

# 지반의 비선형 특성이 차세대원전 구조물의 지진응답에 미치는 영향

## Effects of Soil Nonlinearity Characteristics on the Seismic Response of KNGR Structures

장영선\*  
Jang, Young-Sun

고광훈\*  
Koh, Kwang-Hoon

김태영\*\*  
Kim, Tae-Young

### ABSTRACT

The SSI(Soil-Structure Interaction) analyses are being performed for the KNGR(Korean Next Generation Reactor) design, because the KNGR is developed as a standard nuclear power plant concept enveloping various soil conditions. The SASSI program which adopts the flexible volume method is used for the SSI analyses. The soil curves, used in the three dimensional SSI analyses of KNGR Nuclear Island(NI) structures, are based on the upper bound shear modulus curve and lower bound damping degradation curve recommended by I.M. Idriss in 1990. To assess the effects of soil nonlinearity characteristics on SSI response, the average shear modulus curve with average damping curve was used for two soil cases. This study presents the results of the variances by using different soil nonlinearity parameters based on the parametric SSI analyses. The results include the maximum member forces (shear and axial force) at the base of the NI structures and the 5% damping Floor Response Spectra (FRS) at some representative locations at the top of the NI superstructures. They are also compared together with the enveloped SSI results for eight soil cases and fixed-base analysis for rock case by using two control motions.

### 1. 서론

차세대원전(Korean Next Generation Reactor : KNGR)은 표준발전소 설계개념으로 개발되고 있다. 즉, 차세대원전은 토사지반에서 견고한 암반까지의 다양한 부지조건을 만족하도록 표준설계로 개발되고 있는데, 표준설계란 발전소가 건설될 부지가 설계조건에 포괄되면 특정부지에 대한 재해석과 설계를 수행하지 않고 건설할 수 있는 설계를 의미한다. 따라서, KNGR 설계에서는 다양한 부지조건을 만족시키기 위해 암반 부지에 대한 고정기초해석과 아울러 8 개의 토사지반에 대한 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction : SSI) 해석을 수행하였다.

Seed와 Idriss(1970, 1984)가 연구한 바와 같이, 동적 하중을 받는 경우에 전단계수와 감쇠비는 변형률에 따라서 그 값이 변화하는 비선형 거동을 보이므로, SSI 해석 시에는 이를 고려하여 해석하여야 보다 정확한 지진해석이 가능하다. 지반종류에 따라 비선형 곡선들은 그림 1, 그림 2에 보인바와 같이 상한값과 하한값 사이의 범위 내에 존재한다. KNGR 지진해석에서는 상한값의 전단계수곡선과 하한값의 감쇠비곡선을 사용하였다.

\* 한국전력기술(주) 책임기술원, 정회원

\*\* 한국전력기술(주) 주임기술원, 정회원

본 연구에서는 KNGR 구조물을 대상으로 지반의 비선형 특성이 구조물의 동적 거동에 미치는 변화를 정량적으로 평가하기 위하여 매개변수연구를 수행하였다. 이를 위해 전단계수곡선과 감쇠비곡선의 상하한 범위 중 평균에 해당되는 곡선(Seed & Idriss(Average))을 사용하는 해석을 수행하고, 1990년에 Idriss가 제안한 전단계수곡선의 상한값과 감쇠비곡선의 하한값을 사용하여 해석하고 포괄화한 KNGR의 응답과 비교하여 내진해석 및 포괄설계에 지반의 비선형성 차이가 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다. SSI 해석을 위한 프로그램으로는 2차원 및 3차원 공간에서 유한요소방법과 진동수영역의 복소응답해석방법을 채택한 SASSI(System for Analysis of Soil-Structure Interaction)를 이용하였다.

