

## 정적탄소성해석에 의한 복합구조물의 거동특성에 관한 연구

### A Study on the Behavior Properties of Residential-Commercial Building by Pushover Analysis

강 병 두\*                  전 대 한\*\*                  김 재 응\*\*\*  
Kang, Pyeong-Doo    Jun, Dae-Han                  Kim, Jae-Ung

#### ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate elasto-plastic behaviour and estimate ultimate resistance capacity of the residential-commercial building subjected to lateral force along the height of structure. Four types of residential-commercial building are chosen as analytical models and investigated by pushover analysis. Pushover analysis estimates initial elastic stiffness, post-yielding stiffness, and plastic hinges on each story of structures through three-dimensional nonlinear analysis program CANNY-99.

Skeleton curve of bending stiffness model is bilinear, shear stiffness model is trilinear, and axial stiffness model is elastic. Skeleton curve of axial stiffness model has the axial compression and tension stiffness of reinforced concrete members.

This study presents the change of inter story drift, story stiffness and hinge of story and member.

#### 1. 서 론

복합건물은 도심지역, 특히 고밀화 되어 가는 상업지역에서 주거, 상업 및 서비스공간을 같은 장소에 두고자 상업공간에 주거공간을 도입한 건물이다. 일반적으로 주상복합건물은 상부는 주거용으로 하부는 상업용으로, 소위 상부벽식-하부골조 구조형식이 채택된다. 이와 같이 서로 다른 두 가지의 구조형식을 하나의 구조체로 건설하게 되면 setback이 생기거나, 상·하부의 구조가 정확하게 맞물려서 연결되지 않는 경우가 발생하게 된다. 이러한 상·하부의 구조형식은 pit층을 두어 연결시킬 수 있으며, pit층의 형식으로는 transfer girder, transfer truss, 및 transfer slab 등이 있다.

기존 골조구조의 항복 메카니즘은 일반적으로 1층 기둥과 보의 양단부에서 소성힌지가 발생하므

로, 정밀한 탄소성해석을 하지 않아도 어느 정도 예측할 수 있으나, 복합구조물의 경우 상부벽식-하부골조의 구조형식, 질량과 강성의 큰 변화, setback의 영향으로 항복에 의한 거동특성을 예측하기란 쉽지가 않다.

본 연구에서는 3차원 탄소성해석용 프로그램인 CANNY-99<sup>1,2)</sup>(이후 CANNY라 함)에 의한 정적탄소성해석(pushover analysis)을 통하여, 탄성해석만으로는 파악하기 어려운 복합구조물의 정적탄소성 거동특성을 살펴보고자 한다.

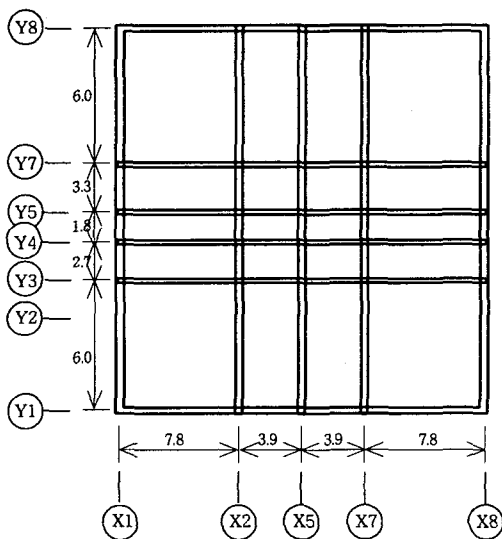
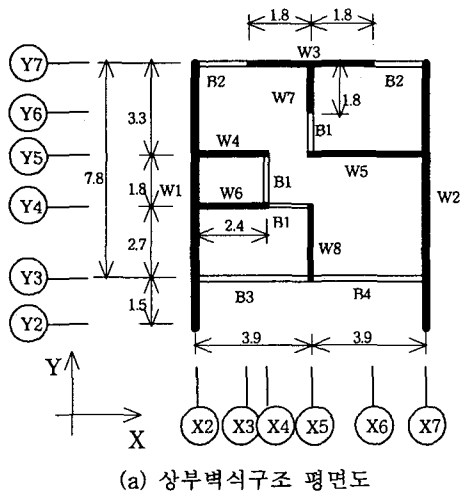
#### 2. 해석모델

##### 2.1. 일반사항

본 연구에서 사용될 해석모델은 표 1과 같이 4가지로서 모든 모델의 평면은 그림 1과 같이 동일하며, 단지 상부벽식 층수만 다르다. 모든 해석모델의 하부골조의 층고는 4.5m, 상부벽식의 층고는 2.8m로 한다. 모델의 pit층의 형식은 transfer girder

