

무량판 아파트 구조시스템 해석

Analysis of Structural System of Flat-Plate Apartment Buildings

이 지 용* 강 수 민* 김 옥 중** 이 도 범*** 천 영 수**** 이 현 호*****
Lee, Ji-Woong Kang, Su-Min Kim, Ook-Jong Lee, Do-Bum Chun, Young-Soo Lee, Hyun-Ho

ABSTRACT

Stiffness reduction factor of slab in flat-plate structure is proposed in comparison with UCB test result. Then analysis of structural system of flat-plate apartment buildings is carried out by using effective beam width method and finite element method. Effective beam width method overestimates the lateral stiffness of the system where columns are arranged atypically and overestimates the stiffness of slab-wall joint.

1. 서론

삼성동 I-파크, 스타 시티 등과 같은 무량판 구조를 적용한 아파트가 완공되거나 현재 시공되고 있다. 또한 층간소음과 바닥진동에 관련하여 슬래브두께를 180mm 이상으로 해야 하는 규정이 생기면서 무량판 구조에 대한 관심이 더욱 증대되고 있다. 하지만 국내에서는 무량판 구조에 대한 해석 및 설계 경험이 부족하고 그 기법이 정립되어 있지 못하여 외국에 의존하고 있는 실정이다. 따라서 무량판 구조에 대한 해석방법에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

무량판 구조시스템의 해석 기법으로는 유한요소법, 등가골조법, 유효보폭법이 있다. 유한요소법은 실제 건물과 가장 유사하게 모델링할 수 있으나 시간이 많이 걸린다는 단점이 있고, 등가골조법은 3차원 골조에 적용하기 어렵기 때문에 유효보폭법이 널리 사용되어 왔다. 하지만 유효보폭법은 건물 전체 시스템이 아닌 일부 구조체에 대한 실험결과를 바탕으로 제안된 것으로서 전체 시스템에 그대로 적용하기에는 무리가 있다. 최근 수퍼요소의 개념을 사용하여 해석시간을 대폭 줄인 유한요소 해석 프로그램 Midas ADS가 개발되었으나, 아직은 ADS를 이용한 구조 해석 사례가 부족하고 균열에 의한 슬래브의 강성저감을 얼마나 적용하여야 하는지에 대한 문제가 남아 있다. 본 연구에서는 UCB에서 실시한 무량판 실험과의 비교를 통해 슬래브의 강성저감계수를 제안하고자 하며, 유한요소법과 유효보폭법을 이용하여 무량판 아파트에 대한 구조 해석을 수행함으로써 두 해석기법을 비교분석하고자 한다.

* 대림산업(주) 기술연구소 연구원
** 대림산업(주) 기술연구소 과장
*** 대림산업(주) 기술연구소 부장
**** 대한주택공사 책임연구원
***** 동양대학교 건축공학과 교수

2. 무량판 구조시스템 해석기법

2.1. 유효보폭법(Effective Beam Width Method)

유효보폭을 제안하는 식으로 가장 널리 사용되는 것은 Grossman이 제안한 식으로, 식 (1)과 같다.

$$\alpha l_2 = (K_d) \left[0.3l_1 + c_1 \left(\frac{l_2}{l_1} \right) + \frac{(c_2 - c_1)}{2} \right] (d/0.9h)(K_{FP}) \quad (1)$$

여기서 α =유효보폭계수, l_1 (l_2)=하중과 평행(수직)인 방향의 경간 길이, c_1 (c_2)=하중과 평행(수직)인 방향의 기둥 폭, d =슬래브 유효 두께, h =슬래브 두께이다. K_d 는 층간변위의 영향을 반영하는 계수로 $h_s/800$, $h_s/400$, $h_s/200$, $h_s/100$ 의 층간변위에 대하여 각각 1.1, 1.0, 0.8, 0.5의 값을 갖는다. K_{FP} 는 기둥의 위치에 따른 계수이며 내부기둥, 외부기둥, 모서리기둥에 대하여 각각 1.0, 0.8, 0.6의 값을 갖는다.

