

## 기반암 전단파속도의 부지응답특성 영향평가

### The Effect of the Shear Wave Velocity of a Seismic Control Point on Site Response Analysis

이진선<sup>1)</sup>

Lee, Jin-Sun

**국문 요약** >> 본 논문에서는 부지응답 해석 시 통제운동 지점의 전단파속도가 부지응답해석에 미치는 영향을 살펴보았다. 내진설계기준 연구(II)(건설교통부, 1997)에서는 ‘재현주기별 지진가속도의 작용 위치는 “기본적인 지진재해도는 보통암지반을 기준으로 평가한다.”라고 정의하고 있다. 그러나 보통암지반( $S_B$ )의 전단파속도 범위가 760m/sec~1500m/sec로 폭넓게 분포되어 있어, 부지응답 해석 시 통제운동지점의 선택에 따라 해석의 결과에 차이가 발생할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 국내의 대표적인 해성퇴적지반층인 인천 및 부산지역의 상세부지조사결과를 바탕으로 1차원 등가선형해석을 수행하였다. 통제운동지점인 기반암 전단파속도에 따른 지층내 가속도의 크기 변화, 그리고 이에 따른 액상화 안전을 변화정도를 살펴보았다. 또한, 해석결과와 외국의 내진설계기준을 바탕으로 국내 내진설계기준의 개선방향에 대하여 살펴보았다.

**주요어** 부지응답특성, 지반증폭현상, 등가선형해석, 전단파속도, 액상화, 기반암

**ABSTRACT** >> In order to evaluate the effect of shear wave velocity of a seismic control point on site response analysis, one-dimensional equivalent linear site response analysis were performed on the model soil profile based on the results of a detailed site investigation of sedimentary layers at Incheon and Busan. The results of the analysis show that an increase of shear wave velocity on the seismic control point (base rock) results in an increase of acceleration in the soil layers. This was mainly due to an unclear definition of the seismic control point. For this reason, the Korean Seismic Design Standard requires a specific definition of the seismic control point, including spatial conditions and soil properties, similar to the MCE (Maximum Considered Earthquake) in FEMA 369.

**Key words** site response, site amplification, equivalent linear analysis, shear wave velocity, liquefaction, base rock

## 1. 서론

지진 시 기반암 상부로 지진파가 전파됨에 따라, 지진운동의 크기가 변화하는 현상을 부지응답특성 또는 지반증폭현상이라 한다. 구조물의 내진설계 또는 지반의 액상화 평가를 위한 부지응답해석은 일반적으로, 기반암면을 지진운동 통제점으로 선택하여 시행한다.

이에 따라, 미국의 경우 FEMA 368, 369에서 최대 가능지진(MCE, Maximum Considered Earthquake)의 통제점을  $S_B$  지반(건설교통부 내진설계기준연구(II)의  $S_B$  지반과 동

일) 중 최소 전단파속도를 가지는 760m/sec 지점으로 명확히 명시하여 적용하도록 규정되어 있다.<sup>(2),(3)</sup>

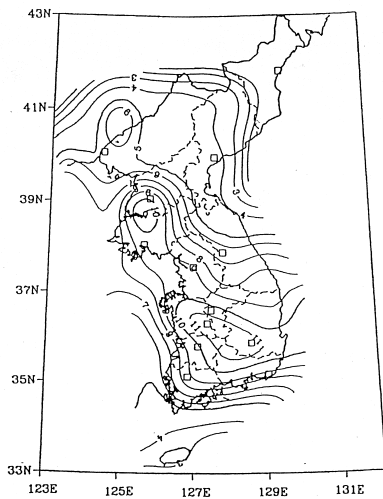
반면, 우리나라의 경우 1997년 건설교통부에서 발표된 내진설계기준연구(II)에서 제시된 ‘우리나라 재현주기별 지진가속도’ (그림 1)이 작용하는 위치를 “기본적인 지진재해도는 보통암 지반을 기준으로 평가한다.”라고 정의하고 있음에 따라, 공간상의 위치(지표면, 기반암, 노두)와 지층특성(보통암 지반의 전단파속도)가 명기되어 있지 않아 현재는 암묵적으로 내진설계기준연구(II)의 보통암 노두( $S_B$  지반)를 지진운동 통제점으로 간주하여 설계하는 것이 일반적인 방법이다.

