

# 국내 연안지역의 액상화 구역도 작성에 관한 연구

## Study on Mapping of Liquefaction Hazard Potential at Port and Harbor in Korea

강 규 진\*      박 인 준\*\*      김 수 일\*\*\*  
Kang, Gyu Jin      Park, Inn Joon      Kim, Soo Il

### 국문요약

본 연구에서는 항만 및 어항시설의 내진설계표준서에서 채택하고 있는 수정 Seed와 Idriss방법을 이용하여 액상화 평가를 수행하고 액상화 가능지수(Liquefaction potential index, LPI)와 등가 액상화 안전율(FE)을 이용하여 액상화 가능성에 대한 구역도를 작성하였다. 이 두 결과가 유사한 것으로 나타나 등가 액상화 안전율의 적합성을 확인하였다. 국내 연안의 두 지역에 대하여 Hachinohe지진기록과 Ofunato지진기록을 이용한 액상화 가능성 구역도를 FE를 이용하여 작성한 후 비교한 결과, Hachinohe지진기록에 의한 액상화 가능성 구역도가 더 과소평가되는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 FE는 안전율의 형태로 표현되었기 때문에 구역도 작성과 해석에 편의성을 제공하였다.

**주요어** : 액상화구역도, 액상화 가능지수, 등가 액상화 안전율

### ABSTRACT

In this study, liquefaction hazard potential was assessed by modified Seed and Idriss method and maps of liquefaction hazard potential utilized by LPI(liquefaction potential index) and FE(equivalent liquefaction factor of safety) were constructed in two dimensional space. Comparisons of liquefaction hazard maps assessed by LPI and FE are represented to verify the FE method proposed in this study. Based on the results of comparing two liquefaction hazard maps using LPI and FE, there are similar distribution trend of zonation indices. From the result of comparison of liquefaction hazard maps of FE base using Hachinohe and Ofunato PGA(peak ground acceleration) data at two different sites of port and harbor in Korea, the values of FE in liquefaction hazard map using Hachinohe data are underestimated. And in the view of quantitative analysis, FE is more convenient than LPI, because types of results from FE are factor of safety that widely used in geotechnical practice and aseismic design standard for port and harbor in Korea.

**Key words** : liquefaction hazard map, liquefaction potential index, equivalent liquefaction factor of safety

## 1. 서 론

현재 국내에서는 협소한 토지사정과 함께 지역개발목적으로 인하여 연안지역을 개발하는 곳이 많아지고 있으며 대부분 액상화에 대한 안정성 평가를 많이 수행하고 있다. 액상화 평가를 수행할 때에는 경험적으로 제안된 간편해

석법을 이용하여 많이 이루어지고 있으며 특별한 경우에 한하여 진동삼축시험과 같은 추가조사를 이용한 상세예측법이 이용된다. 그러나 이들 평가방법들은 표준관입시험이나 콘관입시험이 이루어지는 시추공에 대하여 깊이별로 액상화에 대한 안전율을 산정하고 있기 때문에 이보다 광범위한 지역에 대하여 전체적인 액상화에 대한 안정성 검토에는 어려움이 많다.

광범위한 지역의 액상화 발생 가능성을 알아 보는 방법으로는 구역도를 작성하는 방법이 있다.

\* 연세대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 정희원 · 연세대학교 토목공학과 박사후과정

\*\*\* 정희원 · 연세대학교 토목공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2000년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

Youd<sup>(1)</sup>는 과거에 발생한 지진자료와 지질학적 자료를 이용하여 지반의 파괴가능성에 대하여 구역도를 작성하였다. 또한 Youd<sup>(2)</sup>는 액상화 발생 가능성에 대한 구역도를 작성하는데 필요한 지표인 액상화 강도지수(liquefaction severity index)를 제안하였으며 이를 이용하여 California 지역에 대하여 액상화 발생 가능성에 대한 구역도를 작성하였다. 그리고 Iwasaki<sup>(3)</sup>는 구역도 작성 수행 지표인 액상화 가능지수, liquefaction potential index(LPI)를 제안하였으며 Divakarla 등<sup>(4)</sup>은 푸에르토리코에서 LPI를 이용하여 구역도를 작성하였다.

