

## 대만 화련 대형 내진시험모델의 지반-구조물 상호작용해석

### Soil-Structure Interaction Analysis of Large Scale Seismic Test Model at Hualien in Taiwan

장정범, 서용표, 이종립

한국전력공사 전력연구원  
대전광역시 유성구 문지동 103-16

#### 요 약

원전 건설부지의 확보가 어려워짐에 따라 점차 원전은 견고한 지반이나 암반이 아닌 유연한 지반상에 건설될 가능성이 높아지고 있다. 이러한 경우, 암반상에 건설된 구조물과는 달리 유연한 지반위에 놓인 구조물의 동적 응답특성은 지반과 구조물의 상호작용에 의해 크게 영향을 받게 된다. 그러므로, 유연한 지반상의 원전 구조물 및 관련 기기계통 설비의 합리적인 내진설계를 위해서는 지반 - 구조물의 상호작용을 고려한 내진해석기술의 향상이 필수적이라고 할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 지반 - 구조물 상호작용해석 프로그램 중 가장 널리 사용되고 있는 SASSI 에 대하여 대만 화련 국제 공동연구에서 계측된 지진응답자료와 수치해석결과와의 비교를 통하여 그 신뢰성을 검증하였다. 본 연구결과, 수치해석결과가 첨두 가속도응답 크기 및 기본진동수의 예측에 있어서 지진응답 계측결과와 거의 일치하는 결과를 보여주고 있어 본 연구에서 사용한 SASSI 프로그램의 신뢰성 및 유용성을 확인할 수 있었다.

#### Abstract

The issue of SSI in seismic analysis and design of NPPs is getting more important, as it may be inevitable to build NPPs at sites with soft foundation due to ever-increasing difficulty in acquiring new construction sites for NPPs. And, the improvement of seismic analysis technique including soil - structure interaction analysis is essential to achieve reasonable seismic design for structures and equipments, etc. of NPPs.

Therefore, among the existing SSI analysis programs, the most prevalent SASSI is verified through the comparison numerical analysis results with recorded response results of Hualien project in this study. As a result, SASSI accurately estimated the recorded response results for the fundamental frequency and peak acceleration of structure and was proved to be reliable and useful for the seismic analysis and design of NPPs.

## 1. 서론

원전 건설부지의 확보가 어려워짐에 따라 점차 원전은 견고한 지반이나 암반이 아닌 유연한 지반상에 건설될 가능성이 높아지고 있다. 이러한 경우, 암반상에 건설된 구조물과는 달리 유연한 지반위에 놓인 구조물의 동적 응답특성은 지반과 구조물의 상호작용에 의해 크게 영향을 받게 된다. 유연한 지반상의 원전 구조물 및 관련 기기계통 설비의 합리적인 내진설계를 위해서는 지반 - 구조물의 상호작용을 고려한 내진해석기술의 향상이 필수적이라고 할 수 있다. 이를 위해서는 지반 - 구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 해석방법의 개선과 이의 불확실성 및 제약성을 정량화할 수 있는 기술적인 자료의 제공이 우선되어야 한다.

따라서, 한국전력공사에서는 1988년부터 착수된 국제 공동연구인 “대만 화련 대형 내진모델 시험”에 1991년 8월부터 참가하여, 원자로 건물과 유체저장탱크 축소모델의 설계 및 건설, 부지의 지반조사, 지진계측시스템 설치, 강제가진시험과 실제 지진발생시 지반-구조물 상호작용 해석, 내진해석 절차서 작성 등의 업무를 각국의 참가기관과 함께 분담하여 수행하였다. 대만의 화련지방은 MM 진도 5 이하의 지진이 자주 발생하는 곳으로, MM 진도 7 이상의 강진도 일년에 1회 정도의 확률로 발생하고 있는 세계적인 지진다발지역 중의 하나이며, 연구수행을 위해 100만 kW 급 원자로건물의 1/4 축소모델 ( 직경 10.5 m, 높이 16.1 m ) 과 유체저장탱크의 1/2 축소모델 ( 직경 7 m, 높이 8.6 m ) 이 건설되었다. 또한, 지반 - 구조물 상호작용 해석기법을 개선하고, 기존의 전산 프로그램들을 검증하기 위하여, 1993년부터 발생지진에 대한 계측을 시작하여 현재까지 총 5,600여개의 지진응답자료 Database 를 구축하였다.

