

원자로격납건물 축소모델
지반-구조물계의 지진응답 특성에 관한 연구

A Study on the Seismic Response Characteristics of Soil-Structure
System at Hualien Large Scale Seismic Test (LSST)

백 용 락, 현 창 현, 최 강 룡
한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

신 재 철
충남대학교
대전광역시 유성구 궁동 220번지

요 약

지반-구조물 상호작용(SSI) 효과를 규명하기 위한 지진기록의 취득 및 SSI 해석기술의 검증을 위한 목적으로 대만 화련 대형내진모델시험 (Large Scale Seismic Test : LSST) 국제공동 연구가 수행되었다. 해당부지에는 원자로 격납건물의 1/4 축소모델을 건설하였으며 모델주변은 지반-구조물 상호작용 효과를 규명하기 위해 인위적인 뒷채움(Backfill)을 하였고 모델 및 모델주변 지반에는 지진에 따른 응답을 계측하기 위한 지진계측기가 설치되었다. 1993년 9월부터 2002년 3월까지 리히터 규모 3.0-7.3의 활용 가능한 70개의 지진에 대한 지진응답이 기록되었으며 이에 대한 분석을 통하여 지진발생중, 축소모델시험 부지의 지반운동 특성, 인접 지반운동에 대한 구조물의 영향, 축소모델의 응답특성 등 지진-구조물 상호작용 효과에 대한 유용한 정보를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

This paper presents analysis results of earthquake response data recorded from the Hualien large-scale seismic test (LSST). A soil-structure interaction (SSI) experiment was conducted in a seismically active region in Hualien. To obtain earthquake data for quantifying SSI effects and to improve SSI analysis method, a 1/4-th scale of a typical nuclear reactor cylindrical concrete containment was constructed in the site where both the containment model and its surrounding soil, surface and sub-surface, are extensively instrumented to record earthquake data.

In between September 1993 and March 2002 more than seventy earthquakes with Richter magnitudes ranging from 2.6 to 7.3 have been recorded at the site. The recorded data were analyzed to provide information on the response characteristics of the Hualien soil-structure system, the SSI effects and the ground motion characteristics.

1. 서론

원전건설부지의 제한성으로 인하여 향후 암반상이 아닌 유연한 지반에 원전이 건설될 가능성이 매우 높아지고 있으며 프랑스, 미국 등 외국에서는 이미 상대적으로 유연한 지반 상에 원전건설이 이루어져오고 있다. 또한 국내의 경우 차세대원전의 경우도 토양지반 조건을 내진설계에 반영하여 표준설계를 수행한 바 있다. 이에 따라 원전 내진 설계에 있어서 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure Interaction : SSI) 효과를 타당하게 평가하는 것이 매우 중요하게 되었다.

이러한 지반-구조물 상호작용 해석의 문제는 내진설계 분야의 오랜 연구과제의 하나이며 지난 20년간 지반-구조물 상호작용과 관련한 해석기법 및 컴퓨터 코드가 지속적인 발전을 하여 왔음에도 불구하고 각각의 해석기법들은 지반조건 모델링, 입력자료의 산정 등 서로 다른 가정사항 및 제한성이 있기 때문에 동일한 문제에 대해서도 현저한 결과차이를 나타내며 사용자에게 따라 다른 결과를 나타내었다. 이것은 각각의 기법들이 갖는 불확실성과 제한성을 정량적으로 평가하기 위한 기술적 기반이 부족하며 또한 이를 위한 계획된 지진계측을 통한 지반-구조물 응답의 실측자료의 부족에 기인한다. 즉 지반-구조물 상호작용 효과에 대한 다양한 정보를 제공할 수 있는 계획된 지반-구조물 시스템의 설치와 적절한 규모의 지진발생에 의한 지진응답 실측 및 이에 대한 평가가 필요하였다.

이와 같은 필요성에 따라서 지진의 발생빈도와 강도가 높은 대만의 화련지방에 지반-구조물 상호작용 효과를 규명하기 위한 대형내진모델시험(Large Scale Seismic Test : LSST) 국제공동연구가 계획되었다. 해당부지에는 원자로격납건물의 1/4 축소모델을 건설하였으며, 지진에 따른 지반 및 구조물의 응답을 계측을 위한 지진계측기가 설치되었다.

본 논문에서는 활용 가능한 정보가 기록되어 제공된 총 74개의 지진응답기록중 규모 3.0 미만의 지진 4개를 제외한 70개의 실측 지진응답기록을 대상으로 지진발생에 따른 지반운동 특성, 지표 및 지하깊이별 지반-구조물 상호작용 효과를 분석하였다. 또한 지진규모나 진앙거리를 고려한 영향정도도 평가하였으며 지진발생에 따른 화련 LSST 모델구조물의 응답특성도 분석하였다.

2. 화련 LSST의 개요

화련(Hualien) LSST 사업은 한국, 미국, 대만, 일본, 프랑스 등 5개국 11개 기관이 참여하여 수행된 국제공동연구사업이다[1]. 1988년에 발의되어 본격적인 연구사업은 모델 구조물이 완성된 후 약 5년간(1993년~1998년) 수행되었으며 이후 추가적인 지진계측자료를 얻기 위해 연구기간을 약 3년간 연장하였다. 본 연구사업의 목적은 지진다발지역에 원자로건물 축소모델 구조물을 축조한 후 각종 지진계측설비를 설치, 현장 내진구조실증시험을 통하여 지진파의 특성을 규명하고 구조물의 실제 변형거동을 분석함으로써, 내진설계상 논란이 되고 있는 지반-구조물 상호작용 해석기술의 불확실성 규명에 있다.

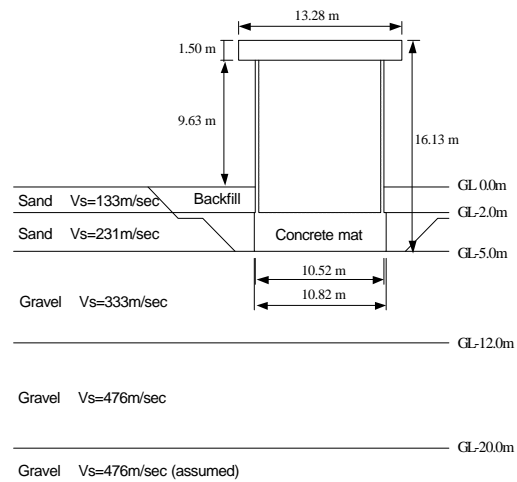
2.1 지반특성

LSST 시험부지는 지진활동이 활발한 대만 북동부의 해안의 화련 지방이며 시험부지 하부는 직경 10cm-20cm 사이의 자갈로 구성된 대규모의 비압밀 상태의 집괴암(conglomerate)으로 이루어져 있다. 대만전력공사(TPC)가 1989년에 수행한 지구물리학적 시험 및 보어링 시험에 의하면 상부 100m 깊이까지 지반의 전단파 속도는 400m/초 정도이며 그 밑 약 7km까지 지반은 1500m/초-1850m/초 사이 값으로 추정된다. 또한 지하 50m까지 보어링한 결과에 의하면 상층부 5m는 점토질 모래이며 그 아래는 3cm에서 7cm 사이의 자갈로 구성되어 있다[2]. 일본 전력중앙연구소(CRIEPI)는 더 상세한 지구물리학적, 지질공학적 조사를 수행하여 그림 2.1(b)와 같은 지반의 Profile을 제시하였다.[3]

2.2 시험모델 및 지진계측

LSST 시험모델 구조물은 그림 2.1(a) 에서와 같이 지붕과 기초가 평평한 축대칭 철근콘크리트 구조이며 제원은 국내 경수로형 원자로격납건물의 약 1/4 크기의 축소모델이다. 구조물의 전체 높이는 16.13m 이며 지표면하부로 약 5m가 묻혀있다. 벽체는 직경이 10.52m이며 두께는 0.3m로 일정하다. 또한 기초는 두께가 3m이며 외경은 10.82m이며 지붕 슬래브는 두께 1.5m, 외경이 13.28m이다. 지진데이터의 계측을 위하여 축소모델 구조물에는 기초슬래브, 벽체상하단, 지붕슬래브의 각 방향별로 계측기를 배치하여 지진에 따른 구조물의 응답을 계측할 수 있도록 하였다.

