

국내 연안지역의 액상화 재해도 작성기법 개발

Development of the Method for Liquefaction Hazard Microzonation in Korean Coastal Areas

곽창원¹⁾, Chang-Won Kwak, 최재순²⁾, Jae-Soon Choi, 강규진³⁾, Kyu-Jin Khang, 김수일⁴⁾, Soo-Il Kim

¹⁾ (주) 청석엔지니어링 토목기사, Engineer, Chungbuk Engineering. Co. Ltd.

²⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사후과정, Post-Doctor, Dept. of Civil Engr., Yonsei University

³⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Yonsei University

⁴⁾ 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engr., Yonsei University

개요(SYNOPSIS) : Reclaimed coastal areas for the construction of ports and harbors are in general subjected to strong possibility of liquefaction. In this research, a new method for liquefaction hazard microzonation based on liquefaction settlements was developed. Severity of liquefaction hazard was defined by liquefaction settlements obtained from the method proposed by Tokimatsu and Seed. 10 coastal areas, representing typical geological and geotechnical characteristics of Korean ports and harbors, and 3 real earthquake records for site response analysis were selected. From this research, liquefaction settlement criteria is adapted as a new quantitative index for the liquefaction hazard microzonation. Liquefaction settlements were also compared with LPI (Liquefaction Potential Index), obtained from the assessment of liquefaction potential based on the modified Seed and Idriss's method. As an example, 2 and 3 dimensional liquefaction hazard microzonations of Pusan port and harbor area were mapped by overlapped liquefaction settlement contours.

주요어(Key words) : Liquefaction hazard microzonation, Liquefaction settlement, LPI(Liquefaction Potential Index), Real earthquake record, Korean coastal area

1. 서론

Hogoken-Nanbu 지진(일본 고베, 1995)을 비롯하여 세계적으로 발생한 지진피해보도로 인해 1990년 중반부터 국내에서도 내진구조물의 건설 및 보수보강에 대한 필요성을 인식하고 이에 대한 연구를 수행해 오고 있는 실정이다. 특히, 액상화 안정성 평가는 구조물 종류에 관계없이 기본적으로 수행되어야 하는 내진검토항목으로 인식되어 세부전공사항에 상관없이 모든 건설분야에서 많은 관심을 갖고 있다. 포화된 느슨한 사질지반이 지진과 같은 급격한 진동하중이 가해질 때 비배수조건의 과잉간극수압이 발생하는 액상화 현상에 대한 평가는 경험적으로 제안된 간편해석법을 이용하며 특별한 경우에 한하여 진동삼축시험과 같은 추가시험을 통해 상세평가를 수행하는 것이 일반적이다. 그러나, 액상화 평가가 시추공을 중심으로 조사된 깊이별 지반조사자료에 기초하게 되므로 건설예정지 전역에 걸친 종합평가를 수행하기 어려울 뿐만 아니라, 많은 비용이 소요되게 된다. 이러한 연유로 미국 및 일본 등 선진지진연구국

가에서는 효과적인 대책마련을 위해 지반진동, 액상화, 지진시 사면파괴 등의 중요 내진검토사항들을 지도상에 표시함으로써 공학기술자들의 이해편의를 도모하는 재해도 작성연구에 많은 연구력을 집중시키고 있는 실정이다. 본 연구에서는 기존의 재해도 작성기법에 대한 분석연구를 기초로 하여 중약진 지진 대로 대별되는 국내 지진특성에 대한 고려와 침하량과 같이 정량적 표현이 가능한 국내 액상화 재해도 작성기법을 개발하고자 한다.

2. 액상화 재해도 작성기법

액상화 재해도는 평가심도별 액상화 평가결과를 종합하여 2차원 또는 3차원화하여 나타내는 것으로 일반적으로 지진피해자료가 많지 않은 국가에서는 액상화 평가결과를 이용한 액상화 가능성 지수(Liquefaction Potential Index, LPI)로 표현하는 것이 일반적이다. 그러나, 액상화 가능성 지수는 위험정도의 수준을 쉽게 가늠하기 어렵기 때문에 재해도 본연의 목적을 달성하기 어려울 뿐만 아니라 별도의 부연설명을 위한 도표가 필요하게 된다. 본 연구에서는 건설기술자뿐만 아니라 일반인들도 쉽게 이해할 수 있도록 액상화 발생 예상침하량으로 간편하게 액상화 재해도를 작성하는 기법을 개발하고 이를 액상화 가능성 지수와 의 상관관계를 통해 비교하고자 한다.