그러나, 지반 - 구조물 상호작용 해석절차 및 이론은 많은 발전을 하여 현재 다양한 해석기법 및 관련 전산프로그램이 사용가능하게 되었음에도 불구하고 각각의 해석기법들은 서로 다른 가정사항 및 제한성을 지니고 있기 때문에 동일한 문제에 대하여도 현저히 다른 결과를 나타낸다. 이미 개발된 SASSI, FLUSH/ALUSH, HASSI 등과 같은 전산프로그램도 복잡한 지반조건의 모델링, 입력조건의 산정 등의 문제로 인하여 사용자에게 따라 일관되지 않은 결과를 주고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 지반 - 구조물 상호작용해석 프로그램 중 가장 널리 사용되고 있는 SASSI 에 대하여 대만 화련 국제 공동연구에서 계측된 지진응답자료와 수치해석결과와의 비교분석을 통하여 그 신뢰성 및 유용성을 검증하고자 한다.

## 2. SASSI

유연체적 부분구조법을 채택하고 있는 지반 - 구조물 상호작용해석 프로그램 SASSI 는 2 차원 및 3 차원 기초 - 구조물 시스템의 동적응답을 평가할 수 있는 프로그램으로서 선형 유한요소로 모델링하여 주파수영역에서 해석할 수 있으며, 기초부분은 균질한 반무한 탄성체 위에 놓여있는 수평지층 및 탄성, 점탄성 지반시스템으로 가정한다. 지반의 동적계수는 주파수 독립인 히스테리시스 감쇠를 적용한 복소계수를 사용하여 모델링한다. 지표면 상에 지지되거나 묻힌기초로 된 구조물은 절점에서 상호 연결된 2 차원 및 3 차원 유한요소로 모델링한다. 또한, SASSI 를 이용하여 외부 동적하중과 경사각을 가지고 있는 실체파 및 표면파로 구성된 지진력을 받는 구조물에 대해 지반 - 구조물 상호작용해석을 수행할 수 있다.

SASSI 는 전체 8 개의 모듈이 독립적으로 실행되도록 구성되어 있어 입력변수, 즉 입력지진

조건, 외부하중 조건 및 구조물 특성 등과 같은 입력 매개변수의 일부가 변화할 때 프로그램의 제한된 부분만 실행할 수 있도록 되어 있다. 계산결과는 변환함수, 가속도, 속도 및 변위 응답스펙트럼, 구조물과 지반의 내부응력 및 변형률 등으로 출력된다.

유연체적 부분구조법에서 구조물과 기초는 그림 1 과 같이 분리된다. 이 분리에서 구조물은 상부구조물과 지하 지반에 묻힌 구조물부분에서 굴착된 지반을 제외한 지하구조물로 구성되며 지반은 굴착이 이루어지지 않은 원지반으로 구성된다. 구조물과 지반의 상호작용은 모든 지하 기초절점에서 일어난다. 이 때의 운동방정식은 다음과 같다.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{Q_b\} \quad (1)$$

여기서,  $[M]$  과  $[K]$  는 각각 전체 질량행렬과 강성행렬이며,  $\{u\}$  는 절점변위,  $\{Q_b\}$  는 외력이다. 진동원은 구성모델의 바깥쪽이므로  $\{Q_b\}$  는 구조물에서 아주 멀리 떨어져 있다고 가정하는 경계절점의 자유도에서만 0 이 아닌 값을 가진다.