## 2. 차세대원전의 내진해석과 설계

### 2.1 부지조건

차세대원전의 잠재적인 건설예정부지는 견고한 암반 또는 토사의 깊이가 최대 200ft 이하인 지반을 갖는 것으로 가정하였고, 이러한 부지에 대하여 암반 위에 놓이는 지층의 두께에 따라서 토사지반은 크게 3 가지로 구분하였으며(그림 3), 토사지반은 전단파속도 분포 등을 고려하여 표 1과 같이 8 가지로 재분류하였다. 그림 3에서 부지조건 A는 원자력 구조물(Nuclear Island : NI)의 매립 깊이에 해당하는 지표면 아래 53ft에 암반이 존재하는 경우이고, 부지조건 B는 지표면 아래 100ft, 부지조건 C는 지표면 아래 200ft에 각각 암반이 존재하는 경우이다. 지표면에서의 토사지반의 최소 전단파속도는 1000ft/sec이고, 암반과 만나는 위치에서는 1300ft/sec이며, 표1에 나타난 바와 같이 깊이에 따른 전단파속도의 변화는 포물선분포를 이루는 것으로 가정하였다.

### 2.2 입력지진동

설계를 위한 입력지진동은 그림 4에 보인 바와 같은 응답스펙트럼을 갖는 서로 다른 2개의 인공가속도 시간이력을 사용하였는데, 그 중 하나는 CMS1으로 미국 원자력규제위원회 규제지침(Regulatory Guide) 1.60에 제시된 설계지반응답스펙트럼(Design Ground Response Spectrum : DGRS)과 동일하며, 다른 하나는 CMS3로 NUREG/CR-0098에서 제시된 지반응답스펙트럼이다.

### 2.3 상부구조물 모델링

차세대원전(Nuclear Island : NI) 구조물의 배치는 그림 5에 보인 바와 같으며, NI 구조물은 다음과 같이 구성되어있다.

- 외부 격납건물을 포함한 보조건물
- 내부 격납건물
- 원자로 냉각재 계통을 포함한 격납건물 내부구조물

NI 구조물의 콘크리트 기초 두께는 10ft이며(Top Elevation 55ft), 크기는 367ft X 296ft이고, 지표면 아래로 매립된 깊이는 53ft 8in이다.

그림 6에 나타난 바와 같이 각각의 구조물에 대하여 집중질량을 갖는 보 요소를 이용하여 3 차원 보 요소 모델을 구성하였으며, 보조건물의 경우 4개의 구역으로 나누어 보 요소 모델을 구성하였다.

내부 격납건물과 노심냉각계통을 포함한 격납건물 내부구조물도 보 요소 모델로 변환시켜서 전체 NI 구조물의 모델에 포함시켰다. 이렇게 구성된 3 차원 보 요소 모델은 3 차원 유한요소모델의 고유치 해석 결과와의 튜닝 과정을 거쳐 동적 특성을 일치시키는 작업을 수행하였다.

### 2.4 자유장 해석

자유장 해석에는 SHAKE가 이용되었는데, 암반 노두(Rock Outcrop)에 CMS3의 수평 2 성분(H1, H2)을 동서방향(EW)과 남북방향(NS)으로 입력하였다. 전단계수와 감쇠비는 저변형을 부분에 해당하는 지반 특성값을 초기값으로 입력하였으며, 비선형 전단계수곡선은 상한값을 비선형 감쇠비곡선은 하한값을 적용하였고, 단일의 자유장 해석 결과를 SSI 해석에 적용하기 위해서 두 수평방향의 자유장 해석 결과를 평균하였다. 비선형 지반특성을 이용한 최종 자유장 해석도 수평 두 방향에 대하여 각각 수행

하였는데, 이 최종 자유장 해석의 목적은 입력 지진동에 의한 세 방향 성분의 부지응답 시간이력을 계산하는 것이며, 이 응답 결과는 SSI 해석에 입력으로 사용된다.

## 2.5 차세대원전의 SSI 해석 방법

### 1) 전산프로그램 SASSI

SSI 해석용 전산프로그램 SASSI는 진동수영역에서 유한요소방법과 복소응답해석방법을 이용하는 부분구조법을 채택한 프로그램이다. 경험에 비추어보면 차세대원전과 같이 매립된 부분이 클 때는 일반적인 SASSI 프로그램의 방법론을 따라서 해석하자면 몇 가지 문제점이 발생한다. 즉, 매립된 부분이 관심 진동수영역에서 충분히 해석될 수 있도록 작게 모델링하다보면 Interaction 절점의 수가 너무 많아져서 해석에 너무 많은 시간이 걸리거나, 해석이 불가능한 경우도 발생할 수 있다.

