

슬래브의 유연성을 고려한 집중질량 모델링방법의 개선에 관한 연구

권 영 철, 이 상 훈, 김 종 수

한국전력기술주식회사

요 약

현재 원전의 내진해석 절차에는 수직방향의 동적해석모델을 집중질량-보요소 모델로 나타내고 있으나, 층슬래브의 동적유연성을 합리적으로 고려할 수 있는 기준이 마련되어 있지 않다. 본 연구에서는 벽체로 지지된 4변고정 슬래브를 유한요소모델 및 집중질량 모델로 이상화한 후 고유치해석 및 시간이력해석을 수행한 결과, 현재 층슬래브의 수직 응답을 얻기 위해 통상적으로 사용되는 일련의 단자유도계 모델은 이에 상응하는 유한요소모델의 각 모드에 대한 평균응답밖에 주지 못함을 확인하였고, 각 모드 층슬래브의 최대응답을 얻기 위해서는 각 고유진동수가 최소한 이자유도계로 모델링되어야 하며, 이때 이자유도계에 분배할 질량 및 연결보의 강성크기가 각각 1:5와 1:6일때 잘 일치함을 확인하였다. 또한 이렇게 결정된 모델링 방법은 실제 전단벽 구조물의 해석을 통해 그 적용성이 입증되었다.

1.0 서론

원자력발전소의 구조물, 계통 및 기기의 지진에 대한 안전성확보는 원자력발전소 설계에 고려하여야 할 가장 기본적이고도 중요한 요소이므로 원전구조물의 내진설계는 일반 산업시설물에 비하여 엄격하고 복잡한 과정을 거쳐 이루어진다. 원전구조물의 내진해석 모델은 해석결과의 신뢰성 및 정확성에 지대한 영향을 주므로 지진시의 구조물의 동적거동을 정확히 나타낼 수 있어야 한다. 그러나 기존의 내진해석 기준이나 참고문헌에서는 모델링에 대한 기본적인 사항만이 명시될 뿐 상세한 모델링 절차나 방법에 관하여는 구체적으로 기술되지 않고 있다. 이러한 이유로 실무에서의 내진해석 모델링은 기술자의 경험이나 공학적 판단에 크게 의존해 왔다. 따라서 내진해석모델은 기술자의 작성방법에 따라 크게 차이가 날 수 있으며, 이에 따라 실제와는 다른 해석결과를 줄 수도 있다.

현재 원자력발전소 내진해석시 수직방향 동적해석모델은 주로 집중질량-보요소 모델로 구성하는데, 이때 층슬래브의 동적 유연성을 고려하는 방법으로 층슬래브의 질량 일부를 단순 분배한 일정 진동수구간의 단자유도계로 이상화시키고 있다. 동적 구조물응답은 해석모델의 구성에 따라 매우 민감하기 때문에, 보다 실제적인 동적응답을 얻기 위해서는 어느정도의 정확도를 가질 수 있는 해석모델을 개발하여 개선된 내진해석절차를 확립할 필요가 있다.

본 연구에서는 벽체로 지지된 직사각형 형상의 고정슬래브를 가정하고 이 슬래브를 유한요소모델 및 집중질량모델로 이상화 후, 고유치해석 및 시간이력해석을 수행하여 각 결과를 비교 분석함으로써 현재 층슬래브의 수직응답을 얻기위해 통상적으로 사용되는 단자유도 모델의 적합성을 검토하고, 실제 구조물의 해석을 통한 적용성의 입증과 함께 개선된 내진해석 모델링기법을 제시한다.

2.0 관련기술현황 및 문제점

층슬래브의 유연성을 고려한 구조물의 응답을 해석하는 방법은 유한요소법, 단계적해석법, 합성집중질량법등 크게 세가지로 분류된다. 유한요소법은 전체구조물을 유한요소로 모델링하기 때문에 층슬래브의 유연성이 모델자체에서 고려되므로 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있지만, 복잡한 구조물과 같은 경우 해석의 비효율성이 지적된다.

