

부분구조법에 의한 지반-구조물 상호작용 시스템의 지진응답 매개변수 해석

Parametric Study on Earthquake Responses of Soil-structure Interaction System by Substructure Method.

조양희* 박형기* 이성규** 이태범***

ABSTRACT

This paper presents results of parametric studies of the seismic responses of a reactor containment structure on layered base soil. Among the numerous parameters, this study concentrates on the effects of embedment of structure to the base soil, thickness of the soil layers, stiffness of the base soil, and the definition point of the input motion. For the analysis, a substructure method using frequency independent impedances is adopted. The method is based on the mode superposition method in time domain using the composite modal damping values of the SSI system computed from the ratio of dissipated energy to the strain energy for each mode. From the study results, the sensitives of each parameter on the earthquake responses have been suggested for the practical application of the substructure method of SSI analysis.

1. 서론

지반-구조물상호작용해석은 원전과 같은 주요 시설물의 내진설계 과정에서 가장 중요하면서도 가장 많은 불확실성을 내포하고 있는 과정이다. 따라서 현재까지 이를 위한 다양한 해석방법 및 전산프로그램이 개발되어 있긴 하지만, 어느 방법도 제한사항 없이 모든 조건하에서 공학적으로 타당한 해석결과를 줄 수 있는 방법을 찾기는 어렵다.

본 연구에서 제시된 집중파라미터모델을 사용하는 부분구조해석을 이용한 지반-구조물상호작용해석 방법은 그 이론적 합리성이 검증되었을 뿐만 아니라, Huailien에서 수행된 대형내진시험모델의 시험 및 실제지진 계측결과를 통하여 그 해석결과에 대한 신뢰성도 확인된 바있다. 그럼에도 불구하고 제시된 방법은 전술한 불확실성으로 인하여 시스템 및 입력운동의 형태에 무관하게 일반적으로

* 인천대학교, 토목공학과 교수, 정회원

** 한국원자력안전기술원, 구조부지실장, 정회원

*** 인천대학교 토목공학과, 석사과정, 학생회원

적용 가능한 방법이라고 할 수는 없다. 또 특정한 인자의 변화가 해석결과에 미치는 영향도 또다른 상관인자와의 관계에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 지반-구조물상호작용해석 과정에서 해석결과에 비교적 큰 영향을 주는 인자들을 대상으로, 그 인자의 변화가 해석결과에 미치는 영향을 분석하기 위한 다양한 매개변수해석을 수행하였다. 해석방법으로서는 물론 본 연구 과정에서 제시된 집중과라 메타모델을 이용하는 부분구조법을 사용하였으며, 고려 대상 인자로서는 입력운동, 지반의 전단강성, 구조물의 문힘깊이, 지반의 층상특성, 기초의 형상, 지하수위, 기초의 들림현상 등을 대상으로 하였다. 이와 같은 해석에서 얻어진 결과들은 다양한 관점에서 분석, 정리함으로써 향후 실제 업무 수행시 특정 조건하에서 지진응답 등의 경향을 예측할 수 있는 중요한 자료로 활용될 수 있도록 하였다.

2. 입력운동 및 대상 구조물

2.1 입력운동

동일한 지반-구조물상호작용시스템의 지진해석 결과도 입력운동의 특성에 따라 큰 차이를 보일 수 있다. 따라서 입력운동 특성에 따른 영향을 배제하기 위해서는 충분한 수의 입력운동에 대한 반복해석을 수행한 다음 그 결과들을 합리적인 방법으로 통계처리할 필요가 있다. 본 연구에서는 동일한 동적특성을 갖는 서로 다른 다섯 개의 인공 지진시간이력을 해석용 입력으로 선택하였다. 선택된 인공지진은 미국의 원전설계용 표준응답스펙트럼⁽¹⁾에 부합되도록 작성하였으며, 이를 위하여 전산프로그램 SIMQKE⁽²⁾를 사용하였다.

작성된 인공 가속도시간이력의 지속시간은 24초이고, 시간간격(Δt)은 0.005초로 하였으며, 대상 시스템의 효율적인 응답거동을 나타낼 수 있도록 최대지반가속도를 0.2g로 정규화시켜 이를 지표면운동으로 정의하였다. 그림1은 해석에 사용된 대표적인 인공지진의 시간이력과 응답스펙트럼을 도시한 그림이다.