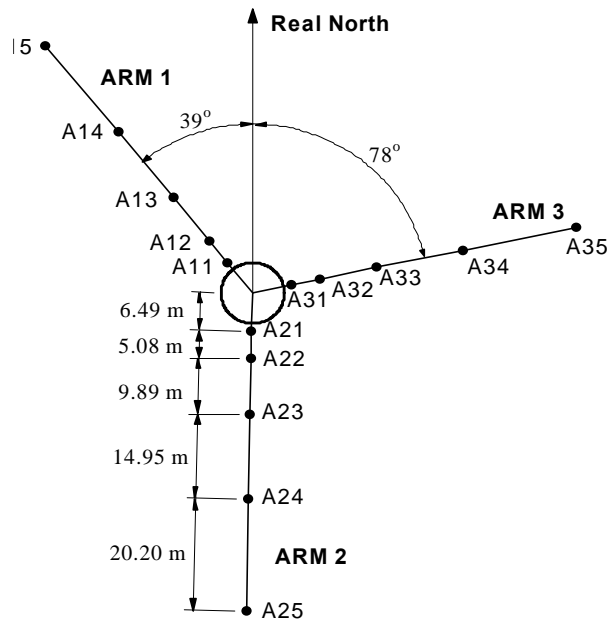
또한 시험부지에는 그림 2.2와 같이 시험모델의 중심으로부터 5.5배되는 지점까지, 3방향의 방사방향으로 15개의 계측기가 배치되었으며 최외각 지점인 A15, A25 및 시험모델에 근접한 A21 하부 각각에 Downhole을 따라 깊이 5.3m, 15.8m, 26.3m, 52.6m 지점에 계측기를 배치하여 거리와 깊이에 따른 지진응답특성을 관측할 수 있도록 하였다.[1][4] 설치된 가속도계는 FBA 23과 FBA 13이며 이 모든 기록은 PC data acquisition subsystem(PCA 및 PCB)와 SSR-3E solid state digital recorder로 기록하였다.



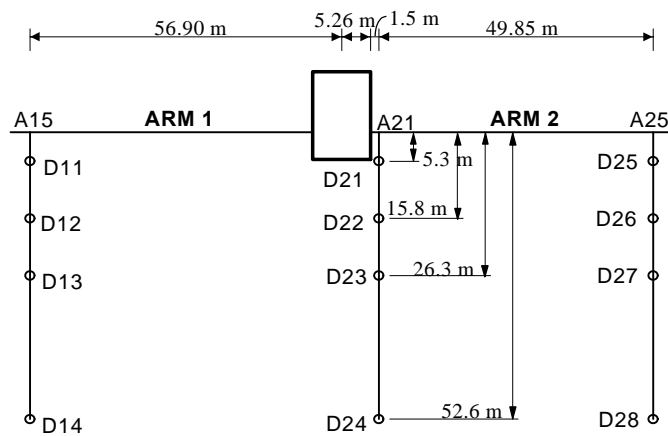
(a) Downscale Structure Model (Photo)

(b) Downscale Model Dimension & Soil Profile

Fig 2.1 Hualien LSST Model



(a) Ground Surface Accelerometer (Plan View)



(b) Downhole Accelerometer (Elevation View)

Fig. 2.2 Arrangement of Ground Accelerometers

3. 계측지진의 개요

시험모델 건설이 완료된 1993년 9월부터 동 연구의 사업기간인 1998년까지 리히터 규모 2.6에서 6.2의 지진이 34개가 발생되었으며 사업종료후 약 3년간 추가적인 지진 기록을 취득을 통하여 1999년부터 2002년 3월까지 규모 2.7-7.3의 83개의 추가지진이 발생하였으나 이중 규모 3.0 미만의 지진과 관련 지진정보가 불충분하여 대만 IES(Institute of Earth Science)로부터 제공되지 않은 지진을 제외한 총 70개의 지진 응답기록을 분석대상으로 하였다.

70개 (리히터 규모 $M_L = 3.0-7.3$)의 지진의 개요는 표 3.1에 정리하였으며[5][6] 이들 지진중 최대 지반가속도를 기록한 지진은 47번으로 동서방향 가속도가 142gal을 기록하였다. 47번은 지진 규모가 5.7로서 규모는 상대적으로 작으나 이보다 큰 규모의 지진에 비해 진앙거리($\Delta = 16$ km)와 진앙깊이($depth = 7.2$ km)가 상대적으로 작은데 기인하는 것으로 판단된다. 아울러 분석대상 지진중 자유장의 지반가속도가 3축 성분중 1축 이상이 50gal 이상을 기록한 지진은 모두 15개이다.

지진의 발생위치는 그림 3.1에서와 같이 기록된 지진의 85%가 진앙거리 30km 이내에서 발생하였으며 규모별 분포를 살펴보면 지진규모가 클수록 진앙지가 멀어지는 경향을 보이고 있다. 또한 발생한 지진의 70%이상이 시험모델시험 부지의 오른쪽인 북동쪽 바다에서 발생하고 있는 바 이는 필리핀판과 유라시아 판의 경계부 근처에 위치한 대만의 위치적 특성에 기인하는 것으로 판단된다.

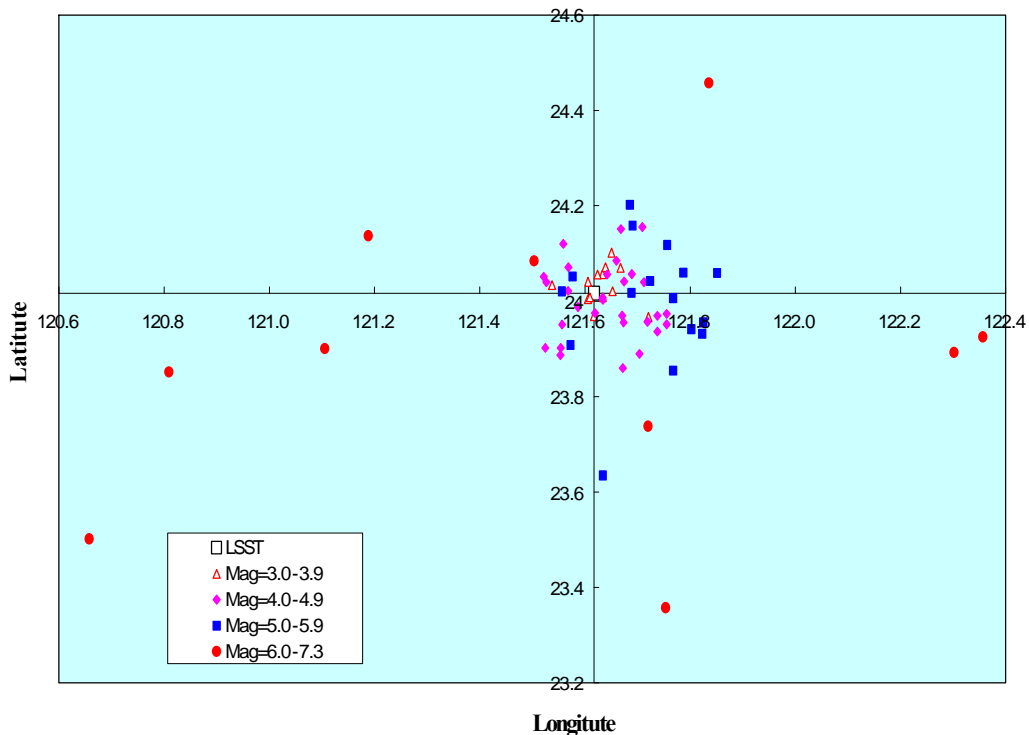


Fig 3.1 Epicenter of Earthquakes

Table 3.1 Earthquakes recorded by the LSST array in Hualien.