2.1 표준관입저항치에 기초한 액상화 발생 예상침하량

느슨한 모래지반은 지진에 의해 진동을 받은 후 조밀해지는 특징을 보인다. 만일 모래지반이 포화되었고 배수가 허용되지 않는다고 가정하면 전체 체적은 일정하게 유지되고 과잉간극수압이 발생하게 되며 최종적으로 과잉간극수압이 소산될 때, 포화 모래지반의 침하가 발생한다고 할 수 있다. 이러한 메카니즘을 바탕으로 Tokimatsu와 Seed(1987)는 지진에 의한 지반진동시 포화모래지반에 발생하는 침하량을 구하는 방법을 제안하였다. 이는 지진시 지반침하의 주원인을 진동전단응력과 최대 전단변형률로 보고 대상지점의 SPT N치와 지진규모를 기준으로 제안된 체적변형률과 지진의 진동전단응력비와 보정 N치, $(N_1)_{60}$ 과의 관계를 표시한 것으로 그 관계는 그림 1에 나타낸 바와 같다.

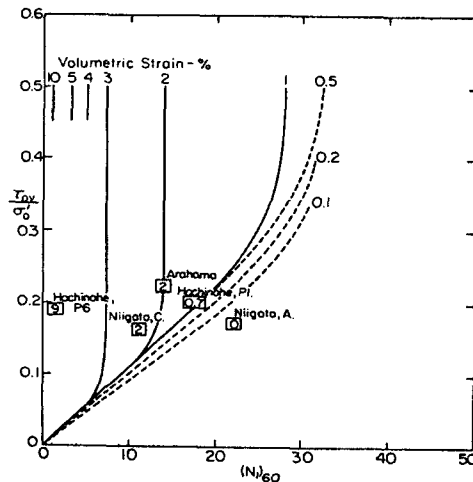


그림 1 진동전단응력비와 체적변형률 및 보정 N치과의 관계(Seed 등, 1984)

그림 1의 보정 N치 산정식은 식(1)과 같고, 침하량은 체적변형률을 깊이방향만을 고려하여 산정한다.

$$(N_1)_{60} = C_{ER} \cdot C_N \cdot N \quad (1)$$

여기서, $(N_1)_{60}$ 은 보정 N치이고 C_N 은 유효상재압에 대한 보정계수로 산정식은 식(2)와 같다.

$$C_N = \sqrt{\frac{10}{\sigma_v'}} \quad (2)$$

식(2)는 유효구속압 10kg/cm²을 기준으로 유효구속압의 영향을 정규화시키는 내용을 나타내고 있다. 또한, 식(2)에서 C_{ER}은 표준관입시험시 해머의 에너지 효율에 대한 보정계수로 Seed와 Tokimatsu(1984)는 표 1과 같이 여러 표준관입시험장비에 대해 각각의 보정계수값을 추천한 바 있다.

표 1 표준관입시험장비별 에너지 효율 보정계수 (Seed and Tokimatsu, 1984)

Country	Hammer Type	Hammer Release	Estimated Rod Energy (%)	Correction Factor for 60% Rod Energy
Japan	Donut	Free-Fall	78	78 / 60 = 1.30
		Rope & Pulley with special throw release	67	67 / 60 = 1.12
USA	Safety	Rope & Pulley	60	60 / 60 = 1.00
	Donut	Rope & Pulley	45	45 / 60 = 0.75
Argentina	Donut	Rope & Pulley	45	45 / 60 = 0.75
China	Donut	Free-Fall	60	60 / 60 = 1.00
		Rope & Pulley	50	50 / 60 = 0.83

국내의 경우, 현장지반조사에 가장 많이 이용되고 있는 표준관입시험장비의 에너지 효율에 대한 국내 정립을 통해 표준화된 결과자료를 이용해야 한다는 필요성이 강조되고 있다. 그리고, 실제적으로 여러 연구가 발표된 바 있으나, 아직까지 표준화된 기준이 제시된 바 없는 실정으로 이에 대한 기준마련이 시급하다. 그림 1은 대부분 지진규모 7.5 부근의 강진에 대한 지진피해사례를 통해 작성된 것이므로 중약진 지진대로 구분되는 국내 적용을 위해서는 Y축의 진동전단강도비를 Scaling Factor, r_m을 이용하여 보정한다. Tokimatsu와 Seed(1987)는 많은 지진피해사례분석을 통해 표 2와 같이 지진규모별 보정계수를 제안하였으며 식(3)을 통해 지진에 의한 진동전단응력비를 보정하게 된다.

