



원전구조물의 면진해석 및 설계기술 개발

이계희*, 김재민**, 이상훈***

(*목포해양대학교, **전남대학교, ***한국전력기술)

1. 머리말

경제발전이 어느 정도 이루어진 나라에서는 환경문제가 필연적으로 주목받게 된다. 우리나라도 마찬가지로 환경에 대한 관심이 지속적으로 증대되고 있고 이에 따라 온실가스나 지구온난화 등이 경제개발시 중요한 고려사항이 되고 있다. 이러한 연장선에서 현재 우리나라는 원자력 발전소 혹은 핵발전소라 불리는 발전시설(이하 원전)에 대한 사회적 논의가 진행중이고 국민들의 통합된 의견이 반영된 원전정책이 정립되리라 판단된다. 어떠한 방향으로 정책이 결정되든 엔지니어들은 원전의 총체적인 안전성을 증강시키는 고민과 노력을 계속하고 있다.

원전에 발생하는 최악의 사태는 일반적으로 melt down이라 불리는 노심용융사태이다. 이는 원자로에 장전된 핵연료의 핵분열에 대한 통제에 실패하여 연쇄반응이 발생하여 핵연료다발과 원자로가 열붕괴를 일으키는 현상을 의미한다. 일반적으로 1979년에 발생한 스리마일 섬의 사고와 1986년에 발생한 체르노빌사고, 최근 일본에서 발생한 후쿠시마원전의 사고가 가장 대표적인 사례로 알려지고 있다. 그러나 앞의 두 사고는 기본적으로 인적오류에 의한 사고인 것으로 판단되고 있어 자연재해인 지진에서 발생한 후쿠시마사고와는 차이를 보이고 있다.

원전의 안전성 확보에 가장 중요하게 고려되는 자연재해는 지진이다. 따라서 원전에 적용되는 지진하중의 고려는 지속적으로 강화되어 왔다. 지진하중이 커질수록 구조물의 강도를 증가시켜 이를 대비하는 것이 일반적이거나 이의 대비를 위한 비용은 기하급수적으로 증가하므로 구조물에 작용하는 지진하중을 획기적으로 줄이는 방안을 고려하게 되었다. 이런 방안의 하나는 원전의 기초에 면진장치를 설치하여 상부에 작용하는 하중을 줄이려는 시도이다. 이러한 면진장치를 설치한 원전은 프랑스의 경우, 80년대 초반 상용 원전구조물(남아프리카 공화국 Koeberg, 프랑스 Cruas)에 이미 적용 사례가 있다. 하지만 그 기술의 상세와 자료는 공개되지 않고 있다. 또한 원전 설계기술을 보유한 미국이나 일본 등에서도 원전구조물의 면진장치 도입에 관한 연구가 진행되었거나 활발히 진행중이며 현재 관련 규제시스템의 준비를 위하여 활발한 연구와 논의가 진행 중이다.

이러한 배경으로부터 국내에서도 원전면진장치에 대한 연구필요성이 꾸준히 제기되어왔다. 기술의 개발과 적용시점을 고려하고 국내의 지진환경을 고려할 때 수출형 원전에 적용하는 것을 우선 목표로 하여 2011년도부터 “수출형 원전구조물의 면진설계 실용화 요소기술 개발”이 진행 중이다. 이 과제에서는 다음과 같은 내용의 세