Event No EQ No.	Origin Time (UT)	Epicenter		Depth (km)	Mag. (M_L)	Azimuth (degree)	Delta (km)	Max. Ground Accelerations(gal)		
		Longitude	Latitude					L(N-S)	T(E-W)	V
1	1993 09 16 12:18:45.36	121 40.43	23 58.316	21.1	4.2	133.7	7.7	16.9	13.4	8.2
2	1994 01 20 05:50:15.57	121 51.14	24 03.89	49.5	5.6	77.5	24.4	39.4	48.8	24.5
3	1994 05 30 07:50:51.89	121 34.20	24 04.80	17.0	4.5	328.4	9.6	28.5	21.4	17.6
4	1994 06 05 01:09:30.10	121 50.26	24 27.74	5.3	6.2	24.5	54.0	41.4	27.8	28.3
5	1994 10 05 01:13:24.47	121 43.22	23 09.38	31.3	5.8	173.8	95.8	27.4	38.8	12.0
6	1995 02 23 05:19:02.78	121 41.22	24 12.22	21.7	5.8	18.8	21.8	51.4	45.8	23.9
7	1995 05 01 14:50:45.67	121 31.99	24 02.66	2.2	4.9	48.7	4.6	135.8	73.7	115.5
8	1995 05 02 06:17:21.60	121 38.04	24 00.74	8.9	4.6	107.7	1.7	87.5	64.9	118.2
9	1995 10 07 11:08:42.96	121 40.57	23 51.97	0.6	4.7	160.7	17.6	9.6	10.1	4.8
10	1995 11 14 07:26:26.68	121 31.52	24 03.12	17.9	4.2	292.6	10.3	20.5	17.8	21.1
11	1995 11 26 19:26:00.97	121 35.34	23 59.46	6.4	4.2	223.0	3.8	35.2	21.4	37.3
12	1995 12 18 16:17:54.53	121 41.52	24 01.10	22.1	5.8	88.2	7.6	36.6	27.7	20.6
13	1996 03 05 14:52:27.13	122 21.69	23 55.81	6.0	6.4	97.0	78.0	8.1	11.3	5.5
14	1996 03 05 17:32:08.56	122 18.18	23 53.91	10.8	6.0	100.5	71.0	9.3	11.5	7.0
15	1996 05 28 21:53:22.35	121 34.97	24 03.21	25.0	5.1	320.0	5.4	82.5	51.5	86.3
16	1996 11 26 08:22:23.71	121 41.72	24 09.86	26.2	5.3	205.3	18.2	20.9	18.0	13.4
17	1997 02 19 09:49:21.23	121 33.37	23 54.24	17.5	4.5	26.7	14.0	10.8	11.7	19.7
18	1997 02 27 15:44:43.28	121 42.38	23 53.61	16.9	4.7	326.6	16.3	15.4	13.5	10.2
19	1997 03 24 23:32:20.12	121 42.93	24 09.55	29.1	4.8	211.6	18.7	16.4	12.6	7.0
20	1997 06 18 02:03:30.61	121 49.80	23 57.56	31.7	5.2	286.1	22.4	20.3	19.2	11.5
21	1997 09 15 22:26:35.30	121 32.45	24 02.06	8.4	3.9	104.9	8.1	28.7	26.3	26.9
22	1998 05 15 08:50:28.54	121 43.23	23 57.65	46.0	4.9	300.3	12.0	11.6	9.5	5.0
23	1998 06 10 05:25:44.59	121 39.99	24 05.17	7.9	4.1	212.1	9.2	35.9	39.6	17.5
24	1998 07 17 04:51:14.96	120 39.75	23 30.16	2.8	6.2	69.8	104.4	6.1	9.4	3.3
25	1998 07 17 18:44:39.93	121 41.56	24 03.68	1.8	4.8	56.5	9.1	96.3	68.8	37.6
26	1998 07 17 18:46:23.85	121 39.08	24 02.73	10.3	3.5	46.6	4.6	17.8	12.5	12.4
27	1998 07 17 23:01:48.92	121 39.23	24 01.45	8.3	3.5	74.6	3.7	17.3	11.3	9.4
28	1998 07 18 00:50:17.21	121 38.88	24 03.59	8.4	4.3	32.0	5.7	50.3	23.6	32.3
29	1998 07 18 00:51:27.05	121 38.03	24 03.67	8.9	3.2	16.7	5.3	20.6	12.8	12.2
30	1998 07 18 16:14:04.81	121 40.77	24 02.79	3.7	4.4	61.6	7.1	49.7	42.7	19.4
31	1998 07 18 18:43:02.61	121 37.73	24 03.59	8.5	3.5	11.6	5.0	23.4	14.4	13.3
32	1998 09 04 10:40:50.60	121 34.59	23 54.84	11.0	5.0	200.1	12.1	16.1	20.3	9.7
33	1998 11 25 20:22:06.85	121 37.08	23 58.26	6.6	3.5	97.1	29.4	19.5	15.3	17.0
34	1999 04 10 07:54:05.91	121 39.04	24 06.17	9.2	3.4	349.8	10.1	30.4	19.6	14.6
35	1999 04 26 05:45:11.16	121 34.14	24 01.48	20.9	4.3	279.9	4.9	19.5	10.9	28.6
36	1999 09 20 17:47:15.85	120 48.93	23 51.15	8.0	7.3	268.6	82.0	87.1	118.9	32.7
37	1999 11 01 17:53:02.25	121 45.33	23 21.71	31.3	6.9	169.1	73.8	59.3	106.1	29.0
38	1999 11 05 05:50:32.34	121 40.69	23 57.53	4.6	4.1	136.5	8.8	63.5	50.2	89.2
39	2000 05 01 18:06:02.87	121 33.32	23 53.34	28.9	4.3	204.9	15.6	17.5	10.7	12.5
40	2000 05 06 13:41:52.84	121 33.62	24 01.41	27.0	5.1	277.7	5.8	72.0	47.9	106.0
41	2000 06 10 18:23:29.45	121 06.55	23 54.06	16.2	6.7	256.0	53.4	51.8	46.9	21.0
42	2000 06 19 21:56:24.76	121 05.53	23 55.22	27.0	5.2	258.9	54.6	11.9	12.9	5.2
43	2000 07 07 10:17:48.54	121 43.54	24 02.67	6.7	4.8	74.1	11.4	19.2	18.8	4.6
44	2000 07 11 12:30:06.97	121 44.44	23 59.31	8.5	4.2	103.8	12.8	8.8	14.8	9.1
45	2000 07 13 17:36:05.48	121 44.45	23 58.30	8.1	4.9	111.6	13.4	16.2	28.6	11.1
46	2000 07 13 22:01:10.32	121 49.61	23 56.38	5.3	5.1	111.7	22.9	24.7	43.1	14.3
47	2000 07 14 00:07:32.64	121 43.70	24 02.90	7.2	5.7	72.0	11.6	82.3	142.0	21.0
48	2000 07 14 07:18:20.54	121 45.55	23 58.70	2.9	4.8	106.3	14.9	13.1	24.4	8.9
49	2000 07 14 09:40:50.42	121 45.56	23 57.15	8.0	4.9	116.1	16.0	22.1	45.8	36.1
50	2000 07 14 23:04:34.64	121 48.19	23 56.82	6.0	5.1	112.2	20.3	19.5	29.8	6.0
51	2000 07 17 06:50:39.38	121 47.39	24 03.99	10.3	5.1	72.2	18.3	23.9	18.7	5.8
52	2000 07 19 04:46:33.42	121 45.61	24 07.13	3.7	5.0	51.5	18.3	22.1	18.1	8.9
53	2000 07 28 08:03:14.53	121 38.08	24 00.83	7.3	3.0	96.9	2.2	48.0	20.1	25.0
54	2000 08 23 00:49:16.58	121 38.08	23 38.16	27.5	5.6	177.1	42.2	21.7	17.6	6.6
55	2000 09 10 08:54:46.53	121 35.03	24 05.12	17.7	6.2	333.9	8.5	114.5	61.8	99.8
56	2000 09 11 10:49:30.45	121 40.18	24 09.11	5.8	4.7	18.8	15.9	39.3	32.0	62.5
57	2000 09 25 17:28:03.73	121 38.58	24 04.80	8.6	3.8	22.1	7.6	17.5	10.0	18.2
58	2000 09 25 17:30:36.12	121 40.11	24 04.33	7.1	3.7	38.7	7.9	18.3	13.1	11.3
59	2000 09 30 16:03:14.19	121 37.25	23 58.84	10.2	4.2	180.0	3.8	28.1	39.8	27.2
60	2000 10 02 19:45:48.16	121 38.07	24 00.29	10.0	4.1	22.1	7.6	43.3	24.7	20.6
61	2000 10 03 04:05:58.84	121 36.56	24 00.39	8.9	3.0	125.0	2.2	25.6	9.3	5.9
62	2000 10 04 20:29:22.50	121 33.88	24 07.35	20.2	4.5	334.7	13.0	33.2	28.8	27.8
63	2000 10 16 08:56:14.60	121 36.95	24 00.85	12.7	3.1			33.9	22.8	22.3
64	2000 10 24 07:11:57.66	121 31.79	23 54.20	18.4	4.8	215.8	15.4	57.9	49.9	35.6
65	2000 11 29 11:00:33.00	121 46.09	23 51.44	15.3	5.2	139.0	23.3	27.9	29.9	22.1
66	2001 07 09 15:20:47.63	121 46.11	24 00.66	43.4	5.1			29.5	23.8	8.1
67	2001 10 03 19:55:53.08	121 43.90	23 58.03	12.9	3.6			12.0	18.0	10.0
68	2001 10 13 20:07:05.55	121 33.66	23 57.11	12.7	4.4			20.6	12.5	14.9
69	2002 02 12 03:27:25.00	121 43.36	23 44.44	29.9	6.2			26.0	30.8	17.4
70	2002 03 31 06:52:49.95	121 11.49	24 08.39	13.8	6.8			44.5	59.4	17.4

4. 지진 계측기록 분석

본 논문에서는 응답스펙트럼(5% 감쇠) 및 최대가속도를 분석목적에 따라 변수별로 통계처리를 하여 평가하였다. 고려된 변수는 시험모델로부터의 거리, 지반 하부의 깊이, 지진규모 등이 고려되어 통계처리 되었다. 통계값으로는 median, 84 percentile, 16 percentile 값을 사용하였다.