그러나 상기의 방법은 보통암의 전단파속도(전단파속도 760m/sec~1,500m/sec) 범위가 매우 넓게 분포되어 있어 그 영향이 실제 결과에 미치는 영향을 무시할 수 없는 수준이며, 이에 따른 결과가 후속 설계 작업(구조물 설계, 액상화 평가

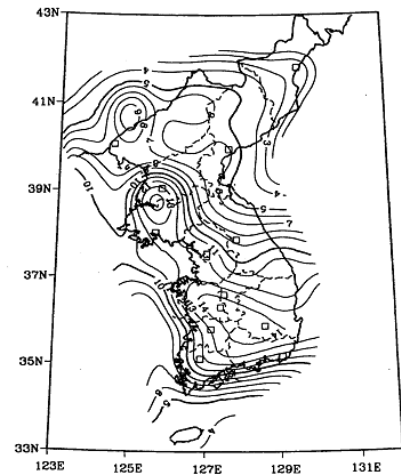
<sup>1)</sup> 정회원·공학박사, 토질 및 기초기술사, 소방방재청 시설사무관  
(대표저자: tycheon@paran.com)

본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 10. 14 / 수정일 : 2008. 12. 4 / 게재확정일 : 2008. 12. 4)



(a) 평균 재현주기 500년



(b) 평균 재현주기 1,000년

〈그림 1〉 우리나라의 재현주기에 따른 지진 지반운동 (% g)<sup>(6)</sup>

등)에 큰 영향을 미칠 수가 있다.

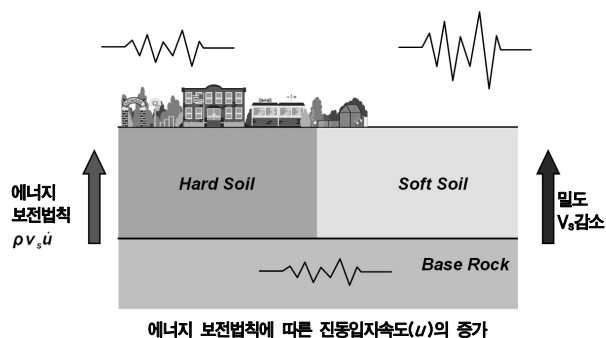
따라서, 본 논문에서는 보통암 전단파속도의 크기에 따른 지진운동 통제점 선택이 부지응답특성 평가에 미치는 영향을 등가정적해석기법을 이용한 사례 해석을 통하여 살펴보고자 한다.

## 2. 부지응답 해석

### 2.1 지반증폭현상

암반 내 단층으로부터 발생한 지진파는 암반 및 지반을 통해 지표면으로 상향전파가 이루어진다. 일반적으로 지진파가 상향전파됨에 따라 밀도( $\rho$ )와 전단파속도( $V_s$ )가 낮은 지층을 통과하게 되는데, 지진파의 에너지가 보존되며 전파되기 위해서는 상향전파됨에 따라 지진파의 입자속도가 증가하여야 된다(그림 2).

위와 같은 지진파의 지층을 통한 전파결과, 암반층에 도달한 지진파는 그 크기(입자속도 : 가속도, 속도 등)와 주파



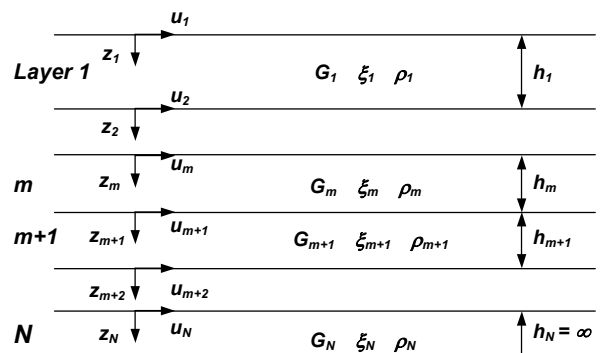
〈그림 2〉 지반증폭현상 개념도

수 대역이 변하여 지표면에 도달하게 된다. 따라서, 부지 응답특성 평가는 이러한 지반의 종류 및 지층구조에 따른 지진파의 전파특성을 고려하여 설계응답 스펙트럼의 작성, 액상화(Liquefaction) 평가를 위한 지진 거동시 지반의 변형률-전단응력의 예측, 그리고 지반 구조물의 안정성 확보를 위한 지진에 의한 동적 하중의 산정을 위해 수행되어진다. 이를 위하여 지난 수십여년간 여러 가지 부지 응답 특성평가 기법이 개발되었다.<sup>(8)</sup>

### 2.2 1차원 등가선형해석

1차원 등가선형해석기법은 부지응답해석으로 가장 널리 알려져 있는 해석법이며, 일반적으로 SHAKE 프로그램으로 더 유명해진 해석방법이다.<sup>(12)</sup> 해석상의 가정사항은 모든 지층의 경계가 반무한-수평이고 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다.

N개의 지층을 그림 3과 같이 전단탄성계수 G, 감쇠비  $\xi$ ,



〈그림 3〉 다층지반의 모형화

밀도  $\rho$ , 두께  $h_1$ 를 가지는 수평으로 무한한 보(Beam)의 연속으로 모형화 한, N자유도 구조의 주파수영역 동적해석을 수행한다.

이때, 지반의 비선형 거동특성을 해석에 고려하기 위하여 지진 시 지반의 변형율과 이에 상응하는 전단탄성계수의 차이를 일정한 오차범위 내에 수렴하도록 반복연산(Iteration)을 시행한다(그림 4).