### 2) 임피던스 함수 계산

위에서 언급한 것과 같은 SASSI 사용시의 제약점을 극복하기 위해서 기초가 상대적으로 강성이 크기 때문에 강체로 간주할 수 있다는 가정하에 계산시간을 획기적으로 줄일 수 있는 방법이 모색되어, 기초가 강체로 거동한다는 가정을 이용하여 SASSI의 새로운 모듈인 RIMP가 개발되었다(DE&S, 1997). RIMP 모듈은 진동수영역에서 임의의 형상을 갖는 단일 강체기초에 대한 임피던스 함수를 계산할 수 있다.

본 해석에서는 기초를 강체로 가정하였고, 따라서 모든 Interaction 절점에서의 전체 유연도행렬이 한 점에서의 유연도행렬로 치환될 수 있게 되고 이때의 치환된 유연도행렬은 기초의 형상에 지배된다. 여기서 기초의 강성은 애초에 강체운동으로 가정했기 때문에 산정할 필요가 없어진다. 임피던스 행렬을 계산하기 위해서 한 점(기초의 중심)에서 크기 6 X 6인 유연도행렬의 역행렬을 계산해야 한다.

### 3) Scattering 해석

지반에서의 입력지진동에 의한 지표면의 거동이 발산행렬을 계산할 때 필요하다. 그러나 RIMP 모듈은 임피던스 함수를 계산하면서 이러한 발산행렬은 계산하지 못한다. RIMP 모듈은 모든 방향에 대해서 발산행렬은 1로 일정하다고 가정한다. 이는 지표면에서의 입력이나 기초면에서의 거동이 동일하다는 것을 뜻한다. 하지만 차세대원전 구조물처럼 53ft 정도 매립되어 있는 경우에는 이러한 가정 때문에 해석결과는 실제와 많은 차이를 보이게 된다. 지반에 매립된 부분 때문에 기초에서의 거동은 지표면에서의 입력보다 작아질 것이다. 따라서 지표면에서의 입력 지진동에 의한 기초면에서의 거동과 밀접한 관련이 있는 발산행렬을 기초의 2차원 해석을 통하여 계산할 수 있다.

2차원 해석결과를 조합하여 3차원 해석을 위한 6 X 3의 발산행렬을 유도할 수 있는데, 이때 발산행렬은 상부구조물과 기초가 만나는 곳에서 관심 진동수영역대에서의 값을 갖는 형태이다.

### 4) 전달함수의 계산

구조물 내의 주요 지점에서의 전달함수는 임피던스 함수와 발산행렬이 계산된 이후에 계산되어진다. SSI 해석이 진동수영역에서 이루어지기 때문에 전달함수는 지정된 최대진동수 영역 내에서만 계산되어진다. 이 최대진동수는 Cutoff 진동수라 불리며, 지반요소의 크기, 지층의 두께, 그리고 지층의 특성에 따라 달라진다.

### 5) 응답 계산

전달함수를 구한 이후에 구조물의 주어진 위치에서 가속도응답시간이력을 계산하는데, 특정 진동수와 감쇠비에 대한 응답의 조합으로 계산한다.

## 2.6 확장 층 응답스펙트럼

모든 SSI 해석에 대하여 구조물의 층 응답스펙트럼(Floor Response Spectrum : FRS)을 계산하게 되는데, 차세대원전의 표준설계를 위해서 이들 FRS는 고정지반 해석결과를 포함하여 포괄곡선을 구하고, 각각의 Peak 성분들에 대하여 15% 확장한 최종결과를 계산한다.

## 2.7 설계변수

설계를 위하여 고정지반 해석결과를 포함하여 모든 SSI 해석결과를 포괄한 최종결과로부터 구조물의 전단력, 축력, 모멘트와 영주기가속도(Zero Period Acceleration : ZPA)를 계산하게 된다. 모든 해석결과는 포괄시켜서 표나 그림 등으로 작성되어 설계에 쉽게 적용할 수 있도록 정리된다.

### 3. 매개변수 해석

#### 3.1 부지조건

본 연구는 KNGR에 적용한 비선형 전단계수곡선의 상한값과 감쇠비곡선의 하한값 대신에 평균값을 사용하여 해석을 수행하였다. 지반조건으로는 8개의 토사지반 중 2개의 경우(A1과 B2)를 선택하였다.