$$\left(\frac{\tau_{av}}{\sigma_v'} \right)_{M=7.5} = \left(\frac{\tau_{av}}{\sigma_v'} \right)_{M=M_R} \times \frac{1}{r_m} \quad (3)$$

표 2 지진규모별 액상화 저항강도 보정계수 (Seed 등, 1983)

지진규모(M)	5.25	6.00	6.75	7.50	8.50
보정계수(r _m)	1.50	1.32	1.13	1.00	0.89

식(3)에서 아래첨자 M_R은 적용할 지진규모이고 M=7.5는 그림 1에서 Y축값이다. 그러므로, 지진규모가 7.5 미만인 경우, 표 2의 보정계수의 값이 1보다 크게 되어 실제적으로 그림 1에 적용할 지진의 진동전단응력비는 감소하게 된다. 국내 적용시에는 해양수산부 주관으로 편찬된 항만 및 어항시설 내진설계 기준에서 한시적으로 이용하고 있는 지진규모 6.5를 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

2.2 기존의 액상화 가능성 지수를 통한 재해도 작성

액상화 가능성 지수를 통한 재해도 작성은 경험적 액상화 평가법을 이용하여 산정한 액상화 평가안전을 이용한다. 전세계적으로 대부분의 내진설계시방서에 수록되어 있는 액상화 평가법이 표준관입저항치, SPT N치에 기초한 Seed와 Idriss(1971)의 간편법을 이용하는 것이 일반적이다. 액상화 평가의 경우,

해당깊이별로 평가가 수행되기 때문에 같은 지점이라 할지라도 해당깊이별 표준관입저항치와 그에 기초한 액상화 평가안전율은 다르게 된다. 그러므로, 재해도와 같이 2차원 또는 3차원으로 표현해야 하는 경우, 깊이마다 다르게 표현되는 안전율을 대상 지점을 대표할 수 있는 하나의 값으로 나타내는 것이 무엇보다도 중요하다. Iwasaki(1978)는 표준관입저항치와 액상화 평가 간편법을 이용하여 액상화에 대한 재해도를 작성할 수 있도록 액상화 가능성 지수를 제안하였다. 액상화 가능성 지수는 식(4)를 통해 산정되는데, 이는 심도별 액상화 평가안전율의 합을 통해 액상화 발생 가능성 정도를 대표하도록 한 것이다.

$$P_L = \int_0^{20} F(z) w(z) dz \quad (4)$$

여기서, z 는 심도를 나타내며 $F(z)$ 는 액상화에 대한 안전율인 F_L 의 함수로 $F(z)=1-F_L$ 의 식으로 표현된다. 이 값이 1보다 작지 않은 경우에는 0의 값을 갖는 반면, 1보다 작은 경우에는 0에서 1 사이의 값을 갖게 된다. 식(1)에서 $w(z)$ 는 가중치(Weighting Factor)로서 지반심도가 깊어질수록 유효구속압의 영향 등으로 액상화의 발생 가능성이 작아짐에 기초한 것이며 가중치 산정식은 $w(z)=10-0.5 \times z$ 이다. 이상의 내용을 토대로 산정된 P_L 값을 액상화 가능성 지수, LPI라 하며 LPI의 범위는 0에서 100까지 나타난다. 식(1)에서 적분범위한계가 지반심도 20m인 것은 유효구속압의 영향으로 지반심도 20m를 넘어서는 경우에는 액상화 발생가능성이 거의 없음을 고려한 것으로 이때, 가중치와 액상화 가능성 지수의 값은 0의 값을 갖게 된다. 국내의 경우, 20세기 계기계측 지진력 상에 나타난 지진규모 5 이상의 발생횟수는 4회이며, 지리역사학적으로 한반도는 휴지기 상태에 있으므로 국내 발생가능 지진규모는 미국 및 일본에서 기준으로 이용하고 있는 지진규모 7.5보다는 작게 산정하는 것이 내진성 확보에 요구되는 건설비용의 추가지출을 합리적으로 관리할 수 있다는 의견이 크게 대두되고 있다. 이와 관련하여 액상화 한계 지반심도도 일본에서 규정하고 있는 지반심도 20m보다 그 한계범위를 축소시켜도 무방하다는 연구(신윤섭, 1999)가 발표되었다. 그림 2는 액상화 가능성 지수의 산정과정을 요약설명한 것으로 우선 표준관입시험을 통해 얻은 지반자료를 바탕으로 액상화 평가법을 수행하여 대상 Site에서 깊이에 따른 액상화 안전율, F_L 값을 구한다. 만일, 이 값이 1보다 크면 그 깊이에서의 액상화 가능성 지수는 0이 되며 1보다 작으면 가중치, $w(z)$ 를 각 깊이별(0~20m)로 곱하게 된다. 최종적인 한 지점의 액상화 가능성 지수는 해당깊이별의 값을 합한 값이다. Iwasaki(1978)는 63개의 액상화 발생 지역과 22개의 액상화 미발생 지역을 대상으로 LPI값을 조사하여 분석한 결과에 의한 액상화 피해의 구분기준은 다음과 같다고 하였으며 그림 3은 이상의 내용을 토대로 작성한 액상화 재해도 작성사례이다.