본 연구에서는 광범위한 지역에 대하여 액상화에 대한 안정성을 알아볼 수 있는 구역도에 대하여 알아보고 국내 지형에 알맞는 구역도 작성 방법을 제안하고자 한다. 그리고 이것을 Iwasaki의 구역도 작성방법인 LPI와 비교하였으며 이를 이용하여 국내 연안지역 두 곳에 대한 구역도를 작성하였다.

## 2. 액상화 구역도 작성

현재까지 제안된 여러 액상화 간편해석법들은 특정 지점에서 깊이별 액상화에 대한 안전율을 구할 수 있다는 점에서 유용하게 쓰일 수 있으나 이를 광범위한 지역으로 확대 적용하는 데에는 사용에 어려움이 많다. 따라서 이를 보완하여 광범위한 지역에 대한 액상화 발생 가능성을 알아보는 방법으로는 구역도를 작성하는 방법이 있으며 일본과 미국 등지에서는 이에 대한 기준을 마련해 놓은 상태이다. 국제 토질 및 지반공학회(ISSMGE) 산하의 지진지반공학 기술위원회(TC-4)에서는 여러 가지 구역도 작성 방법을 단계별로 설명<sup>(3)</sup>하고 있으며, Iwasaki는 액상화에 대한 안전율을 이용하여 구역도를 작성하는 방법<sup>(3)</sup>을 제안하였다.

### 2.1 액상화 가능지수(liquefaction potential index, LPI)<sup>(3)</sup>

Iwasaki는 1982년 액상화에 대한 피해가 어

느 정도 가능한지를 식 (1)을 이용하여 정량적으로 나타냈다.

$$P_L = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \quad (1)$$

여기서, z는 지표면에서의 깊이(m)를 나타내고 F(z)는 액상화에 대한 안전율( $F_L$ )의 함수로써 안전율이 1보다 작은 경우에는  $F(z)=1-F_L$ 로 나타내지만 1보다 큰 경우에는  $F(z)=0$ 이다. 그리고 w(z)는 깊이에 따른 가중치로써  $w(z)=10-0.5z$ 로 나타낸다.

$P_L$ 의 값은 1에서 100사이의 범위를 가지며  $P_L$ 의 범위에 따른 액상화에 대한 피해정도는 표 1과 같다.

표 1  $P_L$ 의 범위에 따른 액상화 피해정도<sup>(4)</sup>

LPI 범위	피해정도
0	피해 없음
$0 < P_L \leq 5$	피해정도가 적음
$5 < P_L \leq 15$	중간정도의 피해
$P_L > 15$	피해정도가 큼

Divkarla 등은 위의 과정을 거쳐서 1998년 푸에르토리코에서 액상화 가능지수를 이용하여 그림 1에 나타난 바와 같이 액상화에 대한 구역도를 작성하였다.<sup>(4)</sup>

그림 1의 결과는 지진규모 7.5에서 지표면 최대가속도를 0.05g부터 0.15g까지 변화시키며 얻은 결과이며  $P_L$ 의 값의 범위에 따라 명암으로 구분된 선으로 구역도를 작성한 것이다. 이 결과에 의하면 그림 1(a)에서는 대부분의 지역이 액상화가능지수가 5보다 작은 경미한 피해지역이고 일부 지역이 액상화가능지수가 15보다 작은 중간 정도의 피해지역이며 일부 지역이 액상화가능지수가 15보다 큰 피해가 예상되는 지역임을 나타내고 있다. 그러나 지표 최대가속도 0.15g인 그림 1(c)를 보면 대부분의 지역이 큰 피해지역임을 나타내고 있다.