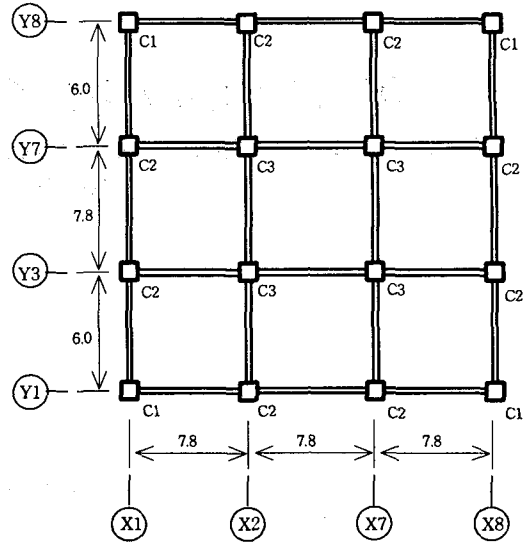
\* 도립거창전문대학 건축과 조교수  
\*\* 동서대학교 건설공학부 조교수  
\*\*\* 동아대학교 건축공학과 교수

를 사용한다. 층수에 따른 부재치수의 변화는 무시하기로 하며, 이들 부재의 치수 및 배근도는 표 2~4와 같다. 사용재료의 특성은 철근의 경우, 탄성계수  $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{kgf/cm}^2$ , 항복응력은 D16이상에서는  $f_y = 4000 \text{kgf/cm}^2$ , D13이하에서는  $f_y = 3000 \text{kgf/cm}^2$ 이다. 콘크리트의 경우, 탄성계수  $E_c = 2.32 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ , 설계기준강도  $F_c = 240 \text{kgf/cm}^2$ , 전단탄성계수  $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ , 프와송비  $\nu = 0.167$ 이다.



※ 모든 transfer girder는 TGI

(b) Pit층 평면도(4층 바닥)



※ 모든 보는 G1

(c) 하부골조구조 평면도

그림 1. 해석모델 평면도

표 1. 해석모델

해석 모델	하부골조 층수	상부벽식 층수	전체 층수	전체높이 (m)
S1	3	21	24	72.3
S2	3	16	19	58.3
S3	3	11	14	44.3
S4	3	5	8	27.5

표 2. 기둥배근 리스트

모델	Col. ID	Story No.	Size(mm)	Bar	Hoop
S1	C1	1F~3F	1000×1000	20-HD25	D10@200
	C2	1F~3F	1000×1000	48-HD25	D10@200
	C3	1F~3F	1000×1000	30-HD25	D10@200
S2	C1	1F~3F	1000×1000	20-HD25	D10@200
	C2	1F~3F	1000×1000	38-HD25	D10@200
	C3	1F~3F	1000×1000	20-HD25	D10@200
S3, S4	C1	1F~3F	1000×1000	20-HD25	D10@200
	C2	1F~3F	1000×1000	20-HD25	D10@200
	C3	1F~3F	1000×1000	20-HD25	D10@200

표 3. 벽배근 리스트

모델	Wall ID	THK (mm)	Story No.	Ver. Bar*	Hor. Bar*	Edge Bar
S1	W1, W2	200	4F~9F	D19@150	D13@150	4-HD22
			10F~15F	D16@150	D10@200	4-HD22
			16F~RF	D13@300	D10@300	4-HD22
	W3~W8	180	4F~9F	D19@150	D13@150	4-HD22
			10F~15F	D16@150	D10@200	4-HD22
			16F~RF	D13@300	D10@300	4-HD22
S2	W1, W2	200	4F~8F	D19@150	D10@150	4-HD22
			9F~13F	D13@150	D10@200	4-HD22
			14F~RF	D10@300	D10@300	4-HD22
	W3~W8	180	4F~8F	D19@150	D10@150	4-HD22
			9F~13F	D13@150	D10@200	4-HD22
			14F~RF	D10@300	D10@300	4-HD22
S3	W1, W2	200	4F~6F	D13@150	D10@150	4-HD22
			7F~10F	D10@150	D10@200	4-HD22
			11F~RF	D10@300	D10@300	4-HD22
	W3~W8	180	4F~6F	D13@150	D10@150	4-HD22
			7F~10F	D10@150	D10@200	4-HD22
			11F~RF	D10@300	D10@300	4-HD22
S4	W1, W2	200	4F~RF	D13@300	D10@300	4-HD22
	W3~W8	180	4F~RF	D13@300	D10@300	4-HD22