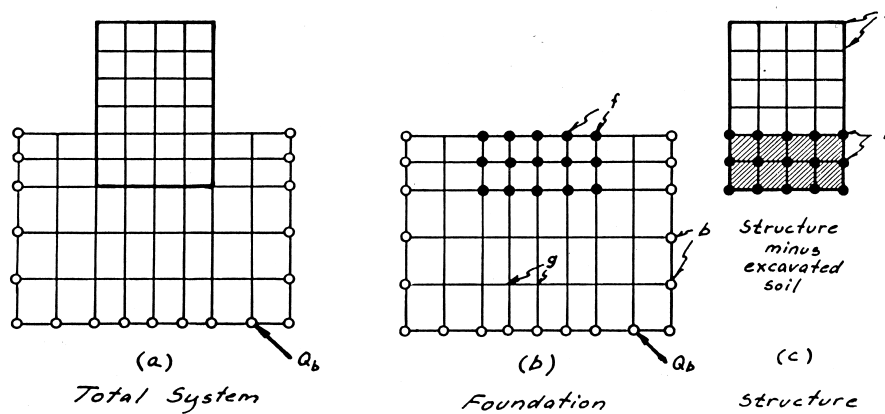


그림 1. 부분구조법에 의한 지반 - 구조물 상호작용모델

주파수가  $w$  인 조화진동의 하중과 변위벡터는 다음과 같다.

$$\{Q_b\} = \{Q_b\}e^{iwt} \quad (2)$$

$$\{u\} = \{u\}e^{iwt} \quad (3)$$

여기서,  $\{Q_b\}$  와  $\{u\}$  는 복소외력과 변위진폭을 나타낸다. 그러므로 각 주파수에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$[C]\{u\} = \{Q_b\} \quad (4)$$

여기서,  $[C]$  는 복소 주파수 종속 강성행렬이다.

$$[C]=[K]-w^2[M] \quad (5)$$

그림 1(b) 의 기초지반 운동방정식과 그림 1(c) 의 구조물에 대한 운동방정식은 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fg} & C_{fb} \\ C_{gf} & C_{gg} & C_{gb} \\ C_{bf} & C_{bg} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_f \\ u_g \\ u_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_f \\ 0 \\ Q_b \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & (C_{ii}-C_{ff}) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_s \\ u_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -Q_f \end{pmatrix} \quad (7)$$

여기서, 첨자 s 는 상부구조물, i 는 구조물의 기초, f 는 굴착된 지반, b 는 외부경계, g 는 남아 있는 지반을 나타내며,  $\{Q_f\}$  는 구조물과의 상호작용력이다. 변위의 적합조건과 힘의 평형조건으로부터  $u_i = u_f$ ,  $Q_i + Q_f = 0$  이 도입되었으며, 그림 1(c) 에서 알 수 있듯이  $(C_{ii}-C_{ff})$  는 구조물의 강성으로부터 굴착된 지반의 강성과 질량이 제거되는 것을 의미한다.

외부경계가 구조물로부터 아주 멀리 떨어진 곳에 위치한다고 가정하면, 자유장에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fg} & C_{fb} \\ C_{gf} & C_{gg} & C_{gb} \\ C_{bf} & C_{bg} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u'_f \\ u'_g \\ u'_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ Q_b \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서,  $\{u'\}$  는 자유장 운동이며, 식 (6) 에서 식 (8) 을 빼고 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} C_{ff} & C_{fg} & C_{fb} \\ C_{gf} & C_{gg} & C_{gb} \\ C_{bf} & C_{bg} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} r_f \\ r_g \\ r_b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

여기서,  $\{r\} = \{u\} - \{u'\}$  는 상호작용 변위이며,  $\{r_g\}$  와  $\{r_b\}$  는 제거될 수 있으므로  $\{Q_f\}$  는 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$\{Q_f\} = [X_f]\{r_f\} = [X_f](\{u_f\} - \{u'_f\}) \quad (10)$$

주파수 종속인 행렬  $[X_f]$  는 임피던스 행렬이라고 한다. 식 (10) 을 식 (7) 에 대입하여 정리하면 다음과 같이 구조물의 최종 운동방정식이 된다.

$$\begin{bmatrix} C_{ss} & C_{si} \\ C_{is} & (C_{ii}-C_{ff}+X_f) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_s \\ u_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ [X_f]\{u'_f\} \end{pmatrix} \quad (11)$$

따라서, 지반 - 구조물 상호작용해석은 구조물의 문헌부분에서 자유장 운동  $\{u_f\}$  을 결정하는 부지응답해석, 행렬  $[X_f]$  를 결정하는 임피던스 해석, 복소 강성행렬과 하중벡터를 구성하여 최종 변위를 구하는 구조물 해석의 세 단계로 구성된다.