#### 3.2 입력지진동 및 자유장 해석

입력지진동으로는 CMS1은 지표면에, CMS3는 자유장 해석 결과 얻은 지표면에서의 응답을 적용하였다. 자유장해석 시 비선형 전단계수곡선과 감쇠비곡선은 평균값을 적용하였다.

#### 3.3 SSI 해석

SSI 해석은 2장에서 설명한 절차를 그대로 따랐으며, 매개변수해석을 위하여 지반 특성만 바꾸었다.

#### 3.4 해석 결과

매개변수 해석의 목적은 A1과 B2 경우의 지반에 대하여 평균의 비선형 전단계수곡선과 감쇠비곡선을 적용한 해석 결과와 내진설계를 위해 수행한 지진해석 결과와의 비교에 있었기 때문에 응답을 대표적으로 보여줄 수 있는 다음과 같은 위치에서 구조응답을 비교해 보았다.

- 보조건물, 내부 격납건물 기초면에서의 부재력 : 전단력과 축력
- 보조건물 지붕, 외부 격납건물 돔 정점, 내부 격납건물 돔 정점 : 5% FRS

해석 결과의 비교는 Peak를 15% 확장한 FRS와 최대 부재력을 비교하였다. 표 2에서 보면 본 연구에서 해석을 수행한 A1과 B2 경우의 결과는 설계에 이용된 부재력보다 모두 작음을 알 수 있다.

그림 7 ~ 그림 14는 입력 지진동 CMS1과 CMS3에 대하여 네 군데에서의 5% 감쇠비를 갖는 세 방향 FRS를 보여주고 있다. 그림의 범례에서 'Idriss(1990)/A1/CMS1'은 A1 Case에 대하여 1990년 Idriss에 의해 제안된 상한의 비선형 전단계수곡선과 하한의 감쇠비곡선, 입력 지진동 CMS1을 사용하여 해석한 결과의 FRS임을 뜻한다. 한편 'Seed-Idiss(ave.)/B2/CMS3'는 B2 Case에 대하여 Seed와 Idriss에 의해서 제시된 평균의 비선형 전단계수곡선과 감쇠비곡선, 입력 지진동 CMS3를 사용하여 해석한 결과임을 뜻한다. 전반적으로 평균의 비선형 전단계수곡선과 감쇠비곡선을 사용한 해석 결과는 설계에 사용된 포괄 FRS범위내에 들어왔다. 또한 상한의 전단계수곡선과 하한의 감쇠비곡선을 사용한 경우에 비해 평균값의 곡선들을 사용하는 경우, 최대가속도의 크기가 거의 같거나 최대 45%까지 감소하고, 최대가속도가 발생하는 진동수는 대부분 낮은 쪽으로 이동하였다.

Seed-Idiss의 평균 곡선들을 사용시 최대가속도 크기가 대부분 감소한 것은 Seed-Idiss의 평균 감쇠비곡선을 사용하면 하한의 감쇠비 곡선을 사용한 경우보다 지반의 감쇠비가 증가하게 되고, 이는 또한 지반-구조물 상호작용시스템의 감쇠비 증가로 이어져 응답크기가 감소되었기 때문인 것으로 판단된다. 평균 곡선들을 사용시 최대가속도 발생위치의 진동수가 대부분 감소한 것은 Seed-Idiss의 평균 전단계수 곡선을 사용하면 상한의 전단계수 곡선을 사용한 경우보다 지반의 전단계수가 감소하게 되고, 이에 따라 지반-구조물 상호작용시스템의 강성이 낮아지고, 고유진동수는 감소하기 때문으로 판단된다.

다만 그림 10에서와 같이 내부격납건물의 NS방향 응답에서 최대가속도의 값이 2%정도 증가하였으나, 이는 설계에는 영향을 미치지 않는다. 그러나 입력 지진동의 진동수 성분과 전달함수의 공진 가능성 여부에 대한 추가검토가 요구된다.

