

스펙트럼 강도와 지반의 액상화 가능성에 관한 연구

Spectral Intensity for the Evaluation of Liquefaction Potential

박 종 관 Jong-Kwan Park

서울산업대학교 토목공학과 부교수

Abstract

Ground reinforcements is the essential method to prevent the liquefaction of loose sand deposit. However, in the construction of the life lines, it is impossible to treat the whole loose deposit against liquefaction. As an countmeasure for the life lines against the liquefaction, a monitoring system can be considered for an immediate judgement of the liquefaction occurrence during an earthquake. Through shaking table tests on model grounds, pore presure developments were investigated in terms of the surface spectral velocity, which was verified as a tool for the immediate judgement of the liquefaction occurrence.

1. 서론

토목 구조물은 지진에 의하여 많은 피해를 받고 있다. 그 중에도 지반의 액상화로 인하여 구조물 및 댐과 제방이 붕괴되며, 또한 대규모의 지반유동이 발생하여 많은 인명과 재산에 막대한 손실을 가져왔다. 액상화된 지반에는 수 미터에서 수 백미터까지 측방 유동이 발생하며 특히 강이나 바다에 접해 있거나 약간이라도 경사가된 지반에서 대규모의 측방 유동이 발생한다고 보고 있다.[2,3]

지반에 액상화 현상이 발생되지 않도록 하기 위해서는 액상화의 발생이 가능한 지반을 보강하여야 한다. 보강공법으로는 과대한 간극수압의 발생을 억제하기 위하여 다짐공법이나 배수공법 등이 널리 사용되고 있으나 아직도 보강의 범위에 대하여서는 정확하게 알려진 바는 없다.[5] 특히 상수도, 하수도, 또는 도시가스과 같은 관거(life lines)를 액상화 가능

성이 있는 연약 사질토에 매설할 경우 보강범위를 결정하는데 문제가 발생한다. 실제로 부분적인 보강은 가능하지만 매설관이 통과하는 전 지역을 보강한다는 것은 불가능하다. 만일 적절하게 보강되지 않은 지역에 큰 지진이 발생하고 지반이 액상화 된다면 과잉간극수압과 지반유동에 의하여 지하 매설관이 파괴되고, 이로 인하여 재앙이 발생하고 사회에 커다란 혼란이 야기된다. 따라서 액상화로 인한 피해를 감소시키기 위해서는 지진이 발생한 즉시 지반의 액상화 가능성에 판단하고 조치하여야 한다. 이러한 과정은 지진이 발생하는 동안 지진의 크기와 형태를 기록하여 액상화 가능성을 판단하는 예보장치(Monitoring system)을 통하여 가능하다.

지진 직후 액상화 가능성을 판단할 수 있는 하나의 수단으로 지진의 최대 지진가속도의 크기로 기준 할 수 있다. 그러나 액상화를 판정하는데 있어서 가속도의 주기 빈도 및 진폭의 영향을 고려하지 않고 단지 최대 가속도만을 기준하는 방법은 불합리하다. 실제로 측정된 지진의 기록을 에너지로 바꾸어 나타낼 수 있는 수단으로 스펙트럼 강도 (Spectral intensity)가 있다. 스펙트럼 강도는 Housner[1]에 의하여 처음 소개 되었으며, 이는 일차 자유도에서 평균 진동속도를 나타내고 있다. 이미 스펙트럼 해석은 내진 구조물 해석에 널리 사용되고 있으며 이러한 해석을 지반의 액상화 평가에 적용하고자 한다. 본 연구에서는 모형 항만 구조물에 대하여 진동대 시험 (Shaking table test)을 실시하고, 측정된 가속도의 기록을 통하여 스펙트럼 강도를 구하고 이를 간극수압 발생과정과 관련하여 지반의 액상화 가능성을 분석하고자 한다.

2. 스펙트럼 강도 (Spectral Intensity)

스펙트럼 강도 (Spectral intensity, SI)는 처음 Housner[1]에 의하여 제안되었다. 이는 여러 구조물에 미치는 지진의 영향을 평균 진동속도의 개념으로 나타낸 것이다. 지진의 영향을 받는 지반의 경우도 1 차 자유도 개념으로 가정하면 스펙트럼 강도를 다음과 같이 정의할 수 있다. 그림 1과같이 지진에 의한 1 차 자유도 구조물 (Single degree of freedom system)의 기본 운동방정식은 식 (1)과 같다.[4]

$$\ddot{x} + 2h\omega\dot{x} + \omega^2x = -\ddot{y}_s(t) \dots \dots \dots (1)$$

여기서, x 는 상대 변위 ($y - y_s$), ω 는 고유 회전 진동수 (Natural circular frequency, $(= \sqrt{k/m})$), h 는 감쇠계수, k 는 스프링 상수, 그리고 m 는 질량이다.