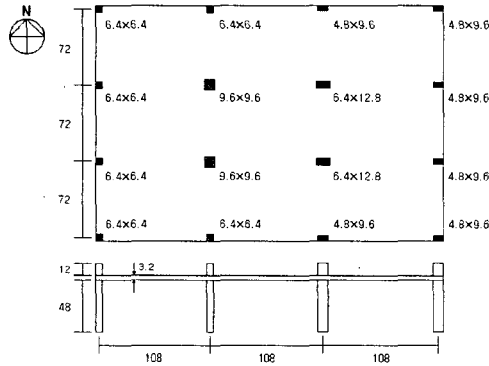


그림 1 UCB 시험체 (모든 수치는 in. 단위)

표 1 UCB 실험결과 및 유효보폭법 해석결과

단계	UCB 실험결과			유효보폭법 해석결과		
	하중 kip	변위 in.	강성 kip/in.	하중 kip	변위 in.	강성 kip/in.
NS800	4.91	0.06	82	4.17	0.06	69.53
	-4.52	-0.06	75			
EW800	6.27	0.06	105	104	4.22	0.06
	-6.18	-0.06	103			
NS400	9.10	0.12	76	70	7.89	0.12
	-7.66	-0.12	64			
EW400	11.47	0.12	96	91	7.84	0.12
	-10.32	-0.12	86			
NS200	15.15	0.24	63	62	13.72	0.24
	-14.48	-0.24	60			
EW200	17.93	0.24	75	76	13.10	0.24
	-18.40	-0.24	77			
NS100	23.74	0.48	49	46	19.79	0.48
	-20.16	-0.48	42			
EW100	24.93	0.48	52	53	17.54	0.48
	-25.58	-0.48	53			

S. J. Hwang과 J. P. Moehle가 UCB에서 수행한 9-패널 무량판 실험에 대하여 유효보폭법으로 해석하여 실험결과와 비교하였다. UCB 실험결과와 유효보폭법 해석결과를 표 1에 정리하였다. 표 1에서 NS800은 남북 방향으로 $h_s/800$ 의 변위를 발생시키는 단계를 의미한다. N-S 방향으로서는 강성을 상당히 근사하게 예측하는 데 반해 E-W 방향으로서는 강성을 과소평가하는 양상을 보였다.

2.2. 유한요소법(Finite Element Method)

유한요소 해석 시 균열에 의한 슬래브의 강성 저감을 고려하여야 하며, 이를 위하여 규준에서는 슬래브의 강성을 25~50%만 적용할 것을 제안하고 있다. 본 연구에서는 슬래브의 강성저감계수를 제안하기 위하여 UCB 실험결과를 이용, 비교하였다. 유한요소해석 결과 N-S 방향은 $h_s/800$, $h_s/400$, $h_s/200$ 의 층간변위에서 슬래브의 강성을 각각 62%, 48%, 38%를 반영하여야 하며, E-W 방향은 각각 80%, 67%, 52%를 반영하여야 하는 것으로 나타났다(그림 2, 3). 유효보폭법을 적용할 경우에서처럼 유한요소법을 적용할 경우에도 E-W 방향의 강성이 실험결과에 비하여 상대적으로 저평가되는 양상이 나타났으므로 N-S 방향을 기준으로 하는 것이 바람직하다고 생각되며, 이후의 무량판 아파트 해석 시 안전율을 고려하여 슬래브 강성을 1/3로 저감하여 해석하였다.