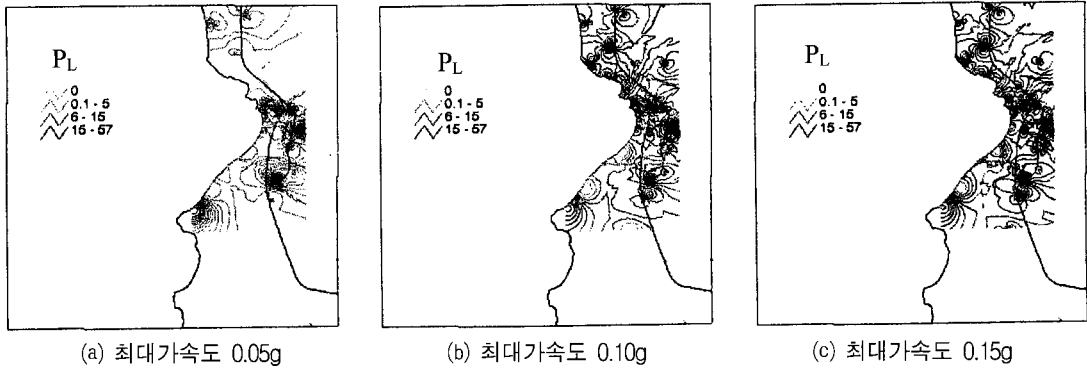


그림 1 푸에르토리코에서의 액상화 피해 구역도<sup>(4)</sup>

## 2.2 등가 액상화 안전율

국내에는  $P_L$ 과 같은 구역도를 작성하는데 필요한 지표가 현재까지 제안되어있지 않기 때문에 구역도 작성에 어려움이 있으며  $P_L$ 의 국내 지반 조건에 대한 적합성도 알 수 없다.

따라서 국내 사정에 적합한 것으로 보고 된 수정 Seed와 Idriss의 방법<sup>(5)</sup>을 이용하여 구한 안전율과 깊이에 따른 보정계수를 곱하여 조사지점에서의 깊이별로 다른 액상화에 대한 안전율을 값을 대표할 수 있는 하나의 값으로 나타내는 등가 액상화 안전율(FE)을 제안하였다.<sup>(6)</sup>

$$FE = \frac{\sum F_{si} \cdot WF_i \cdot H_i}{H_T} \quad (2)$$

식 (2)는 등가 액상화 안전율을 구하는 식으로써  $F_{si}$ 는 임의의 한 깊이에서의 액상화에 대한 안전율,  $WF_i$ 는 깊이별 가중계수,  $H_i$ 는  $F_{si}$ 를 구한 심도와  $F_{si-1}$ 를 구한 심도의 차이를 나타내며  $H_T$ 는 대상 지층의 총 두께를 말한다.  $WF_i$ 의 값은 지표면에서는 1.6 그리고 심도 15m에서는 0의 값을 가지도록 선형의 분포로 하여 심도가 깊어질수록 커지는 구속압으로 인해 전체적인 안전율에 기여도가 적은 것을 고려하고 있다. 국내에서 발생한 지진규모를 고려할 때 액상화가 발생할 수 있는 최대심도는 15m로 제한<sup>(4)</sup>되었기 때문에 이를 이용하여 가중치의 적용범위를 15m 이내로 제한하였다.

그림 2는 등가 액상화 안전율(FE)을 구하는 과정을 그림으로 설명한 것이다. 깊이별로 액상화에 대한 안전율을 구하고 여기에 안전율을 구한 깊이에서의 가중치를 곱하는 과정을 거쳐 등가 액상화 안전율을 구한다. 식 (2)를 사용하