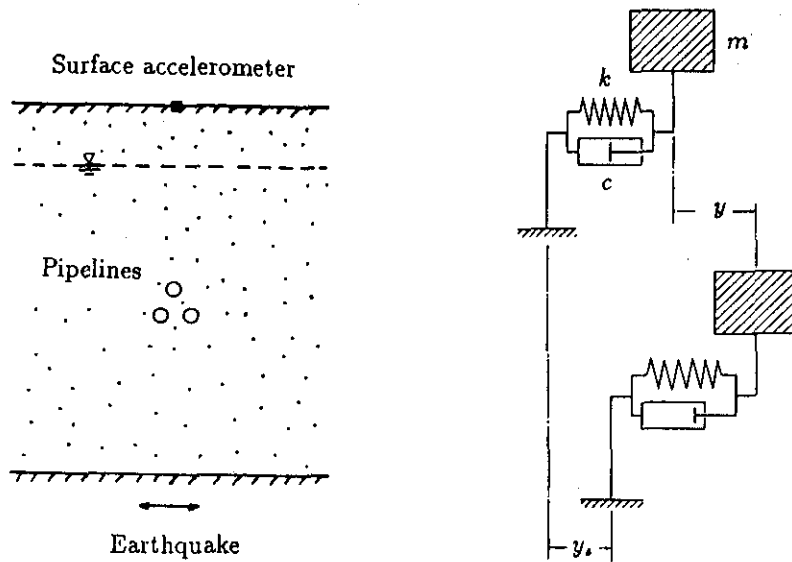
위의 미분방정식을 풀어 수평변위, 진동속도를 나타내면 각각 식 (2)와 (3)과같이 쓸 수 있다.

$$x(t) = -\frac{1}{w} \int_0^t y_s''(\tau) \exp\{-h\omega(t-\tau)\} \sin\omega(t-\tau) d\tau \dots (2)$$

$$x'(t) = -\int_0^t y_s''(\tau) \exp\{-h\omega(t-\tau)\} \cdot \left[\cos\omega(t-\tau) - \frac{h}{\sqrt{1-h^2}} \sin\omega(t-\tau) \right] d\tau \dots (3)$$

위식으로부터 감쇠에 대한 영향을 최소화하기 위하여 이를 아래 식 (4)와 같이 가정하면 즉,

$$\sqrt{1-h^2} \approx 1 \dots (4)$$



(a) 연약사질토에 매설된 관거

(b) 1차 자유도 해석도

그림 1. 액상화 가능한 지반에 매설된 관거

이다. 수평변위, 진동속도 및 가속도의 최대값을 얻을 수 있다. 여기서 얻어진 최대값을 스펙트럼 변위 (Spectral displacement, S_d), 스펙트럼 속도 (Spectral velocity, S_v), 그리고 스펙트럼 가속도 (Spectral acceleration, S_a)로 정의하며 다음과 같이 나타낸다.

$$S_d = x_{\max} \quad \dots \dots (5)$$

$$S_v = \left[- \int_0^t \ddot{y}_s(\tau) \exp(-h\omega(t-\tau)) \cos \omega(t-\tau) d\tau \right]_{\max} \quad \dots \dots (6)$$

$$S_a = \omega^2 S_d \quad \dots \dots (7)$$

또한, 간편하게 S_d , S_v , 과 S_a 의 관계를 정리하면 식 (8) 과같이 쓸 수 있다.

$$S_d \approx \frac{S_v}{\omega} \approx \frac{T}{\pi} S_v \quad \dots \dots (8)$$

여기서, T 는 주기 (Period)이다. 만일 지진 가속도에 대한 기록이 측정된다면, 스펙트럼 속도, S_v 는 각지반의 고유주기 (Natural period)와 감쇠계수의 크기에 따라 계산될 수 있다. 여기서, Housner는 토목 구조물은 고유주기를 0.1 과 2.5 사이의 값을 갖는다고 가정하여 스펙트럼 강도를 식 (9)과같이 나타내었다.

$$I_h = \int_{0.1}^{2.5} S_v(h, T) dT \quad \dots \dots (9)$$

반면, 본 해석에서는 액상화 가능한 지반의 감쇠계수를 0.2 로 가정하고 스펙트럼 강도 SI 를 스펙트럼 속도의 평균값으로 식 (10)과같이 정의하고자 한다.

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(h = 0.2, T) dT \quad \dots \dots (10)$$

만일 지진가속도가 측정되어 기록된다면 SI 값은 즉시 컴퓨터에 의하여 얻을 수 있다.