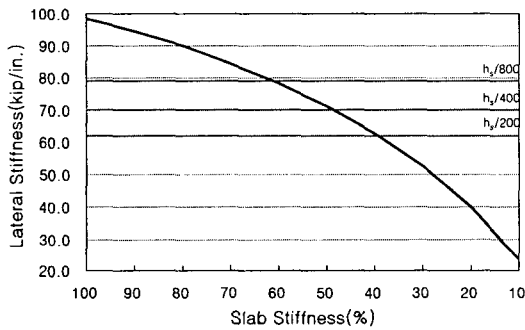


그림 2 N-S 방향 유한요소모델 강성

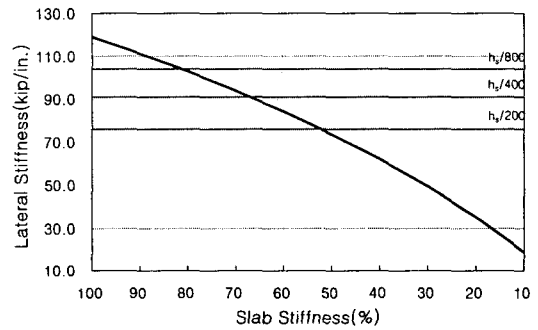


그림 3 E-W 방향 유한요소모델 강성

3. 무량판 아파트 해석결과 분석

2장에서 언급한 해석기법을 이용하여 판상형 무량판 아파트에 대한 구조해석을 수행하였다. 본 연구에서는 해석 대상을 판상형 무량판 아파트에 한정하였으며, 현재까지 완공된 혹은 시공중인 무량판 건물들은 대부분 타워형이므로 기존의 벽식 아파트 평면을 변형하여 그림 4와 같은 해석 대상 평면을 만들었다. 기둥은 상대적으로 벽량이 적은 장변방향으로 큰 강성을 갖도록 가로로 배치되었으며, 내부기둥의 경우 평면계획에 의하여 세로로 배치되었다. 유한요소해석 시 슬래브 강성은 1/3을 적용하였고, 유효보폭해석 시 용이한 모델링을 위하여 $h_s/200$ 의 층간변위에서의 유효보폭을 전 층에 대하여 일괄 적용하였다. 이러한 조건으로 UCB 시험체를 모델링할 경우의 강성은 표 2와 같다.

표 2 UCB 시험체 해석모델 강성 (단위:kip/in.)

방향	유한요소모델	유효보폭모델
N-S	55.66	57.17
E-W	53.31	54.58

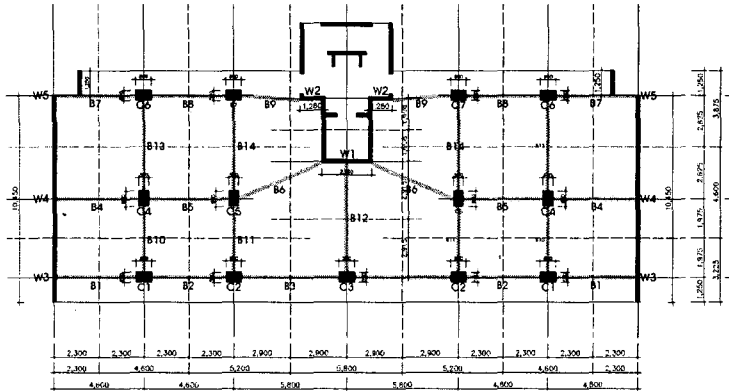


그림 4 해석 대상 평면

3.1. 불균형모멘트

해석 대상 모델에서 C1, C2, C3, C6, C7은 발코니 쪽의 기둥으로 기둥 바깥으로 슬래브가 1m 이상 나와 있다. 이들을 내부기둥으로 보느냐 외부기둥으로 보느냐에 따라 유효보폭이 달라지며, 이에 따라 응력의 흐름이 달라지고 기둥에 작용하는 불균형모멘트의 크기도 달라진다. 각각의 모델에서 기둥에 발생하는 불균형모멘트를 표 3에 정리하였으며, 발코니 쪽 기둥을 외부기둥으로 모델링할 경우 불균형모멘트의 분포가 유한요소모델과 보다 유사하게 나타남을 알 수 있다.

유효보폭해석 시 C5와 C7 기둥에서 유한요소해석에서보다 더 큰 모멘트가 발생하므로 응력이 이 부분에 집중됨을 알 수 있다. 이 부분은 벽체 쪽으로 응력이 전달되며, 응력의 흐름이 X, Y축과 어긋난 부분임을 평면에서 확인할 수 있다. 이러한 결과는 슬래브-벽체 접합부나 비정형의 배치에서 유효보폭법이 접합부의 강성을 과대평가하는 경향이 있음을 의미하며, 기둥이 정형으로 배치된 평면에서 슬래브-기둥 접합부에 대하여 검증된 유효보폭법의 한계를 보여주는 결과라고 할 수 있다.

