

# 인천 국제공항 준설매립 지반 - 지반진동에 따른 액상화 연구사례(II)

김종국\*, 이강운\*\*, 김영웅\*\*, 채영수\*\*

## 1. 서론

준설토로 자연퇴적된 매립지에 토목구조물을 축조할 경우 지하수위가 높은상태에서 지반개량이 되어 있지 않으면 느슨한 지반 때문에 지반진동 발생시 지진규모가 작아도 액상화 현상으로 인해 큰피해가 발생할 수 있다. 특히 해안 연약지반이나 매립지반에 설치되는 구조물은 이같은 현상에 대해 예민하기 때문에 지진 및 동적특성을 고려하여 피해대책을 마련해야 한다. 이같은 차원에서 본 연구는 영종도 준설매립지반상에 신축되는 공항 진입도로 및 유도도로의 하부 노반재인 준설토에 대해 액상화 현상을 예측 평가하여 현장관리를 실시하였다.

공항 건설지역내 활주로 등의 노반재로 사용된 준설토는 입도분포상으로는 사용재료로 가능하나 #200체 통과량이 20%이내이며, 현위치 N치가 10이하로서 액상화발생 가능성이 예측되었다. 특히 본 지역은 해상 인접지역으로서 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부, 1999.3)기준에 따르더라도 이같은 가능성이 예측되었다. 따라서 동아시아 국제공항으로서 그 기능을 담당해야하는 인천국제공항 노반 포장층은 동적, 정적하중에 대해 안정성을 확보해야 한다. 이에 따라 시공 및 지진시 발생할 수 있는 동적하중으로부터 구조물 피해발생을 예측하기

위한 액상화 검토가 요구되었다. 액상화 평가는 시간과 경제성, 과업의 중요성, 구조물 내구연한등을 종합적으로 고려하여 평가절차에 의거 실시해야 하는데, 당 현장은 국내 각 현장에 일반적으로 시행되고 있는 간편예측을 우선적으로 실시하였으며, 이로부터 소요의 안정성이 미확보될 경우에 한해 상세예측을 실시하고자 하였다. 그리고, 현위치 시험값인 N-Value와 다짐밀도와의 상관관계를 비교검토함으로써 그 기준을 설정하였으며, 이를 위해 실내 진동삼축시험을 실시하였다. 이로부터 통과중량 백분율에 따른 경향을 파악하였으며, 간편법과 비교시험을 실시하였다.

## 2. 액상화 발생 기본 개념

액상화 평가는 진동발생 규모와 구조물의 중요성에 따라 제안자 별로 그 적용범위와 평가방법의 차이가 크므로 일정한 기준을 설정할 수 없으나, 기본적으로는 크게 전응력 개념과 유효응력 개념으로 구분된다. 전응력 개념은 지반 - 흙 구조물의 상호 작용 문제를 적용하는데는 어려움이 있기 때문에 정확한 액상화 평가는 곤란한 반면, 간편해석이 가능하므로 경험적 평가방법이 주로 이용된다. 반면에 유효응력 개념 평가방법은 과잉간극수압의 변화와 지반의 역학적 거동변화를 보다 정확하게 평가함으로써 액상화 현상을 정확히 규명할 수 있을 뿐만 아니라, 지반 - 흙 구조물에서 간극수압 변화양상을 매우 정확히

\*1 정회원, 한국건설품질시험원 지반기술팀 과장

\*\*2 정회원, (주)동성엔지니어링 지반공학부 상무이사

\*\*3 정회원, 인천국제공항공사 기술개발팀 건설시험소 소장

\*\*4 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수

파악할 수 있는 장점이 있는 반면, 많은 입력정수에 대한 상세한 연구와 해석상 주의를 요한다.

### 2.1 액상화 현상의 정의

자연지반에서 사질토의 경우, 외력이 작용하기 전에 토립자들은 상호접촉상태에 있으며 입자간의 상호접촉을 통해 외력이 전달된다. 사질토 지반은 이같은 원리로 지표에 있는 구조물에 저항하는 전단력을 제공한다. 지진에 의해 발생된 전단력은 사질토체에 변형을 일으키게 됨에 따라 본래 수직방향으로 지지하던 사질토는 포화사질토의 단위중량을 가지는 액체와 같이 거동하게 된다. 액상화가 발생한 후, 진동하중의 재하가 가치게 되면, 토립자는 재구성과 함께 간극수압이 소산됨에 따라 토체는 다시 안정화(post-liquefaction)를 이루게 된다. 이때 발생하는 체적변화는 소산된 간극수의 체적과 같다. 이와 같은 토체의 변화과정을 도시하면 그림 1과 같다. 또한, 토체내의 액상화 발생과정을 간극비와 유효응력간의 관계로 설명하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 자유배수가 허용된 상태에서 진동하중을 재하하게 되면 초기상태의 응력과 간극비 상태를 나타내는 압축곡선상의 점 A는 간극수 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

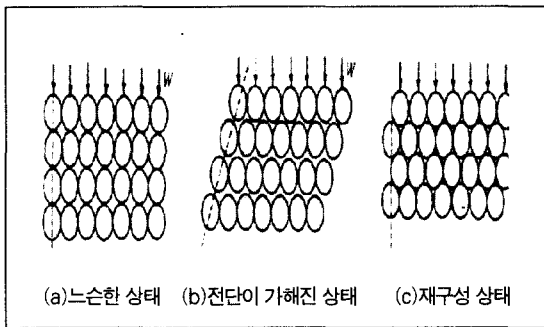


그림 1. 액상화의 발생과정에 따른 사질토 입자배열변화

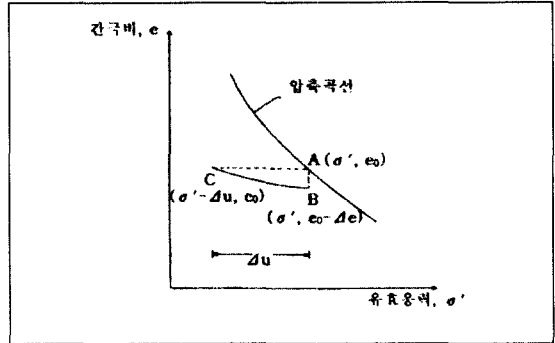


그림 2. 반복하중에 의한 간극수압 발생개념도

발생하게되는 과잉간극수압( $\Delta u$ )이 초기응력과 같아짐에 따라 흙의 유효응력이 0이 된 상태에서 발생하는 것이라고 정의 할 수 있다.

### 2.2 액상화 평가방법

일반적으로 사질토지반에서 액상화 평가방법으로 널리 사용하고 있는 간편 예측법은 표준관입시험을 이용한 간편예측법(Seed & Idriss, 1971, Iwasaki & Tatsuoka)과 표준관입시험과 입도분포를 이용한 간편예측법(Ishihara, 1976)이 있다. 이것은 현위치 조사시 일반적으로 널리 수행하고있는 표준관입시험의 간편성과 신속성, 그리고 실내 물리시험인 입도시험 자료를 손쉽게 얻을 수 있기 때문에 가능하였다. 그러나 현장조건에 따라 시험방법이 달라지므로 연약지반이 출현하는 해상이나 하상지역에서 주로 사용하고, 신뢰성이 비교적 높은 콘관입시험과 DMT를 이용한 방법이 최근 널리 적용되고 있다. 즉 연약지반에서는 표준관입시험보다 높은 정밀도와 연속적인 결과를 얻을 수 있는 현장시험으로 콘관입시험을 액상화예측에 사용하고 있다. 그리고 DMT를 이용한 방법도 그 적용성이 높아지고 있다. 따라서 이를 이용하여 예측방법을 다양화하는 것도 지반분야에 기여할 것으로 판단되는 바 기존방법과 비교 평가하고자 한다. 한편 현재 사용되고 있는 간편 액상화 평가방법을 보면 다음과 같다.

- ① 표준관입시험을 이용한 간편예측  
(Seed & Idriss 1971, Iwasaki & Tatsuoka)
- ② 콘관입시험을 이용한 간편예측  
(Olsen et al. 1988, 1995, 1996)
- ③ DMT를 이용한 액상화 평가방법
- ④ 표준관입시험과 입도분포를 이용한 간편예측  
(Ishihara, 1976)

1) 표준관입시험을 이용한 간편예측  
(Seed & Idriss, 1971)

표준관입시험을 이용한 간편예측방법은 현장 시추 조사시 병행하여 실시하는 표준관입시험을 통해 지진발생 전단응력비와 지반저항 응력비의 관계로부터 액상화발생을 판단하는 예측방법이다. 즉 액상화에 대한 안전율은 지진으로 인해 지반에 전달되는 전단 응력을 유효상재압으로 정규화시킨 지진 전단응력비 ( $\tau_v / \sigma'_{vo}$ )와 지반이 발휘할 수 있는 최대전단응력을 유효상재압으로 정규화시킨 액상화 저항응력비( $\tau_c / \sigma'_{vo}$ )의 비로부터 산출되는데, 이때 지반저항 응력비는 환산 N치와 지진규모의 관계로부터 산정할 수 있으며, Seed 등이 제안한 CRR 관계도를 보면 다음 그림 3 과 같다.

