

# 바닥슬래브의 면내강성을 고려한 필로티 구조물의 효율적인 거동분석

## Efficient Analysis of Shear Wall Structures with Pilotis considering the in-plane stiffness of the floor slabs

김 현 수\* · 김 혜 숙\*\* · 김 현 정\*\*\* · 이 동 근\*\*\*\*

Kim, Hyun-Su · Kim, Hye-Sook · Kim, Hyun-Jung · Lee, Dong-Guen

### ABSTRACT

Recently, many apartment buildings in the shear wall system often has pilotis in the lower story to meet the architectural needs. If the lateral force resisting system consists of shear walls supported by columns and beams, the discontinuity at the lowest level with pilotis results in the vertical irregularity with strength and stiffness. So, there are needs to be considered the analysis and design about column and beam bellow shear walls and the behavior and stress condition of structure by stiffness change being generated at shear walls.

The purpose of this paper is to investigate the behavior of shear wall structures with pilotis using the floors modeled as rigid diaphragm or semi rigid diaphragm. Through analyses, after estimating values of the story drift, natural period, stress condition of shear walls and the forces of column, we inferred how the behavior of shear wall structures with pilotis was influenced by the floor stiffness.

**Key words:** shear wall structure, piloti, rigid diaphragm, floor stiffness

### 1. 서 론

최근에 많이 건설되고 있는 전단벽식 아파트는 저층부에 건축적인 요구를 받아들여 필로티를 두고 있는 경우가 흔히 있다. 저층부에 필로티가 있는 전단벽식 구조물은 수직하중과 횡하중을 전단벽이 모두 부담하도록 하는 구조시스템에 부분적으로 기둥과 보로 구성되는 골조방식을 적용한 경우로 저층부에서 구조물의 강도와 강성이 크게 변한다. 이러한 구조물의 강도와 강성의 변화는 건물의 수평방향과 수직방향의 거동에 영향을 미치게 되는데 특히 필로티 부분의 기둥과 보, 전단벽은 지진하중과 같은 횡하중을 받을 때의 거동과 응력상태를 충분히 검토하여야 한다. 일반적으로 횡하중이 전달되는 경로에서 바닥슬래브는 큰 비중을 차지하고 특히 구조물이 전단벽식 시스템 또는 비정형 구조일 경우에는 바닥슬래브의 영향이 커지게 된다. 따라서 기존의 연구에서도 바닥슬래브의 강성에 의한 영향 평가가 이루어져 왔다.(문성권 외, 1992; S. H. Ju

\* 정회원 · 성균관대 건축공학과 박사 후 연구원 E-mail: digiarchi@skku.edu

\*\* 학생회원 · 성균관대 건축공학과 박사과정 E-mail: hselja@hanmail.net

\*\*\* 학생회원 · 성균관대 건축공학과 석사과정 E-mail: hjzzangu@hotmail.com

\*\*\* 정회원 · 성균관대 건축공학과 교수, 공학박사 E-mail: dglee@skku.ac.kr

외, 1999; I. N. Doudoumis, 2001)

일반적으로 구조물은 바닥슬래브를 모형화하지 않고 강막 가정을 이용하여 해석을 하는데 바닥슬래브를 강막 가정을 이용하여 모형화하였을 때에는 바닥슬래브의 면외 휨강성은 무시되고 면내 강성은 무한대로 가정된다. 따라서 실제 바닥슬래브가 있는 모델과 그렇지 않은 모델은 구조물의 횡방향 강성과 면내 변형에 의하여 전체구조물의 횡하중의 분배면에서 차이가 있다. 근래에 들어서는 바닥슬래브의 면외 휨강성을 이용하여 전단벽식 구조물의 횡변위를 제어하는 해석방법이 대두되고 있기 때문에 전체 구조물의 횡방향 강성에 슬래브의 면외 강성의 영향이 고려되고 있다. 전단벽식 구조물은 바닥슬래브의 면내 강성에 의한 영향이 다른 구조시스템보다 크고 특히 필로티가 있는 전단벽식 구조물처럼 비정형구조일 경우에는 하중의 흐름이 정형구조물과 다르기 때문에 바닥슬래브의 모형화 여부와 방법에 따라서 구조물의 거동에 어떤 영향을 미치는가에 대한 검토가 필요하다. 그러나 바닥슬래브의 면외 휨강성과 면내 강성을 모두 고려하여 해석할 경우에는 많은 시간과 노력이 요구되기 때문에 바닥슬래브의 면내 강성을 무한대로 보고 지진하중과 같은 횡하중의 전달 경로에서 바닥슬래브의 면내 변형에 의한 영향을 제외하는 것이 일반적이다.(김현수, 2001; 이동근 외, 2001; 김현수 외, 2002)따라서 본 논문에서는 필로티가 있는 전단벽식 구조물의 해석과 설계시 바닥슬래브의 강성이 미치는 영향에 대하여 알아보고 바닥슬래브의 강성을 고려하면서 시간과 노력을 감소시키고 정확한 해석결과를 얻을 수 있는 효율적인 해석모델을 제안하고자 한다.

