

## 지반응답해석 Round Robin Test 결과 종합적 분석 연구 Comprehensive Evaluation of Results of Ground Response Analysis Round Robin Test

박두희<sup>1)</sup>, Duhee Park, 윤종구<sup>2)</sup>, Jong-Ku Yoon, 박영호<sup>3)</sup>, Young-Ho Park, 안창윤<sup>4)</sup>, Chang-yoon Ahn, 김재연<sup>5)</sup>, Jae-Yeon Kim

- <sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 전임강사, Assistant Prof., Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.
- <sup>2)</sup> 한국유지관리 이사, Korea Maintenance & Control Co., Ltd.
- <sup>3)</sup> 현대건설 부장, Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.
- <sup>4)</sup> 삼보기술단, Sambo Engineering Co., Ltd.
- <sup>5)</sup> 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

**SYNOPSIS** : This paper performed a comprehensive evaluation of the results of the 2007 Ground Response Analysis Round Robin Test, at which 14 institutions and individuals participated. The submitted results showed significant discrepancies. The main reason for this difference has been attributed to the dispersion in the estimated shear wave velocity profiles and dynamic soil curves. It is therefore concluded that accurate evaluation of the material properties is of primary importance for reliable estimation of the ground vibration. Evaluation of the effect of the analysis method showed that the equivalent linear analysis overestimates the peak ground acceleration, but overall the results are similar to a total stress nonlinear analysis. However, the total and effective stress nonlinear analyses show distinct discrepancies, the effective stress analyses consistently resulting in a lower response due to the development of the excess pore water pressure and thus softer response.

**Keywords** : Round Robin Test, Site Response Analysis, Material Properties, Analysis Method, Dispersion

### 1. 서론

지반증폭현상은 지반구조물의 내진설계시 요구되는 응답스펙트럼, 액상화 피해 예측을 위한 동적응력 및 변형률, 지반구조물에 작용하는 지진하중 또는 변위 등을 결정하기 위하여 반드시 규명되어야 하며, 이를 예측하기 위하여 지반응답해석이 수행되어진다. 정확한 해석을 수행하기 위해서는 해석지반의 동적물성치 자료를 획득하는 것이 중요하다. 이때 사용되어지는 동적자료로는 전단파속도 주상도, 전단탄성계수감소와 감쇠비곡선 그리고 과잉간극수압 계수 등이 있고, 이는 다양한 현장 및 실내실험을 통해 얻어지게 된다. 하지만 실제로 내진설계시 지반응답해석에 필요한 모든 입력자료가 구비되어 있는 경우는 극히 드물며 일반적으로 제한된 자료만을 사용하여 필요한 데이터를 추정하게 된다. 본 논문에서는 지반진동위원회 주최로 수행된 2007년 지반응답해석 Round Robin Test(RRT)를 통해 추정된 지반물성치와 해석결과의 분산정도, 그리고 개별적인 입력데이터가 분산정도에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 지반응답해석 및 입력자료

지반응답해석은 주어진 입력지진파에 대한 토층의 증폭정도를 예측하고자 수행된다. 지반응답해석은 해석차원에 따라서 1, 2, 3차원으로 구분할 수 있으며 해석영역에 따라서 주파수영역/시간영역, 구성모형에 따라서 선형/등가선형/비선형 그리고 과잉간극수압 고려여부에 따라서 전응력/유효응력으로 구분할 수 있다. 본 RRT에서는 해석을 1차원해석 등가선형해석과 비선형해석(전응력 + 유효응력)으로 국한하였다.

지반응답해석은 다양한 입력자료를 필요로 하며 이중 대표적인 데이터는 다음과 같다.

- 단위중량 주상도
- 지하수위 위치
- $V_s$  주상도
- 기반암 정보(깊이 및 강성)
- 동적곡선
- 입력지진파

RRT에 참가한 각 기관들에게 3개의 해석부지에 대한 보어링 조사 결과,  $N$ 치 주상도와  $q_t$  주상도만을 제공하였고 이를 기반으로 동적곡선,  $V_s$  주상도, 기반암 특성을 추정하도록 하였으며 해석기법은 기관이 선정하도록 하였다. 입력자료중 해석에 큰 영향을 미치지 않는 단위중량은 주어지지 않았으며 지하수위는 지표면에 있다고 가정하였다<sup>1)</sup>. 유효응력해석을 수행하기 위해서 필요한 과잉간극수압 측정자료는 제공되지 않았다. 본 RRT에서 지반물성치에 대한 모든 정보가 주어지지 않은 이유는 제한된 데이터만으로 내진설계를 수행하는 국내현황을 반영하기 위해서였다.

## 3. 지반물성치 분산정도

지반응답해석에 가장 지배적인 영향을 미치는 요소는 1) 토층의 전단파속도 주상도, 2) 기반암의 깊이 및 강성, 그리고 3) 토층을 구성하는 각 층의 동적곡선이다. 본 RRT에서는 주상도별로 보어링 자료와  $N$ - $q_t$  주상도만이 주어졌으며 이를 기반으로 참여기관이 각각 필요한 입력정보를 유추하도록 하였다. 사용된 주상도에 대한 세부정보는 “지반응답해석 Round-Robin Test 개요”를 참조하기 바란다. 본 절에서는 참여기관이 추정한  $V_s$ , 기반암 특성, 그리고 동적곡선의 분산정도를 평가하였다.