2) 콘관입시험 결과를 이용한 간편 예측  
(Olsen et al, 1998)

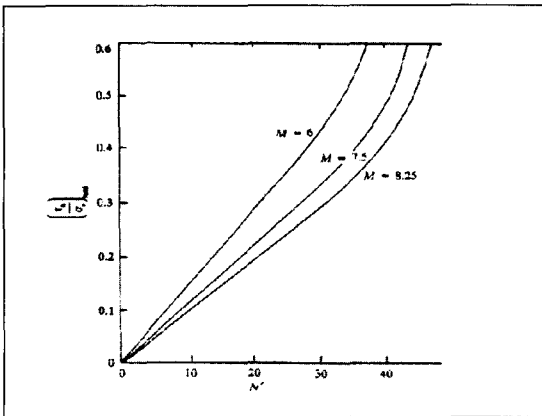


그림 3. 보정(N<sub>c</sub>/σ'<sub>vo</sub>)값과 액상화 저항력비

콘관입시험은 표준관입시험보다는 높은 정밀도와 연속적인 결과를 얻을 수 있기 때문에 최근 많이 사용되고 있는 현장시험법이다. 따라서, 표준관입시험 결과인 N치를 이용하여 지반의 액상화 저항응력비를 계산하는 과정을 콘관입시험으로 대체하여 사용한다.

그림 4는 콘관입시험에서 얻어진 콘관입 저항력을 유효상재압으로 정규화시킨 액상화 저항응력비를 도출하는 그림이다. 콘관입시험의 콘선단저항치( $q_{cl}$ )는 액상화를 예측하는 데 이용되고 있으며, Robertson & Campanella(1985), Shibata & Teparaksa (1988), Robertson & Wride(1998)등은 이에 대해 제안하였다. 본 연구는 Robertson & Wride(1998)의 제안방법이 다소 많은 변수로 인해 계산이 복잡한 점을 감안해 Shibata & Teparaksa(1988)가 제안한 방법을 이용하여 SPT와 CPTU시험에 근거해서 액상화 발생 가능성을 평가하였으며, CPTU의 시험으로부터 선단저항( $q_{cl}$ )은 식 (1)에 따라 보정한다.

$$q_{cl} = \left( \frac{0.17}{0.17 + \sigma'_{vo}} \right) \quad (1)$$

CPTU자료로부터 액상화 저항 강도비 (CRR =  $\tau_c / \sigma'_{vo}$ )는 식(2)와 같이 산정한다.

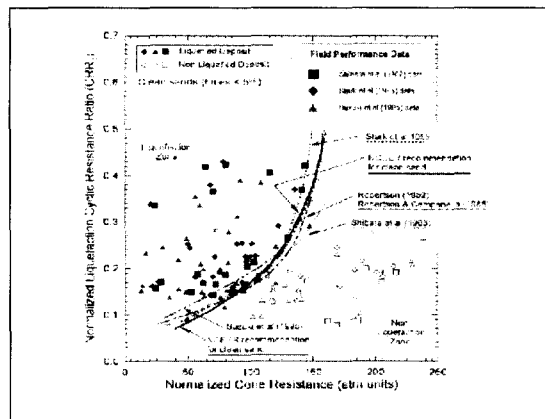


그림 4. 콘저항력에 따른 액상화 예측

$$CRR = 0.1 + 0.2 \left[ \frac{(q_{cl} / C_2) - 5.0}{25 - (q_{cl} / C_2)} \right] \quad (2)$$

여기서,  $C_2$ 는 세립분 함유량을 고려한 것으로 평균 입경  $D_{50}$ 에 대한 보정계수로서, 모래입경  $D_{50} \geq 0.25\text{mm}$ 인 경우는  $C_2 = 1$ ,  $D_{50} < 0.25\text{mm}$  작은 경우는  $C_2 = D_{50}/0.25\text{mm}$ 로 구분하였다.

대상지반의 지진시 발생하는 반복응력비는 식 (3)과 같이 구한다.

$$CRS = 0.1(M-1) \cdot \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} (1-0.015 \cdot z) \quad (3)$$

여기서,  $\alpha_{max}$ 는 최대 지반 가속도,  $g$ 는 중력가속도,  $\gamma_d$ 는 응력감쇠계수이다. 즉, 지진시 전단응력비와 지반의 액상화 저항강도비를 비교하여 액상화에 대한 안전율을 구할 수 있다.

### 3) DMT를 이용한 액상화 평가방법

Marchetti (1982)는 큰 동적하중을 받을 때 액상화하기 쉬운 토질은 낮은 수평응력 상태에서 매우 적은 응력이력을 갖으며, 전형적으로 포화된 느슨한 모래 및 실트에서 Dilatometer(DMT)로 부터 얻어진 수평응력지수( $K_D$ )가 상대밀도( $D_r$ ), 정지토압계수( $K_0$ ), 응력이력등의 요소들에 의하여 영향받는 것을 제안하였다. 이러한 토층의 액상화 발생 가능성을 추정하기 위하여, 그는 액상화 저항응력비( $CRR = \tau / \sigma'_{vo}$ )

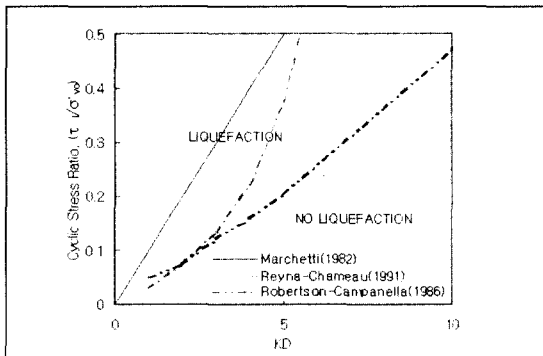


그림 5.  $\tau / \sigma'_{vo}$  추정도표(R&C, 1991)

와 수평응력지수( $K_D$ )의 관계성을 제안하였다. Robertson & Campanella(1986)는 현장시험과 검교정 결과를 근거로 정규압밀 모래지반 상태에서의 관계도를 제시하였으며, 이를 Reyna & Chameau(1991)가 추가하여 그림 5와 같이 제시하였다. 그림 5를 이용하여 대상지반의 액상화 저항강도비(CRR)을 추정할 수 있으며, 지진개념으로 유도된 전단응력비( $\tau / \sigma'_{vo}$ )는 식(4)와 같다.

$$CRS = 0.65 \cdot \frac{\alpha_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \cdot \gamma_d \quad (4)$$

DMT를 이용한 액상화 평가에서 Robertson & Campanella의 추천안은 낮은 반복응력비에서는 적합한 반면, Marchetti가 추천한 안은 높은 반복응력비에서 적합함을 보여주고 있다(그림 5 참조).

### 4) 표준관입시험과 입도분포를 이용한 간편예측 (Ishihara, 1976)

이 방법은 입도분포와 표준관입시험 결과를 이용해 액상화 발생 여부를 판별하며, 먼저 입도분포 기준곡선인 그림 6을 참조하여 대상지반의 입도분포가 액상화가 발생하기 쉬운지 아닌지를 판단한다. 입도분포가 A 또는  $B_c$ 의 범위에 속할 경우 등가 N치는 식 (5)을 이용하여 계산하며,  $B_r$ 의 범위에 속할 경우 등가 N치는 표준관입시험의 결과인 N치를 그대로 사용한다.

$$(N)_{0.66} = \frac{N-1.828(\sigma'_v - 0.66)}{0.339(\sigma'_v - 0.66) + 1} \quad (5)$$

여기서  $(N)_{0.66}$  = 등가 N치이며, 대상지반의 등가 가속도는 식(6)과 같다.

$$\alpha_{eq} = 0.7 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} g \quad (6)$$

여기에서  $\alpha_{eq}$  = 대상지반의 등가가속도,  $\tau_{max}$  = 최대 전단응력이다.