\* 복배근

표 4. 보배근 리스트

모델	Gir. ID	Story No.	Size (mm)	주근		녹근	
				단부	중앙부	단부	중앙부
S1	G1	2F~3F	400×600	8-HD22	2-HD22	D10@200	D10@250
	TG1	4F	700×2100	3-HD22	4-HD22		
S2	G1	2F~3F	400×600	8-HD22	2-HD22	D10@200	D10@250
	TG1	4F	700×2100	15-HD29	15-HD29		
S3	G1	2F~3F	400×600	8-HD22	2-HD22	D10@200	D10@250
	TG1	4F	700×2100	15-HD22	15-HD22		
S4	G1	2F~3F	400×600	8-HD22	2-HD22	D10@200	D10@250
	TG1	4F	700×2100	15-HD22	15-HD22		
상부 벽식 보부 재(전 모델)	B1	5F~RF	180×580	4-HD16	4-HD16	D10@200	D10@200
	B2	5F~RF	180×1300	4-HD16	4-HD16		
	B3	5F~RF	180×1000	4-HD16	4-HD16		
	B4	5F~RF	180×320	4-HD16	4-HD16		

\* 수평전단보강근

2.2. 하중조건

구조물의 구조해석과 단면설계를 위한 하중 및

하중조합은 대한건축학회 제정의 하중규준<sup>3)</sup>을 따른다.

(1) 고정하중 및 적재하중

사용하중 중 고정하중과 적재하중의 경우 상부 벽식은 600kgf/m<sup>2</sup>과 200kgf/m<sup>2</sup>, 하부골조는 560kgf/m<sup>2</sup>과 350kgf/m<sup>2</sup>을 사용하였다.

(2) 풍하중

풍하중 산정은 하중규준에 의해 계산되었으며 노풍도 구분 A의 대도시 중심부에 10층 이상의 대규모 고층건축물이 밀집해 있는 지역으로, 기본풍속은 40m/sec이며, 지형에 의한 풍속할증계수( $K_{zt}$ )는 1.0, 건축물의 중요도계수( $I_w$ )는 15층 이상 아파트의 경우로 1.10의 값을 사용하였다.

(3) 지진하중

층지진하중, 층전단력, 밀면전단력, 전도모멘트의 산정은 하중규준에 의해 산정되었다. 하중규준식에 사용되는 계계수와 그 값은 표 5와 같고, 하중규준식에 따라 산정된 각 모델의 밀면전단력은 표 6과 같다. 표 6의 밀면전단력(V)의 변화가 크지 않은 것은, 고층을 예(S1)를 들면, 구조물의 전체 중량(W)은 크지만 높이( $h_n$ )가 커서 동적계수(C)가 작아지기 때문이다.

표 5. 밀면전단력 산정용 계계수(등가정적해석)

기호	값	비고
A	0.11	지진구역 I
R	3.0	기타구조방식
S	1.0	지반중별의 지반 I로 가정
T	-	기타구조물, $T=0.0488(h_n)^{3/4}$
$I_E$	1.5	도시계획구역, 15층 이상 APT
W	-	건물의 전중량
$h_n$	-	건물의 전체 높이
C	-	$C = \frac{S}{1.2\sqrt{T}}$

표 6. 내진설계법에 의한 밀면전단력(V)

모델	$h_n$ (m)	T(sec)	C	W(tonf)	V(tonf)
S1	72.3	1.21	0.76	4519.1	188.3
S2	58.3	1.03	0.82	4047.0	182.8
S3	44.3	0.84	0.91	3574.8	179.0
S4	27.5	0.59	1.09	3008.3	180.1

수평하중 중 풍하중과 지진하중의 층전단력과 전도모멘트의 비교를 비교하면 그림 2와 같다.

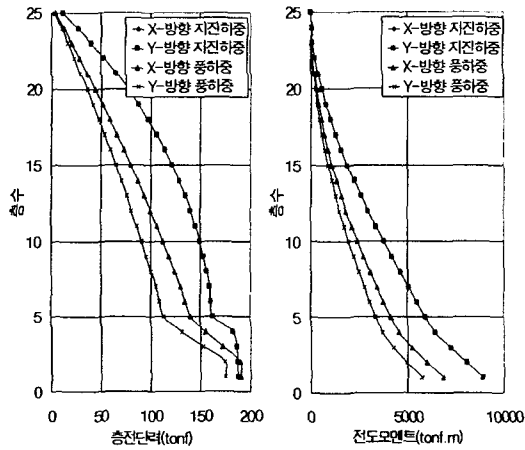


그림 2. 모델 S1의 층전단력, 전도모멘트 비교

비교 결과, 상·하부 모든 층에서 지진하중이 큰 값을 나타내었다. 따라서 수평하중으로는 지진하중만을 고려하며, 이를 하중조합에 반영한다.