또한, 지반의 비선형 응력-변형률 관계로 인하여 지진과 같은 반복하중 재하 시 발생하는 에너지 소산(Hystretic Damping)은 지진시 지반의 등가변형율과 이에 상응하는 점성감쇠비(Viscous Damper)를 가지는 Kelvin-Voight모델로 해석에 반영하고 있다(그림 5).<sup>(1)</sup>

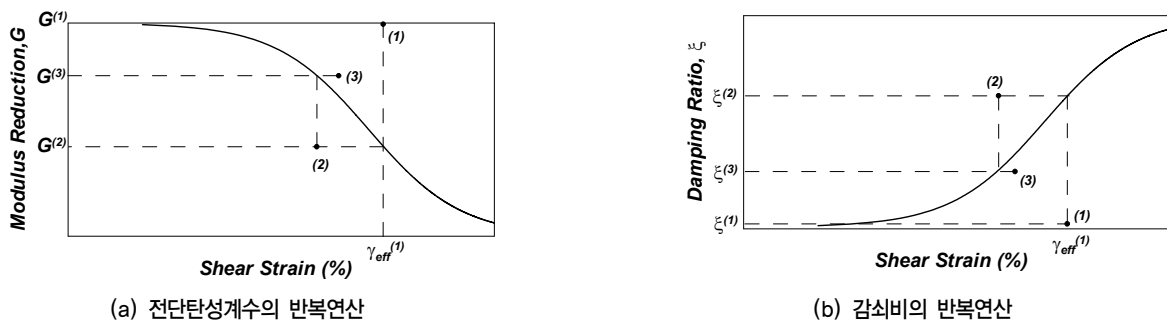
이러한 1차원 등가선형해석기법은 내진설계 기준 작성, 지표면 가속도의 결정, 지반의 액상화 여부판단, 지중구조물의 응답변위해석을 위해 가장 널리 사용되고 있으며, 해석의 정확도는 미국 캘리포니아 지역에서 발생한 여러 지진계측기록과 부지특성평가 결과를 활용한 부지응답해석으로

검증되어져 왔다.<sup>(9)</sup>

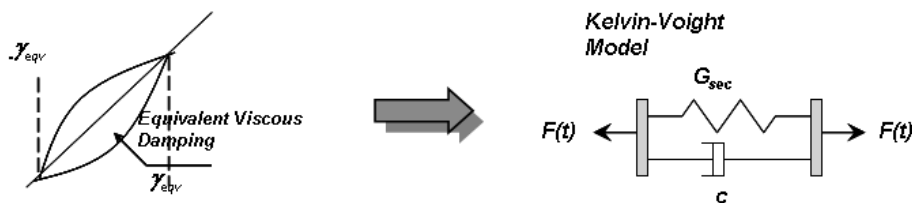
### 3. 기반암 전단파속도의 영향

서론에서 살펴 보았듯이 우리나라의 경우 발생 가능한 지진가속도는 재현주기별 지진가속도로 ‘내진설계기준연구(II)’에 명기되어 있다. 또한, 발생 가능한 지진가속도는 보통암 노두에서 발생가능하다고 암묵적으로 간주되어 통상적으로 보통암 노두를 지진운동 통제점으로 간주하여 설계하는 것이 일반적인 방법이다. 그러나 ‘내진설계기준연구(II)’에서는 지진운동 통제점(보통암 노두)의 전단파속도에 대한 명확한 정의가 누락되어 있음에 따라 통제운동지점의 선택(전단파속도)에 따른 부지응답 해석결과에 큰 차이가 발생할 수 있다.

‘내진설계기준연구(II)’에서 정의되고 있는 지반분류는 표 1과 같으며, FEMA<sup>(2),(3)</sup>에서 제안된 지반분류와 동일한 분류기준을 사용한다. 이때, 지진운동 통제점으로 사용되는 보통



〈그림 4〉 등가 선형해석의 반복연산 과정<sup>(8)</sup>



〈그림 5〉 등가선형해석에서 비선형 지반특성의 모형화<sup>(1)</sup>

〈표 1〉 지반분류표<sup>(6)</sup>

지반분류	지반종류의 호칭	상부 30m에 대한 평균지반특성		
		전단파속도(m/sec)	표준관입시험(N)	비배수전단강도(kPa)
S <sub>A</sub>	경암지반	1500 초과	-	-
S <sub>B</sub>	보통암지반	760에서 1500		
S <sub>C</sub>	매우 조밀한 토사 또는 연암지반	360에서 760	> 50	> 100
S <sub>D</sub>	단단한 토사지반	180에서 360	15에서 50	50에서 100
S <sub>E</sub>	연약한 토사지반	180 미만	< 15	< 50
S <sub>F</sub>	부지고유의 특성평가가 요구되는 지반			

암노두의 전단파속도는 760m/sec~1,500m/sec로 최대 1,500m/sec와 최소 760m/sec를 적용 가능하며 그 차이는 두 배에 이른다.