### 3. 대형 내진모델시험

지반 - 구조물의 상호작용을 고려할 수 있는 해석방법의 개선과 이의 불확실성 및 제약성을 정량화할 수 있는 기술적인 자료를 확보하기 위하여 대만과 미국을 중심으로 대만의 Lotung 지역에 대형 내진모델시험 사업이 1985 년에 시작되었다. 그러나 단일지역에서는 각기 다른 토질의 특성에 따른 구조물 응답의 영향성을 평가하는데 한계가 있어 Lotung 연구사업에 이어 Hualien 연구사업이 계획되었다. 국제공동연구인 “ 대만 화련 대형 내진모델시험 ” 은 미국의 EPRI 와 대만의 대만전력이 주관하고 일본 ( TEPCO, CRIEPI ), 미국 ( NRC ), 프랑스 ( CEA, EDF, Framatome ) 가 공동 참여하여 1988 년부터 착수되었으며, 이 연구에서는 지반의 지진응답 특성을 규명하고 구조물의 응답을 예측하여 분석함으로써 지반 - 구조물 상호작용 해석기법을 개선하기 위한 연구가 수행되고 있다.

대만의 화련지방은 동부해안 지역에 위치하여 필리핀 해양판 경계 근처에 위치한 지진다발지역으로, MM 진도 7 이상의 강진도 일년에 1회 정도의 빈도로 발생하고 있는 것으로 알려져 있다. 지반은 지표에서 5 m 까지는 사질토이고 그 아래는 자갈층으로 크게 2 개의 지층으로 이루어져 있다.

본 연구수행을 위해 화련부지에 100 만kw 급 원통형 축대칭 철근 콘크리트 구조의 원자로 건물의 1/4 축소모델과 유체저장탱크의 1/2 축소모델이 건설되었다. 원자로 건물의 1/4 축소모델의 전체 높이는 16.13 m 이고 이중 5 m 가 지반에 묻혀 있으며, 묻힘 비율은 31 % 이다. 또한, 벽체두께는 0.3 m 로 일정하며 기초는 두께가 3.0 m, 외경은 10.82 m 이고, 지붕슬래브는 두께가 1.5 m, 외경이 13.28 m 이다. 구조물 전체의 중량은 1440.2 tf 로 이중 46 % 가 기초에, 35 % 가 지붕에 집중되어 있다. 구조물의 상세한 제원은 그림 2 와 같으며, 본 연구에서는 원자로 건물의 1/4 축소모델을 대상으로 SASSI 해석기법의 검증을 수행하였다.

#### 3.1 지진계측

화련부지에서 발생하는 지진을 계측하기 위하여 시험부지에는 가속도계가 그림 3 과 같이 설치되어 있으며, 가속도계는 구조물을 중심으로 모델 직경의 5.5 배 되는 지점까지 3 곳의 방사선상에 위치하도록 설치되어 있다. 또한, 구조물에도 지진응답을 관측하기 위하여 기초부, 벽체 및 지붕에 동서남북의 방향으로 가속도계가 설치되어 있다. 특히 계측지점 A15, A25 및 A35 아래에는 Downhole 을 따라 깊이 5.3 m, 15.8 m, 26.3 m, 52.6 m 되는 지점에 가속도계가 설치되어 있어 지하 심도에 따른 지진파의 증폭특성을 관측할 수 있다. 지진계가 설치된 이후 96 년 5 월 까지 리히터 진도계에 의한 지진규모 4 이상의 지진은 15 차례 발생하였고, 이중 95 년 5 월 1 일에 발생한 지진 ( LSST 7 ) 이 시험부지내에서는 최대 가속도를 기록하였으며 지진데이터도 거의 완벽하게 기록되어 있다. LSST 7 은 다른 지진과 비교했을 때 규모면에서는 작으나 진원이 시험부지 가까이에 위치하여 남북방향이 135 gal, 동서방향이 78 gal 이라는 큰 가속도값을 기록하였다.