앞에서 검토한 바와 같이 지반의 비선형 특성이 원전구조물의 응답특성에 미치는 영향이 크므로, 지반의 비선형 특성을 정확하게 파악하여 지진해석을 하지 않으면, 실제 거동과 동떨어진 설계가 되며,

적당히 Seed-Idriss의 평균 곡선들을 사용하여 지진해석하는 경우에는 FRS의 최대응답이 감소될 수 있고, 특히 기기에 대해서는 과소설계를 유발할 수 있다. 따라서 지반-구조물 상호작용해석 시에는 비선형 지반특성을 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다.

**4. 결론**

포괄부지개념에 입각하여 내진설계된 차세대원전에 대하여 지반의 비선형 특성에 의한 지진해석의 불확실성을 검증하고자, 비선형 지반특성의 변화가 지진응답에 미치는 영향을 검토하였다. 지반조건은 A1 과 B2의 경우로 하였으며, 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 비교 대상은 NI 구조물의 부재력과 FRS이며, 설계에 사용된 값이 지반의 비선형 특성 변화에 의한 결과를 거의 포괄하였다. 따라서 차세대원전은 포괄부지개념이 적절하게 적용된 경우로 볼 수 있다.
- Seed-Idriss의 비선형 지반특성 곡선중 상한의 전단계수곡선과 하한의 감쇠비곡선을 사용한 경우에 비해 평균 곡선들을 사용한 경우, 대부분 최대가속도의 크기가 같거나 최대 45% 감소하고, 최대가속도가 발생하는 진동수는 낮은 쪽으로 이동하였다. 이는 지반의 비선형특성을 지진해석에 정확히 반영하지 않을 경우, 과대 또는 과소 설계가 될 수 있음을 의미한다.
- 평균 곡선들을 사용시 최대가속도 크기가 대부분 감소한 것은 평균 감쇠비 곡선을 사용시 하한의 감쇠비 곡선을 사용한 경우보다 지반의 감쇠비가 증가하게 되어, 응답크기가 감소되었기 때문인 것으로 판단된다. 평균 곡선들을 사용시 최대가속도 발생위치의 진동수가 대부분 감소한 것은 Seed-Idriss의 평균 전단계수 곡선을 사용하면 상한의 전단계수 곡선을 사용한 경우보다 지반의 전단계수가 감소하게 되고, 이에 따라 지반-구조물 상호작용시스템의 강성은 낮아지고, 고유진동수는 낮아지기 때문으로 판단된다.

**REFERENCES**

1. Seed, H.B. and Idriss, I. M.(1970), "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses", Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.
2. Seed, H.B., Wong, R.T., Idriss, I. M. and Tokimatsu, K.(1984), "Moduli and Damping Factors for Dynamic Analysis of Cohesionless Soils", Report No. UCB/EERC 84-14, University of California, Berkeley.
3. Idriss, I.M.(1990), "Response of Soft Soil Sites during Earthquakes", H. Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings.
4. DE&S(1997), "SASSI (System for Analysis of Soil-Structure Interaction) User's Manual", Version 4.1, San Ramon, USA.

표 1. 지반분류에 따른 깊이별 초기 전단파속도 분포

Depth	Soil Case	Soil Case	Soil Case	Soil Case	Soil Case	Soil Case	Soil Case	Soil Case
Below	A-1	B-1	B-2	B-3	B-4	C-1	C-2	C-3
Surface								
0 ft	1800	1000	1400	1800	1000	1000	1800	1000
to	to	to	to	to	to	to	to	to
53 ft	2200	1234	1712	2267	1200	1276	2260	1220
	ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec
53 ft		1234	1712	2267	2200	1276	2260	1220
to	Rock	to	to	to	to	to	to	to
100 ft		1300	1800	2400	2400	1450	2550	1300
		ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec	ft/sec
100 ft						1450	2550	2600
to	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	to	to	to
200 ft						1600	2800	2800
						ft/sec	ft/sec	ft/sec
200 ft								
and	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock	Rock
Greater								

주 :  
 (1) 깊이에 따른 전단파속도의 변화는 포물선 분포를 갖는 것으로 가정.  
 (2) 암반의 전단파속도는 5000 ft/sec로 가정.