## 2. 필로티가 있는 전단벽식 구조물의 해석

### 2.1 예제구조물

바닥슬래브의 모형화 방법이 필로티가 있는 전단벽식 구조물의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해서 한 쪽에 필로티가 있는 경우의 20층 구조물에 대하여 해석하였다. 아래의 그림은 지면의 절약을 위해서 5층 구조물을 이용하여 필로티의 위치를 나타내었다. 예제구조물의 바닥슬래브의 두께는 15cm로하고 전단벽의 두께는 외벽과 세대간벽은 20cm, 내벽은 18cm로 하였다. 그리고 필로티의 기둥은 70cm×70cm로 하였다. 해석에 적용된 하중은 등가정적지진하중과 설계스펙트럼 하중으로 정적, 동적하중 모두 UBC97에서 규정하는 Zone 2B에 해당하는 지진하중을 사용하였고 해석 프로그램은 MIDAS /Gen을 이용하였다.

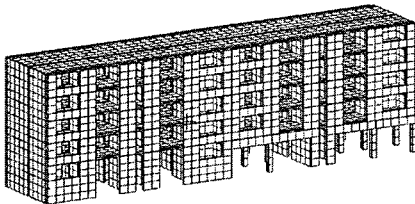


그림 1. 한 쪽에 필로티가 있는 구조물

표 1. 부재 정보 (단위: cm)

구분	부재크기
바닥슬래브	t15
외벽, 세대간벽	t20
내벽	t18
기둥	70 x 70

### 2.2 바닥 슬래브 모형화에 따른 해석모델

바닥슬래브의 면내 강성과 면외 강성을 포함했을 때의 구조물의 응답을 비교하기 위해서 해석모델을 표2와 같이 구분하였다. RD모델은 바닥슬래브를 모형화하지 않고 강막가정을 이용하였고 FS모델은 슬래브를 판요소로 모형화하여 면외 휨강성과 면내 강성을 모두 고려한 모델이다. 그리고 FSRD모델은 판요소로 바닥슬래브를 모형화하고 면내 자유도를 구속하여 면외 휨강성은 고려하고 면내강성은 무한대로 본 모델이다.

표 2. 해석모델의 구분

	해석모델		
	RD	FSRD	FS
면내강성	$\infty$	$\infty$	고려
면외강성	무시	고려	고려

### 3. 한쪽에 필로티가 있는 예제구조물 해석 결과

#### 3.1. 고유 진동주기 해석결과

한쪽에 필로티가 있는 예제구조물의 1층 평면도는 그림2와 같으며 층간변위, 밀면전단력 등의 분포를 비교하기 위해서 그림에 비교위치를 표시하였다. 구조물의 동적특성을 나타내 주는 고유주기는 다음의 표3과 같다. 표에서 알 수 있듯이 구조물의 횡방향 강성은 RD모델이 가장 작고 FSRD모델이 가장 크게 나타난다. 그리고 면내변형을 고려한 FS모델의 경우에 바닥슬래브의 면내 휨변형 모드가 3차, 5차, 6차 모드에서 나타난다.