이러한 비효율성을 개선하면서도 정확도가 높은 응답을 얻기 위하여 도입된 방법이 단계적해석법이다. 이 방법은 슬래브의 유연성을 고려하지 않은 집중질량모델에 대해 먼저 시간이력해석을 수행하여 각 슬래브가 위치한 집중질량점에서 응답을 얻고, 이 응답을 유한요소 혹은 단자유도계로 모형화된 층슬래브모델에 입력운동으로 작용시켜 슬래브상에서의 응답을 얻는다. 이 방법은 전체구조물과 층슬래브 간의 상호작용의 영향을 고려할 수 없으나 비교적 안전측의 결과를 주며 사용하기가 간편하여 실무에 보편적으로 적용되고 있다.

합성집중질량법은 층슬래브와 전체구조물간의 상호작용의 영향을 고려할 수 있는 방법으로서 층슬래브를 집중질량으로 나타내어 전체구조물에 연계시켜 층슬래브의 집중질량점에서 직접 응답을 구한다. 전체 층슬래브 시스템은 지지되는 단부의 경계조건에 따라 여러개의 슬래브로 분할할 수 있는데, 이들 각 슬래브의 동적특성을 나타낼 수 있는 단자유도 집중질량모델을 만든다. 대부분의 경우 단자유도계의 질량은 그 총합이 층슬래브 전체질량의 절반이 되게 하며, 나머지 절반은 층슬래브가 연결되는 질량점에 집중시킨다. 이러한 합성집중질량법은 전체구조물과 층슬래브간의 에너지 피이드 백 효과에 의해 단계적해석방법보다 다소 작은 응답을 준다.

3.0 유한요소모델 및 집중질량모델로 이상화한 슬래브의 파라메트릭 해석

3.1 4변고정 슬래브의 형상별 동적특성 비교

벽체로 지지되는 4변고정 슬래브가 집중질량 단자유도계로의 이상화 가능성 여부를 검토하기 위해 먼저 슬래브를 유한요소로 모델링하고, 해석에 고려된 요소에 따라 고유치해석을 수행한 후 동적특성을 비교한다.

3.1.1 해석모델

본 절에서 고려하는 해석모델은 등방성 재료특성을 지니며 벽체로 지지되는 4변고정 슬래브로서 그 크기와 두께는 표3-1과 같으며, 해석모델의 재료특성은 표3-2와 같다. 고정슬래브는 두 수평회전 및 수직변위에 대하여, 벽체의 경우 수직변위에만 자유도를 부여하였고 나머지 절점은 모두 구속하였다.

본 연구에 사용된 판슬래브 해석모델의 크기와 경계조건은 원자력발전소 구조물에서 흔히 사용되는 전형적인 조건으로 선택하였으나, 슬래브의 두께는 해석결과와의 비교검토 편의상 고유진동수를 33Hz 이하로 낮추기 위해 비교적 작은 값을 가정했다. 이들의 유한요소 형상은 그림3-1에 나타나 있다.

본 해석모델에 작용하는 하중은 콘크리트 슬래브자중 이외에 주요장비 및 기타하중을 고려하여 200 psf의 활하중에 대한 질량을 판슬래브의 수직방향에 대하여 추가로 등분포시켰다. 한편, 본 연구에는 범용 구조해석 프로그램인 SAP90을 사용하여 해석을 수행하였다.

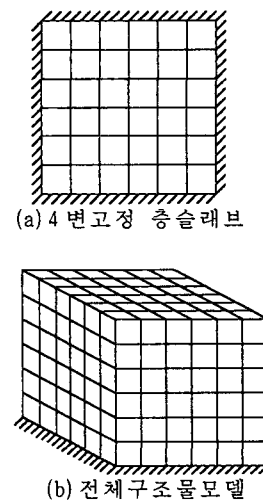


그림 3-1 해석에 사용된 유한요소모델

표3-1 해석에 사용된 모델의 크기

해석모델	종횡비	모델의 크기 (ft.)		Mesh 크기 (ft.)	비 고
		슬래브	벽체		
Slab1	1 : 1	30×30×1.5	-	슬래브:3×3	4변고정슬래브만 모델
Slab2	1 : 1.5	45×30×1.5	-		
Slab3	1 : 2.5	75×30×1.5	-		
FEM1	1 : 1	30×30×1.5	18×2.0	슬래브:3×3 벽체:3×4.5	벽체를 연계한 전체모델
FEM2	1 : 1.5	45×30×1.5	18×2.0		
FEM3	1 : 2.5	75×30×1.5	18×2.0		