3. 모형 구조물의 진동대 실험

본 연구에 사용된 진동대 실험기는 일본 동경 대학에 있는 것으로서 진동파 입력부, 유압기, 진동축과 진동대 및 토조로 구성되어 있다. 토조의 길이는 4 미터, 높이는 0.87 미터 그리고 폭은 1 미터이다. 모두 7개의 모형 지반이 준비되었는데 이는 3가지 종류의 모형 구조물로 나누어 볼 수 있다. 첫째로 3 개의 크기가 작은 수평 지반과, 둘째로 하나의 대형 사면, 그리고 셋째로 세개의 대형 강널말뚝 (Sheet pile) 구조물이다. 액상화가 발생 가능한 느슨한 지반을 만들기 위하여 우선 토조에 물을 채우고 마른 모래를 부어 모형 지반을 성형하였다. 모형의 크기는 대형 모형의 경우 길이는 4 미터, 높이는 0.55 미터이며 폭은 0.3 미터로 줄였고, 소형의 경우 길이는 0.7 미터, 폭은 0.4 미터 그리고 지반의 깊이는 0.48 미터이다. 사용된 모래는 일본의 표준사 중의 하나인 토요다 모래이며 토성은 표 1 과 같다.

대형 모형지반은 경사 1:2.75의 제방, 이중 강널말뚝 (Double Sheet Pile wall)과 앵커 강널말뚝 (Anchor sheet pile wall)의 형태를 이루고 있다. 그림 2는 이러한 모형 구조물의 형태를 보여 주고 있으며 축방유동을 관찰하기 위하여 지반의 창쪽에 검은 모래 기둥을 수직으로 설치하였다. 대부분의 지반은 액상화가 가능한 상대밀도 약 35 % 정도의 느슨한 지반과 일부분 보강을 목적으로 다진 상대밀도 85 % 정도의 조밀한 지반으로 이루고 있다. 표 2 는 각 지반의 밀도를 나타내고 있다. 모형 강널말뚝으로 두께 3 mm의 플라스틱 판이 사용 되었으며 이는 실험시 지반에 발생될 축방유동에 의하여 벽체에 큰 변형이 유발 할 수 있도록 하기 위해서 이다. 모형 강널말뚝의 아래 부분은 고정 되었으며 위 부분은 직경 3 mm 의 동봉 (Bronze rod) 으로 연결 또는 고정되었다. 또한 그림 2에서 보는 바 와 같이 실험중 계측을 목적으로 여러 개의 간극수압계 와 가속도계가 모형지반에 설치되었으며 입력 가속도는 진동대 아래 부분에서 측정되었다.

표 1. 토요다 모래의 특성치

비 중	G_s	2.65
최대 간극비	e_{max}	0.947
최소 간극비	e_{min}	0.616
균등계수	U_c	1.500
유효입경	D_{10} (mm)	0.16

표 2. 모형 구조물의 지반상태

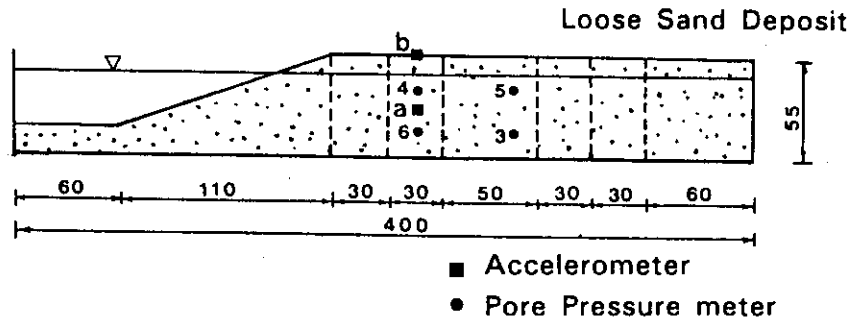
Case	Types of model	Range of compacted zone (cm)	Ground condition				Remarks
			loose ground		compacted ground		
			e	D (%)	e	D (%)	
1	Embankment	-	0.866	24.5	-	-	
2	Double sheet pile	15	0.846	30.5	0.715	-	
3	Anchor sheet pile	-	0.844	31.1	-	-	
4	Reinforced sheet wall	70	0.827	36.2	0.681	83.8	
5-1	Level ground	-	0.812	40.7	-	-	
5-2	Level ground	-	0.806	42.5	-	-	
5-3	Level ground	-	0.769	53.8	-	-	