현재까지 부지응답 특성에 따른 지반증폭현상 해석을 위하여 여러 현장 및 실내 지반조사 기법(탄성파 시험(공내 수평/하향 탄성파시험, 표면파시험), 공진주/비틀림전단시험), 부지응답 해석기법(등가선형해석기법, 비선형해석기법)이 연구·개발 되었으나, 지진운동 통제점의 선택에 따른 영향 평가는 거의 이루어지지 않은 실정이다.

따라서, 우리나라의 경우 지진운동 통제점에 관한 명확한 정의가 없는 관계로 내진설계 시 시추조사 결과상 암반층이 나타나기 시작하는 지점을 지진운동 통제점으로 간주하여 해당위치의 전단파속도를 그대로 기반암의 전단파속도로 간주하여 부지응답해석을 시행하고 있는 실정이다.

따라서, 본 논문에서는 국내 대표적인 해성퇴적지반인 부산 및 인천지역의 상세부지조사결과를 바탕으로 지진운동 통제점의 선택이 부지응답해석 결과에 미치는 영향을 1차원 등가선형해석 프로그램을 사용하여 살펴보고, 해석결과가 액상화 평가에 미치는 영향을 액상화 평가 간편법을 이용하여 살펴보았다.

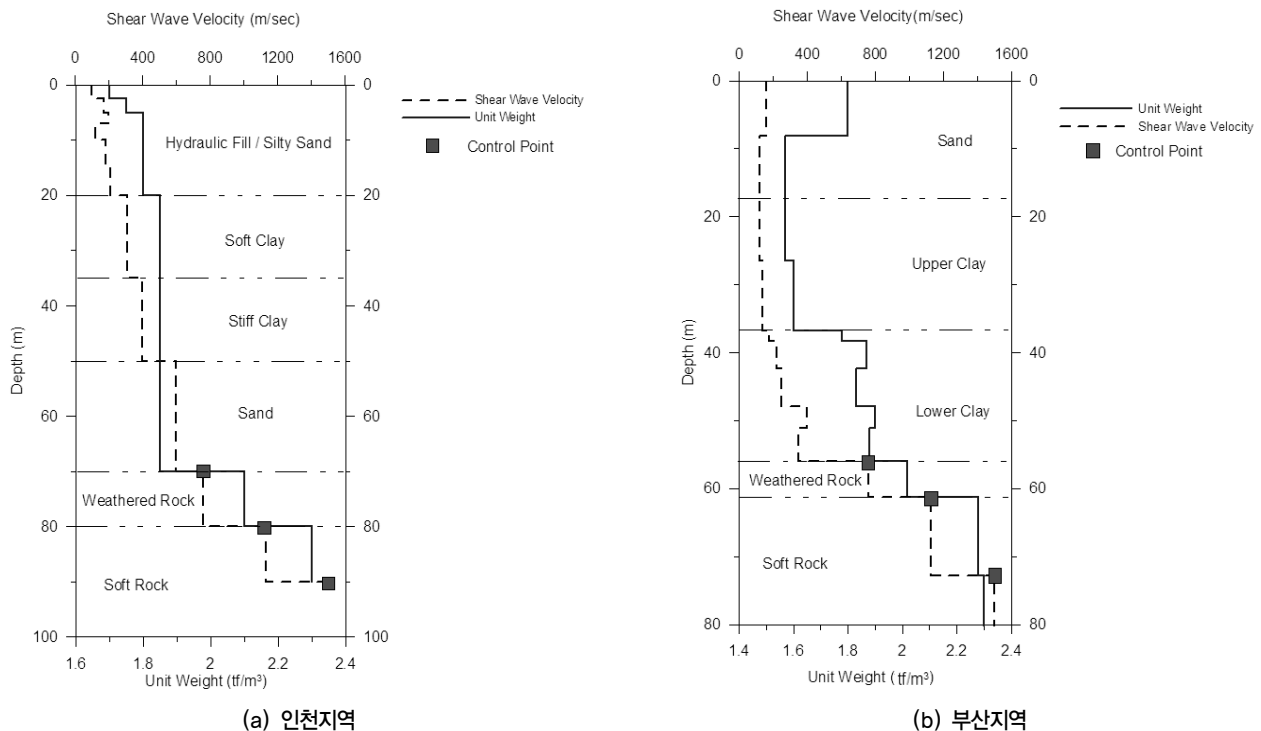
### 3.1 해석모델

본 논문에서는 국내 대표 해안지역인 인천과 부산지역의

상세부지조사 결과를 바탕으로, 지진운동 통제점의 선택에 따른 부지응답 특성변화를 1차원 등가선형해석을 시행하여 살펴보았다. 사용된 프로그램은 SHAKE91이며, 두 지역의 상세부지조사결과에 따른 주상도는 아래의 그림 6과 같다.