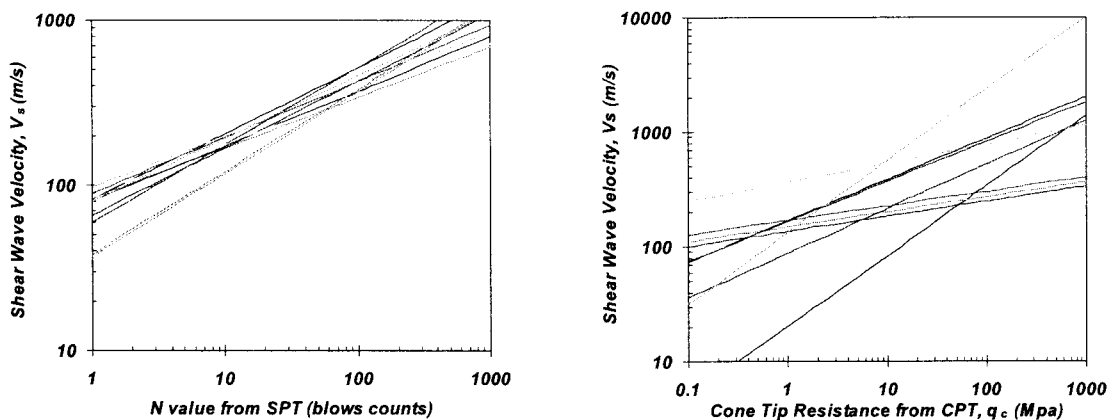


그림 1. 사용된 경험식의 비교(김동수 등)

1) 등가선형과 전응력 비선형해석에서는 지하수위의 영향이 해석결과에 영향을 미치지 않는다. 단, 구속압력에 대하여 변이하는 동적곡선을 사용할 경우 지하수위의 위치의 영향을 받으므로 이와 같은 경우에는 이를 고려해 주어야 한다.

### 3.1 Vs 주상도 추정

그림 1은 참여기관이 사용한 N-Vs 그리고  $q_c$ -Vs 경험식 들이다. 이들은 N치와  $q_t$ 로터 Vs를 예측하는 관계식간에 매우 큰 편차가 있음을 보여주고 있다. 따라서 SPT와 CPT시험에 내재된 불확실성에 이로부터 Vs를 추정하는 과정에서 불확실성이 추가됨을 알 수 있다. 또한, SPT에 비하여 시험결과가 정확하다고 알려진 CPT의 경우,  $q_c$ -Vs의 관계식의 분산정도는 N-Vs의 관계식보다 오히려 더욱 높으므로, 적절한  $q_c$ -Vs 관계식의 선정이 매우 중요하다고 판단된다.

그림 2는 N치 그리고  $q_t$  주상도와 그림 1의 관계식을 기반으로 참여기관들이 추정한 Vs 주상도와 실제 계측된 주상도를 비교하고 있다. 참여기관별로 N치 또는  $q_t$  주상도만을 사용하거나 N치와  $q_t$  결과를 복합적으로 사용하여 지반의 특성에 따라 각기 다른 경험식을 적용하였다. 그림 2는 대부분의 추정된 주상도와 계측된 주상도는 큰 차이를 보이고 있음을 보여주고 있으며 이는 N,  $q_c$  주상도로부터 Vs를 예측하는 것이 얼마나 불확실한지를 여실히 보여주고 있다.

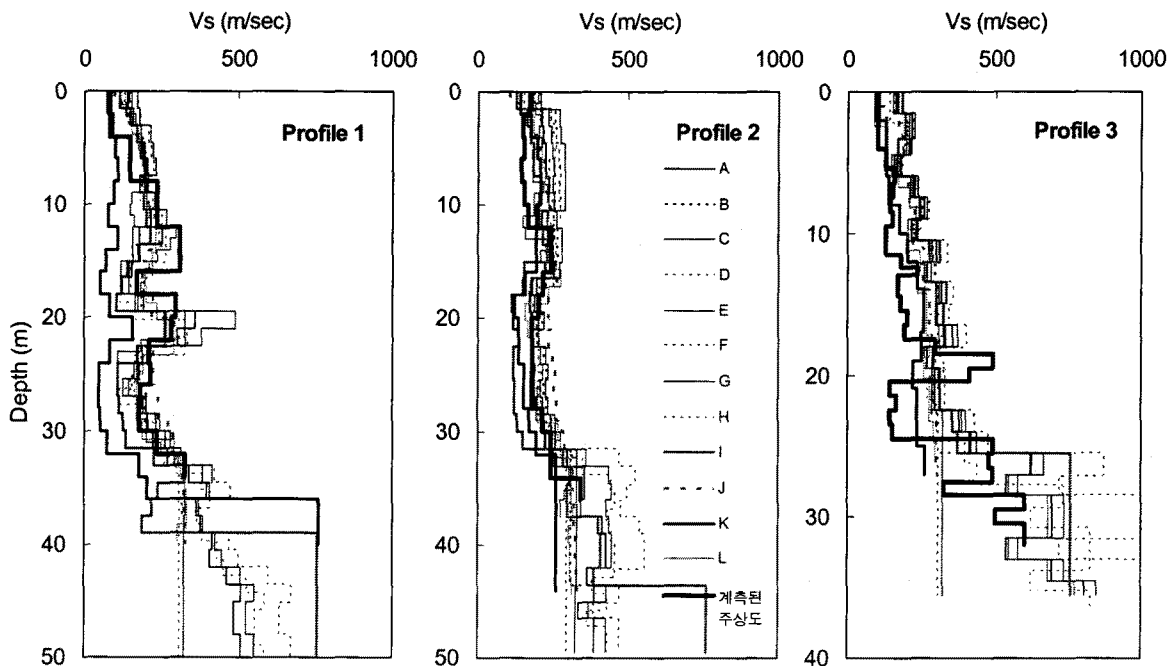


그림 2. N치와  $q_t$  주상도에서 도출된 전단파속도 주상도

### 3.2 기반암 특성 추정

RRT에서는 기반암에 대한 정보는 주어지지 않았으며 기관마다 이를 추정하도록 하였다. 참여기관들은 기반암의 깊이로는 연암이 시작되는 위치를 선정하거나 주어진 주상도 전체 두께를 사용하였으며 기반암의 전단파속도로는 760 ~ 1000 m/sec를 사용하였다. 기반암 강성의 선택범위는 상대적으로 크지 않으므로 해석결과에는 큰 영향을 미치지 않았을 것으로 판단된다.

### 3.3 동적곡선 추정

해석결과에 지배적인 영향을 미치는 세 번째 요소는 동적곡선이다. 그림 3은 참여기관들이 사용한 동적곡선들 중에서 모래, 실트 그리고 점토만을 비교하고 있다. 그림 3은 동적곡선의 분산정도가 매우 크며 전단탄성계수 곡선보다 특히 감쇠비 곡선의 편차가 매우 큰 것을 볼 수 있다. 제한된 지면으로 그림에는 포함되지 않았지만 점토와 모래의 경우에도 분산정도는 실트와 유사하였다.