예제 구조물의 부재설계용 하중조합은 다음과 같이 하며, 설계 프로그램으로는 MIDAS/GENw Ver. 4.1.3<sup>4)</sup> (이후 MIDAS라 함)를 사용하기로 한다.

$$U=1.4D+1.7L$$

$$U=0.75(1.4D+1.7L \pm 1.8Ex,y)$$

$$U=0.9D \pm 1.4Ex,y$$

여기서, D는 고정하중, L은 적재하중, E는 지진하중으로서 X, Y 양방향에 대해 각각 고려한다.

### 3. 정적탄소성해석

#### 3.1. 기본가정

탄성해석 및 설계가 이루어진 해석모델에 대하여, 3차원 입체 탄소성해석용 CANNY 프로그램으로 탄소성 해석을 수행하였다. 2.2절의 하중조건에서 산정한 국내 내진설계기준<sup>4)</sup>의 지진하중 분포를 X방향의 수평력 분포로 사용하였다. 모델의 연직하중은 고려하지 않으며, 수평력에 의한 증분해석을 수행하였다.

지반은 고정으로 가정하였으며, 기하학적비선형성은 고려하지 않는다. 보-기둥 절점은 강점으로

가정하고, 선형 요소단에서 강역(rigid zones)은 고려하지 않았다. 모든 층의 바닥판은 강막(rigid diaphragm)으로 가정하였다.

#### 3.2 요소모델의 성격<sup>1,2)</sup>

##### (1) 보, 기둥의 모델화

비선형해석을 위한 보, 기둥요소는 탄소성 일축 스프링으로 요소단부에서 두 개의 회전스프링, 재단 중앙부에서 전단과 축 스프링에 의해 이상화된다. 축변형은 보의 경우 고려되지 않았으며, 기둥의 경우 탄성변형으로 고려하였다. 이는 비선형 변형을 양단부 혹은 스프링에 집중시킨 것으로 다른 변위요소에 대한 상호관계 없이 일축스프링에 의해 이상화되는 것이다.

##### (2) 전단벽의 모델화

전단벽 모델은 그림 3과 같이 전단벽의 상·하부에서는 무한강성을 갖는 판넬 보(rigid panel-beam)가 위치하는 것으로 가정하며, 판넬변형을 나타내기 위해, 면내 축스프링, 회전스프링, 전단스프링이 사용된다. 면외강성은 무시한다.

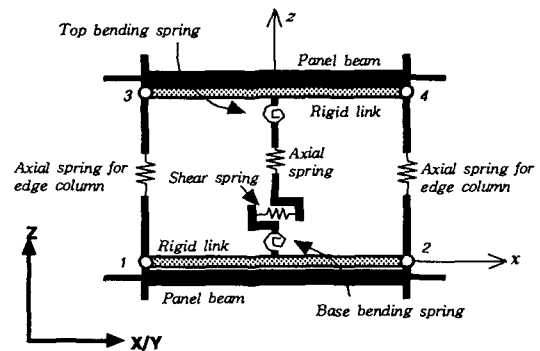


그림 3. 전단벽의 모델화 방법

#### 3.3. 골격곡선 및 단면내력

본 연구에서 사용한 골격곡선(skeleton curve)으로는, 휨변형은 bilinear, 전단변형은 trilinear, 축변형은 elastic 모델을 사용하였다.

탄소성해석에 필요한 부재의 균열 휨 및 전단강도, 종곡 휨 및 전단강도, 그리고 압축강도 등은 직접 산정하여 입력하였다. 휨에 대한 균열 및 종곡강도는 휨이론에 따라 산정되었으며, 전단에 대한 균열 및 종곡강도는 일본건축학회 강도산정식<sup>5,6)</sup>을

사용하였다.

전단균열후의 강성은 할선강성으로 초기강성의 0.16을 사용하였으며, 균열후의 항복강성은 초기강성의 0.001을 사용하였다.

### 3.4. 증분해석법

일반적으로 철근콘크리트 구조물의 탄소성해석에서는, 힙과 변위 사이의 순간적 선형관계의 가정 아래, 하중을 점점 증가시키면서 부재의 항복상태를 파악하는 증분해석법(step by step)을 사용한다. 이 방법은 구조부재의 항복한지 발생 및 구조물 전체의 총항복 상태를 보다 정밀히 추적할 수 있는 방법이다.