표 2. 기초면에서의 부재력 비교

(a) 보조건물

	CMS1			CMS3		
	축력 P1 (kip)	전단력(EW) P2 (kip)	전단력(NS) P3 (kip)	축력 P1 (kip)	전단력(EW) P2 (kip)	전단력(NS) P3 (kip)
설계에 이용된 포괄 결과	2.48E5	3.36E5	3.92E5	2.48E5	3.36E5	3.92E5
Case A1 Seed-Idriss(ave)	2.30E5	2.39E5	2.61E5	1.71E5	2.67E5	2.94E5
Case B2 Seed-Idriss(ave)	2.10E5	2.01E5	2.35E5	1.39E5	2.21E5	2.77E5

(b) 내부 격납건물

	CMS1			CMS3		
	축력 P1 (kip)	전단력(EW) P2 (kip)	전단력(NS) P3 (kip)	축력 P1 (kip)	전단력(EW) P2 (kip)	전단력(NS) P3 (kip)
설계에 이용된 포괄 결과	4.70E4	6.91E4	6.69E4	4.70E4	6.91E4	6.69E4
Case A1 Seed-Idriss(ave)	4.55E4	5.29E4	5.88E4	3.65E4	5.12E4	5.18E4
Case B2 Seed-Idriss(ave)	2.38E4	2.93E4	3.81E4	1.32E4	3.69E4	4.05E4