계산된 등가 N치와 등가가속도를 이용하여 그림

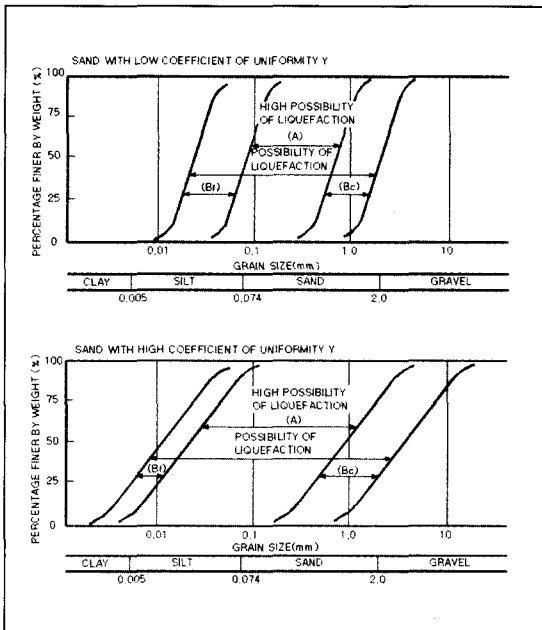


그림 6. 입도분포에 따른 액상화

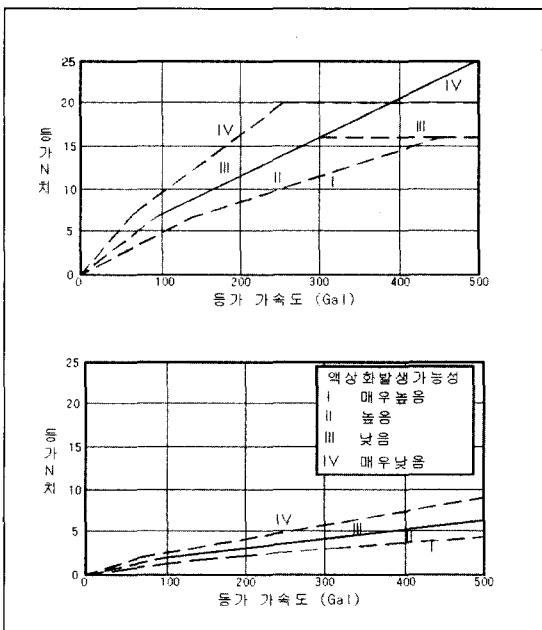


그림 7. 액상화판정도표

7에서 대상지반의 액상화 발생 등급 (I~IV)을 결정할 수 있다.

### 3. 지반조건

연구대상인 공항 유도로지역의 지층상태는 지표로부터 약 5.0m내외가 준설패립층으로 구성되어 있으며, 그하부는 충적층인 점성토와 실트층이 교호하여 형성된 층으로서 N치는 10이하인 것으로 나타났다. 한편 지반개량을 위해 PBD(Plastic Board Drain)를 1.8m×1.8m간격으로 시공한 지역에서 실시된 현위치 시험종목은 SPT, CPTU, DMT등이며, 대표 시험결과는 그림 8과 같다.

본 현장 지하수위는 1.3m이내에 존재하며, 준설토의 입도분포는 #200체 통과량이 5%~25%정도이고, 중간층은 실트질모래층, 상부점토층은 CL, 하부 점성토층은 CH인 것으로 나타났다.

### 4. 실험

#### 4.1 실내 진동삼축시험

인천국제공항지역 여객터미널, 관제탑, 교통센터 및 방조제 활주로 등 주요 시설물은 내진설계기준에 따라 지진규모 5.5(MM진도 7)에 견딜 수 있도록 설계되었다. 특히 방조제는 지진하중보다 큰 수압 및 파력등을 고려하여 설계되었으며 규모 7.0이상의 지진에도 견딜 수 있도록 축조되었다. 본 연구는 공항 지역에 설계된 지진규모를 고려하여 최대지진규모를 6.5로 정하고 Seed의 이론을 토대로 액상화 발생 진동재하횟수를 10회로 선정하여 실험을 실시하였으며, 준설패립지반 액상화 저항강도비를 파악하기 위해 상대밀도( $D_r$ ) 및 세립분 함유량에 따른 시험결과를 분석하였다. 또한 그 결과를 통해 표준관입시험(N치)의 변화가 액상화 저항강도비에 미치는 영향을 살펴보았다. 이에 공항부지로 조성된 노체, 노상 지반 준설토로 선정된 대표시료의 물리시험결과는 다음 표 1과 같다.

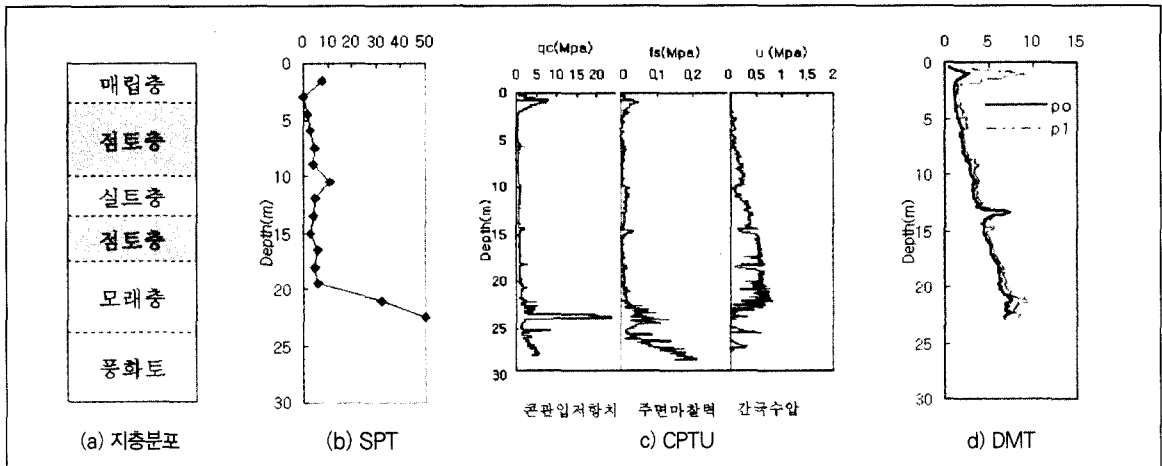


그림 8. 현장시험결과

표 1. 대표적인 준설토의 기본물성시험결과

노체	2.67	1.647	1.348	0.17	6.2	23.2	SP, SP-SM
노상	2.66	1.844	1.518	0.40	5.9	6.2	

진동삼축시험시 준설매립토에 함유된 세립분이 5~20%내외인 점을 고려해 세립함유량을 0, 10, 20, 30, 40%로 각각 변화시켜 실시하였으며, 이때 시료의 비중은 2.66~2.67,  $D_{50}$ (mm)은 0.17~0.26,  $C_u$ 는 2.6~7.3으로 나타났으며, 시료 재성형시 상대밀도( $D_r$ )는 햄머다짐전의 현장 비다짐 상태의 밀도를 고려해 50%로 정하여 시험을 수행하였다.

이때 준설토층 두께와 지하수위를 고려하여 초기 유효 구속압은 100kPa로 가정하였으며, 하중제어는 응력하중 방식으로서 정현파인 진동수 1Hz, 응력비(stress ratio= $\sigma_v/2\sigma_h$ )는 0.2, 0.25, 0.3 단계별로 재하하였으며, 필요에 따라 0.5까지 재하하고, 시료조건은 포화 비배수 조건으로 시료의 간극수압, 변위, 응력-변형률관계를 조사하였다.

그림 9는 노체, 노상지반 재료에 대한 시험결과 예로, 반복전단 응력비가 0.25이고, 유효구속 압력( $\sigma_3'$ )은 100kPa인 경우의 결과를 나타낸 것이다. 비배수 시료내 반복하중으로 유발된 과잉간극 수압

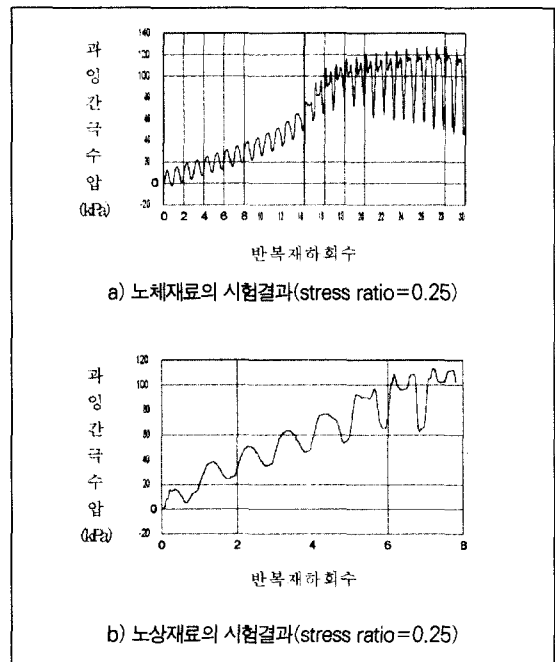


그림 9. 준설매립토의 진동삼축시험결과

( $\Delta u$ )의 크기가 초기유효구속압( $\sigma'_3$ )의 크기와 같아지면 시료내부는 전단에 대한 저항력을 상실하는 초기 액상화 상태로 간주하게 된다. 즉, 과잉간극수압이 초기 유효구속압과 같아지는 시점을 액상화가 발생한 것으로 간주하였다. 이러한 결과를 바탕으로 나머지 진동삼축시험 결과와 함께 작성한 전단저항응력비와 액상화 발생 재하횟수( $N_c$ )와의 관계를 토대로 액상화 발생 가능성여부를 평가하였다.