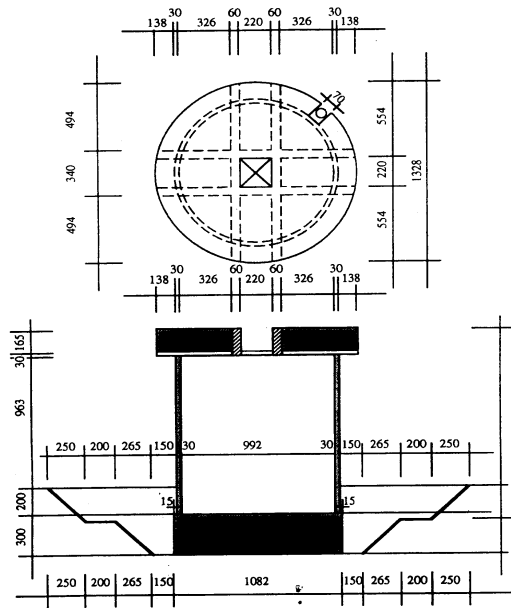


그림 2. 원자로 건물 1/4 축소모델의 평면 및 수직단면 ( 단위 : cm )

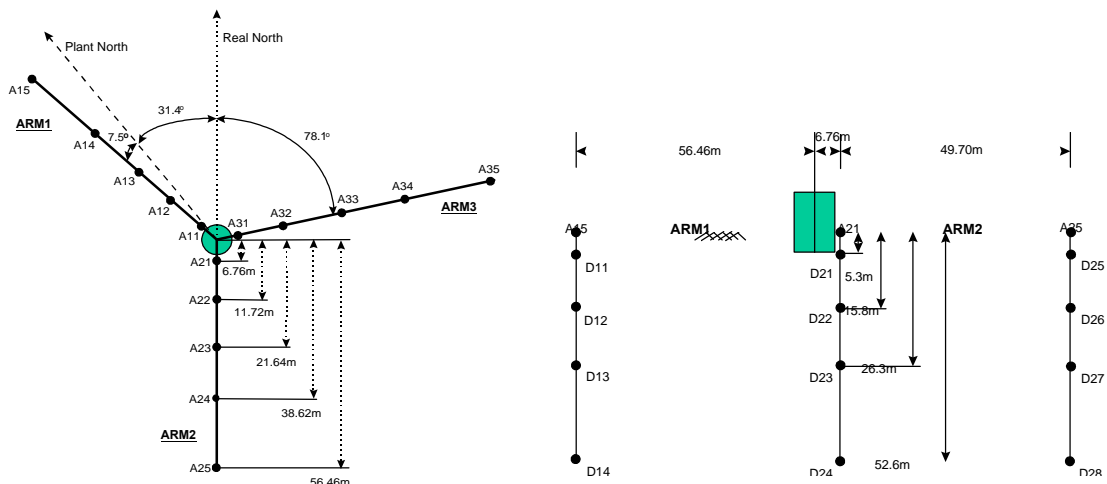


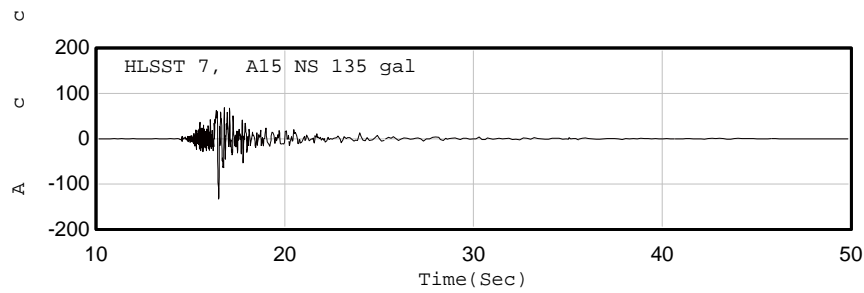
그림 3. 대만 화력부지에 설치된 가속도계의 위치

### 3.2 통제운동

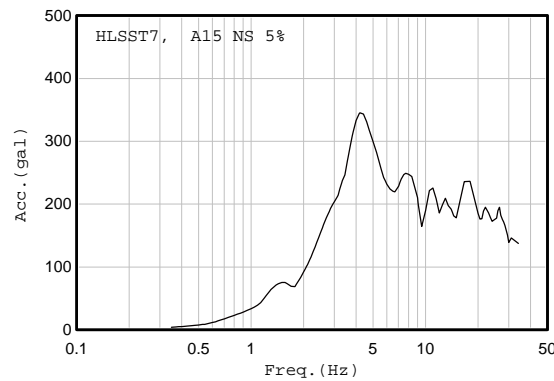
구조물 응답해석을 위한 입력지진동 ( 통제운동 ) 은 구조물의 근역에서 계측된 임의의 지진파로 설정할 수 있다. 그러나 구조물에 근접하여 계측된 지진파의 경우, 구조물에 의한 산란 및 진동으로 2 차적인 운동이 포함된 지진파일 가능성이 높아 피하는 것이 바람직하다. 따라서, 이러