4.1 지반운동 분석

그림 4.1 및 4.2는 지표면에 설치된 ARM 1, ARM 2, ARM 3 각각의 array 에서의 최대지반가속도와 응답스펙트럼을 구조물에서 가장 먼 지점(A15, A25, A35)에서의 응답에 대한 비의 통계값으로 나타낸 것이다. 수평방향(그림4.1)의 경우, 최대지반가속도와 4Hz 이상의 응답스펙트럼은 구조물 중심으로부터 36.4m 거리에 이를 때까지 감소하고 있음을 알 수 있다. 그러나 자유장 지반운동의 불확실성(그림 4.7: 동일거리의 자유장(A15, A25) 지반운동 비교시 차이를 보임)을 고려하면 지반운동이 구조물에 의해 영향을 받는 거리(영향 반경)는 구조물로부터 11.6m-21.5m의 거리까지로 보는 것이 타당하며 이 거리는 구조물 끝단으로부터 구조물 제원(D)의 약 0.6-1.5 배의 거리에 해당한다. 또한 이 그림으로부터 응답계측 지점이 구조물에 가까워져 갈수록 지반응답은 구조물 기초(distance=0)의 응답과 가까워져 감을 알 수 있으며 구조물로부터의 거리에 따른 응답의 감소는 4-5Hz 미만의 저진동수 영역에서는 거의 일어나지 않음을 알 수 있다.

그림 4.2의 수직방향의 경우도 구조물로부터의 거리에 따른 응답의 감소현상은 나타나나 최대지반가속도의 감소정도가 수평방향에 비해 낮으며 변동폭은 크게 증가한다. 응답스펙트럼의 경우도 구조물에 가까운 지반운동의 경우 특정 진동수 구간에서 급격히 감소하거나 증가되는 경향을 보여주고 있어 수직방향 지반운동의 불확실성을 보여주며 수평방향에 비해 더 심한 영향을 받는 것을 알 수 있으므로 수직방향 지반운동의 변동성에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

그림 4.3은 지진규모에 따라 구조물로부터 거리에 따른 응답의 추이를 살펴본 것으로 불확실성이 작은 수평방향만을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 지진규모가 작은 경우 4Hz 이상에서의 거리별 응답비의 차가 크나 지진규모가 증가할수록 거리에 따른 영향정도가 줄어들며 영향 진동수 구간도 점차 줄어들고 있음을 알 수 있다. 이는 지진규모 커질수록 따른 구조물에 의한 영향이 상대적으로 작아지기 때문인 것으로 판단되나 보다 많은 큰 규모의 지진기록을 더하여 추가적인 분석이 필요한 것으로 판단된다.

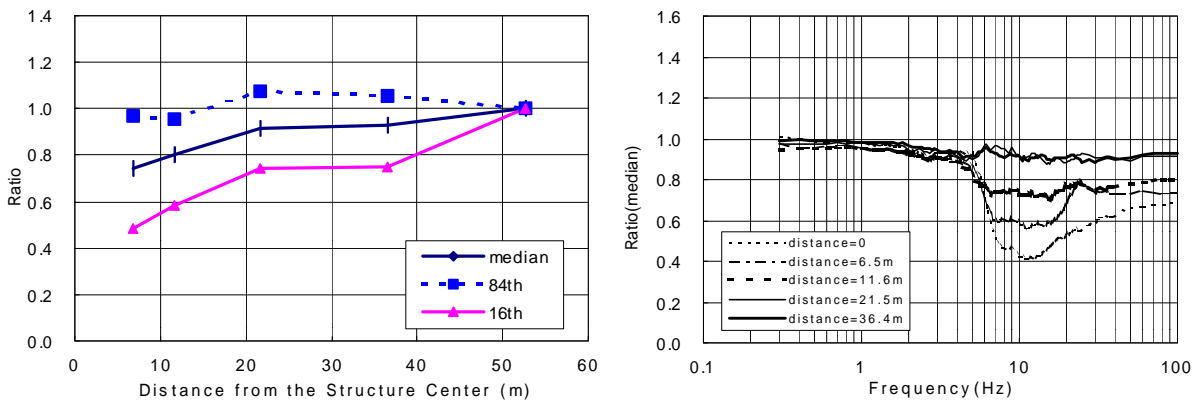


Fig. 4.1 Ratio of Soil Responses with Distance from Model Center (Horizontal)

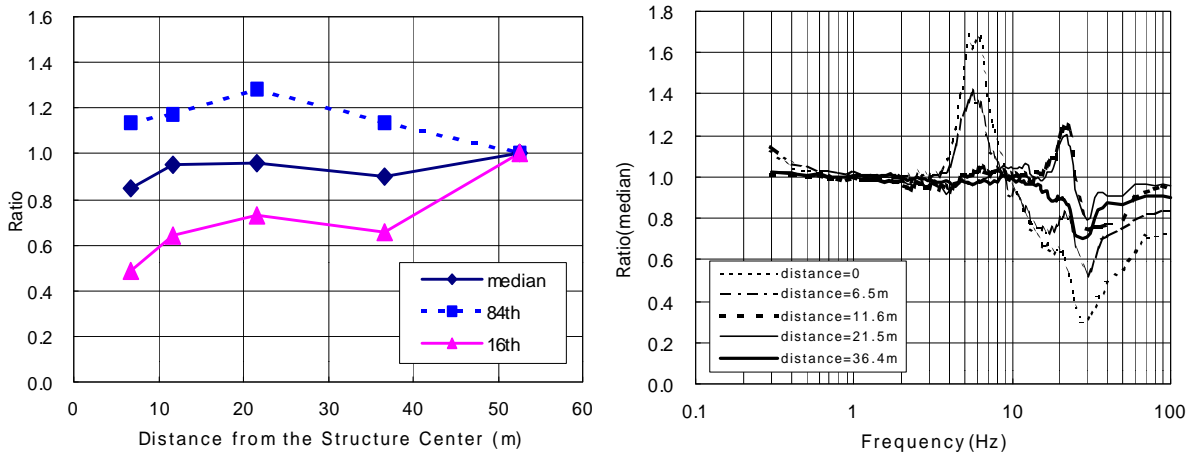


Fig. 4.2 Ratio of Soil Responses with Distance from Model Centerl (Vertical)

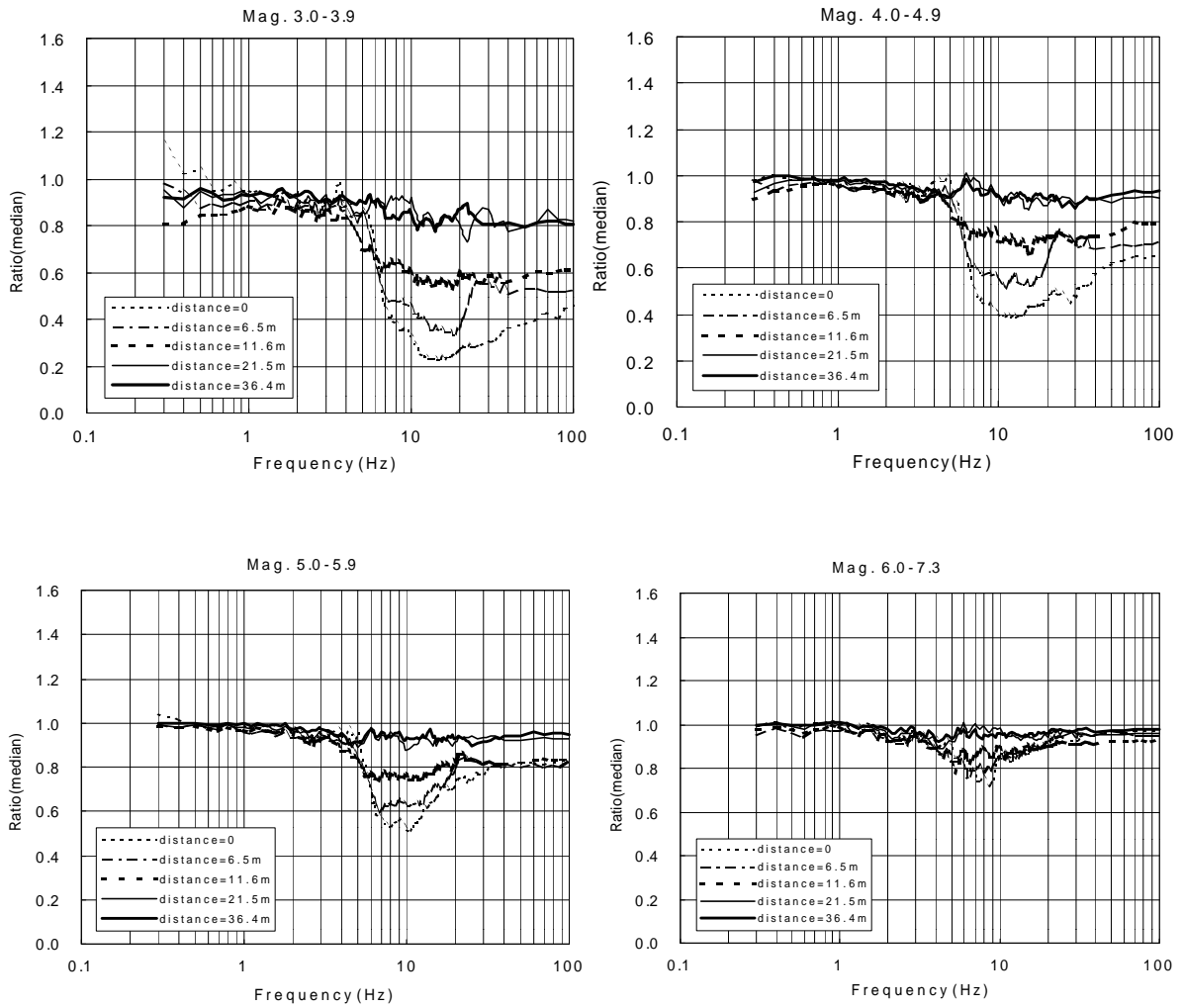


Fig. 4.3 Ratio of Soil Responses with Distance from Model Center for Magnitude Groups (Horizontal)