4. 실험결과 및 분석

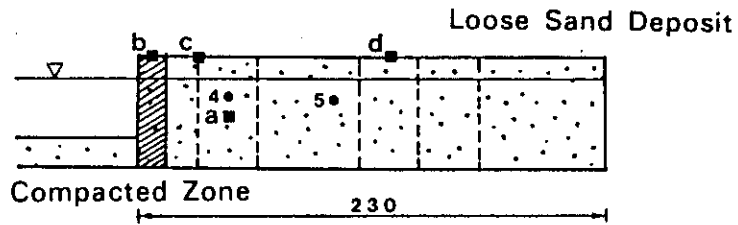
진동대 실험에 사용된 입력 가속도는 120 gals 의 사인파 (Sine wave) 이며 입력 주파수는 Case 1 의 경우 5 Hz, 그리고 Case 5-1 의 경우 6 Hz을 제외하고는 모두 3 Hz를 사용하였다. 실험조건 및 유발된 측방변형은 표 3 과 그림 3 과같이 나타나고 있다. 실험의 결과로써 그림 4는 모형제방에서 나타나는 가속도 및 간극수압의 이력에 대하여 보여 주고 있으며, 그림 5는 Case 2 경우 지표면에서 측정된 가속도의 이력을 나타내고 있다. Case 3 과 Case 4 의 경우도 Case 2 와 비슷한 기록을 얻었다. 그리고 Case 5 의 작은 크기의 수평지반에 대하여서는 비교적 오랫동안 입력 가속도를 증가시키면서 하중을 가하였다. 그림 5(c)는 Case 5-1 의 최대 가속도를 나타내고 있다.

진동하중에 의한 간극수압의 발생과 소멸과정은 지반의 위치에 따라 서로 다른 양상을 나타내고 있다. 모든 모형지반은 대단히 연약한 사질토로 구성되어 있어 진동하중을 부가하자마자 간극수압은 급격히 상승하여 지반에 액상화 현상이 발생하였다. 액상화는 지반의 깊이와 관계없이 발생한 것으로 보인다. 그러나 간극수압은 지반의 아래부터 시작한다. 특히 그림 4(b) 에서 보는 바와 같이 제방 아래쪽에서는 진동하중이 끝난 후 바로 간극수압이 감소하기 시작하는데 비하여 제방 위쪽에서는 하중이 중단되고 상당한 시간이 경과된 후에 간극수압이 감소되기 시작하였다. 결국 위와 아래에서 소멸되는 두개의 간극수압 경로는 서로 만나고 있다. 이러한 간극수압의 소멸 경로로부터 액상화된 지반은 아래쪽으로부터 안정되기 시작함을 알 수 있으며, 전 액상화된 지반이 완전한 안정 상태를 이루는 동안 많은 변형 및 침하가 발생하고 있다.

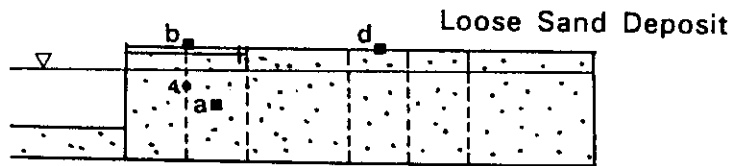
(a) Case 1 - Embankment



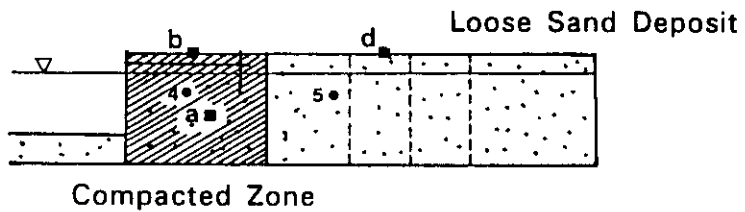
(b) Case 2 - Double Sheet Pile Wall



(c) Case 3 - Anchor Sheet Pile Wall



(d) Case 4 - Reinforced Sheet Pile Wall



(e) Case 5 - Level Ground

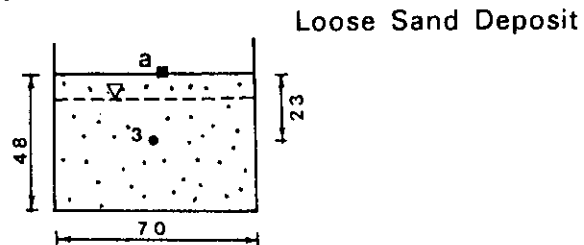


그림 2. 진동대 실험을 위한 모형 구조물의 형태

표 3. 진동 실험조건과 유발된 측방변위

Csae	Shaking		Measured deformations (cm)						Remarks
	Freq. (Hz)	Time (sec)	A	B	C	D	E	F	
1	5	6	10.0	10.0	6.0	5.0	5.0	2.5	
2	3	28	13.5	7.0	5.0	2.0	0.	0.	
3	3	18	45.0	42.0	25.0	11.0	9.0	9.0	
4	3	26	1.2	0.	0.	0.	0.	0.	
5-1	6	30	-	-	-	-	-	-	
5-2	3	47	-	-	-	-	-	-	
5-3	3	80	-	-	-	-	-	-	

(a) Case 1 - Embankment



(b) Case 2 - Double Sheet Pile Wall



* 1 - 5 sec. 2 - 10 sec. 3 - 15 sec.