#### 4.2 현위치 시험

본 연구를 위해 현장에서 수행된 현위치 시험방법은 그림 10과 같은 관입장치를 이용하여 실시하였으며, 효율적인 작업을 수행하고자 시험시 발생오차 요인을 최소화할 수 있도록 그림 11과 같은 보조장치를 활용하였다. 즉 관입 보조시스템으로 관입장치의 자동클램프의 일부 부품만 교체함으로써 다양한 시험을 수행할 수 있도록 실시하였다.

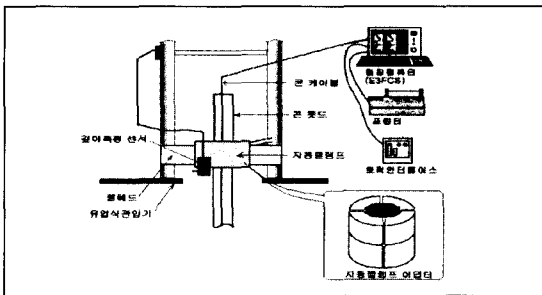
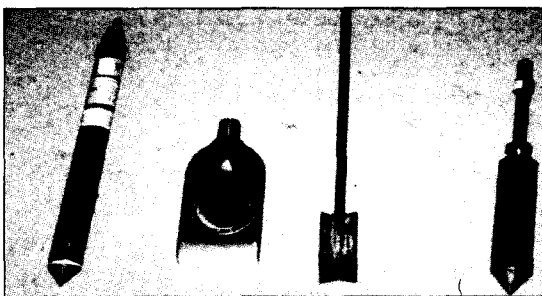


그림 10. 유압식 관입장치의 자동클램프장치



a) 콘(CPT) b) 브레이드(DMT) c) 베인 d) 환경콘(GM)

그림 11. 관입 보조장치 종류 모양

이중 본 연구에 직접활용된 피에조콘 관입시험과 Dilatometer(DMT)를 중심으로 설명하면 다음과 같다.

#### 4.2.1 콘관입시험(CPT<sub>u</sub>)

##### 1) 시험 장비 및 개요

콘관입시험은 기존의 더치 콘(dutch cone)을 개량한 것으로, 1960년 이후 자동차 계측에 의한 선단 저항과 주면저항을 동시에 측정할 수 있는 전기식 콘이 개발 되었으며, 간극수압 및 간극수압소산을 측정할 수 있도록 1970년 초에 개발되었다. 이후 10~30ton의 유압식 관입장치에 의한 일련의 연결로트에 전기식 콘(3성분 또는 4성분)을 장착하여 일정한 관입속도로 지중에 압입하여 소정의 심도까지 연속적으로 관입저항 및 슬리브의 마찰력, 관입간극수압을 측정하는 장비가 개발되어 현재와 같은 장비가 사용되고 있다. 피에조콘관입시험은 심도에 따라 신속하게, 연속적으로 지반의 공학적 특성을 파악할 수 있어 설계에 직접 이용할 수 있으며, 관입속도, 콘의 모양 및 크기 등에 따라 달라질 수 있다. 이러한 콘관입시험결과에 영향을 주는 요소를 없애기 위해 관입속도를  $2 \pm 0.5 \text{ cm/sec}$ , 선단각  $60^\circ$ , 선단면적  $10 \text{ cm}^2$ , 주면면적  $150 \text{ cm}^2$ 을 표준화하고 있으며 시험결과는 응력이력, 압축성, 입자크기등의 지반조건에 따라 다르게 나타나는데, 이에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다.

##### 2) 콘 관입시험의 특성

콘관입시험은 흙의 여러가지 성질을 동시에 측정할 수 있으며, 간극수압 소산시험에 의한 현장 압밀계수를 산정할 수 있는 등의 현장조사 장비로 가장 유용하게 사용되는 장비로써, 콘관입시험 수행시 획득할 수 있는 토질정수 및 특성은 다음과 같으며, 이중 ①, ②, ③ 항은 타 조사시험으로는 획득하기 어려운 피에조콘만의 특성이다. ① 연속적인 지층주상도 및 비배수전단강도의 산정, ② 수평방향 압밀특성 파악, ③ 점성토층내에 분포하는 샌드심(sand

seam)층 파악 가능, ④ 지반개량 전·후의 강도 기준치 설정, ⑤ 응력경로 및 과압밀비 측정, ⑥ 간극수압 측정, ⑦ 연관 토질정수의 추정 등이 있다.

콘관입시험 결과에 의한 지층구분, 흙의 분류, 압밀도 및 응력이력(과압밀비), 지반의 수평응력, 변형 특성, 비배수 전단강도, 액상화평가 등의 다양한 시험이 이루어지고 있다.

3) 시험결과의 이용 및 해석

① 흙의 분류

전기식 콘관입시험 데이터를 이용해서 수행할 수 있는 가장 유용한 분석을 Douglas & Olsen(1981)이 제안하였으나, 흙분류 도표를 이용하는데 있어 까다롭게 만들어졌다. 이러한 이유로 Rodertson & Campanella(1983)은 Douglas 도표를 보다 단순화하여 마찰률을 이용한 식 ( $R_f = (f_s/q_t) \times 100$ )에 의해 흙분류를 하였다. 여기서  $q_t$ 는 다공질 필터가 원추 바로 뒷면에 위치한 전기식콘의 경우로 원추 저면에

서의 부등면적 효과를 고려하여 수정한 콘 관입저항치로 보정식  $q_t = q_c + (1-a)u_{bt}$ 를 이용하였다. 또한 Rodertson & Campanella(1988)는 간극수압을 이용한 방법으로 간극수압계수를 이용한 흙의 분류를 제안하였으며, 북미 여러 지역에서의 시험결과를 이용  $q_t - R_f$  또는  $q_t - B_q$ 를 각각 이용한 흙의 분류도표를 제안하였다. 한편 이선재(1997)가 피에조콘시험 결과를 토대로 국내지반에 맞는 흙의 분류를 제안한 바 있으며, 점차 이에 대한 많은 관심과 연구가 진행 중에 있는 실정이다.

② 비배수 전단강도

콘지력결과를 이용한 점성토의 비배수전단강도를 산정하는 방법에는 일반적으로 이론적인 방법과 경험적인 방법이 있다. 특히 점성토의 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 경험적인 방법이 쓰이게 된다. 다양한 지반에 대해 실시한 콘관입시험의 결과와 삼축압축시험, 현장배인시험등의 실내 및 현장시험

표 2. 피에조콘관입시험을 이용한 비배수 전단강도 추정

Vesic(1972)	$S_u = \frac{u_{bt} - u_0}{N_{su}}$	공동팽창이론으로부터 콘관입시험에서 측정된 과잉간극수압을 이용	$q_c$ : 콘관입 저항치 $q_t$ : 수정콘관입 저항치 $\sigma_v$ : 전응력 $u_{bt}$ : 간극수압 $N_{su}, N_k, N_{su}, N_{kt}$ : 콘계수
Schmertmann (1978)	$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{sk}}$	말뚝의 관입이 콘의 관입과 유사하다는 가정하에서 전체선단 저항치를 이용	
Campanella (1982)	$S_u = \frac{q_t - u_{bt}}{N_{su}}$	콘관입저항치에서 간극수압을 뺀 유효선단저항치 이용	
Lunne et al. (1985)	$S_u = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}}$	간극수압 측정 필터가 원추 뒷면에 위치, $q_c$ 대신에 $q_t$ 를 이용 부등단면비를 고려	

표 3. 콘관입시험으로부터 시간계수를 추정하는 방법비교

Torstensson (1975)	$C_h = \frac{R^2 T_{50}}{t_{50}}$	원통형 공동이나 구형 공동에 해당하는 1차원 해, 등방, 탄성-완전 소성체, 유한 차분 압밀해석	$R$ : 등가원추 반지름 $T$ : 시간계수 $t$ : 50% 압밀도의 소산시간 $lr$ : 강성지수 ( $G/S_v = E_v/3S_v$ )
Baligh & Levadoux (1980)	$C_h = \frac{R^2 T}{t}$	유선으로부터 서로 다른 요소의 변형률 경로를 추정, 등방, 탄성-완전 소성체, 2차원, Terzaghi-Rendulic 압밀해석.	
Levadoux & Baligh (1986)			
Houlsby & Teh (1991)	$C_h = \frac{R^2 T}{t \sqrt{lr}}$	유한요소해석을 고려, 2차원 Terzaghi-Rendulic 압밀해석, 강성지수의 영향 고려	



을 통해 구한 참고강도와의 상관관계를 비교하여 콘 계수를 얻게된다. 표 2는 여러 제안자의 제안사항을 정리한 것으로 본 고에서는 이들 제안식을 이용하여 콘 계수를 산정하였다.