한 영향이 배제된 충분한 이격거리에서 계측된 지진파를 통제운동으로 선정하여야 하며 또한, 지하에서 계측된 지진파보다 지표면에서 계측된 지진파를 통제운동으로 사용하는 것이 수치해석시 보다 정확한 해석결과를 보여준다.

따라서, 본 연구에서는 지진계측자료가 거의 완벽하게 기록된 LSST 7 의 지진계측자료 중 가장 큰 가속도를 기록한 그림 4 에서 보여주고 있는 A15 남북방향 성분의 지진계측자료를 입력지진동으로 하여 지반 - 구조물 상호작용해석을 수행하였다.



( a ) 가속도 시간이력



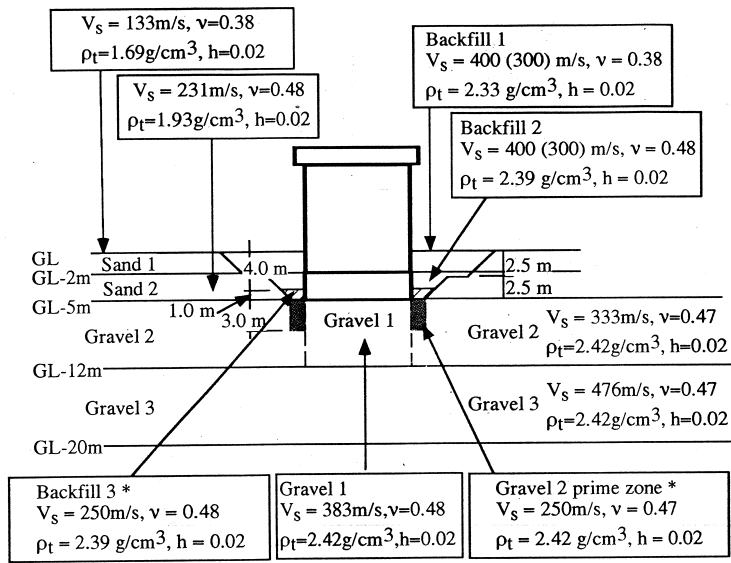
( b ) 가속도 응답스펙트럼

그림 4. HLSST 7 의 지진특성 ( A15, NS 방향 )

## 4. 지진응답해석

### 4.1 해석조건

대만 화련부지에 건설된 원자로 건물 1/4 축소모델을 대상으로 지반 - 구조물의 상호작용을 고려한 수치해석은 3 차원 유연체적 부분구조법을 이용하는 SASSI 전산프로그램을 이용하여 수행하였다. 또한, 구조물 주위 및 하부의 지반재료는 일본 전력중앙연구소 ( CRIEPI ) 에서 보어링, 대구경 관입시험, PS - logging 과 같은 현장시험과 동결 비교란 샘플의 삼축압축시험과 같은 실내시험을 수행하여 결정된 그림 5 에서 보여주는 “ 수정지반모델 ” 을 사용하였다.



Notes:  
 Values in parentheses are those of the modified ground model.  
 Zones designated by asterisk (\*) have been introduced in the modified ground model.

그림 5. 수정 지반모델

지진응답해석을 위한 통제운동은 3.2 에서 언급한 바와 같이 최대 지반가속도 135.8 gal 을 기록한 LSST 7, A15 지진파의 남북방향 성분을 사용하였다.

#### 4.2 구조물의 지진응답해석

대만 화련부지에 건설된 원자로 건물 1/4 축소모델을 대상으로 지반 - 구조물 상호작용해석을 수행하기 위하여 본 연구에서는 원자로건물을 유한요소모델로 모형화하였다. 또한 수치해석결과와 비교할 구조물에서 계측된 지진응답 스펙트럼은 그림 6 과 같다.