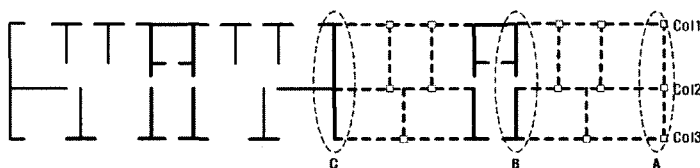


그림 2. 한쪽에 필로티가 있는 구조물의 1층 평면도

표 3. 한쪽에 필로티가 있는 구조물의 고유주기 (단위: sec)

	mode No.	RD	FSRD	mode No.	FS
고유주기	1	1.090	0.988	1	1.001
	2	0.236	0.221	2	0.231
				3	<b>0.130</b>
	3	0.104	0.100	4	0.099
				5	<b>0.090</b>
				6	<b>0.069</b>
	4	0.059	0.057	7	0.061

#### 3.2. 밀면전단력의 분포

바닥슬래브의 모형화 방법에 따라서 횡하중의 분배가 어떻게 달라지는가에 대해서 알아보기 위하여 바닥슬래브를 모형화하지 않고 강막가정을 사용한 모델인 RD모델과 바닥슬래브를 관요소로 모형화하고 바닥슬래브의 면내 강성과 면외 강성을 모두 고려한 FS모델에 대해서 밀면전단력을 비교하여 보았다. 그림3에 표시한 기둥열인 A열에서는 FS모델의 경우가 RD모델과 비교하였을 때에 약 2배정도 큰 밀면전단력을 가지며, 전단벽열에서는 RD모델이 FS모델과 비교한 경우에 약 5%정도 큰 밀면전단력을 가진다. 따라서 구조물에 필로티가 있는 경우에 바닥슬래브의 강성이 구조물의 기둥의 밀면전단력에 미치는 영향이 크므로 필로티가 있는 구조물에서 바닥슬래브의 강성을 고려할 필요가 있다.

표 4. 밀면전단력의 비교 (단위 : tonf)

	A열 밀면전단력		B열 밀면전단력		C열 밀면전단력	
	RD	FS	RD	FS	RD	FS
정적해석	36.97	58.25	104.27	96.95	161.38	167.29
동적해석	36.90	70.62	125.76	131.71	167.87	171.09

3.3 층간변위비교

층간변위에 대한 검토시 면내 강성을 무한대로 가정하는 모델(RD, FSRD)의 경우에는 필로티 부분과 전단벽 부분의 변위가 동일하게 된다. 이러한 경우에는 필로티부분의 변위와 전단벽부분의 변위의 차이를 비교할 수 없으므로 그림3과 같이 RD모델과 FSRD모델의 경우에는 층간변위를 필로티가 있는 부분과 전단벽이 있는 부분으로 구별하지 않았지만 FS모델의 경우에는 필로티가 있는 외측부분과 그렇지 않은 중앙부분의 층간변위를 구별하여 확인해 보았다.

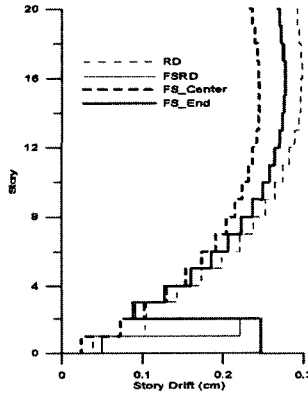


그림3. 한쪽에 필로티가 있는 구조물의 층간변위

한쪽에 필로티가 있는 구조물의 층간변위는 그림3에서 보는 바와 같이 저층부에서는 FSRD모델과 RD모델의 층간변위가 작은 반면 상층부로 갈수록 바닥슬래브의 강성을 고려하지 않은 모델인 RD모델의 층간변위가 큰 것으로 나타났다. 또한 필로티에 의한 층간변위값은 FS모델의 중앙 부분과 외곽 부분을 비교하였을 때 저층부부터 상층부까지 그 차이가 큰 것으로 나타난다.