표3-2 해석모델의 재료특성

재료	강도(f_c')	탄성계수(E)	포아송비(ν)	단위중량(ρ)
콘크리트	4,000 psi	519,000 ksf	0.17	150 pcf

표 3-3 고유치해석 결과비교

종횡비	모드번호	고유진동수 (cps)			모드질량비율 (%)	
		*수계산	4변고정	전체모델	4변고정	전체모델
1 : 1	1	21.48	21.18	20.96	60.2	50.4
	2	43.81	43.00	42.16	0	0
	3	43.81	43.00	42.16	0	0
	4	64.63	61.89	60.70	0	0
	5	78.53	76.97	74.23	0	0
	6	78.89	77.45	74.58	22.4	22.8
1 : 1.5	1	16.12	15.99	15.86	58.5	50.2
	2	24.89	24.49	24.26	0	0
	3	39.46	38.97	38.34	10.0	9.2
	4	39.71	39.14	38.46	0	0
	5	47.66	46.44	45.67	0	0
	6	60.18	59.02	57.91	0	0
1 : 2.5	1	14.11	14.07	13.96	58.2	51.1
	2	16.60	16.44	16.32	0	0
	3	21.15	20.83	20.68	8.7	7.7
	4	27.87	27.37	27.16	0	0
	5	36.73	36.02	35.71	3.8	3.5
	6	37.66	37.53	36.72	0	0

(*수계산은 참고문헌(Blevins, R.D.)의 수식에 의한 결과임

있는 경우이다. 따라서 실제 구조물의 내진해석에서는 대부분 첫번째 모드의 진동수만 고려하여 집중질량모델로 이상화할 수 있다. 한편 유한요소해석 결과의 모드질량비율(4변고정 약60%, 전체모델 약50%)과 실제 발전소 내진해석시 단자유도 모델에 적용되는 질량의 크기(약33%)는 서로 차이를 보이고 있는데, 집중질량 단자유도계에 배분되는 질량의 크기가 상호작용에 의하여 구조물의 응답에 역으로 끼치는 영향은 3.2항에서 논의된다.

3.2 층슬래브와 구조물간의 동적응답의 상호작용 영향 검토

단자유도계에 배분되는 슬래브의 집중질량 크기가 상호작용에 의하여 구조물의 응답과 슬래브의 응답에 영향을 미치는 지를 검토하기 위하여, 단자유도계의 질량의 크기를 달리하는 몇가지 합성집중질량모델을 작성하고 시간이력해석을 수행한 후 유한요소모델의 해석결과와 비교한다.

3.1.2 해석 결과

각 유한요소 해석모델에 대하여 고유치해석을 수행한 후 주요 6개 모드의 고유진동수와 모드질량비율을 수계산된 고유진동수와 함께 비교하였다. 수계산된 진동수값은 유한요소법에 의한 방법과 비교할 때 대체로 1-3%의 오차를 주고 있으므로 수계산에 의하여 얻어진 고유진동수 계산이 보다 효율적인 것으로 판단된다. 첫번째 모드의 경우 4변고정 모델에서는 약 60%가, 슬래브가 벽체에 연계된 전체모델에서는 약50%의 모드질량을 갖고 있으며, 두 번째 큰 모드질량비율을 가지는 모드의 경우 대체로 10-20%에 해당하는 값을 갖지만 고진동수 영역에 있음을 알 수 있다. 첫번째 모드 또는 경우에 따라서는 세번째 모드까지가 층슬래브의 동적 거동의 대부분을 차지하고 있으나 Slab3과 FEM3 모델은 실제보다 지나치게 유연하게 가정되어