- $P_L = 0$: 액상화 피해 없음
- $0 < P_L \leq 5$: 액상화 피해 거의 없음
- $5 < P_L \leq 15$: 액상화 피해 거의 없음
- $P_L > 15$: 액상화 피해 없음

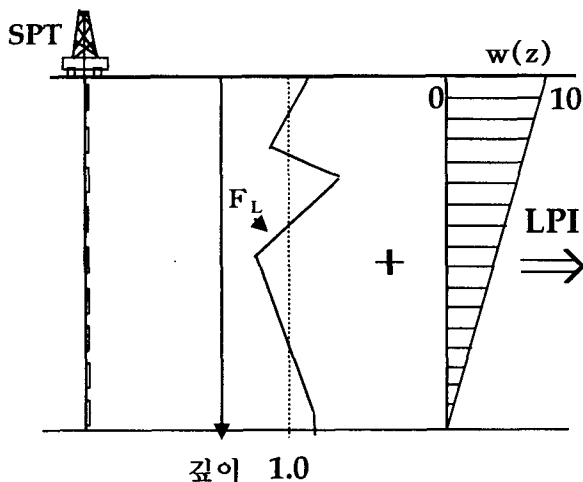


그림 2 액상화 가능성 지수의 도출과정

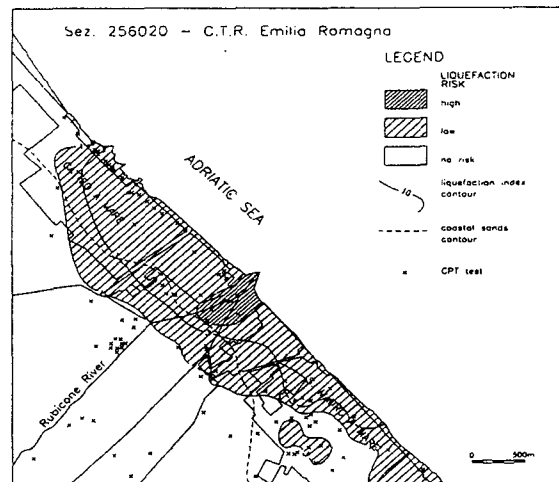


그림 3 액상화 재해도 작성예 (Crespellani 등, 1999)

3. 국내 적합한 액상화 재해도 작성기법

본 연구에서는 기존의 연구사례에 대한 분석을 통해 국내와 같이 지진피해자료가 부족한 지역에서 사용가능한 재해도 작성기법을 개발하였으며, 특히 일반인의 이해가 용이하도록 침하량으로 재해도를 작성하도록 하였다. 그림 4에 나타낸 바와 같이 기존의 작성기법인 액상화 가능성 지수는 액상화 평가를 포함하고 있는 반면, 액상화 가능성 지수의 공학적 의미가 일반 공학기술자들이 쉽게 이해하기 어려운 점이 있으며 액상화 발생예상 침하량의 경우, 액상화 평가와 상관없이 산정되는 점을 보완하였다.

