

## 국내 액상화 현상의 평가 및 대책

### Assessment and Remediation for Liquefaction in Korea

연세대학교 교수 김 수 일

Soo-Il Kim (Prof. Yonsei Univer.)

#### 1. 서문

최근 범세계적으로 발생하고 있는 기상이변현상에 따른 집중호우와 지각변동에 따른 지진발생으로 많은 인명 및 재산 피해가 잇따르면서, 인간의 생존을 위협하는 자연재해에 대한 예측 및 대책마련에 대한 노력이 범국가적인 차원에서 이루어지고 있는 실정이다. 우리 나라의 경우, 1998년 여름에 발생한 집중호우피해는 우리에게 다시 한번 자연에 대한 경외심과 함께 이에 대한 대책마련의 시급함을 깨닫게 하는 기회가 되었다. 또한, 1998년 한해동안 비교적 작은 규모이기는 하지만 여러 차례의 지진이 발생하였을 뿐만 아니라 세계적으로도 지진의 발생빈도 및 예상지역외의 발생 예가 급증함에 따라 우리 국민들에게 지진피해에 대한 불안감을 가중시키고 있는 실정이다.

지진은 발생의 원인 및 예측이 매우 어려울 뿐 만 아니라 피해상황도 단지 수분안에 발생함으로써 예보시스템 및 대책 마련도 다른 자연재해에 비해 어렵다. 따라서, 대규모 지진발생빈도가 높은 미국, 일본에서는 지진피해의 최소화를 위해 많은 연구인력과 연구비를 투자하고 있다. 이에 반해 우리 나라는 지진피해 발생정도가 그다지 심하지 않음에 따라 연구의 필요성을 느끼지 못하였고 단지 원자력발전소와 같이 절대적인 안전을 요하는 구조물에 대해서만 내진설계를 수행해 왔다. 그러나, 1995년 일본 Hyogoken-Nanbu 지진의 엄청난 피해상황 및 각국에서 빈번하게 전해지는 지진피해상황을 지켜보면서 지진대비의 필요성을 느끼고 1997년, 지진공학회 및 지진공학센터 등을 발족시키고 본격적인 연구를 시작하였다.

지진발생이 빈번한 미국, 일본 등의 지진피해사례를 살펴보면, 최초로 공학적인 연구를 위한 지진 가속도기록이 측정된 경우는 1940년 El Centro 지진이며 이후로 많은 지진기록과 피해사례에 대한 분석이 이루어 졌다. 이를 토대로 지진발생에 따른 지반의 거동특성 변화에 대한 연구가 활발하게 진행되어 지진발생시 액상화 현상규명 및 지반-구조물의 상호거동에 관한 연구가 계속적으로 수행되고 있다.

1964년 알래스카에서 발생한 Good Friday 지진 및 일본에서 발생한 Niigata 지진으로 파악된 액상화 현상은 1985년 멕시코에서 발생한 Michoacan 지진, 1989년과 1994년 미국 캘리포니아주에서 발생한 Loma Prieta 지진과 Northridge 지진, 그리고 1995년 일본 고베부근에서 발생한 Hyogoken-Nanbu 지진에서 그 피해의 심각함을 알 수 있다. 특히, 1985년 Michoacan 지진피해사례를 보면, 그다지 크지 않은 장주기의 지진파가 진원지로부터 수백 km 떨어진 멕시코 시티까지 전파됨과 동시에 지반특성으로 인한 지반증폭현상이 발생하였을 뿐 만 아니라 액상화 피해도 크게 발생하였다. 이 사례를 통해 지반 조건별 증폭현상 및 지진파의 주기특성에 관한 연구가 심도있게 수행되기 시작하였다. 또한, 1995년 Hyogoken-Nanbu 지진은 매립지반으로 형성된 고베항 부근지역의 액상화 피해를 발생시킴에 따라 매립지반에서의 액상화 거동 연구와 함께 효과적인 매립지반의 대책공법 연구가 활발하게 진행되고 있다.

1997년부터 지반-지반구조물-상부구조물에 대한 본격적인 지진연구를 시작한 우리 나라의 경우, 설계시 지진연구가 활발한 외국의 규정을 그대로 사용하기에는 많은 문제점이 따른다. 지진연구가 활발한 미국 및 일본의 규정을 보면, 자국의 지진특성상 지진규모가 큰 7.5를 기준으로 연구된 것이 대부분을 차지하고 있다. 따라서, 지진규모가 크지 않은 우리 나라의 지진특성을 고려할 때, 외국의 규정을 수정보완없이 이용하는 것은 매우 비경제적인 설계 및 시공의 수행을 동반할 것으로 사료된다. 또한, 1990년대 이후 공항, 공단, 항구 등 대규모 부지마련을 위해 서-남해 연안의 연약한 지반을 매립 하는 사례가 급증하고 있는 실정으로, 건설될 구조물의 중요성을 감안할 때, 내진설계는 반드시 수행되어야 하며

특히, 매립지반에 대한 액상화 평가수행으로 지진발생시 지반의 안정을 최우선으로 해결해야 할 것으로 판단된다.

필자를 포함한 연구팀은 지진발생시 큰 피해를 야기시키는 액상화 가능성을 미리 예측하고 이로 인한 피해를 최소화하기 위하여 기존의 액상화 평가방법에 대한 고찰과 국내에 적합한 지진특성 및 지반특성에 대한 연구를 통해 국내 발생가능한 지진의 역학적 특성을 충분히 고려할 수 있는 액상화 평가방법을 제안하고자 연구 중에 있다. 특히, 보나 심도있는 연구를 위한 실내시험 및 현장시험의 수행뿐 만 아니라 국내 매립지반에 적절한 액상화 대책공법에 대한 연구도 병행하고 있다.

본 연구가 성공적으로 수행되어 국내 공학기술자들이 간편하게 액상화 평가 및 대책공법을 수행함으로써 국내 여건에 부합되는 내진구조물이 내구적으로나 경제적으로 만족되어 건설되기를 기대하며 지금까지 진행되어온 연구에 대해 개관하고자 한다.

## 2. 액상화 현상

일반적으로 토체에 재하되는 하중속도가 과잉간극수가 소산되기에 충분한 정도로 느리다면 실질적인 간극수압의 증가는 발생하지 않을 것이다. 그러나 토체가 급속하중을 받거나 투수계수가 매우 작은 경우, 토체는 비배수 상태하에 있으므로 간극수는 배수되지 못하고 그로 인해 간극수압이 증가한다. 대개의 경우, 모래지반은 투수계수의 차이로 인해 점토지반보다 과잉간극수압의 소산이 비교적 빠르게 진행되므로 정적하중을 받는 사질토의 경우, 비배수 조건은 크게 고려하지 않아도 무방하다. 그러나, 포화 사질토 지반에 동적 하중이 재하되는 경우, 하중의 변화속도에 따라 비배수 상태의 발생이 가능해지므로 지진과 같은 급속하중은 포화 사질토 지반을 비배수 전단상태로 유도함으로써 지반의 파괴 또는 침하 등의 피해를 발생시킴과 동시에 상부구조물에도 큰 영향을 미치게 된다. 이 때, 지반파괴 및 지반침하의 주된 원인 중의 하나가 느슨한 포화사질토 내의 과잉간극수압 증가로 인해 발생하는 액상화 현상이다. 즉, 액상화 현상은 지진과 같은 급속한 진동하중 발생시, 순간적으로 배수가 허용되지 않음에 따라 느슨한 사질토 또는 매립토 지반에서 유발되는 과잉간극수압으로 지반의 전단저항력이 저하되거나 잃게되는 상태를 표현하는 것으로 그 발생정도에 따라 직접적인 지반파괴뿐 만 아니라 이로 인해 야기되는 지반침하 또는 횡방향 변위발생으로 구조물의 안정에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 지진발생이 빈번하고 액상화 피해사례가 많은 미국, 일본에서는 모든 구조물의 내진설계시 가장 먼저 검토해야할 사항으로 정하고 있다.

### 2.1 액상화 현상의 정의

사질토의 경우, 외력이 작용하기 전에 토립자들은 상호접촉상태에 있으며 입자간의 상호접촉을 통해 외력이 전달된다. 사질토 지반은 이와 같은 원리로 지표에 있는 구조물에 저항하는 전단력을 제공한다. 지진에 의해 발생한 전단력은 사질토체에 변형을 일으키게 됨에 따라 본래 수직방향으로 지지하던 접촉점들이 분리되고 간극수압이 이 역할을 대신하게 된다. 이와 같은 현상을 액상화라고 하며 전단저항을 잃은 사질토는 포화사질토의 단위중량을 가지는 액체와 같이 거동하게 된다. 액상화가 발생한 후, 진동하중의 재하가 그치게 되면, 토립자는 재구성파 함께 간극수압이 소산됨에 따라 토체는 다시 안정화(post-liquefaction)를 이루게 된다. 이 때, 발생하는 체적 변화는 소산된 간극수의 체적과 같다. 이와 같은 토체의 변화과정을 도시하면 그림 1과 같다. 또한, 토체 내의 액상화 발생과정을 간극비와 유효응력간의 관계로 설명하면 그림 2와 같다. 그림 2에 나타난 바와 같이, 자유배수가 허용된 상태에서 진동하중을 재하하게 되면 초기상태의 응력과 간극비 상태를 나타내는 압축곡선상의 점 A는 간극수의 배수로 인해  $\Delta e$ 만큼의 부피감소가 발생하여 점 B로 이동하나 비배수 상태로 간주하면 부피감소가 없으므로 과잉간극수압( $\Delta u$ )의 증가로 인해 유효응력은 점차 감소하여 응력상태는 점 C로 이동할 것이다. 즉, 액상화는 급속재하를 받아 발생하게되는 과잉간극수압( $\Delta u$ )이 초기응력과 같아짐에 따라 흙의 유효응력이 0이 된 상태에서 발생하는 것이라고 정의할 수 있다.

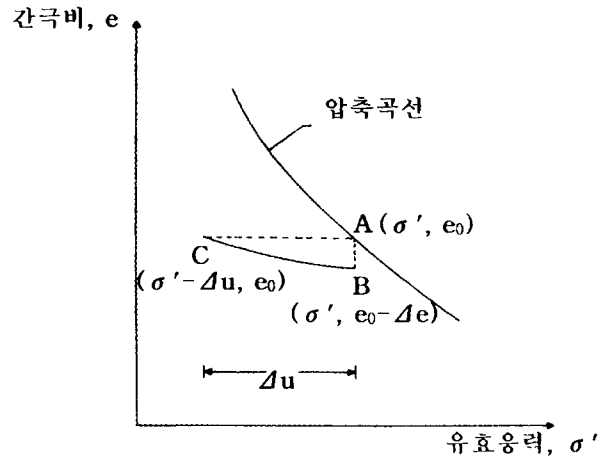
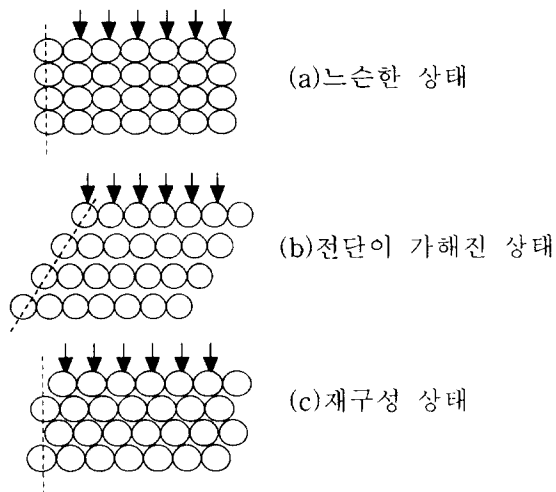


그림 1 액상화의 발생과정에 따른 사질토 입자배열변화 그림 2 반복하중에 의한 간극수압 발생개념도

### 3. 액상화 현상 예측기법

액상화 현상에 대한 평가는 크게 지반의 거동을 전응력 개념 또는 유효응력 개념으로 해석하느냐에 따라서 decoupled method, indirectly coupled method, fully coupled method로 구분할 수 있다.

전응력 개념이론(decoupled method)의 프로그램 중에서 등가선형해석을 기초로 개발된 프로그램으로는 SHAKE, QUAD-4, LUSH, FLUSH 등이 있다. 또한, 비선형 탄성모델을 이용함으로써 전응력 개념을 일부 보완한 이론(indirectly coupled method)으로 DESRA, TARA 등이 있다. 전응력 개념 이론은 지반-흙 구조물의 상호작용 문제에 적용하는데는 어려움이 있기 때문에 정확한 액상화 평가에는 이용하기 곤란한 반면, 간편한 해석이 가능함에 따라 경험적인 액상화 평가방법에서는 주로 이 방법을 이용하고 있는 실정이다.

유효응력이론(fully coupled method)을 이용한 프로그램으로는 DYSAC2, DSC-Dyn 2D 등이 있으며 이는 Biot's formulation을 사용하여 흙과 물을 상호연관시켜 해석하고 있다. 해석시 이용된 이론으로는 Galerkin's method, Hilbert-Taylor-Hughes scheme 또는 Newmark  $\beta$  method 등이 있다. 이러한 유효응력 개념의 액상화 평가방법은 과잉간극수압의 변화와 지반의 역학적 거동변화를 보다 정확하게 분석함으로써 액상화 현상을 보다 정확하게 규명할 수 있을 뿐 만 아니라 지반-흙 구조물에서의 간극수압 변화 양상을 매우 정확하게 파악할 수 있는 장점이 있는 반면, 많은 파라미터에 대한 자세한 연구와 함께 해석시 많은 주의를 요한다.

#### 3.1 경험적 방법에 의한 예측기법

일반적으로 전응력 개념을 이용하는 경험적 액상화 평가방법에서는 그림 3에 나타난 바와 같이 지진에 의한 전단응력과 지반의 전단저항강도를 비교함으로써 간편하게 액상화 평가를 수행한다. 이러한 경험적 방법을 이용한 액상화 평가의 경우, 지진에 의한 전단응력은 Shake 91과 같은 지진응답해석프로그램을 이용하여 해당 지반의 지진응답해석을 수행하여 산정하고 지반의 전단저항강도는 해당지층의 불교란시료에 대한 반복삼축시험 등을 통해 산정하는 것이 가장 바람직하다. 그러나, 적용의 편이를 위해서 나라별로 규정짓고 있는 기본 가속도와 지반계수를 이용하여 지진에 의한 전단응력을 산정하고 지반의 전단저항강도는 원지반의 지반강도 및 지반물성치를 이용한 간편식을 통해 산정할 수도 있

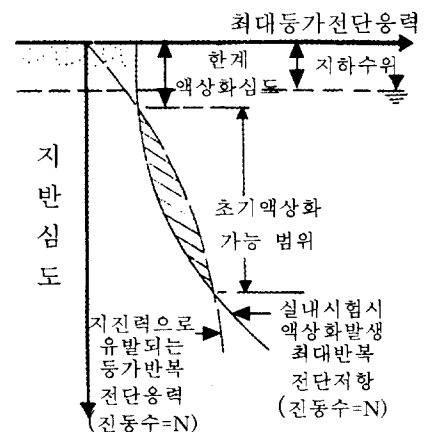


그림 3 경험적 평가방법의 개요

다. 특히, 최근까지 이러한 경험적 액상화 평가방법을 주로 이용하고 있는 일본의 내진설계기준에서는 Seed와 Idriss, Iwasaki와 Tatsuoka, Ishihara의 이론 등을 공사시행 주체별로 선택적으로 규정을 제정하여 사용하고 있으며 Eurocode에서는 Seed의 이론을 근간으로 내진설계기준을 규정하고 있다.