## 4. 해석결과 및 고찰

### 4.1. 정적탄성해석결과

해석모델에 대한 MIDAS와 CANNY에 의한 X, Y 방향에 대한 고유주기와 MIDAS에 의한 질량참여율을 표 7에 나타내었다. 질량참여율은 고층 모델로 갈수록 1차 모드의 영향이 줄어들어 확인할 수 있다. MIDAS와 CANNY의 3차 모드까지의 mode shape는 그림 4와 같다.

표 7과 그림 4에서 알 수 있듯이, 두 해석 프로그램

표 7. 각 모델의 고유주기비교 및 질량참여율

모델	모드	MIDAS		CANNY		오차율(%)		질량참여율 누계(%)	
		Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty	Tx	Ty
S1	1st	2.45	1.57	2.38	1.52	3.06	3.15	32.61	45.53
	2nd	0.80	0.65	0.79	0.65	1.41	0.81	72.69	87.35
	3rd	0.43	0.23	0.43	0.23	0.41	-0.96	93.25	93.41
S2	1st	1.64	1.08	1.60	1.06	2.61	2.08	34.96	60.99
	2nd	0.69	0.57	0.70	0.57	-0.12	0.76	87.44	92.36
	3rd	0.29	0.15	0.29	0.15	-1.09	-3.00	92.60	92.84
S3	1st	1.00	0.80	0.98	0.80	1.90	0.40	54.63	85.28
	2nd	0.59	0.40	0.59	0.38	0.28	4.41	89.17	91.61
	3rd	0.16	0.10	0.17	0.10	-2.38	-0.82	91.79	97.92
S4	1st	0.69	0.67	0.69	0.67	0.12	0.10	89.17	89.82
	2nd	0.25	0.14	0.23	0.13	6.43	3.89	90.15	90.61
	3rd	0.11	0.09	0.11	0.10	-2.55	-9.70	90.73	98.13

$$\text{오차율(}\%) = \frac{\text{MIDAS} - \text{CANNY}}{\text{CANNY}} \times 100$$

램에 의한 탄성해석 결과는 거의 일치한다. 이것은 해석모델링 방법과 CANNY에 충분한 타당성과 신뢰성이 있음을 간접적으로 보여주고 있다.

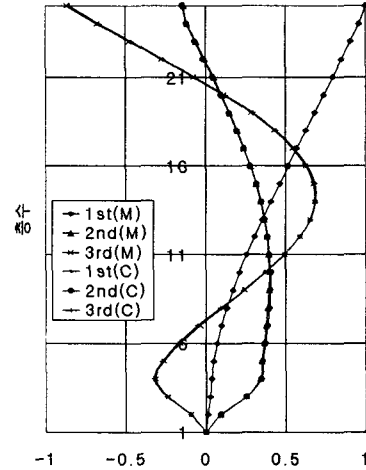
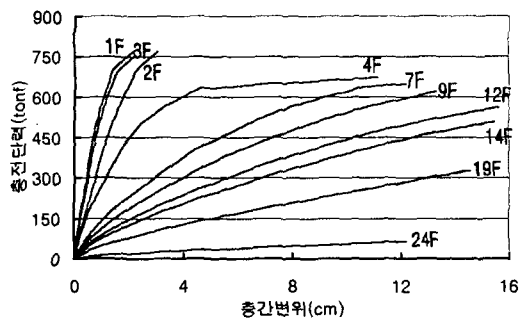


그림 4. 모델 S1의 mode shape

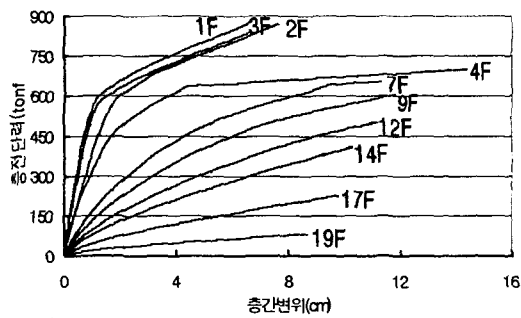
### 4.2 정적탄소성해석결과

탄성해석에서 사용된 해석모델에 대하여 탄소성 해석을 수행한 결과 중, 대표적인 층간변위-층전단력 관계를 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5에 나타난 것처럼 하부층으로 갈수록 층강성이 크고, 고층으로 갈수록 층간변위항복이 늦게 발생하며, 층간변위는 중간층 부근에서 더욱 큰 것으로 나타난다. 그림 5의 값들은 전단질점계모델의 동적해석을 위한 복원력 특성 즉, 각 층 슬래브 위치에 질량을 집중시켜 한 층당 일자유도를 갖는 진동모델을 구성하는데 사용될 수 있다.