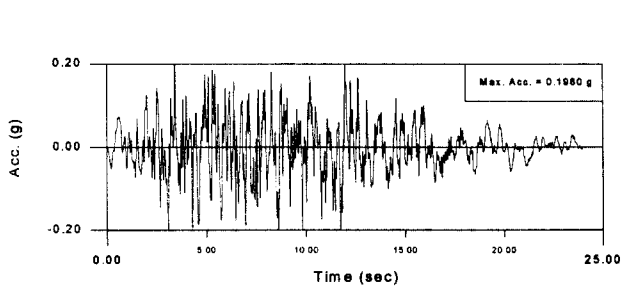
2.2 대상구조물

지반-구조물상호작용에 의한 영향의 정도는 지반과 구조물의 상대적인 강도특성에 따라 결정된다. 즉, 상부구조물의 강성이 클수록 또 폭-높이비가 클수록 더 큰 상호작용 효과를 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 상대적으로 큰 상호작용 효과를 줄 것으로 예상되며, 또 실제 설계, 시공된 적이있는 전형적인 원자력발전소의 원자로건물을 해석 대상 구조물로 선택하였다.

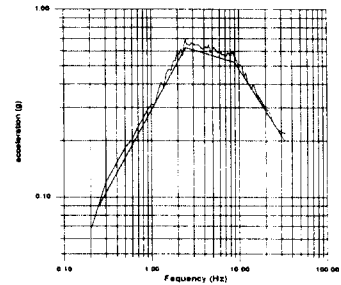
선택된 원자로건물은 원통형벽체와 반구형돔으로 된 프리스트레스트 콘크리트 구조로 되어 있으며, 그 내부에는 철근콘크리트로 된 각종 차폐벽 및 지지구조물들이 배치되어 있다. 벽체의 반경은 22.8m이고, 벽체 및 돔의 총 높이는 91.44m이

다. 또 건물의 기초는 두께 3.6m의 철근콘크리트 슬래브로 되어 있다. 그림2는 해석대상 원자로건물의 단면도 및 해석모델을 보인것이다. 건설재료로 사용된 콘크리트는 탄성계수, $E_c = 2.98 \times 10^6 \text{ t/m}^2$, 단위중량, $W_c = 2.64 \text{ t/m}^3$, 포아송비, $\nu = 0.17$ 의 값을 가지며, 입력지진의 최대가속도 크기가 0.2g인 점을 감안하여 재료감쇠비는 5%로 가정하여 사용하였다.

이와같은 상부구조물은 해석을 위해서 그림2에 보인바와 같이 18개의 보요소로 구성된 집중질량모델로 이상화하였다. 해석 대상 구조물의 고유치해석을 수행한 결과 수평방향 주진동수가 4.5Hz인 비교적 강성이 큰 구조물임을 알 수 있었다