* E-mail : lghlsk@mmu.ac.kr / Tel : (061)240-7314

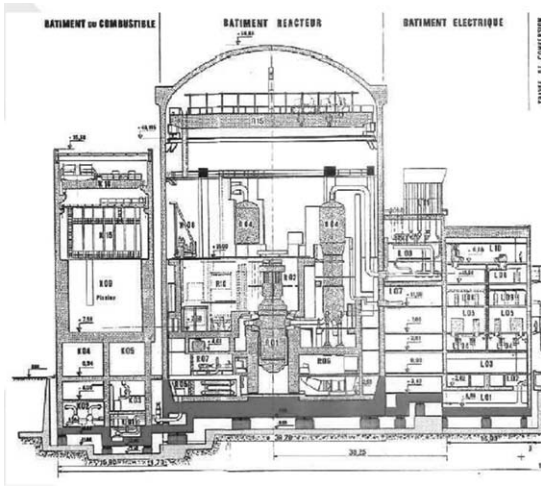


그림 1 프랑스 Cruas원전의 면진장치 설치도

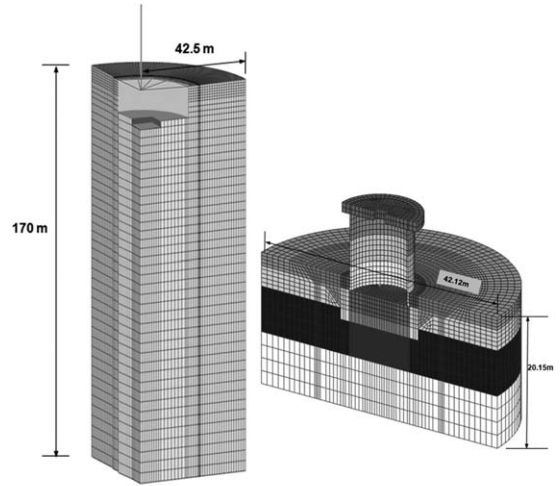
부과제를 포함하고 있다.

- 면진시스템 채택으로 원전구조물의 배치, 정적 및 동적 구조 특성 변화에 대한 해석 및 설계기술 개발
 - 수출형 원전의 면진설계에 적용할 기술기준 개발
 - 면진영향설비들에 대한 성능기준수립, 이론 및 실험을 통한 검증, 설치 이후 유지관리
 - 원전의 설계기준을 만족하는 면진장치 연구
- 이 글에서는 위의 연구과제중 제1세부과제에서 진행하고 있는 원전의 면진관련 해석 및 설계기술을 개발에 관한 간략한 소개를 하고자한다.

2. 지반구조물 상호작용 해석

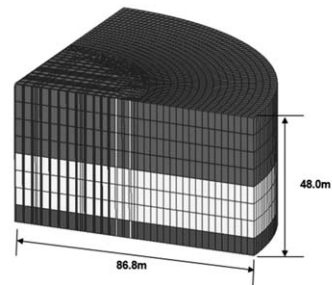
원전의 내진해석 및 설계는 반드시 지반에 대해서 고려하도록 관련 규제기준에 정의되어 있다. 특히 이러한 기준들은 원전의 안전성확보를 위해 보수성을 원칙으로 하고 있다. 즉 검증된 프로그램이나 방법이 아닌 새로운 방법을 도입하는 경우에는 이에 대한 검증이 엄격하게 수행되어야한다. 이러한 측면에서 우선 지반구조물상호작용해석용 프로그램에 대한 검증 및 성능개선연구가 이루어졌다.

현재 원전분야에서 검증된 지반구조물 상호작



(a) SMART 격납건물

(b) Hualien 격납건물



(c) 파일보강 원형기초

그림 2 KIESSI-3D의 적용예

용해석프로그램으로 대표적인 것은 1981년 미국 버클리대학의 연구팀이 개발한 SASSI프로그램이다. 유연체적법이라는 해석기법을 사용한 이 프로그램은 그동안 다양한 과제와 연구에서 오류를 수정하고 해석기법을 축척시켜왔다. 그러나 이미 개발된 지 30년 가까운 프로그램으로 해석의 효율성이나 확장성에 대한 고려가 크지 못한 것이 단점으로 여겨지고 있다. 이러한 단점은 기본적으로 현재까지의 지반구조물 상호작용해석프로그램이 해석법의 특징상 선형해석만 가능하다는 점에서 비선형성거동을 해석해야하는 면진해석에 적용하기에는 프로그램이 가진 단점이 문제가 된다. 이러한 점을 극복하고 해석기술의 국내자립을 위하여 또다른 대안이 KIESSI-3D해석 프로그램을 이용하여 검증된 지반구조

표 1 다중 CPU 사용에 따른 KIESSI-3D 해석시간 (해석 주파수 1개)

예제 구조물	절점 개수	해석시간(min)			1 core/4 cores	1 core/8 cores
		1 core	4 cores	8 cores		
SMART 격납건물	91,832	5.53	4.16	2.83	1.33	1.95
Huallien LSST	27283	0.53	0.40	0.29	1.33	1.83
파일보강 원형매트기초	23,076	0.52	0.35	0.28	1.49	1.86

물해석시스템을 구축하고자 하였다.