### ③ 간극수압 소산시험

콘에 의한 간극수압 소산시험은 샌드심층 투수성을 파악할 수 있을 뿐만 아니라 연약지반의 압밀계수 추정에 유용하게 사용할 수 있으며, 콘관입시험시 콘의 관입을 멈추었을 때 시간에 따른 과잉간극수압의 변화로부터 간극수압 소산곡선을 통해 각 압밀도에 해당하는 시간을 구할 수 있게 된다.

표 3은 Torstensson(1975), Baligh & Levadoux(1980, 1986), 그리고 Houlsby & Teh (1991) 등이 콘관입시험으로부터 시간계수를 추정하는 방법을 비교하여 나타낸 것이다.

### ④ 과압밀비

콘관입시험 결과로부터 OCR을 산정하기 위해 Mayne & Bachus(1988)은 공동팽창이론과 한계상태이론을 사용하였으며, Chang(1990)은 OCR이 8이하인 지반에 대하여 수행한 실험을 통해 간극수압계수(Bq)와 OCR과의 관계를 식  $[OCR = 2.9 Bq / (3.7 Bq - 1)]$ 과 같이 제안하였다.

## 4. 2. 2 Dilatometer Test(DMT)

### 1) 시험장비 및 개요

딜라토미터는 1970년 이탈리아의 Silvano Marchetti 교수에 의하여 고안된 장비로 두께 14mm, 폭 95mm의 강판에 지름 6cm인 스틸 멤브레인이 한쪽면에 부착된 브레이드(blade)를 사용하고 있으며, 관입시는 정적콘관입장치를 이용하여 자갈층 및 굳은지반(N=40이상)을 제외한 점토 또는 모래등 거의 모든 연약지반에서 쉽게 활용할 수 있으며 특히 20cm 깊이 간격으로 연속적으로 시험이 가능하며 시험방법이 간편하여 토질정수를 추정하는데 매우 효과적이다.

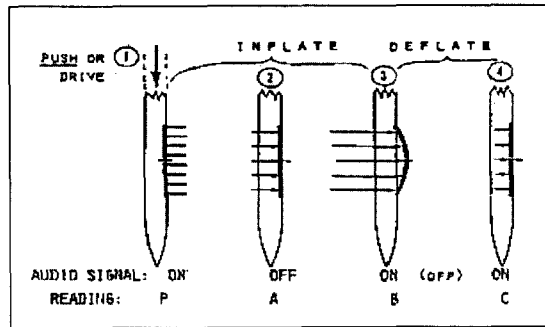


그림 12. DMT 멤브레인에 의한 측정

그림 12와 같이 브레이드는 케이블을 통해 압축공기를 주입하면 스틸멤브레인이 팽창되고, 그 압력으로 인하여 지반내에 변형을 발생시켜 A, B, C 값을 얻을 수 있으며 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$P_0 = 1.05(A - Z_M + \Delta A) - 0.05(B - Z_M - \Delta B) \quad (7)$$

$$P_1 = B - Z_M - \Delta B \quad (8)$$

$$P_2 = C - Z_M + \Delta A \quad (9)$$

여기서,

A : 관입에 의하여 수축된 멤브레인을 0.05mm 팽창시킬 때의 압력

B : 멤브레인 중심부가 1.1mm 팽창했을 때의 압력

$\Delta A$  : 멤브레인의 강성을 극복하기 위한 대기중에서 A값에 대한 보정

$\Delta B$  : 멤브레인의 강성을 극복하기 위한 대기중에서 B값에 대한 보정

$Z_M$  : 대기압으로 배출할 때의 압력값

이를 토대로 Dilatometer Test 지수  $E_D = 34.7 (P_1 - P_0)$ , 재료지수  $I_D = (P_1 - P_0) / (P_0 - u_0)$ , 수평응력지수  $K_D = (P_0 - u_0) / \sigma'_{vo}$ , 간극수압지수  $U_D = (P_2 - P_0) / (P_0 - u_0)$  등을 구하여 대상지반의 특성을 파악하는데 활용할 수 있다.

### 2) Dilatometer의 특성

Dilatometer 시험은 콘관입시험과 유사하며, 콘

대신 브레이드를 이용 가스압에 의한 팽창과 수축에 의한 압력에 의한 변형에 의해  $E_b$ ,  $I_b$ ,  $K_b$ ,  $U_b$  등의 상호관계를 파악하는 것이 특징이다. Marchetti(1980)는 주로 이태리 지반에서 얻어진 결과를 이용하여 흙의 분류, 비배수전단강도, 과압밀비, 정지토압계수, 단위중량, 전단계수, 압밀계수 등의 다양한 물성을 추정할 수 있는 방법을 제안하였다. 다만 Dilatometer 시험에 의해 얻어지는 자료는 요소들에 의해 영향을 받기 때문에 지반상태, 현장시험시 조건에 의해 얻어지는 결과에 따라 영향을 받는다. 이에 따라 기존에 제안한 상호관계들은 그 지역 지반특성만을 반영한 결과이므로 이들을 이용하고자 할 때는 대상지반의 적용성을 검토하여야 할 필요가 있다.

3) 시험결과의 이용 및 해석

① 흙의 분류

Marchetti(1980)는 재료지수 ( $I_b$ ) 값을 사용하여 흙의 분류 및 흙의 분류와 단위중량을 결정하기 위하여  $I_b$  값과  $E_b$  값을 이용하여 상관관계도를 제안하였다. Marchetti & Crapps(1981)는 Dilatometer 지수( $E_b$ )를 활용하여 흙의 단위중량을 추정하였다. 이는 점토지반보다 모래지반에 가까울수록 주변지반을 팽창시키기 위한 압력이 크게 요구되기 때문인 것으로 생각된다. 보편적으로  $I_b$  값은 입자의 크기와 관련이 있다고 할 수 있다.

② 비배수전단강도

Marchetti는 경험적인 방법으로 점토지반에서 dilatometer를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하는 식  $S_u = 0.22\sigma'_v (0.5K_b)^{1.25}$  을 제안했으며 이 관계식은  $I_b$ 가 1.2보다 작은 점토지반에 대하여 비교적 잘 적용되며, Roque(1988)는 DMT 브레이드의 삽입과정에서 수평적인 파괴가 일어나는 기초로 간주된다는 것을 주장한 바 토질의 비배수전단강도를 측정하기 위하여 전형적인 지지력 방식을 사용하는 것을 식 10과 같이 제안하였다.

$$S_u = \frac{P_1 - \sigma_{ho}}{N_c} \quad (10)$$

여기서,  $P_1$  = 초기 최대 DMT 팽창압력,

$N_c$  = 토질에 따른 큰계수

$\sigma_{ho} = K_0 \sigma'_{vo} + u_0$ 에 의하여 측정된, 총 수평응력

또한 Lacasse & Lunne(1983) 및 Fabius et al.(1984)에 의하면 연약한 포화점토에서 비배수 전단강도의 예측은 입자간 결합이 없는 경우 보정되지 않은 현장배인 실험의 결과와 잘 일치하나 단단한 과압밀 상태의 점토지반에서는 잘 맞지 않는다고 보고하였다.