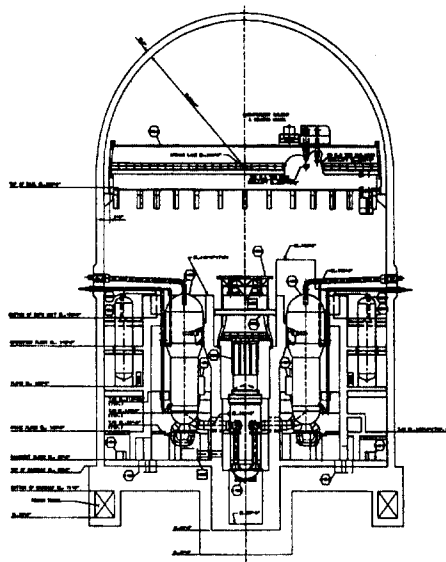


(a) 인공지진의 시간이력곡선

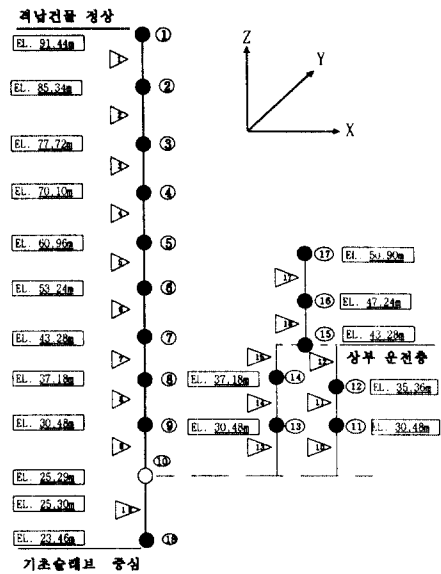


(b) 인공지진의 응답스펙트럼

그림1. 입력운동으로 사용된 대표적인 인공지진의 시간이력곡선과 응답스펙트럼



(a) 단면도



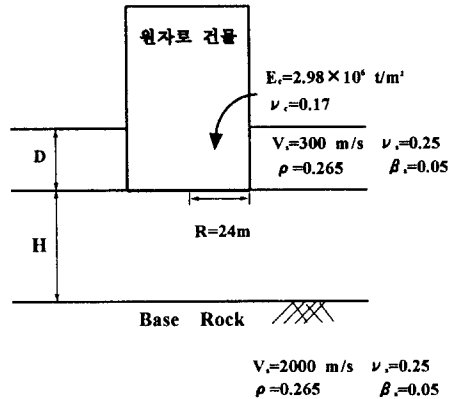
(b) 집중질량-보요소모델

그림2. 해석 대상 구조물인 원전 원자로건물의 단면도 및 해석모델

3. 매개변수의 선택

전술한 바와같이 지반-구조물상호작용해석 결과에 영향을 미치는 인자는 입력 운동, 상부구조물, 지반, 해석방법 등 전 분야에 걸쳐 실로 다양하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 이들 인자중에서 해석결과에 상대적으로 큰 영향을 미치고, 또 실무에서 항상 주요 고려대상이 되는 인자인 입력운동의 정의위치, 지반의 강도특성(전단강성), 구조물의 문힘깊이, 지반의 층상특성(층상두께), 기초의 형상, 지하수위의 위치, 그리고 기초의 들림현상을 해석대상 인자로 선택하였다. 표1은 그림 3에 보인 바와 같은 지반-구조물상호작용시스템에 대하여 매개변수의 종류 및 해석모델의 내용을 요약한 것이다.

매개변수		모델 종류				
종류	특성					
입력운동 정의위치	정의위치	기초 저면	지표면	-	-	-
지반의 강도특성	전단파속도 (m/sec)	500	700	100 0	130 0	∞ (고정 지반)
	재료감쇠비 (%)	5	4	3	2	-
	지반분류	사질 토	암	암	암	-
구조물의 문힘깊이	D/R	0	0.5	1.0	1.5	-
지반의 층상특성	H/R	0.5	1.0	2.0	3.0	α (반무 한체)
기초의 형상	-	직사 각형	원형	-	-	-
지하수	영향고려 여부	고 려	불고려	-	-	-
기초들림 현상	들림고려 여부	고 려	불고려	-	-	-



벌레

R = 기초반경	ν_s = 지반의 포아송비
V_s = 지반의 전단파속도	ν_r = 구조물의 포아송비
D = 기초의 문힘깊이	E_s = 구조물의 탄성계수
H = 지반의 층상깊이	ρ = 흙의 밀도
β_s = 지반의 재료감쇠비	

그림3. 매개변수해석을 위한 지반-구조물 상호작용시스템

표1 각 매개변수의 변화에 따른 해석모델 종류

4. 인자별 영향 분석

4.1 입력운동의 영향

입력운동의 영향을 관찰하기 위하여 지표면 입력운동과 기초저면 입력운동을 사용하여 지반-구조물상호작용해석을 수행하였다. 기초 저면 입력운동을 결정하기

위하여 지표면에서 정의된 가속도시간이력을 M-SHAKE⁽⁴⁾를 사용하여 각 모델별로 부지응답해석을 수행하였다. 그림 4는 인공지진1을 지표면과 기초저면에서 입력시킨경우에 대한 해석결과를 도시한 것이다. 그림에서 보듯이, 지표면 입력과 기초저면에서의 입력을 사용한 해석결과의 차이를 비교하여 보면, 입력운동의 종류가 최대공진진동수에 미치는 영향은 전혀 없거나 있는 경우에도 무시할 수 있는 정도이다. 그러나 구조물 응답은 예외없이 지표면 입력운동이 기초 위치에서의 입력운동보다 큰값을 주며, 경우에 따라서는 그 정도가 너무 크기 때문에, 지표면 운동을 사용할 경우 비경제적인 설계 결과를 줄 수도 있음에 유의해야 한다.