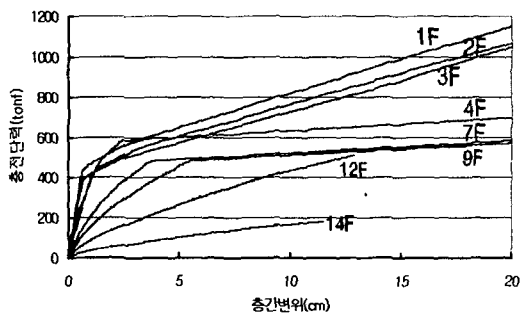
그림 6~9는 각 모델의 항복한지 발생도이다. 각 모델에 대하여 내진설계기준에 의한 밀면전단력(V)을 기준으로 작성한 것으로, △는 V, ○는 2V, ▲는 3V, ●는 4V의 밀면전단력이 작용한 경우에 해당되는 것으로, 각 층의 각 부재에 대해 항복한지의 발생의 순서를 그림에 나타내었다. 해석 모델의 전체적인 항복양상은 상부벽식구조의 coupling beam의 단부, 상부벽식구조의 최하부 벽의 하단부, 하부골조의 1층 주각부와 3층 주두부 및 2~3층 보의 양단부의 순서로 발생되었다. Transfer girder의 경우 항복한지는 늦게 형성되며, 주로 상부벽이 위치하는 곳에서 나타났다.



