

입력지진파 차이로 인한 지반응답 분산도 평가 연구 Evaluation of Ground Response Dispersion Caused by the Difference of Input Ground Motions

김진만¹⁾, Jin-Man Kim, 류정호²⁾, Jeong-Ho Ryu, 권기철³⁾, Gi-Chul Kweon, 심재호⁴⁾, Jae-Ho Sim,
김제경⁵⁾, Jae-Kyoung Kim

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 조교수, Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Pusan National University

²⁾ 부산대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student Dept. of Civil Engineering, Pusan National University

³⁾ 동의대학교 토목공학과 조교수, Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Dong-Eui University

⁴⁾ (주) 동림건설컨설팅 지반부 과장, Supervisor, Geotech. Dept. Dongrim Consultant Co., Ltd.

⁵⁾ 삼보기술단 이사, Director, Sambo Engineering Co.

SYNOPSIS : In 2007, Round Robin Test (RRT) on ground response analyses has been conducted by the technical committee of Soil Dynamics and Geotechnical Earthquake Engineering of Korean Geotechnical Society. Total 14 teams have reported 16 different results. This paper discusses the evaluation of ground response dispersion caused by the difference of input ground motions. In order to determine the characteristics of ground response, this study analysed the peak ground acceleration, predominant period, and response spectrum of reported ground surface motions. The results suggest that ground response dispersion due to the difference of input ground motions can be significant.

Keywords : Round Robin Test, Ground Motion, Ground Response Analysis, Dispersion

1. 서론

2007년 한국지반공학회 지반진동위원회가 주최한 지반응답해석 Round Robin Test(이하 RRT)에는 총 14개 기관이 참여하였고 해석방법에 따라 총 16개의 결과를 도출하였다. 지반응답해석 RRT는 3개의 입력지진파와 3개소의 지반이 모든 참여기관에 제공되었다. 입력지진파는 국내에서 많이 사용되고 있는 Hachinohe, Ofunato 파 그리고 인공지진파가 주어졌다. 본 논문은 지반조건이나 해석기법 등 여타 조건이 같은 상태에서 입력지진파의 차이에 의해서만 발생하는 지반응답해석의 분산도를 평가하고 있다. 입력지진파에 따른 지반응답해석 결과의 분산도를 평가한 연구사례는 국내외를 막론하고 비교적 드문 편이다(Wang and Kavazanjian, 1987, Constantinou et al., 1984, Yegian et al., Kim, 2003, Kim, 2007).

2. 입력지진파 개요 및 특성

2개의 실측파와 1개의 인공지진파, 총 3개의 지진파가 입력지진파로 사용되었다. 지진구역 I, 재현주기 1000년에 상응하는 수준이며, 실측파는 비교적 장주기 특성을 가진 Hachinohe파와 상대적으로 단주기 특성을 가진 Ofunato파가 사용되었다.

2.1 Hachinohe 지진파

1968년 5월 16일 00시48분에 일본 아오모리현 동쪽바다에서 발생하였으며, 규모 7.9이었다. 주 피

해지역은 토호쿠 북부와 홋카이도 남부이고, 연약지반에 많은 피해가 발생하였다. 여진이 약 45일동안 지속되었으며 규모 또한 7.2에서 7.5로 굉장히 큰 것으로 알려져 있다. 지진해일(쓰나미)에 의한 피해도 상당수 발생했고, 지진에 의한 화재발생율이 비교적 높았던 것으로 알려져 있다. 최대가속도 0.154 g 이고 탁월주기는 2.67초 이다(그림 1, 최원호, 1999).

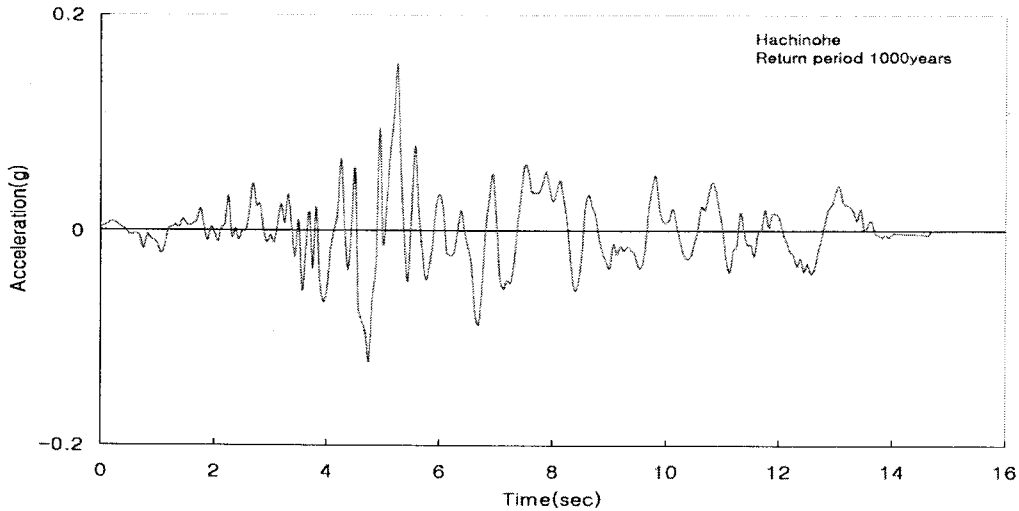


그림 1. RRT 참여기관에 제공된 수정된 Hachinohe 지진파

2.2 Ofunato 지진파

1978년 6월 12일 일본 Miyagi Ken-Oki의 Ofunato항에서 측정된 지진파는 38.2 N 132 E 지점에 발생하여 28명이 죽고 1325명의 부상자를 가져온 규모 7.4의 강진이었다. 토호쿠 대학교의 9층 건물의 옥상에서 측정된 지반가속도가 1.02 g 이상으로 기록되었다고 한다. 최대가속도 0.154 g 이고, 탁월주기는 0.302초 이다(그림 2, 최원호 1999).