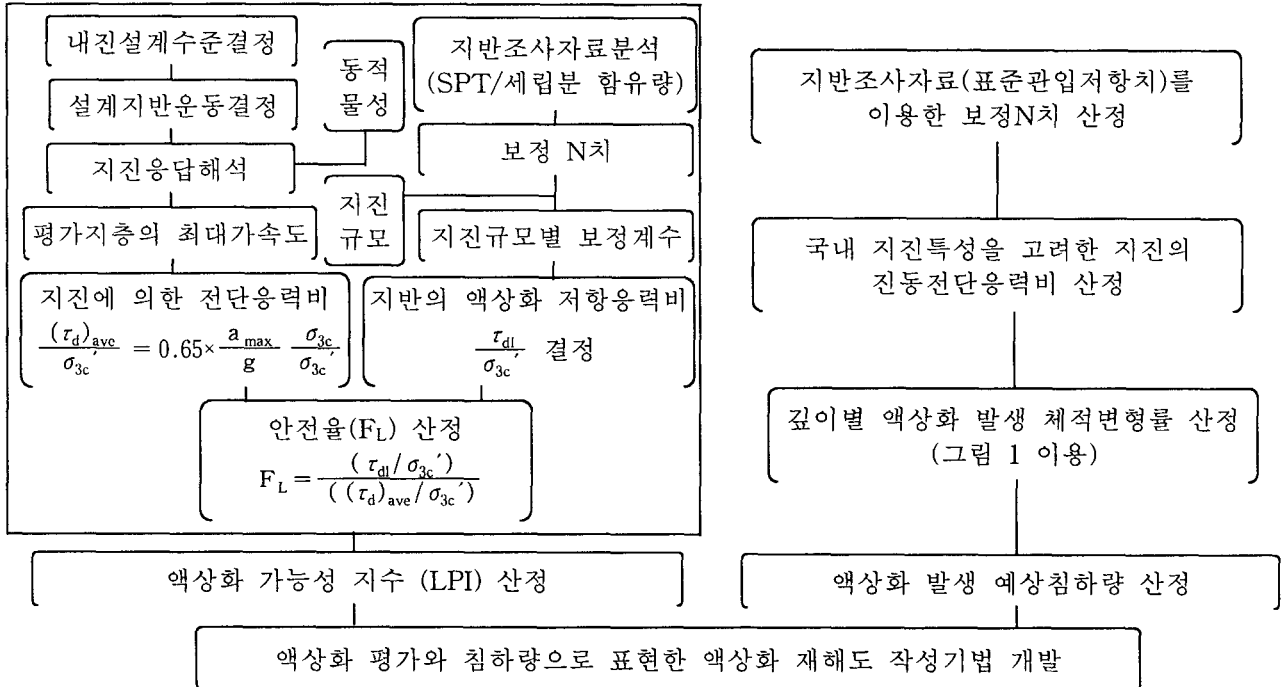


그림 4 국내 연안지역 액상화 재해도 작성기법의 개요

그림 4에 나타낸 바와 같이, 액상화 가능성 지수와 발생 예상침하량 모두 보정 N치에 기초하여 산정됨에 따라 상호간의 상관관계 및 작성기준이 도출될 수 있을 뿐만 아니라 지진규모에 대한 고려가 가능하므로 국내 지진특성을 고려할 수 있다. 본 연구에서는 국내 연안지역을 대상으로 LPI와 발생 예상침하량간의 상관관계를 도출하기 위해 10개 지역(인천국제공항, 아산항, 새만금신항, 여수공업단지, 광양항, 양산물금, 가덕도신항, 부산신항, 부산항, 부산항 북동부), 130개소의 지반조사자료를 수집하였으며 이를 토대로 LPI와 액상화 발생 예상침하량을 산정하였다. 이때, 지진에 의한 진동전단응력비 산정을 위해 SHAKE91 프로그램(Idriss and Sun, 1992)을 이용하여 1차원 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석 시 입력지진은 그림 5에 나타낸 바와 같이 국내 지진특성을 고려하여 지진규모 6.5 부근의 실지진 시간이력을 이용하였으며 입력최대 지진가속도는 국내 내진설계기준 1등급 수준의 0.154g로 통일하였다. 그림 6은 그림 5의 입력지진에 대한 LPI와 침하량 산정결과를 종합한 것이다.