인천지역 모형지반의 구성은 액상화 위험이 있는 최상부층에 상재하중 및 에너지 보정된 표준관입시험치(CN<sub>60</sub>=10~16)정도의 20m 두께의 포화 준설패립 및 사질토층으로 구성되어 있으며, 그 밑으로 약 15m 두께의 점토층, 약 15m정도의 하부사질토층이 연암과 풍화암 상부에 위치하고 있다. 부산지역 모형지반의 구성은 액상화 위험이 있는 최 상부층에 상재하중 및 에너지 보정된 표준관입시험치(CN<sub>60</sub>=10~18)정도의 18m 두께의 포화 사질토층으로 구성되어 있으며, 그 밑으로 약 20m 두께의 상부 점토층, 약 20m정도의 하부점토층이 연암과 풍화암 상부에 위치하고 있다.

지진 통제운동의 경우 1999년 제정된 항만 및 어항시설의 내진설계표준서<sup>(5)</sup>에서 적용이 시작되어 시설물별 내진설계 기준에서 널리 적용중인 3개의 지진파형인 Hachinohe형 지진, Ofunato형 지진 및 인공지진파 중 장주기 및 단주기 지진특성을 반영할 수 있는 Hachinohe형 지진, Ofunato형 지진이 사용되었다.<sup>(7)</sup> 지진운동 가속도의 크기는 ‘내진설계 기준연구(II)’에서 제시하고 있는 1구역 1등급 붕괴방지수준에 해당되는 최대가속도 0.154g를 적용하여 지진파의 최대가속도를 스케일링하여 사용하였다(그림 7).

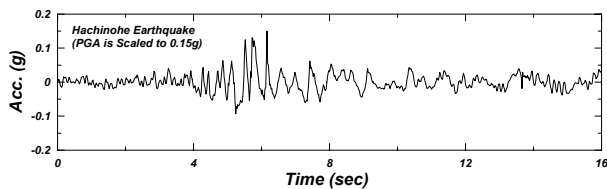


〈그림 6〉 모형 해석부지의 상세부지조사 결과

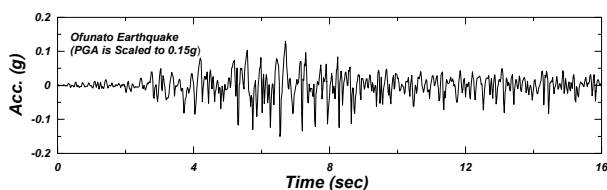
지진운동 통제점은 ‘내진설계기준연구(II)’상 보통암 지반 (S<sub>B</sub>)의 전단파속도 분포범위의 최소, 중간, 최대치인 760m/sec, 1130m/sec, 1500m/sec 지점을 각각 선택하여 통제운동을 암반노두의 경계조건으로 입력하여 해석을 시행하였다(그림 6). 지진운동 통제점 선택에 따른 부지응답 해석 민감도 분석을 위한 해석 구성표는 표 2와 같이 총 12개의 해석모형으로 구성되어 있다.

3.2 1차원 등가선형해석 결과(지층별 최대가속도)

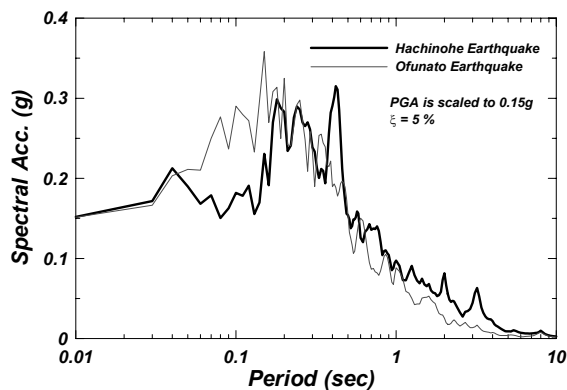
모형해석부지의 지진운동 통제점 선택에 따른 영향을 살펴보기 위하여, 인천지역 모형해석부지의 1차원 등가선형해석 결과 지층별 최대가속도 분포를 그림 8에 나타내었다.



(a) Hachinohe형 지진의 시간이력 곡선



(b) Ofunato형 지진의 시간이력 곡선



(c) Hachinohe, Ofunato형 지진의 주파수영역 분포도

〈그림 7〉 해석에 사용된 지진 통제운동의 특성

그림 8의 결과를 살펴보면, 장주기 지진인 Hachinohe형 지진과 단주기 지진인 Ofunato형 지진 공히 지진운동 통제점의 전단파속도가 증가함에 따라(760m/sec→1500m/sec) 지진파의 상향전파에 따른 가속도의 크기가 증가함을 알 수 있으며, 지표면 최대가속도의 크기는 각각 27%(0.2g→0.26g), 10%(0.17g→0.18g)가 증가함을 알 수 있다.

부산지역 모형해석부지의 1차원 등가선형해석용으로 결과 중 지층별 최대가속도 분포는 그림 9에 나타내었다. 그림 9의 결과를 살펴보면, 장주기 지진인 Hachinohe형 지진과 단주기 지진인 Ofunato형지진 공히 지진운동 통제점의 전단파속도가 증가함에 따라(760m/sec→1500m/sec) 지진파의 상향전파에 따른 가속도의 크기가 증가함을 알 수 있으며, 지표면 최대가속도의 크기는 각각 8%(0.16g→0.18g), 17%(0.18g→0.21g)가 증가함을 알 수 있다.