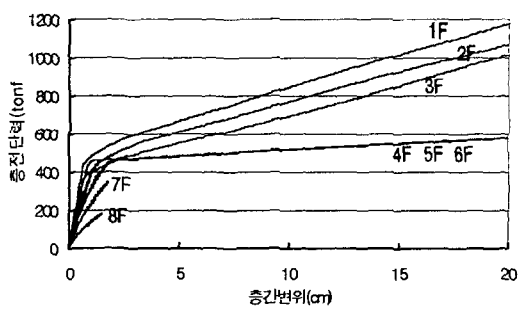
(a) 모델 S1



(b) 모델 S2



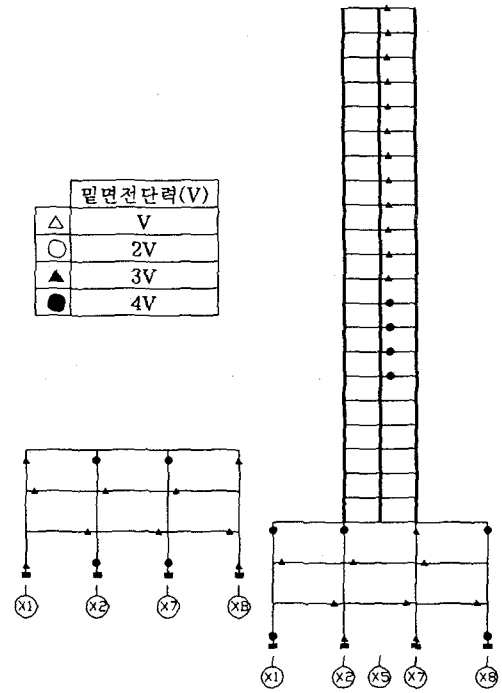
(c) 모델 S3



(d) 모델 S4

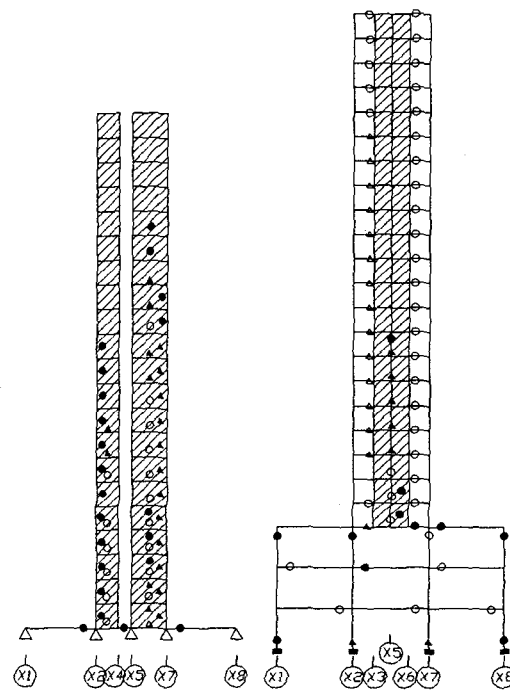
그림 5. 해석모델의 층간변위-층전단력관계

밀면전단력(V)	
△	V
○	2V
▲	3V
●	4V



(a) Y1 골조

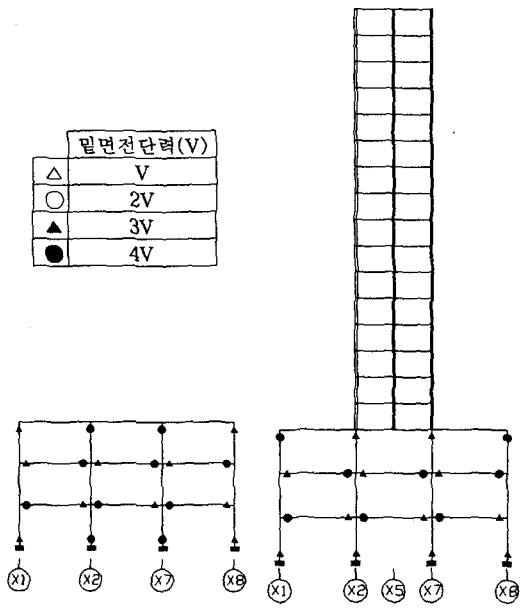
(b) Y3 골조



(c) Y5 골조

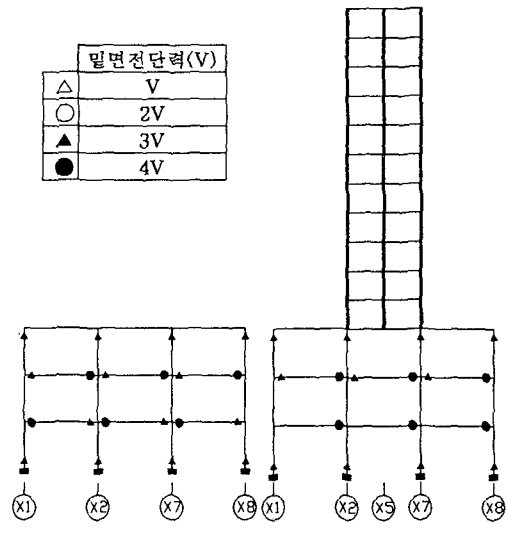
(d) Y7 골조

그림 6. 모델 S1의 항복한지도



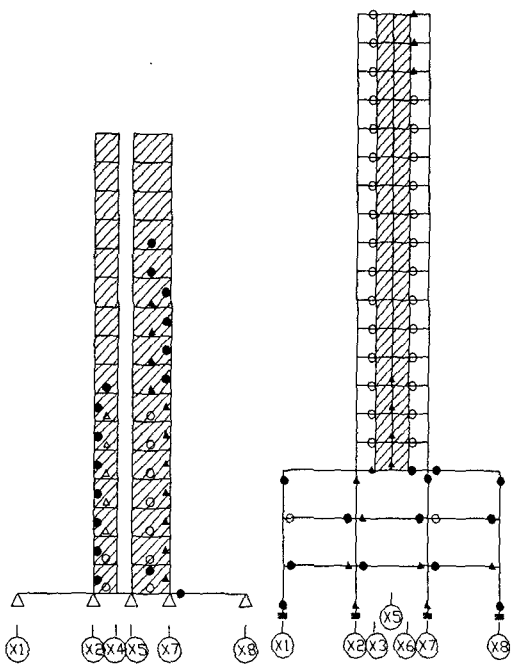
(a) Y1 골조

(b) Y3 골조



(a) Y1 골조

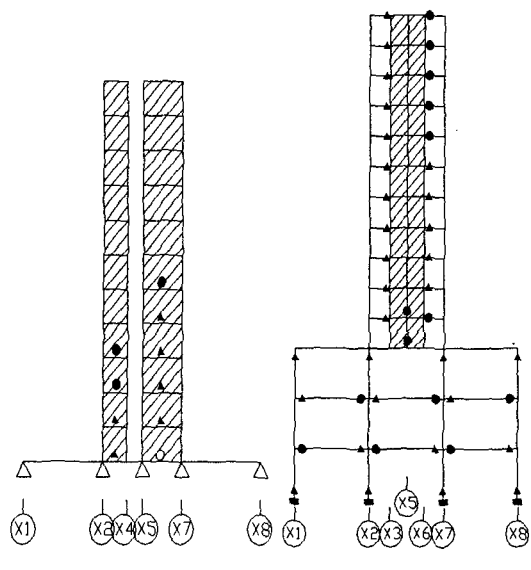
(b) Y3 골조



(c) Y5 골조

(d) Y7 골조

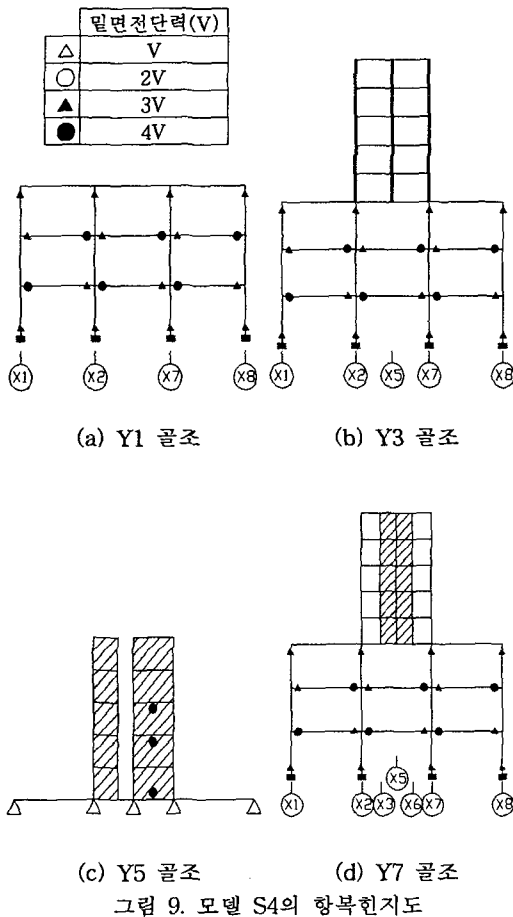
그림 7. 모델 S2의 항복한지도



(c) Y5 골조

(d) Y7 골조

그림 8. 모델 S3의 항복한지도



## 5. 결 론

본 연구에서는 우리나라의 복합구조물의 대표적 구조형식인 상부벽식-하부골조에 pit층이 transfer girder 형식인, 복합구조물에 대해 3차원 정적탄소성해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) MIDAS와 CANNY의 각 모델에 대한 고유주기와 mode shape은 거의 일치한 것으로 나타나므로, 해석모델링 방법과 CANNY에 충분한 타당성과 신뢰성이 있다고 볼 수 있다.

2) 고층으로 갈수록 층간변위항복이 늦게 나타났으며, 하부층일수록 층강성은 커졌다. 그리고 층간변위는 중간층에서 크게 나타났다.

3) 상부높이의 변화에 따른 해석모델의 항복양상은 하부골조의 경우 전 모델이 비슷하게 나타났으