3.4 기둥의 부재력 비교

부재력을 비교하기 위하여 그림2에서 표시한 기둥에 대해서 부재력을 확인해 보았다. 축력은 전체 구조물의 횡방향 강성과 관련이 있기 때문에 바닥슬래브의 면외 강성을 고려한 FS모델과 FSRD모델보다 RD모델의 축력이 훨씬 크게 나타난다. 슬래브의 면외강성을 고려치 않을 때에는 건물 전체의 강성이 감소하기 때문에 기둥과 벽체의 부담이 증가하게 되므로 기둥의 축력을 과대평가하게 된다. 그러나 휨모멘트와 전단력은 바닥슬래브의 면내 강성의 고려 여부에 따라 바닥슬래브의 면내 강성을 고려한 경우인 FS모델의 경우 FSRD모델과 RD모델에 비해 거의 두 배 정도 크게 나타나고 있다. 따라서 설계시 축력에 대해서는 RD모델을 사용할 경우 FS모델보다 축력을 과대평가하게 되지만 휨모멘트와 전단력에 대해서는 RD모델이 FS모델보다 작은 값을 가지게 되어 기둥부재가 위험하게 설계되어 질 수 있으므로 주의 하여야한다.

표 5. 기둥의 부재력 (단위 : tonf)

Model	축력			휨모멘트			전단력		
	Col.1	Col.2	Col.3	Col.1	Col.2	Col.3	Col.1	Col.2	Col.3
FS	201.4	47.4	-172.8	30.3 -32.6	19.9 -26.5	28.3 -31.5	-18.0	-13.2	-17.1
FSRD	197.6	49.2	-163.3	18.5 -18.5	6.2 -11.1	16.5 -17.4	-10.6	-4.8	-9.7
RD	222.8	74.5	-156.1	19.4 -18.7	5.5 -10.1	15.0 -16.3	-10.9	-4.3	-8.9

#### 4. 효율적인 해석을 위한 모델

바닥슬래브의 강성을 고려하면서 시간과 노력을 감소시키고 정확한 해석결과를 얻을 수 있는 효율적인 해석모델을 제안하기 위해서 한 쪽에 필로티가 있는 5층 구조물에 대하여 해석하였다. 예제구조물은 그림 1과 같으며 바닥슬래브의 두께는 18cm로하고 전단벽의 두께는 외벽과 세대간 벽은 20cm, 내벽은 15cm로 하였으며 필로티의 기둥은 70cm×70cm로 하였다. 그림 4와같이 5개의 모델에 대하여 해석을 수행하였으며 모델별 자유도의 수는 표 7과 같다. 그림 4에서 (a) 모델은 제안한 모델의 정확성을 비교하기 위한 전체구조물이며 여기에서 검은 점은 수평, 연직, 회전의 6개의 자유도가 모두 존재하는 것을 의미한다. 그림 4(b)의 모델 B는 구조물의 벽체와 슬래브가 만나는 점의 자유도가 모두 존재하는 것을 의미하며 그림(c)의 모델 C의 경우에는 각 세대를 나누는 벽체와 내벽 부분의 중앙열의 자유도가 존재하여 바닥슬래브의 거동을 표현 할 수 있게 하였다. 여기에서 흰점은 수평방향의 1개의 자유도만 존재하는 것을 의미하고 회색점에서는 수평방향 2개의 자유도가 존재한다. 그림 4(d)는 세대를 나누는 벽체와 바닥슬래브가 만나는 점의 수평방향 자유도만이 존재하고 그림(e)의 경우에는 가운데 벽이 슬래브와 만나는 곳의 수평방향 2개의 자유도와 회전자유도 1개가 존재한다. 표 7에서 확인 할 수 있듯이 모델 A에서 모델 E로 갈 수록 자유도 수가 줄어들고 있으며 모델 C에서 자유도수가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