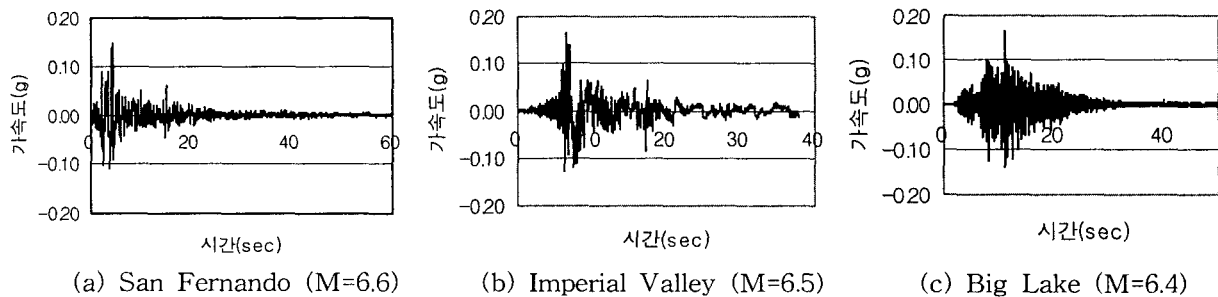


그림 5 지진응답해석에 이용된 실지진 시간이력

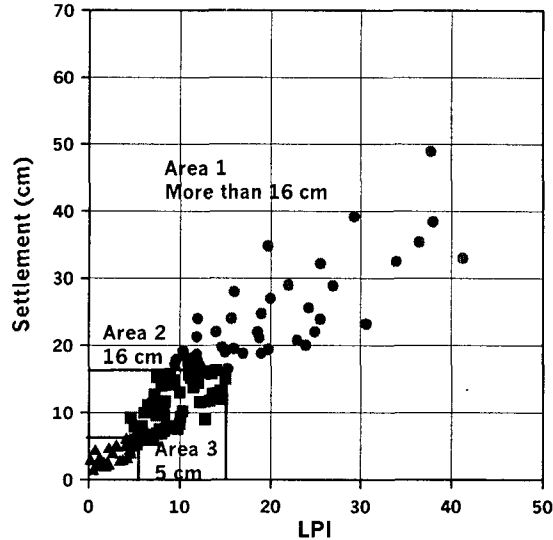


그림 6 액상화 가능성 지수, LPI와 액상화 발생 예상침하량과의 상관관계

그림 6에 나타난 바와 같이 액상화 가능성 지수와 발생 예상침하량이 선형관계에 있는 것으로 나타났다. 그러므로, 향후 더 많은 지역과 입력지진들에 대한 분석이 계속된다면 이를 기초로 액상화 평가와 더불어 간편하게 액상화 재해도를 작성할 수 있는 상관관계식이 도출될 것으로 예상된다. 그림 6에서 영역구분은 Iwasaki가 제안한 피해정도의 구분기준에 준하여 액상화 피해가 없는 경우와 거의 없는 경우일 때를 Area 3, 액상화 피해가 발생하는 경우를 Area 2, 그리고, 액상화 피해가 심각한 경우를 Area 1로 나타낸 것이다. 향후, 이와 같은 상관관계에 대한 많은 적용예들이 추가보완된다면 액상화 피해정도 구역구분에 따른 침하량(Area 3에서는 5cm, Area 2에서는 16cm)의 정량적 의미가 크게 신뢰성을 확보하여 국내 지반과 관련된 내진설계기준으로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 액상화 재해도 작성에

이상의 연구내용을 토대로 부산항 지역의 액상화 재해도 작성을 위해 12개소에 대한 지반조사자료를 토대로 지진응답해석과 이에 기초한 액상화 평가를 수행하였다. 그림 7과 그림 8은 각각의 결과이다.