③ 압밀계수

압밀계수 산정 원리는 관입장치를 사용하여 브레이드가 지반에 관입되어질 때 주변 지반에서는 과잉 간극수압이 유발되고, 이 간극수압은 시간이 경과함에 따라 주로 수평방향으로 소산되는 것을 말한다. 본 연구에서는 Robertson이 제안한 DMT-C의 방법에 따라 소산시험에서 얻어진 P2값을 이용하여 소산곡선의 50%에서의 수평방향 압밀계수( $C_h$ )를 식 (11)과 같이 산정하였다. 이 때 표준 브레이드는 14 mm×95mm로 등가 단면적을 갖는 원형 단면으로 가정하여 구한 반경 R을 20.57mm를 산정하였으며, 선단부로부터 관입 멤브레인까지의 거리를 고려하여 반경의 4배 뒤에 있는 점을 고려하였다. 그리고 강성지수 ( $I_r = E/S_u$ )는 Gupta(1988)가 제안한 시간계수 (T) 1.1을 적용하였으며 CPT<sub>u</sub>와 DMT간에 사용한 강성지수에 다소 차이가 있는 점을 감안하였다.

$$C_h = \frac{R^2 T_{50}}{t_{50}} \quad (11)$$

여기서, R : 등가반경(20.57mm),

$T_{50}$  : 50% 소산시 시간계수

④ 과압밀비

Marchetti(1980)가 제안한 DMT의 수평응력지수와 압밀시험의 결과로부터 과압밀비 OCR를 비교하는 아래와 같은 경험식(19) Lacasse & Lunne은 OCR값이 1.25보다 크고, ID가 1.2보다 작은 점토지반에서는 수정식(20)을 이용하였다.

$$OCR = 0.5 KD^{1.56} \quad (12)$$

$$OCR = 0.225 KD^m \quad (13)$$

여기서,  $m = 1.35 \sim 1.65$ , (소성지수에 의존하며 소성지수가 높으면 낮은 값, 소성지수가 낮으면 높은 값 적용)

Lunne(1989)에 의하면 생성된 점토지반의 지질학적 근거나,  $S_u / \sigma'_{vo}$ 를 토대로 신선한 점토(young clay)와 오래된 점토(old clay)로 분류하여 OCR추정을 위한 아래의 (14)(15)식을 이용하여 비교하였다.

young clay의 경우  
 $: OCR = 0.3 K_b^{1.17} (S_u / \sigma'_{vo} < 0.8) \quad (14)$

old clay의 경우  
 $: OCR = 2.7 K_b^{1.17} (S_u / \sigma'_{vo} > 0.8) \quad (15)$

⑤ 정지토압계수

DMT 시험에서 브레이드의 삽입이 흙을 교란시키기 때문에 직접적으로 수평응력을 측정하는 것은 가능하지 않으나 정지토압계수  $K_0$ 와 수평응력지수  $K_b$  관계에 관한 경험적인 비교는 제안되어 왔다.

Marchetti(1980)를 시초로 Lacasse & Lunne (1988)는 Marchetti(1980)의 경험식을 수정하여 수평응력지수( $K_b$ )가  $I_b < 1.2$  와  $K_b < 4$  를 가지는 연약하고 중간정도의 견고한 비교적 점토지반을 대상으로, Lunne (1990)와 Powell & Uglow (1988)는 신선한 점토지반(young clay)과 오래된 점토지반(old clay)에서의  $K_b$  와  $K_0$  가 서로 다른 경험식을 제안한 바 있다.

## 5. 역상화 평가

### 5.1 유압햄머다짐시 역상화 평가

유압햄머다짐은 그림 13과 같이 동하중 진동에 의하여 토립자간의 상대변위를 유발시키고, 지반의 간극비를 감소시키므로서 다짐밀도값을 증가시키는 원리이다. 즉, 진동에 의한 사질토의 간극비 감소는 토립자의 접촉수를 증가시키는 원리로 반복진동에 의하여 입자간의 약한 접촉부분은 파괴시키고, 강한 접촉부분만 남게되므로서 그 접촉 면적이 커져서 간극비 변화없이 탄성계수가 증가될 수 있는 원리이다. 이러한 다짐시 발생하는 진동은 그림 14와 같이 표면파와 전단파의 복합체로 P파, S파, R파 등이 간극수압의 증가, 입자간의 변위 유발, 입자에 전단력이 적용되므로서 밀실한 상태로 입자가 재배열 된다. (Gambin, 1979)



그림 13. 유압햄머다짐 전경

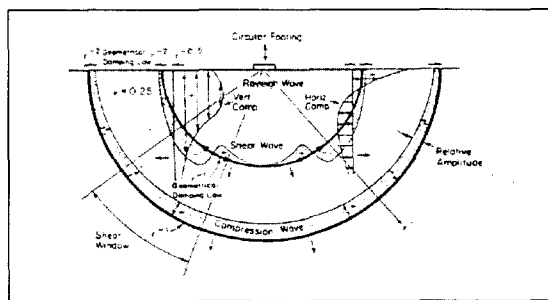


그림 14. 다짐시 발생하는 진동원

이같은 개념에 의거 유압햄머 다짐공법에 의한 사질토지반을 개량할 수 있으며, 그 효과를 그림 15와 같이 다짐 전과 다짐 후의 SPT(N치)의 변화를 통해 확인할 수 있다. 그림 15에서 보듯이 준설토로 느슨하게 매립된 지층을 유압식 햄머에 의해 3차다짐까지 충분히 다짐한 결과 매립지반의 지반지지력은 상당히 증가한 것으로 나타났으며 지하수위 저하에 따른 N치가 증가하고 있어 지지력이 크게 향상됨을 알 수 있다. 다짐 전, 후의 깊이에 따른 전단파 속도에 따른 유압햄머다짐의 개량효과는 그림 16과 같이 나타났으며, 그 결과 심도에 따라 차이는 있으나 개량전 느슨한 상태에서 개량후 약 20~60m/sec정도 전단파속도가 증가되는 것으로 나타났다.

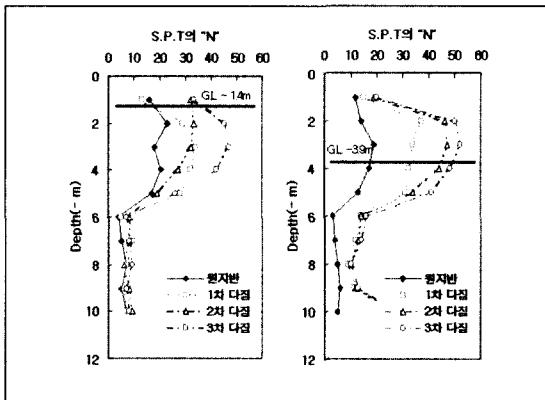


그림 15. 다짐전 · 후의 N치 변화

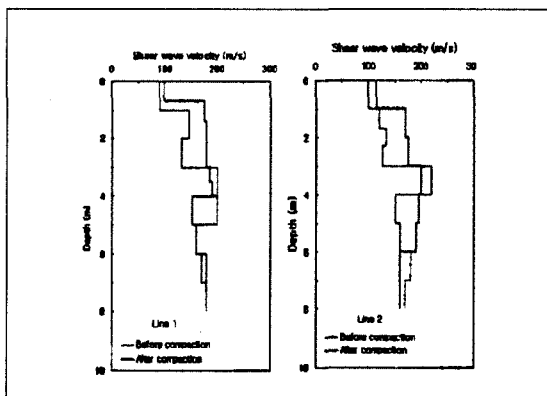


그림 16. 다짐전 · 후의 전단파속도 변화

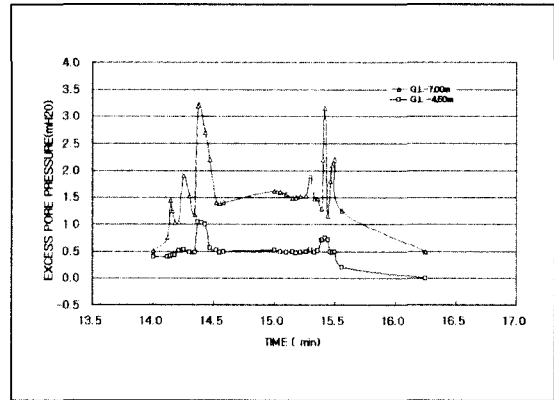


그림 17. 다짐후의 과잉간극수압의 변화

이와같이 준설매립지반은 유압햄머다짐의 반복진동으로 간극수압의 변화를 수반할 수 있는 점을 고려해 공항부지 노반재료인 준설토에 대해 지반개량(유압햄머다짐)시 실시한 진동원으로부터의 액상화를 평가하고자 과잉간극수압의 변화를 파악하였다. 준설매립지반 하부 4.5m와 7.0m에 설치한 간극수압계로부터 나타난 간극수압은 그림 17에서 보는 바와 같이 유압햄머다짐시 준설매립층 내부에는 간극수압 증가는 있었으나, 과잉간극수압은 대략 1시간 이내에 대부분 소산되는 것으로 나타났다.