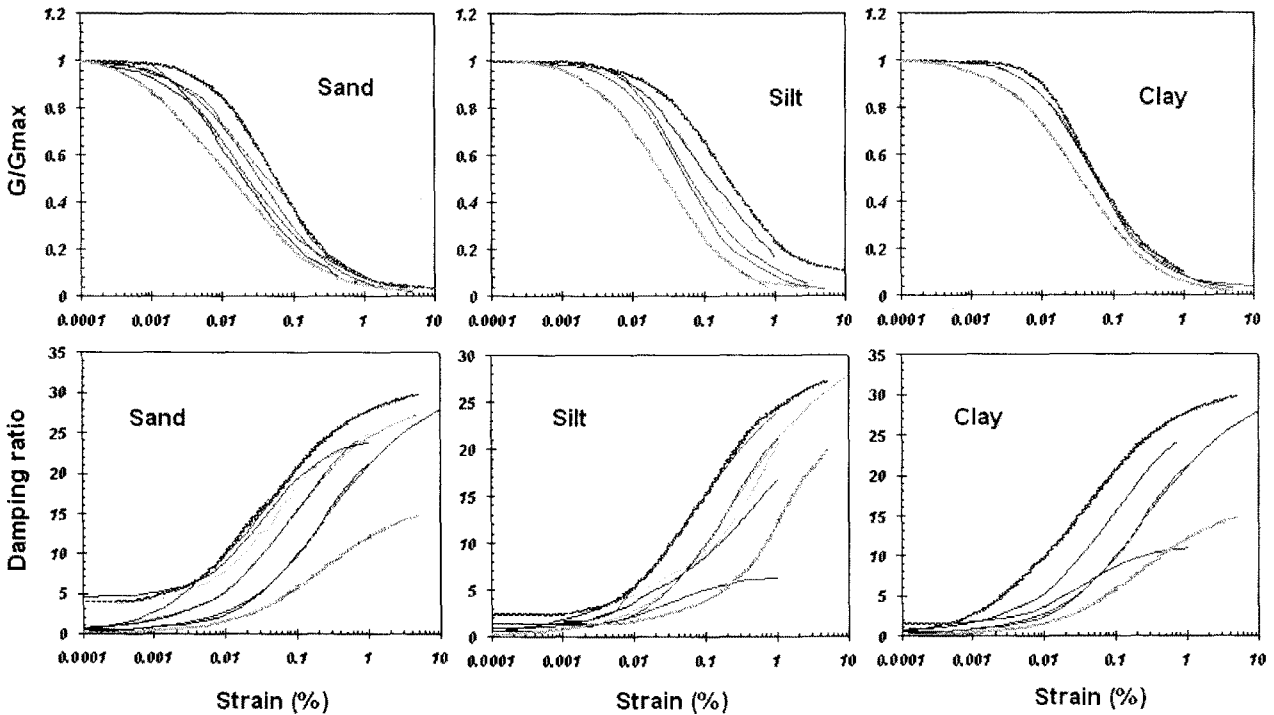


그림 3. 사용된 동적곡선의 비교(김동수 등)

## 4. 지반응답해석수행 결과

### 4.1 해석결과 분산정도

그림 4는 등가선형해석 결과 중 지표면에서의 5% 감쇠된 응답스펙트럼을 비교하고 있다. 회색선으로 표시된 선들은 해석기관들의 예측결과이며 두꺼운 선들로 표시된 선들은 Hachinohe, Ofunato, 그리고 인공지진파에 대한 평균스펙트럼이다. 그림 5는 최대지반진동가속도와 변형률 주상도를 비교하고 있다.

참여기관들은 지반응답해석에 지배적인 영향을 미치는 지반물성치들을 모두 다르게 예측하였기에 해석결과에는 큰 편차가 발생하였다. PGA는 기관 간 최대 7배의 차이가 발생하였고 최대전단변형률은 최대 무려 41배의 차이가 발생하였다. 이와 같은 큰 분산정도는 일반적으로 설계시 주어지는 입력물성치에 대한 정보가 매우 부족하며 정확하게 지반진동을 예측하기 어려움을 확연하게 입증하고 있다.

### 4.2 입력지진파의 영향

1차원 지반응답해석을 수행하기 위하여 3가지 종류의 입력지진파가 주어졌다. 선정된 지진파는 저주파수가 풍부한 Hachinohe 지진파, 고주파수 요소가 풍부한 Ofunato 지진파 그리고 비교적 주파수 분포가 균일한 인공지진파로서, 모두 재현주기 1000년 지진파(PGA=0.154g)로 scaling되었다.

그림 4의 세 개의 입력지진파들에 대한 평균응답스펙트럼은 전체 분산정도에 비하여 입력지진파에 의한 분산정도가 상대적으로 작음을 보여주고 있다<sup>2)</sup>. 이는 지반응답해석시 입력지진파의 선정이 중요하기는 하지만 추후 논의될 지반물성치와 해석기법의 영향이 더욱 크다는 것을 의미한다.

2) 보다 자세한 입력지진파의 영향은 “입력지진파 차이로 인한 지반응답 분산도 평가 연구 - 김진만 등”을 참조하기 바란다.

### 4.3 Vs 주상도의 영향

참여기관들은 모든 지반물성치들을 다르게 예측하였으므로 제출된 결론만으로 각각의 요소가 지반 응답해석결과에 미치는 영향을 평가하는 것은 불가능하였다. 따라서 본 논문에서는 Vs 주상도와 동적곡선의 영향을 평가하고자 추가적인 해석을 수행하였다. 그림 6은 주상도 1과 인공지진파를 이용한 해석결과이다. 기준 주상도는 실제 계측된 Vs 주상도이며 이는 굵은 선으로 도시되었다. 계측된 주상도와 더불어 B, G, I, L 기관들이 예측한 Vs 주상도를 사용하여 등가선형해석을 수행하였다. 해석시 Vs 주상도의 영향만을 평가하고자 동적곡선은 모든 해석에서 고정하였다. 그림 6은 Vs가 해석결과에 지배적인 영향을 미치는 것을 확연하게 보여주고 있다. 추정된 주상도를 사용하였을 경우 모든 경우에 계측된 주상도를 사용하였을 경우에 비하여 큰 편차가 있음을 보여주고 있다. 특히, 추정된 주상도 중 가장 낮은 I 기관의 주상도를 사용하였을 경우 매우 비현실적으로 낮은 응답이 예측되었다.