### 3.1.1 Seed와 Idriss 액상화 평가 간편법

일본 건축물관련 내진설계기준의 경험적 액상화 평가방법은 Seed와 Idriss의 방법을 근간으로 제정된 것으로, 지진력을 표현하는 지진의 최대전단응력비는 지진응답해석 또는 국가별로 제안된 기본가속도와 지반계수를 통해 구해진 지표면 최대가속도를 토대로 산정한다. 또한 지진력에 대한 지반의 전단저항비는 반복삼축시험 등을 통해 산정하거나 많은 시험결과를 토대로 제안한 간편식을 이용하여 산정한다. Seed의 액상화 평가 간편법을 그림으로 나타내면 그림 4와 같다. (Seed, H. B. and Lee, K. L., 1966)

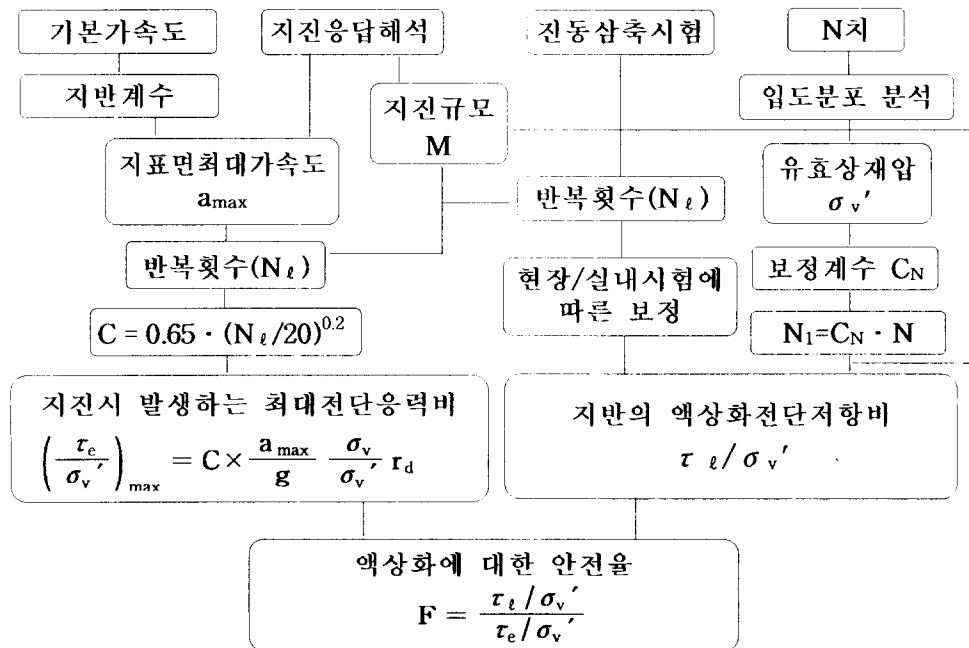


그림 4 Seed와 Idriss 액상화 평가 간편법의 순서도

그림 4에서 왼편에 있는 내용이 지진으로 인한 최대전단응력비를 산정하는 것이고 오른편에 나타난 내용이 지반의 액상화 전단저항강도비를 산정하는 것이다. 액상화 평가는 최대전단응력비와 전단저항강도비를 비교하여 안전율을 산정함으로써 수행되어진다. 그림 4의 왼편의 내용 중  $r_d$ 는 지반심도에 따른 응력감소계수로 지반심도의 변화에 따라 9m보다 작을 경우에는 0.9, 심도가 9m보다 클 경우에는  $1-h/90$ 의 식을 이용한다. 또한, 지진규모에 따른 보정계수, C는 많은 지진자료를 분석한 결과를 통해서 나타난 식이며 보정계수를 산정하는데 이용되는  $N_l$ 은 지진규모별 진동반복횟수를 의미한다. 다음의 표 1은 Seed가 제안한 지진규모별 반복횟수를 나타내고 있다.

표 1 정현과의 지진규모별 반복횟수

지진 규모 (M)	반복 횟수 ( $N_l$ )
5.25	2~3
6.00	5~6
6.75	10
7.50	15
8.50	26

Seed와 Idriss는 실내시험 및 현장시험자료분석을 통해 매우 간편한 액상화 전단강도 산정방법을 제안하였다. 이 방법의 특징은 보편적으로 많이 수행되고 있는 표준관입시험의 결과와 기본물성 시험결과를 이용할 수 있도록 한 점이다. 그림 4의 오른쪽에 나타나 있는  $N_1$ 은 환산  $N$ 치이며 이 값을 산정하는데 이용되는  $C_N$ 은 유효상재압에 따른 보정계수로  $(=10/\sigma'v)^{0.5}$ 를 이용하여 산정한다. 이 때, 유효상재압의 단위는  $\text{ton}/\text{m}^2$ 이다. 이와 같이 산정된 환산  $N$ 치와 액상화 전단저항비와의 관계를 지진규모에 따라 그림 5와 같이 나타내었다. 또한, 반복삼축시험 수행시, 액상화 전단저항강도비 산정에도 지진규모를 고려할 수 있도록 지진규모별 반복진동횟수를 제안하고 있다. 그 내용을 보면, 지진규모 7에서는 10회, 지진규모 7.5에서는 20회, 그리고 지진규모 8에서는 30회이다(Seed, H. B. and Idriss, I. M., 1967).

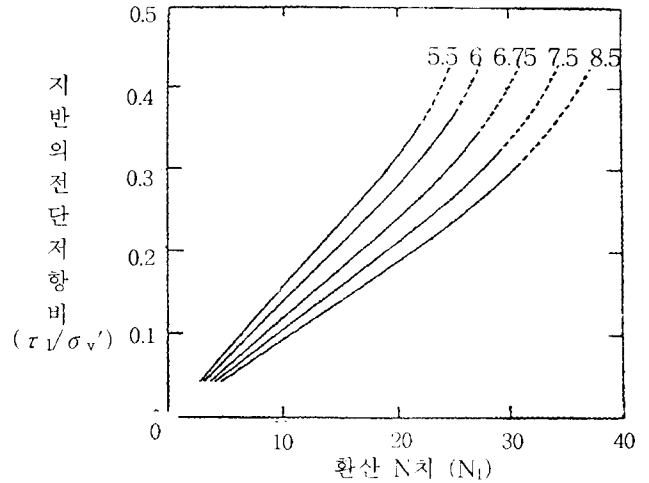


그림 5 환산  $N$ 치와 액상화 전단저항비와의 관계

Seed와 Idriss의 간편법을 보완하여 1988년 일본 건축물 내진설계기준의 근간이 된 1983년 Tokimatsu와 Yoshimi의 방법에서는 지진에 의한 전단응력비 산정식의 지진규모별 보정계수  $C$ 를  $0.1(M-1)$ 의 식을 이용하고 응력감소계수  $r_n$ 의 산정은  $1-0.015h$ 의 식을 이용할 것을 제안하고 있다. 이 값은 앞에서 언급한 응력감소계수의 최소값 0.9보다 깊이에 따라 큰 변화폭을 갖게 된다. 또한, 세립질 함유량이 많게 되면 액상화 발생이 어렵다는 점이 고려되도록 환산  $N$ 치에 증가분  $N$ 치를 더하여 액상화 평가를 수행하도록 제안하고 있다. 이 때, 세립질 함유량별 증가분  $N$ 치를 살펴보면, 5%에서는 0, 10%에서는 6, 20%에서는 8, 그리고 50%에서는 11이며 그외의 값은 직선보간법을 이용하여 산정한다.

최종적인 액상화 평가는 액상화 전단저항강도비와 지진의 전단응력비에 대한 비교를 통해 산정한 안전율,  $F$ 로 나타내며 안전율이 1.0보다 작은 경우에는 액상화 발생이 가능하고 1.0보다 큰 경우, 액상화에 대해 안전하다고 평가한다.

### 3.1.2 Iwasaki와 Tatsuoka 방법

일본의 도로교 시방서에서 이용되고 있는 Iwasaki와 Tatsuoka의 방법은 지진규모 7.5 수준의 강진을 기준으로 지표면 최대가속도와 반복삼축시험 또는  $N$ 치, 평균입경( $D_{50}$ ), 유효상재압 등을 고려하여 최대 전단응력비와 최대반복강도비를 산정, 비교함으로써 액상화 평가를 수행한다. 그림 6은 평가방법의 순서를 개략적으로 보여주고 있다.

그림 6의 원편 내용을 보면, 앞 절의 내용과 달리 지진규모별 보정계수,  $C$ 를 사용하고 있지 않음에 따라 지진력을 크게 산정된다. 이 때, 지표면 최대가속도의 산정은 앞 절의 내용과 동일하고 응력감소계수,  $r_n$  산정방법은 Tokimatsu와 Yoshimi의 방법과 동일하다. 그림 6에서  $R_{max}$ 는 최대반복강도비이고  $R$ 은 전단강도비를 나타낸다. 반복삼축시험을 이용하여 전단강도비를 산정하는 경우, 반복재하횟수 20회시의 값을 이용하며 간편식을 통해 산정하는 경우,  $N$ 치, 평균입경,  $D_{50}$ , 그리고 세립토 함유량,  $FC$ 을 고려하여 각각  $R_1$ ,  $R_2$ , 그리고  $R_3$ 를 산정하고 그 값을 합한다. 이 때,  $R_1$  산정식에 이용되는 유효상재압,  $\sigma'v$ 의 단위는  $\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 사용한다. 또한,  $C_i(i=1\sim5)$ 는 보정계수로  $C_1$ 은 반복삼축시험과 현장지반 사이의 구속응력 차이에 대한 보정계수이며  $(1+K_0)/3$ 의 식을 이용한다. 여기서,  $K_0$ 는 정지토압계수로 사질토의 경우에 적용하는 Jaky의 식( $=1-\sin\phi$ )을 이용하는 것이 일반적이다.  $C_2$ 는 지진파형의 불규칙성에 대한 보정계수로  $1/0.55\sim1/0.7$ 의 범위에 있으며 일반적으로 1.67의 값을 사용하고  $C_3$ 는 시료의 흐트러짐에 대한 보정계수이며  $C_4$ 는 시료채취에서 시험할 때까지 생기는 밀도화에 대한 보정계수로 계수  $C_3$ 와  $C_4$ 의 곱은 대략 1.0이다. 또한,  $C_5$ 는 수평면에서의 진동 2차원에 대한 보정계수로 0.9의 값을 사용한다.

최종적인 액상화 평가는 Seed와 Idriss의 방법과 동일하게 최대전단응력비와 최대반복강도비를 비교하여 안전율을 산정함으로써 수행된다.

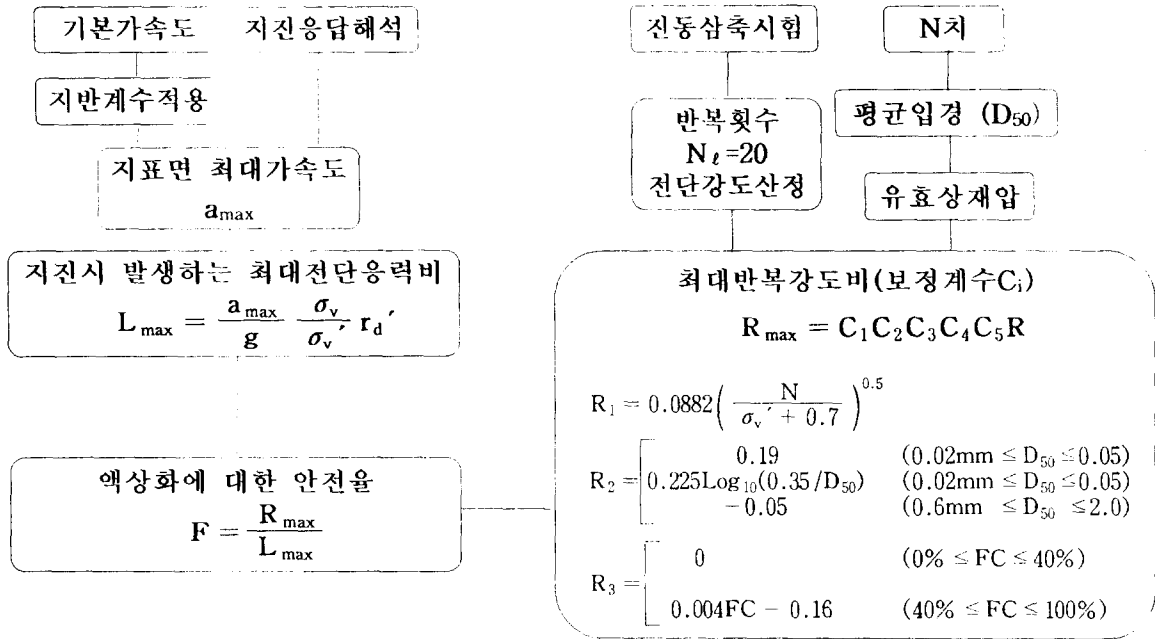


그림 6 Iwasaki와 Tatsuoka 액상화 평가방법의 순서도

### 3.1.3 Ishihara 방법

일본 항만구조물 내진설계규정에서 이용하는 액상화 평가방법으로 입도분포와 N치를 이용한 간편법, 반복삼축시험, 그리고 진동대시험, 3가지 방법을 언급하고 관련된 구조물의 중요도를 고려하여 선택하도록 제안하고 있다. 대개의 경우, 입도분포와 N치를 이용한 액상화 평가를 수행한 후, 결과가 분명치 않거나 중요한 구조물에 대해서는 반복삼축시험 및 진동대시험 등의 추가조사를 통해 이를 검증하는 것이 바람직하다.

입도분포와 N치를 이용한 액상화 평가방법을 살펴보면, 우선 체분석 등을 통해 입도분포곡선을 작성하고 이를 그림 7에 적용하여 액상화 가능성을 판단한다. 그림 (a)와 (b)는 과거 액상화 발생자료를 근거로 작성된 것

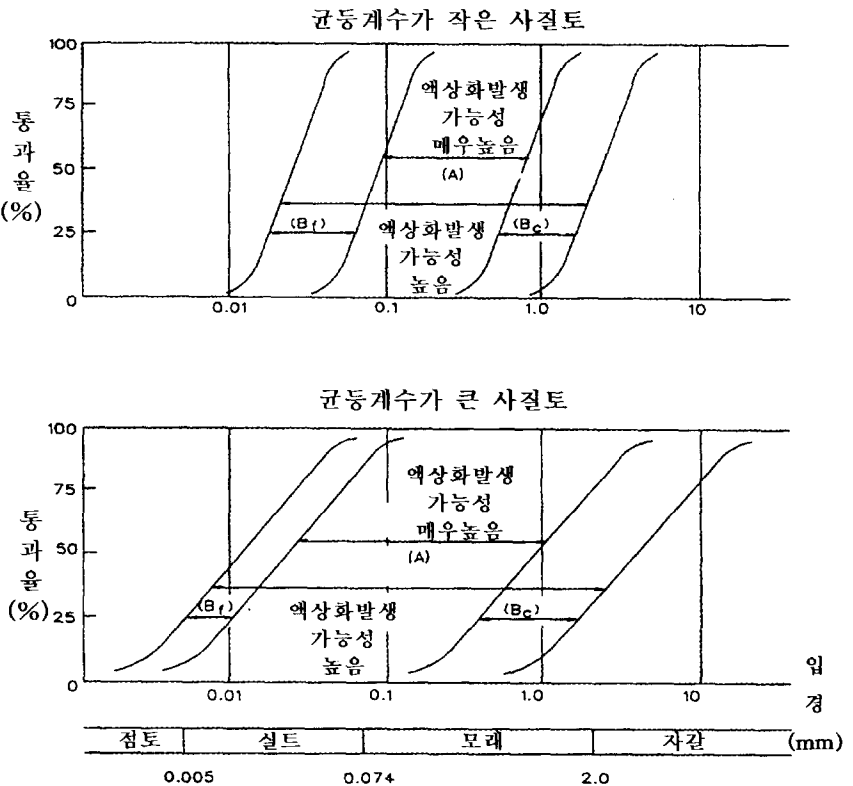


그림 7 액상화가능성이 있는 흙의 입도분포

이며 (a)와 (b)의 분류기준은 흙의 균등계수( $U_c$ ) 3.5이다. 그림 7에서 영역 A, 영역 B<sub>f</sub> 그리고 영역 B<sub>c</sub>

를 제외한 나머지 영역의 입도분포는 액상화 가능성이 없는 것으로 간주하며 영역 A는 영역 B<sub>f</sub> 및 B<sub>c</sub>보다 액상화 가능성이 높음을 나타내고 있다. 만약, 입도분포 곡선이 두 영역에 걸쳐 있는 경우에는 공학자의 적절한 판단이 요구된다.

Ishihara 방법의 전반적인 평가순서를 도시하면 그림 8과 같다.