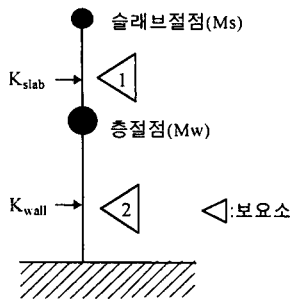


그림 3-2 합성집중질량모델

3.2.1 해석모델

표3-1의 전체모델중 FEM1을 선정하고 그림3-2와 같이 이에 대응하는 합성집중질량모델 세 개를 작성하였다. 현재 원전의 내진해석에 적용되는 두 수평 및 수직응답을 분리하는 기본가정과 동일하도록 구조물의 동적 수직 거동응답은 벽체의 수직방향의 강성에만 영향을 받는다고 가정한다. 층절점에는 벽체의 1/2질량과 단자유도계에 배분되고 남은 질량을 집중시켰으며, 슬래브의 유연성을 표현하는 단자유도계 절점의 질량은 각각 슬래브의 1/3, 1/2 및 2/3가 되도록 해석모델을 작성하였다. 그림 3-2의 부재 2에는 벽체의 실제 수직강성이, 부재 1에는 FEM1의 기본진동수(20.96Hz)를 얻을 수 있는 수직강성이 제공되었다. 집중질량모델의 경계조건은 유한요소모델과 같이 수직방향의 변위에 대하여만 자유도를 부여하였다.

3.2.2 입력시간이력 및 출력응답스펙트럼의 감쇠값

해석은 실제 내진해석에서 사용된 인공가속도 시간이력을 사용하였으며, 응답스펙트럼의 비교는 2% 감쇠에 대하여만 수행되었다.

3.2.3 해석결과

그림3-3에서 보듯이 세 집중질량모델의 층절점에서의 응답곡선과 전체모델인 FEM1의 벽체에서의 응답곡선은 거의 동일하므로 단자유도계 질량의 크기가 슬래브절점의 응답에 영향을 미치는 이른바 벽체-슬래브간의 상호작용은 무시할만 한 것으로 판단되는데, 이는 실제적인 원전구조물에서 보는 바와 같이 단자유도계에 비하여 벽체의 수직방향 강성이 상대적으로 매우 크기 때문이다.

한편 그림3-4에서 보듯이 세 집중질량모델 자체의 슬래브절점의 응답곡선들은 거의 일치하므로 단자유도계에 배분된 질량의 크기도 슬래브의 응답에는 전혀 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그러나 단자유도계에서 나타난 슬래브의 응답과 전체 유한요소모델의 가운데 절점에서의 응답은 약1.7배 정도의 차이를 보여주고 있는데, 이같은 현상으로부터 단자유도계로 이상화한 시스템이 슬래브의 최대응답을 주는 것이 아님을 명백히 알 수 있다.

3.3 단자유도계로 이상화한 슬래브의 동적응답특성

단자유도계로 이상화된 슬래브의 동적응답과 전체를 유한요소로 이상화하여 구한 동적응답의 차이를 규명하기 위하여, 4변고정 슬래브만을 고려하는 유한요소 및 단자유도 모델을 작성하고 그 동적응답을 비교한다.

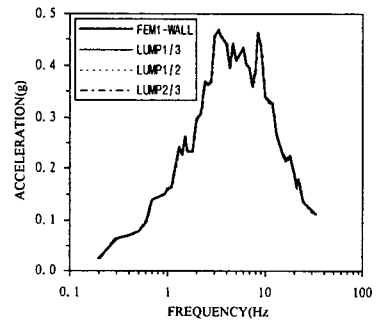


그림 3-3 층절점에서의 응답스펙트럼 비교

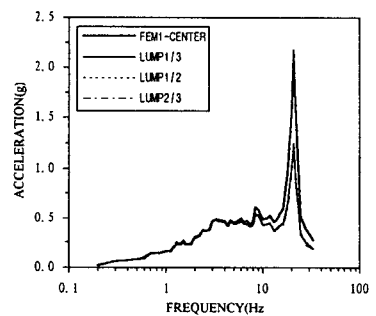


그림 3-4 슬래브절점에서의 응답스펙트럼 비교

3.3.1 해석모델

표3-1의 4변고정 슬래브 모델중 Slab1을 선정하고 그림3-5(b)에서와 같이 이에 대응하는 단자유도 모델 SDOF1을 작성하였다. SDOF1의 경계 조건 및 동특성은 3.2에서 언급한 바와 같다.