KIESSI-3D는 국내기술진들에 의하여 1990년 대부터 지속적으로 개발되고 있는 지반구조물 상호작용해석프로그램으로 동적무한요소를 이용하여 지반을 고려하고 상부의 구조물을 유한요소법을 이용하여 해석을 수행하는 프로그램이다. 다양한 요소군을 사용할 수 있고 여타프로그램에 비해 상대적으로 빠른 해석속도를 장점으로 가지고 있다.

기초적인 예제들에 대해서는 이미 검증이 완료되었고 다양한 분야와 대형해석모델에 대한 적용성 및 해석효율을 증가시키는 방향의 연구가 진행되고 있다. 특히 개선된 유한요소의 적용 및 검증이나 다중 CPU를 이용한 대형모델의 해석, 범용프로그램의 적용을 위한 전후처리의 개발 등을 통해 프로그램의 적용성을 높이고 있다.

이러한 대형 지반구조물 상호작용해석 모델의 예를 그림 2에서 볼 수 있다. 이들 해석모델에 대하여 다중 CPU를 이용하는 경우의 해석효율은 표 1에 나타난 바와 같다.

3. 원전구조의 면진해석

앞절에서 살펴본 KIESSI-3D는 다른 지반구조물 상호작용해석프로그램과 동일하게 기본적으로 선형해석프로그램이다. 면진구조의 해석을 위한 비선형해석에 이러한 선형해석프로그램을 적용하기 위해서는 필연적으로 비선형해석기능을 가지고 있는 해석프로그램을 사용하여야한다. 이 연구에서는 다음과 같은 2가지 방

식으로 비선형해석프로그램을 면진해석에 적용하였다.

- KIESSI-3D + 일반비선형해석프로그램
- 지반-구조물상호작용을 고려할 수 있는 비선형해석프로그램

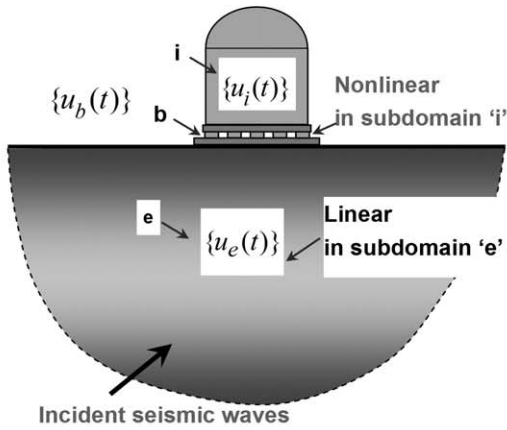
첫 번째 접근법을 사용하기 위해서는 KIESSI-3D가 가지고 있는 지반의 동적거동효과를 면진장치의 비선형거동을 나타낼 수 있는 해석프로그램에 전달하는 방안을 찾아야하고 두 번째 방법을 사용하기 위해서는 지반의 동적효과를 고려할 수 있는 프로그래를 찾고 이를 기존의 검증된 지반구조물상호작용해석프로그램과 교차검증하여야 한다. 이에 대한 내용을 다음 절에 기술하였다.

3.1 경계반력법

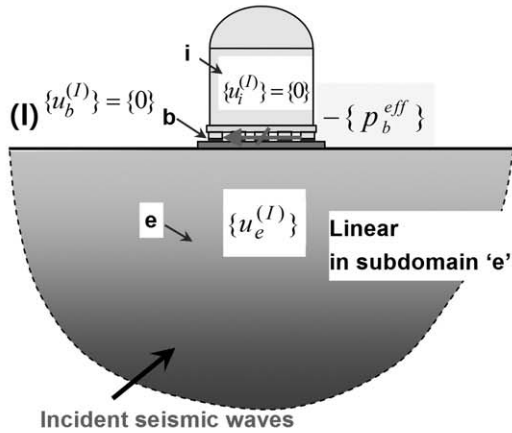
KIESSI에서 산정된 지반의 동적효과를 비선형해석프로그램에 도입하기 위해서 다음과 같은 과정을 거친다.