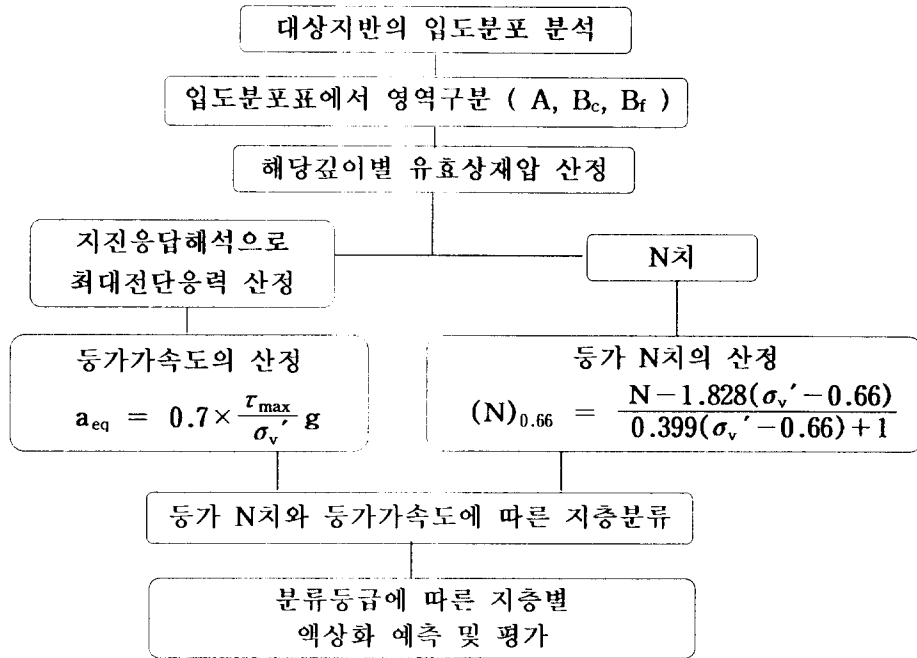


그림 8 Ishihara 액상화 평가방법의 순서도

그림 8의 내용을 보면, 앞 절의 방법과는 큰 차이를 보이고 있다. 우선, 지진응답해석으로 산정한 최대전단응력으로 등가가속도를 산정함으로써 지진력을 표현한다. 그리고, 지반저항에 대한 내용은 N치를 유효상재압 0.66 kgf/cm<sup>2</sup>을 기준으로 보정함으로써 등가 N치, (N)<sub>0.66</sub>을 산정한다. 이때, 유효상재압은 3kgf/cm<sup>2</sup>이하, 등가 N치는 2~40으로 해석의 제한을 두고 있다. 액상화 평가는 앞 절의 방법들과 같이 안전율 산정을 통해 수행하는 것이 아니고 두 값에 따른 지층분류를 통해 액상화 평가를 수행하는 것이 특징이다. 등가 N치와 등가가속도와의 관계에 대한 지층분류내용은 그림 9에 나타난 바와 같다.

최종적인 액상화 평가는 등가 N치와 등가가속도의 관계가 그림 9의 구분된 영역 I~IV에 어느 영역에 해당하는가를 결정함으로써 수행된다. 이때, 그림 7에서 영역 A의 입도분포를 갖는 지층은 그림 9 (a)를 이용하고 영역 B<sub>f</sub>와 B<sub>c</sub>의 입도분포를 갖는 지층은 그림 9 (b)를 이용한다. 그림 9를 통해 결정된 구역에 관한 액상화 평가내용을 보면, 다음의 표 2와 같다.

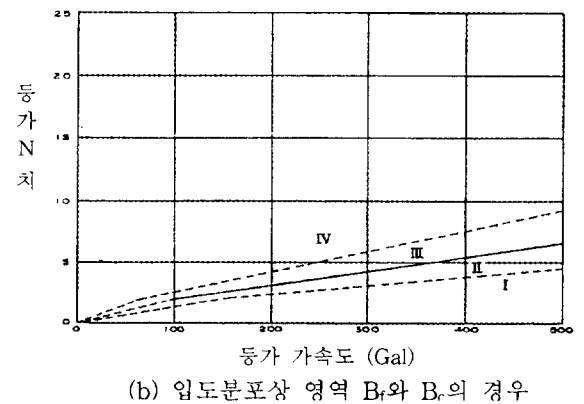
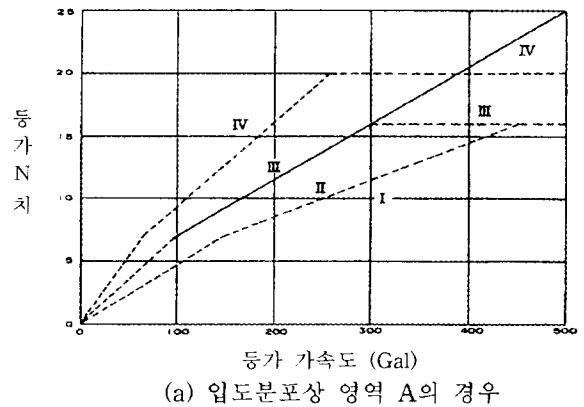


그림 9 액상화 예상에 대한 지층 분류

표 2 입도분포와 N치를 이용한 액상화 예측 및 평가내용

지층분류	입도분포와 N치를 이용한 액상화 예측	입도분포와 N치를 이용한 액상화 평가
I	액상화 가능성 매우 높음	액상화 발생.
II	액상화 가능성 높음	액상화 발생하나 진동삼축시험으로 보다 정밀한 평가 요구.
III	액상화 가능성 낮음	액상화 발생하나 진동삼축시험으로 보다 정밀한 평가요구. 큰 안전율을 설계해야 하는 중요구조물이 경우에는 반복삼축 시험으로 보다 정밀한 평가가 요구.
IV	액상화 가능성 매우 낮음	액상화 발생가능성이 없음.

표 2의 내용을 보면, I 또는 IV영역으로 평가된 결과는 추가적인 조사없이 다음 단계의 공정을 수행 하여도 무방하나 II 또는 III영역으로 결정된 경우에는 반복삼축압축시험 등의 추가적인 액상화 평가가 필요함을 나타내고 있다. 또한, 세립질 함유량에 따른 고려사항을 언급하고 있는데, 영역 A로 분류된 지층의 경우, 그림 9(a)의 등가 N치를 세립질 함유량에 따라 감소시켜 적용하도록 제안하고 있다. 세립질 함유량이 15% 이상인 경우, 등가 N치의 값을 1/2 감소시키고 5~15%인 경우에는 각각 1.0~0.5에 해당하는 감소계수를 비례적으로 사용하며 5%미만인 경우에 대해서는 감소없이 그대로 사용한다. 이와 같은 감소계수 적용으로 세립질 함유량의 증가에 따라 액상화 발생가능성이 낮아진다는 점을 고려하고 있다. 그리고, 영역 B로 분류된 지층이 점토나 실트와 같은 낮은 투수성을 갖는 층 아래에 놓여 있는 경우, 영역 A의 지층과 같이 취급하여 평가를 수행하도록 제안하고 있다.

### 3.1.4 Eurocode 방법

Eurocode에서 제안하고 있는 액상화 평가방법은 Seed의 이론을 토대로 규정한 것으로 일련의 평가과정을 살펴보면, 다음의 그림 10과 같다.

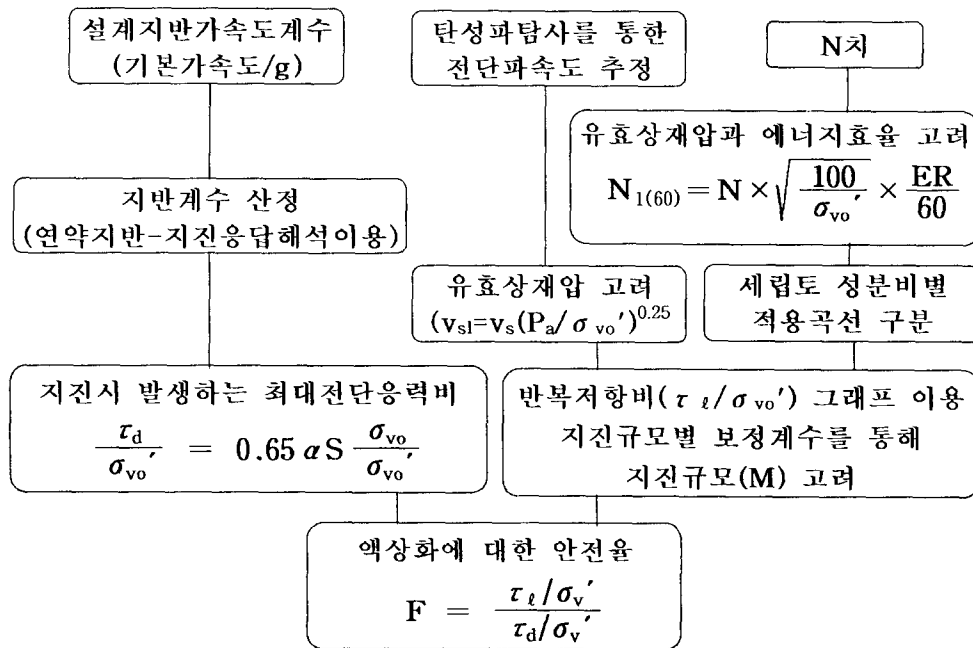
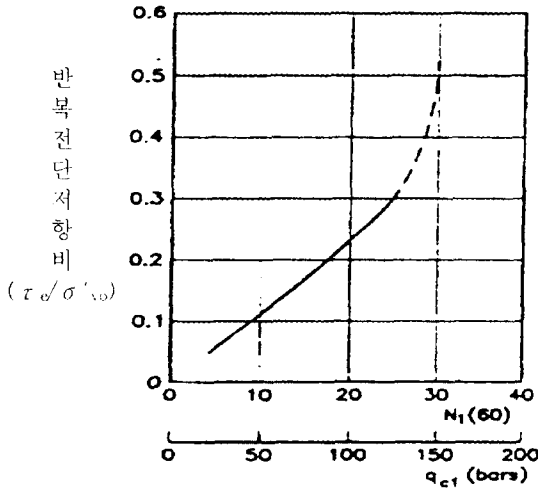


그림 10 Eurocode 규정의 액상화 평가방법의 순서도

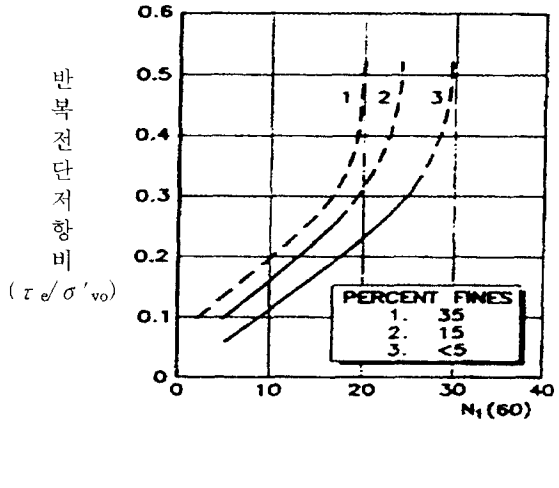
Eurocode의 내용을 보면, 지진의 최대전단응력비 산정은 연약지반이 매우 두꺼운 경우를 제외한 모든 지반에 대해서 기본가속도계수와 지반계수를 이용하도록 규정하고 있다. 또한, 지반의 반복저항비 산정



은 해당지층의 표준관입저항치, N치를 이용하여 이를 유효상재압 100 kPa과 에너지 효율 60%를 기준으로 보정하여 적용한다. 또한, 전단저항비 산정시 세립질 함유량을 고려할 수 있으며 콘 관입시험결과도 이용할 수 있도록 그림 11을 제안하고 있다. 그림 11 (a)는 표준관입저항치 및 콘 관입저항치를 이용한 액상화 반복전단저항비 산정곡선이고 그림 11 (b)는 세립질 함유량에 따른 반복전단저항비 곡선을 나타내고 있다.



(a) 모래



(b) 실트질 모래

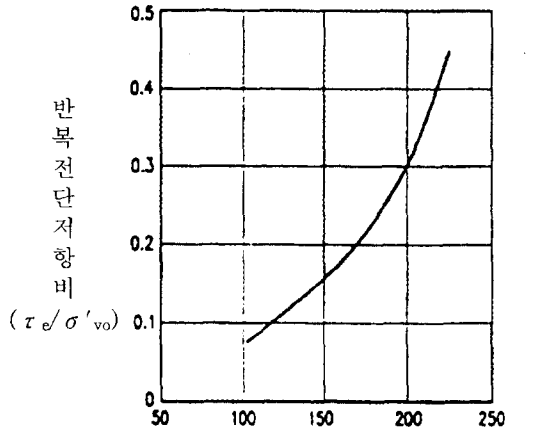
그림 11 액상화 평가를 위한 기준곡선 (지진규모 7.5)

지반의 샘플링이 어려워 표준관입저항치 N치 산정이 어려운 경우, 전단파속도를 이용하여 액상화 평가를 수행할 수 있도록 그림 12를 제안하고 있다. 이 때, 탄성과탐사를 통해 얻어진 전단파속도는 유효상재압과 대기압에 대해 보정한다.

지진규모에 대한 고려는 반복전단저항비 산정시에 국한한다. 그 내용을 살펴보면, 그림 11을 통해 산정된 반복전단저항비에 표 3의 지진규모별 수정계수, CM을 곱하여 각 지진규모별 반복전단저항비를 산정할 수 있다.

Eurocode에서 다음과 같은 몇 가지 사항에 대해서 주의할 것을 언급하고 있는데 우선, 지반심도가 3m이하인 경우에는 N치를 보정하지 않고 N치를 25% 감소하여 적용하고 지반심도 20m이내에 대해서만 평가를 수행하도록 제안하고 있는 점이다.

또한, 일본의 규정들과는 달리 허용안전율 1.5를 제한하여 보다 실제적인 평가기준을 규정하고 있으며 평가결과가 허용안전율보다 작은 경우, 진동삼축시험과 같은 추가적인 조사를 추천하고 있다.



정규화된 전단파속도( $v_{s1}$ , m/sec)  
그림 12 액상화 평가곡선 ( $v_s$  이용)

표 3 간이예측법에 적용되는 지진규모별 전단저항강도 수정계수 (CM)

지진 규모 (M)	지진 규모별 수정계수 (CM)
5.5	2.86
6.0	2.20
6.5	1.69
7.0	1.30
8.0	0.67

### 3.1.5 각 평가방법별 비교 및 국내 적용시 고려사항

3.1.1~3.1.4에서 소개한 각 액상화 평가방법을 살펴보면, 몇 가지 특징들을 보유하고 있는 점을 알 수 있다. 각 방법의 특징을 전체적으로 나타내면 다음의 표 4와 같다.

표 4 각 액상화 평가방법별 특징

구 분	내 용	특 징	
		지진력 산정	지반저항력 산정
Seed와 Idriss	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지진규모 고려가능</li> <li>· 안전율 산정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지진규모별 재하횟수 (표 1 참조)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· N치 및 세립질 함유량</li> <li>· 지진규모 고려 (그림 4 참조)</li> </ul>
Iwasaki와 Tatsuoka	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지진규모 7.5 기준</li> <li>· 안전율 산정</li> <li>· 평가한계심도 20 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 보정계수 사용안함 (타방법보다 큰 값)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 입력자료 : N치, 평균입경, 세립질 함유량</li> </ul>
Ishihara	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 액상화 발생가능 입도분포곡선</li> <li>· 액상화 정도별 지역구분(4구역)</li> <li>· 한계유효상재압 <math>3\text{kg/cm}^2</math>이하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지진응답해석 수행 후 (최대전단응력 산정), 등가가속도 산정</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 등가 N치 산정시 유효상재압 <math>0.66\text{ kg/cm}^2</math>에 대해 보정</li> <li>· 세립질 함유량 고려시, 등가 N치를 감소시켜 적용</li> </ul>
Eurocode	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Seed 법과 유사</li> <li>· 지진규모 고려가능</li> <li>· 허용안전율 제안</li> <li>· 평가한계심도 20 m</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지진규모 고려 안함.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지진규모 7.5인 경우의 값에 대해 지진규모별 보정계수를 곱함 (표 3 참조)</li> </ul>

앞 절에서 소개된 액상화 평가방법 중 Seed, Iwasaki와 Tatsuoka, 그리고 Eurocode와 같이 안전율을 산정하는 방법은 그 사용에 있어서 매우 편리한 장점이 있다. 그러나, 이를 국내 지반에 대해 적용하는 경우에는 몇 가지 해결해야 할 문제가 있다.

첫 번째로 각 액상화 평가방법에서 이용하는 지반계수에 대한 국내의 규정이다. 지반계수는 지반형태 분류에 따른 지반 내 지진증폭현상을 표현하는 값으로 국내 지반을 대상으로 한 직접적 연구를 수행하지 않고 외국의 규정을 그대로 인용하는 것은 매우 비합리적인 사고로 판단된다. 따라서, 지반계수 규정은 많은 국내 지반을 대상으로 한 증폭현상연구와 여러 공학자들의 논의를 통해 합리적인 값을 도출하는 것이 바람직하다고 사료된다.

이러한 연구의 완성도가 일정 수준에 도달할 때까지는 Shake 91과 같은 지진응답해석 프로그램의 이용을 추천한다. 외국의 지진연구에서 많이 이용되고 있는 1차원 등가해석 프로그램인 Shake 91은 경제적인 측면의 만족도가 높고 해석결과도 비선형 해석과 비교해 볼 때, 큰 차이가 나지 않을 뿐 아니라 그 차이도 내진설계시 안전측의 결과를 주는 장점이 있다.