(c) Case 3 - Anchor Sheet Pile Wall

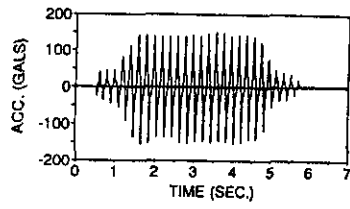


* 1 - 5 sec. 2 - 10 sec. 3 - 18 sec.

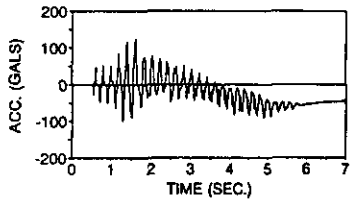
(d) Case 4 - Reinforced Sheet Pile Wall



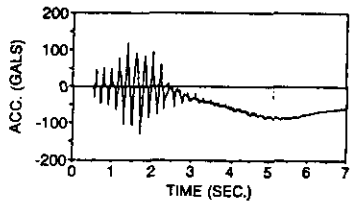
그림 3. 진동대 실험에 의하여 모형구조물에 유발된 지반 변형의 형태



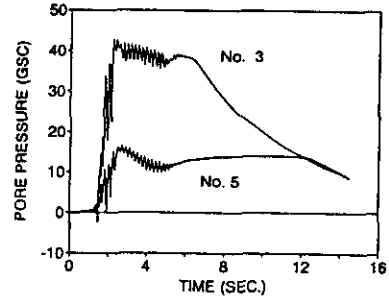
(a) Input Acceleration



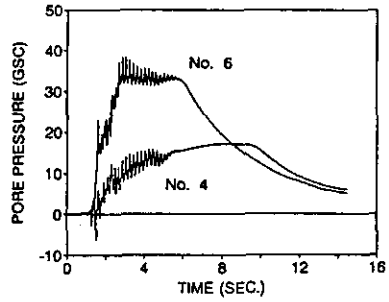
(b) Location a



(c) Location b

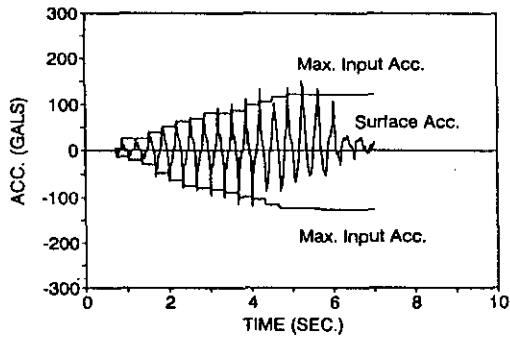


(d) Location Nos. 3 and 5

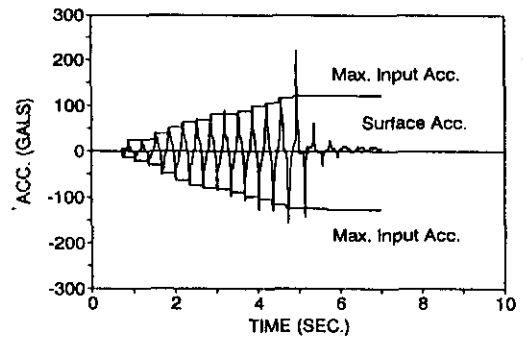


(e) Location Nos. 4 and 6

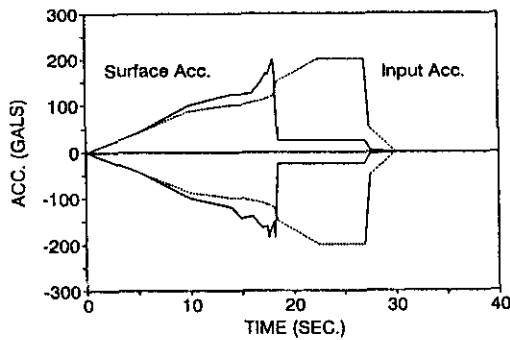
그림 4. 모형 제방의 진동대 실험에서 나타낸 가속도와 간극수압 발생의 이력 (Case 1)



(a) Case 3 - Loc. c



(b) Case 3 - Loc. d



(c) Case 5-1

그림 5. 모형 앵커말뚝과 소형 수평지반에서 측정된 가속도의 기록

그림 5 와 같이 강널말뚝 구조물의 다져진 지반에서는 부간극수압 (Negative pore pressure)이 발생 되었는데 이는 진동 하중으로 인하여 발생된 전단응력이 다져진 모래에 다이레턴시 (Dilatency) 현상을 유발한 것으로 보인다. 진동대 실험을 통하여 액상화된 지반에 발생한 간극수압의 기록과 유동변형의 특성은 대단히 복잡하게 나타나고 있으나 이를 정량적으로 간단히 정리하면 다음과 같다.