그림 4.4는 지표에 대한 각 downhole에서의 최대지반가속도 비의 통계값(median)을 나타낸 것이다. (이 경우 downhole Array가 설치된 A15, 25 및 A21 지표응답에 대한 각 downhole 계측기의 응답의 비임) 이 그림을 보면 구조물에서 가장 멀리 떨어져 구조물의 영향이 가장 작은 A15와 A25의 downhole 에서의 최대가속도 비는 서로 유사하게 나타나나 구조물에 인접한 A21의 downhole 에서의 값과는 차이를 보이고 있어 구조물 근처의 지반운동이 구조물에 의해 영향을 받았음을 보여주고 있다.

또한 지표면 근처에서의 지반운동 증폭정도를 비교하여 보면 전체적으로 최대 지반가속도는 지표 근처에서 급격히 증폭되고 있음을 알 수 있다. A15와 A25의 downhole의 경우 지하 -15.8m 이하에서의 응답의 감소가 거의 멈추고 -15.8m 부터 지표까지 응답의 증폭은 약 2배정도 증폭(지표에 대한 downhole에서의 최대가속도비가 0.5에서 1.0으로 증가) 됨을 볼 수 있다. 이는 현재의 내진설계 기준에서 구조물 기초깊이(약 10m이상) 에서의 지진동은 지표면 지진동의 60% 이상이 되도록 한 규정이 다소 보수적이거나 유사함을 나타낸다. 반면 A21 downhole의 경우는 증폭이 약 1.5배 정도로 증가하여 (0.63에서 1.0으로 증가) 증폭정도도 구조물의 영향을 받음을 나타내고 있다. 수직방향도 지표근처에서의 증폭정도와 최대가속도비가 수평방향의 경우와 유사하게 나타나나 분산정도가 수평에 비하여 매우 큰 것으로 나타났다.

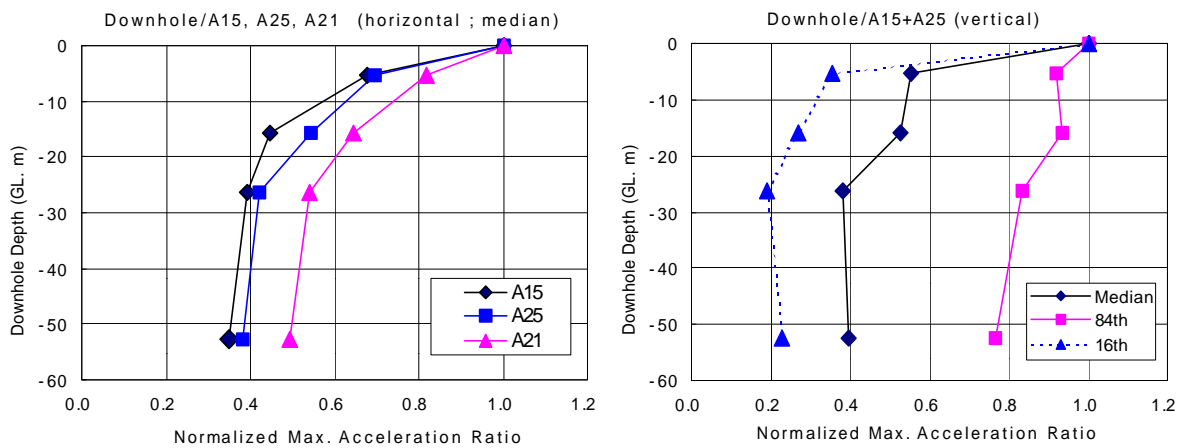


Fig. 4.4 Normalized Max. Acceleration Ratio with Depth

그림 4.5는 지표에 대한 지하에서의 응답스펙트럼(5% 감쇠-수평) 비의 통계값(median)을 비교한 것이다. 이 그림들에서 자유장에서(A15, A25)의 지반응답 특성이 거의 유사하게 나타났으며 깊이가 깊어질수록 깊이에 따른 응답의 감소가 더 넓은 범위의 진동수 영역에서 일어나고 있음을 보여주고 있다. 또한 응답의 감소는 -15.3m 이하에서는 응답의 감소가 증가하지 않고 있어 대략 구조물에 의한 지하깊이에서의 응답의 영향범위는 지표에서 대략 구조물 직경의 1.5D-2.0D의 범위로 추정된다. 아울러 대부분의 응답스펙트럼이 1Hz-2Hz 근처에서 응답의 감소가 시작되어 3-9 Hz 까지 감소하며 downhole이 깊어질수록 응답비가 최저점에 도달하는 진동수구간이 작아져 경사도가 급격해짐을 볼 수 있다. 구조물에 인접한 A21의 응답특성은 A15 및 A25의 응답특성과 동일한 경향을 보이거나 응답비의 감소정도가 구조물의 영향으로 자유장에 비해 다소 작게 나타났으며 특히 지표근처인 -5.3m에서의 응답비는 A15 및 A25와 큰 차이를 나타내었다.

수직방향은 자유장인 A15 및 A25에 대한 downhole 값에 대해서만 나타냈었다 수직방향은 지표에 대한 downhole에서의 응답비가 수평에 비해 감소정도가 더 크게 나타났다. 수평방향과 달

리 깊이가 깊어짐에 따른 진동수 구간의 변화경향(깊이에 따른 더 넓은 진동수 영역의 증가)은 나타나지 않았으며 응답이 감소되는 진동수 구간이 대체적으로 일치함을 보여주고 있다. 아울러 응답의 감소도 약 5Hz부터 급격히 감소되어 최저응답비에 이르는 진동수 구간은 약 20-30Hz 범위로 수평에 비해 고진동수 영역으로 이동(shift)되었음을 확인하였다. 이는 수평방향에 비해 수직방향의 진동수 성분이 고진동수 영역에 있기 때문인 것으로 판단된다.

그림 4.6은 그림 4.5의 경우(자유장 응답 A15, A25에 대한 downhole깊이별 응답중 수평방향)를 지진 규모별로 구분하여 응답비를 비교한 것으로 지진규모가 증가함에 따라 응답비의 최저비가 다소 증가하는 경향이나 깊이에 따라 응답비가 감소하는 진동수 영역 등 나머지 특징은 거의 유사한 것으로 나타났다.

그림 4.7은 계측지점 A15와 A21의 downhole에서의 응답을 A25의 downhole에서의 응답과 비교한 것이다. 즉 이 그림은 각 downhole을 따라 같은 깊이에 있는 계측지점들끼리에서의 응답을 비교한 것이며 (A15/A25, D11/D25, ..., D24/D28, A21/A25, D21/D25, ..., D24/D28). 응답스펙트럼의 비의 통계값은 중앙값(median)만을 비교하였다. 이 그림에서 볼 수 있듯이 자유장인 A15와 A25 downhole에서의 응답들도 서로 약간의 차이가 있음을 나타내고 있다. 이 차이는 이 시험부지의 공간적 불균질성에 어느 정도 기인하는 것으로 보이며 또한 자유장 지반운동의 불확실성을 나타낸다. A21 아래 downhole에서의 응답은 A25 아래 downhole에서의 응답에 비하여 깊이가 얕을수록 작아짐을 보이고 있다. 이는 구조물이 A21 아래 downhole에서의 응답에 영향을 주고 있음을 나타낸다.