두 번째로 앞 절에서 언급한 액상화 평가방법들이 큰 지진규모를 대비하고 있는 국가들에서 연구된 것으로 대체적으로 지진규모 7.5를 기준으로 규정들이 마련된 것으로 보인다. 따라서, 이에 대한 수정 보완없이 우리 나라에 적용하는 것은 지진규모가 그다지 크지 않은 국내 지진특성을 고려할 때, 과다설계 및 비경제적인 시공을 유발하게 될 것이다. 다음의 표 5에 나타난 바와 같이 최근 20년간의 발생규모 통계(한국지진공학회 제 2 회 기술강습회 자료)와 여러 문헌에 나타나 있는 지진기록(역사지진 포함)을 보면, 국내에서 발생한 지진규모는 6이 넘는 경우가 거의 없음을 언급하고 있다. 따라서, 국내에 적용가능한 지진규모는 구조물의 중요도에 따라 다르겠지만 최대 6.5를 넘지 않도록 적용하는 것이 매우 합리적일 것이라고 판단된다.

표 5 국내 계측지진의 지진규모별 빈도분포 (건축물의 내진설계, 한국지진공학회, 1998)

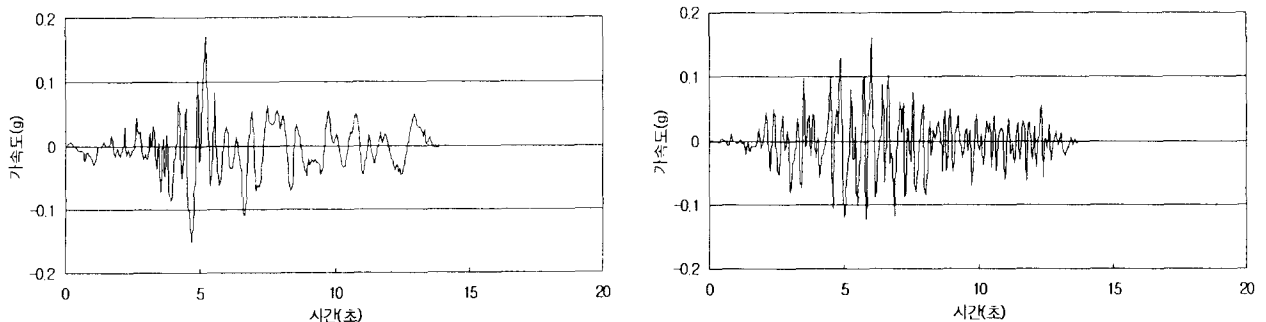
년도	지진규모 M				계
	6 < M < 5	5 < M < 4	4 < M < 3	3 < M < 2	
1978	2	2	1	1	6
1979		1	16	5	22
1980	1		5	10	16
1981		1	9	5	15
1982	1	2	8	2	13
1983		1	9	10	20
1984			7	12	19
1985		2	9	15	26
1986			12	3	15
1987		1	3	7	11
1988			4	2	6
1989			13	3	16
1990			3	12	15
1991			7	12	19
1992		3	4	8	15
1993		1	6	15	22
1994		4	7	14	25
1995		1	10	18	29
계	4	19	133	152	310

※지진규모 6.5이상은 발생가능 한계범위로 규정

### 3.2 경험적 액상화 평가에

3.1절의 각 평가방법별 비교를 위해서 간편법을 적용하여 액상화 평가를 수행하고자 했으나 국내 규정에 지표면 지진가속도 산정에 이용되는 지반계수규정이 아직 마련되지 않은 관계로 지진응답해석을 이용하는 방법을 통해 국내 지반에 대한 액상화 평가를 수행하였다.

지진응답해석에 이용된 입력지진시간이력은 국내 지진기록이 거의 전무하여 일본 항만구조물 설계에 사용되는 장주기 특성의 Hachinohe항 지진기록과 단주기 특성의 Ofunato항 지진기록을 이용하였다. 해석에 이용된 입력가속도수준은 1997년 한국지진공학회 주관으로 규정화한 기반암에서의 지진가속도를 이용하였다. 해석에 사용된 지진기록과 지진가속도 규정은 그림 13과 표 6에 나타난 바와 같다.



(a) Hachinohe 지진기록 (b) Ofunato 지진기록

그림 13 지진응답해석에 이용된 지진 가속도 시간이력곡선

표 6 우리 나라의 상위개념 내진설계기준 (한국지진공학회, 1997)

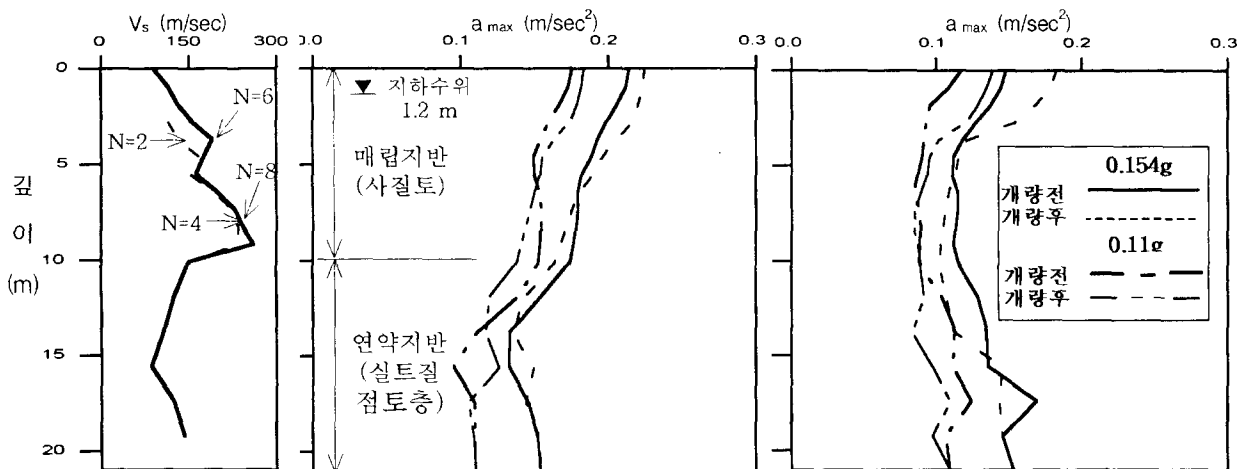
재현주기	구분	성능수준별 구조물분류		기반암에서의 지진가속도		위험도 계수
		기능수행	붕괴방지	지역 A	지역 B	
50년	내진 II등급	←	←	0.044 g	0.028 g	0.40
100년	내진 I등급	←	←	0.063 g	0.040 g	0.57
200년	내진 특등급	←	←	0.080 g	0.051 g	0.73
500년		←	←	0.110 g	0.070 g	1.00
1000년		←	←	0.154 g	0.119 g	1.40
2400년		←	←	0.220 g	0.140 g	2.00

※ 지역 B : 지진발생 가능성이 낮은 지역 (강원북부, 전남 남서부, 제주도)  
 지역 A : 지진발생 가능성이 높은 지역 (지역 B를 제외한 지역)

표 6의 기능수행수준은 실제지진 발생 후에 구조물들이 국부적인 보수를 통해 기능을 수행할 수 있는 수준의 내진성능으로, 발생하는 최대응력이나 변위가 탄성한계내에 있는 것을 의미하고 붕괴방지수준은 구조물의 제한적인 피해는 허용되나 짧은 시간의 긴급보수를 통해 시설물로서의 역할을 수행할 수 있는 수준을 의미한다. 또한, 표 6의 지진가속도는 지역별 가속도를 나타내는 구역계수(재현주기 500년 기준)에 재현주기별 위험도 계수를 곱하여 산정한 것이다.

지진응답해석에 이용된 상용프로그램 Shake 91은 1970년 Dr. Per Schnabel에 의해 개발된 것으로 다층반사모델을 이용한 1차원 등가선형해석을 통해 지반내 증폭현상을 해석하는 특징을 갖고 있다. 또한, 해석시 변형률수준에 따른 전단탄성계수와 감쇠비를 이용함으로써 지반의 동적 특성을 충분히 고려할 수 있는 점과 시간영역 및 주파수영역에서의 해석이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 해석시 주의사항은 지층분할을 너무 크게 할 경우, 심도에 따른 지반강성변화를 충분히 고려하지 못하게 되어 증폭현상을 정확히 표현할 수 없다는 점이다. 이러한 이유로 일본 항만구조물 내진설계기준에서는 지반심도 10m를 기준으로 10m이내에서는 1m이하, 10m이상에서는 2.5m이하로 지층을 분할할 것을 추천하고 있다.

그림 14는 영종도 인천국제공항 건설부지를 대상으로 지진응답해석을 수행한 결과이다. 해석시 입력 지반자료는 지반개량 전후의 표준관입저항치를 전단파속도로 변환하여 이용하였으며 그 내용은 다음의 그림 14 (a)와 같다. 그림 (a)는 지반개량을 통해 지반심도 4m에서 N치가 2에서 6으로 증가하고 지반심도 8m에서는 4에서 8로 증가한 내용을 전단파속도로 표현하고 있다. 그림에서 굵은 실선은 개량후, 점선은 개량전의 전단파속도이다. 또한, 그림 14 (b)와 (c)는 각각 Hachinohe항과 Ofunato항 가속도 시간이력을 입력한 해석결과이며 이 때, 입력가속도는 붕괴방지 내진1등급(재현주기 1000년)과 붕괴방지 내진2등급(재현주기 500년)수준의 값을 이용하였으며 표 6에서 보면, 그 값은 각각 0.154g와 0.110g이다.



(a) 입력 전단파속도 (b) Hachinohe항 지진응답해석결과 (c) Ofunato항 지진응답해석결과

그림 14 개량전-후의 지진응답해석 (영종도)

지진응답해석결과, 장주기의 Hachinohe항 지진이 단주기의 Ofunato항 지진보다 크게 지반내 증폭현상을 보이는 것으로 나타났으며 Hachinohe항 지진의 증폭비율이 여러 규정에서 제안하고 있는 지반계수 최대값 1.5(미국 UBC 및 한국 도로교 표준 시방서) 적용시보다 크게 나타났다. 따라서, 국내지반에 대한 증폭현상연구를 통해 합리적인 지반계수가 규정화되어야 할 것으로 판단된다. 또한, 심도 4m에서는 N치가 2에서 6으로, 8m에서는 4에서 8로 지반개량효과로 인한 증폭현상의 변화를 살펴보면, 매립지반층의 증폭현상은 다소 감소함을 보였다. 이로써, 지반의 강도를 증가시키고 지반내 지진증폭현상을 감소시키는 지반개량이 매우 효율적인 액상화 방지대책임을 확인할 수 있었다.

지진응답해석결과를 이용하여 Seed와 Idriss, Iwasaki와 Tatsuoka, 그리고 Eurocode의 방법으로 액상화 평가를 수행한 결과, 산정된 안전율은 다음의 그림 15에 나타난 바와 같다.

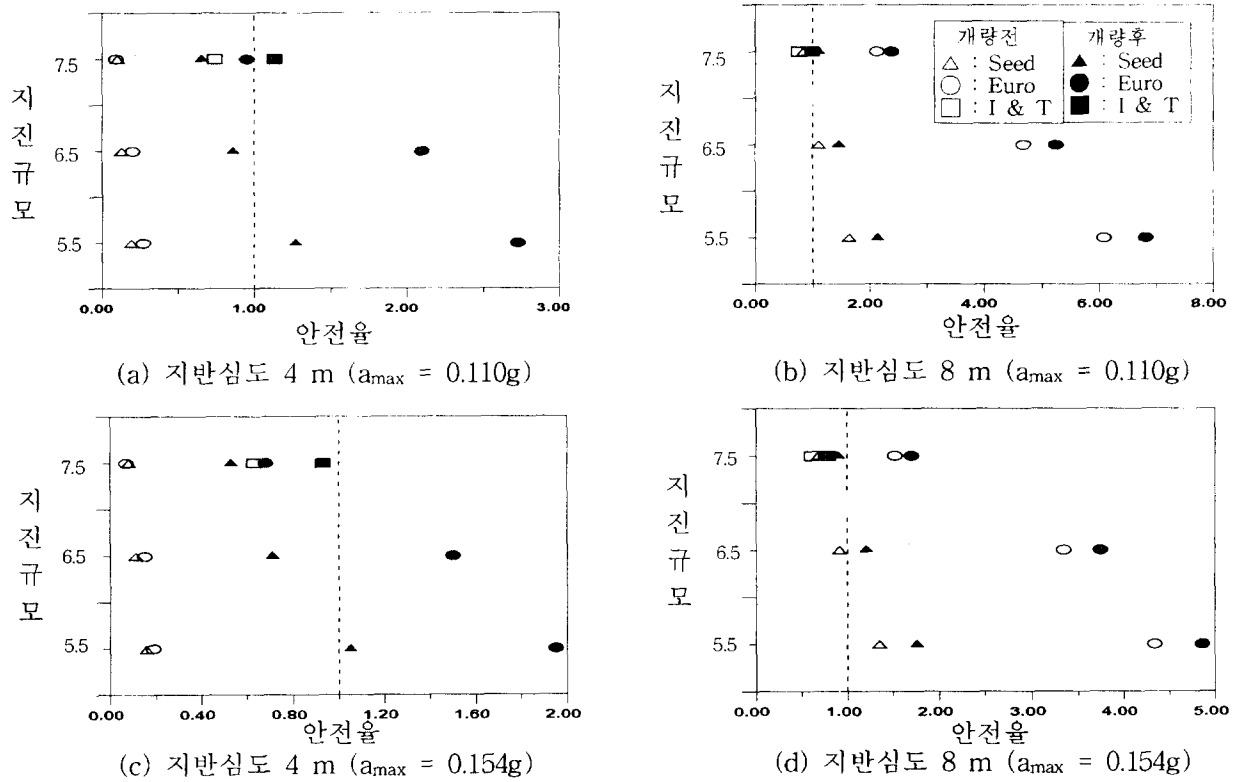


그림 15 각 평가방법별 안전율 산정결과 비교 (영중도)

그림 15에 나타난 Seed 간편법과 Eurocode의 결과를 비교해 보면, 지반개량전에는 유사한 결과를 보이고 있으나 지반개량으로 인한 안전율의 증가가 Eurocode의 방법에서 크게 두드러짐을 보였다. 또한, 지진규모에 따른 결과를 보면, 지진규모가 작아질수록 Eurocode의 안전율 증가율이 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 Eurocode의 방법이 Seed의 방법보다 안전율이 높게 산정됨을 알 수 있었다. 그리고, Iwasaki와 Tatsuoka의 결과를 보면, 지반개량으로 인한 안전율의 변화폭이 가장 적은 것으로 나타났다. 이는 Seed와 Eurocode에서는 1보다 작은 계수를 곱하여 지진력을 작게 산정하나 Iwasaki와 Tatsuoka의 방법에서는 이러한 계수를 곱하지 않음으로써 지진력을 크게 산정하여 안전율 F의 분모값을 크게 만들기 때문이다. 또한, Seed와 Eurocode의 방법에서는 액상화 전단저항비가 N치의 제곱 함수로 표현되는 도표를 이용하여 산정하는 반면, Iwasaki와 Tatsuoka의 방법에서는 N치의 제곱근 함수로 표현되는 산정식을 통해 산정됨에 따라 N치의 증가에 따른 액상화 전단저항비의 증가율이 미비한 것으로 나타났다. 그리고, 평가방법에 관계없이, 전반적으로 지반심도가 깊어짐에 따라 안전율은 증가하였는데 이는 모든 방법에서 유효상재압이 고려됨으로써 지반심도(유효상재압)가 증가하면 액상화 발생가능성이 감소함을 보여주고 있다. 특히, 표 4의 Iwasaki와 Tatsuoka, 그리고 Eurocode의 평가한계심도와 Ishihara 방법의 평가한계 유효상재압에 대한 규정사항도 이러한 사실을 고려한 것으로 국내 규정에도 이러한 내용을 첨부하는 것이 바람직할 것으로 판단되며 본인은 평가한계심도 20 m의 값을 추천한다.

### 3.3 유효응력 개념에 기초한 예측기법

앞 절에서 언급한 전응력 개념의 액상화 평가방법은 지진력과 지반저항강도의 비교를 통해 액상화 발생가능의 유무만을 예측 판정하는 것으로 지진발생시 정확한 해석을 기대하기는 어렵다. 즉, 안전율이 1보다 크게 산정된 경우, 액상화로 인한 지반파괴는 발생하지 않지만 소정의 침하발생으로 구조물에 심각한 영향을 줄 수도 있다. 따라서, 최근 미국, 일본 등 지진연구가 활발한 나라에서는 이러한 문제에 대한 해결방안을 연구하고자 많은 인력 및 장비와 연구비가 투입되고 있다.

유효응력 개념의 액상화 평가는 간극수압의 변화를 분석함으로써 액상화 판정과 침하 및 횡방향 변위 등을 산정할 수 있을 뿐 만 아니라 중요 구조물의 내진해석시 지반과 연계된 상호작용을 효과적으로 고려할 수 있다. 물론, 지반을 물과 연계된 복합재료로써 해석하는 만큼 여러 파라미터들이 필요하다는 단점이 있지만 많은 실험적 연구를 통해서 파라미터의 수를 감소시키고자 하는 노력을 하고 있다.