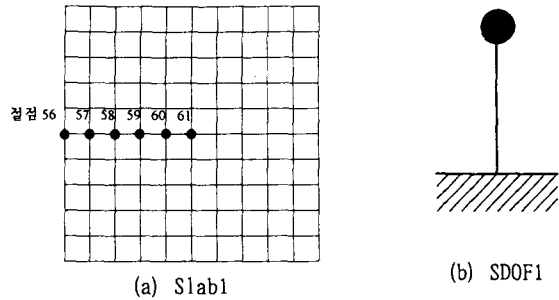


그림 3-5 4 변고정 슬래브 모델

3.3.2 해석결과

Slab1과 SDOF1에 대하여 시간이력해석을 수행하되 Slab1의 경우 한 개 모드만 고려하여 해석을 수행한 후, Slab1의 절점번호 57에서부터 61번까지의 응답과 SDOF1의 응답을 그림3-6에서 나타내었고, Slab1의 중심축 모드벡터값을 표3-4에 정리하였다.

SDOF1의 동적응답은 전체 유한요소모델의 첫 번째 모드의 평균값임을 확인할 수 있으며, 이때 Slab1의 최대 동적응답은 SDOF1의 약 1.7배이다. 이는 Peak 점의 모드벡터가 전체 모드벡터 평균값의 약 1.7배이기 때문이다. 따라서 슬래브의 유연성을 고려하기 위하여 단자유도계를 달아서 이상화 하는 것은 결국 단자유도계를 이상화 시킬 구조물 부분의 평균응답을 묘사하기 위함이지 결코 이상화 영역내의 최대값을 대변하는 것이 아님을 염두에 두어야 한다. 일반적으로 원자력발전소 전단벽 구조물내의 슬래브는 하나의 단자유도계로만 단순화시켜 해석하고 있기 때문에 만약 이상화된 슬래브의 유연성에 대한 최대응답점의 값을 주기 위해서는 슬래브의 첫 번째 모드의 형상 벡터로 미루어 약 1.7배의 값으로 외삽시킬 수 있는 등가의 이자유도계를 정의해야 한다.

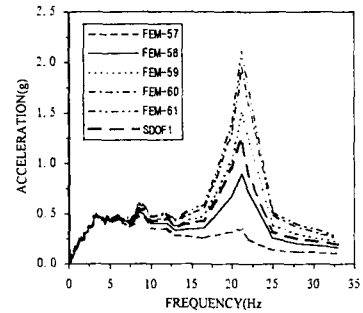


그림 3-6 슬래브의 유한요소모델과 단자유도계모델의 응답비교

표3-4 슬래브의 유한요소 모델의 모드벡터

절점번호	모드벡터
56	0.0000
57	0.0942
58	0.2942
59	0.5045
60	0.6583
61	0.7143

3.4 이자유도계로 이상화한 층슬래브의 동적응답

단자유도계로 이상화할 때의 슬래브의 동적응답은 최대동적응답의 약 50-60%정도이므로 이를 보정하기 위하여 등가의 이자유도계 모델을 도입하고 응답을 검토한다.

3.4.1 해석모델

표3-1의 중횡비를 달리하는 4변고정 슬래브 유한요소 모델 Slab1, Slab2, Slab3에 대응하는 이자유도 모델을 그림 3-7과 같이 이상화 하였다. 이자유도계 모델의 연결보는 각각 2ft로 가정하였고 표3-5 과 같이 두 절점의 질량비와 두 연결보의 강성비를 바꾸어 가면서 모델을 작성하였다.

