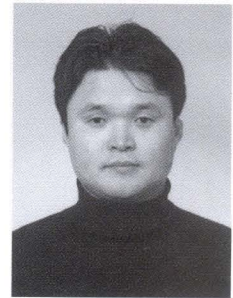




# 장기변형을 고려한 복합구조건물의 시공단계해석



이대근 과장  
(주)마이다사이티 건축구조팀

## 1. 개요

고층건물에서 부등처짐은 탄성축소 뿐만 아니라 건조수축 및 장기 압축하중에 따른 크리프 등에 의해 발생되며, 상층부로 갈수록 부등처짐으로 인한 거더단부의 부가응력이 매우 커져 탄성부등처짐에 의한 부재력의 분포와 상이한 결과를 나타낸다. 이러한 현상은 복합구조시스템에서 보다 큰 문제로 대두된다.

철골기둥과 콘크리트 전단벽으로 이루어진 복합구조시스템에서 축강성에 의한 탄성축소량은 철골기둥이 크지만, 건조수축과 크리프에 의한 비탄성축소량은 콘크리트 전단벽이 크게 나타나게 된다.

따라서, 복합구조시스템일수록 수직부재의 탄성축소량 및 비탄성축소량의 예측이 설계단계에서 반드시 이루어져야 하며, 콘크리트의 비탄성변형을 고려한 시공단계해석을 통해 비교적 합리적이고 정확한 결과를 얻을 수 있다.

MIDAS/Gen의 건조수축과 크리프를 고려한 시공단계해석기능은 위에서 서술한 문제들을 해석적으로 해결하기 위하여 고층건물의 시공과정을 그대로 묘사할 수 있도록 개발되었으며, 콘크리트의 강도, 시공기간, 타설조건, 기후조건 등과 같은 입력변수를 통해 수직부재의 탄성축소와 건조수축 및 크리프에 의해 발생하는 부등축소량을 산정할 수 있다.

본 자료에서는 고층의 사무소 건물에 많이 적용되고 있는 외부철골 프레임과 내부 콘크리트 전단벽으로 이루어진 40층 복합구조시스템에 대하여, 탄성변형과 비탄성변형을 고려한 시공단계해석을

수행하였으며, 수직부재의 처짐량과 거더의 부재력에 대해서 일반 해석(시공단계를 고려하지 않은 경우)결과와 비교, 평가하였다.

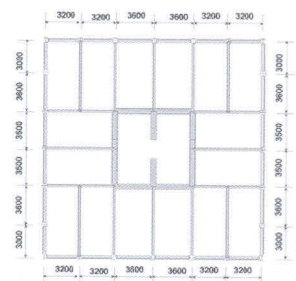
## 2. 모델개요

### 2.1 구조시스템

구조시스템은 코어벽체와 Perimeter Steel Column & Steel Girder로 구성된 지상 40층 건물이며, 기준층 평면은 <그림 2>와 같다.



<그림 1> 건물의 3D 해석모델



<그림 2> 기준층 평면도

각 층의 작용하중은 <표 1>과 같다.

<표 1> 작용하중

하중 구분	기호	기호
골조자중	SW	-
슬래브 자중	Dc	360kg/m <sup>2</sup>
마감 및 외벽하중	Dd	160kg/m <sup>2</sup>
적재하중	LL	250kg/m <sup>2</sup>



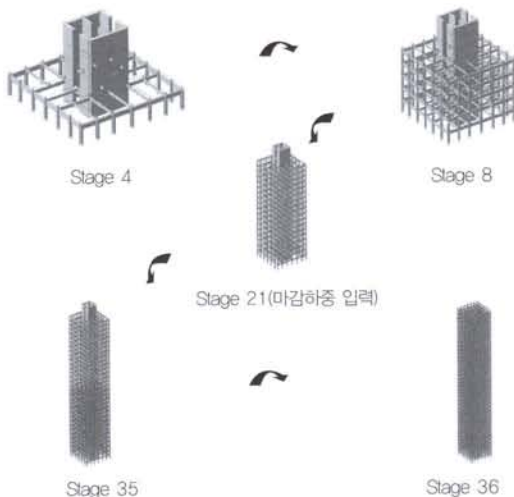
### 2.2 시공 Sequence

시공단계는 코어벽체가 5일 공정으로 3개층 선행시공된 후 네 번째 층이 시공되면서 동시에 철골보, 철골기둥 및 슬래브타설 공정이 진행되며, 바닥마감은 Frame이 21층 시공시 1층부터 5일 공정으로 진행되고 적재하중은 완공 후 90일 이후에 재하된다고 가정하였다.