본 연구에서는 최근 새롭게 개발 발표된 교란상태개념(Disturbed State Concept : DSC) 및 에너지 이론을 이용하여 유효응력 개념하의 액상화 평가를 수행하고자 노력중이며 그 내용은 다음과 같다.

#### 3.3.1 교란상태개념(DSC) 이론에 기초한 예측기법

교란상태개념에서는 하중을 받는 재료의 거동을 정의하기 위해 두 개의 기준상태를 도입한다. 첫 번째 기준상태는 재료가 외력을 받기 전의 초기상태를 상대적으로 손상되지 않은(relative intact state ; RI)상태로 간주하는 것으로 초기상태시 미세한 결함이 존재하더라도 RI상태에 가깝다고 볼 수 있다. 두 번째는 완전파괴(fully adjusted state; FA)상태로써 재료의 초기상태에 미세하게 존재했던 손상된 부분이 외력에 의해 점차로 확산되어 재료가 전단저항력을 완전히 잃은 상태를 말한다. 따라서 하중을 받는 재료들은 RI상태와 FA상태의 사이에 존재하게 된다. 이러한 재료의 상태변화를 도시하면 그림 16과 같다.

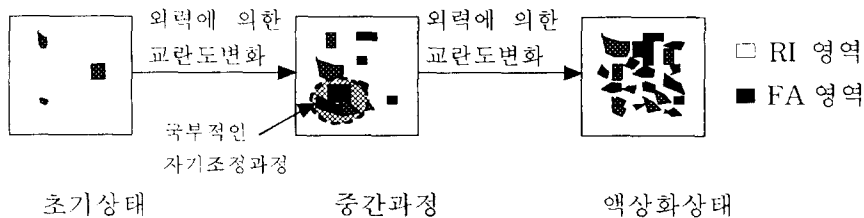


그림 16 교란도의 변화에 따른 재료 내부의 상태변화 모식도 (Park, I, J., 1997)

#### 1) RI 상태

RI상태는 재료의 경화거동(hardening behavior)을 나타낼 수 있는 탄소성모델을 사용하여 표현하는데 본 연구에서는 계층적 단일 항복곡면 모델(Hierarchical Single Yield Surface model ; HiSS model)중 가장 기본이 되는 탄소성 경화모델인  $\delta_0$ 모델(관련유동법칙과 등방경화모델)을 통해 항복함수(F)를 정의하였으며 그 식은 다음의 식 (1)과 같다. (Desai et al, 1986; Desai and Wathugala, 1987).

$$F = \frac{J_{2D}}{p_a} - \left[ -\alpha \left[ \frac{J_1}{p_a} \right]^n + \gamma \left[ \frac{J_1}{p_a} \right]^2 \right] (1 - \beta S_r)^{-0.5} \quad (1)$$

여기서,  $S_r = (\sqrt{27} J_{3D}) / (2J_{2D}^{3/2})$ 이며,  $J_1$ 은 응력텐서의 1차 불변량(The first invariant of the stress tensor)이고  $J_{3D}$ 는 축차응력텐서( $S_{ij}$ )의 3차 불변량(The third invariant of the deviatoric stress tensor)이다. 또한,  $\gamma$ 는 재료의 파괴상태를 정의하는 매개변수,  $\beta$ 는 재료의 항복면 형상을 정의하는 매개변수,  $n$ 은 재료의 상태변화에 관한 매개변수, 그리고  $\alpha$ 는 경화 함수(Rigby and Desai, 1995)로 다음의 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\alpha = \frac{h_1}{\xi^{h_2}} \quad (2)$$

여기서,  $h_1$ 과  $h_2$ 는 경화함수 매개변수이며,  $\xi$ 는 소성변형률 상각궤도(plastic strains trajectory)  $= \int \sqrt{d\epsilon_{ij}^p d\epsilon_{ij}^p}$ 이며,  $d\epsilon_{ij}^p$ 는 소성변형률 텐서이다.  $\delta_0$ 모델을 통해 RI상태의 응력-변형률 증분에 관한 방정식을 표현하면 식 (3)과 같다.

$$d\sigma_{ij}^{RI} = C_{ijkl}^{ep} d\epsilon_{kl}^{RI} \quad (3)$$

여기서  $d\sigma_{ij}^{RI}$ 는 RI상태의 응력의 증분이며,  $d\epsilon_{ij}^{RI}$ 는 RI상태의 변형률의 증분, 그리고  $C_{ijkl}^{ep}$ 는 탄소성 구성 텐서이며 식 (1)에 의해 결정된다.

## 2) FA상태

FA상태는 한계상태(critical state)로 정의할 수 있으며 식 (4)를 이용하여 재료의 FA상태를 표현한다.

$$\sqrt{J_{2D}^c} = \bar{m} J_1^c \quad (4-a)$$

$$J_1^c = 3p_a \times e^{\left(\frac{e_0^c - e^c}{\lambda}\right)} \quad (4-b)$$

여기서,  $\bar{m}$  과  $\lambda$ 는 재료의 매개변수,  $e_0^c$ 는  $J_1^c = 3p_a$ 일 때의 간극비이고  $p_a$ 는 대기압이다.

## 3) 교란도함수

진동삼축시험 또는 실삼축시험등의 실내시험을 통해 교란도함수를 정의할 경우, 근사적으로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_\sigma = \frac{\frac{\bar{\sigma}^{(c)}}{\sigma} - \frac{\bar{\sigma}^{(a)}}{\sigma}}{\frac{\bar{\sigma}^{(c)}}{\sigma} - \frac{\bar{\sigma}^{(a)}}{\sigma}} \quad (5)$$

여기서, 위 첨자 i, c, 그리고 a 는 각각 RI상태, FA상태, 그리고 시료의 실제 거동상태를 표시하며  $\bar{\sigma}$ 는 평균 유효응력을 의미한다. 포화 사질토의 경우, 체적 변형률보다는 전단 변형률이 교란도를 지배한다고 정의함으로써, 교란도 함수 D는 전단소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strains trajectory),  $\xi_D$ 의 함수를 통해 다음의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. (Amaleh and Desai, 1990).

$$D = 0.99 (1 - e^{-A\xi_D^Z}) \quad (6)$$

여기서, A와 Z는 매개변수로 초기 유효구속압 ( $\bar{\sigma}_0'$ ), 초기 밀도 ( $\rho_0$ ), 그리고 진동반복횟수(N) 등의 영향을 받는다. 그리고  $\xi_D$ 는 다음의 식 (7)을 통해 정의할 수 있다.

$$\xi_D = \int \sqrt{dE_{ij}^p dE_{ij}^p} \quad (7)$$

여기서,  $dE_{ij}^p$ 는 축차소성변형률의 증분으로  $dE_{ij}^p = d\epsilon_{ij}^p - d\epsilon_v^p/3$ 이다. 이 때,  $d\epsilon_{ij}^p$ 와  $d\epsilon_v^p$ 는 소성변형률 증분 및 체적소성변형률 증분이다. 진동하중을 받는 재료의 경우, 전단소성변형률 상각궤도,  $\xi_D$ 는 매회 진동주기의 최대응력에 해당하는  $dE_{ij}^p$ 를 이용하여 산정한다.

4) 교란도 함수를 이용한 액상화 평가

교란도 함수를 이용한 액상화 평가는 유효응력개념에 기초한 것으로 보다 정확한 액상화 현상을 예측하고자 할 때 유용한 방법이다. DSC 법을 이용한 액상화 평가의 개략적인 과정은 그림 17과 같이 다섯단계로 구분할 수 있으며 각각의 내용을 살펴보면 다음과 같다. (Park, I. J., 1997)

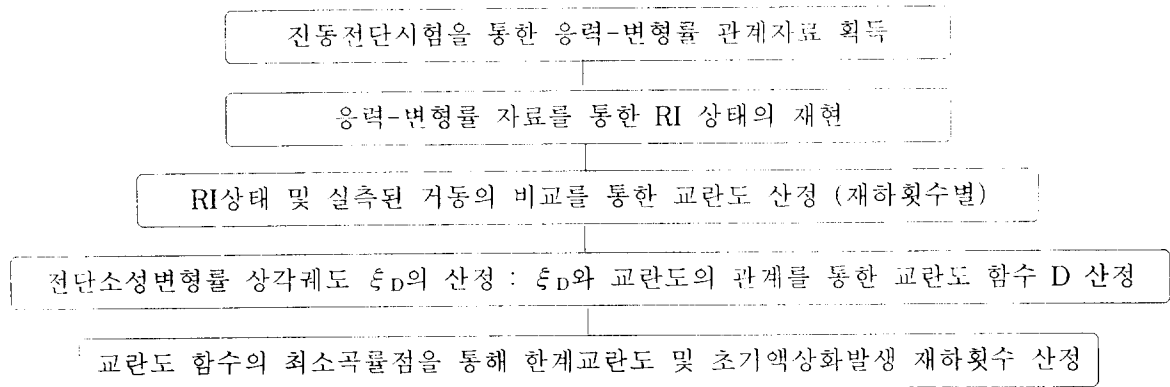


그림 17 교란도 함수를 이용한 액상화 평가 순서

- ① 지진하중으로 인한 액상화현상을 재현할 수 있는 진동삼축시험, 또는 실삼축시험등을 통해 포화사질토에 대한 응력-변형률 관계자료를 얻는 것이다.
- ② 진동삼축시험을 통해서 얻은 응력-변형률 관계를 통해 재료의 RI(relative intact)상태 거동을 재현한다. RI상태의 재현은 규명된 매개변수를 탄성 또는 탄소성 모델에 적용하는 방법과 진동삼축시험 또는 실삼축시험결과에서 첫 번째 하중재하시의 재료의 응력-변형률 거동을 그 재료의 RI 상태거동으로 가정하는 방법이다. 여기서, 구한 재료의 RI상태의 거동은 세 주응력방향에 대한 평균유효응력의 향으로 나타내며, 이를  $\bar{\sigma}^{(i)}$ 로 표현한다. 이와 같이 구한 RI상태의 응력-변형률 관계를 이용하여 매 주기별로 축차응력이 최고값에 도달한 시점의 변형률 및 그에 상응하는 응력을 산정한다.
- ③ 하중재하에 따른 교란도를 구한다. 이는 실내시험 결과를 통해 산정되는 평균유효응력,  $\bar{\sigma}^{(a)}$ 과 ②에서 산정된  $\bar{\sigma}^{(i)}$ 를 식 (5)에 대입하여 매재하횟수(N)마다 교란도,  $D_N$ 을 산정한다.
- ④ 전단소성변형률 상각궤도(deviatoric plastic strains trajectory),  $\xi_D$ 를 산정한다. 이는 매주기별로 축차응력이 최대값에 이르렀을 때의 값을 이용하며 ③에서 산정한 교란도와와의 관계를 도출한다. 이러한 과정을 통해 최종적으로 산정한 교란도함수(D)는  $D = 0.99[1 - e^{(-A\xi_D^Z)}]$ 와 같은 형태를 가진다. 여기서, 매개변수 A와 Z는 각 초기유효구속압에 대한  $\ln(\xi_D)$ 와  $\ln(-\ln(1-D/0.99))$ 에 대한 선형회귀분석을 통해 산정한다.
- ⑤ ④에서 구한  $\xi_D$ 와 D(disturbance)의 관계그래프, 즉 교란도 함수의 최소곡률점을 한계교란도(critical disturbance ;  $D_c$ )로 정의하고 이 때의 액상화 발생 진동재하횟수를 산정한다. 한계교란도의 물리적인 의미는 재료내부의 교란도의 변화가 가장 급격한 시점을 의미한다. 즉, 재료는 한계교란도를 경계로 커다란 상태변화를 겪게 된다. 교란도의 변화는 내부적으로는 재료의 미세구조변화를 의미하며, 외부적으로는 재료의 거동변화로 나타난다. 액상화 현상을 토립자의 미세구조 측면에서 보면, 재료 입자간의 접촉을 통해 외부하중을 지지하던 미세구조가 완전히 무너지고 물이 하중을 전담하는 급격한 변화양상으로 액상화 발생시점은 교란도 변화가 가장 급격한 시점으로 간주할 수 있다. 따라서,  $\xi_D$ 와 D(disturbance)의 관계 그래프에서 곡률반경(R)이 최소인 지점이 교란도 함수의 변화가 가장 급격한 점으로 볼 수 있으며 이 때, 재료는 초기액상화에 도달했다고 가정한다. 임의의 함수에



대한 곡률을 구하는 식은 식 (8)과 같다.

$$R = \frac{D''}{(1 + D'^2)^{3/2}} \quad (8)$$

여기서  $D'$  와  $D''$  는 각각 교란도함수  $D$ 의  $\xi_D$ 에 대한 1차미분항과 2차미분항으로 식 (9)와 같다.

$$D' = \frac{dD}{d\xi_D} = 0.99 \times AZ \xi_D^{Z-1} \text{Exp}(-A\xi_D^Z) \quad (9-a)$$

$$D'' = \frac{d^2D}{d\xi_D^2} = 0.99 \times AZ \xi_D^{Z-2} \text{Exp}(-A\xi_D^Z)(Z - 1 - AZ\xi_D^Z) \quad (9-b)$$

이와 같은 방법으로 구한 한계교란도에서의  $\xi_D$ 와 매 재하시의  $\xi_D$ 를 비교함으로써 DSC법을 통한 액상화 발생 재하횟수,  $N_c$ 를 산정할 수 있다. 다음의 그림 18은 실내시험을 통해 산정된 RI상태 및 완전파괴상태(FA)와 교란도에 대한 내용을 도시하고 있으며 그림 19는 교란도함수의 도식적인 형태를 나타내고 있다.

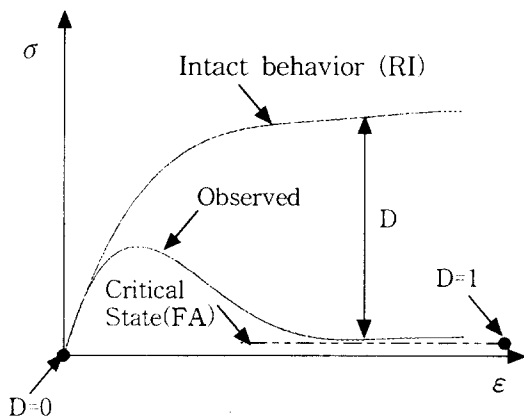


그림 18 응력-변형률 관계도 상의 교란도

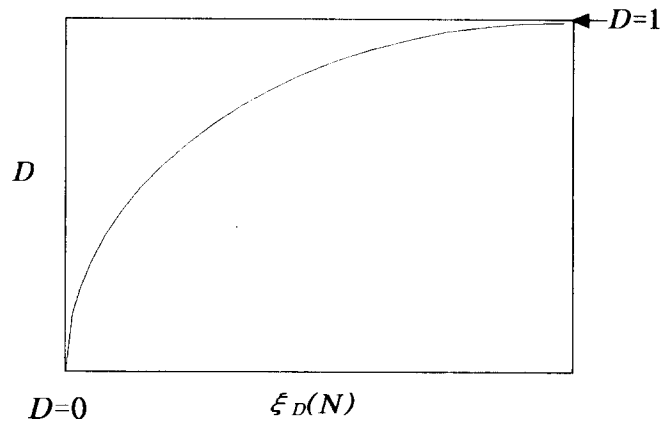


그림 19 DSC 함수의 도식적인 형태

### 3.3.2 변형률에너지 이론에 기초한 예측기법

액상화란 포화사질토가 급속하중을 받아 간극수압이 증가하고 전단력을 상실하여 유체와 같이 거동하는 상태를 말하는 것으로 입자간의 접촉이 무너지면서 토립자가 부담하던 하중을 물이 전적으로 부담하게 되는 상태이다. 이 현상을 재료 내부의 소산에너지의 개념으로도 설명할 수 있다. 외부로부터 가해지는 하중에 의한 에너지는 토립자의 접촉점간의 마찰을 감소시킴으로써 소비된다. 토립자의 접촉점간의 마찰이 줄어들어 따라 입자구조는 재배열을 이루며 그 과정에서 유효응력은 감소되며 외부의 하중은 점차로 물이 부담하게 된다. 사질토에 액상화현상이 발생하게 되면 토립자간의 재배열이 급속한 속도로 이루어진다. 즉 토립자간의 마찰저항이 급격히 감소하면서 입자구조는 재배열된다. 이때 토립자간의 입자구조를 변화시키는 데에 소모되는 소산에너지의 양도 급격하게 증가할 것이다.