표 3 불균형모멘트(tonf-m)

층	FEM		EBWM(내부)		EBWM(외부)		층	FEM		EBWM(내부)		EBWM(외부)				
	①		②	②/①	③	③/①		①		②	②/①	③	③/①			
15	4.0	14%	7.1	11%	80%	4.8	10%	71%	9.7	14%	13.9	11%	80%	11.6	10%	75%
	3.4	12%	8.7	14%	115%	5.9	12%	101%	8.5	12%	17.2	14%	113%	13.9	12%	102%
	3.6	13%	8.4	13%	105%	5.5	11%	88%	9.0	13%	17.2	14%	108%	13.3	12%	93%
	4.0	14%	6.6	10%	75%	7.4	15%	108%	9.9	14%	13.7	11%	78%	16.8	15%	106%
	4.5	16%	8.7	14%	87%	9.8	20%	126%	11.5	16%	18.1	14%	88%	22.1	19%	120%
	3.8	13%	8.9	14%	107%	5.8	12%	90%	9.7	14%	18.1	14%	105%	13.6	12%	89%
	5.1	18%	14.4	23%	127%	9.5	20%	108%	13.0	18%	29.1	23%	125%	22.4	20%	108%
분산				19%			18%	분산				18%				15%
20	6.4	15%	9.4	11%	74%	7.7	10%	69%	12.2	13%	17.4	11%	82%	14.5	10%	76%
	5.5	13%	11.7	13%	106%	9.3	12%	97%	10.9	12%	21.4	14%	113%	17.4	12%	102%
	5.8	13%	11.5	13%	99%	8.8	12%	86%	11.4	13%	21.6	14%	109%	16.8	12%	94%
	6.4	15%	9.4	11%	73%	11.2	15%	100%	12.7	14%	17.2	11%	78%	21.1	15%	107%
	7.4	17%	12.5	14%	85%	14.9	20%	116%	14.9	16%	22.4	14%	86%	27.6	19%	118%
	6.3	14%	12.2	14%	98%	9.1	12%	83%	12.3	14%	22.6	14%	105%	17.2	12%	89%
	5.8	13%	20.2	23%	175%	15.1	20%	149%	16.6	18%	35.7	23%	124%	27.8	20%	107%
분산				35%			26%	분산				18%				14%

3.2. 최상층 변위와 층간변위

그림 4를 평면으로 하는 15층, 20층, 25층, 30층 아파트에 대하여 유한요소법과 유효보폭법으로 구조해석을 수행하였다. 풍하중에 의하여 발생하는 최상층 변위와 지진하중에 의하여 발생하는 층간변위비의 최대값을 비교하였으며, 적용한 하중은 표 4와 같다.

표 4 하중 조건

중력하중	고정하중	0.8tonf/m ²	자중 포함
	활하중	0.2tonf/m ²	
풍하중	설계기본풍속	30m/sec	서울지역
	노풍도	B	중층건물 산재지역
	중요도계수	1.1	특-15층 이상 아파트
	가스트 영향계수	2.2	강체구조물-노풍도 B
지진하중	지역계수	0.11	지진구역 I
	중요도계수	1.5	특, 도시계획구역, 10층 이상 아파트
	지반계수	1.2	지반 2
	반응수정계수	3.0	기타구조방식

유효보폭모델의 경우 풍하중에 의한 최상층 변위는 유한요소모델의 81%, 지진하중에 의한 최대 층간변위비는 82% 수준으로 발생하는 것으로 나타났다. 표 2에 의하면 UCB 시험체를 모델링할 경우 유한요소모델의 강성이 유효보폭모델의 강성의 97~98% 수준이었던 것에 비해 변위가 상당히 작게 발생한 것을 알 수 있다. 이 결과 역시 기존의 유효보폭법이 슬래브의 강성을 과대평가하기 때문일 것으로 생각된다.