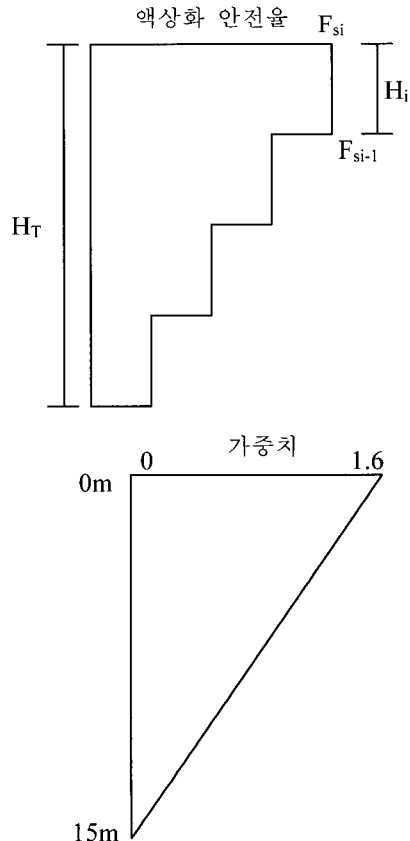


그림 2 등가 액상화 안전율의 개념

면 대상 지점에서 깊이에 따라 다른 값을 가지는 안전율을 대상 지점을 대표할 수 있는 하나의 안전율의 형태로 표시할 수 있기 때문에 이용시 편리할 것으로 생각되며 국내에서의 액상화에 대한 구역도 작성시에도 도움이 될 것으로 판단된다. 또한 등가 액상화 안전율의 범위를 해양수산부의 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서<sup>(5)</sup>의 내용에 맞추어 1.0이하에서는 액상화에 의한 피해가 예상되는 지점이고, 1.0에서 1.5사이에서는 진동삼축시험 또는 진동대 시험과 같은 추가적인 시험이 필요한 지역, 1.5이상에서는 액상화에 대하여 안전한 것으로 하여 이용하기 쉽게 하였다.

### 3. 액상화 구역도 작성

본 장에서는 세 곳의 국내 연안지역을 선정하여 지진응답해석과 함께 액상화 평가를 수행하고 이 결과를 이용하여 액상화 구역도를 작성하였다. 우선 한 곳을 선정하여 PL과 FE에 의한 결과를 비교하여 FE의 적합성에 대하여 알아보았으며 나머지 두 곳은 FE를 이용하여 구역도를 작성하였다. 구역도 작성에 필요한 액상화에 대한 안전율은 수정 Seed와 Idriss의 방법을 이용하여 구하였으며 액상화 평가에 이용되는 지점최대가속도는 지진 재해도상에서 구한 설계지진가속도와 Shake91을 이용한 지진응답해석을 수행하여 구하였다.

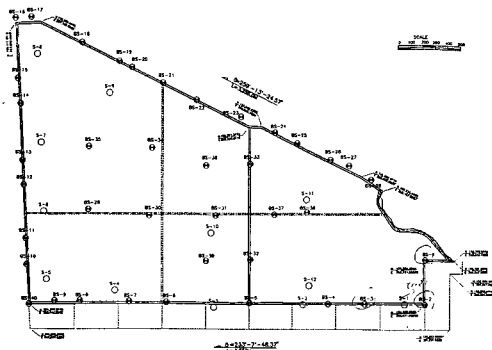
### 3.1 PL과 FE의 비교

그림 3은 국내 연안의 광양만 지역을 대상으로 작성한 시추위치도이며 A지역으로 명명하였다. 이 지역은 퇴적층, 풍화대, 그리고 기반암으로 구성되어 있으며 퇴적층은 실트에서 자갈까지 다양하게 구성되어 있다. 퇴적층의 두께는 1.3m에서 21.0m까지 다양하며 표준관입저항치는 0에서 5가량으로 매우 연약하다. 풍화대의 두께는 0.3m에서 3.9m사이에 분포하며 기반암의 경우 2.7m에서 22.3m깊이에 존재한다. 그림 3(a)는 원시추위치도이며 그림 3(b)는 A지역에 대하여 구역도를 작성하기 위하여 구성한 구역도망이다. 구역도를 작성하기 위하여 시추공별로 지진응답해석과 함께 액상화 평가를 수행하였으며 이 때 이용된 시추공의 수는 총 40개이다. 지진응답해석에 이용된 조건은 표 2와 같다.