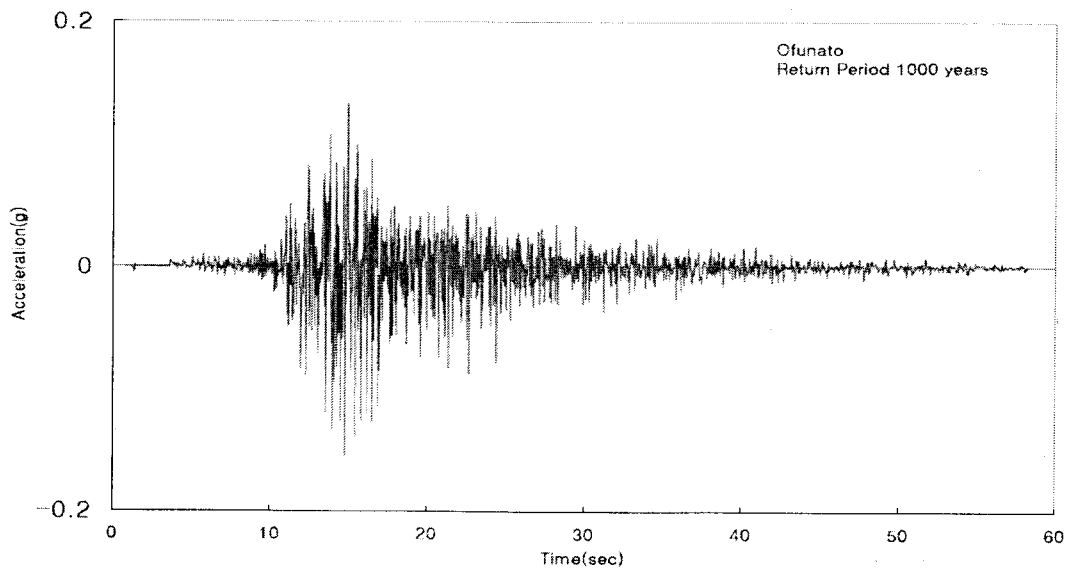


그림 2. RRT 참여기관에 제공된 수정된 Ofunato 지진파

2.3 인공지진파

국내 내진설계기준에 따라 작성된 그림 3과같은 인공지진파가 제공되었다. 최대가속도 0.154 g이고 탁월주기는 0.413초였다(그림 3).

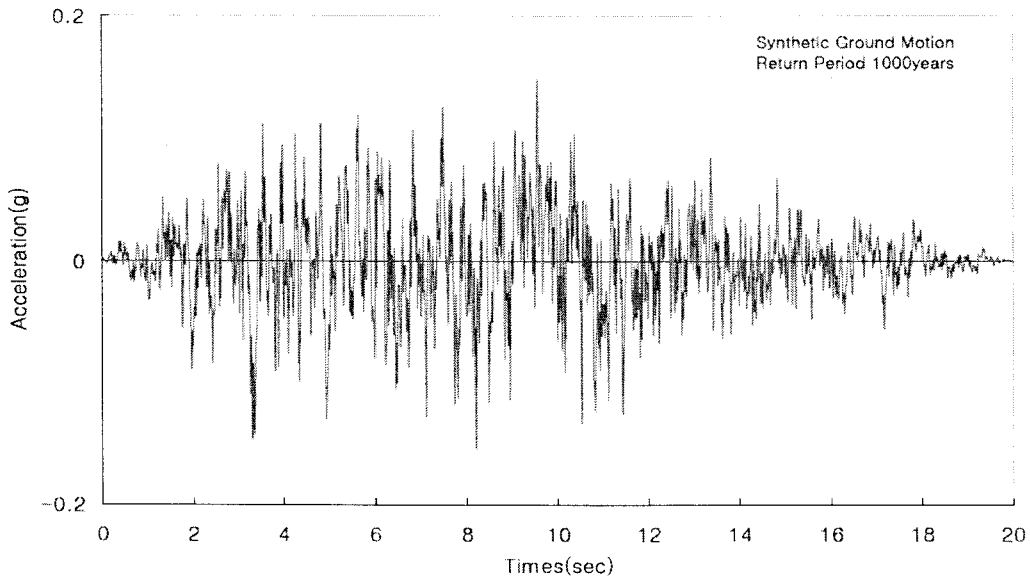


그림 3. RRT 참여기관에 제공된 인공 지진파

2.4 설계응답스펙트럼과 비교

해석에 사용된 지진파를 내진설계기준연구(Ⅱ)(건설교통부, 1997) 에서 제시한 설계응답스펙트럼과 비교해 보았다. 보통암인 S_B 지반으로, 지진구역은 I 구역으로 정하여 지진계수를 산정하였다(표 1). 작성된 설계응답스펙트럼과 입력 지진파의 응답스펙트럼을 한 차트에 도시하였다. Hachinohe 파는 전반적으로 표준설계응답스펙트럼과 잘 맞지 않는 경향을 보였고, Ofunato 파와 인공지진파는 상대적으로 표준설계응답스펙트럼과 비교적 잘 일치하는 경향을 보인다(그림 4).

표 1. 설계응답스펙트럼에 사용된 지진 파라미터

구 분		계 수
단주기 지진계수	C _a	0.11
장주기 지진계수	C _v	0.11
통제주기	T _s (sec)	0.4
	T ₀ (sec)	0.08

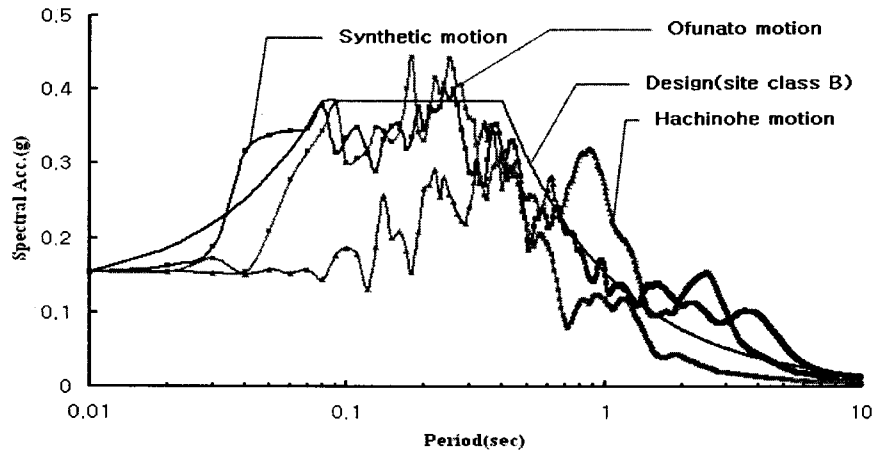


그림 4. 표준설계응답스펙트럼과 입력지진파 응답스펙트럼과의 비교

3. 입력지진파에 따른 지반응답 분산특성

전체 16개의 해석결과로부터 분석된 입력지진파에 따른 지반응답 분산특성을 수행기관별로 분류하였다. 본 논문에서는 해석편의상 지반응답 특성을 최대가속도(PGA), 탁월주기(Predominant Period), 그리고 응답스펙트럼(Response Spectrum)등으로만 구분하였으며 최대가속도와 탁월주기 그리고 지표면 응답스펙트럼에 대해 각 수행기관별 분산특성과 지진파별 분산특성을 분석하였다.