〈표 2〉 시공 Sequence

Stage	요소그룹		Stage 하중	존속기간 (일)	총공사 기간(일)	비고
#CS1	1층 코어		SW/Dc	5	5	
#CS2	2층 코어		SW/Dc	5	10	
#CS3	3층 코어		SW/Dc	5	15	
#CS4	4층 코어	1층 골조	SW/Dc	5	20	
#CS5	5층 코어	2층 골조	SW/Dc	5	25	
#CS6	6층 코어	3층 골조	SW/Dc	5	30	
#CS7	7층 코어	4층 골조	SW/Dc	5	35	
...	...	...	...	...	...	...
#CS21	21층 코어	18층 골조	SW/Dc/Dd	5	105	1층 마감
#CS22	22층 코어	19층 골조	SW/Dc/Dd	5	110	2층 마감
...	...	...	...	...	...	...
#CS40	40층 코어	37층 골조	SW/Dc/Dd	5	200	20층 마감
#CS41		38층 골조	SW/Dc/Dd	5	205	21층 마감
#CS42		39층 골조	SW/Dc/Dd	5	210	22층 마감
#CS43		40층 골조	SW/Dc/Dd	5	215	23층 마감
#CS44			Dd	85	300	24~40층 마감 완공
#CS45				90	390	
#CS46			LL	260	650	입주

시공단계 및 입력하중의 변화상태는 〈그림 3〉과 같다.



〈그림 3〉 시공단계별 하중입력

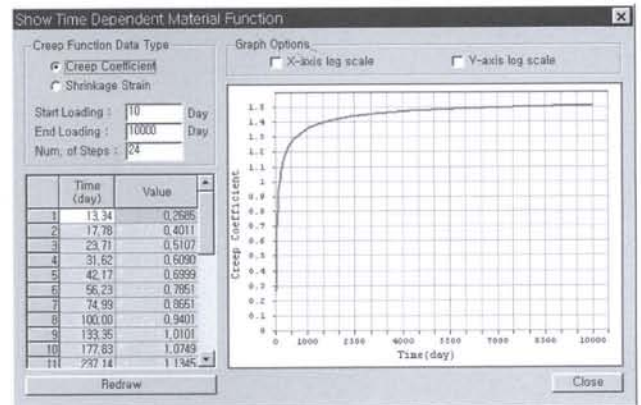
### 2.3 재료의 성질

콘크리트의 건조수축과 크리프 특성을 정의하기 위한 콘크리트의 재료특성은 〈표 3〉과 같다.

〈표 3〉 콘크리트의 재료특성

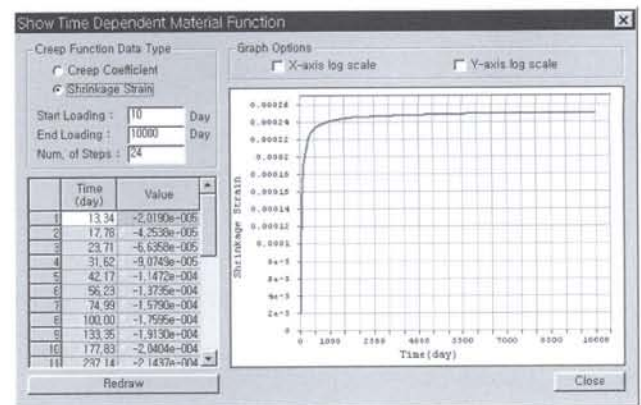
구분	입축강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	상대습도 (%)	슬럼프값 (cm)	잔골재율 (%)	공기량 (%)	단위시멘트 량(kg/m <sup>3</sup> )	초기양생 (일)	V/S Ratio(min)	적용코드
벽체 (1~10F)	500	55	12	60	4.5	450	7	266	ACI
벽체 (11~20F)	400	55	12	60	4.5	380	7	266	ACI
벽체 (21~30F)	350	55	12	60	4.5	350	7	226	ACI
벽체 (31~40F)	300	55	12	60	4.5	320	7	226	ACI

ACI코드에 의한 콘크리트의 크리프 계수는 〈그림 4〉와 같다.