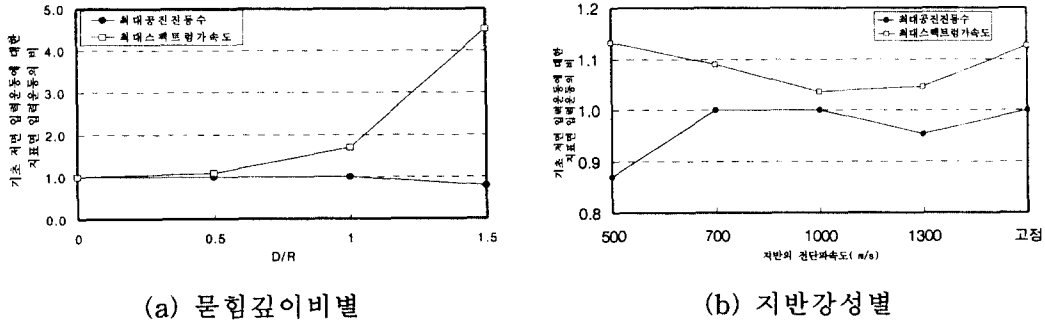


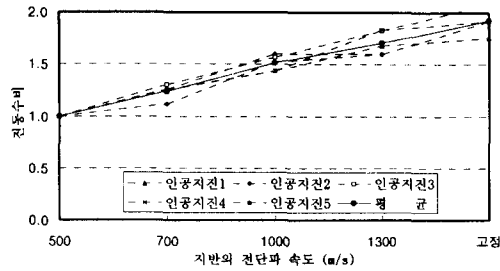
그림4. 입력운동 종류에 따른 응답 비교

4.2 지반강성의 영향

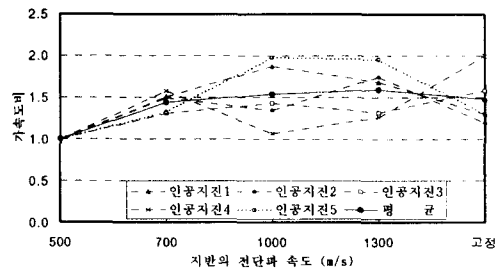
지반강성의 영향을 분석하기 위하여 전단파속도 500m/s, 700m/s, 1000m/s, 1300m/s인 네 종류의 서로 다른 모델에 대하여 각각 5개 입력운동을 작용시켜 해석을 수행하여 그 응답을 상호 비교하였다.

그림 5는 세 개의 서로 다른 모델에 대하여 격납건물정상에서의 응답중 최대공진진동수비와 최대스펙트럼가속도비를 지반의 전단파속도별로 나타낸 것이다.

해석결과에서 보듯이, 지반강성이 증가할수록 지반-원자로건물시스템의 최대공진진동수 및 최대스펙트럼가속도가 동시에 증가하는 경향을 확인하였으며, 이는 지반강성 증가에 따라 시스템 진동수가 증가하는 반면에 감소값은 감소하기 때문에 발생하는 일반적인 현상으로서 예상한 바와 같다. 그러나 최대스펙트럼가속도의 경우는 최대공진진동수와는 달리 입력운동 및 모델종류에 따라 그 응답의 평균값 및 분산도가 현저한 차이를 보이고 있다. 특히 상부토층의 두께가 얇을 경우 (H/R=1.0)에는 지반전단파속도의 변화에도 불구하고 최대스펙트럼가속도 응답의 변화가 거의 없거나 오히려 감소하는 경우(예 : 기본모델)도 있을 수 있으므로, 해석결과의 응용시 특히 유의할 필요가 있다. 이러한 현상으로부터, 상부토층의 두께가 얇은 경우에는 지진파의 간힘효과(confining effect)로 인하여 지반강성이 응답결과에 주는 영향의 정도가 감소됨을 알 수 있다.



