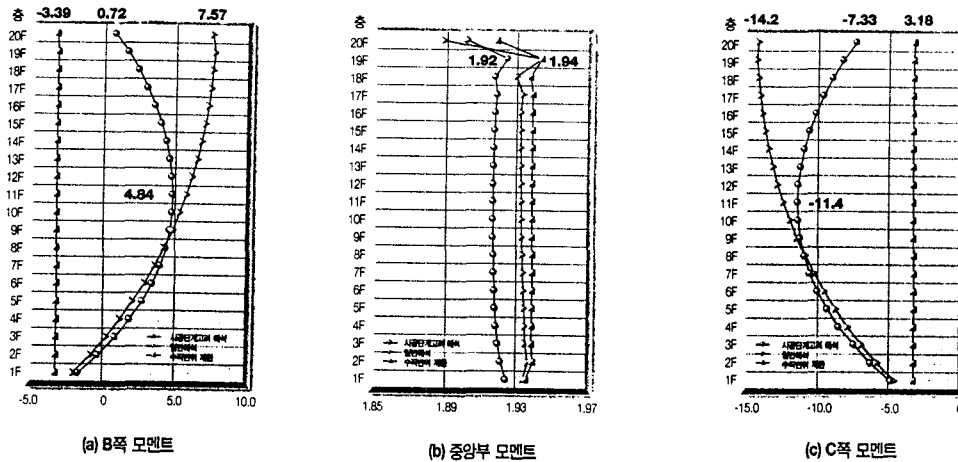
$$\text{시공단계를 고려한 해석결과: } \Delta n = \sum_{k=1}^n \frac{L_k}{E_k A_k} \sum_{i=n}^N P_i$$

$$\text{해당층과 하부층의 하중에 의한 수직변위량(Up to Slab): } \Delta n = \sum_{k=1}^n P_k \sum_{i=1}^k \frac{L_i}{E_i A_i}$$

$$\text{상부층의 하중에 의한 임의층의 수직변위량(Subsequent): } \Delta n = \sum_{k=1}^n \frac{L_k}{E_k A_k} \sum_{i=n+1}^N P_i$$

여기서,  $n$  = 임의층  $N$  = 총층수  $L_{i,k}$  =  $i$  또는  $k$ 층의 층고  $P_{i,k}$  =  $i$  또는  $k$ 층의 시공단계 수직하중  
 $E_{i,k}$  =  $i$  또는  $k$ 층에 위치한 수직부재의 탄성계수  $A_{i,k}$  =  $i$  또는  $k$ 층에 위치한 수직부재의 탄성계수

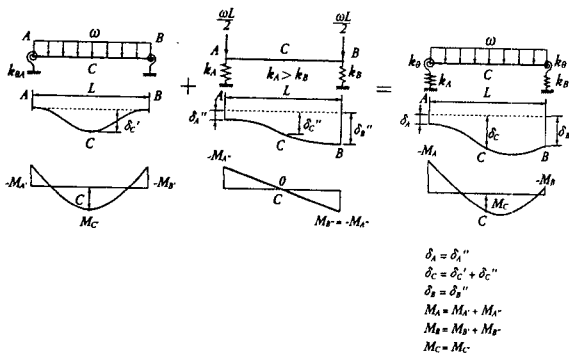
[그림 8]은 세대간 벽과 중앙기둥을 연결하는 보부재에 대해 시공단계를 고려한 해석결과와 일반해석 그리고, 수직변위를 제한한 조건(층평면에 위치한 부재의 설계를 위해 수직부재의 축강성을 인위적으로 키우거나, 수직변위를 구속하여 해석하는 경우)의 해석결과를 비교하여 나타낸 것이다.



[그림 8] 20층규모, 가변형 철근콘크리트아파트의 보부재에 대한 해석방법별 모멘트 분포 비교도 (ROW2의 B-C 구간) [단위: t·m]

[그림 8]에서 수직변위를 구속한 조건에 대한 보의 휨모멘트는 층별로 거의 일정한 값을 가지는 반면, 일반해석결과와 시공단계를 고려한 해석결과에서는 수직변위가 제한된 조건에서의 휨모멘트에 보 양단의 부등변위에 따른 모멘트가 추가되어 발생함을 알 수 있다.

[그림 9]는 양단의 수직강성이 서로 다른 지지조건을 가진 보에 하중이 작용할 때, 부등처짐에 의해 모멘트가 추가되는 개념을 설명한 것이다. [그림 9(c)]에서와 같이 부등처짐이 발생되면, 보 상단의 분포 하중에 의해 1차적으로 발생한 휨모멘트에, 부등처짐에 의해 발생한 2차 휨모멘트가 추가된다. 그리고 [그림 9]에서 양단의 수직 축강성이 같은 조건일 때에도 각 지지점의 하중분담면적이 다르다면, 이 역시 부등처짐이 발생하게 되어 2차 휨모멘트가 추가하여 작용하게 된다.