3.1 지표면 최대가속도

그림 5, 6, 7의 최대가속도(PGA)분포는 각 해석결과의 최대가속도 주상도에서 지표면 최대가속도를 사용하였고, 해석대상 site 별로 각 지진파에 따른 지반응답 분산 특성을 평균과 함께 나타내었다(그림 5, 6, 7).

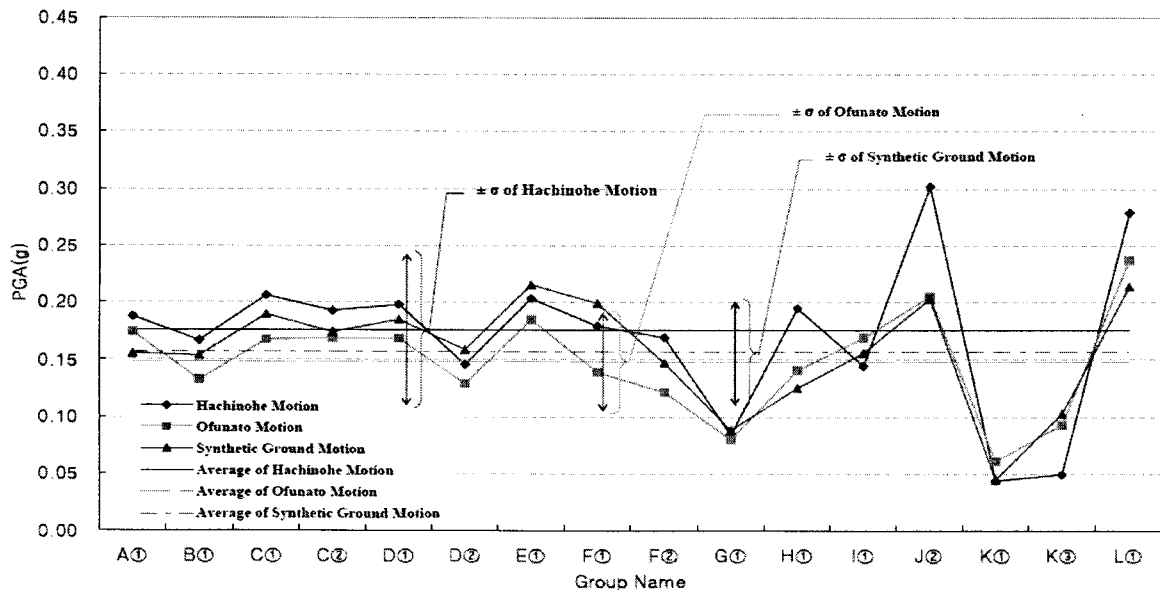


그림 5. 각 해석결과별 지표면 최대가속도 분포(site 1)

여기서, 가로축의 알파벳 대문자는 수행기관을 나타내고 이어지는 번호는 ①: 등가선형해석, ②: 비선형 전응력 해석, ③: 비선형 유효응력 해석을 나타낸다. site 1의 경우, 일부 결과를 제외하면 대체로 지표면 최대가속도의 범위가 0.15g~0.20g 사이에 분포되어 있으나, G, K 결과에서는 0.10g 이하에 위치한 것을 볼 수가 있고 J, L 결과는 0.30g 까지 증폭하는 것을 볼 수가 있다. 입력지진파별로 살펴봤을 때 대부분 결과에서 장주기 특성을 가진 Hachinohe 파의 증폭정도(12%)가 가장 컸고, 다음은 인공지진파(2%), Ofunato(-4%) 순으로 나타났다. 이러한 결과는 site 1의 지층구조와 각 지층의 물성이 장주기 진동을 증폭시키고 단주기 진동을 감쇠시키는 역할을 한 것에서 비롯됐다고 판단되며 비교적 연약한 지층이 깊은 곳까지 분포하는 점을 고려할 때 예상할 수 있는 결과로 판단된다.

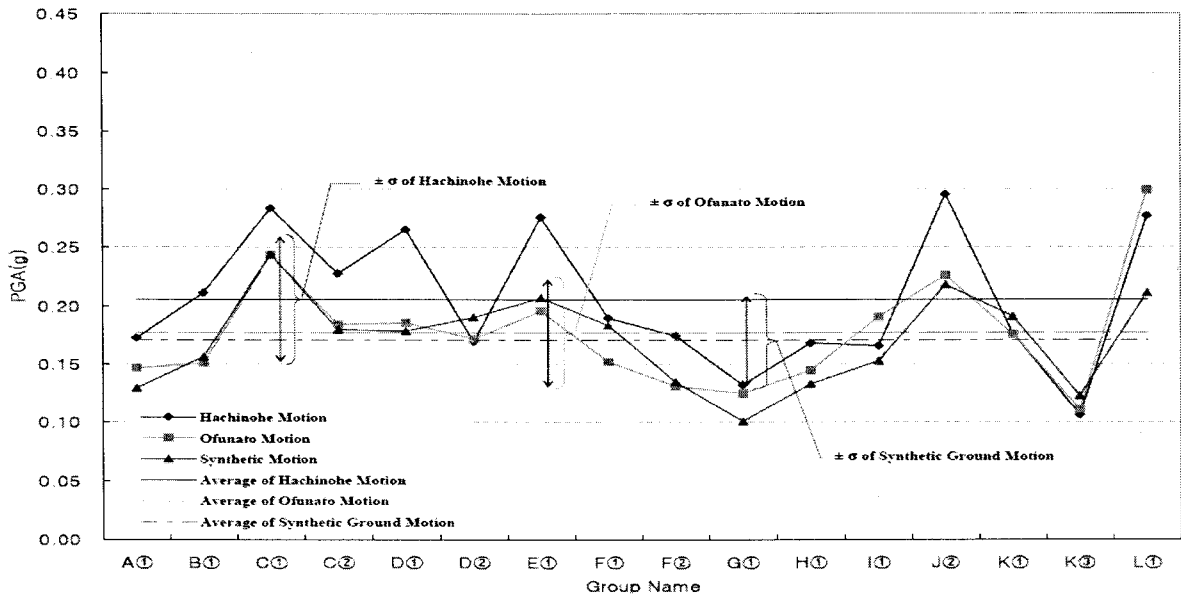


그림 6. 각 해석결과별 지표면 최대가속도 분포(site 2)

site 2에서는 대체로 지표면 최대가속도의 범위가 0.15g~0.25g 사이에 분포되어 있고, G, K 결과에서는 0.15g 이하에 위치한 것을 볼 수가 있으며 J, L 결과는 0.30g 까지 증폭하는 것을 볼 수가 있다. 전체적으로 살펴봤을 때 평균적으로 site 1보다 큰 증폭을 보였고, site 1과 마찬가지로 입력지진파 중에서는 Hachinohe 파의 증폭정도(34%)가 가장 컸으며 Ofunato(15%), 인공지진파(11%) 순으로 나타났다. site 1과 마찬가지로 site 2도 연약한 지층이 두껍게 분포하는 점을 고려한다면 이해가 가능한 것으로 보인다.