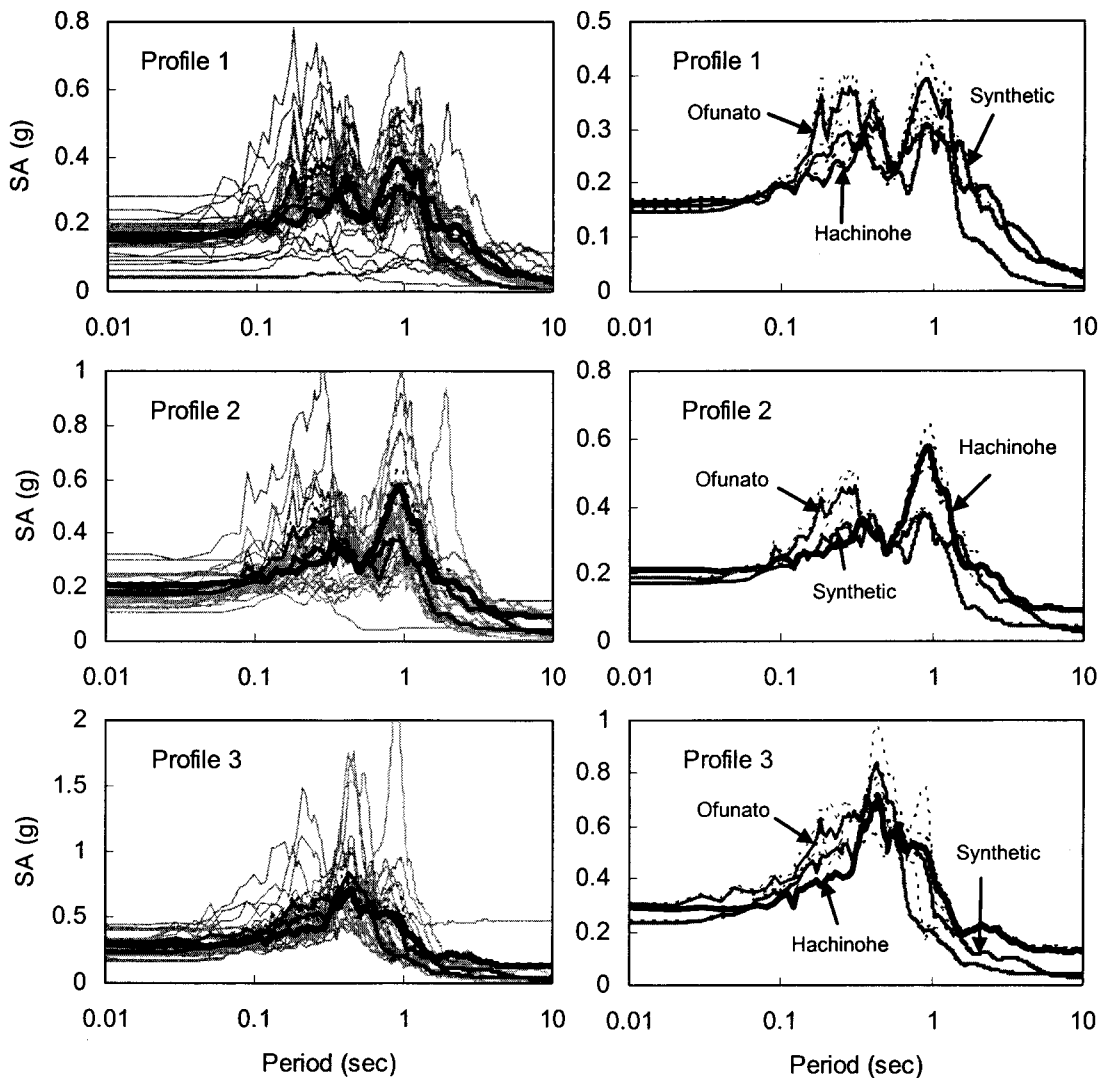


그림 4. Profile 1, 2, 3에 대한 가속도 응답스펙트럼

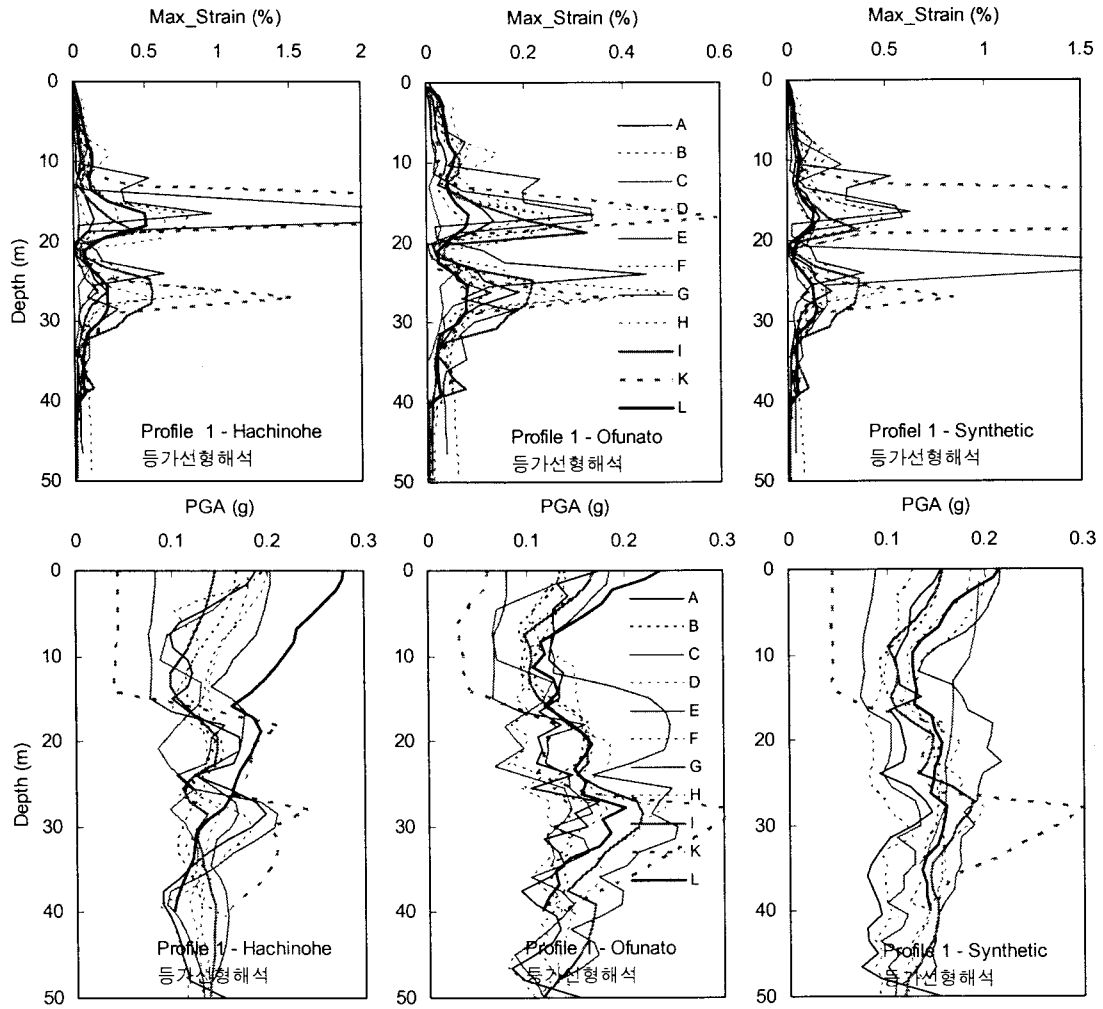


그림 5. Profile 1에서 등가선형해석으로 계산된 최대전단변형률과 PGA 주상도

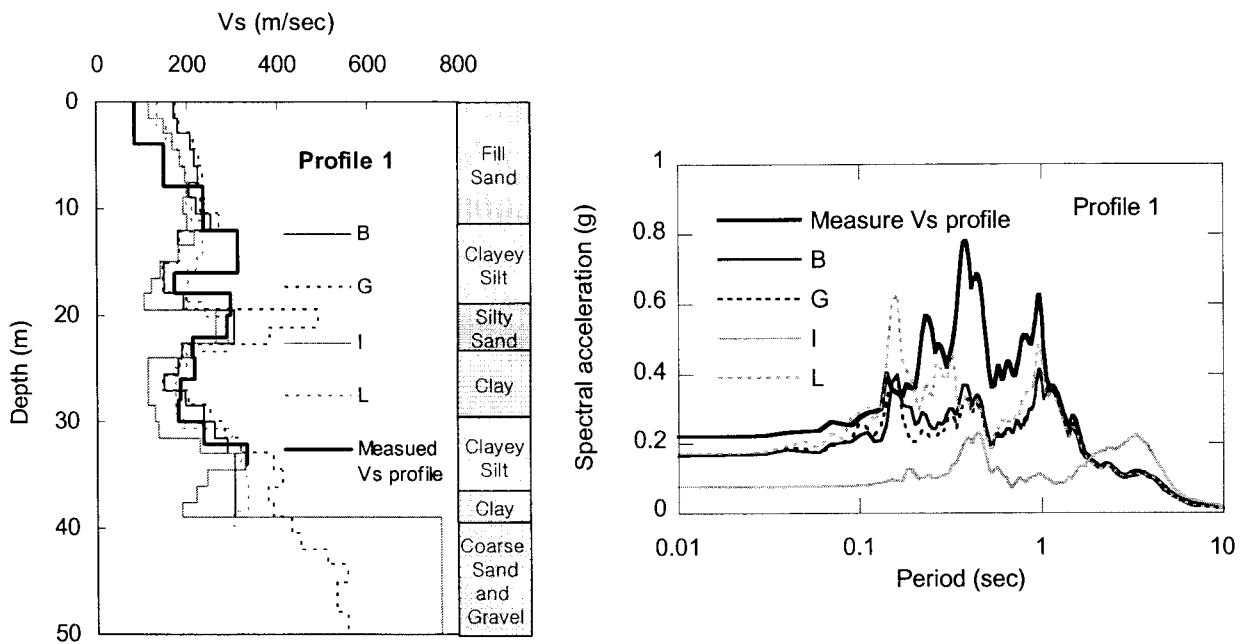


그림 6. Vs 주상도가 계산된 지표면 가속도 응답스펙트럼에 미치는 영향

#### 4.4 동적곡선의 영향

본 절에서는 동적곡선의 영향을 평가하고자 이번에는 Vs 주상도를 고정시키고 동적곡선을 변화시켜 이의 영향을 평가하였다(그림 7). 주상도는 계측된 Vs 주상도를 사용하였으며 전절과 동일하게 인공지진파를 사용하였다.