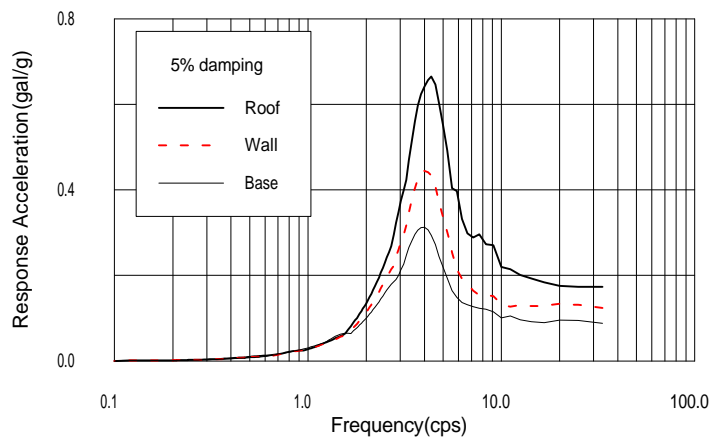


그림 6. 원자로 건물 1/4 축소모델에서 계측된 각 지진응답 스펙트럼



지반 - 구조물의 전체 구조시스템은 그림 7 과 같이 해석모델의 축대칭성을 이용하여 1/4 만 모델링하였으며, 지반영역과 뒷채움부분 및 구조물은 8 절점 - 육면체요소를 이용하여 모델링하였다.

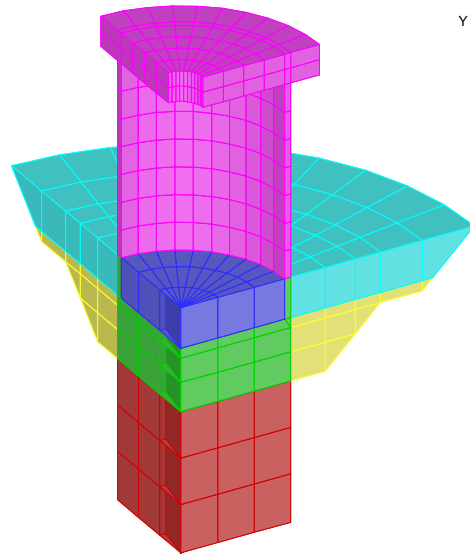


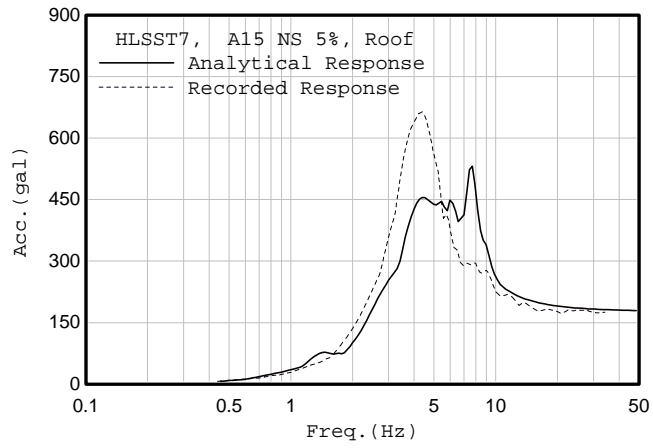
그림 7. 원자로 건물 1/4 축소모델의 유한요소모델

그림 8 은 원자로 건물 1/4 축소모델의 지붕, 벽체 및 기초부에서의 수치해석결과와 지진응답 계측결과를 보여주고 있다. 그림 8 에서 알 수 있는 것처럼, 기본진동수와 첨두 가속도응답을 비교해 보면 전체적으로 지진응답 계측결과와 수치해석결과가 일치하는 결과를 보이고 있으며, 첨두 가속도응답은 지붕에서 기초로 갈수록 보다 잘 일치하는 경향을 보이고 있다. 특히, 기본진동수에 있어서는 수치해석결과가 거의 정확히 지진응답 계측결과를 예측하고 있음을 알 수 있다.