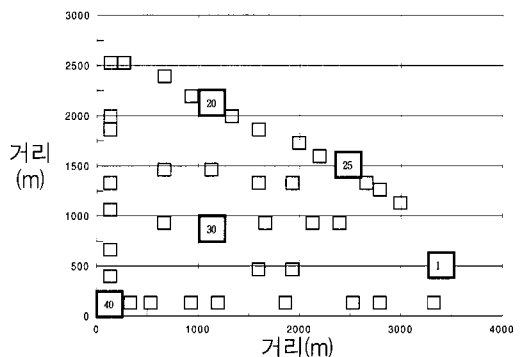
표 2에서의 설계지진가속도는 붕괴방지 1등급에 해당하는 재해도상에서 A지역을 찾아 그곳에서의 설계지진가속도를 읽은 값이다. 또한 국내에서 발생한 지진의 규모를 고려하여 설계

표 2 지진응답해석 수행 조건

설계지진가속도	0.12g
설계지진규모	6.5
해석에 이용된 지진기록	Hachinohe, Ofunato
지하수위 위치	0m(지표면)



(a)



(b)

그림 3 A지역의 시추위치도

지진규모를 6.5로 산정하였으며 해석에 이용된 지진기록은 장주기와 단주기 특성을 대표하는 Hachinohe지진기록과 Ofunato지진기록이다. 따라서 이 두 지진기록을 이용함으로써 지반의 주기에 따른 특성을 알아낼 수 있다. 또한 지하수위의 위치를 지표면으로 하여 대상지반이 완전 포화된 것으로 가정하였다. 그 외 해석에 이용되는 표준관입저항치는 시추자료에 명시된 값을 이용하였으며 동적물성치의 하나인  $G/G_{max}$ 의 값은 Shake91에서 기본적으로 제공하고 있는 값을 이용하였다. 구역도 작성시 대상지역은 지반구조물이 위치하게 되는 연안지역을 대상으로 하며 이들 지역은 대부분 매립을 통해 조성된다. 따라서 이를 고려하기 위하여 A지역에 깊이 10m지점까지 매립치환한 것으로 가정하였다.

표 3은 A지역에서 구역도를 작성하는데 필요한 두 지표인  $P_L$ 과 FE의 값을 구하여 비교한 것이다. 그리고 표 4는 표 3의 결과를 이용하여  $P_L$ 을 기준으로 하여 FE의 정확도를 분석한 것이다. 즉  $P_L$ 의 결과와 일치하는 지역,  $P_L$ 보다 과소평가하는 지역,  $P_L$ 보다 과대평가하는 지역으로 나누어 각각 백분율로 나타내었다. 그리고 일치하는 지역과 과소평가하는 지역을 안전측의 결과를 나타내는 것으로 보고 두 부분의 결과를  $P_L$ 에 대한 FE의 정확도로 산정하였다. 표 3의 결과를 보면 지진기록에 상관없이  $P_L$ 의 결과와 FE의 결과가 대체로 일치하거나 과소평가하는 경향을 보임으로써 안전측의 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 FE를  $P_L$ 대신에 이용하는데 문제가 없을 것으로 판단된다.

### 3.2 액상화 구역도 작성

그림 4는 액상화 구역도를 작성한 국내 연안 지역중에서 부산에 위치한 B지역과 새만금 지역의 일부인 C지역의 시추위치를 나타낸 것이다. 두 지역의 대략적인 지질상태를 살펴보면 B지역의 시추위치는 모두 33개이고, 두께 1.4m에서 48m의 퇴적층이 존재하며 2.7m에서 41.7m

깊이에 풍화암층이 존재하고 있다. C지역의 시추위치는 모두 30개이며 해성퇴적층의 경우 실트질 점토층, 점토질 실트층, 실트질 모래층 등이 다양하게 분포되어 있다. 해성퇴적층의 두께는 11.0m에서 12.7m의 두께를 가지며 심도 13.2m에서 16.4m에 기반암이 존재한다. 두 지역에 대하여 3.1절의 표 2의 조건을 이용하여 지진응답 해석을 수행하였으며 항만 내진설계표준서<sup>6)</sup>에