〈그림 4〉 크리프 계수 데이터 및 그래프

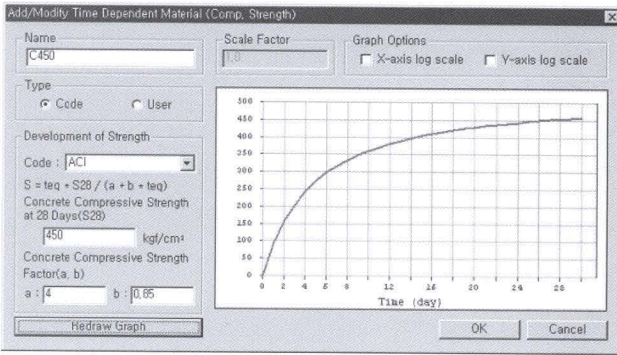
ACI코드에 의한 콘크리트의 건조수축 변형률은 〈그림 5〉와 같다.



〈그림 5〉 건조수축 변형률 데이터 및 그래프



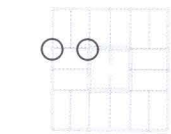
ACI코드에 의한 콘크리트의 강도발현 함수는 <그림 6>과 같다.



<그림 6> 강도발현함수 및 그래프( $c' = 450\text{kgf/cm}^2$ )

### 3. 수직부재의 축소량 및 거더의 휨모멘트비교

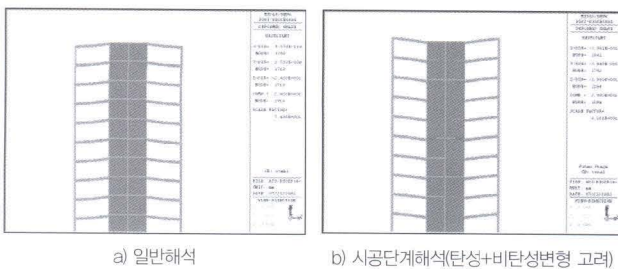
#### 3.1 수직부재의 축소량 비교



<그림 7> 축소량 검토 위치

수직부재의 축소량 검토 위치는 <그림 7>과 같이 철골기둥과 콘크리트벽체를 선정하였다.

해석결과 시공단계를 고려하지 않은 일반 해석의 경우에는 <그림 8>에서처럼 철골기둥이 벽체에 비해 상대적으로 많이 처졌으나, 구조물의 탄성변형 뿐만 아니라 콘크리트 벽체의 건조수축과 크리프 성분을 고려하여 시공단계해석을 수행한 경우에는 일반해석과는 반대로 벽체의 수직처짐량이 더 크게 나타났다. 이는 벽체의 비탄성처짐량이 탄성 처짐량에 비해 비교적 크기 때문으로 볼 수 있다.

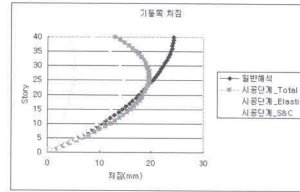


<그림 8> 수직부재의 부등축소

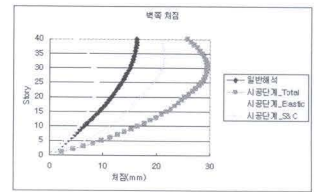
<그림 9>와 <그림 10>은 기둥과 벽체의 층별 수직처짐 분포도를 나타낸 것이다. 일반해석의 경우 상부층으로 가면서 점차 증가하여 최상층에서 최대(기둥:24.2mm, 벽체:16.3mm)가 되고, 시공단계를 고려할 경우에는 기둥은 26층에서 최대(19.6mm), 벽체는 30층에서 최대(29.5mm)를 보이고 상부층으로 가면서 점차 감소한다.

기둥의 경우 25층 이상에서 일반해석과 시공단계해석의 결과가

차이가 나지만, 벽체의 경우는 거의 모든 층에서 큰 차이를 보이고 있다. 이는 벽체의 건조수축과 크리프에 의한 처짐이 탄성처짐에 비해 매우 크게 발생하기 때문으로서, 벽체의 비탄성처짐을 무시할 수 없음을 보여준다.