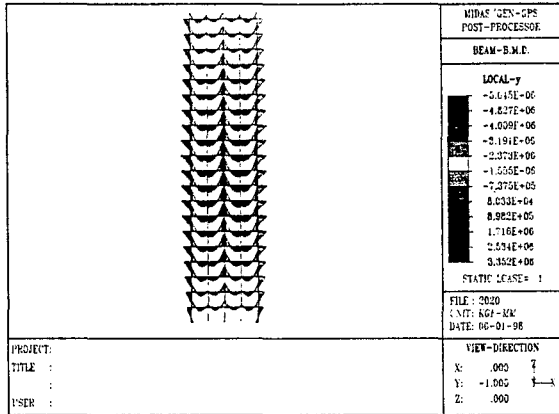


(a) 보 양단의 수직변위를 제한한 해석결과 (보 상단의 분포하중에 의해 발생한 변위와 휨모멘트) (b) 보 양단의 수직강성의 차이에 따른 부등처짐과 휨모멘트 (c) 보 상단의 분포하중에 의해 1차적으로 발생한 휨모멘트 + 보 양단의 부등처짐에 의해 2차적으로 발생한 휨모멘트

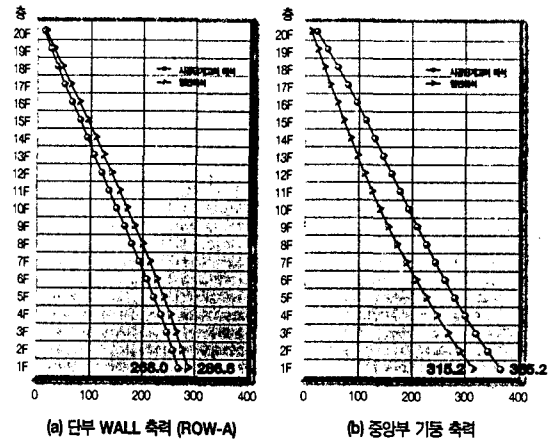
[그림 9] 양단의 수직강성이 다른 지지조건을 가진 보의 부등처짐에 의한 모멘트부가 효과

[그림 10]의 휨모멘트도에서 일부 상하부에 위치한 기둥부재만 수직지지부재의 역할을 할 뿐, 나머지 대부분의 기둥부재들은 양단벽체와의 상대부등처짐 때문에 지지역할을 하지 못함을 알 수 있다. 또한 시공단계를 고려하지 않고 완성된 전체 모델을 이용하여 해석적용한 결과에서, 양단부 모멘트가 9층 이상에서는 과대평가되고, 9층 이하에서는 시공단계를 고려한 해석방법에 비해 과소평가되며, 중앙부 모멘트는 전층에

결쳐 과대평가됨을 알 수 있다. 따라서, 실무에서 Flooring System의 설계시 일부 사용되고 있는 방법인 수직부재의 축강성을 인위적으로 키우거나 수직변위를 구속하는 방법 또는 일반해석방법을 사용할 경우, 부재력 산출결과에 상당한 오류를 포함할 수 있음을 나타내고 있다. 그리고, 수직부재의 축강성이 상대적으로 큰 외벽의 경우는 다소 과대평가되고, 중앙부 기둥의 경우는 과소평가됨을 [그림 11]에서 알 수 있다.

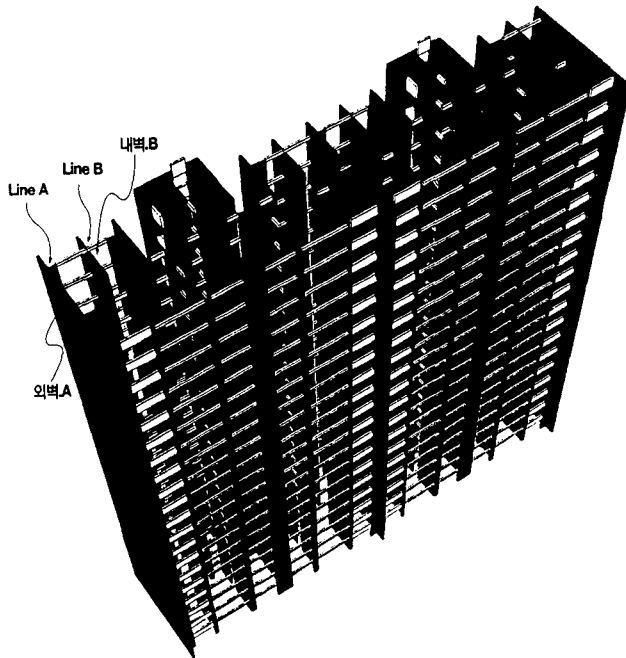


[그림 10] 20층 규모 가변형 철근콘크리트아파트의 시공단계별 고려한 해석결과 균형모멘트도 (2ROW) [단위 : kgf-m]