표 3 A지역 액상화 구역도 지표 결과

지역	$P_L$		FE	
	Hachinohe	Ofunato	Hachinohe	Ofunato
1	11.56	13.44	1.24	0.96
13	8.91	4.94	0.88	1.29
14	10.74	11.69	0.87	0.86
16	6.60	4.20	1.00	1.22
17	1.89	2.52	1.34	1.15
18	0	0	2.94	3.88
20	7.22	9.82	1.35	1.15
22	8.94	11.55	1.39	1.01
23	15.24	12.63	0.62	0.75
25	6.18	5.61	2.35	1.72
27	6.08	5.60	1.47	1.76
28	6.37	6.08	1.71	1.95
30	13.08	16.16	0.82	0.87
31	15.33	17.09	0.78	0.76
33	12.52	14.20	1.03	1.07
34	10.40	11.34	1.18	0.84
36	14.61	17.51	0.80	0.84
37	11.49	12.69	0.88	0.85
39	9.87	9.81	0.90	0.89
40	6.42	9.77	1.01	0.95

표 4 A지역의 FE 정확도 분석

	Hachinohe 지진기록	Ofunato 지진기록
일치(①)	29개소	22개소
과소평가(②)	9개소	14개소
과대평가(③)	2개소	4개소
①+② (%)	95%	90%

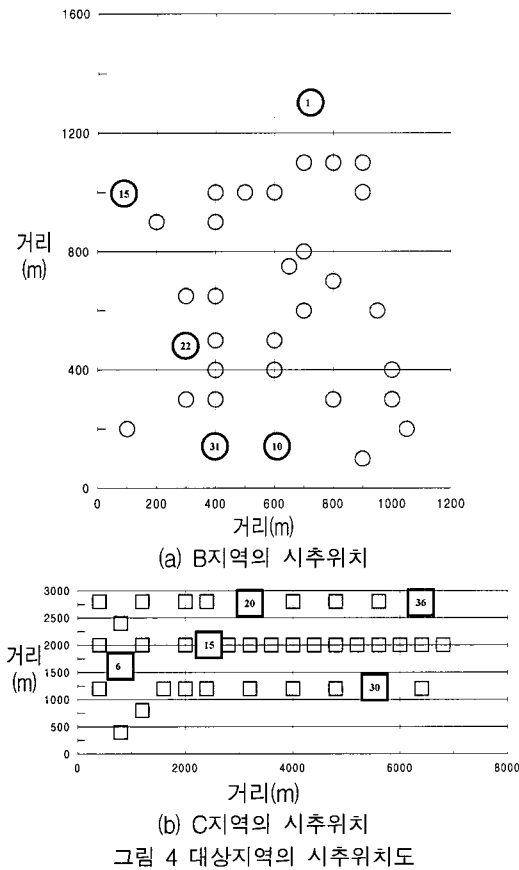


표 5 B지역과 C지역의 액상화 구역도 지표 결과

B지역			C지역		
지역	Hachinohe	Ofunato	지역	Hachinohe	Ofunato
1	1.07	1.00	6	1.20	1.27
2	1.15	1.13	7	1.27	1.22
9	1.38	1.48	9	0.95	1.20
10	1.08	1.12	11	0.86	1.47
11	1.19	1.34	15	0.89	0.93
13	1.14	1.07	17	1.01	0.87
15	0.85	1.13	18	0.97	1.22
16	0.89	0.85	19	1.00	1.61
17	2.83	3.39	20	0.88	1.03
18	0.81	1.18	21	0.76	0.78
21	1.67	1.59	22	1.06	1.85
22	1.04	1.06	23	0.80	0.92
23	0.89	0.90	24	1.12	1.12
26	1.07	1.07	27	1.09	1.06
27	1.09	1.11	28	0.98	1.33
30	0.87	0.89	29	0.73	0.35
31	0.98	0.91	30	0.82	0.81
32	0.82	1.01	32	0.91	0.94
33	1.03	0.91	33	0.85	0.85
34	1.05	0.93	36	0.68	0.72

의거하여 액상화 평가를 수행한 후 FE를 이용하여 액상화에 대한 구역도를 작성하였다.