- (1) 초기 전단응력이 존재하는 제방의 경우 간극수압비가 70 % 에서 80 % 되는 상태에서 사면에 큰 유동변형이 발생하고 이러한 변형은 대단히 넓은 지역으로 퍼져 나간다.
- (2) 일단 액상화된 지반에서 유동변형의 크기는 진동 가속도의 크기보다는 액상화 된 지반의 넓이 및 형태 그리고 액상화 되어 있는 상태에 영향을 받는다.
- (3) 액상화된 지반과 비 액상화된 지반에서는 간극수압의 발생뿐 만 아니라 지반 가속도의 형태에도 큰 차이를 보여 지반이 액상화 되기 직전에 가속도가 크게 증폭되며 일단 액상화 된 지반에서는 진동 가속도가 크게 감소한다.

5. 지표 스펙트럼 강도와 간극수압의 관계

스펙트럼 강도는 지진에 의한 구조물의 반응을 나타낸 것이다. 연약한 사질토 지반을 하나의 구조물로 가정한다면 연약 사질토 지반에 발생하는 액상화 현상을 스펙트럼 강도와 연관하여 볼 수 있다. 이러한 관계를 규명하기 위하여 진동대 실험을 통하여 얻어진 모형 지반의 스펙트럼 강도와 간극 수압의 관계를 분석하고, 이를 통하여 지반의 액상화를 유발시키는 스펙트럼 강도의 크기를 규정하고자 한다. 이러한 해석으로 실제의 사질토 지반에 대하여 액상화 가능성을 지진 즉시 판별할 수 있다. 만일 현장에서 쉽게 지표면의 지진 가속도를 측정한다면 즉시 지표의 스펙트럼 강도가 계산되고 이 값의 크기를 분석하면 액상화 발생 가능성의 여부를 판별할 수 있을 것이다.

그림 6 과 7 은 모형지반의 스펙트럼 속도와 강도를 식 (6) 과 (10)을 통하여 구하고 이를 나타낸 것이고, 그림 8 는 상대밀도가 35 % 정도의 모형 지반에서 얻어진 스펙트럼 강도와 간극수압비의 관계이다. 지반 내의 간극수압은 지반진동에 의하여 발생하므로 스펙트럼 강도와 간극수압의 발생은 시간적으로 약간의 차이를 두고 있다. 그림 9 에서 보듯이 간극수압비가 0.1 에 도달하기까지 스펙트럼 강도는 급격히 증가하고 있으며 그후 점차 증가비가 둔화되다가 간극수압비가 0.7 정도에서 이르면 갑작스럽게 증가하여 최대값에 이른다. 갑작스런 스펙트럼 강도의 증가는 지반이 액상화되기 전에 지반이 공명 (

Resonance) 현상이 발생하여 가속도가 증폭되기 때문이다.

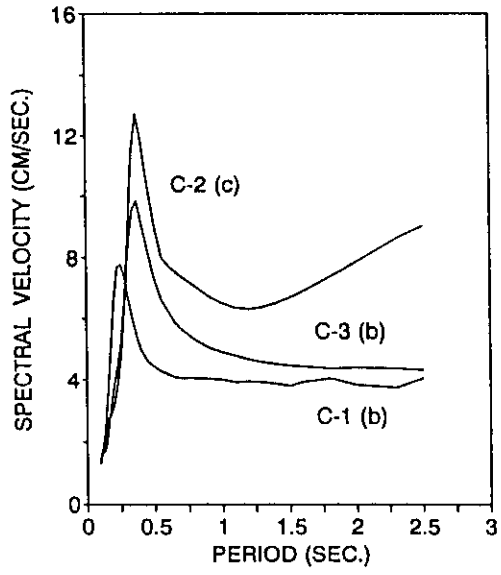
스펙트럼 강도와 간극수압비의 관계는 진동주기, 가속도의 크기, 및 지반의 형태등과 관계없이 하나의 함수로 나타낼 수 가 있다. 즉 스펙트럼 강도, SI를 Hyperbola 함수로 나타내면 식 (11)과 같다.