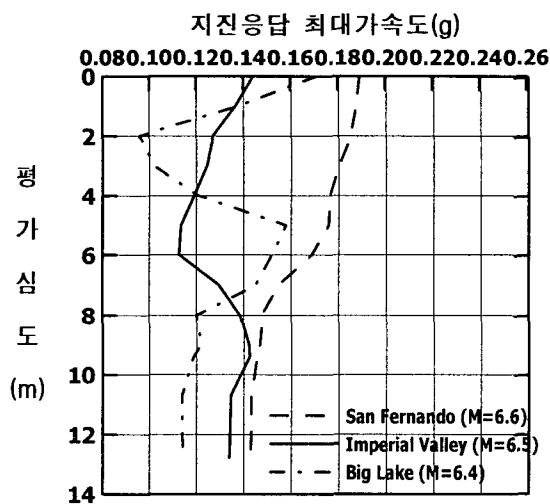


그림 7 지진응답해석결과의 평가심도별 최대가속도

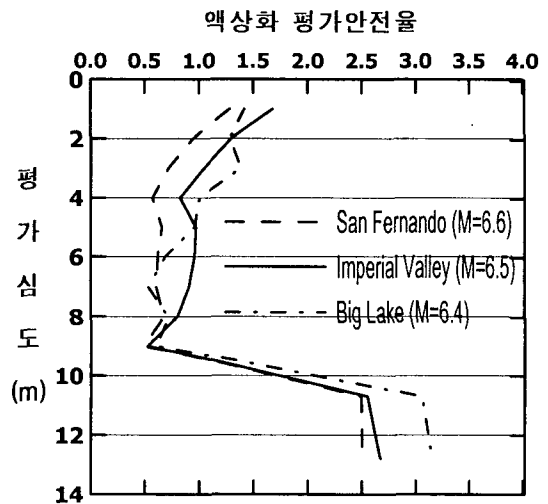


그림 8 평가심도별 액상화 평가안전율

그림 8을 보면, 평가심도 3~10m에서는 액상화 평가안전율이 1.0미만으로 액상화 발생 가능성이 높은 것으로 나타났다. 표 3은 부산항 지역 P6지역에 대한 액상화 가능성 지수 및 침하량을 계산한 예이다.

표 3 한 지점에 대한 액상화 발생 침하량의 계산예 (부산항 P6)

지층 구분 (1)	층두께 (m) (2)	N값 (3)	에너지 보정 (4)	σ_v (t/m ²) (5)	σ'_v (t/m ²) (6)	C _N (7)	(N ₁) ₆₀ (8)	$(\tau/\sigma'_v)_{ave}$ (9)	체적 변형률(%) (10)	침하량 (cm) (11)	가중 안전율 (12)
1	1.2	1	0.82	1.17	1.17	-	-	-	-	-	-
2	1.0	0.5	0.82	3.31	2.80	1.7	0.7	0.155	10	10	9.4
3	1.0	0.5	0.82	5.25	3.73	1.57	0.6	0.185	10	10	9.6
4	1.0	0.5	1.09	7.10	4.65	1.44	0.8	0.200	10	10	9.3
5	1.0	2	1.09	9.21	5.58	1.34	2.9	0.210	5.5	5.5	6.4
6	1.0	5	1.09	11.04	6.51	1.24	6.8	0.215	3.2	3.3	3.7
7	1.0	23	1.21	12.98	7.43	1.16	32	0.220	0	0	0
8	1.0	33	1.21	14.91	8.37	1.09	44	0.225	0	0	0
9	1.0	28	1.21	16.84	9.29	1.03	35	0.225	0	0	0
10	1.0	33	1.21	18.78	10.22	0.97	39	0.225	0	0	0
										총침하량	LPI
										38.8	38.4

12개소의 산정결과를 이용하여 작성한 재해도는 그림 9와 그림 10과 같다. 재해도 작성은 실제 지반 조사된 위치를 정확히 지도상에 표시하기 위하여 1/5000 축척의 수치지도를 Base Map으로 하고, 그 위에 데이터의 2차원 및 3차원 도식화와 표면 Mapping이 가능한 WINSURFER Program을 사용하여 침하량 등고선을 작성하였다. 이때, 수치지도상에 표현된 침하량 등고선 간격은 1cm로 하였다.

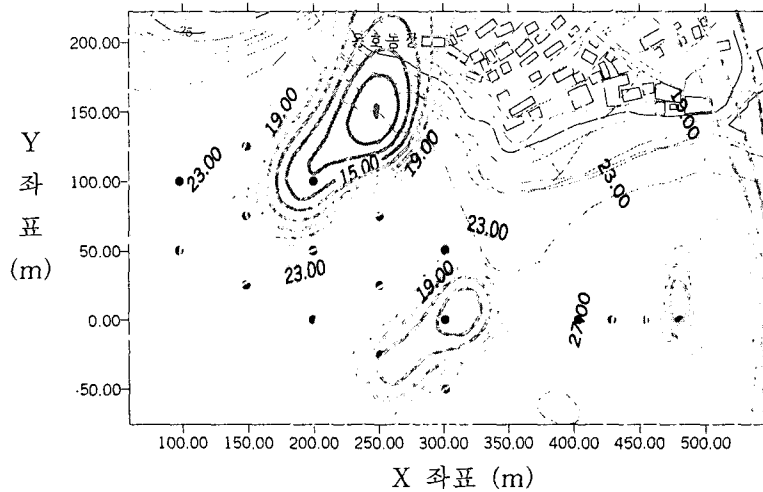


그림 9 액상화 재해도의 작성예 (지진규모 6.5 부근 지진과 적용)