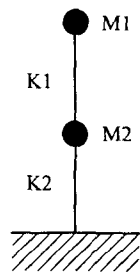


그림 3-7 이자유도계모델

표 3-5 이자유도계모델의 질량 및 강성비

질량비 (M1 / M2)	강성비 (K1 / K2)
1 / 1	1 / 2
1 / 3	1 / 4
1 / 5	1 / 6
1 / 6	1 / 7
1 / 9	1 / 10

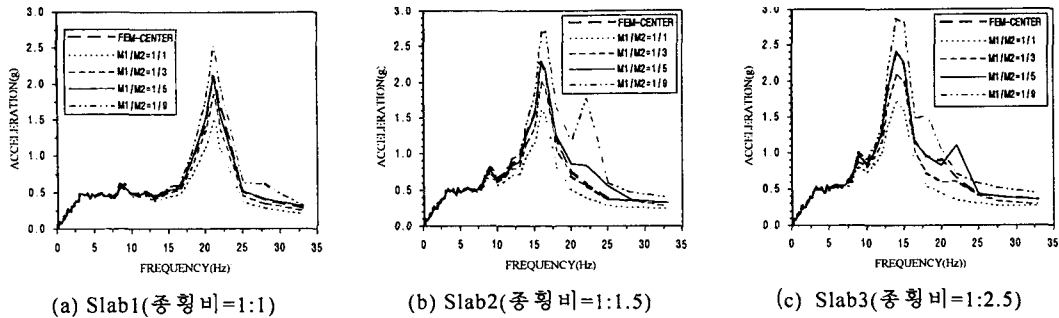


그림 3-8 슬래브의 유한요소모델과 이자유도계모델의 응답비교

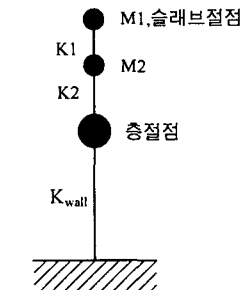


그림 3-9 이자유도계로 이상화한 합성집중 질량모델 (Lump1/3-1)

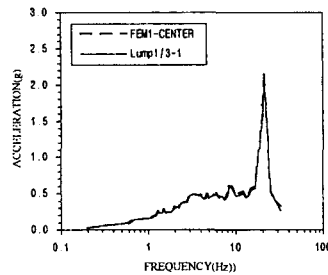


그림 3-10 슬래브 절점에서의 FEM1 과 Lump1/3-1의 응답비교

그림3-8에서 보는바와 같이 종횡비와 기본진동수를 달리하는 세 모델 모두에 대하여, 이자유도계의 질량비가 1:5이고 이때의 강성비가 1:6 일 때 유한요소모델의 최대 응답과 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이중 Slab1에 대응하는 이자유도계를 3.2절의 합성집중질량모델 Lump 1/3 에 연계시켜(그림3-9) 그 응답을 구하고 FEM1 과 비교하여 (그림3-10) 본 결과 서로 잘 일치한다.

4.0 결론

벽체로 지지되는 콘크리트 4변고정 슬래브를 유한요소모델 및 집중질량모델로 이상화한 후 고유치해석 및 시간이력 해석을 수행하고 그 결과를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 벽체의 축방향강성의 상대적인 크기가 슬래브의 수직방향의 강성에 비하여 매우 크기 때문에 집중질량으로 표현되는 층슬래브의 질량 배분율의 크기가 층절점의 응답에 역으로 영향을 주는 상호작용은 무시할 수 있음을 알 수 있었으며, 이로 인한 슬래브자체의 응답도 영향이 없음을 확인하였다.

둘째, 단자유도계로 이상화하여 구한 슬래브의 응답은 슬래브 응답의 최대값이 아닌 평균값임을 확인 하였고, 슬래브응답의 최대값을 얻기 위해서는 슬래브를 최소한 이자유도계로 모델링 하여야 하며, 이자유도계에 분배할 질량 및 연결보의 강성크기가 각각 1:5과 1:6일때 가장 정확한 해석결과를 얻을 수 있다.

한편, 일반적인 경계조건을 만족할 수 있는 보다 효과적인 모델링 기법을 개발하기 위해서는, 등가 이자유도계는 물론 시스템 동일화(System Identification)기법을 도입하기 위한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Perumalswani, P. R. & Dalal, J. S., "Modeling of Slab in Seismic Analysis of Nuclear Power Plant Buildings," Nuclear Engineering & Design 47, 1978
2. Blevins, R. D., "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape," Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1979