<그림 9> 기둥의 층별 수직처짐 분포도

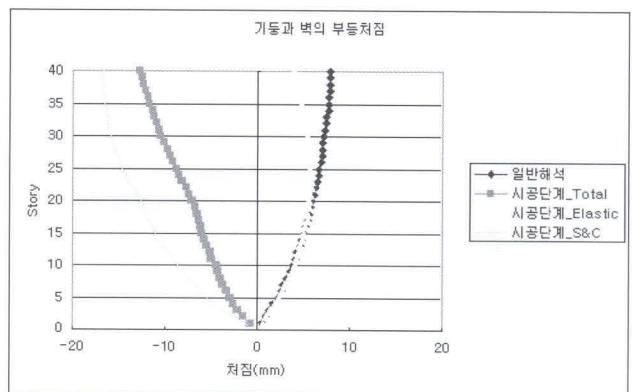


<그림 10> 벽체의 층별 수직처짐 분포도

일반해석의 경우는 기둥이 더 많이 처지고, 비탄성변형을 고려한 시공단계해석의 경우는 벽체가 더 많이 처지기 때문에, 기둥과 벽체의 부등처짐량은 일반해석과 시공단계해석의 경우 정반대로 나타나게 된다. 두 경우 모두 부등처짐이 상부층으로 갈수록 점차 증가하여 최상층에서 최대(일반해석:7.9mm, 시공단계해석:12.8mm)가 되지만, 일반해석의 경우는 기둥이 7.9mm, 시공단계해석의 경우는 벽체가 12.8mm 더 처진 결과로써, 이러한 현상은 탄성에 의한 층별 부등처짐의 양상과는 아주 다르다.

<표 4> 최상층의 부등처짐량 비교

	일반해석	시공단계해석		
		Elastic	S&C	Total
부등처짐량	7.9mm	4.0mm	16.7mm	12.8mm
처짐량 비교	기둥 > 벽체	기둥 > 벽체	기둥 > 벽체	기둥 > 벽체



<그림 11> 기둥과 벽체의 층별 부등처짐 분포도

<표 5>는 적재하중이 가해지기 직전(#CS45)과 적재하중이 가해지고 260일 후(#CS46)에 철골 기둥과 콘크리트 벽체의 부등처짐량을 나타낸 것이다. #CS46단계는 공사기간 650일이 지난 시점으로서 건조수축과 크리프에 의한 처짐량이 약 90%정도 진행된 시기에 해당된다. 적재하중은 #CS46단계에서 100%가 작용되고,



고정하중의 40%정도 크기에 해당되므로, 적재하중에 의한 부등처짐은 #CS46단계와 #CS45단계의 부등처짐량의 차이(0.3mm)의 40%인 0.12mm가 된다.

이는 전체 부등처짐량의 1.0%에 지나지 않으므로 완공 후 재하되는 적재하중은 수직부재의 부등처짐에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단할 수 있다.

〈표 5〉 적재하중이 가해지기 직전과 260일이 지난 후의 부등처짐

	부등처짐(mm)	작용하중	작용하중	작용하중
#CS45	12.4	DL	90	390
#CS46	12.7	DL + LL	260	650

### 3.2 거더의 휨모멘트 비교

다음 4가지 경우에 대해 콘크리트 벽체와 철골 기둥을 연결하는 거더의 휨모멘트 해석결과를 비교하였다. Case 4는 실무에서 고층 건물의 수평부재 설계시 일부 사용되고 있는 방법으로써 부등처짐에 의한 부가응력을 무시하는 경우이다.

- ▶ Case 1 : 시공단계를 고려하지 않은 일반해석
- ▶ Case 2 : 탄성처짐만을 고려한 시공단계해석
- ▶ Case 3 : 탄성 및 비탄성처짐(건조수축 & 크리프)을 고려한 시공단계해석
- ▶ Case 4 : 수직부재의 부등처짐을 무시한 해석

최대단부모멘트가 일반해석과 탄성처짐만을 고려한 시공단계해석의 경우 벽체쪽에서 발생한 반면, 건조수축과 크리프를 포함한 시공단계해석의 경우에는 기둥쪽에서 발생하였다. 이는 앞서 설명한대로 건조수축과 크리프를 고려하지 않았을 경우에는 상대적으로 기둥이 많이 처지고, 고려하였을 경우에는 벽체가 많이 처지기 때문이다.