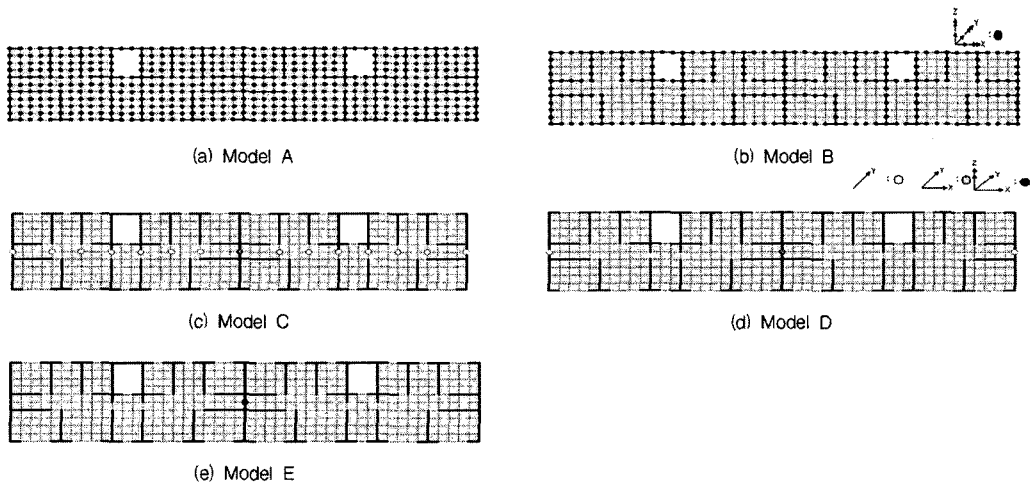


그림 4. 자유도 수에 따른 해석 모델

표 6. 부재 정보 (단위: cm)

구분	부재크기
바닥슬래브	t18
외벽, 세대간벽	t20
내벽	t15
기둥	70 x 70

표 7. 모델별 자유도 수

층 수	자유도수 (DOF)				
	Model A	Model B	Model C	Model D	Model E
2층	10,800	2,940	32	8	6
5층	28,566	7,350	80	20	15
10층	58,176	14,700	160	40	30

### 5. 효율적인 해석모델 제안을 위한 예제구조물의 해석 결과

자유도 수에 따른 해석 모델(Model A, Model B, Model C, Model D, Model E)의 정확성을 확인하고 효율적인 해석모델을 알아보기 위하여 구조 해석을 수행하여 얻어진 구조물의 최상층 정적 변위 및 동적해석 결과를 비교하였다.

#### 5.1. 정적해석결과비교

정적해석은 그림 5에서와 같이 최상층에 절점하중으로 250tonf을 구조물에 가력하였고 각 모델별 최상층 변위를 비교하였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 Model B와 Model C의 경우 전체구조물인 Model A를 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 그러나 자유도 수가 적은 Model D와 Model E의 경우 표현할 수 있는 절점이 제한 되어 있기 때문에 바닥슬래브의 거동 표현이 어렵다.