표 1. 해석에 사용된 동적곡선의 조합

	Sand - Seed & Idriss		Clay and Silt			
	Upper	Lower	Sun et al.		Vucetic & Dobry	
			PI=5-10	PI=20-40	PI=15	PI=30
#1	○		○	○		
#2	○				○	○
#3	○		○			○
#4	○			○	○	
#5		○	○	○		
#6		○			○	○
#7		○	○			○
#8		○		○	○	

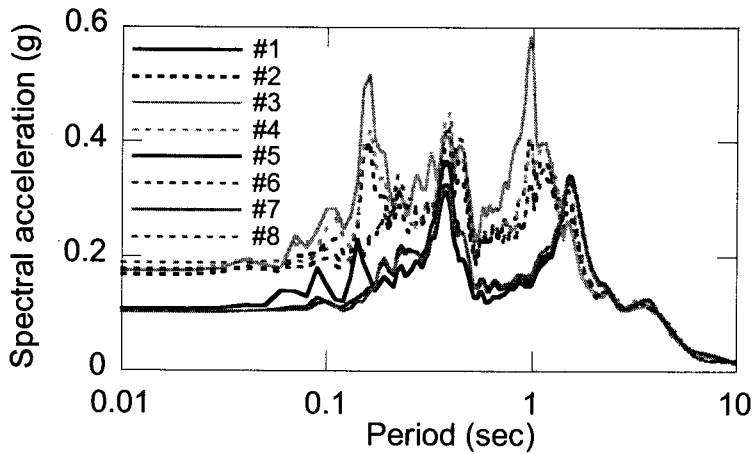


그림 7. 다양한 동적곡선의 조합을 사용하여 계산된 응답스펙트럼(Profile 1과 인공지진파 사용)