Case 4처럼 수직부재의 부등처짐을 무시하고 구한 거더의 모멘트는 수직부재의 탄성 및 비탄성 부등처짐을 고려한 Case 3의 해석결과에 비해 하부 몇 개층을 제외하고는 상층부로 올라갈수록 큰 오차를 보였다. 가장 큰 오차를 보인 40층 거더의 경우 기둥쪽 모멘트는 47.1%로 과소평가하게 되고, 벽체쪽 모멘트는 274.1%로 심하게 과대평가하는 것으로 나타났다. 따라서, 실무에서 수평부재 설계시 일부 사용하고 있는 수직부재의 부등처짐을 무시한 해석결과는 상당한 오류를 포함할 수 있음을 보여준다.

〈표 6〉 해석 종류별 거더의 모멘트 비교

거더	Case	Moment(tf-m)					
		column	Ratio	mid	Ratio	wall	Ratio
40F G	일반해석	4.68	-19.7%	9.19	100.9%	-26.71	-684.9%
	시공단계_Elastic	-0.26	1.1%	9.22	101.2%	-21.31	-546.4%
	시공단계_Total	-23.71	100.0%	9.11	100.0%	3.9	100.0%
	처짐무시	-11.17	47.1%	8.64	94.8%	-10.69	-274.1%
20F G	일반해석	1.29	-7.6%	9.15	104.7%	-23.14	568.6%
	시공단계_Elastic	2.48	-14.5%	9.26	105.9%	-24.2	594.6%
	시공단계_Total	-17.07	100.0%	8.74	100.0%	-4.07	100.0%
	처짐무시	-11.17	65.4%	8.64	98.9%	-10.69	262.7%
1F G	일반해석	-9.31	85.2%	8.92	100.0%	-12.12	117.1%
	시공단계_Elastic	-8.86	81.1%	8.98	100.7%	-12.47	120.5%
	시공단계_Total	-10.93	100.0%	8.92	100.0%	-10.35	100.0%
	처짐무시	-11.17	102.2%	8.64	96.9%	-10.69	103.3%

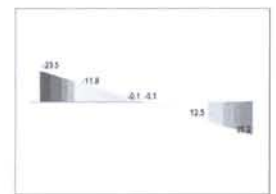
〈그림 12〉는 40층 거더의 모멘트분포의 차이를 일반해석의 경우와 시공단계해석의 경우로 나누어 나타낸 것이며, 〈그림 13〉 및 〈그림 14〉는 구조물 상층부의 모멘트 분포를 비교한 것이다.



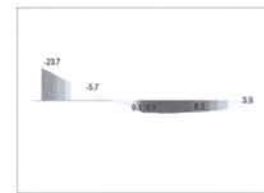
▲ 일반해석



▲ 시공단계해석(Elastic)

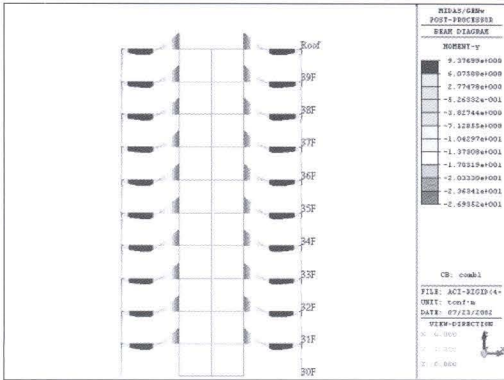


▲ 시공단계해석(Creep & Shrinkage)

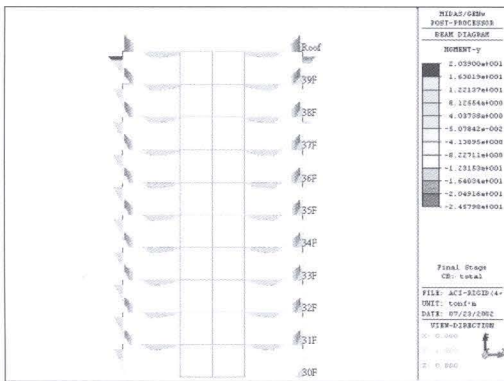


▲ 시공단계해석(Total)