(a) 최대공진진동수비



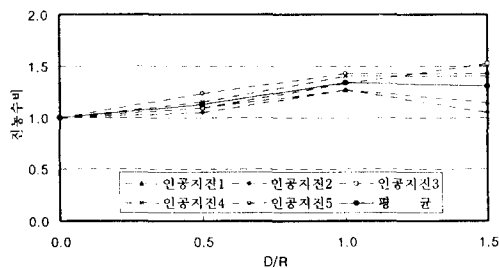
(b) 최대스펙트럼가속도비

그림5. 지반강성의 변화에 따른 격납건물 정상 응답 비교 (D/R=0.0, H/R=6.0)

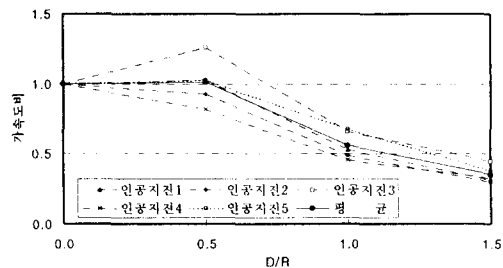
4.3 구조물 문힘의 영향

구조물의 문힘에 의한 영향을 분석하기 위하여, 표면기초(D/R=0)와 원자로건물의 문힘깊이가 건물기초 반경(24m)의 각각 0.5배(D/R=0.5), 1.0배(D/R=1.0), 1.5배(D/R=1.5)인 네 가지의 서로 다른 경우를 선정하고, 그 해석결과를 상호 비교하였다. 그림6은 서로 다른 두가지 모델에 대하여 각 입력운동별로 격납건물 정상의 최대공진진동수와 최대스펙트럼가속도를 기초문힘비에 따라 비교하여 나타낸 것이다.

해석결과에서 보듯이 문힘깊이가 커질수록 격납건물 정상의 응답은 감소하고, 최대공진진동수는 증가하는 일반적인 경향을 확인하였다. 이러한 현상은 구조물이 문힌 경우, 구조물 측면지반(backfill)으로 인하여 시스템의 강성 및 감쇠가 동시에 증가하기 때문에 발생하는 현상으로서 예상했던 바와 일치하는 경향이다. 격납건물의 가속도응답은 표면기초 구조물에 비해 최고 60%까지 감소되는 현상을 보이고 있다. 그러므로 실제 설계시 매입깊이가 응답에 미치는 영향을 필히 고려해야 할 것으로 판단된다. 이 경우에도 4.2에서와 마찬가지로 상부토층의 두께가 얇은 경우(기본모델)에는 토층내의 지진파 간섭효과로 인하여 일반적인 경향이 약간 변형된 경향을 보이고 있음을 발견할 수 있다.



(a) 최대공진진동수비



(b) 최대스펙트럼가속도비

그림6. 문힘깊이의 변화에 따른 격납건물 정상 응답 비교 (H/R=6.0, V_s=700m/s)

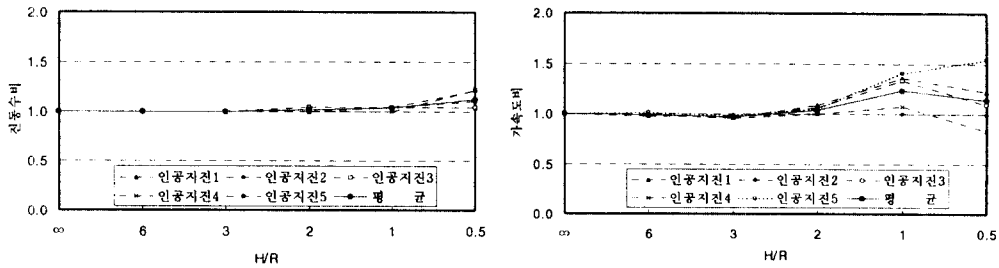
4.4 지반층상 특성의 영향

층상형태의 지반이 지진응답에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 상부토층의 깊

이가 건물기초 반경(24m)의 0.5배($H/R=0.5$), 1.0배($H/R=1.0$), 2.0배($H/R=2.0$), 3.0배($H/R=3.0$), 6.0배($H/R=6.0$)인 모델 및 반무한탄성체($H/R=\infty$)모델과 같은 6가지의 서로 다른 토층모델을 선정하고, 그 해석결과를 상호 비교하였다.