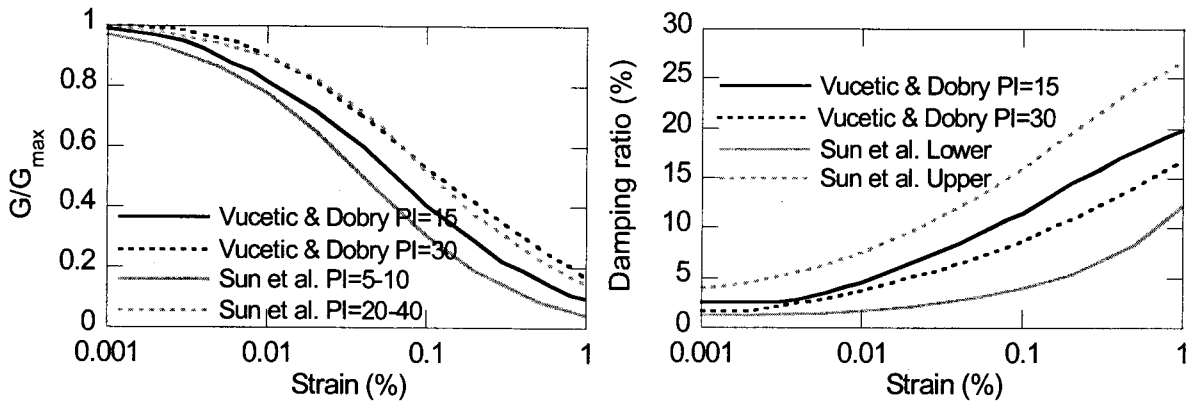


그림 8. Sun et al.과 Vucetic and Dobry의 동적곡선 비교

표 1은 해석시 사용된 동적곡선의 조합을 보여주고 있다. Fill sand & Gravel, Silty sand에는 Seed & Idriss의 Upper 그리고 Lower 곡선들이 사용되었으며 Silt와 Clay에는 Sun et al.과 Vucetic & Dobry 곡선들이 사용되었다(그림 8, 이들은 모두 참여기관들이 선정한 곡선들 이다). Silt와 Clay에는 소성지수에 따라, Silt에는  $PI \approx 15$ , Clay에는  $PI \approx 30$ 을 적용하였다. 주상도 1의 경우 Sand층의 총 두께는 Clay-Silt 층에 비하여 상대적으로 얇기 때문에 Sand층에 사용된 동적곡선의 영향은 제한적인 반면(예: #1과 #5) 선정된 Clay-Silt층의 동적곡선은 해석결과에 지배적인 영향을 미치는 것을 볼 수 있다.

#### 4.5 해석기법의 영향

지반응답해석결과는 입력물성치 뿐만 아니라 해석기법의 영향을 받게 된다. 따라서 지반의 특성에 따라서 적절한 해석기법을 선정하는 것은 매우 중요하다. 본 RRT에서는 등가선형해석, 전응력 그리고 유효응력 비선형해석을 선택하여 수행하도록 하였다. 모든 기관이 기본으로 등가선형해석은 수행하였으며 4개와 2개의 기관이 각각 전응력과 유효응력해석을 수행하였다.

그림 9는 Profile 1과 2에서의 등가선형해석과 전응력 비선형해석의 결과를 RRS(Ratio of response spectra, 등가선형해석과 비선형해석의 스펙트럴 가속도의 비율)를 통하여 비교하고 있다. 해석기법 간의 차이만을 평가하고자 기관간의 결과는 의도적으로 비교하지 않았다. 그림 9와 같이 일반적으로 등가선형은 PGA를 과대예측하며 주기별 응답은 주상도, 입력지진파에 따라서 큰 차이를 보이고 있다. 또한, C와 F 기관은 RRS가 유사한 반면 D의 경우 큰 차이를 보이고 있다. 이는 사용된 비선형구성모형과 선택된 점성감쇠계수로부터 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 등가선형해석에서는 최대지반진동가속도를 과대예측함을 볼 수 있다.