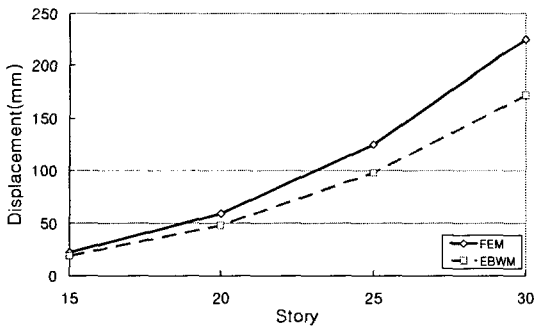


그림 5 풍하중에 의한 최상층 변위

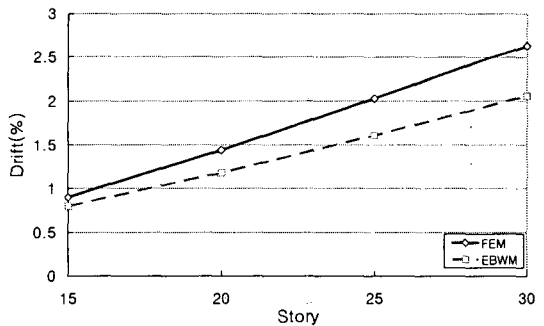


그림 6 지진하중에 의한 최대 층간변위비

3.3. 무량판 아파트에서 구조부재 크기의 영향

무량판 아파트에서 구조부재의 크기가 구조물의 변위에 미치는 영향을 알아보기 위해 15층, 20층, 25층, 30층 건물에 대하여 벽두께를 150mm, 200mm, 250mm로, 슬래브두께를 180mm, 200mm, 220mm로 변화시키면서 해석을 수행하였다. 전체 물량에서 차지하는 비율이 슬래브가 훨씬 크기 때문에 슬래브두께의 변화량을 보다 적게 설정하였으며, 또다른 구조부재인 기둥은 벽체나 슬래브에 비하여 상대적으로 강성에 대한 기여분이 작기 때문에 변수에서 제외하였다. 해석모델을 정리하면 표 5와 같다.

표 5 해석모델

No	층수	슬래브	벽	No	층수	슬래브	벽	No	층수	슬래브	벽	No	층수	슬래브	벽			
1	15	18	15	10	20	18	15	19	25	18	15	28	30	18	15			
2			20	11			20	20			20	29			20			
3			25	12			25	21			25	30			25			
4		20	15	13		20	15	22		20	15	31		20	15	31	20	15
5			20	14			20	23			20	32			20			
6			25	15			25	24			25	33			25			
7		22	15	16		22	15	25		22	15	34		25	15	34	25	15
8			20	17			20	26			20	35			20			
9			25	18			25	27			25	36			25			

건물에 대한 구조설계 시 풍하중과 지진하중에 대한 사용성 조건을 만족시켜야 한다. 풍하중에 대하여서는 최상층 변위가 $H/500$ 보다 작아야 하고, 지진하중에 대하여서는 층간변위비가 1.5%보다 작아야 한다. 그림 7, 8에 최상층 변위와 최대 층간변위비를 나타내었으며, 풍하중에 대한 조건은 25층 이하에서 만족하며 지진하중 조건은 20층 이하에서 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 보다 높은 건물에 무량판 구조시스템을 적용하기 위해서는 구조부재의 크기를 보다 키우거나 아웃리거, 광폭보 등의 횡력저항 요소를 무량판 구조와 조합하여 사용하여야 할 것이다.

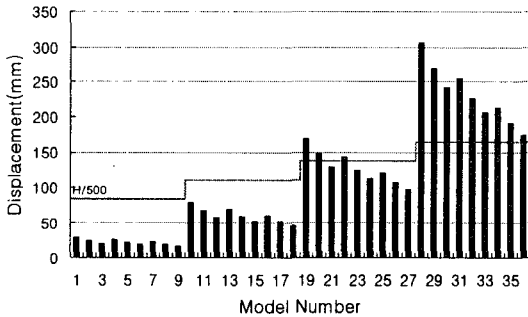


그림 7 풍하중에 의한 최상층 변위

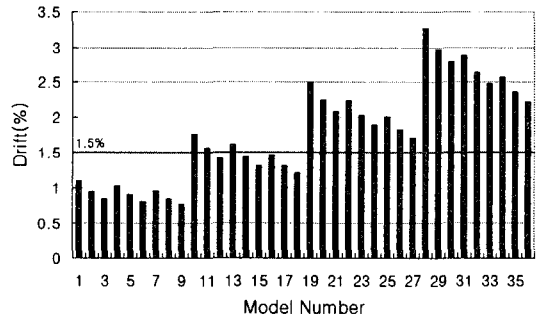


그림 8 지진하중에 의한 최대 층간변위비

벽두께를 150mm에서 250mm로 증가시킬 경우 최상층 변위는 75% 정도로 감소하고, 최대 층간변위비는 84% 정도로 감소하며, 슬래브두께를 180mm에서 220mm로 증가시킬 경우 최상층 변위는 76%, 최대 층간변위비는 83% 정도로 감소하는 것으로 나타났다. 벽두께를 100mm 증가시키면 한 층당 32.9tonf의 콘크리트 물량이 증가하고, 슬래브두께를 40mm 증가시키면 한 층당 34.0tonf의 물량이 증가하므로 벽체 또는 슬래브를 같은 물량만큼 증가시킬 경우 변위의 감소율은 비슷할 것이라고 생각된다. 그림 7(a), (c)와 그림 8(a), (c)를 비교해보면 벽두께의 영향은 건물이 낮을수록 커지는 데 반해 슬래브두께의 영향은 건물이 높을수록 커지는 것을 알 수 있다. 따라서 구조부재의 크기로 무량판 아파트의 변위를 조절할 때 건물의 높이에 따라 크기를 키워야 할 부재를 결정해야 하며, 고층 아파트의 경우 슬래브두께를 증가시키는 것이 변위 제어에 더욱 효과적이다.