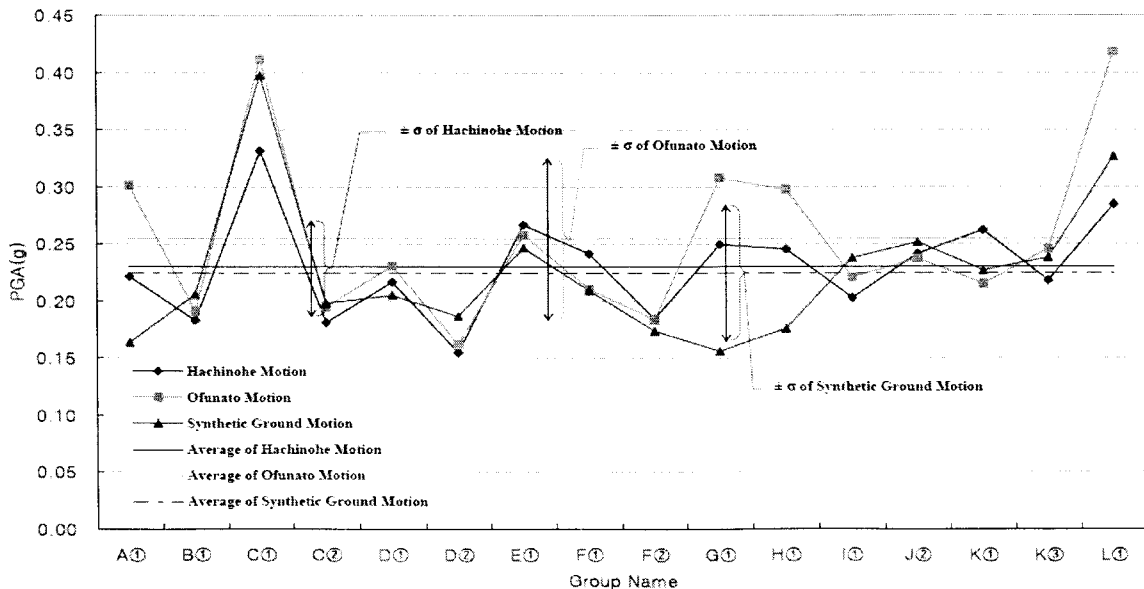


그림 7. 각 해석결과별 지표면 최대가속도 분포(site 3)

site 3에서는 대체로 지표면 최대가속도의 범위가 0.15g~0.3g 사이에 분포되어 있고, C, L 그룹에서는 0.40g 이상까지 증폭하는 것을 볼 수가 있다. site 1과 2에서와 같이 G, K 결과가 작게 나타나거나 J 결과가 크게 나타나는 현상은 site 3에서는 나타나지 않았다. 위의 두 개의 지반과는 달리 site 3에서는 단주기 특성을 보이는 Ofunato 파가 다른 입력파들보다 큰 증폭정도(66%)를 보인다. site 3는 지반조사 결과 중 표준관입시험의 결과를 비교했을때 site 3의 지반강성이 site 1, site 2보다 비교적 큰 강성을 가지고 있기 때문에 단주기 특성을 가진 Ofunato 파가 site 3에서 지반증폭이 큰 양상을 보였고, 그에따라 표준편차도 큰 범위를 가진 것으로 판단된다. 입력지진파별 지표면 최대가속도의 평균, 표준편차와 증폭율을 각 site 별로 정리하였다(표 2).

표 2. 입력지진파별 지표면 최대가속도의 평균, 표준편차와 증폭율

단위: g

구 분		평균	표준편차	증폭율(%)
site 1	Hachinohe	0.172	0.067	12
	Ofunato	0.148	0.044	-4
	Synthetic	0.157	0.046	2
site 2	Hachinohe	0.206	0.056	34
	Ofunato	0.177	0.047	15
	Synthetic	0.171	0.039	11
site 3	Hachinohe	0.230	0.043	49
	Ofunato	0.256	0.073	66
	Synthetic	0.225	0.060	46

3.2 지표면 응답 탁월주기

탁월주기(Predominant Period)는 각 해석결과의 지표면 가속도 시간이력을 푸리에 변환을 하여 푸리에 스펙트럼으로부터 결정하였다. Narrow Band에서는 쉽게 최대값을 찾을 수 있었지만 Broad Band에서는 최대값의 결정을 위하여 스무딩 기법을 사용하였다. 그 결과를 그림 8, 9, 10과 같이 해석 대상 site 별로 나타내었다. 본 논문에서는 편의상 지표면 응답의 탁월주기에서 입력지진파의 탁월주기를 빼 값을 탁월주기 변화로 정의하였다.

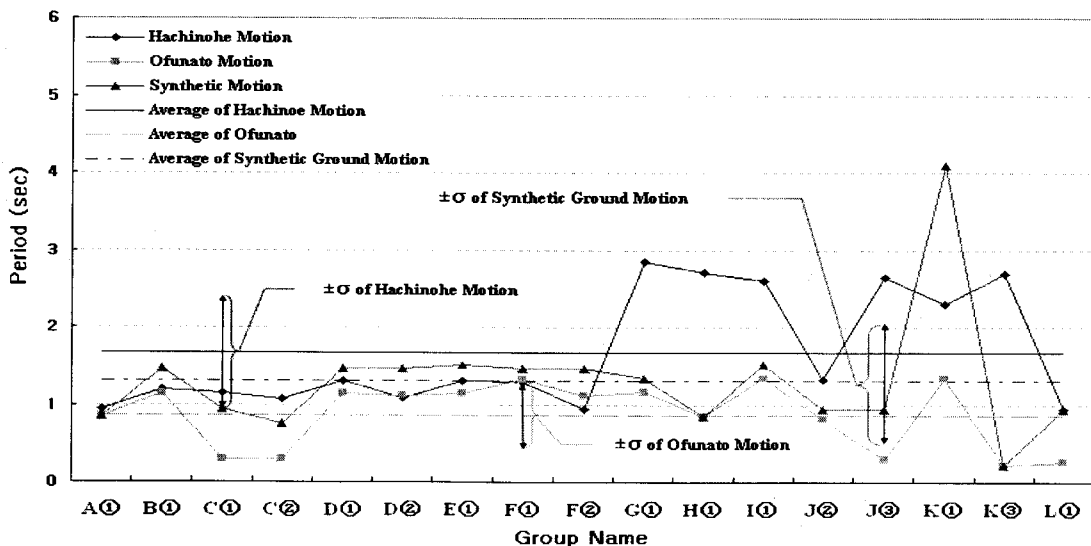


그림 8. 각 해석결과별 탁월주기 분포(site 1)