〈그림 12〉 40층 거더의 일반해석과 시공단계해석시 모멘트 분포

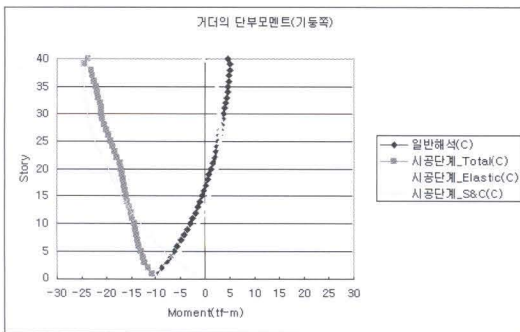


(그림 13) 거더의 모멘트 분포(일반해석)

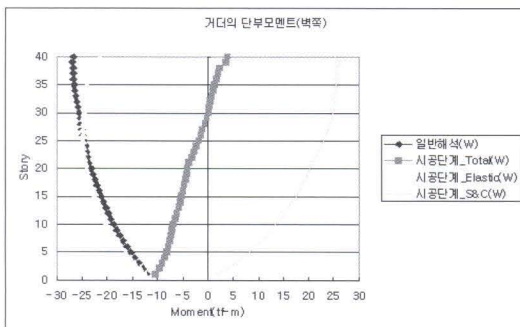


(그림 14) 거더의 모멘트 분포(시공단계, 탄성변형, 크리프 및 건조수축 고려)

탄성 및 비탄성에 의한 부등처짐의 영향을 모두 고려했을 때, 거더의 기둥쪽 단부모멘트는 일반해석하는 경우 크게 과소평가되고, 거더의 벽체쪽 단부모멘트는 크게 과대평가하는 것으로 나타났다.

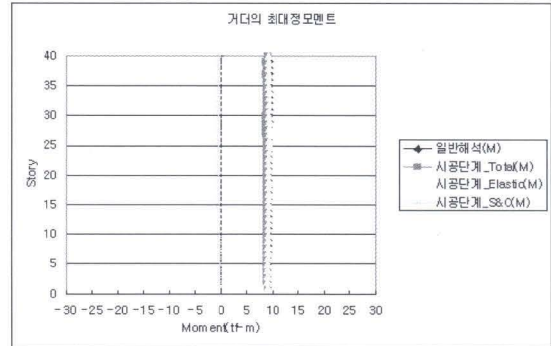


(그림 15) 층별 거더 단부모멘트(기둥쪽)



(그림 16) 층별 거더의 단부 모멘트(벽쪽)

부등처짐에 의한 부가응력이 거더 중앙부에서는 거의 0에 가깝기 때문에 거더의 최대정모멘트는 일반해석과 시공단계해석결과가 별로 차이가 나지 않는다.



(그림 16) 층별 거더의 단부 모멘트(벽쪽)

#### 4. 맺음말

철골기둥과 콘크리트 벽체로 이루어진 초고층 복합구조물의 일반해석 및 시공단계해석결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- ▶ 콘크리트 벽체의 비탄성처짐량은 탄성처짐량의 4배정도로써 콘크리트의 건조수축과 크리프에 의한 처짐을 반드시 고려하여야 한다.
- ▶ 건조수축과 크리프에 의한 콘크리트 부재의 비탄성 변형은 장기간에 걸쳐 발생하지만, 시공시 그 대부분이 발생하게 되어 완공 후 재하되는 적재하중에 의한 부등처짐량은 고정하중에 의한 부등처짐량의 1% 정도로 매우 작다.
- ▶ 거더의 최대 부모멘트의 경우, 일반해석과 탄성변형만을 고려한 시공단계해석의 경우 벽체쪽에서 크게 나타나지만, 건조수축과 크리프를 고려한 시공단계해석의 경우 반대로 기둥쪽에서 더 크게 나타난다. 따라서, 일반해석 또는 탄성변형만을 고려한 시공단계해석의 경우 비탄성변형을 고려한 시공단계해석에 비해 거더에 작용하는 단부모멘트를 벽체쪽의 경우 과대평가 하게되고, 기둥쪽의 경우 과소평가 하게된다.
- ▶ 거더의 최대 정모멘트의 경우, 시공단계 및 수직부재의 부등처짐에 큰 영향을 받지 않는다. 이는 수직부재의 부등처짐에 의한 부가응력이 거더 중앙부에서는 0에 가깝기 때문이다.
- ▶ 실무에서 고층건물의 수평부재 설계시 일부 사용되고 있는 수직부재의 부등처짐을 무시하는 방법은 부등처짐에 의한 부가응력을 고려하지 못하게 되므로 부재력 산출결과에 상당한 오류를 포함할 수 있다. **KSEA**