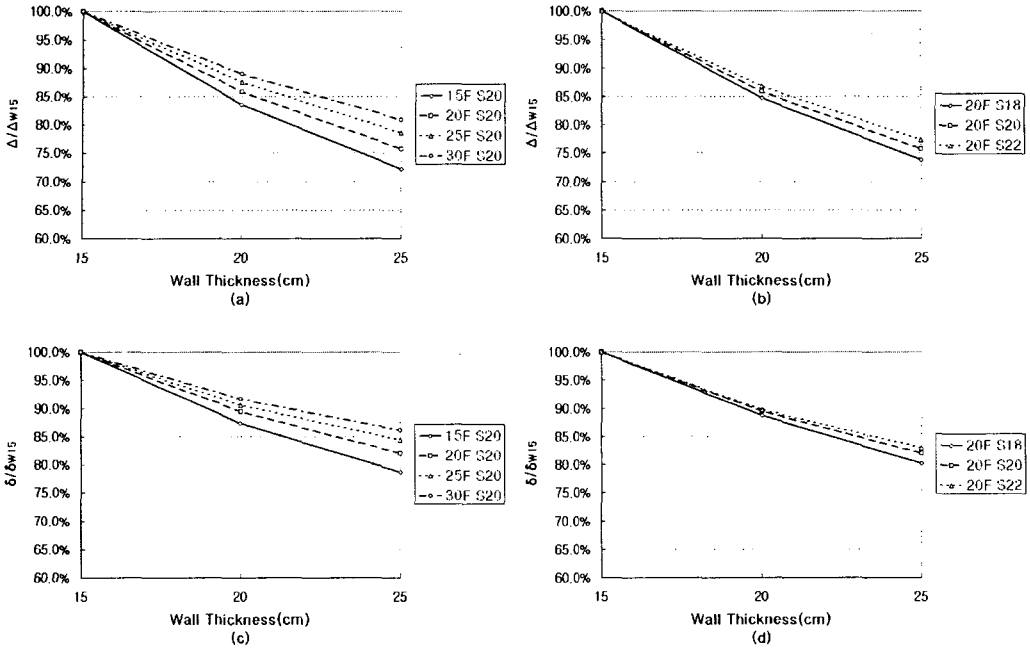


그림 7 최상층 변위, 최대 층간변위비에 대한 벽 두께의 영향

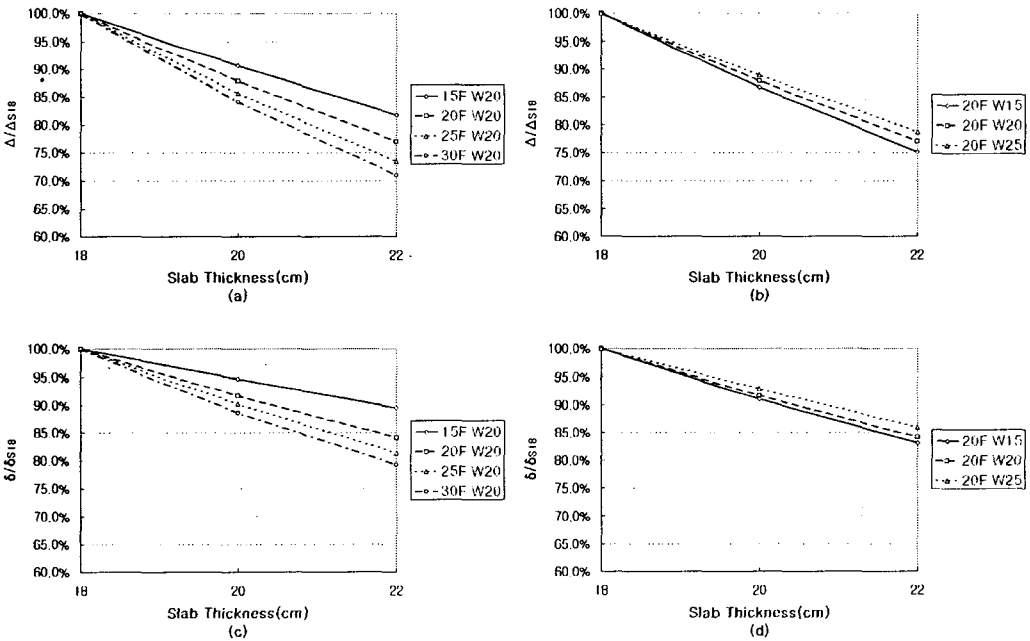


그림 8 최상층 변위, 최대 층간변위비에 대한 슬래브 두께의 영향

4. 결론

유효보폭법과 유한요소법을 이용하여 UCB 시험체에 대하여 해석한 후 실험결과와 비교하였다. Grossman의 제안식을 적용한 유효보폭모델은 N-S 방향의 강성은 잘 예측하지만 E-W 방향의 강성은 과소평가하는 경향을 보였다. 이 경향은 유한요소모델에서도 유사하게 나타났으므로 실험에 대한 면밀한 분석이 필요할 것으로 생각된다. 유한요소모델의 경우 N-S 방향에 대하여 $h_s/800$, $h_s/400$, $h_s/200$ 의 층간변위에서 균열의 영향을 고려하여 슬래브의 강성을 각각 62%, 48%, 38%를 반영하는 것이 바람직할 것으로 생각되며, 안전율을 고려하여 구조해석 시 슬래브의 강성을 1/3로 저감하여 해석할 것을 제안한다.

판상형 무량판 아파트에 대한 유효보폭해석 결과, 슬래브-벽체 접합부와 비정형으로 배치된 부분에서 기둥에 불균형모멘트가 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 벽체가 없으며 기둥이 정형으로 배치된 UCB 시험체를 모델링하였을 경우 유효보폭모델과 유한요소모델 사이에 강성의 차이가 거의 없었던 데 반해 무량판 아파트를 모델링하면 유효보폭모델에서 변위가 약 20% 정도 작게 발생하였다. 이들 결과들을 통하여 유효보폭법은 슬래브-벽체 접합부와 비정형으로 배치된 부분에 대하여 강도를 과대평가한다는 결론을 얻을 수 있으며, 이에 대한 보완이 필요하다고 생각된다.