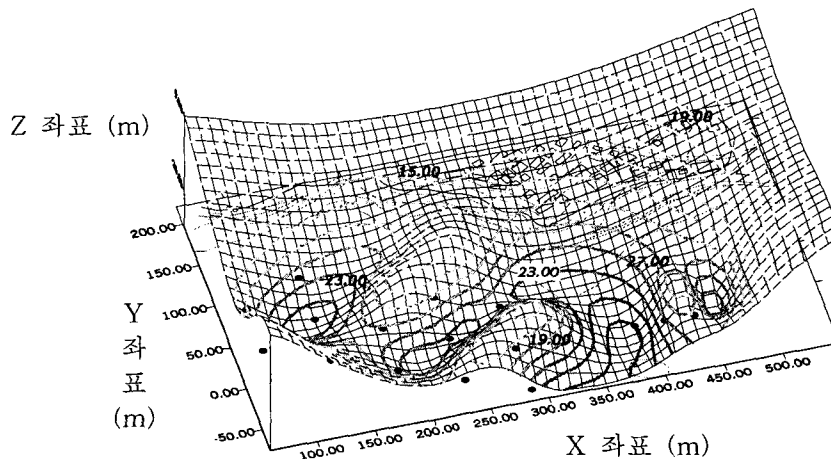


그림 10 액상화 재해도의 3차원 Overlapping

그림 9와 그림 10에 나타난 바와 같이, 수치지도상에 침하량 등고선이 2차원 및 3차원으로 표시할 수 있을 뿐만 아니라, 화면상으로 컬러영상화가 가능함으로써 일반인들도 쉽게 이해할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 기존의 액상화 가능성 지수를 기준으로 하는 액상화 재해도 작성 기법을 수정·보완하여 지진 발생시 예상 침하량을 기준으로 피해정도를 예측할 수 있는 액상화 재해도 작성기법을 개발·제안하였다. 개발된 작성기법은 액상화 평가내용을 포함하고 있을 뿐만 아니라 재해도 작성이 침하량으로 표현되어 지진발생시 액상화와 관련된 사전정보를 편리하게 획득할 수 있는 장점을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 향후, 이에 대한 많은 적용예들과 더불어 결과분석이 계속되어 국내 적용가능한 액상화 가능성 지수와 발생예상 침하량에 대한 상관관계식 및 기준침하량이 정립되면 건설지역에 대한 액상화 재해도 작성을 통해 액상화로 인한 상부구조물의 예상피해지역을 구분할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의한 것입니다.

7. 참고문헌

1. 김수일, 박인준, 최재순(2001), "국내 여건에 적합한 액상화 평가기법 연구", 대한토목학회 논문집, 제 20권, 제 2-C호, pp. 129-139.
2. 신윤섭, 최재순, 박인준, 김수일(1999), "국내 지진특성을 고려한 액상화 저항강도 산정", 한국지반공학회 논문집, 15권 6호, pp. 307-318.
3. Crepellani, T, Madiari, C., and Vannucchi, G.(1999), "Zoning for Liquefaction Risk in an Italian Coastal Area Using CPT", *Proceedings of the Second Int. Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Lisboa, Portugal, Vol. 2, pp. 561-566.
4. Idriss, I. M, and Sun, J. I.(1992), *User' Manual for SHAKE91, A Computer Program for Conducting Equivalent Linear Seismic Response of Horizontal Layered Soil Deposits*, University of California, Davis, CA, Maryland.
5. Seed, H. B. and Idriss, I. M.(1971), "Simplified Procedure for Evaluation Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 97, No. 9, pp. 1249-1273
6. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida K. and Yasuda, S.(1978), "A Practical Method For Assessing Soil Liquefaction Potential Based on Case Studies at Various Sites in Japan", *Proceedings of the Second International Conference on Microzonation for Safer Construction-Research and Application, sponsored by National Science Foundation UNESCO*, San Francisco, California, Vol. 2, pp. 885-8961.
7. Seed, H. B., Idriss, I. M, and Arango, I.(1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482.
8. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M.(1984), *The Influence of SPT Procedure in Soil Liquefaction Resistance Evaluation*, Univ. of California Berkeley EERC Report, No. UCB/EERC 84-15.
9. Tokimatsu, K., and Seed, H. B.(1987), "Evaluation of Settlements in Sands due to Earthquake Shaking", *Journal of Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol. 113, No. 8, pp. 861-878.