표 5는 B지역과 C지역을 대상으로 하여 지진 응답해석과 액상화 평가를 수행하고 이를 이용하여 구역도 작성에 필요한 FE의 값을 구한 것이다.

그림 5를 보면 두 구역도의 전체적인 형상은 서로 유사한 것을 알 수 있다. 그러나 Hachinohe 지진기록을 이용했을 때 Ofunato 지진기록을 이용한 구역도보다 불안정한 구역인 교차선으로 표시한 지역이 부분적으로 넓게 존재하고 있는 것을 알 수 있으며 상대적으로 안정지역인 수직선으로 표시한 부분이 적은 것을 알 수 있다.

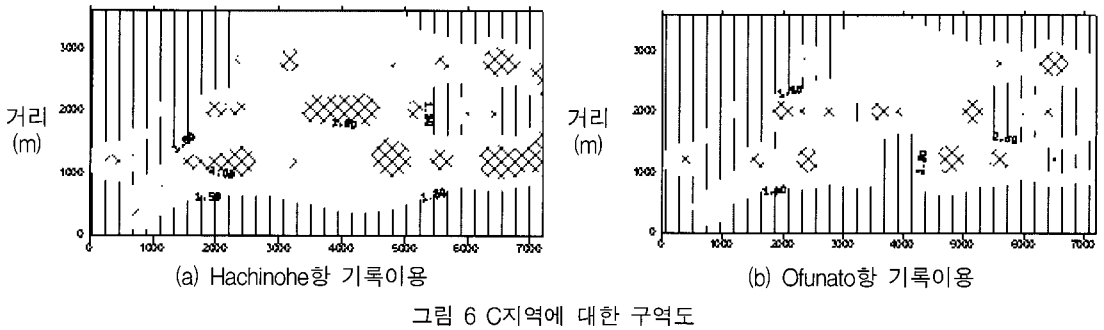
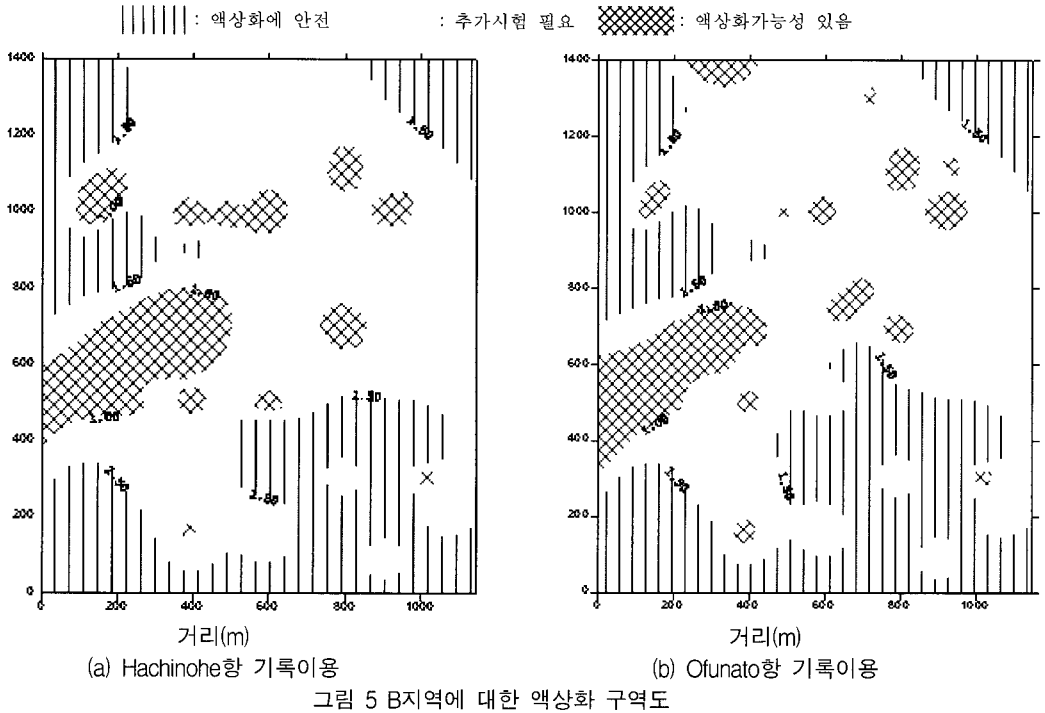
C지역의 액상화 구역도를 나타내는 그림 6도 B지역과 비슷한 경향을 보이고 있다. Hachinohe 지진기록을 이용하였을 때 Ofunato 지진기록에 의한 결과보다 교차선으로 표시한 지역이 상대