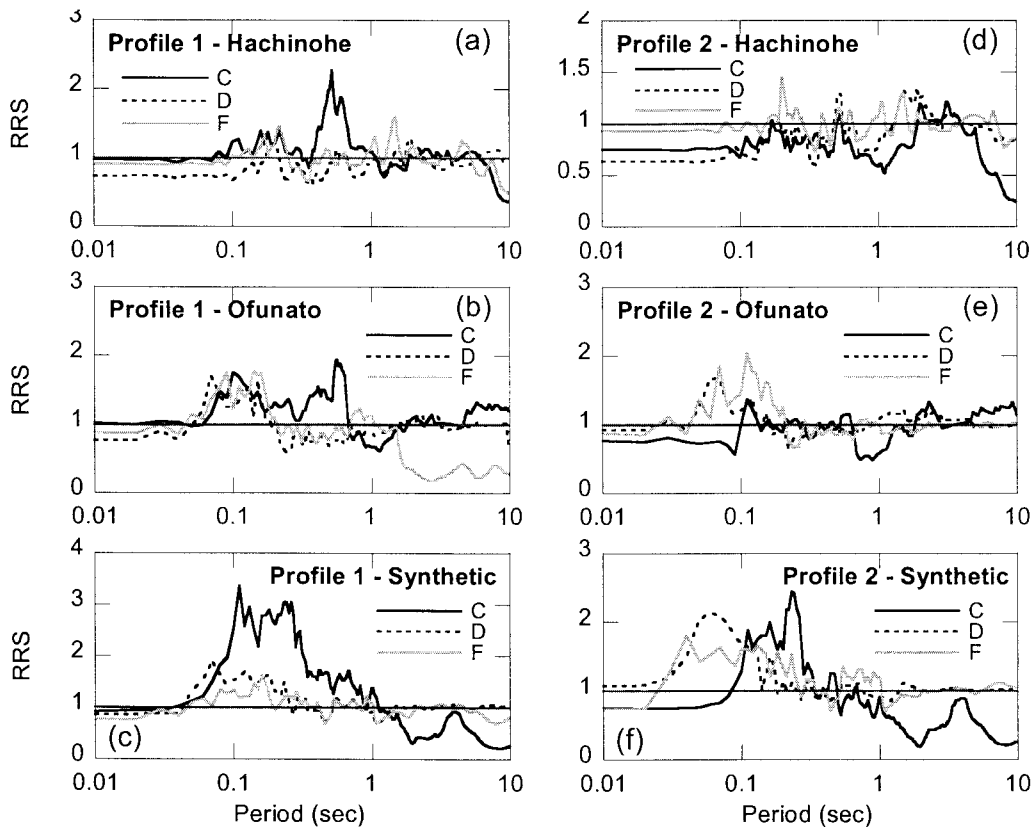


그림 9. 등가선형해석과 전응력 비선형해석의 RRS 비교



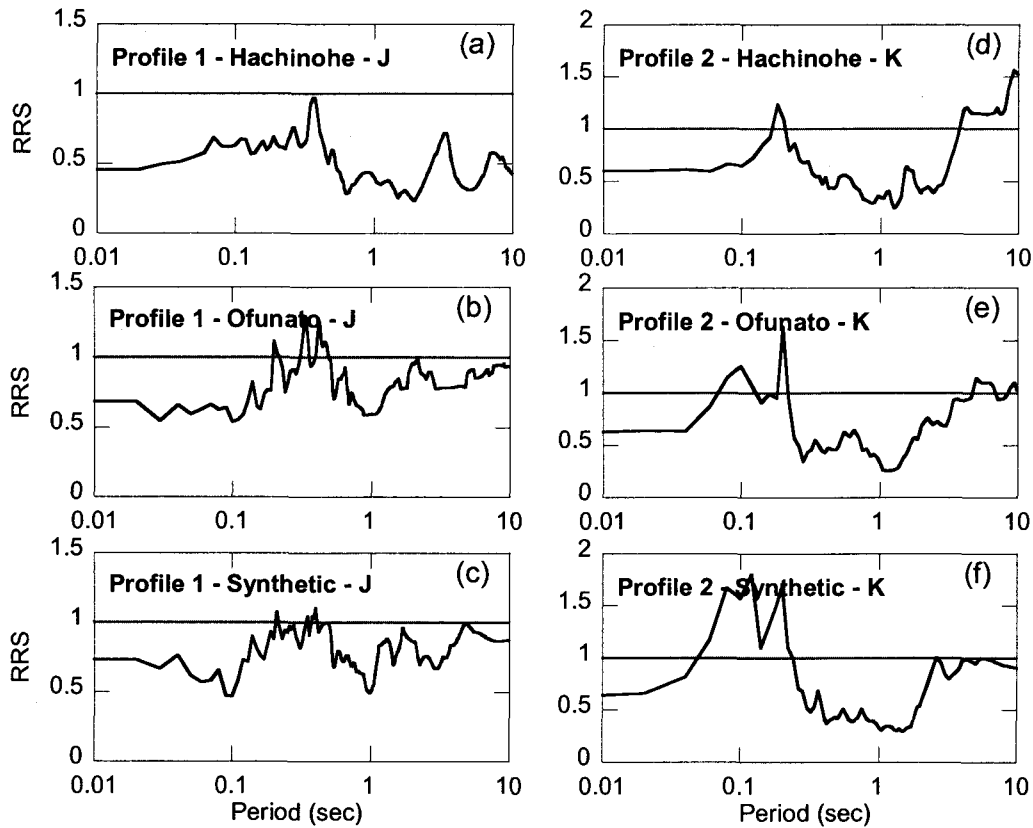


그림 10. J 기관 - 전응력해석과 유효응력해석의 RRS 비교  
K 기관 - 등가선형해석과 유효응력해석의 RRS 비교

유효응력 비선형해석을 수행하기 위해서는 주어진 입력자료에 추가적으로 반복하중에 대한 과잉간극 수압을 측정할 실내실험결과가 필요하다. 연구 목적으로 실내실험을 수행하는 경우 이외에는 실제 구조물의 내진설계시 이와 같은 자료를 측정하는 경우는 드물기 때문에 본 RRT에서는 의도적으로 과잉간극 수압 측정 자료가 주어지지 않았다. 그림 10은 각각 J 기관과 K 기관의 RRS(전응력 해석 vs. 유효응력 해석 스펙트럴 가속도 비율)를 비교하고 있다. J 기관 RRS는 전응력과 유효응력 비선형 해석을 비교하고 있으며 K 기관은 등가선형과 유효응력 해석결과를 비교하고 있다<sup>3)</sup>. 또한, J 기관은 Profile 1, K 기관은 Profile 2에서의 결과이다. 모든 해석에서 유효응력해석은 지진하중으로 인하여 발생하는 과잉간극 수압이 유효응력을 감소시키므로 해석결과가 비선형 해석에 비하여 낮음을 볼 수 있다. PGA는 전응력 해석의 대략 60%정도로 나타났으며 기타 대부분의 주기에서 유효응력의 결과가 더욱 낮은 것을 확인할 수 있다. 유효응력해석 유의해야 할 점은 해석결과는 과잉간극수압계수에 좌우된다는 점이다. 정확한 해석을 위해서는 반드시 현장지반의 계수가 측정되어야 한다.

#### 4.6 해석결과 종합분석

전술한 입력지진파, 지반물성치, 그리고 해석기법에 의한 분산정도를 평가하고자 표 2와 같이 Profile 1에서 계산된 PGA 비(최대 PGA/최소 PGA)를 비교하였다. Profile 1에서 제출된 모든 등가선형해석 결과의 PGA비는 xx였다. 요소별로는 입력지진파에 대한 PGA 비는 그림 4의 평균 응답스펙트럼으로부터 계산되었으며 xx로 가장 낮은 것으로 나타났다. PGA 비가 가장 높은 요소는 Vs 주상도로 2.23이었으며 동적곡선의 차이로 인한 PGA 비는 1.84였다. Vs로 인한 비율은 그림 6으로부터, 동적곡선으로 인

3) K 기관은 전응력 비선형해석을 수행하지 않았으므로 등가선형해석과 비교하였다.