[그림 11] 20층 규모 가변형 철근콘크리트아파트의 외벽과 중앙부 기둥에서의 층별 축력 분포도 [단위 : tonf]

[그림 12]는 서울근교에 시공된 벽식아파트의 한 모델도이다. 국내의 대부분 아파트에 적용되고 있는 철근콘크리트 벽식구조시스템은 인접 벽체간의 수직축강성이 다르고, 중력방향하중의 분담율도 다르기 때문에 수직부등침짐에 따른 문제를 수반하게 된다. 특히, 최근 들어 아파트가 고층화됨에 따라

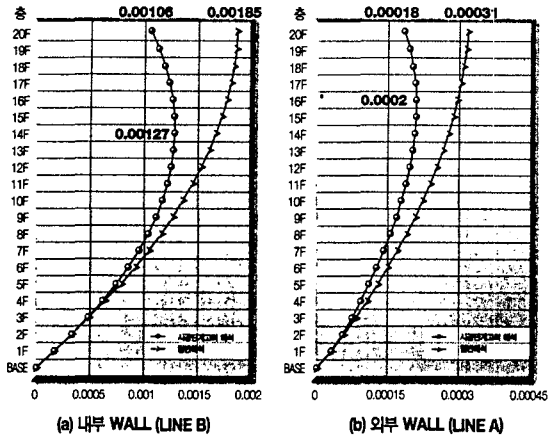


[그림 12] 서울 인근에 건축된 20층 규모 철근콘크리트 벽식 판상형 아파트의 모델도

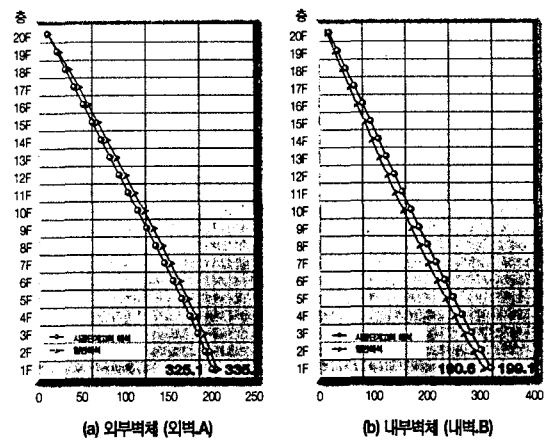
시공단계를 고려한 해석의 필요성이 시급히 요구되고 있다. 실제로 일반해석방법을 이용할 경우 벽식아파트의 보에 발생하는 이상모멘트 때문에 철근 배근의 설계시 어려움을 겪는 경우가 많다.

[그림 13]은 벽식아파트의 외벽과 내벽([그림 12]의 Line A와 Line B)에 대한 수직처짐분포도를 나타낸 것이다. 최상층에서 일반해석의 결과와 시공단계를 고려한 해석결과에서 약 2배 정도의 차이가 있음을 알 수 있다. 그리고, 시공단계해석결과 그래프에서 수직변위가 중앙층인 10층 부근에서 최대가 되지 않고, 14층 부근에서 최대값을 나타내고 있다. 이와같은 현상은 시공단계의 하중만 고려할 경우에는 10층 부근에서 최대가 되었다가 그 상부층으로 가면서 점진적으로 감소하게 되지만, 골조공사 완료 후 재하되는 각종 고정하중과 적재하중에 의한 수직변위의 경향은 상부층으로 가면서 증가하기 때문

에 이 두가지 영향(시공단계 고정하중의 영향+골조시공후 재하되는 기타 고정하중과 적재하중의 영향)이 중첩되어 나타난데 기인한 것이다.

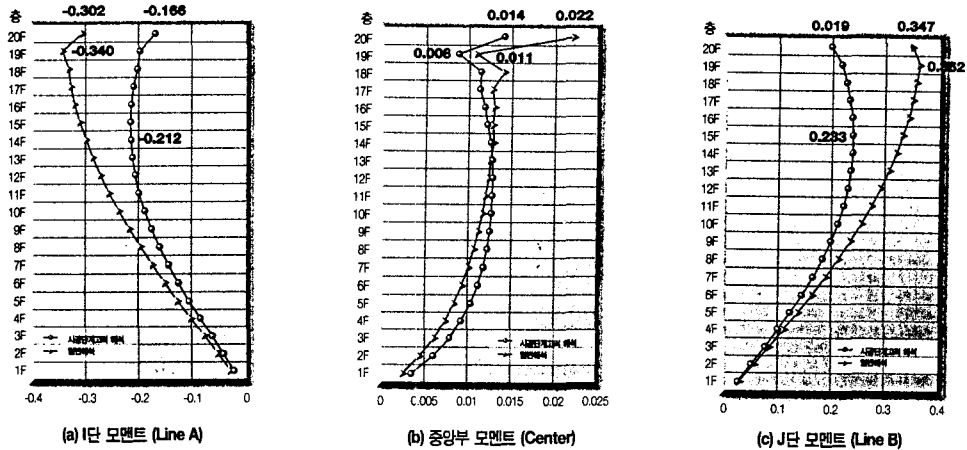


[그림 13] 20층규모 철근콘크리트 벽식아파트의 수직변위분포 비교도 [단위:m]