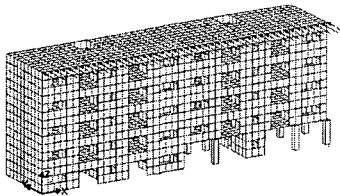


그림 5. 절점하중 가력

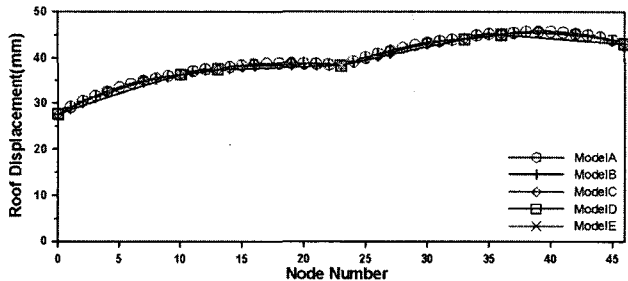


그림 6. 구조물 최상층 변위 비교

#### 5.2. 동적해석결과비교

동적해석은 고유주기를 통해 각각의 모델의 주기를 비교하고 El Centro, 지진하중에 대하여 시간이력해석을 통하여 각 모델들의 최상층 변위응답을 비교하였다. 그림 7은 모델들의 모드별 주기를 나타낸 것이다. Model A의 주기에 대하여 Model B는 거의 일치하고 Model C의 경우는 3차 모드를 제외하고 역시 Model A와 거의 유사하게 따라가고 있다. 3차 모드에서 발생하는 차이는 구조물이 저층인 것에서 비롯된 것으로 예상되며 구조물이 고층일 경우 차이를 감소시킬 수 있을 것이다. 그러나 Model D와 Model E의 경우 주기의 차이가 상당히 크고 표현할 수 있는 모드도 제한적이다. 따라서 Model B와 Model C의 경우 전체구조물과 유사한 동적 거동을 보일 것으로 예상된다. 그림 9와 10은 El Centro, 지진하중에 대한 모델별 최상층 변위응답을 비교한 그래프이고 그림 10의 경우는 차이를 더 자세히 알아보기 위하여 0 ~ 6초 구간만을 확대한 것이다. 최상층 변위응답은 고유주기와 관련이 있기 때문에 고유주기가 Model A와 유사한 Model B와 Model C의 경우 그 응답 또한 유사하지만 Model D와 Model E의 경우 응답에 큰 차이를 보인다. 또한 표 9

의 최대값을 보며 Model A, B, C, D의 경우 최대변위가 발생하는 시점이 같지만 Model E는 그 시간이 다르고 Model D와 E의 경우 최대변위가 전체구조물과 크게 차이가 난다. 표 10은 동적해석 시간을 비교한 것이고 표에서 확인 할 수 있듯이 Model A에 비하여 B와 C는 해석 시간이 급격하게 감소한 것을 알 수 있다.

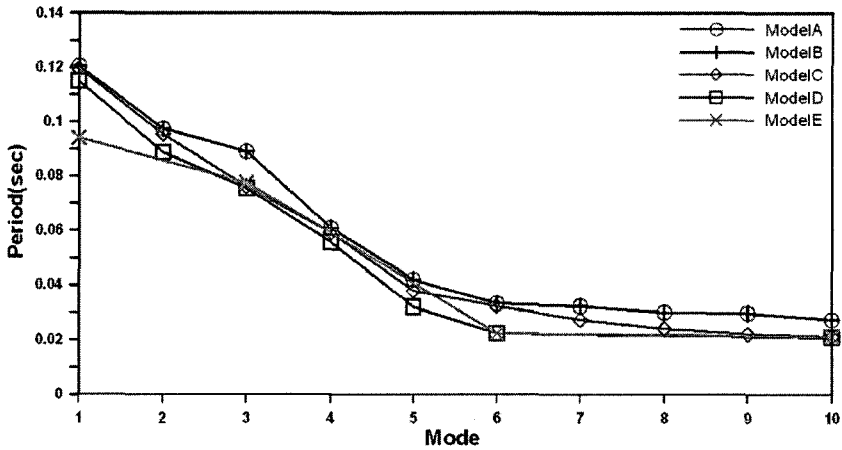


그림 7. 해석모델별 고유주기 비교

표 9. 시간이력 해석변위 최대값

Model	A		B	
	Time(sec) [2.10 ~ 2.30]	Displacement (mm)	Time(sec) [2.40 ~ 2.60]	Displacement (mm)
Model A	2.22	1.94	2.48	2.19
Model B	2.22	1.95	2.48	2.21
Model C	2.22	1.94	2.48	2.21
Model D	2.22	1.82	2.48	2.05
Model E	2.22	1.74	2.48	1.49

● 변위 측정 위치

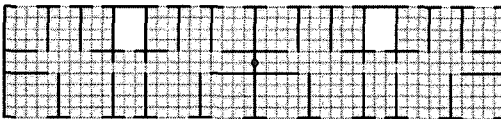


그림 8. 시간이력 해석 변위 측정 위치

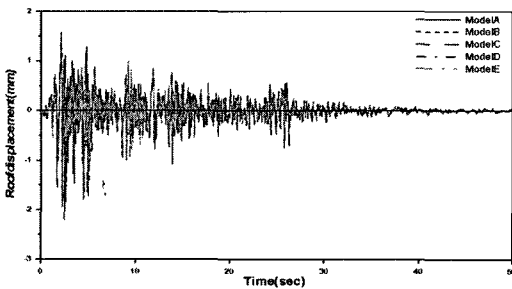


그림 9. 시간이력해석 변위 응답 비교(0~50 sec)