면진시스템을 포함한 지반구조물상호작용해석시스템은 지반의 외부에서 지진파가 입사되고, 선형으로 가정된 지반과 구조물 및 비선형지진격리받침으로 이루어진 문제로 나타낼 수 있다(그림 3). 이 비선형 지반구조물 상호작용해석 문제는 그림 3(b)와 같이 지진격리받침 하단을 고정시킨 부구조 I과 그림 3(c)와 같은 부구조 II로 분리할 수 있다. 이때 부구조 (I)은 선형 SSI 문제인 반면 부구조 II는 비선형문제임을 알 수 있다.

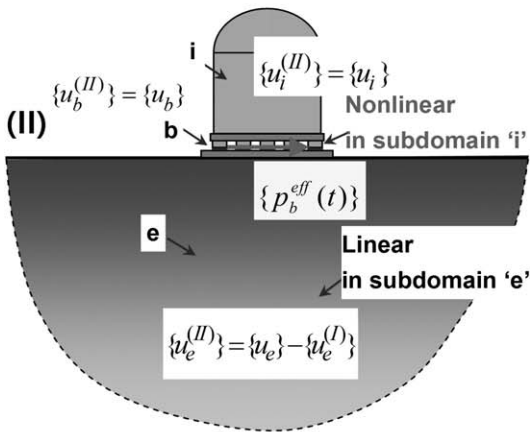
제안된 방법은 부구조 I에서 경계면 반력을 지반-구조물 상호작용해석프로그램을 이용하여



(a) Original nonlinear SSI problem

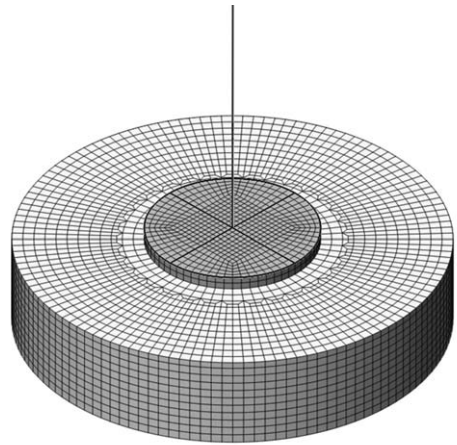


(b) Linear auxiliary problem

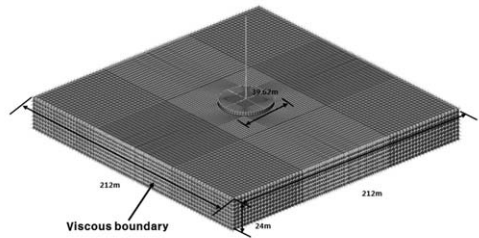


(c) Reduced radiation problem

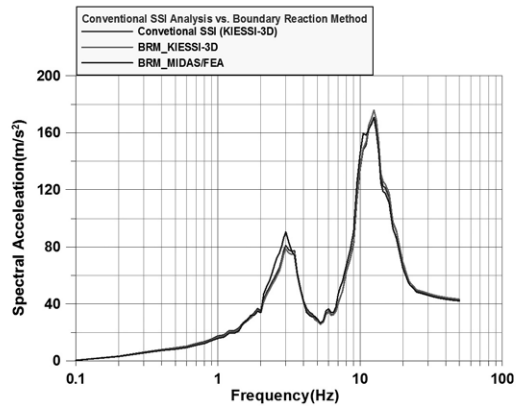
그림 3 경계반력법의 개요



(a) KIESSI-3D 모델



(b) MIDAS/FEA 모델



(c) 경계반력법에 의한 응답비교

그림 4 경계반력법의 검증

구하고, 부구조 II의 비선형 시간이력해석을 범용 유한요소해석 프로그램을 이용하는 방법이다. 이 방법은 경계반력법(boundary reaction method)로 명명되었다.