[그림 14] 20층규모 철근콘크리트 벽식아파트의 수직축력분포도 [단위:tonf]

[그림 14]에서 외부 벽체(외벽.A)의 경우는 일반해석결과가 상대적으로 과대평가되고, 내부벽체(내벽.A)의 경우는 과소평가됨을 알 수 있다. 그리고, [그림 15]에서 보부재의 층별 모멘트 분포도는 일반해석결과가 시공단계를 고려한 해석결과에 비해 보의 단부에서는 과대평가되고, 12층 이하의 중앙부에서는 정 모멘트가 과소평가됨을 나타내고 있다.

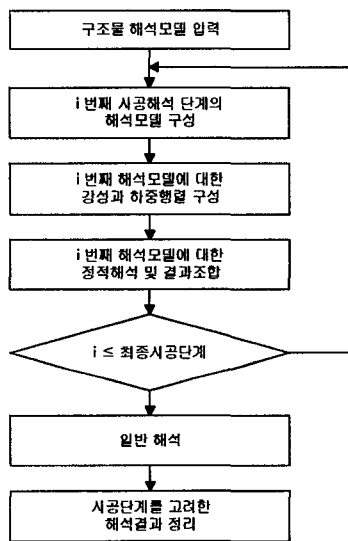


[그림 15] 20층규모 철근콘크리트 벽식아파트의 보 모멘트분포 비교도 [단위:tonf-m]



#### 4. 결 론

이상의 구조물에 대한 분석 결과를 요약하면, 전술한 바와 같이 첫번째 오차는 저층 철근 콘크리트 건물의 경우에 주로 발생할 수 있고, 두번째 오차의 요인인 부등변형에 따른 문제는 고층 건물에서 크게 나타날 수 있다. 따라서, 현재 실무에서 일반적으로 적용되고 있는 해석 방법과 시공 단계를 고려한 해석 결과 사이에는 상호 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 특히, 실존 건물의 검토 결과에서 일반 해석방법이나 수직변위를 제한한 해석 방법을 사용할 경우, 부재력이 과소 또는 과대 평가됨으로써 구조물의 안전상에 심각한 설계문제를 야기하거나 과대 설계될 수 있음이 나타났다. 따라서, 설계단계에서 구조물의 시공순서와 그에 따른 재하조건을 사전에 파악하여 해석작업에 반영하는 것이 건물의 경제적인 설계와 적절한 구조적 성능을 부여하는데 매우 중요하다 할 수 있다.



[그림 16] GEN(또는 BDS) 프로그램의 시공단계를 고려한 구조해석 개념도

상기와 같이 데이터가 입력되면 MIDAS/GEN(또는 BDS)는 주어진 시공단계별로 모델을 분리, 생성한 다음 시공단계하중을 자동으로 재하하여 해석을 수행한다. 이때 시공단계를 고려한 해석은 상기의 둘째 단계에서 지정된 시공단계 고정하중조건에 대해 수행되며, 기타 골조공사 완료 후 재하될 고정하중과 적재하중 그리고 횡력 등은 일반해석방법과 같이 수행된다. ([그림 16]참조)

MIDAS/GEN (또는 BDS) 프로그램으로 건물의 시공단계를 고려하기 위한 해석절차는 다음과 같다.

첫째, 전체구조물을 모델링한다. 이때 층 또는 절단위로 시공이 될 경우에는 별다른 고려사항 없이 모델링을 하면 되지만, Core와 철골 프레임으로 골조가 구성된 건물에서와 같이 Core를 몇 개층 먼저 시공한 다음, 후속공정으로 철골이 따라 올라가는 경우에는 같은 층이라 하더라도 시공시점이 다르기 때문에 시공단계를 입력할 때 주의해야 한다. 그리고, 시공단계 고정하중과 골조공사 완료 후 재하될 고정하중, 적재하중, 기타 횡력을 별도의 하중조건번호로 구분 입력하여야 한다.

둘째, 시공단계 고정하중조건을 지정한다.

셋째, 시공순서를 고려하여 시공단계별로 포함될 부재의 Group과 Loading Step을 층 또는 재질번호로 구분하여 지정한다.