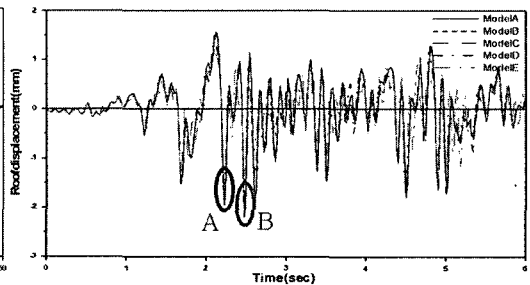


그림 10. 시간이력해석 변위 응답 비교(0~6 sec)

표 10. 동적해석시간비교

(단위: sec)

Model	Number of DOFs	Sub-Super Element	Super Element	Sub-Structure	Eigen Value	Time History	Total Time	Ratio(%)
Model A	28,566	--	--	--	5,333.312	305.781	5,639.093	100.00
Model B	7,350	16.047	7.406	402.157	1,264.172	87.093	1,776.875	31.51
Model C	40	16.312	7.844	442.484	10.047	5.703	949.030	16.83
Model D	20	16.656	7.578	405.375	8.000	5.109	442.718	7.85
Model E	15	16.781	7.469	403.266	8.281	5.078	440.875	7.82

## 6. 결론

본 논문에서는 필로티가 있는 전단벽식 구조물에서 바닥슬래브의 모형화 방법에 따라서 슬래브 강성이 구조물의 거동에 어떠한 영향을 미치는가와 슬래브 강성을 고려하여 정확하고 효율적인 해석에 대하여 해석결과와 비교하고 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 강막가정을 사용한 경우에는 바닥슬래브의 면내 강성을 고려할 수 없기 때문에 면내변형으로 생기는 층간변위와 부재의 휨모멘트와 전단력을 과소평가하게 되는 결과가 발생한다. 또한 슬래브의 강성을 고려하지 않으면 건물 전체의 강성을 작게 고려하게 되므로 슬래브의 강성을 고려하는 경우에는 벽체의 부담이 감소된다. 따라서 슬래브가 횡하중을 어느정도 부담한다고 할 수 있다.
2. 바닥슬래브의 면외 휨강성을 고려하지 않았을 때에는 전체 구조물의 횡강성이 과소평가되어 횡하중에 대하여 부재의 축력이 과대평가된다. 반면에 면내 강성과 면외 휨강성을 모두 고려한 모델의 경우에는 해석의 시간과 노력이 많이 요구된다. 그러나 필로티층의 연약층 검토, 전단벽과 기둥의 부재력 등을 정확하게 평가하기 위해서는 바닥슬래브의 면내 강성과 면외 휨강성을 모두 고려할 필요가 있다.
3. 효율적인 해석을 위하여 제안한 해석모델 중 Model C는 정적 해석결과와 동적해석결과가 전체구조물인 Model A와 유사하고 자유도 수와 해석시간이 Model A에 비하여 급격하게 감소하므로 Model C를 이용하여 구조물을 모델링하면 정확하고 효율적으로 결과를 얻을 수 있다.

## 감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국 건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산C04-01)에 의한 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 이동근, 김현수 (2001) 바닥판의 휨강성을 고려한 전단벽식 건물의 효율적인 지진해석, 전산구조공학회 논문집, Vol.14, No.12.
- 김현수 (2001) 전단벽식 고층건물의 효율적인 해석, 박사학위논문.
- 김현수, 남궁계홍, 이동근 (2002) 개구부가 있는 고층 벽식 구조물의 효율적인 3차원 해석, 한국전산구조공학회 논문집, Vol.15 No.2.
- S. H. Ju and M. C. Lin, (1999) Comparison of building analyses assuming rigid or flexible floors, *Journal of structural engineering*.
- I. N. Doudoumis and A. M. Athanatopoulou, (2001) Code provisions and analytical modeling for the in-plane flexibility of floor diaphragms in building structures, *Journal of earthquake engineering*.