그림 8에서 볼 수 있듯이 site 1은 전반적으로 0.2초에서 4초 사이에 탁월주기가 분포되어 있다. 입력지진파별로 살펴보면 Hachinohe 파가 평균 1.67초, 주기변화가 -1초로 입력지진파중 가장 큰 변화를 보였고, 인공지진파(+0.9초), Ofunato 파(+0.57초) 순으로 탁월주기 변화가 나타났다. site 1에서 Hachinohe 파는 단주기 성분이 강화되었고, Ofunato와 인공지진파는 장주기 성분이 강화되었음을 알 수 있다. 이러한 주기 변화 경향은 site 1의 고유주기가 약 1.08초, Hachinohe 입력파 탁월주기가 2.67초, Ofunato 입력파와 인공지진파가 탁월주기가 각각 0.30초와 0.41초임을 고려하면 예상과 일치되는 결과로 볼 수 있다.

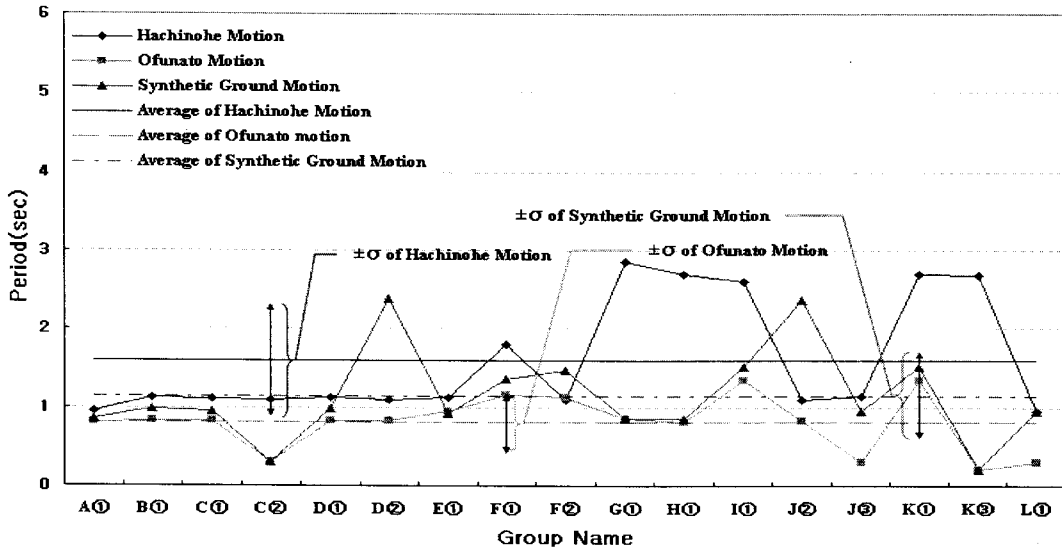


그림 9. 각 해석결과별 탁월주기 분포(site 2)

site 2는 전반적으로 0.2초에서 3초 사이에 탁월주기가 분포되어 있다. 입력지진파별로 살펴보면 Hachinohe 파가 평균 1.6초, 주기변화가 -1.07초로 site 1처럼 가장 큰 평균과 주기변화를 보였고, 인공지진파(+0.73초)와 Ofunato 파(+0.50초) 순으로 주기변화가 나타났다. Site 2의 고유주기가 0.97초로 Site 1과 비슷한 점을 고려할 때 같은 원인에 의한 결과로 판단된다.

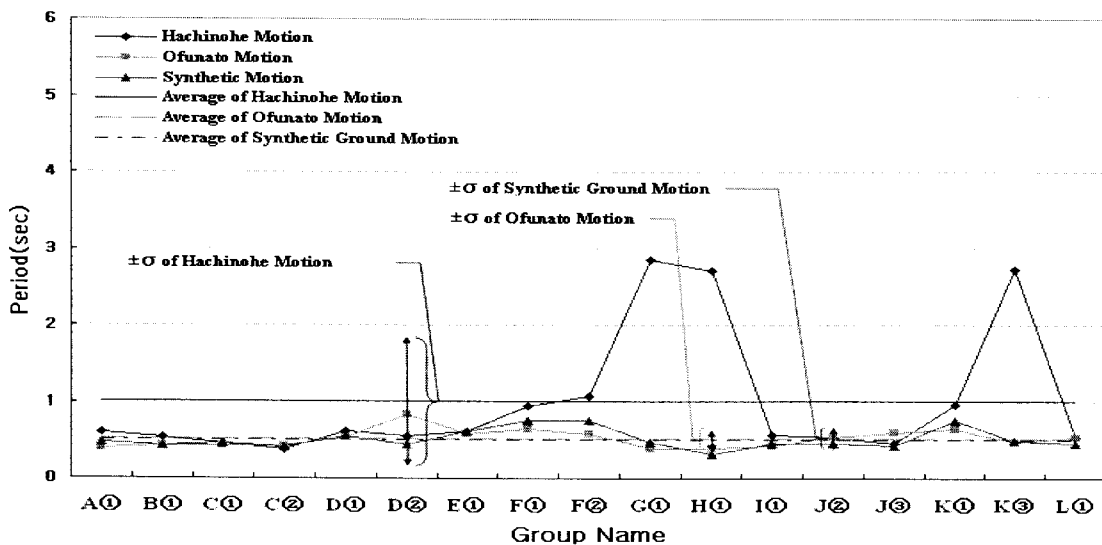


그림 10. 각 그룹별 탁월주기 분포(site 3)

site 3에서는 Hachinohe 파를 제외한 나머지 두 개의 입력지진파에서는 Hachinohe 파에 비해 분산정도가 작았다. 입력지진파별로 살펴보면 Hachinohe 파는 평균 1.01초, 주기변화 -1.66초로 입력지진파는

물론, 다른 site보다 상대적으로 큰 주기변화를 보였다. 반면, Ofunato와 인공지진파는 주기변화가 Hachinohe 파에 비해 매우 작은값(Ofunato 파: +0.22초, 인공지진파: +0.10초)을 보였다. 이러한 주기변화 경향은 site 3의 고유주기가 약 0.66초로서 site 1과 site 2에 비해 상대적으로 단주기 특성을 보이는 점을 고려할 때 예상되는 결과로 판단할 수 있다. 입력지진파별 지표면 응답의 탁월주기의 평균, 표준편차와 주기변화를 각 site별로 정리하였다(표3).