그림7은 서로 다른 두 가지 모델에 대하여 각 입력운동별로 얻은 격납건물 정상에서의 최대공진진동수와 최대스펙트럼가속도를 지반층상비에 따라 비교하여 나타낸 것이다.

이들 해석결과를 분석해 보면, 층상두께가 감소할수록 최대공진진동수 및 최대스펙트럼가속도는 동시에 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 층상두께가 두꺼워질수록 시스템의 강성은 감소하는 반면에 감쇠는 증가하기 때문에 기인하는 현상으로서 이는 예상했던 바와 같은 경향이다. 그러나 층상두께 변화에 따른 응답변화의 정도가 최대 10%내외로 그 정도가 크지 않으므로 실제 공학적인 측면에서의 의미는 다른 인자에 비하여 크지 않다고 할 수 있다. 또 기초 하부 층상두께가 기초반경의 3배이상이 되면 반무한체와 유사한 응답을 보인다.



(a) 최대공진진동수비

(b) 최대스펙트럼가속도비

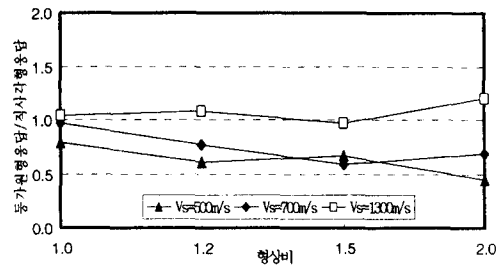
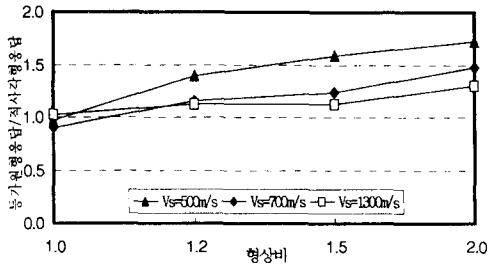
그림7. 지반 층상두께의 변화에 따른 격납건물 정상 응답 비교 (기본모델)

4.5 기초형상의 영향

기초형상의 영향을 분석하기 위하여 고려한 기초형상은 같은 크기의 평면 면적을 가지는 직사각형기초와 등가 원형기초이다. 이들 기초에 대하여 전단파속도가 500m/s, 700m/s, 1300m/s인 세 종류의 반무한탄성지반에 하나의 인공 가속도시간이력을 입력시켜 그 응답을 상호 비교하였다.

그림 8에서 격납건물 정상의 응답을 직사각형기초를 사용한 경우와 등가 원형기초를 사용한 경우에 대하여 비교하였다.

해석결과를 고찰하면, 전반적으로 등가 원형기초를 사용한 경우의 최대공진진동수가 높고, 최대스펙트럼가속도값은 낮다. 최대공진진동수는 직사각형기초의 장변방향 응답의 경우에 비하여 단변방향 응답의 경우는 형상비(장변의 길이/단변의 길이)가 커질수록 최대공진진동수의 차이는 더욱 커지며 이러한 경향은 지반의 전단파속도가 낮아 질수록 더욱 현저하다. 최대스펙트럼가속도는 형상비에 따라 일정한 경향을 보이지 않고 있으나, 지반의 전단파속도가 낮아 질수록 등가 원형기초를 사용한 경우는 직사각형기초의 장변방향의 경우에 비하여 단변방향의 경우 더욱 작은 값을 얻게된다.



(a) 최대공진진동수비

(b) 최대스펙트럼가속도비

그림8. 기초형상에 따른 격납건물 정상응답 비교

4.6 해석결과 요약

표2는 4.1항에서 4.5항까지의 각종 해석결과를 요약한 표이다. 이 표에서 포함된 내용중 지하수위의 영향과 기초들림의 영향에 대해서는 지면관계상 구체적인 해석과정 및 결과의 기술은 생략한채 최종결과에 대한 내용만 포함되어있다. 이와 관련된 구체적인 내용은 참고문헌 5와 6에 기술되어있다.