적으로 넓게 존재하고 있으며 추가조사가 필요한 지역인 수평선으로 표시한 부분도 Hachinohe 지진기록에 의한 구역도에서 넓게 분포하고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

국내 광양지역의 한 지역을 대상으로 하여  $P_L$ 과 FE를 비교하였으며 국내 연안의 부산과 새만금 지역의 두 곳을 선정하여 FE를 이용하여 구역도를 작성하였다.

광양지역을 대상으로 하여  $P_L$ 과 FE를 비교한 결과,  $P_L$ 을 기준으로 하였을 때 FE의 값이 일치하거나 과소평가하는 경향을 보임으로써 FE를 이용하는데 적합성을 확인하였다. FE를 이용하여 부산과 새만금의 일부지역을 선정하여 지진 응답해석, 액상화 평가를 수행한 후 이 결과들



을 이용하여 구역도를 작성한 결과 Hachinohe 지진기록을 이용하였을 때 Ofunato지진기록에 의한 결과보다 과소평가하는 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있었다. 특히 두 지진기록에 의한 구역도의 전체적인 형상은 비슷하게 나왔으나 부분적으로 불안정한 지역과 추가시험이 필요한 지역이 단주기인 Ofunato 지진기록에 의한 결과보다 장주기인 Hachinohe지진기록에 의한 결과가 넓게 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 주기특성이 다른 두 지진기록에 따라서 다른 경향을 보임으로써 부산지역과 새만금 지역의 지반이 장주기에 의한 피해를 더 많이

받을 수 있음을 확인할 수 있었다. 그러므로 FE는  $P_L$ 과 유사한 결과를 이끌어내면서 안전율의 형태로써 이용에도 편리하기 때문에 국내에서의 액상화에 대한 구역도 작성에 이용할 경우 유용할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 KISTEP(N2-01-01-A01) "지진재해 대응기술 개발사업"과 KEERC(97K3-1301-02-01-3) "기초와 지반의 지진응답 특성 규명연구"의 지원에 의한 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Youd, T. L. and Perkins, D. M., "Mapping liquefaction-induced ground failure potential," *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 104, No. GT4, April, 1978.
2. Youd, T. L. and Perkins, D. M., "Mapping of liquefaction severity index," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 113, No. 11, November, 1987.
3. The Japanese Geotechnical Society, *Manual for Zonation on Seismic Geotechnical Hazards*, 1999.
4. Pawan, K. D., Hoyos, R. L. Jr., and Macari, E. J., "Assessment of liquefaction potential of western Puerto Rico," *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE*, Vol 1, Geotechnical Special Publication No. 75, 1998.
5. 한국해양연구소, 항만 및 어항시설의 내진설계표준서, 해양수산부, 1999.
6. 강규진, "국내 연안지역의 액상화 발생 가능성 구역도 작성에 관한 연구", 석사학위 논문, 연세대학교, 2000.
7. 신운섭, 박인준, 최재순, 김수일, "국내 발생 지진규모를 고려한 액상화저항강도 산정", 한국지반공학회 논문집, 제15권 제6호, 1999, pp. 307-317.