표 3. 입력지진파별 지표면 응답의 탁월주기의 평균, 표준편차와 주기변화

단위: 초

구 분		평균	표준편차	주기변화
site 1	Hachinohe	1.67	0.73	-1.00
	Ofunato	0.87	0.41	+0.57
	Synthetic	1.31	0.78	+0.90
site 2	Hachinohe	1.60	0.74	-1.07
	Ofunato	0.80	0.34	+0.50
	Synthetic	1.14	0.57	+0.73
site 3	Hachinohe	1.01	0.83	-1.66
	Ofunato	0.52	0.12	+0.22
	Synthetic	0.51	0.13	+0.10

4. 지표면 응답스펙트럼

해석대상 지반별로 입력지진파에 대한 모든 총 16개의 지표면 응답스펙트럼을 평균(Average) 과 함께 표준 설계 응답 스펙트럼위에 도시하였다. 해석대상 site를 지표면부터 약 30m의 깊이까지 평균한 N치를 바탕으로 분류한 결과 S_D 지반으로 판단하였으며, 그에 따른 표준 설계 응답 스펙트럼을 작성하였다(표 4, 그림 11, 12, 13).

표 4. 설계응답스펙트럼에 사용된 지진 파라미터

구 분		계 수
단주기 지진계수	C _a	0.16
장주기 지진계수	C _v	0.23
통제주기	T _s (sec)	0.58
	T ₀ (sec)	0.12

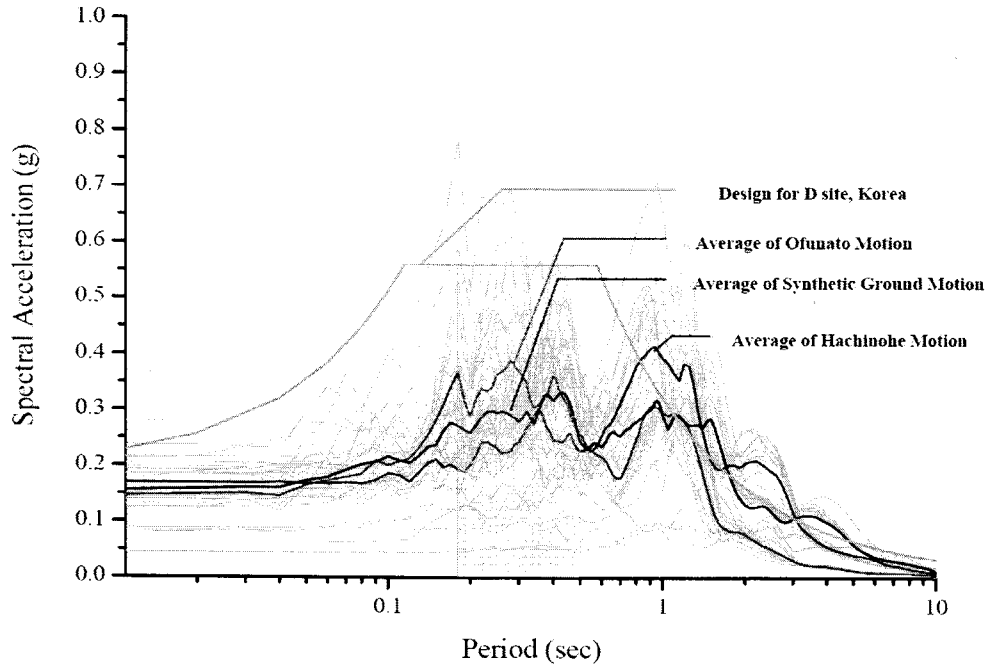


그림 11. 입력지진파에 따른 지표면 응답스펙트럼 분포(site 1)

모든 해석결과를 입력지진파별로 계산된 응답스펙트럼의 평균과 함께 도시한 결과, site 1에서는 그림 11에서 볼 수 있듯이 일부 장주기 영역을 제외하면 전체적으로 표준설계응답스펙트럼보다 증폭이 작게 나타나고, 입력지진파별로 살펴보면 단주기 특성을 지닌 Ofunato 파와 인공지진파는 주기 0.2~0.4 초 영역에서 증폭을 보이고 있다. 반면 장주기 특성을 가진 Hachinohe 파는 1~2 초 사이에서 증폭을 보이고 있다. 전체적으로는 3개의 입력지진파에 대한 해석결과 모두가 1초이하 주기에서 표준스펙트럼에 크게 못 미치는 양상을 보이고 있다. 이는 최대가속도 분포에서 설명한 바와 같이 연약한 지층이 비교적 두꺼운 지반구조와 관련이 있는 것으로 판단된다.

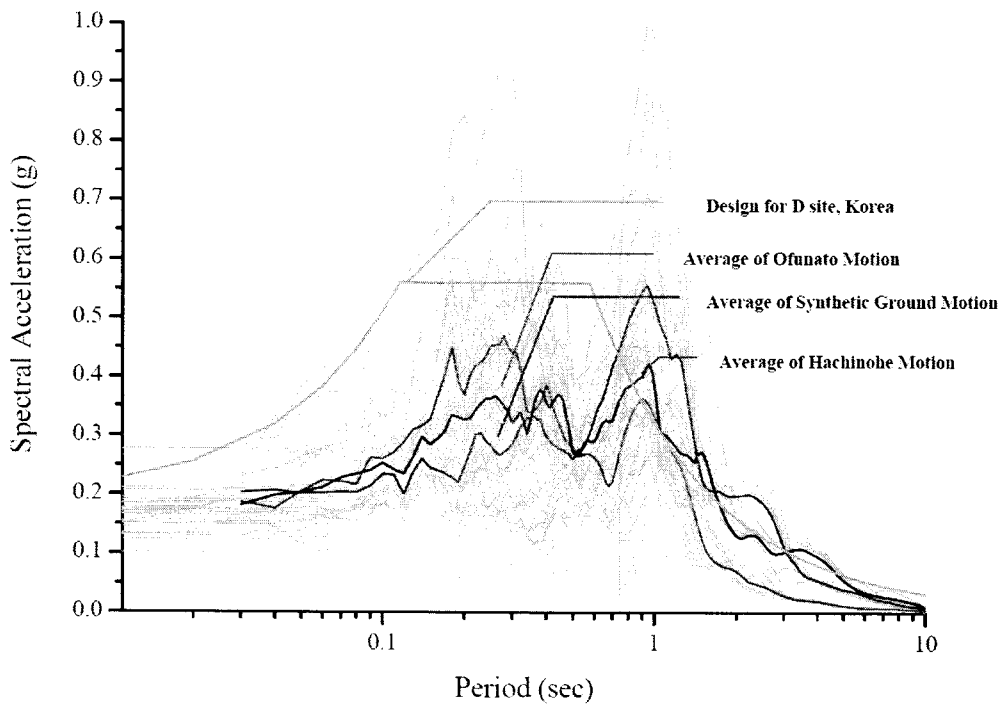


그림 12. 입력지진파에 따른 지표면 응답스펙트럼 분포(site 2)