이 방법의 특징은 경계지점에서의 구한 반력을

임의의 비선형 구조해석프로그램에 대입할 수 있다는 점이다. 즉 지반의 영향을 고려해야하는 부분은 반력을 산정할 수 있는 전용프로그램에 맡기고 구조물의 비선형거동에 집중하여 해석을 수행할 수 있다. 다만 이 경우 방사방식을 나타낼 수 있도록 지반모델을 적절히 포함시켜야 한다.

개발된 방법을 검증하기 위하여 비선형구조해석이 가능한 프로그램에 KIESSI-3D에서 작성된 경계반력을 작용시키고 해석을 수행하였다(그림 4). 해석에 적용된 모델은 선형모델로서 개발된 방법의 검증을 위하여 해석을 수행하였고 검증완료하였다.

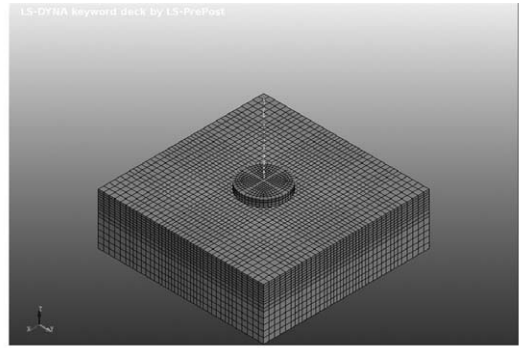
검증된 방법을 이용한 비선형면진해석은 현재 수행중이다.

3.2 Perfectly matched layer

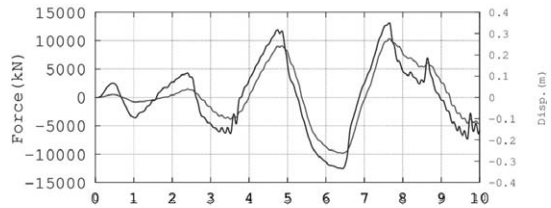
비선형 면진구조의 해석을 위한 다른 접근법은 실제 비선형해석프로그램을 이용하여 지반구조물 상호작용 해석의 전과정을 수행하는 것이다. 기존에도 여러 구조해석 프로그램을 이용한 비선형 지반 구조물 상호작용의 해석이 시도되었으나 전문적인 프로그램에 비하여 해석모델이 지나치게 커지고 또한 정확도도 떨어지는 결과를 보였다. 하지만 최근에 획기적으로 이러한 지반모델의 무한성을 표현할 수 있는 방법이 개발되어 적용되었다. 이 방법은 perfectly matched layer(이하 PML)이라는 접근법이다.

PML의 기본개념은 진동수 영역에서 좌표의 변환을 통해 무한영역을 근사하고 반사파를 제거하는 것이다. 이 과정에서 외부로 파동과 진동수에 대한 연속조건을 도입한다.

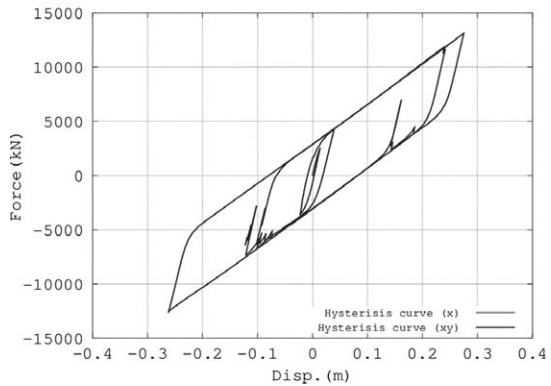
처음 PML방법이 사용된 것은 전자기파의 분야이다. 따라서 기본적인 해석기법이나 이론의 개발은 이 분야에서 이루어졌다. 이후 여러 연구자들에 의하여 이 방법을 탄성파에 적용하는 방법이 연구되었다. 그 결과 최근 PML요소를 양해법(explicit method)을 사용하는 구조해석프로그램에 적용하는 기법이 개발되었다. 이를 바탕으로