$$SI = \frac{r_u}{A + B r_u} \dots (11)$$

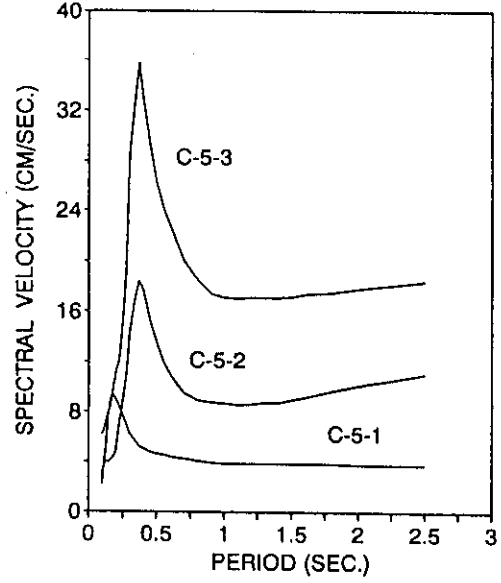
여기서, r_u 은 간극수압비, A 와 B 는 계수이다. 표 5 는 각 모형지반에서 액상화가 시작된 때의 스펙트럼 강도값을 나타내 주고 있다. 액상화를 유발시키는 스펙트럼 강도 값은 지반의 상대밀도에 따라 다르나 상대밀도 약 35 % 의 지반에서는 진동조건과 관계없이 4 에서 5 사이의 값을 갖고 있다. 그림 9 은 상대밀도가 서로 다른 지반에서 스펙트럼 강도와 간극수압비를 나타내고 있다. 상대밀도가 클 수록 액상화에 필요한 스펙트럼 강도가 커지고 있다.

표 4. 액상화 지반의 스펙트럼 강도

Case	Model Type	Loc.	Relative Density D_r (%)	Freq. (Hz)	SI of $r_u = 0$	Hyperbola Func.		Remarks
						A	B	
1	Embankment	b4	24.5	5	4.25	0.0125	0.222	
2	Double sheet pile	c4	30.5	3	5.85	0.0125	0.222	
		d5	30.5	3	4.70	0.0125	0.222	
3	Anchor sheet pile	b4	31.1	3	4.90	0.0125	0.222	
4	Reinforced pile	d5	36.2	3	5.00	0.0125	0.222	
5-1	Level ground	center	40.7	6	4.25	0.0125	0.222	
5-2	Level ground	center	42.5	3	9.90	0.008	0.114	
5-3	Level ground	center	53.8	3	14.30	0.006	0.079	