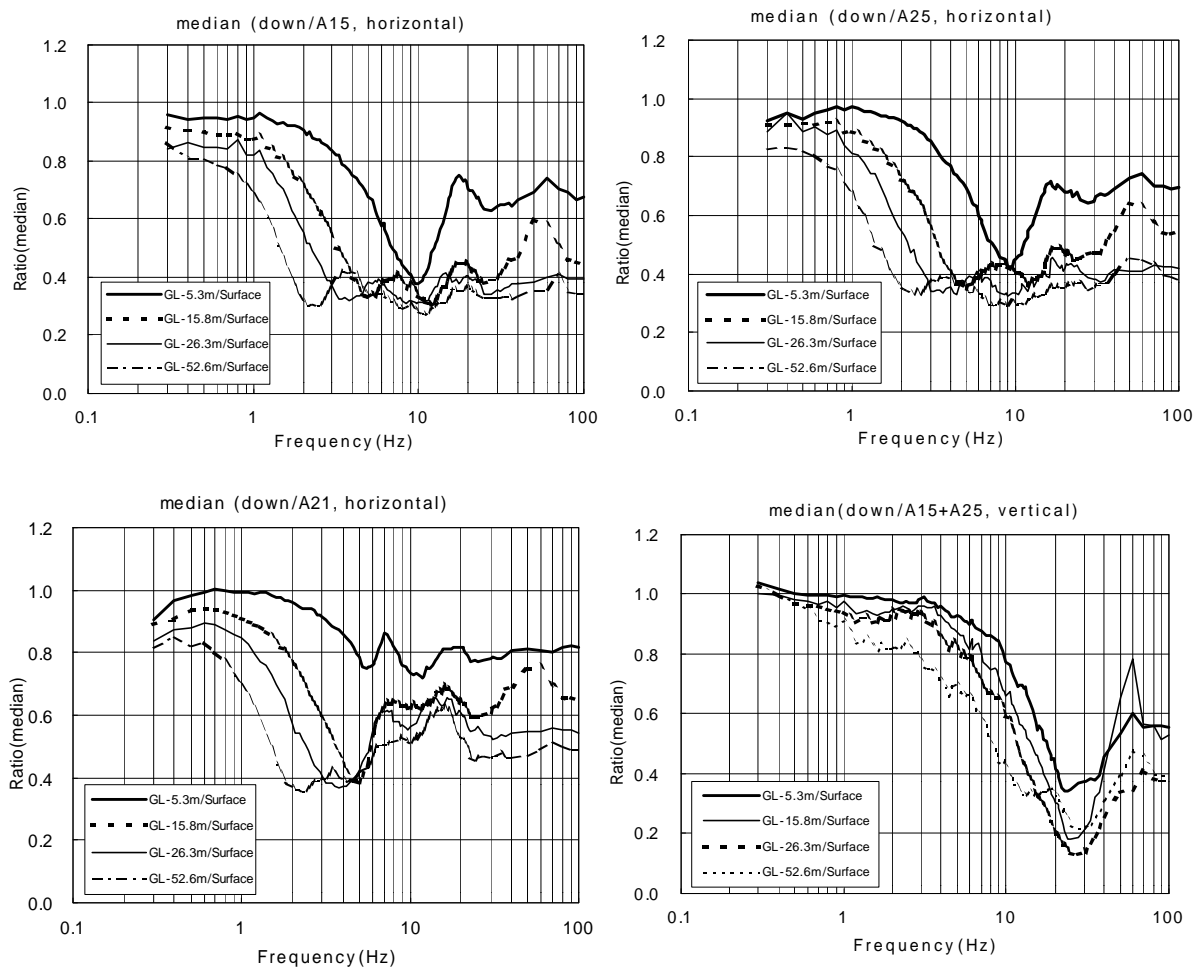


Fig. 4.5 Ratio of Responses Spectra along Downhole Array

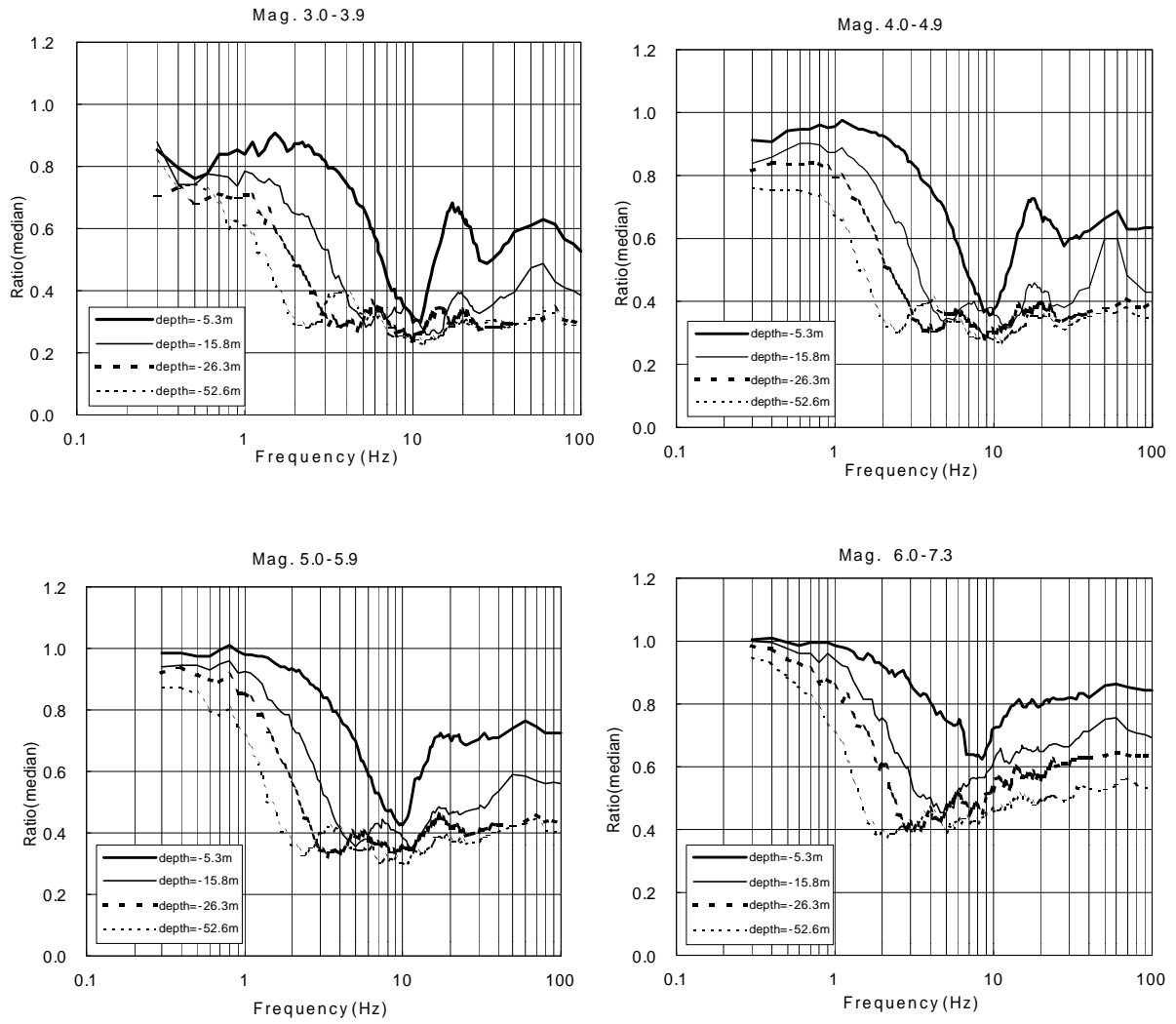


Fig. 4.6 Ratio of Soil Responses with Depth from Ground Surface for Magnitude Groups (Horizontal)

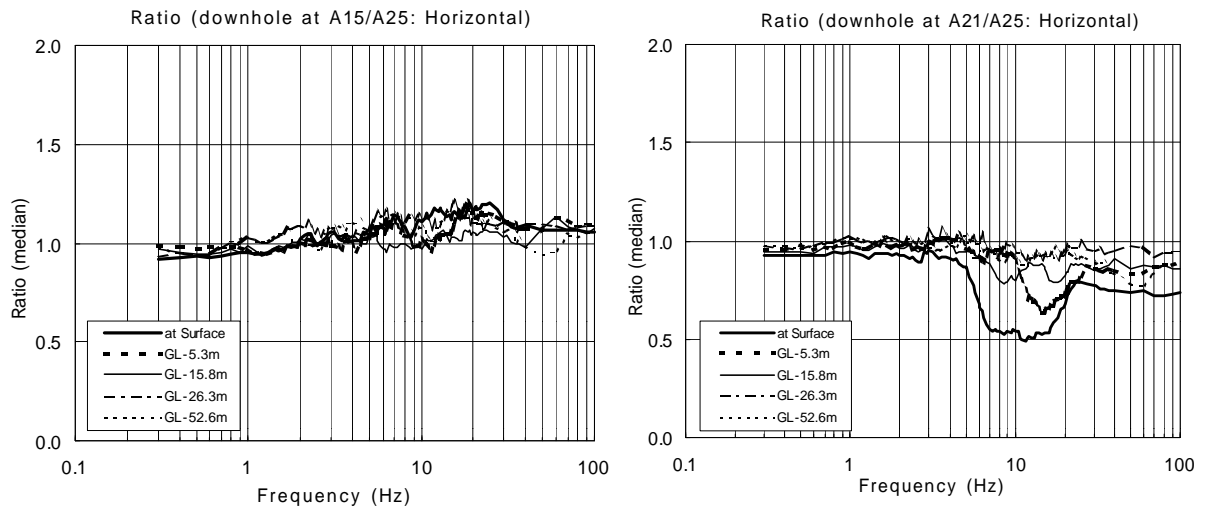


Fig. 4.7 Ratio of Soil Responses with Same Depth of Downhole (Horizontal)