이와 같은 개념에 기초하여, 토체내에 소산되는 소산에너지의 변화율을 통한 사질토의 액상화의 발생시기의 판정이 가능하다. 즉 시간에 따른 소산에너지의 변화량이 가장 큰 시점에서 액상화가 발생한다고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 액상화가 발생하는 시기를 다음의 식 (10)과 같이 정의하고, 이를 통한 해석결과를 시험결과와 비교 검증해 보고자 한다. 이와 같은 개념을 토대로 산정된 식 (10)에서,  $N_c$ 는 액상화 발생재하횟수이고  $dN$ 은 재하횟수의 증분으로 1의 값을 갖는다.

$$N_e = \text{MAX} \left| \frac{dW}{dN} \right| = \text{MAX} | W_i - W_{i-1} | \quad (10)$$

여기서,  $W_i$ 는  $i$ 번째 재하회수에서의 소산에너지를 나타낸다. 그림 20은 상대밀도가 60%이고 69KPa의 초기유효구속압이 작용하고 있는 대상지반을 Energy방법으로 평가한 예로 재하회수에 따른 토체의 단위체적당 소산에너지의 변화를 도시한 것으로 그림 20 (a)는 재하회수에 따른 단위체적당 소산에너지를 나타내고 있으며 그림 20 (b)는 재하회수에 따른 소산에너지의 변화량을 나타내고 있다.

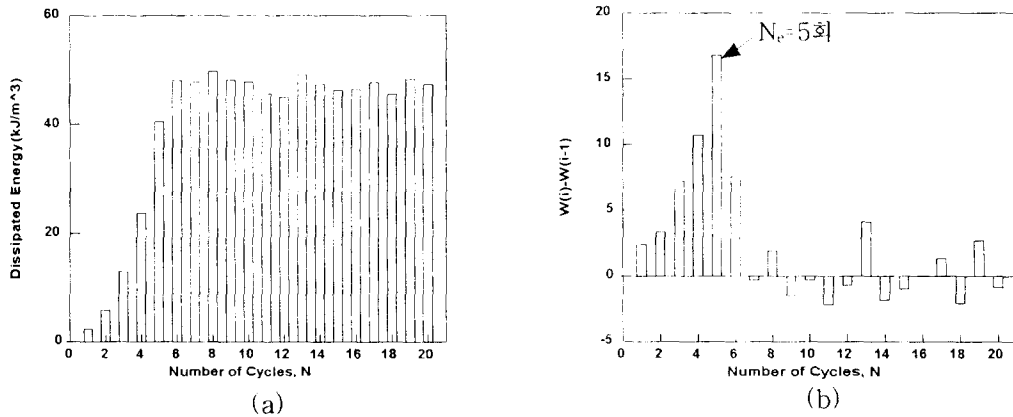


그림 20 에너지방법에 의한 액상화 평가에

### 3.4 유효응력 개념에 기초한 평가에

유효응력 개념의 해석시, 재료의 거동을 충분히 반영하기 위해서는 많은 파라미터들이 필요하다. 따라서, 이러한 파라미터들을 실험적 연구를 통해 규명해 주어야만 한다. 지반의 액상화 해석에 필요한 파라미터들은 일반적으로 진동삼축시험을 이용하여 산정한다.

#### 3.4.1 진동삼축시험

본 연구에서는 상대밀도의 변화가 사질토의 액상화에 미치는 영향을 연구하기 위해 주문진 표준사를 대상으로 상대밀도를 변화시켜 가며 진동삼축시험을 수행하였다. 시험에 사용된 장비는 C. K. Chen Type의 자동화 삼축시험기이다. 주문진 표준사의 기본적인 물성치는 표 7과 같다. 또한, 본 연구에서 수행된 진동삼축시험조건은 표 8의 내용과 같다. 시험시 시료는 직경 50mm, 높이 10mm의 원주형으로 성형하였으며 작용하중의 형태는 정현하중이고 구속압에 대한 축차응력의 비율은 0.5이다.

표 7 주문진 표준사의 기본적인 물성치

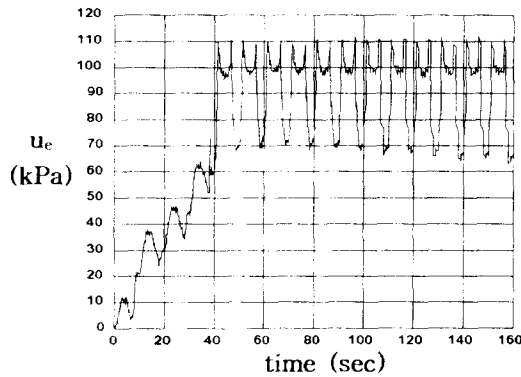
곡률계수, $C_c$	1.23
균등계수, $C_u$	1.17
최대건조단위중량, $\gamma_{dmax}$	1.60
최소건조단위중량, $\gamma_{dmin}$	1.39

표 8 진동삼축시험의 제반조건

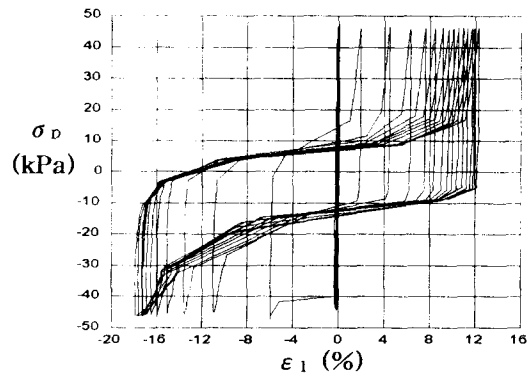
초기유효구속압 (kPa)	100
상대밀도(%)	40, 50, 60
진동수 (Hz)	0.1
하중종류	정현파형
시료조건	포화, 비배수
하중제어방식	응력제어

시험과정은 크게 네 단계로 구분할 수 있다. 첫 번째단계는 시료의 준비과정으로 원하는 상대밀도의

시료를 셀에 거치시키는 것이다. 본 연구에서는 수중침강법(water sedimentation method ; Ishihara, 1996)을 통해 시료를 거치하였다. 두 번째 단계는 시료의 포화단계로 시료의 포화방법은 배압포화법을 사용하였다. 특히, 시료의 포화는 간극수압계수, B값이 0.97이상이 되는 경우를 완전 포화로 간주하였다. 세 번째 단계로 등방압밀과정을 통해 체적변형률이 일정해지는 시기까지 압밀과정을 수행하였다. 네 번째 단계는 축차응력을 반복적으로 가하는 단계로 시료에 가해지는 축차응력의 구속압에 대한 비율은 0.5이다.



(a) 과잉간극수압의 변화



(b) 응력-변형률 변화

그림 21 진동삼축시험결과 ( $\bar{\sigma}_v' = 100$  kPa,  $Dr = 50\%$ ) (김경환, 1998)

이러한 시험과정은 실삼축시험의 경우에도 동일하며 그림 21은 시료의 상대밀도가 50%, 유효구속압이 100 kPa인 경우, 시간에 따른 간극수압의 변화 및 축차응력과 축변형률의 관계를 도시한 것이다. 유효구속압이 100 kPa인 상태에서 상대밀도를 40%, 50%, 60%으로 변화시켜 시험한 결과, 과잉간극수압이 초기 유효구속압(initial effective confining pressure) 수준에 도달한 시점을 액상화의 발생시점으로 간주하는 Seed의 이론에 근거한 액상화 발생 재하횟수,  $N_1$ 은 각각 1회, 4회, 6회인 것으로 나타났다.

### 3.4.2 실삼축시험

다른 방법을 통해 재료의 초기유효구속압이 액상화에 미치는 영향을 연구하였다. 연구에 이용된 실내 시험기는 진동 실삼축시험기(Cyclic Truly Triaxial Test Device)로 본 장비는 삼차원 진동삼축시험 장비로써 삼면의 응력을 임의로 조절할 수 있는 특징이 있다. 본 시험에 이용된 대상시료는 Ottawa 모래로 제원은 다음의 표 9와 같고 시험시 제반조건은 다음의 표 10에 나타난 바와 같다.

표 9 Ottawa모래의 역학적 특성

곡률 계수 ( $C_c$ )	1.60
균등 계수 ( $C_u$ )	2.00
최대간극비 ( $e_{max}$ )	0.77
최소간극비 ( $e_{min}$ )	0.46

표 10 실삼축시험의 제반조건

초기유효구속압 (kPa)	69, 138, 207
상대밀도(%)	60
진동수 (Hz)	0.1
하중종류	톱니파형
시료조건	포화, 비배수
하중제어방식	응력제어

시료는 10 cm의 정방형이고 작용하중의 형태는 정현하중이며 구속압에 대한 축차응력의 비율은 약 0.5로 진동삼축시험시와 동일하다. 시험은 상대밀도 60%를 유지하며 세 종류의 다른 초기 유효구속압 ( $\bar{\sigma}_v' = 69, 138, 207$  kPa)에 대해 시험을 수행하였다. 그림 22 (a), (b)는 시료의 초기유효구속압 138 kPa

의 경우의 시간에 따른 간극수압의 변화 및 축차응력과 축변형률의 관계를 도시한것이다. 진동삼축시험시와 동일하게 과잉간극수압이 초기 유효구속압(initial effective confining pressure)에 도달한 시점을 액상화의 발생시점으로 간주한 결과, 액상화 발생 재하횟수,  $N_1$ 은 유효구속압 69, 138, 207 kPa에 대해 각각 5회, 7회, 8회로 나타났다.

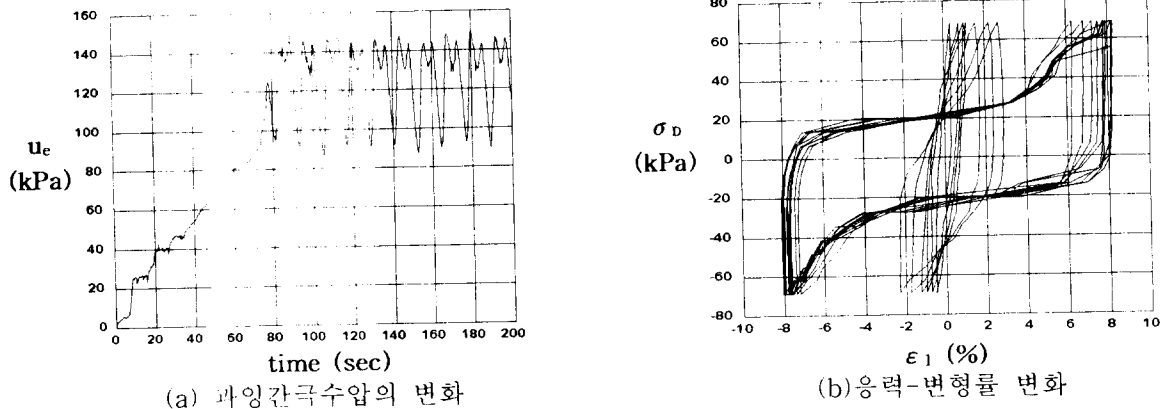


그림 22 진동 실삼축시험결과 ( $\bar{\sigma}_o' = 138$  kPa,  $D_r = 60\%$ ) (I, J. Park, 1998)

상대밀도와 유효구속압의 영향을 보다 자세하게 조사하고자 추가적인 진동삼축시험을 시험하였으며 그 결과, 상대밀도 및 유효구속압의 변화에 따른 액상화 발생 재하횟수,  $N_1$ 은 다음의 그림 23 및 그림 24와 같다.

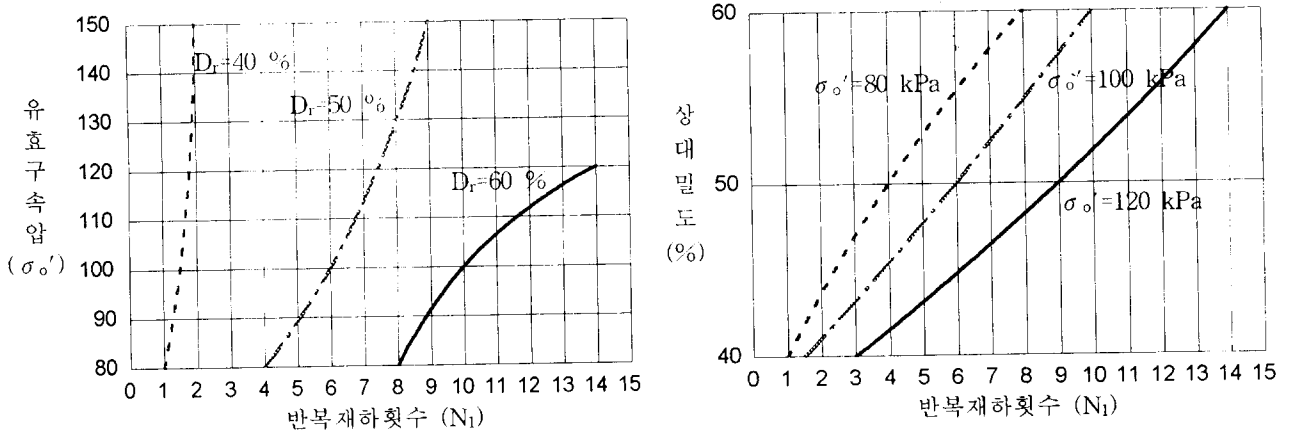
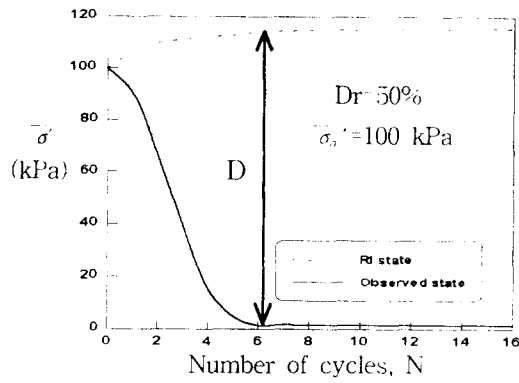


그림 23 상대밀도별 유효구속압-재하횟수의 관계    그림 24 유효구속압별 상대밀도-재하횟수의 관계

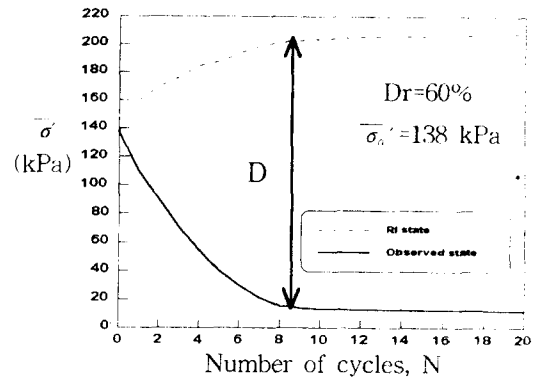
차기에는 유효구속압을 보다 다양하게 변화시켜 진동삼축시험을 수행하고 그 영향을 분석할 뿐만 아니라 세립질 함유량, 전단응력비, 과형 등의 영향인자에 대해서도 실내시험을 통해 영향분석을 수행하고자 한다. 본 시험으로, 보다 정확한 액상화 현상의 영향인자 규명과 함께 유효응력개념의 액상화 평가에 이용할 파라미터들을 획득할 수 있을 것으로 기대한다.

### 3.4.3 교란상태개념(DSC)의 간략법 평가에

3.4.2절의 그림 21 및 그림 22에 나타난 진동삼축시험 및 실삼축시험의 결과를 교란도 함수를 이용한 액상화 평가에 적용하였다. 그림 17에 도시된 평가순서에 의거 우선적으로 각 실내시험결과를 이용하여 재하횟수별 RI 상태와 평균유효응력을 도시하면 다음의 그림 25와 같다.



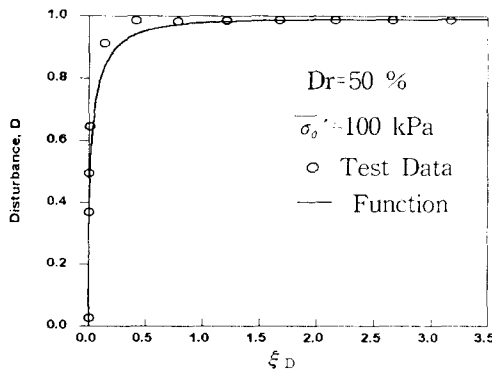
(a) 진동삼축시험결과 이용



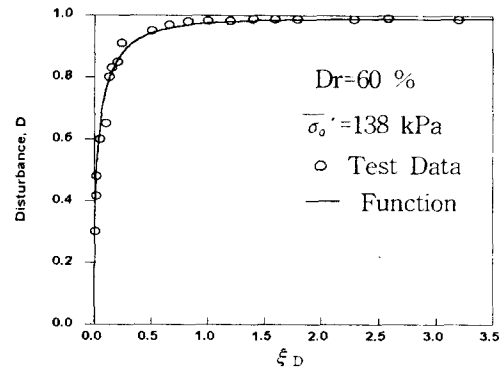
(b) 진동 실삼축시험결과 이용

그림 25 재하횟수별 RI 상태와 시험결과의 평균유효응력

그림 25의 점선은 RI 상태를 표현한 것으로 재료의 경화현상을 나타내고 있으며 실선은 실제 시험을 통해 나타난 평균유효응력 결과를 보여주고 있다. 그림 26은 그림 25의 내용을 토대로 산정한 교란도 함수와 실제 실험결과를 나타내고 있다.