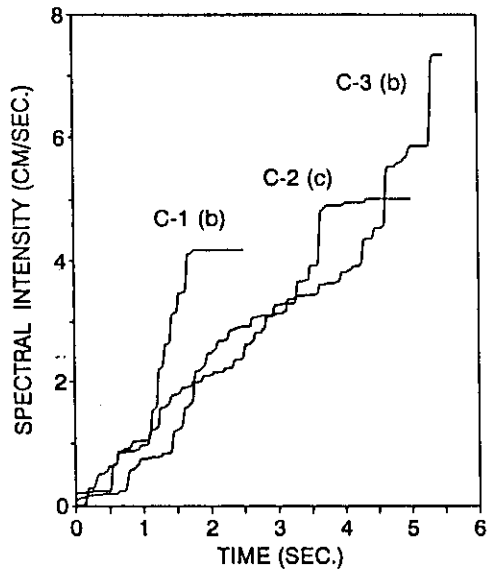


(a) Cases 1, 2, and 3

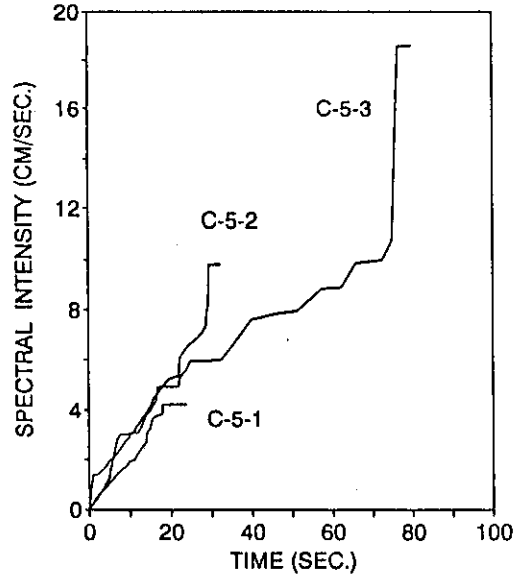


(b) Case 5

그림 6. 모형지반에서 측정된 지표 가속도를 기준한 스펙트럼 속도



(a) Cases 1, 2, and 3



(b) Case 5

그림 7. 모형지반에서 계산된 시간에 따른 스펙트럼 강도

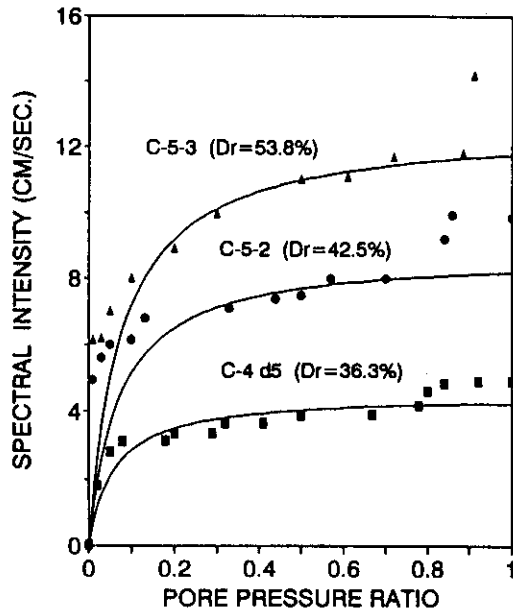


그림 8. 상대밀도 약 35 % 지반에서 나타난 간극수압의 발생과 스펙트럼 강도

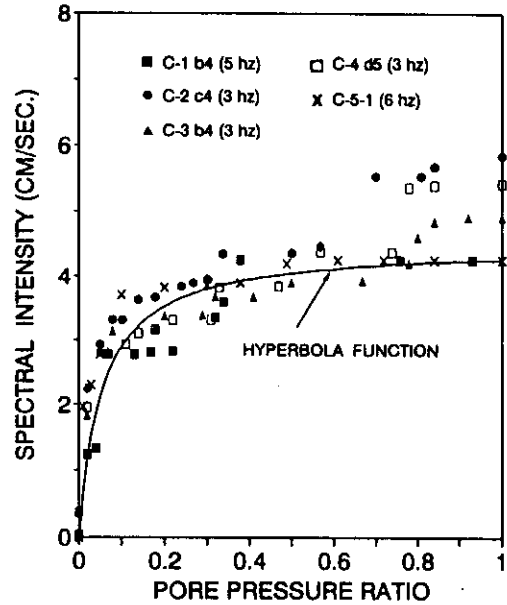


그림 9. 상대밀도가 다른 지반에서 나타난 간극수압의 발생과 스펙트럼 강도

5. 결론

본 연구는 모형 항만 구조물에 대한 진동대 실험을 통하여 액상화 지반의 측방유동에 대한 정량적인 거동을 규명하고 지반의 액상화 가능성을 판별하기 위한 스펙트럼 강도 해석을 실시하였다. 일단 액상화된 지반에서는 진동가속도가 급격히 감소하며 지반의 측방유동은 대단히 넓은 범위에서 발생하며, 측방유동의 크기는 액상화된 지반의 넓이, 지반의 형태 및 경사, 지반의 초기 전단응력 등에 영향을 받는다. 또한 지반의 스펙트럼 강도와 간극수압비는 진동조건 및 지반의 형태와 관계없이 일정한 관계를 가지고 있어 Hyperbola 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 지반의 밀도에 대하여 액상화를 유발하는 최대 스펙트럼 강도를 기준으로 하여 현장에서 지진 즉시 액상화 가능성을 판별할 수 있다. 그러나 진동대 실험에

서 얻어진 스펙트럼 강도는 실제 지진에서 얻어진 값보다 훨씬 적은 값에서 지반이 액상화 현상이 발생하였다. 이러한 결과는 모형지반의 두께가 현장에 비하여 대단히 얇고 지하수 위의 포화되지 않은 성토 투께 및 지반의 밀도 차이에서 오는 영향 (Scale effect) 으로 생각해 볼 수 있다. 따라서 현장의 자료를 중심으로 이 분야에 대한 연구가 더욱 필요하다.

감사의 글

본 연구는 과학재단의 Post-doc. Program 에 의하여 이루어진 것으로 과학재단에 감사드리며, 아울러 본 연구를 지도해 주신 동경대학의 Kenji Ishihara 교수와 Ikuo Towhata 교수께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Housner, G. W. (1959), "Behavior of Structures during Earthquakes," J. of Eng. Mech. Div., ASCE. pp. 109 - 129.
- (2) Hamada, M., Yasuda, S., Isoyama, R. and Emoto, K. (1986), "Observation of Permanent Ground Displacements Induced by Soil Liquefaction," Proc. Japan Society of Civil Engineering, No. 336, III-6, pp. 211-220.
- (3) Ishihara, K. and Takeuchi, M. (1991), "Flow Failure of Liquefied Sand in Large - Scale Shaking Tables," Proc. of 2'nd Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Eng. and Soil Dynamics, March, St. Louis.
- (4) Paz, M. (1985), Structural Dynamics, Theory and Computation, Van Norstrand Reinhold Company, New York.
- (5) Sasaki, Y. (1991), "Strategy for Remedical Treatment of Liquefiable Soil," Int. Workshop for Remedial Treatment of Liquefiable Soil, PWRI, Tsukuba, Japan, pp. 1-11.