4.2 구조물 응답

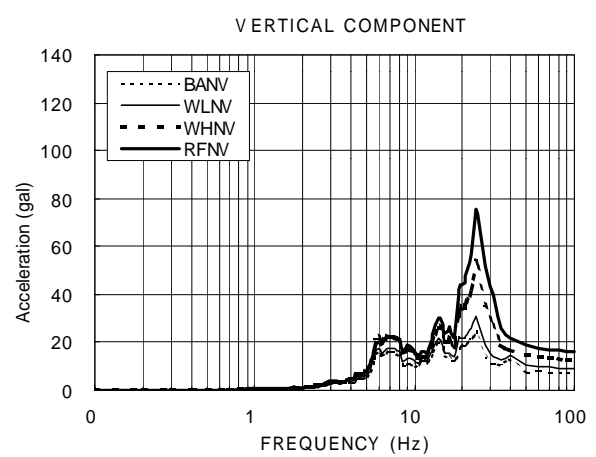
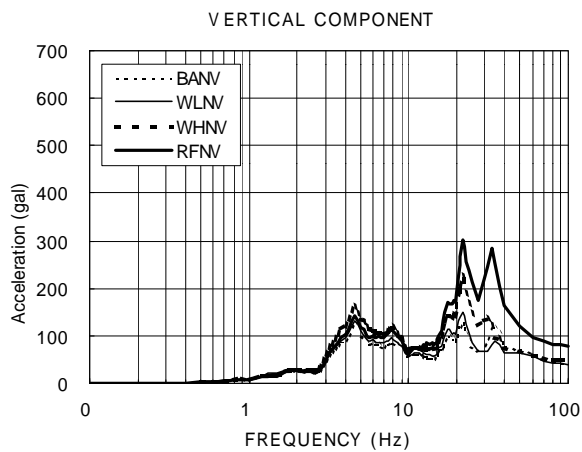
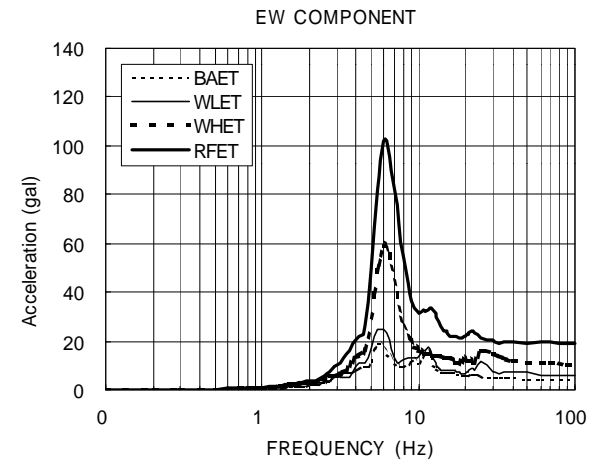
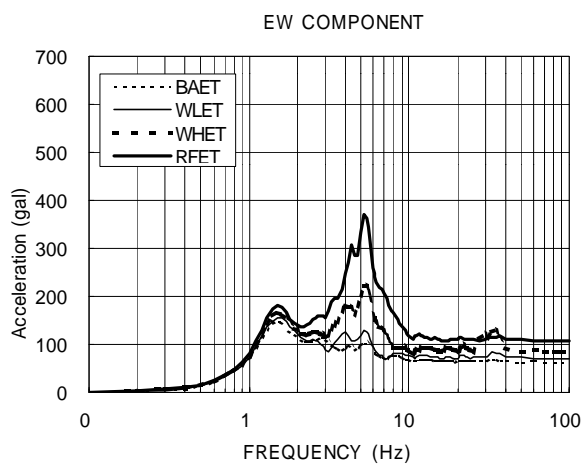
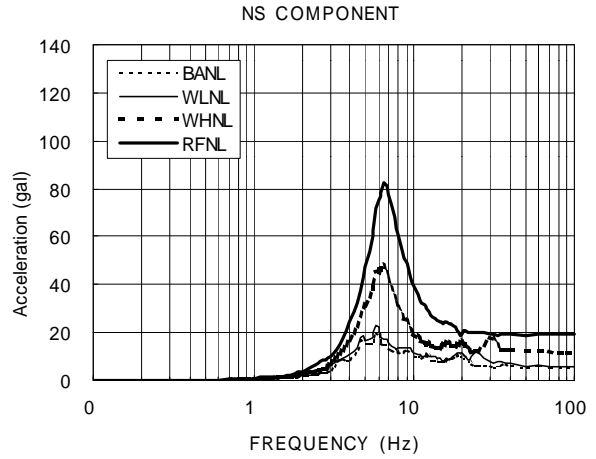
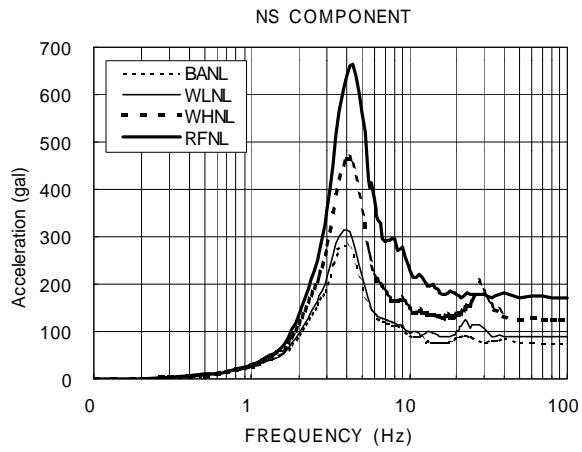
그림 4.8은 모델 구조물 지진응답(지붕(RF), 벽체 상부(WH), 벽체 하부(WL), 기초(BA))의 가속도 응답스펙트럼을 비교한 것으로 그림 4.8의 (a),(b),(c),(d)에 예시된 구조물의 응답스펙트럼은 자유장 최대지반가속도 크기별로 구분하여 구조물 응답특성의 예를 잘 나타내고 있는 경우이다.

이 그림들로부터 수평방향 응답은 구조물 상부로 올라갈수록 최대가속도의 증폭현상이 분명하게 나타나고 있음을 알 수 있으며 구조물 응답은 대략적으로 지반-구조물 시스템의 기본진동수인 4-6Hz 근처에서 가장 크게 증폭되고 있으며 2-3Hz보다 작은 저진동수 영역에서는 증폭이 거의 일어나지 않고 있다. 이러한 경향은 부계통의 내진설계시 구조물과의 공진을 피하고자 할 때 유의하여야 할 사항을 나타내고 있다.

그러나 수직방향의 경우 자유장 지반가속도가 가장 작은 EQ 13 (최대수직지반가속도 5.5 gal)의 경우(그림 4.8 (d)) 구조물 위치별 응답증폭현상이 뚜렷하지 않으며 수직방향 최대지반가속도가 점차 증가하면서 위치별 응답특성이 분명해지는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 대체로 70개의 지진에서 유사한 경향을 보이고 있다.

또한 증폭현상이 나타나는 진동수 구간도 EQ 13에서는 뚜렷하지 않으나 지반가속도의 증가에 따라 점차 뚜렷한 경향을 보이며 수직방향 지반-구조물 시스템의 기본 진동수는 20 Hz 이상으로 이동(shift) 되는 경향을 보여주고 있어 수직방향의 응답특성이 수평방향에 비해 부지에 가해지는 지반가속도값에 따른 변동성이 큼을 보여주고 있다.