3.3 1차원 등가선형해석 결과(액상화 검토)

모형해석부지의 지진운동 통제점 선택에 따른 액상화 발생 영향을 살펴보기 위하여, 1차원 부지해석 결과를 토대로 Seed 등이 제안한 액상화 판정 간편법을 적용하여 그 영향을 살펴보았다.<sup>(11)</sup>

1차원 부지응답 해석결과의 지층별 최대 가속도(그림 8, 그림 9)로부터, 지진시 진동전단응력(CSR, Cyclic Stress Ratio)은 다음과 같이 계산 가능하다.

$$CSR = \frac{\tau_d}{\sigma'_0} = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_0}{\sigma'_0} \right) \quad (1)$$

여기서,  $a_{max}$  : 지층별 최대가속도

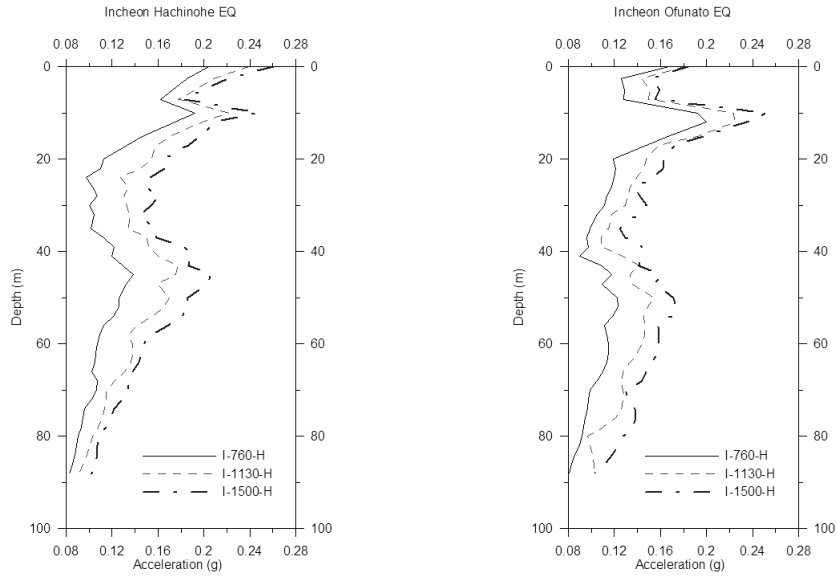
$g$  : 중력 가속도(9.81m/sec, 981cm/sec)

$\sigma_0, \sigma'_0$  : 전응력 및 유효응력

사질토 지반이 가지는 액상화 저항능력비는 Seed와 Idriss가 제안한 다음의 그래프를 이용하여 산정가능하며(그림 10), 여기서 사용된 표준관입시험치 (N<sub>1</sub>)<sub>60</sub>은 상재하중 및 에너지 효율을 보정한 시험치이며, 인천지역은 깊이별로 10~16, 부산지역은 10~18의 값을 가지는 지층으로 구성되어 있다.

〈표 2〉 통제운동 지점에 따른 해석 분류표

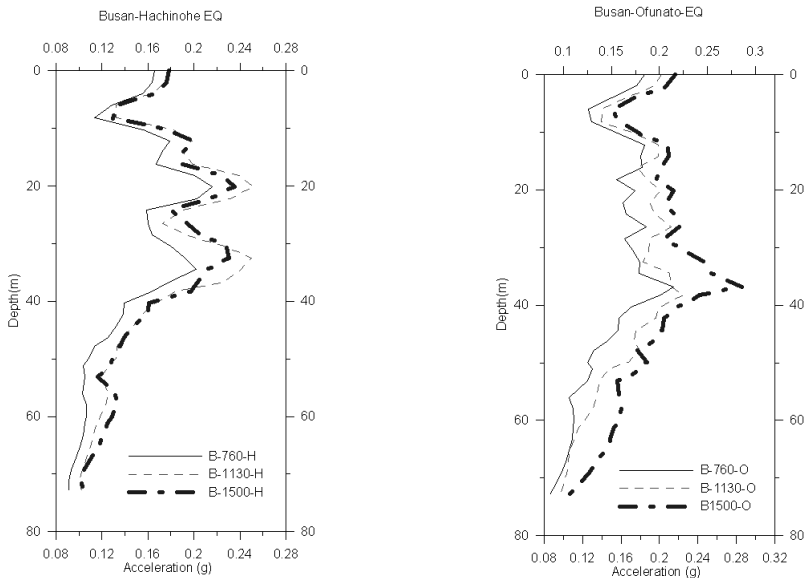
지진 파형	인천			부산		
	통제운동지점 V <sub>s</sub> = 760m/sec	통제운동지점 V <sub>s</sub> = 1130m/sec	통제운동지점 V <sub>s</sub> = 1500m/sec	통제운동지점 V <sub>s</sub> = 760m/sec	통제운동지점 V <sub>s</sub> = 1130m/sec	통제운동지점 V <sub>s</sub> = 1500m/sec
Hachi	I-760-H	I-1130-H	I-1500-H	B-760-H	B-1130-H	B-1500-H
Ofu	I-760-O	I-1130-O	I-1500-O	B-760-O	B-1130-O	B-1500-O