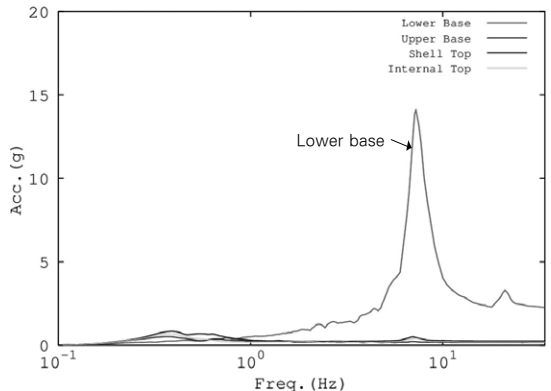
(a) 해석모델



(b) 면진장치의 변위와 부재력



(c) 면진장치의 이력곡선



(d) 구조물에서의 응답스펙트럼

그림 5 PML을 이용한 면진구조 해석

로 대표적인 양해법 해석프로그램인 LS-DYNA에서 PML 요소를 재료물성치로 고려하여 전달 경계로 사용할 수 있도록 하였다.

PML 해석기법을 이용한 SSI 해석은 아직도 개선중인 것으로 판단된다. 하지만 이 방법의 특성상 방사감쇠의 모사에 탁월하고 근역지반의 모델링 범위를 최소화할 수 있는 장점이 있어 이를 이용한 비선형면진해석에 사용성을 검토하였다.

대표적인 지반구조물 상호작용해석프로그램인 SASSI의 기본예제에 대한 비선형 해석의 예를 그림 5에 나타내었다. 이 해석모델은 근역지반을 일반적인 탄성요소로 모델링하고 원역을 PML요소의 층으로 모델링하여 무한지반을 효율적으로 나타내었다. 이 해석모델의 효율성은 그림 4(b)의 해석모델과 비교하면 알 수 있다. 두 해석모델에서 지반위에 설치된 상부구조물은 동일한 크기이다. 단 이 해석에 사용된 해석모델은 비선형요소를 포함하고 있다. 이때 면진장치는 LS-DYNA에서 제공하는 면진장치용 요소를 사용하여 모델링하였다. 기초지반에 입력된 지진에 대한 면진장치의 응답은 그림 5(b)에 나타내었다. 면진장치에 발생하는 변위와 부재력이 전반적으로는 유사하지만 세부적인 형상에 대해서는 약간 다른 것을 알 수 있다. 이와 같은 부재력과 변위의 불일치는 그림 5(c)와 같은 면진장치의 이력곡선으로 나타난다.

이러한 면진장치의 작용으로 구조물에 발생하는 응답은 크게 감소한다. 그림 5(d)에서는 구조물의 각 지점에서의 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 큰 값을 보이는 그래프(lower base)는 지반과 직접 연결된 기초의 응답이고 다른 그래

프는 면진장치의 상부에 위치한 구조물의 응답을 나타낸다.

위의 예제는 PML을 이용한 비선형 지반구조물 해석의 예를 보여주고 있지만 실제 이를 설계에 적용하려면 우선 위의 해석의 기본이 되는 선형모델의 검증이 선결조건이 된다. 이를 위하여 기존의 검증된 선형지반구조물 상호작용해석과의 교차검증이 반드시 필요하다. 이러한 교차검증과정에서 서로 다른 모델링개념, 지반 모델링 방법, 감쇠의 범위 등 수 많은 매개변수들에 대한 정확한 이해와 모델링 기법이 필요하다. 현재 이러한 문제들에 대한 해결이 이 해석법의 당면과제이다.

4. 맺음말

이 글에서는 원전의 면진장치를 채택한 원전의 해석 및 설계를 위한 연구과제의 내용과 현재까지의 진행사항을 간략히 소개하였다. 안전성의 확보를 위해 수많은 규제와 검토가 요구되는 분야의 특성상 전반적으로 보수적인 접근법이 채택되고 있다. 하지만 이러한 여건속에서도 한발 한발 소걸음을 하다보면 반드시 목적지에 도달할 것이다. 오늘도 자기분야에서 고민과 공리를 거듭하고 있는 많은 독자들도 같은 생각일 것이라고 믿는다. [KSNVE](#)

감사의 글

이 연구는 지식경제부 기술혁신사업 중 원자력 융합원천기술과제(2011151010010A)의 연구비 지원으로 수행하였습니다.