표2. 매개변수해석 결과 요약

인 자			구조물 응답에 미치는 영향				안전측 응답을 얻기위한 방법
			최대공진진동수		최대스펙트럼가속도		
종 류	범 위	변화방향	내용	최대변화폭	내용	최대변화폭	
입력운동	기초위치운동과 지표면운동	지표면운동	불변	-	증가	100	지표면운동 사용
지반강성	500~∞	증가	증가	60	증가	100	상대적으로 큰 지반강성 사용
구조물의 묻힘깊이	0~1.5	증가	증가	40	감소	60	상대적으로 작은 묻힘깊이 사용
상부 충상두께	0.5~3.0	증가	감소	15	감소	15	상대적으로 작은 충상두께 사용
기초형상	직사각형과 등가원형	등가 원형기초	증가	50	감소	40	실제기초형상 사용
지하수위의 영향	고려하는 경우와 무시하는 경우	고려	증가	10	일정한 경향없음	-	일정한 경향없음
기초들림의 영향	고려하는 경우와 무시하는 경우	고려	감소	15	감소	60	기초들림을 고려하지 않음

5. 결론

본 연구에서는 지반-구조물상호작용의 해석결과 즉 구조물의 지진응답에 민감한 영향을 줄 수 있는데도 불구하고, 실제 해석시 불확실성을 내포하기 쉬운 인자들을 대상으로 다양한 매개변수해석을 수행한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 부정확한 방법으로 계산된 기초위치에서의 지반운동보다는 오히려 지표면운동을 사용하는 것이 설계측면에서는 보다 바람직하다고 할 수 있다. 이때, 지표면운동을 사용하게 되면 안전측의 결과를 주게 되지만, 경우에 따라서는 과도한 안전 여유치를 줄 수 있음에 유의해야 할 필요가 있다.

- (2) 지반강성이 증가할수록 응답의 최대공진진동수 및 최대스펙트럼가속도가 증가하는 경향을 보인다. 따라서, 내진설계를 위한 해석시는 지반강성을 큰쪽으로 예측할 경우 안전측의 해석결과를 얻을 수 있다. 일반적으로 부지조사 및 시험결과 얻어지는 지반특성은 실제보다 과대평가 되는 경향이 있으므로, 이 값을 직접 사용하여 모델링하는 경우 안전측의 결과를 얻을 수 있음을 시사하고 있다.
- (3) 구조물의 문힘깊이가 커질수록 구조물의 최대스펙트럼가속도응답은 감소하게 된다. 따라서 해석모델 작성시 구조물의 문힘을 무시하게 되면 안전측의 응답을 얻을 수 있다고 할 수 있다. 그러나, 문힘깊이가 기초반경의 1.0배를 초과할 경우에는 과도한 비경제적 해석결과를 줄 수 있음에 유의해야 한다.
- (4) 지반이 층상으로 되어 있을 경우, 층상두께가 증가할수록 구조물의 최대스펙트럼가속도는 감소하게 된다. 따라서 상부층상의 두께를 가능한 한 얇게 모델링할 경우 안전측의 해석결과를 얻을 수 있다. 또, 층상두께가 기초반경의 3배 이상이 되면 반무한체인 경우와 응답에 있어서 큰 차이를 보이지 않으므로, 반무한체로 모델링해도 무방하다.
- (5) 직사각형기초의 경우, 등가 원형기초로 모델링하게 되면 최대스펙트럼가속도응답은 일정한 경향은 보이지 않으나 최대공진진동수의 값은 증가하게 된다.

감사의 말

이 연구는 한국원자력안전기술원의 연구비지원에 의하여 수행되었으며, 저자 일동은 이에 대한 감사의 뜻을 밝힌다.

참 고 문 헌

1. U.S.Atomic Energy Commission.(1973). Regulatory Guide 1.60, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants", Rev.1.
2. MIT.(1976). *SIMQKE : A Program for Artificial Motion Generation, User's Manual and Documentation*, Dept. of Civil Engineering.
3. Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.(1972). *SHAKE- Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*, EERC 72-12, Univ. of California, Berkeley.
4. 박형기.(1995). "층상지반내 수직이동 수평지진파의 해석" 인천대학교, 공업개발연구소, 연구논문집, 제 10집, 제 1권.
5. 한국원자력안전기술원.(1994). 원전의 내진해석 기술개선에 관한 연구, KINS/GR-067, 별책2, 제3권
6. 한국원자력안전기술원(1997) 부분구조법에 의한 지반-구조물 시스템 내진해석 모델링방법 연구, KINS/HR-172