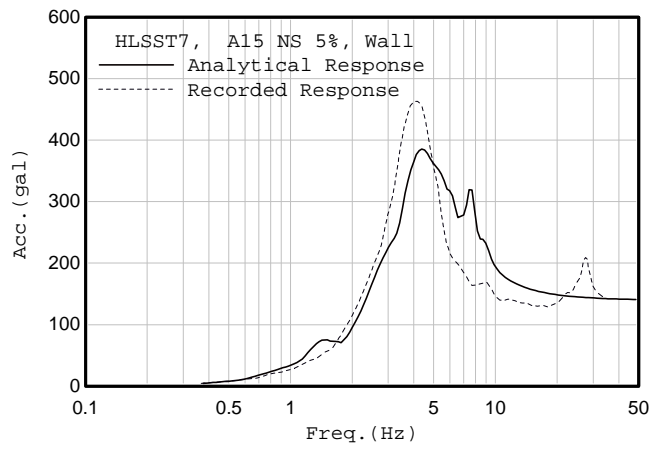
그러나, 수치해석결과가 지진응답 계측결과에 비하여 기본진동수에 있어서는 약간 큰 결과를 보여주고 있고, 첨두 가속도응답에 있어서는 약간 작은 결과를 보여주고 있다. 이러한 결과가 나타난 이유는 기본진동수의 경우 지반의 강성이 해석에서 실제 지반보다 크게 반영되었기 때문인 것으로 판단되며, 또한, 첨두 가속도응답에 있어서는 해석 입력자료 작성시 설계 당시의 구조강성을 해석모델에 반영함으로써 실제 콘크리트의 강성 증가 등 구조물의 강성변화를 충분히 반영치 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

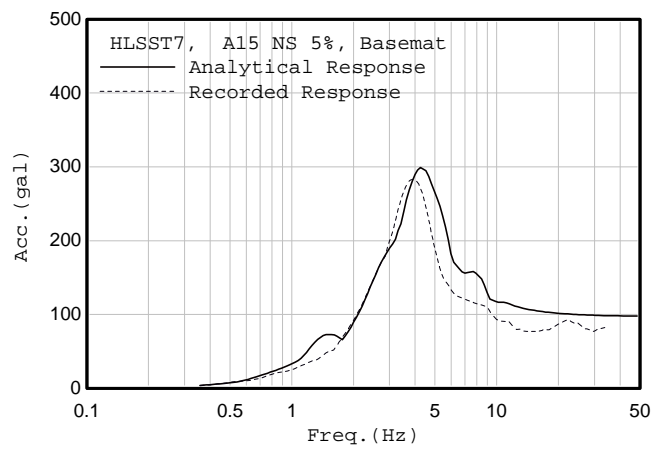
본 연구에서는 지반 - 구조물 상호작용해석 프로그램 중 가장 널리 사용되고 있는 SASSI 에 대하여 대만 화련 국제 공동연구에서 계측된 지진응답자료와 수치해석결과와의 비교를 통하여 그 신뢰성을 검증하였다.



( a ) Roof



( b ) Wall



( c ) Basemat

그림 8. 수치해석결과와 지진응답계측결과의 비교

본 연구결과, 수치해석결과가 첩두 가속도응답 크기 및 기본진동수의 예측에 있어서 지진응답 예측결과와 거의 일치하는 결과를 보여주고 있어 본 연구에서 사용한 SASSI 프로그램의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일부로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 이종립 외, “ 원전의 내진해석 기술개선에 관한 연구( I ), ” KRC-90H-J05, 한국전력공사 전력연구원, 1995.
- [2] W-G, Huang, C-C, Lin, S-N, Cheng, and Y-T, Yeh, “ Strong-Motion Earthquake Records on the 7 October, 1995, in LSST Array, Hualien, ” IESER96-001, Taiwan Power Company, Institute of Earth Sciences Academia Sinica Republic of China, 1996.
- [3] J, Lysmer, “ SASSI Theoretical Manual, ” The Regents of the University of California, San Francisco, California, 1988.
- [4] Luco, J.E., “ Linear Soil-Structure Interaction, ” Report UCRL-15272, PSA No. 7249808, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, California, July 1980.
- [5] Tang, H.T., “ Large Scale Soil - Structure Interaction, ” EPRI NP-5513-SR, Nov., 1987.