(a) Hachinohe형 지진

(b) Ofunato형 지진

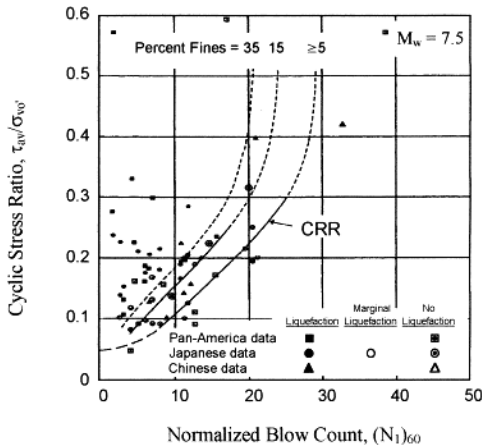
〈그림 8〉 통제운동 지점에 따른 지층별 최대가속도 분포 곡선(인천지역)



(a) Hachinohe형 지진

(b) Ofunato형 지진

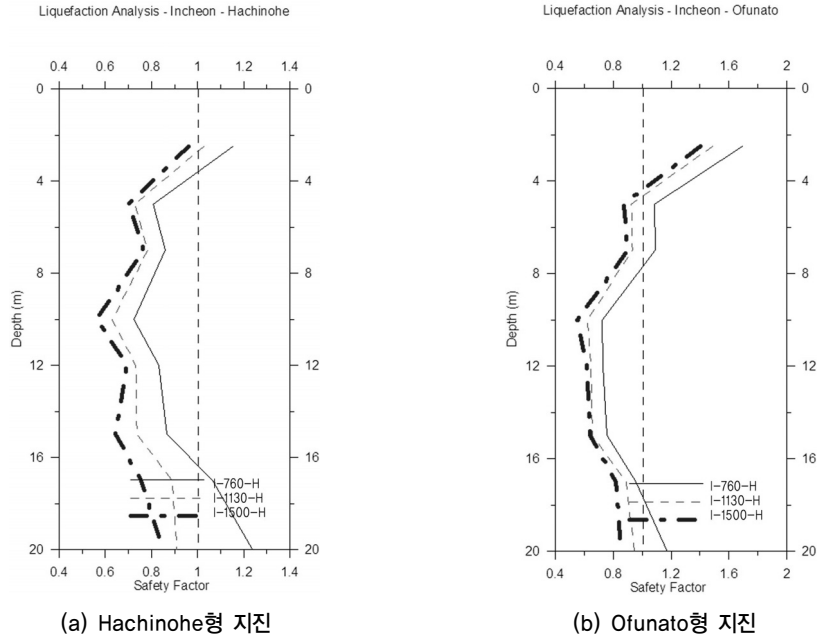
〈그림 9〉 통제운동 지점에 따른 지층별 최대가속도 분포 곡선(부산지역)



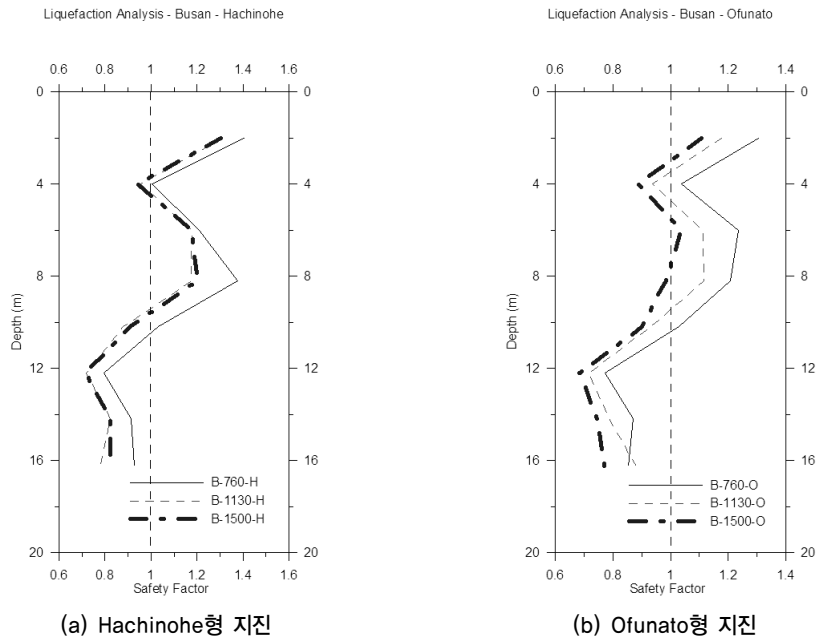
〈그림 10〉 표준관입시험치(SPT, N치)와 액상화 저항능력비의 상관관계<sup>(11)</sup>

그림 10에서 나타난 액상화 저항능력비는 지진규모  $M_w = 7.5$ 에 대하여 제안된 값이므로, 국내 액상화 평가에 사용되는 지진규모  $M_w = 6.5$ 에 대해서는 지진규모 보정계수(Magnitude Correction Factor) 1.2를 곱하여 사용하여야 하며, 표 3과 같이 산정 가능하다.