나, 상부벽식구조 층수가 증가할수록 coupling beam의 단부와 상부벽에서 항복이 더 빨리 발생되었다.

4) Transfer girder의 항복은 기둥, 보, 벽 부재에 비하여 늦게 일어났으며, 주로 상부에 벽이 위치하는 곳에서 발생하였다.

## 참고문헌

1. Kang-Ning Li(1999). "CANNY-99 : Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis Computer Program Package-Users Manual," CANNY Consultants PTE. LTD. Singapore.
2. Kang-Ning Li(1999). "CANNY-E : Three-Dimensional Nonlinear Dynamic Structural Analysis Computer Program Package-Technical Manual(Part I)," CANNY Consultants PTE. LTD. Singapore.
3. "건축물 하중기준 및 해설", 대한건축학회, 2000
4. 포스코 개발주식회사(2000). MIDAS/GENw Ver. 4.1.3. User's Manual Vol. I.
5. 日本建築センター-(1987). 中高層壁式鐵筋コンクリート造設計施工指針・同解説.
6. 日本建築學會(1997). 鐵筋コンクリート造建物靱性保証設型計耐震設計指針(案)・同解説.
7. 전대한 외4인, "벽식건물의 탄성해석에서 벽체의 모델화 방법 검토", 한국지진공학회 1998년도 춘계학술발표대회 논문집, Vol.2, No.1, pp. 180-187.
8. 배익주, "정적·동적 비선형 해석에 의한 철근콘크리트 이중골조의 내진성능 검토", 동아대학교 대학원 석사학위논문, 2000. 2
9. 배익주, 강병두, 전대한, 김재웅, "3차원 정적 탄소성해석에 의한 철-근콘크리트 이중골조의 수평내력 검토", 대한건축학회 99추계학술발표대회논문집 19권 2호 통권 38호, pp.133~138, 1999. 10.