그림 12를 보면 site 2에서도 site 1과 같이 일부 중장주기 영역을 제외하면 각 지진파에 따른 평균 응답스펙트럼이 표준설계응답스펙트럼보다 작은 범위안에 분포하는 경향을 보이고 있다. 입력지진파별로 살펴보면 단주기 특성을 지닌 Ofunato 파는 주기 0.2~0.4 초 영역에서 다소 증폭을 보이고 있다. 인공지진파는 Hachinohe 파와 같이 주기 1초 부근 영역에서 다소 큰 증폭을 보이고 있다. site 2에서 각 입력지진파에 대한 지표면 응답스펙트럼과 표준설계응답스펙트럼을 비교해 봤을때 증폭경향은 site 1에서와 유사하나, Hachinohe 파와 인공지진파의 경우 주기 1초 부근 영역에서 site 1에 비해 증폭이 다소 증가된 것을 알 수있다.

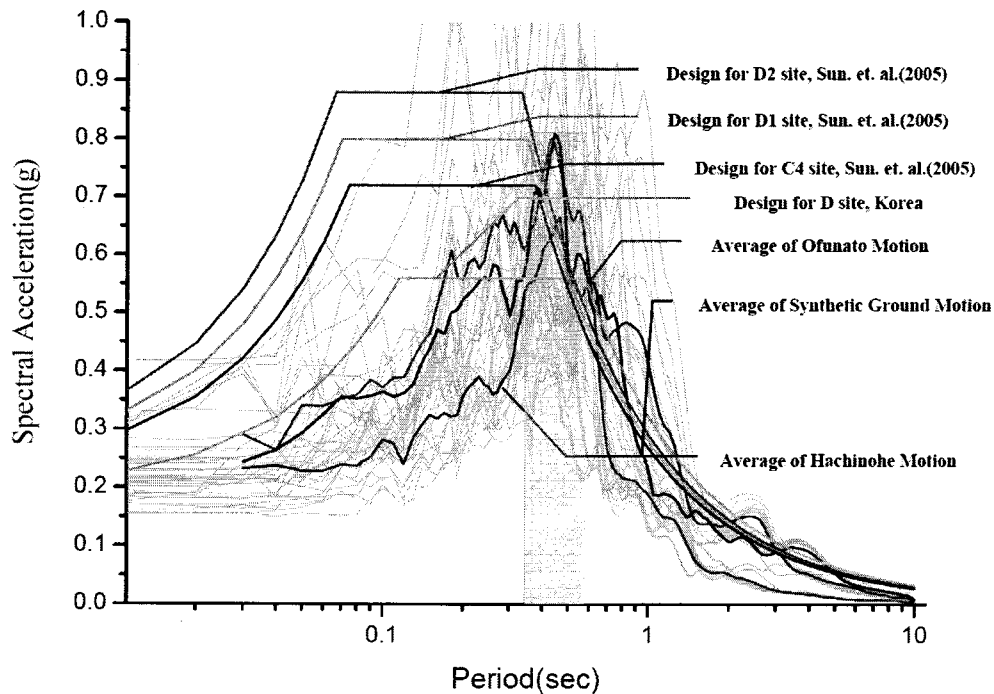


그림 13. 각 그룹별 지표면 응답스펙트럼 분포(site 3)

site 3에서는 site 1과 site 2에 비해 입력지진파 3개 모두 큰 증폭을 보여주고 있으며, 특히, Ofunato 파와 인공지진파는 주기 0.35~0.6 초 영역에서 표준설계응답스펙트럼의 응답스펙트럼 가속도보다 크게 나타난다. 그리고 장주기 특성을 가진 Hachinohe 파도 site 3에서는 주기 1~2 초 영역보다는 주기 0.35~0.6 초 영역에서 가장 큰 증폭을 보이고 있다. 이는 site 3의 고유주기가 약 0.66초에 해당하는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

현재 국내 내진설계에서 사용되고 있는 표준설계응답스펙트럼 및 지반분류체계는 강진 지역중의 하나인 미국 기준을 준용하고 있다(Kim, 2002). 최근 국내의 일부 연구결과는 현재 국내 내진설계기준이 지반특성에 비하여 단주기 영역의 증폭을 과소평가하고 있는 반면, 장주기 영역의 증폭은 과대평가하고 있는 것으로 보고하고 있다(선창국 등, 2005, 윤종구 등, 2006). 이에 따라 본 논문에서는 그림 13에 나타난 바와 같이 한 국내 연구자의 제안(선창국 등, 2005)에 따라 기존의 국내 내진설계기준의 지반분류 S_c 및 S_D 의 세부분류와 지표면 부근 심도까지의 평균 V_s 인 V_{s20} , V_{s15} 와 V_{s10} 의 추가기준을 적용하여 한 곳에 도시해 보았다. 금번 RRT 해석과 분석자료는 지반조사결과(표준관입시험, 콘관입시험)로만 제한되어있기 때문에 편의상 추가로 전단파 속도를 경험식(Imai & Tonouchi, 1982)을 통해 N치로 환산하여 지반분류를 실시하였다. site 3의 N치는 지표면에서 깊이 30m, 20m, 15m, 10m의 평균값으로 각각 33, 26, 21, 14회로 나누어져 C4, D1, D2 지반으로 분류되었다. 분류된 지반을 기준으로 작성된 응답스펙트럼을 지반응답해석 결과와 비교해 본 결과, D1지반의 응답스펙트럼이 가속도 증폭의 최대크기를 주기 0.35~0.6 초 영역에서 비슷하게 반영하고 있으나, 단주기 및 중간주기(0.35 초 이하)에서는 큰 차이가 있

는 것을 알 수 있다. S_D 지반 표준설계응답스펙트럼과 비교해 보면 주기 0.35~0.6초 등 일부 영역을 제외하고는 전체적으로는 해석결과의 평균과 표준설계응답스펙트럼이 비슷한 양상을 보여주고 있다. 이는 site 3지반이 site 1과 site 2에 비해 상대적으로 단주기 특성을 보이는 것과 관련이 있는 것으로 보인다.