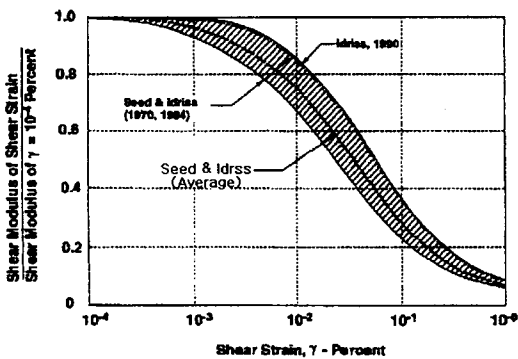


그림 1. 비선형 변형률-전단계수 관계곡선

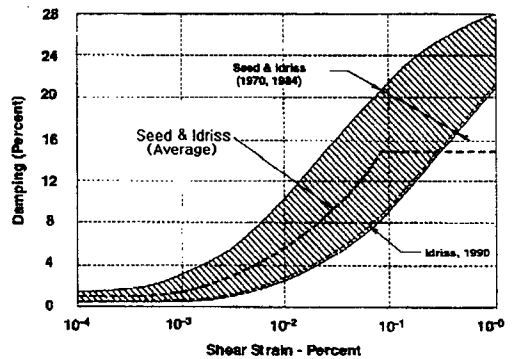


그림 2. 비선형 변형률-감쇠비 관계곡선

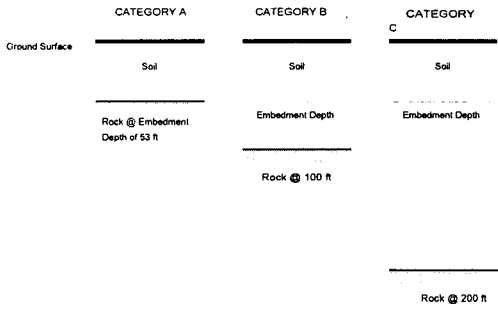


그림 3. 암반 깊이에 따른 지반 분류

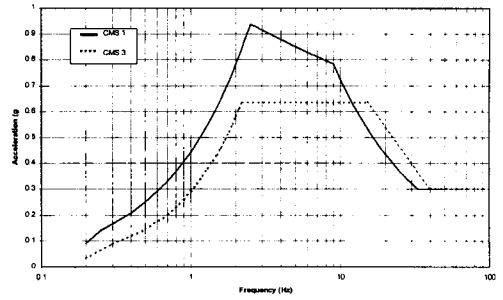


그림 4. 설계지반 응답스펙트럼

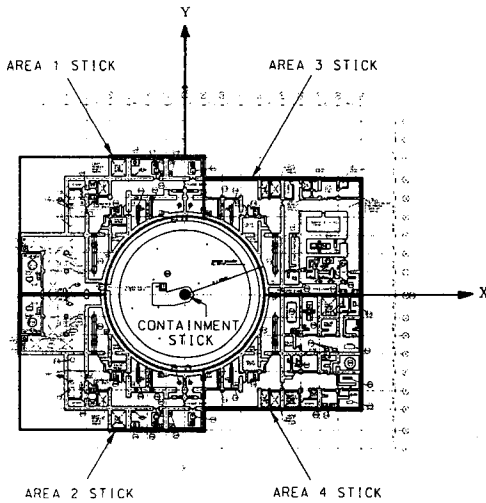


그림 5. KNGR NI 구조물의 평면도

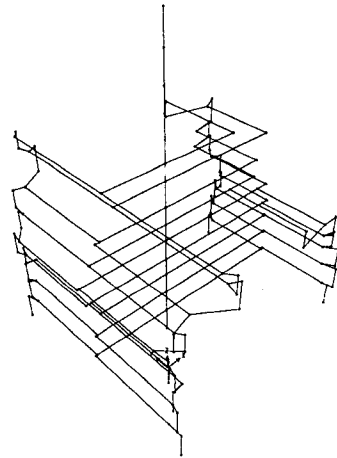


그림 6. Beam Stick Model

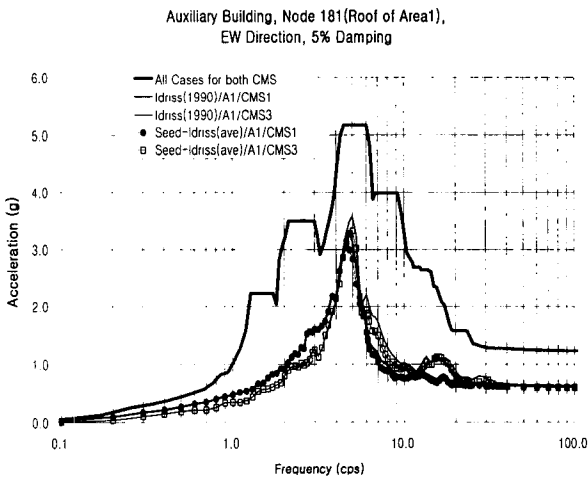


그림 7. 보조건물의 응답비교(Case A1, EW)

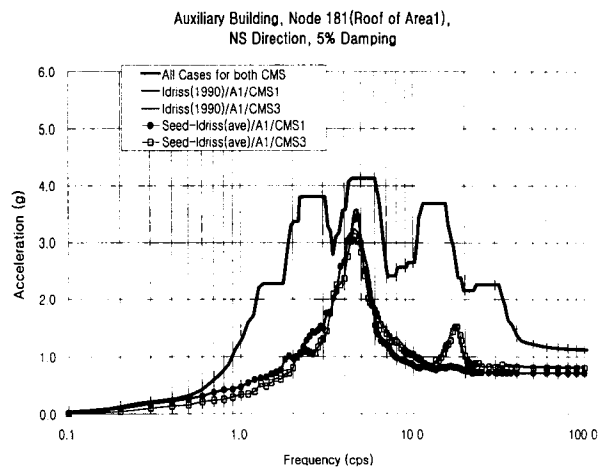


그림 8. 보조건물의 응답비교(Case A1, NS)

Inner Containment, Node 715(Top of Dome),  
EW Direction, 5% Damping

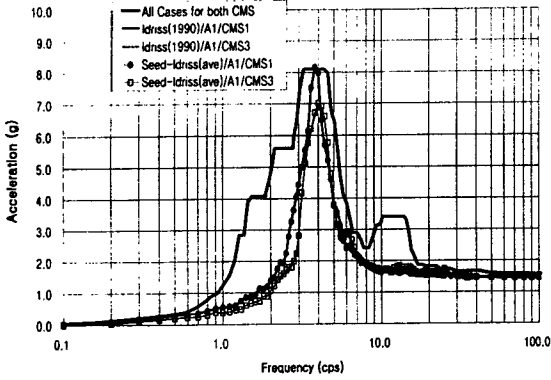


그림 9. 내부격납건물의 응답비교(Case A1, EW)