상기의 방법으로 액상화에 대한 안전율은 (액상화 저항능력비)/(지진지 진동전단응력)으로 표현가능하며, 액상화 간편법으로 판정시 안전율 1.5이하일 경우 상세예측법(진동삼축압축 시험)을 시행함이 일반적이나, 본 논문에서는 간편법 해석결과 안전율 1.0을 액상화 발생 판단기준으로 선정하였다.



(a) Hachinohe형 지진 (b) Ofunato형 지진  
 <그림 11> 통제운동 지점에 따른 지층별 액상화 안전율(인천지역)



(a) Hachinohe형 지진 (b) Ofunato형 지진  
 <그림 12> 통제운동 지점에 따른 지층별 액상화 안전율(부산지역)

<표 3> 지진규모 보정계수

지진 규모	$CSR_M/CSR_{M=7.5}$
5.24	1.50
6.00	1.32
6.75	1.13
7.50	1.00
8.50	0.89

그림 11은 지진 통제운동점 선택에 따른 인천지역의 깊이 20m까지의 액상화 간편법 판정결과이며, 그림 12는 부산지역의 판정결과이다. 두 지역 모두, 지진운동 통제점 선

택에 따라 액상화 판정기준이 다르게 나타나는 지층이 발생할 수 있으며, 일반적으로 지진운동 통제점의 전단파속도가 커질수록 안전율이 감소함을 알 수 있다.

#### 4. 결론

1985년도 멕시코시티 지진 발생이후 지진 시 부지응답(지반증폭)현상에 대한 여러 연구가 시행되어져 왔다.<sup>(10)</sup> 그러나 부지응답해석을 위한 요소기술인 현장 탄성파 시험, 미소변형률 영역에서의 실내시험 그리고 부지응답 해석기

법등에 대한 연구는 다수 시행되었으나 국내에서 지진운동 통제점의 영향에 대한 사항은 중요하게 다루어지지 않은 것이 사실이다. 더욱이, 1997년 제정된 ‘내진설계기준연구(II)’에서 제안된 우리나라의 재현주기별 지진가속도가 지진운동 통제점에 대한 공간(기반암 및 암반노두) 및 보통암의 특성에 대한 명확한 정의가 없음에 따라, 내진설계 시 지반조사결과로 확인되는 기반암의 전단파속도를 그대로 적용하여, 이에 따른 상부구조물의 설계 및 액상화 평가 등에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 국내 대표 해석적 지반층에 대하여 부지응답 해석시 지진운동 통제점의 선택에 따른 영향정도를 살펴보았으며, 그 결과 통제운동지점의 전단파속도가 증가함에 따라 지층내 가속도 크기 또한 증가하고 이로 인한 설계 안전율에 변화가 있음을 알 수 있었다. 그러므로 우리나라의 내진설계 기준 또한 미국의 FEMA에서 제안하고 있는 최대가능지진(MCE)과 같이 통제운동 지점에 대한 명확한 정의가 선행되어야만 해석조건에 따른 오류를 최소화 할 수 있으리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 이진선, “Development of Cyclic Hardening/Degradation Soil Model for Analysis of Wave Propagation Characteristics During Earthquake,” 박사학위 논문, KAIST 건설 및 환경 공학과, 2002.
- FEMA 368, *The 2000 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures*, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- FEMA 369, *The 2000 NEHRP Recommended Provisions For New Buildings And Other Structures Part 2: Commentary*, Federal Emergency Management Agency, 2000.
- 김동수, 이진선, 윤종구, “부지 고유의 지반 거동평가,” 한국지진공학회, Vol. 3, No. 4, 1999, pp. 1-10.
- 해양수산부, 항만 및 여항시설의 내진설계 표준서, 1999.
- 건설교통부, 내진설계기준연구(II), 1997.
- Balkema, A. A., *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, Port and Harbour Research Institute, PHRI, Rotterdam, Brookfield, Netherlands*, 1997.
- Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, PrenticeHall, Upper Saddle River, NJ, 1996.
- Idriss, I. M., *Assessment of Site Response Analysis Procedures*, Report No. NIST GCR 95667, NIST, 1995.
- Vucetic, M. and Dobry, R., “Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response,” *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. GT1, 1991, pp. 89107.
- Seed, H. B., Tokimatsu, L. Harder, L. F., and Chung, R. M., “Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluation,” *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 111, No. 12, 1985, pp. 1425-1445.
- Schnabel, P. B., Lysmer, J., and Seed, H. B., *SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*, Report No. UCB/EERC72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkely, 1972.