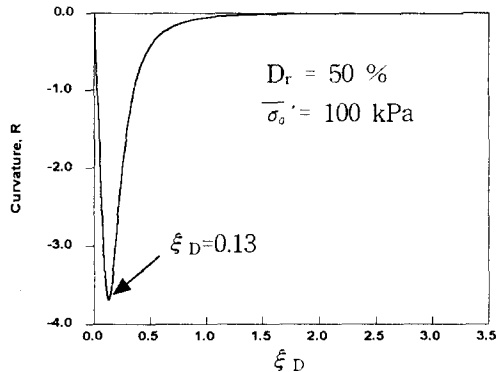
(a) 진동삼축시험결과 이용



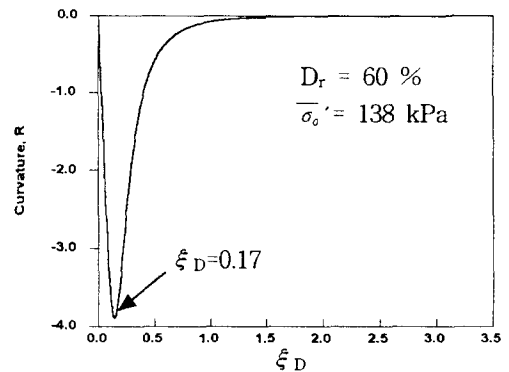
(b) 진동 실삼축시험결과 이용

그림 26 교란도 함수

그림 21 (b)와 22 (b)를 토대로 산정한 전단소성변형을 상각제,  $\xi_D$ 를 구한 후, 그 때의 교란도 함수의 최소곡률반경을 산정하여 나타내면 다음의 그림 27과 같다.



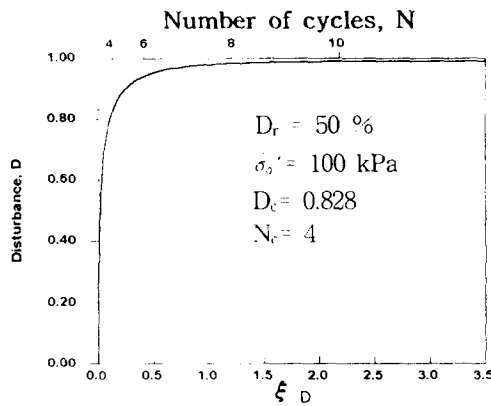
(a) 진동삼축시험결과 이용



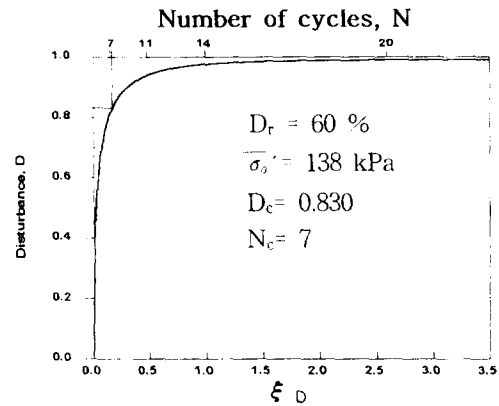
(b) 진동 실삼축시험결과 이용

그림 27  $\xi_D$ 에 따른 교란도함수의 곡률

그림 27을 통해 한계교란도,  $D_c$ 를 구하고 그 때의 재하횟수,  $N_c$ 를 산정하면 다음의 그림 28과 같다.



(a) 진동삼축시험결과 이용



(b) 진동 실삼축시험결과 이용

그림 28 교란도 함수상의 한계교란도

상대밀도를 40, 50, 60 % (유효구속압 100 kPa 고정)로 변화시킨 진동삼축시험결과와 유효구속압을 69, 138, 207 kPa (상대밀도 60 % 고정)로 변화시킨 진동 실삼축시험결과를 이용하여 초기 액상화 발생 재하 횟수를 산정한 내용들을 정리하면 다음의 표 11 및 표 12와 같다.

표 11 DSC법 해석결과 및 비교 (진동삼축시험)

Dr	교란도 함수	D <sub>c</sub>	ξ <sub>D</sub> (N <sub>c</sub> )	N <sub>c</sub>	N <sub>i</sub>
40%	0.99[1 - e <sup>(-3.935ξ<sub>D</sub><sup>0.74</sup>)</sup> ]	0.789	0.14	1	1
50%	0.99[1 - e <sup>(-4.444ξ<sub>D</sub><sup>0.81</sup>)</sup> ]	0.828	0.13	4	4
60%	0.99[1 - e <sup>(-4.483ξ<sub>D</sub><sup>0.81</sup>)</sup> ]	0.831	0.11	6	6

표 12 DSC법 해석결과 및 비교 (진동 실삼축시험)

초기유효구속압	교란도 함수	D <sub>c</sub>	ξ <sub>D</sub> (N <sub>c</sub> )	N <sub>c</sub>	N <sub>i</sub>
69 kPa	0.99[1 - e <sup>(-3.979ξ<sub>D</sub><sup>0.73</sup>)</sup> ]	0.823	0.20	5	5
138 kPa	0.99[1 - e <sup>(-4.200ξ<sub>D</sub><sup>0.79</sup>)</sup> ]	0.830	0.17	7	7
207 kPa	0.99[1 - e <sup>(-4.480ξ<sub>D</sub><sup>0.81</sup>)</sup> ]	0.850	0.11	9	8

표 11과 표 12에 나타난 내용을 보면, 교란도 함수를 이용한 해석을 통해 산정한 액상화 시기 N<sub>c</sub>와 실내시험을 통해 산정한 액상화 시기 N<sub>i</sub>가 거의 일치함을 보여주고 있다. 따라서, 교란도 함수를 이용한 해석이 진동재하시 지반의 거동변화에 대한 정확한 해석이 가능함을 입증하였다. 교란도 함수를 이용한 해석을 통해 영향인자인 상대밀도와 초기유효구속압에 대한 분석을 수행한 결과, 상대밀도 및 초기유효구속압은 포화사질토의 액상화발생에 있어 결정적인 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었으며 두 영향인자가 액상화 발생에 미치는 영향이 매우 유사함을 알 수 있었다.

표 11 및 표 12의 내용을 보면, 재료의 상대밀도 또는 초기유효구속압이 증가에 따라 액상화발생에 요구되는 반복하중의 재하횟수도 비례적으로 증가하였다. 또한, 상대밀도 또는 초기유효구속압이 증가함에 따라 액상화발생에 요구되는 한계교란도, D<sub>c</sub>의 값은 증가하였으나, 액상화 발생시점에서의 ξ<sub>D</sub>는 감소하였다. 이와 같은 결과는 상대밀도 또는 초기유효구속압이 증가함에 따라 재료가 보다 견고해지므로 액상화 발생에 있어 보다 많은 교란, 즉 보다 많은 외부하중(에너지)이 요구되며 또한 액상화에 도달한 시기에 발생한 소성변형률은 보다 작게 나타나는 것을 보여주고 있다. 위의 결과로 볼 때, 재료의 상대밀도가 포화사질토의 비배수 반복전단거동에 미치는 영향은 초기유효구속압이 이에 미치는 영향과 유사한 효과를 가지며 이에 대한 상관관계는 보다 많은 시험을 통해 규명이 가능하리라고 판단된다.

본 연구를 통해 제안된 유효응력개념의 액상화 평가방법은 재료의 역학적 거동특성을 고려했다는 점에서 큰 의미를 가질 뿐만 아니라 매우 합리적이고 신뢰성있는 결과를 보여주었다.

### 3.5 국내 실정에 적합한 액상화 평가 순서

3.1~3.4절의 내용을 토대로 본 연구에서 제안하고자 하는 국내 액상화 평가방법의 대략적인 흐름도를 작성하면 다음의 그림 29와 같다. 본 연구에서는 Seed와 Idriss, Iwasaki와 Tatsuoka, 그리고, Eurocode

와 같이 안전을 산정을 통한 액상화 평가수행이 매우 편리한 방법으로 판단되어 이 방법들을 선택했으며, 특히, 앞절에서 언급한 바와 같이 이 방법들을 국내 한계적용 지진규모 6.5를 고려한 평가방법으로 수정 보완함으로써 국내 여건에 부합되는 평가방법을 제안하고자 한다.

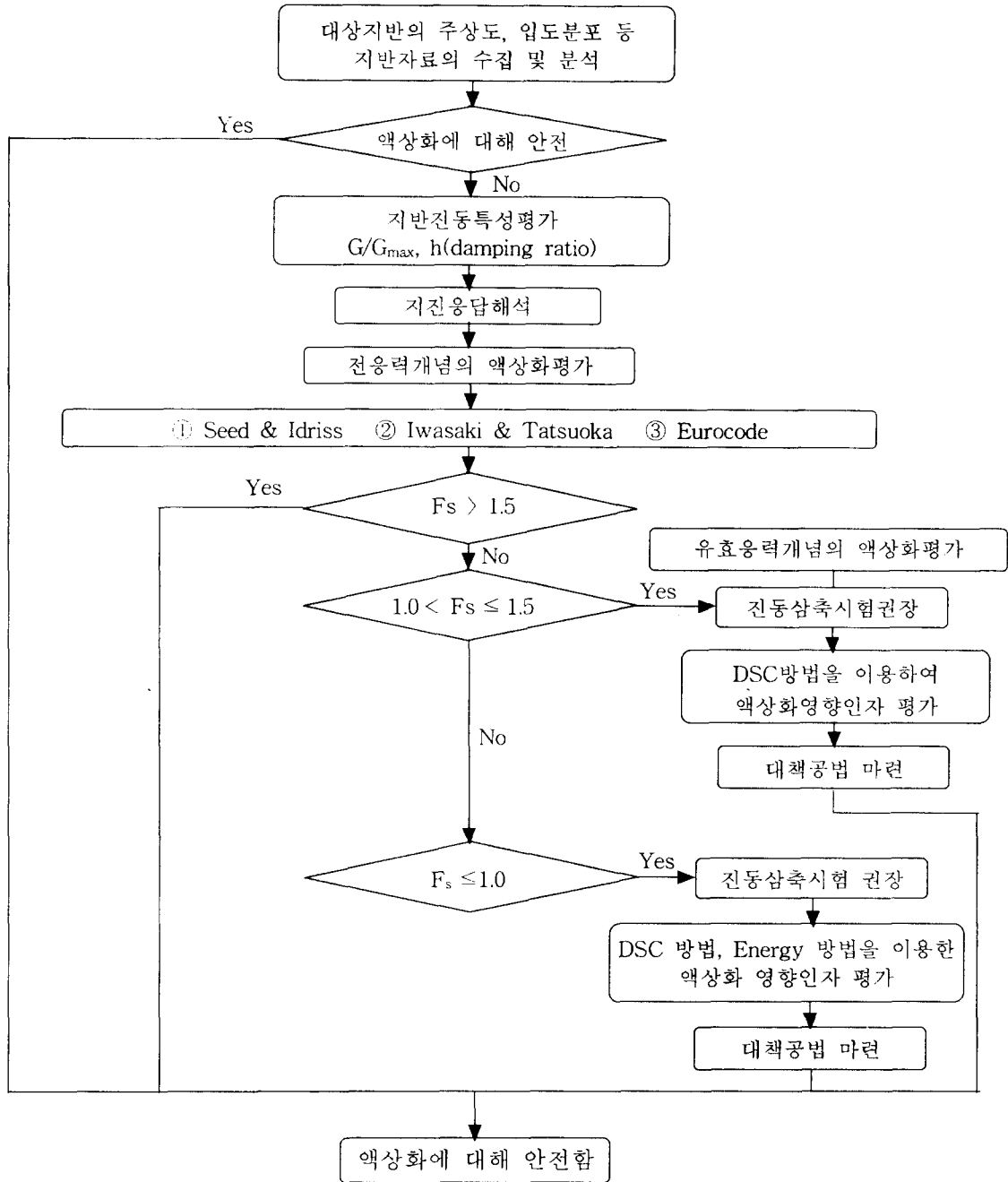


그림 29 국내 실정에 적합한 액상화 평가 흐름도

#### 4. 액상화 대책공법

액상화 현상은 느슨한 모래지반, 지하수위, 그리고 진동이라는 세가지 요소가 조합되어 발생하는 것으로 이에 대한 대책공법은 이 중 하나의 요소를 감소시킴으로써 액상화 발생을 억제하는 것이다. 따라서 액상화 방지대책은 ①흙의 성질 개량 ②지하수위의 저하(포화도의 저하) ③응력, 변형, 간극수압등의 조건을 개량하는 세 종류의 방법으로 크게 구분할 수 있다.

①의 흙의 성질을 개량하는 방법은 다시 몇 가지로 분류할 수 있다. 샌드컴팩션 등의 다짐공법에 의해 지반의 밀도를 높이는 방법, 심층혼합처리 또는 주입고화공법에 의해 지반을 고화시켜 강도를 높이는 방법, 그리고, 액상화의 가능성이 있는 흙 자체를 치환하여 입도를 개량하는 치환공법 등이 있다. 또한, ②의 방법은 느슨한 사질지반에서의 지하수위를 크게 저하시킴으로써 액상화를 방지하는 것으로 Deep Well이나 배수구 타설을 통해 지하수위 및 지반의 포화도를 저하시킨다. 그리고, ③의 방법에는 연직·수평방향의 저항하중을 증가시킴으로써 액상화 저항을 증가시키는 방법, 물을 배출시켜 간극수압을 억제·소산시키는 드레인공법, 그리고 지하연속벽 등에서 전단강도를 증가시키고 변형을 방지하여 간극수압상승의 원인이 되는 지반의 전단변형을 낮추는 공법 등이 있다. 대개의 경우, 액상화 대책공법은 공사전체의 유기적인 관계와 지역적 특성을 고려하여 위의 방법들을 조합하여 사용한다.

위의 내용들은 지반의 액상화 그 자체를 방지하고자 하는 방법이지만, 어느 정도의 지반 액상화 피해를 감수하면서 구조물 측면의 대책을 강구하는 경우도 있다. 즉, 지반의 액상화가 일어나도 구조물의 피해가 발생하지 않도록 하는 것이다. 비용효과를 고려할 때, 이러한 방법이 매우 경제적인 경우도 있다. 특히, 라이프라인의 내진설계와 같이 광범위한 구조물의 경우, 전지반에 대한 액상화 방지대책공법의 수행은 매우 비경제적인 처사라 할 수가 있다. 이러한 경우, 구조물 측면의 대책을 강구하는 것이 보다 효율적이다. 이러한 구조물 측면의 액상화 방지대책공법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째 방법으로 액상화에 견딜 수 있도록 구조물 자체를 안전하게 하는 방법으로 말뚝기초 등을 견고한 지반까지 도달시키는 방법, 기초 또는 안벽의 강도를 높이는 방법, 그리고 지중매설관 등의 떠오르는 양을 저감하는 방법 등이 있다. 그러나, 지진발생시 지반의 거동에 견딜 수 있는 구조물을 만드는 것은 매우 비현실적인 것이므로 기본적으로 지반의 거동을 최소화하는 것이 바람직하다. 따라서, 전체의 지반개량을 하는 방법보다는 작은 블록에 변위를 끊고 변위를 분산시키는 것이 효과적이다. 라이프라인과 같은 구조물에서는 액상화에 의한 지반의 움직임에 예민한 구조물로 설계하기 위해 관로의 이음매 등이 액상화로 발생하는 변위에 따를 수 있도록 하고 있다.

최근, 일본에서는 그림 30과 같은 측방유동현상에 대한 대책마련연구에 많은 노력을 기울이고 있는데 이는 새로운 파괴현상으로 아직까지 설계지침에도 반영되어있지 않다. 일본의 吉田은 “지금까지 연구하고 있는 액상화 현상은 수동적인 측면에서 지반의 지지력 상실에 대한 대처문제를 연구하여 지반의 침하 또는 부상에 대해 중점적으로 연구하였으나 액상화된 지반이 측방유동현상을 통해 직접적인 외력으로 구조물에 작용하는 것을 알았다. 따라서, 액상화 지반이 구조물에 대해 능동적으로 작용하는 현상에 대한 대책도 고려해야 한다.”라고 말하고 있다.