관계곡선을 통해 나타난 과잉간극수압은 원지반의 간극수압에 비하여 현저히 작을 뿐만 아니라 간극수압소산이 매우 신속하게 일어나 유압햄머 진동원에 대한 액상화 발생 가능성은 미약한 것으로 파악되었다. 이같은 현상은 준설매립지반의 투수성이 매우 크기 때문에 유압햄머다짐에 의한 과잉간극수압은 연속다짐에도 불구하고 거의 형성되지 않는 것으로 나타나는 바 액상화 발생 가능성은 없는 것으로 추정되었다.

## 5.2 지진하중에 따른 액상화 평가

### 1) 진동삼축시험

본 준설토의 노체 및 노상 요구 지반개량수준에 따

른 밀도값을 확인하고자 상대밀도(D<sub>r</sub>) 40%, 50%, 60%, 70%에 따른 액상화 저항응력비와 재하횟수의 관계를 각각 그림 18, 그림 19에 나타냈다. 그림에서 재료에 따라 차이는 있으나 상대밀도값이 증가함에 따라 동일 반복하중 재하에 따른 전단저항 강도비는 크게 증가하는 것으로 나타났으나 재하횟수가 증가함에 따라 액상화 저항 강도비는 뚜렷이 감소하는 것으로 확인되었다. 재하횟수가 50회 이상일 경우에는 상대밀도값의 크기에 관계없이 일정하게 0.2에 수렴하는 것으로 나타났는데, 이것은 지진발생 재하횟수가 증가함에 따라 저항강도비는 재료의 양·부에 관계없이 일정함을 나타내는 것으로 판단된다.

진동삼축시험 결과로부터 지진의 전단응력비를 비교하여 안전율을 Seed & Idriss 방법을 이용하여 지진규모 7.5와 6.5에 대하여 산정하면 표 4와 같다.

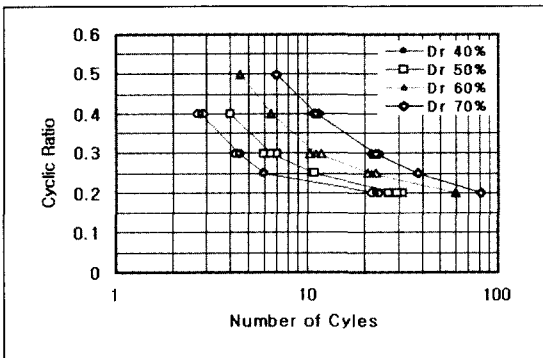


그림 18. 노체의 D<sub>r</sub>에 따른 응력비-N<sub>c</sub> 관계

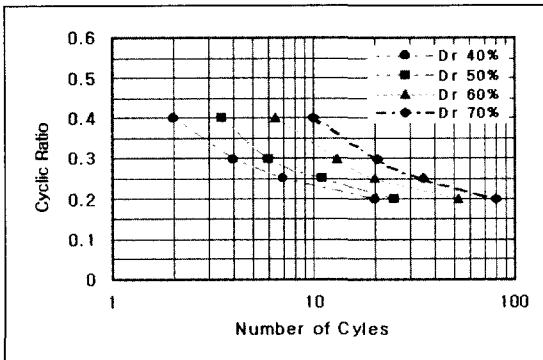


그림 19. 노상의 D<sub>r</sub>에 따른 응력비-N<sub>c</sub> 관계

표 4. 상대밀도에 따른 액상화 평가 안전율 산정(D-SPT<sup>1</sup>N<sup>1</sup>)의 비교

구분	상대밀도 (%)	50	60	70
	표준관입시험(SPT)-N		8	11
진동삼축시험	Seed와 Idriss(M 7.5)	0.97	1.25	1.75
	Seed와 Idriss(M 6.5)	1.02	1.40	2.04

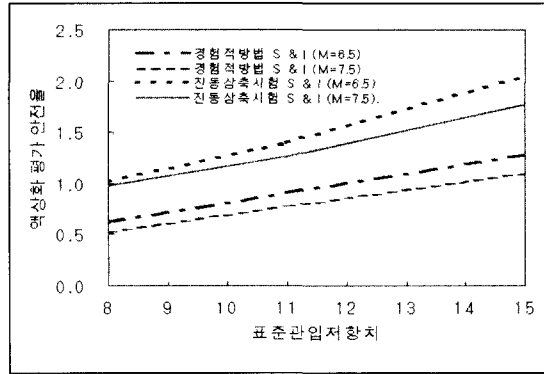


그림 20. 액상화 안전율-N<sub>c</sub> 관계

액상화평가 안전율은 진동삼축시험에 따른 경우 지진규모가 6.5일 때 상대밀도(D<sub>r</sub>)는 10%씩 증가함에 따라 약 0.6씩 증가하는 것으로 나타났으며, 현장 상대밀도값이 60%인 경우 안전율이 1.4를 보이는 바 액상화 발생 가능성은 희박한 것으로 나타났다.

그림 20에서 진동삼축시험에 의한 방법과 경험적 방법에 의한 결과를 상호 비교평가하기 위해 안전율을 비교한 결과 진동규모 6.5에서 7.5로 클수록 10% ~30% 감소하는 것으로 나타났으며, 제안 방법에 대해서는 약 1.8배 이상을 나타내기도 하였는 바 제안방법의 신뢰성이 무엇보다 중요함을 알 수 있다. 같은 조건에서 경험적방법(Seed & Idriss)에서 소요 안전율이 1.0 이하를 나타내는 바 제안방법에 따라 그 차이가 크음을 알 수 있다.

또한 세립분 함량이 소요 안전율에 미치는 영향을 파악하기 위해 진동재하 응력비와 재하횟수의 관계성을 살펴본 결과 그림 21과 같이 대체로 세립분의 함량이 증가함에 따라 동일 재하횟수대비 전단 저항 강도비는 증가하는 것으로 나타났으며, 재하횟수에 따라 강도비는 감소하는 경향을 보였다. 그리고 재하 횟수가 50이상인 경우는 일정하게 수렴하여 재료특

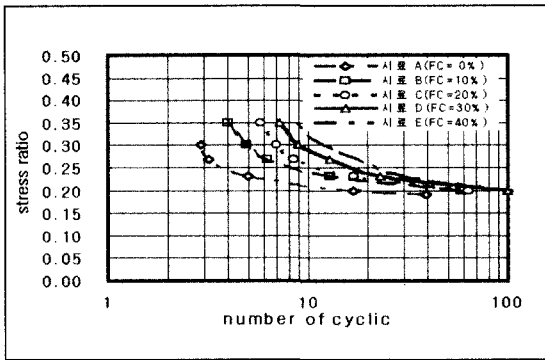


그림 21. 세립분 함량에 따른 응력비-N<sub>v</sub> 관계

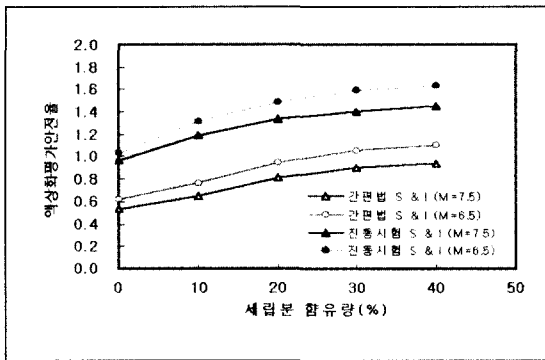


그림 22. 세립분 함량에 따른 안전율

성이 구분되지 않은 것으로 나타났으며, 이것은 상대 밀도 경향과 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 지진규모가 감소함에 따라 전단응력비는 일정하게 증가하는 것으로 나타났다.