5. 요약 및 결론

지반응답해석 Round Robin Test 결과를 분석하여 입력지진과 차이로 인한 지반응답 분산도에 대해 살펴보았으며, 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- (1) site 1의 경우 대부분의 결과에서 장주기 특성을 가진 Hachinohe 파의 지표면 최대가속도 증폭율(12%)이 가장 컸고, 인공지진파(2%), Ofunato 파(-4%) 순으로 나타났다. 이러한 결과는 비교적 연약한 지층이 깊은 곳까지 분포하는 site 1의 지반조건이 장주기 진동을 증폭시키고 단주기 진동을 감쇠시키는 역할을 한 것에서 비롯됐다고 판단된다.
- (2) site 2에서는 전체적으로 site 1보다 큰 증폭을 보였으나 site 1과 마찬가지로 Hachinohe 파의 증폭율(34%)이 가장 컸으며, Ofunato(15%), 인공지진파(11%)순으로 나타났다. site 2도 site 1과 마찬가지로 연약한 지층이 두껍게 분포하는 점이 이러한 결과를 준 것으로 판단된다.
- (3) 위 두 개의 지반과는 달리 site 3에서는 단주기 특성을 보이는 Ofunato 파가 가장 큰 증폭을 보였다. 이는 site 3이 site 1과 site 2에 비해 상당히 짧은 고유주기 특성을 보이기 때문으로 판단된다.
- (4) 입력지진파와 지표면 응답의 탁월주기를 비교해보면 site 1에서 Hachinohe 파는 단주기 성분이 강화되었고, Ofunato와 인공지진파는 장주기 성분이 강화되었음을 알 수 있다. 이러한 주기변화 경향은 site 1의 고유주기가 약 1.08초, Hachinohe 입력파 탁월주기가 2.67초, Ofunato 입력파와 인공지진파가 탁월주기가 각각 0.30초와 0.41초임을 고려할 때 예상되는 결과로 판단된다. 지반조건이 유사한 site 2의 결과도 비슷한 양상을 보였다.
- (5) site 3에서 Hachinohe 파는 주기변화 -1.66초로 site 1과 site 2보다 상대적으로 큰 주기변화를 보였다. 반면 Ofunato와 인공지진파는 Hachinohe 파에 비해 매우 작은 주기변화(Ofunato파: +0.22초, 인공지진파: +0.10초)를 보였다. 이것은 site 3의 지반의 고유주기와 단주기 특성을 가진 Ofunato와 인공지진파의 주기가 비슷해 Ofunato와 인공지진파의 주기변화가 작았으나 장주기 특성을 가진 Hachinohe 파와 지반의 고유주기의 차이가 커 Hachinohe 파의 경우 단주기 성분이 크게 강화된 때문으로 판단된다.
- (6) site 1에서는 1초 이상의 장주기 영역을 제외하면 전체적으로 지표면 응답스펙트럼이 표준설계응답스펙트럼에 크게 못 미치는 양상을 보이고 있다. 단주기 특성을 지닌 Ofunato 파와 인공지진파는 주기 0.2~0.4초 영역에서 증폭을 보이는 반면 장주기 특성을 가진 Hachinohe 파는 1~2초 사이에서 증폭을 보이고 있다. 이러한 결과는 비교적 연약한 지층이 깊은 곳까지 분포하는 site 1의 지반조건과 관련이 있는 것으로 판단된다. 지반조건이 유사한 site 2에서도 비슷한 결과를 얻었다.
- (7) site 3에서는 site 1과 site 2에 비해 모든 입력지진파가 큰 증폭을 보여주고 있으며, 특히 Ofunato 파와 인공지진파는 주기 0.35~0.6초 영역에서 표준설계응답스펙트럼의 응답스펙트럼 가속도보다 크게 나타난다. 그리고 장주기 특성을 가진 Hachinohe 파도 site 3에서는 주기 1~2초 영역보다는 주기 0.35~0.6초 영역에서 가장 큰 증폭을 보이고 있다. 이는 site 3의 고유주기가 약 0.66초에 해당하는 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.
- (8) 이상의 결과로부터 비록 최대가속도가 같더라도 입력지진파들의 주파수 특성이나 강진성분 위치 등의 시간이력 형상특성이 상이하면 지반응답해석 결과의 증폭정도와 주파수 특성에 큰 차이가 발생할 수 있다는 점을 확인할 수 있었으며, 한국형 지반분류와 표준응답스펙트럼에 대한 비교 결과는 비록 특정한 지반조건과 입력지진파를 사용한 결과이기는 하나 이에 대한 신중한 접근과 추가적인 연구가 필요하다는 점을 시사한다.

감사의 글

본 지반응답해석 Round Robin Test에 참여하여 결과 자료를 제공해 주신 동림컨설팅, 동아대학교, 동의대학교, 부산대학교, 삼보기술단, 서경대학교, 서울대학교, 연세대학교, 원광대학교, 한국과학기술원, 한국유지관리, 한국지질자원연구원, 한양대학교 그리고 현대건설의 참여자들(이상 가나다순)에게 감사드립니다.

참고문헌

1. 건설교통부(1997), 내진설계기준연구(Ⅱ), 한국지진공학회.
2. 선창국, 정충기, 김동수(2005), "국내 내륙의 설계 지반 운동 결정을 위한 지반 증폭 계수 및 지반 분류 체계 제안", 한국지반공학회 논문집, 제 21권, 제 6호, pp.101~115.
3. 윤종구, 김동수, 방은석(2006), "국내 지반특성에 적합한 지반분류 방법 및 설계응답스펙트럼 개선에 대한 연구(Ⅲ) - 설계응답스펙트럼 개선방법", 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 제 2호, pp.63~71.
4. 최원호(1999), "최원호의 내진설계 이야기(1999-2007)", [http:// eqstory.skku.ac.kr/](http://eqstory.skku.ac.kr/)
5. Constantinou, M. C., Gazetas, G. and Tadjbakhsh, I. (1984), "Stochastic seismic sliding of rigid mass supported through nonsymmetric friction", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 12, pp.777-793.
6. Wang, J. N. and Kavazanjian, J. E., "A nonstationary probabilistic model for pore pressure development and site response due to seismic excitation," *Report no. 84*, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford University, 1987
7. Yegian, M. K., Marcianno, E. A. and Ghahraman, V. G. (1991), "Earthquake-induced permanent deformations - probabilistic approach", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117(1), pp.35-50.
8. Imai, T. and Tonouchi, K. (1982), "Correlation of N-value with S-wave Velocity and Shear Modulus", *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, pp.57-72.
9. Kim, D. S., Chung, C. K., Sun, C. G., and Bang, E. S.(2002), "Site assessment and evaluation of spatial earthquake ground motion of Kyeongju," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp.371~387.
10. Kim, J. (2003), "The Importance of Geotechnical Variability in the Analysis of Earthquake-Induced Slope Deformations", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.19, No.2, pp.123-133.
11. Kim, J. (2007), "Reliability Analysis of Seismically Induced Slope Deformations", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.3, pp.111-121.