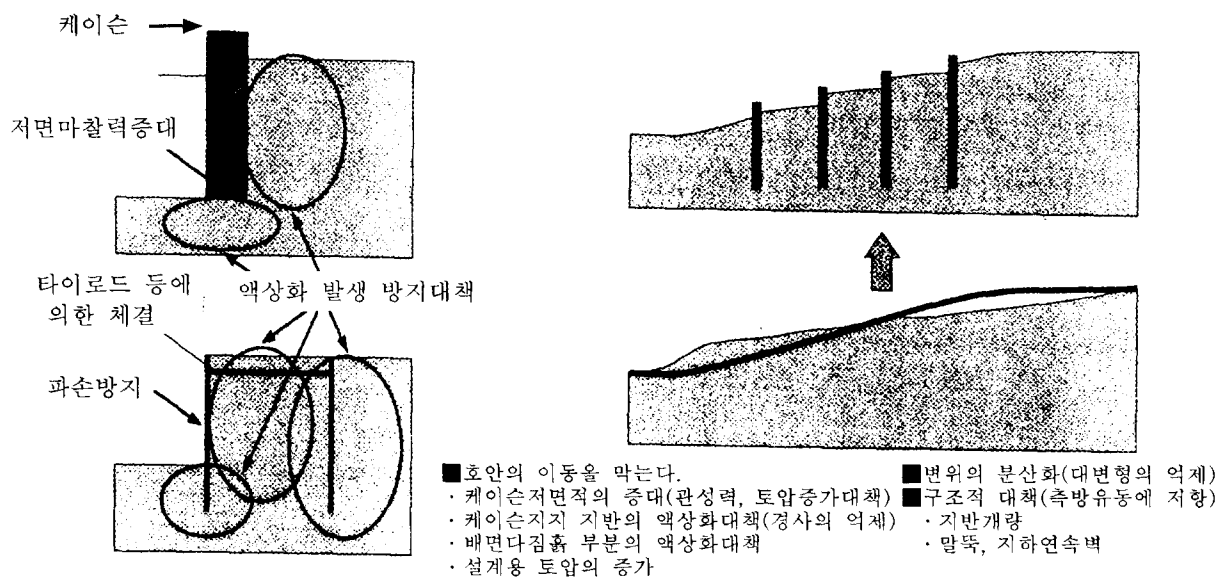


그림 30 측방유동현상



이와 같이 액상화 방지를 위해 여러 방법들이 강구되고 있으며 계속적으로 보다 효율적인 공법에 대한 연구가 수행되고 있다. 표 13은 한국지반공학회에서 제안하고 있는 액상화 대책공법으로 각 공법별 적용한계, 효과, 특징 등을 보여주고 있다.

표 13 액상화 대책공법 (한국지반공학회, 1997)

원 리	공 법	적용한계	효 과	특징 및 공해성	비 고
밀도 증가	바이브로 플로테이션	GL-20m정도	N치 15~20 정도까지	주로 수평진동, 비교적 적다	사용재료에 따라 배수성 기대
	모래다짐말뚝	GL-35m정도	N치 25~30 정도 40한계	주로 연직진동, 비교적 있다	위와같음
	폭 파	GL-20m까지 가능	상대밀도 70~85%정도까지	크다	시공관리 곤란
	동적압밀	GL-10m정도	-	충격	얕은층의 다짐
	바이브러램핑	GL-3m정도	-	연직진동, 비교적 적다	표층다짐, 병용이 많다
	진 압	20~30cm 정도 지하수위 이상	상대밀도 95%정도까지	비교적 적다	지하수위 이하는 지수대책
	무리 말뚝 생석회 말뚝	GL-10~12m GL-20m정도	- -	햄머의 진동, 소음 적다, 먼지공해	타입말뚝 생석회에 의한 흡수팽창
입도개량 또는 고결	치 환	GL-5m정도까지	쇄석치환 등에 의해 유효	적다	
	주입고화	보링깊이까지 가능	시공관리가 중요	부근구조물의 주입압의 영향과 유출	시멘트그라우팅등 시공관리가 어렵다
	표층혼합처리	GL-5m정도	배합량에 의함	적다	
	심층혼합처리	GL-30m정도	배합량에 의함	적다	
포화도 저하	웰포인트	5~6m정도 지하	투수성의 불확실성에 의해 다름	인근 지하수위 저하	장기간의 운영, 유지관리
	깊은 우물	15~20m정도 지하	위와 같음	위와같음	위와같음
간극수압 소산	그래블드레인	GL-20m정도	밀도증가에 대한 차선책	적다	기설구조물에도 적용
전단변형 억제	널 말뚝	GL-10m정도	구속의 정량화가 어렵다	널말뚝 타설에 의한 진동	지중연속벽, 지수벽으로 사용

또한, 구조물별 액상화 방지대책에 대해서도 언급하고 있는데 그 내용을 간략하게 서술하면 다음과 같다. 흙 구조물인 경우에는 다짐, 치환, 그리고 수위저하의 방법 등을 이용하고 건축물 기초의 경우, 지반의 밀도증대, 입도개량, 또는 주변의 수압차단 등을 이용하도록 추천하고 있다. 그리고, 항만구조물의 경우에는 밀도증대, 입도개량, 또는 발생간극수압을 소산시키거나 액상화 대상층을 기대하지 않고 설계하는 방법 등이 있으며 교량의 경우에는 지반반력계수를 감소시켜 설계하거나 말뚝 본수를 증가시키는 방법 등을 추천하고 있다.

#### 4.1 매립지반의 액상화 대책에 적합한 다짐공법

고베항 부근의 매립지반에서 발생한 액상화 피해를 계기로 일본에서는 이에 대한 대책마련에 많은 노력을 다하고 있는 실정이다. 국내의 경우, 1990년대 이후 인천국제공항, 아산만 국가공업단지, 광양만 공업단지, 부산신항만, 군·장항, 그리고 새만금항 등 연약한 연안지역의 지반을 개량하여 대규모 구조

물을 건설하고 있는 중이며 대부분의 경우, 매립을 이용하여 연약지반을 개량하고 있는 실정이다. 따라서, 개량지반위에 건설될 구조물의 중요도로 인해 내진설계는 필수적으로 수행되어야 하며 특히, 매립지반에서 발생가능한 액상화 방지에 많은 노력을 다해야 할 것으로 판단된다.

표 13에서 언급한 여러 액상화 대책공법 중 지표하 10m 내외의 매립지반에 대해서는 다짐공법의 이용이 가장 효율적일 것이라는 판단과 함께 다짐공법의 종류 및 특징에 대해서 살펴보면 다음과 같다. 샌드컴팩션파일공법(SCP)을 시작으로 한 다짐공법은 시공실적이 풍부하고 경제적 측면에서도 매우 만족할 뿐 만 아니라 개량효과도 매우 우수하여 개량한 지반이 매우 강한 점착력을 보유하게 된다. 그러나, 중추낙하식 다짐과 같이 충격 및 진동을 이용한 다짐공법은 경제적 효과가 크지만 주변 지반에 미치는 소음 및 진동영향 때문에 시공상 많은 문제점이 발생한다. 구조물 또는 주택 등과 근접해 있는 경우나 기설 구조물의 개량 등에 이용하기에는 많은 애로점이 있으므로 최근에는 소음 및 진동 등을 감소시키면서도 다짐효과가 우수한 공법을 개발하는데 많은 노력을 다하고 있다. 이러한 연구노력의 전형적인 예로 정적 다짐공법을 들 수 있다. 정적 다짐공법의 몇 가지 예를 간략하게 설명하면 다음과 같다. SAVE 컴포저공법은 진동에너지로 쓰지 않고 쇠석 등을 압입하여 모래지반의 액상화를 방지하는 공법이며 수퍼라임파일공법은 석탄의 흡수, 팽창반응을 이용하여 모래지반을 다지는 공법이다. 그리고, 아직 시공실적은 없지만 스트롱백공법과 같은 방법도 연구되고 있는데 이는 고무호스 모양의 자루 내부에 높은 수압을 재하함으로써 그 팽창력으로 연약한 주변지반을 정적으로 다지는 공법이다. 또한, 기존 공법의 효율을 높이기 위한 기술혁신도 활발하게 진행 중이다. 한 예로 TERRA시스템 및 SIMAR공법에서는 종래의 진동 봉다짐공법에 흡수기구를 이용함으로써 다짐시의 간극수압의 상승억제 및 진동에너지의 효율적 전달로 다짐효과를 높이고 있다. 표 14는 다짐공법의 종류 및 개요를 설명하고 있다.

표 14 주요 다짐공법과 그 개요

공법의 종류	공 법 의 개 요
샌드컴팩션파일 공법	모래를 진동시키면서 지반중에 주입하여 모래말뚝을 형성함으로써 주변지반을 다짐.
진동봉(로드컴팩션)공법	특수한 진동체가 선단에 장치된 로드를 바이브로햄머를 통해 진동을 재하하면서 지반을 다짐.
바이브로플로테이션공법	바이브로플로터라고 불리는 바이브레이터를 내장한 강관을 선단 노즐로부터 물의 사출과 함께 지중에 관입하고 관을 진동시키면서 천천히 관을 위로 올리며 진동에 의해서 바이브로플로터의 주위에 가능한 틈사이에 사리, 모래 등을 흘러 넣음.
중추낙하다짐공법	10~30t의 추를 지반에 낙하시켜 충격 및 진동을 통해 지반을 다짐.
바이브로탬퍼공법	강력한 진동기와 탬퍼의 조합시켜 지표지반을 다짐.
전압공법	전압을 통해 상대밀도를 상승시키는 것으로 시공사례는 극히 적음.
폭파공법	다이나마이트 등을 지중에서 폭파시켜 그 충격으로 토중의 상대밀도를 상승시킴. 다짐효과는 표층에 한정.
군향공법	말뚝을 향타하여 지반을 다짐. 말뚝의 전단변형억제효과를 겸비.

## 4.2 국내 적용사례

최근, 국내에서는 인천국제공항 부지의 매립지반에 대한 효과적인 다짐공법의 선택을 위해 동다짐, 유압식 다짐, 그리고 대형 진동햄머 다짐에 대한 시험시공을 수행한 바 있다. 다음의 표 15는 시험결과를 분석한 신공항건설공단의 「수도권신공항 다짐시험시공 용역 종합보고서 (1996. 3)」의 내용을 요약한 것이다.

표 15 공법별 시험시공 내용 (신공항건설공단, 인천국제공항 매립지반 시험시공 종합보고서, 1996. 3)

내용별	공법별	동 다짐	유압식 햄머다짐	대형 진동햄머 다짐
시공사례		· 싱가포르 CHANGI 공항 · 가장 널리 쓰임	· 영국 BSP 개발 · 국내 군장산업기지	· 일본 KANSAI 공항
개량심도		가장 깊음	중간	가장 얕음. 5m 내외
다짐에너지 증가시		개량효과 증가	개량효과 증가	개량효과의 증가 미비
다짐에너지 증가방법		추무게, 낙하고	햄머, 낙하고, 횡수	햄머, 탬퍼, 횡수
상부 교란층		1.3m	1.0m	0.7m
공사비		11,887 원/m <sup>2</sup>	11,483 원/m <sup>2</sup>	14,940 원/m <sup>2</sup>
장비조합		크레인 및 다짐추	크레인, 유압햄머, 유압발생장치	크레인, 전용햄머, 탬퍼, 발전기, 조작판넬
장비조달의 난이도		국내에서 널리 사용	Pile 항타용 개조 가능	수입조달 및 수리 곤란
타격의 정확도		가장 부정확	타격위치 선정가능	탬퍼진동으로 부정확
시공시 안전여부		매우 불안전	가장 안전	불안전(많은 작업원 필요)
지하수위 영향		영향정도가 가장 미비	중간	매우 민감
평점(100점 기준)		76 점	84 점	70 점

표 15의 내용을 종합해 보면, 인천국제공항 부지에는 유압식 햄머 다짐공법이 가장 적합한 것으로 나타났다. 또한, 보고서의 지반조사자료를 이용하여 깊이별 현장다짐도 평가를 수행한 결과, 다음의 그림 31과 같이 나타났다.

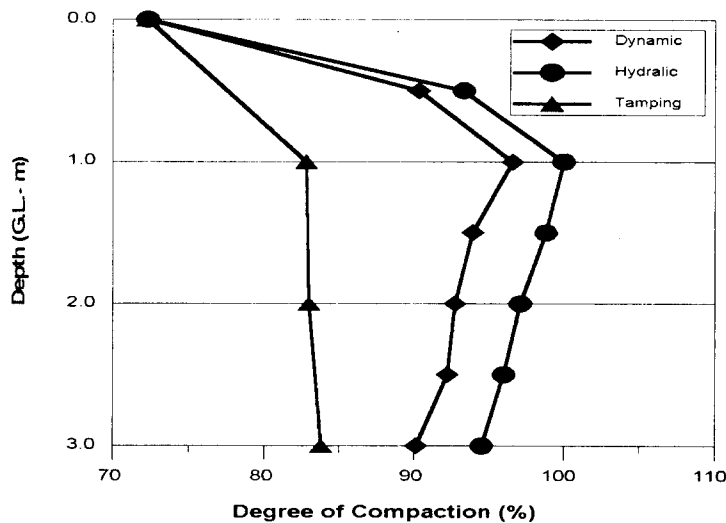


그림 31 다짐공법별 다짐효과 비교

그림 31의 다짐공법별 다짐효과를 비교해 보면, 유압식 다짐공법의 다짐효과가 가장 뛰어난 것으로 나타났다.

## 5. 연구목표 및 향후 연구계획

앞 절에서 소개한 액상화 평가방법과 대책공법들은 대부분 강진경험을 토대로 만들어진 것으로 중진도(M<6.5)규모의 지진이 주로 발생하는 국내의 현실에는 경제적, 공학적측면에서 적합하지 않을 것으로

판단된다. 그러므로 국내 액상화현상 평가 및 대책공법 개발시에는 지진진도가 높지않은 경우에 대한 합리적인 해석적방법 및 공법이 연구 개발되어야한다. 그러기 위해서 진동삼축시험 및 현장시험을 통해 국내 사질토의 지반동역학적 특성을 파악하고 이를 이용하여 기존의 액상화 평가방법을 수정 보완해야된다. 또한 유효응력개념의 액상화 평가법을 개발하여 국내 사질토의 액상화 현상의 지배인자를 규명하는 것이 필수적이다. 이를 통해 액상화 가능성이 높은 국내 연안지역 및 매립지반에 대한 대책공법 또한 국내 지역 특성에 적합하도록 개발되는 것이 중요하다고 사료된다.

이런 연구목표를 달성하기 위해 다음과 같은 향후 연구계획을 수립하여 활발한 연구가 진행 중이다.

- ① 진동삼축시험을 통한 국내 포화 사질토의 지반 동력학적 영향인자 연구
  - 상대밀도, 초기유효구속압, 진동수, 세립질함유량, 전단응력비 등
- ② 국내 지진특성에 부합되도록 기존의 액상화 평가법 수정.
- ③ 유효응력 개념의 액상화 평가법의 간편화 연구 : DSC법, 에너지법
- ④ 수정 액상화 평가법 및 유효응력 액상화 평가법을 이용하여 국내 연안지역의 액상화 평가도 작성.
- ⑤ 국내 지반특성과 액상화 특성에 적합한 대책공법 제안.

또한, 액상화 이후(post liquefaction)에 액상화를 경험한 사질토의 전단응력 회복현상에 대한 실험적, 해석적 규명을 위해 연구를 준비하고 있다.

## 참고문헌

1. Das, B. M., *Fundamentals of Soil Dynamics*, Elsevier Science Publishing Co., 1983, pp.353-392.
2. Kramer, S. L., *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, 1996, pp.348-422.
3. Seed, H. B. and Lee, K. L., "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, No.6, 1966, pp.105-134.
4. Port and Harbour Research Institute, *Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land*, A. A. Balkema, 1997.
5. Seed, H. B. and Idriss, I. M., "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.97, No.9, 1971, pp.1249-1273.
6. Park, I. J., "Disturbed State Modelling for Dynamic and Liquefaction Analysis", *Ph.D. Dissertation*, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, Univ. of Arizona, Tuscon, Arizona., 1997.
7. Norris, G., Siddharthan, R., Zafir, Z., and Madhu, R., "Liquefaction and Residual Strength of Sands from Drained Triaxial Tests", *Journal of the Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Division*, ASCE, Vol. 123, No. 3, 1997, pp.220-228.
8. Desai, C. S. and Wathugala, G. W., "A Hierarchical and Unified Models for Solids and Discontinuities (Joints/Interfaces)", Short Course Notes, *Workshop on Implementation of Constitutive Laws of Engineering Materials*, Dept. of Civil Engineering and Engineering Mechanics, University of Arizona, Tuscon, Arizona, 1987, pp. 9-10, 31-124.
9. 한국지반공학회, 진동 및 내진설계, 구미서관, 1997, pp.243-494.
10. 한국지진공학회, 내진설계기준 개발 연구(II), 한국지진공학회, 1997, pp.29-41.
11. 김경환, 액상화가능성 평가방법에 관한 연구, 연세대학교 토목공학과 석사학위논문, 1998.
12. 박인준, 김수일, 교란상태개념에 기초한 새로운 액상화 평가방법, 한국지진공학회 논문집, 제2권, 2호, 1998, pp.45-55.
13. 박인준, 김수일, "Disturbed State Constitutive Modeling for Fully Saturated Sand under Dynamic Load", 한국지반공학회 논문집, 제14권, 3호, 1998, pp.47-61.