Inner Containment, Node 715(Top of Dome),  
NS Direction, 5% Damping

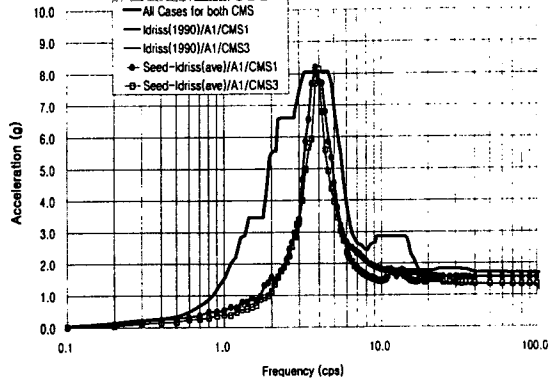


그림 10. 내부격납건물의 응답비교(Case A1, NS)

Auxiliary Building, Node 181(Roof of Area1),  
EW Direction, 5% Damping

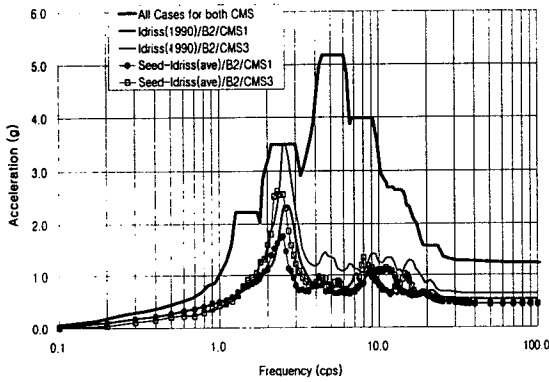


그림 11. 보조건물의 응답비교(Case B2, EW)

Auxiliary Building, Node 181(Roof of Area1),  
NS Direction, 5% Damping

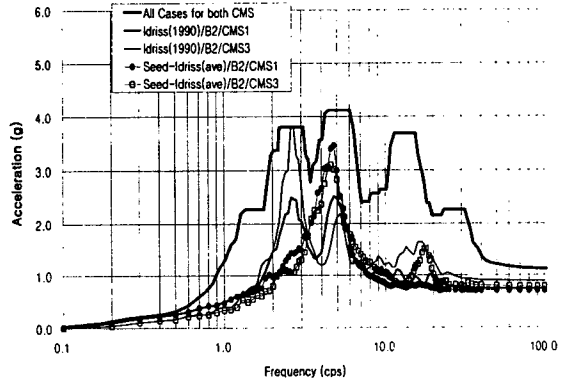


그림 12. 보조건물의 응답비교(Case B2, NS)

Inner Containment, Node 715(Top of Dome),  
EW Direction, 5% Damping

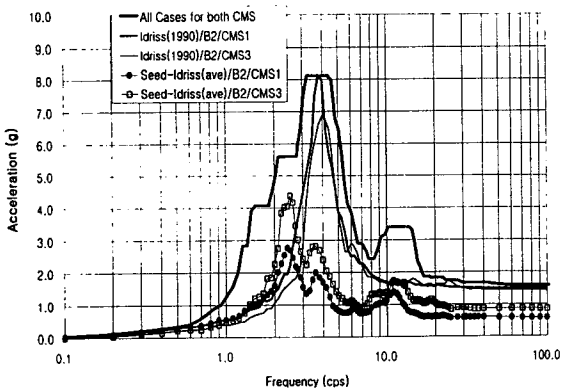


그림 13. 내부격납건물의 응답비교(Case B2, EW)

Inner Containment, Node 715(Top of Dome),  
NS Direction, 5% Damping

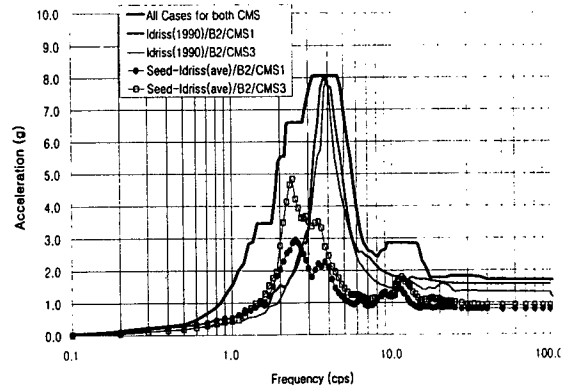


그림 14. 내부격납건물의 응답비교(Case B2, NS)