유한요소법을 사용하여 무량판 아파트에 대한 구조해석을 수행하였다. 본 연구에서 사용한 평면에 대하여 20층 이하의 건물에서는 풍하중과 지진하중에 대하여 안전한 것으로 나타났으나, 아파트가 고층화되고 있는 추세를 고려하면 구조부재의 크기를 키우거나 별도의 횡력저항기구를 사용하여야 할 것으로 생각된다. 무량판 아파트에서 주요 구조부재인 벽체 또는 슬래브를 증가시킬 경우, 물량을 1tonf 증가시킬 때 변위는 약 0.61% 감소하는 것으로 나타났다. 이 때 저층건물에서는 벽두께 증가에 의한 감소율이 높고 고층건물에서는 슬래브두께 증가에 의한 감소율이 높으므로 이를 고려하여 변위를 제어하기 위한 구조부재의 크기를 결정해야 할 것이다.

참고 문헌

1. 최정욱, 송진규, 이수곤, 김진상, "횡하중을 받는 RC 무량판 구조의 슬래브 모델링 기법," 한국콘크리트학회 논문집, 제 14권, 4호, 2002, pp. 615-622
2. Grossman, J. S., "Verification of Proposed Design Methodologies for Effective Width of Slabs in Slab-Column Frames," ACI Structural Journal, V. 94, No. 2, March-April 1997, pp. 181-196
3. Hwang, S. J., and Moehle, J. P., "Vertical and Lateral Load Tests of Nine-Panel Flat-Plate Frame," ACI Structural Journal, V. 97, No. 1, January-February 2000, pp. 193-204
4. Hwang, S. J., and Moehle, J. P., "Models for Laterally Loaded Slab-Column Frames," ACI Structural Journal, V. 97, No. 2, March-April 2000, pp. 345-353