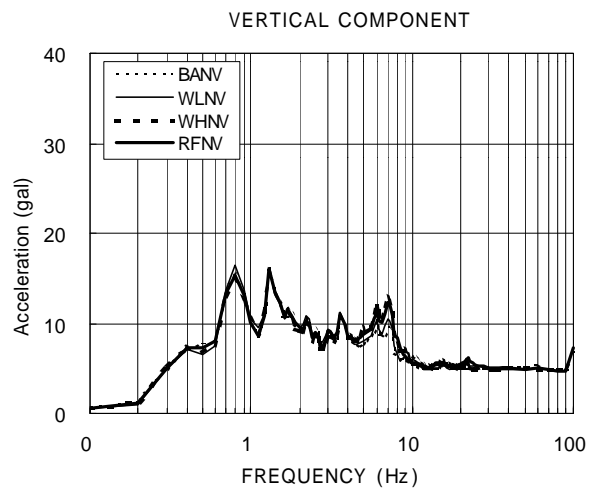
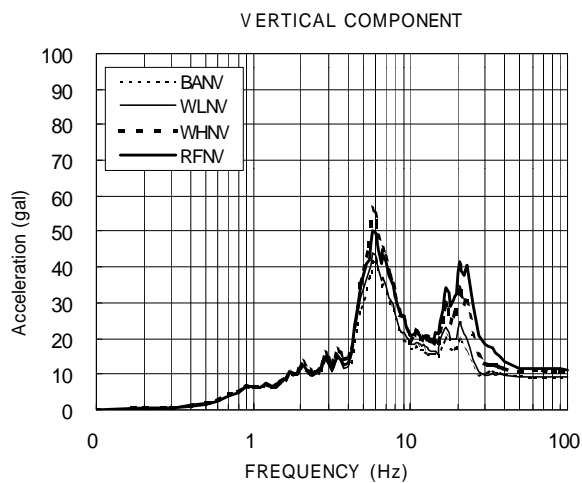
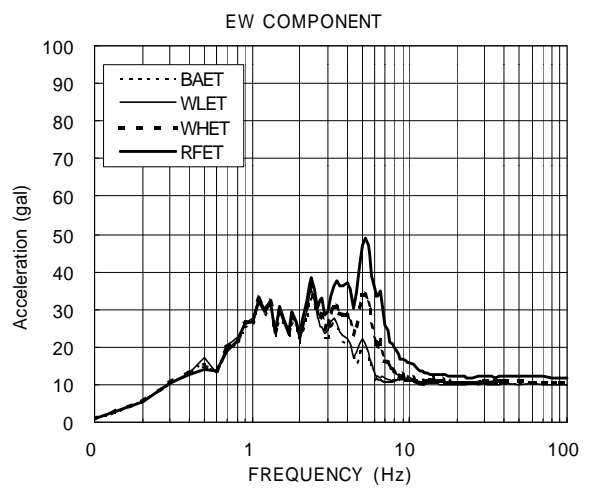
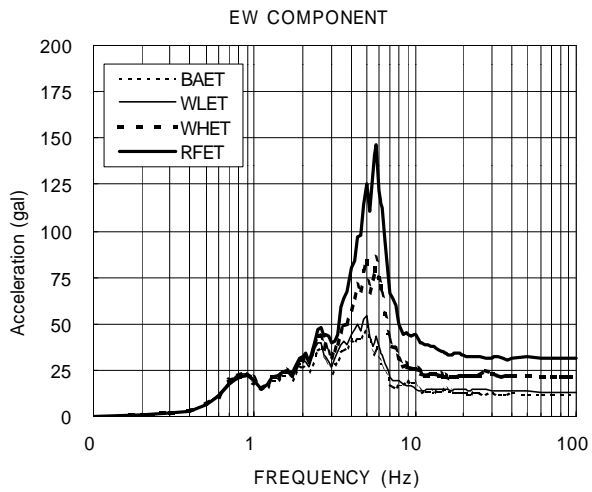
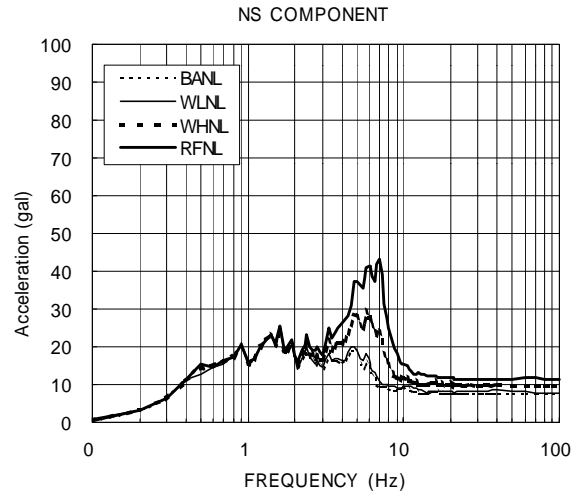
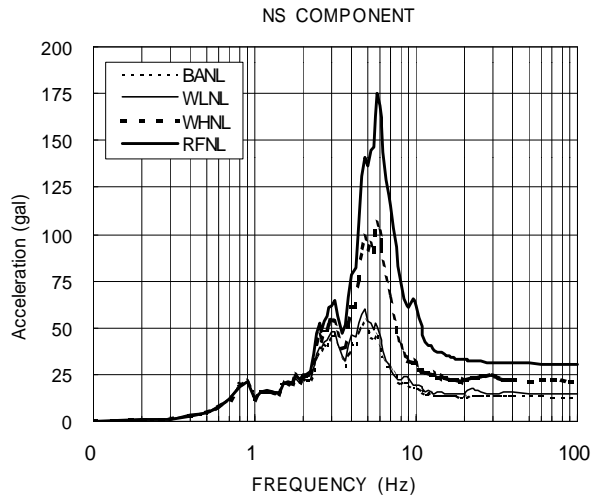
한편 모델 구조물 기초와 벽체 하부(WL)에서의 최대가속도가 서로 차이가 없으며 작게 나타나는 것은 이 시험모델 구조물이 벽체하부 위치까지 뒷채움되어 있기 때문으로 판단된다.



(a) EQ 7 (Damping 5 %)

(b) EQ 21 (Damping 5 %)

Fig 4.8 Comparison of Structural Responses at various Location (1/2)



(c) EQ 16 (Damping 5 %)

(d) EQ 13 (Damping 5 %)

Fig 4.8 Comparison of Structural Responses at various Location (2/2)

5. 결론

화련 LSST에서 계측된 70개의 실측 지진응답기록의 통계처리를 통하여 지반의 응답특성 및 구조물의 응답특성 분석, 지반-구조물 상호작용 현상의 규명을 위해 수행된 본 연구결과의 결론은 다음과 같다.

- (1) 지표면 근처에서의 지반운동(최대지반가속도) 증폭정도는 전체적으로 지표 근처에서 급격히 증폭되어 자유장 지반의 경우 지하 -15.8m 이하에서의 응답의 감소가 거의 멈추고 -15.8m 부터 지표까지 응답의 증폭은 약 2배정도 증폭된다. 이를 통하여 내진설계시 구조물 기초깊이 (약 10m이상) 에서의 지진동은 지표면 지진동의 60% 이상이 되도록 요구한 현재의 내진설계 기준의 적절성을 확인할 수 있었다.
- (2) 수평방향의 최대지반가속도와 4Hz 이상 진동수 영역에서의 응답스펙트럼은 지반 구조물 상호 작용에 의하여 수평방향으로 구조물 직경의 1.5배(기초슬래브 단부로부터)까지, 지하로 기초지반의 약 1.5배-2.0배까지 영향을 받는다. 수직방향은 수평방향에 비하여 영향이 작게났으며 변동성이 매우 크다.
- (3) 구조물로부터 거리에 따른 수평지반응답운동의 영향정도는 지진규모가 커질수록 거리별 차이가 작아졌으며 영향을 받는 진동수 구간도 줄어드는 경향을 보여주고 있으나 이에대한 추가적인 연구가 필요하다.
- (4) 지반의 지진응답은 Hualien 부지의 공간적 불균일성을 나타낸다.
- (5) 수평방향 구조물 응답은 4-6Hz 범위에서 가장 크게 증폭되며 이 진동수 범위는 대상 지반-구조물 시스템의 기본 진동수에 해당한다. 수직방향의 구조물 응답(증폭 진동수 범위)은 자유장 최대지반가속도의 크기에 따라 영향을 받는다.

참고문헌

- [1] 윤철호, 김기환, 이종립(1993), "Hualien 대형내진시험모델 국제공동연구사업", 대한 토목학회 학술발표대회 개요집(I), 원광대학교, 1993. 10
- [2] Tang, H.T et al. 1991, "The Hualien Large-Scale Seismic Test Soil-Structure Research," *Trans. of the 11th SMiRT*, K04/4, Tokyo, Japan
- [3] Kokusho, T. et al. (1993). "Geotechnical Investigation in the Hualien Large Scale Seismic Test Project." *Trans. of the 12th SMiRT*, K03/4, Stuttgart, Germany.
- [4] 윤철호등 (1997). 원전 지반-구조물 시스템 내진안전성 평가기술 개발, 최종보고서(KINS/GR-134), 한국원자력안전기술원.
- [5] Huang, W.-G., Liu, C.-C., Liu, W.-H., "LSST Strong-Motion Records from the Hualien, Taiwan Earthquake of 10 September 2000" IESER 2001-004, Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, for Taiwan Power Company, Taiwan, Oct.2001
- [6] Mail from R. F. Wang(TPC) to KINS, "Transmittal of Strong-Motion Earthquake Records Report and Data Files for Hualien LSST Array", June. 2002