한편 그림 21은 세립분함량에 따른 진동수별, 전단저항 응력비 관계 곡선인데 세립분 함량이 20%까지는 액상화 전단저항 응력비의 증가가 두드러지게 나타난 반면, 그 이후에는 그 양상이 크게 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 현장 준설토의 세립분 함유량이 20%이내인 상태에서 실험결과 5~15% 범위에서 지반저항 응력비가 크게 변화하고 있음을 보여주고 있음을 판단해 볼 때 본 현장 준설매립지반의 준설토는 액상화 발생 가능성에 대해 저항력있는 지반특성을 보유하고 있음을 알 수 있었다. 또한 그림 22의 액상화 안전율은 간편법보다는 진동삼축시험

에 의한 해석법이 크게 나타나 간편법보다는 진동삼축시험 등을 이용한 실험적 연구에 기초하여 액상화 평가방법이 지진대책의 안전성과 경제성을 모두 효과적으로 만족할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2) 현위치 시험

준설매립지반의 현위치 간이법에 의한 액상화 발생평가는 과업의 신속성에서 유리하므로 널리 사용된다. 이때 지반저항 응력비 산정이 무엇보다 중요하므로 이에 대한 방법을 충분히 검토해야 한다. 본 연구는 이같은 차원에서 기존제안방법과 비교 검토하는 것이 타당한 바 지반저항 응력비의 산정은 Seed & Idriss 등의 기존 제안방법에 따라 실시하였다. 그러나 기제안된 방법은 제안자에 따라 그 범위차가

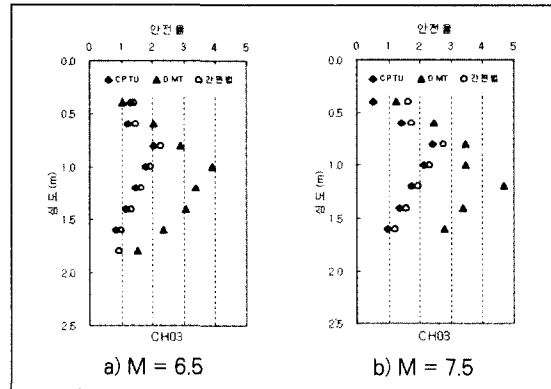


그림 23. 시험방법별 액상화 안전율 비교

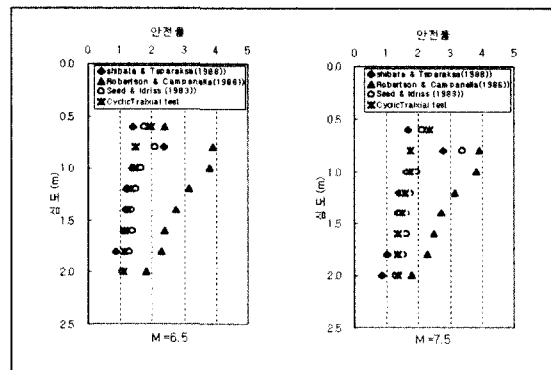


그림 24. 제안자별 액상화 안전율 비교

크며 세립토의 함유량에 따라서도 큰 편차를 나타내고 있는 바, 이를 본 현장 연구 자료로부터 재산정하여 그 경향을 비교 분석하였다. 현장 시험치인 표준관입시험과 콘관입시험 그리고 DMT결과와 실내 진동삼축시험 결과로부터 본 현장 액상화발생 정도를 평가하고자 진도규모에 따라 산정된 안전율은 다음 그림 23, 그림 24와 같다.

그림에서 진도규모에 관계없이 CPTU 방법과 Seed & Idriss(1971)의 간편법(N치 이용)은 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으나 DMT 방법은 기존 제안방법과 큰 차를 나타내는 것을 보여 그 신뢰성이 낮은 것으로 나타났으며 지진규모에 관계없이 대체로 소요안전율을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

또한 실내진동 삼축시험결과에 의한 추정결과와 기존 제안방법을 상호 비교한 결과 Robertson & Campanella(1986)방법은 그 편차가 큰 것으로 나타났으며, 진동삼축시험에 의한 경험적방법 결과는 Shibata & Teparaksa(1988)방법과 Seed et al.(1983)의 간편법에 의한 액상화 안전율과는 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 사질토에서 상대밀도, 마찰저항 및 입자크기 등에 따라 수평응력지수 (KD)가 상당히 커져 상대적으로 반복응력비가 크게 산정되기 때문인 것으로 사료된다.

## 6. 결 언

#200체통과율이 15%이하인 준설패립토에 대해 액상화발생 경향을 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 유압다짐 햄머로부터 발생된 진동발생원에 대해 액상화 발생 경향을 분석한 결과 발생가능성은 미약한 것으로 나타났다.
2. 진동삼축시험결과 상대밀도값이 증가함에 따라 반복재하 하중에 따른 지반저항 응력비는 증가하는 것으로 나타났으나 재하횟수 증가에 따른

지반저항응력비는 뚜렷이 감소하는 것으로 나타났다.

3. 실내 진동삼축시험 결과에 의한 추정방법은 Shibata & Teparaksa(1988)방법과 Seed 등 (1983)의 간편법과는 유사한 것으로 나타났으나, Robertson & Campanella(1986)방법과는 1.8배이상의 편차를 보이는 것으로 나타났다.
4. 본 현장 시료로부터 현위치 시험결과를 이용하여 기존 제안방법을 비교 평가한 결과, 세립분의 함유량에 따라 편차가 발생하는 것으로 나타났으며, 대체로 세립분이 클수록 지반저항 응력비는 큰 것으로 나타났다.
5. 액상화 안전율 평가결과 진도규모에 관계없이 CPTU 방법과 Seed & Idriss(1971)의 간편법 (N치 이용)은 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났으나 DMT 방법은 기존 제안방법과 큰차를 나타내는 것을 보여 그 신뢰성이 낮은 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 신공항공건설공단 (1996) 수도권 신공항 다짐시험시공 용역보고서
2. 김동수, 박형춘, 김영웅, 김수일 (1999). "영종도 지반공학 야외시험장에서의 사질토지반 개량효과 평가", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 439-446.
3. 김종국, 김영웅, 최인걸, 최원호 (2001). "유압햄머다짐 준설패립지반의 액상화평가에 관한 연구" 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 517-524
4. 박인준, 김수일 (1998). "교란상태개념에 기초한 새로운 액상화 평가방법", 한국지진공학회 논문집, 제2권, 2호, pp. 45-55.
5. 박인준, 신윤섭, 최재순, 김수일 (1998). "기존의 액상화 평가기법 및 그 적용성에 관한 연구", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 431-438.
6. Seed, H. B. and Lee, K. L. (1996). "Liquefaction of Saturated Sands during Cyclic Loading",

- Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, No.6, pp.105-134.
7. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1967). "Analysis of Soil Liquefaction Niigata Earthquake", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.93, No.3, pp. 83-108.
  8. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.97, No. SM9, pp. 1249-1274.
  9. Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, Ignacio (1983). "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", Journal of the Geotechnical Engineering Division, Vol. 109, No.3.
  10. Carter, D. P. and Seed, H. B. (1988). "Liquefaction Potential of Sand Deposits under Low Level of Excitation", Earthquake Engineering Research Center, pp. 101-134.
  11. Iwasaki, T., Tatuoka, 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 5th Japan Earthquake Symposium, pp. 641-648.

11월달 게재된 기술자료 중 그림 18 c)를 정정합니다.

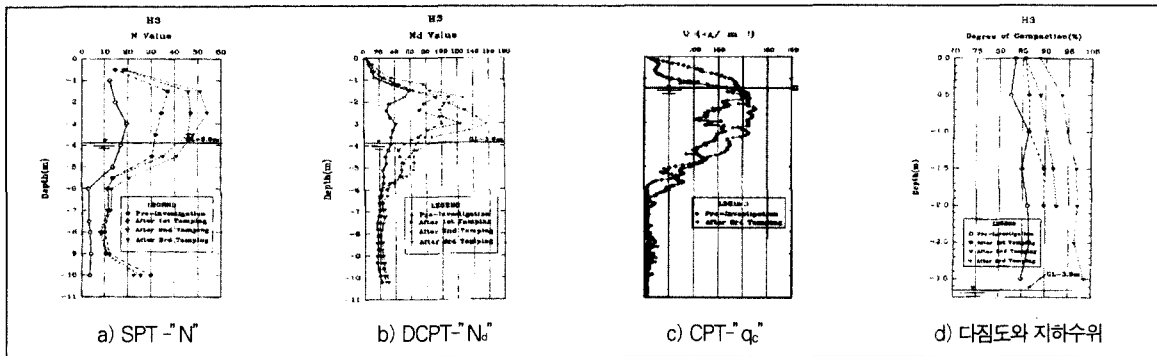


그림 18. 유압식 햄머다짐에 따른 지반조사자료 변화

표 9에서 콘관입저항치( $q_c$ )에서 노상과 노체 기준 값이 잘못 표기되었습니다.

■ 변경전

표 9. 준설매립지반의 품질관리기준 설정

노상	15Mpa	40	80	노상상부 30cm제외
노체	20Mpa	30	60	

■ 변경후

표 9. 준설매립지반의 품질관리기준 설정

노상	20Mpa	40	80	노상상부 30cm제외
노체	15Mpa	30	60	