한 PGA비는 그림 7로부터 계산되었다. 그림 6과 7은 제한된 케이스를 사용한 결과이므로 모든 케이스를 사용하여 분산정도를 계산하였을 경우 표 2의 결과와 달라질 수 있지만 Vs와 동적곡선의 영향은 매우 지배적이라는 결론을 도출할 수 있다. 해석기법은 지반물성치 보다는 영향이 작은 것으로 나타났다. 등가선형 vs 전응력 해석의 경우 PGA 비는 xx로 계산되었고 전응력 vs 유효응력 비선형 해석의 경우 xx로 계산되었다. 표 2는 특정 케이스에 대한 결과이므로 모든 지반응답해석에 적용되는 비율은 아니지만 각각의 요소의 영향정도를 평가하는 유용한 지표라고 판단된다.

표 2. Profile 1에서 수행된 지반응답해석간의 PGA비

요소	해석지반	Vs-주상도	동적곡선	입력지진파	PGA비 $\left(\frac{PGA_{max}}{PGA_{min}}\right)$	비고
All	Profile 1	All	All	All	7.0	그림 4
입력지진파 (등가선형)	Profile 1	All	All	All	1.1	그림 4
Vs 주상도 (등가선형)	Profile 1	B, G, I, L	Fixed	인공지진파	2.2	그림 6
동적곡선 (등가선형)	Profile 1	Fixed	Sand - Seed & Idriss Clay - Sun et al. - Vucetic & Dobry	인공지진파	1.8	그림 7
해석기법의 영향 (등가선형/전응력 비선형)	Profile 1	Fixed	Fixed	인공지진파	1.3	그림 9
해석기법의 영향 (유효응력 비선형/전응력 비선형)	Profile 1	Fixed	Fixed	인공지진파	2.2	그림 10

## 5. 결 과

본 논문은 RRT에서 주어진 보오링 자료, N-주상도,  $q_t$ -주상도, 입력지진파를 기반으로 총 12개의 기관의 지반응답해석결과의 분산정도를 평가하였다. 또한, Vs 주상도와 동적곡선의 영향을 평가하고자 RRT에서 요구된 해석 이외에 추가적인 해석이 수행되었다.

분석결과 다음과 같은 결론이 도출되었다.

- 1) 보오링 자료, N-주상도,  $q_t$ -주상도로부터 추정된 Vs 주상도와 동적곡선들은 참여기관 간에 매우 큰 편차가 발생하였다. 이는 충분하지 않은 자료를 기반으로 해석시 필요한 지반물성치를 추정할 경우 큰 불확실성이 수반된다는 것을 의미한다. 따라서, 내진설계시 최대한 정밀한 지반조사가 필요하다.
- 2) 모든 참여기관의 등가선형해석결과를 비교한 결과 해석기관 간의 분산정도는 매우 큰 것으로 나타났다. 이는 Vs 주상도, 동적곡선, 기반암의 깊이 및 강성 등의 지반물성치에 대한 높은 분산정도로 인하여 발생된 것으로 사료된다. 분산정도는 특히 전단변형을 주상도가 가장 큰 것으로 나타났다.
- 3) Vs 주상도는 해석결과에 가장 지배적인 영향을 주는 것으로 판단된다. 일반적으로 SPT 또는 CPT 주상도로부터 Vs를 추정하였을 경우와 계측된 Vs 주상도를 사용하였을 경우 해석결과에 매우 큰 편차가 발생하였다. 따라서 가능하다면 보다 정확한 탄성과 시험으로 Vs 주상도를 측정하는 것이 중요하다고 판단된다.

- 4) 동적곡선도 Vs 주상도와 마찬가지로 해석결과에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 실제 부지고유의 실험데이터의 부재시 다양한 곡선들을 사용하여 응답의 분포를 규명하는 것이 필요하다고 판단된다.
- 5) 등가선형해석은 전응력 비선형해석에 비하여 최대지반진동가속도를 과대예측하는 것으로 나타났다. 전체적인 영향은 지반물성치에 비하여 적은 것으로 나타났다.
- 6) 유효응력해석은 전응력 비선형해석에 비하여 낮은 응답을 예측하였다. 이는 지반진동으로 인하여 과잉간극수압이 발생하여 유효응력이 감소하며 지반이 더욱 soft한 거동을 하기 때문인 것으로 사료된다. 단, 해석결과는 사용된 과잉간극수압 계수에 지배적인 영향을 받으므로 이를 정확히 산정하는 것이 중요하다. 일반적인 경우에는 전응력이 더욱 보수적인 해석결과를 나타냄으로 이를 내진설계시 사용하는 것은 적절하다고 판단된다.

## 감사의 글

금번 지반응답해석 Round Robin Test에 참여하여 결과 자료를 제공해 주신 참여진분들께 깊이 감사드립니다. 그리고 RRT의 성공적인 수행에 열정적인 노력과 헌신을 보여주신 김진만 위원장님, 선창국 박사님을 비롯한 RRT 수행 실무진 분들께 진심으로 감사를 드립니다. 마지막으로 RRT 수행과 위원회 운영과정에서 많은 지원을 해주신 지반진동위원회 간사이신 희송지오택 김기석 사장님께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김진만(2007), "입력지진과 차이로 인한 지반응답 분산도 평가 연구." 한국지반공학회 학술발표회의 특별세션 지반응답해석 RRT.
2. 김동수 등(2007), "지반응답해석 Round Robin Test의 입력 지반 물성에 따른 지반응답특성 영향 고찰." 한국지반공학회 학술발표회의 특별세션 지반응답해석 RRT.
3. Borja, R. D., Duvernay, B. G., and Lin, C. H.(2002), "Ground response in Lotung: total stress analyses and parametric studies." *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 128(1), pp. 54-63.
4. Chopra, A. K.(1995), *Dynamics of structures : theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
5. Hashash, Y. M. A., and Park, D.(2001), "Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment." *Engineering Geology*, 62(1-3), pp. 185-206.
6. Hashash, Y. M. A., and Park, D.(2002), "Viscous damping formulation and high frequency motion propagation in non-linear site response analysis." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(7), pp. 611-624.
7. Kramer, S. L.(1996), *Geotechnical earthquake engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J. 1996.