

# CPTu와 DMT를 이용한 인천국제공항 해성점토의 공학적 특성연구

## Estimation of Geotechnical Characteristics at of the Marine Clay at Incheon International Airport Marine Clay Using Piezocone and Dilatometer Tests

김 종 국* <sup>1</sup>	Kim, Jong-Kook	김 영 웅* <sup>2</sup>	Kim, Young-Ung
최 인 결* <sup>3</sup>	Choi, In - Gul	박 영 목* <sup>4</sup>	Park, Yeong-Mog

### Abstract

Geotechnical characteristics like soil classification, undrained shear strength, and the coefficient of consolidation were estimated based on the results of piezocone test, dilatometer test and laboratory test on the 2nd phase in Incheon International Airport. Sand seam layer existing in marine clay is judged by the results of soil classification through piezocone and dilatometer test. Undrained shear strength estimated by the cone value of  $N_k = 18.2$  from piezocone test was relatively consistent with the undrained shear strength by the value of  $N_c = 6.35$  from dilatometer test using the Roque formula. The Coefficients of horizontal consolidation using piezocone and dilatometer tests were also well consistent with each other. The coefficient of horizontal consolidation from silty ground where silt and sand seam exist, however, was much greater than the coefficient of vertical consolidation and the ratio of consolidation coefficient ( $C_{h(Oedo, CPTu, DMT)}/C_{v(Oedo)}$ ) showed big difference from 4.3 to 10.2

### 요 지

본 연구에서는 2단계 확정예정부지의 일부 원지반에서 수행된 CPTu(piezocone penetration test)와 DMT(dilatometer) 및 실내시험 결과를 바탕으로 흙의 분류, 비배수전단강도 그리고 압밀계수등의 공학적 특성을 살펴보았다. CPTu와 DMT를 이용한 흙의 분류 결과, 점토층 사이에 얇게 산재한 샌드심(sand seam)층을 보다 정확하게 판정할수 있었다. 삼축압축시험의 비배수 강도( $S_u$ )를 기준으로 산정한 콘계수는 CPTu의 경우  $N_k=18.2$ 를, DMT의 경우 Roque(1988)의 제안식을 이용한  $N_c=6.35$ 로 추정된 비배수전단강도가 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 또한 CPTu와 DMT를 이용한 수평압밀계수는 비교적 근사한 것을 알수 있었다. 그러나, 해성점토사이에 실트, 샌드심이 존재하는 실트질 지반에서의 수평압밀계수가 연직 압밀계수보다 상당히 크며, 압밀계수비( $C_{h(Oedo, CPTu, DMT)}/C_{v(Oedo)}$ )는 4.3~10.2로 큰 차이를 보이고 있다.

**Keywords :** Undrained shear strength, Horizontal coefficient of consolidation

### 1. 서론

인천국제공항 부지는 영종도와 용유도 사이의 바다를 준설매립한 지반과 원지반이 약 5~10m 정도의 연

약지반으로 분포되어 있다. 대부분의 연약 지반은 무기질과 실트질 점토를 이루고 있는 해성점토로 낮은 소성지수를 나타내고 있다. 이러한 지반 부지를 대상으로 그동안 많은 원위치시험등의 현장시험을 수행하였으며 특

\*1 정회원, 한국건설품질시험원 지반기술팀 과장  
 \*2 정회원, 인천국제공항공사 기술개발팀 건설시험소 소장  
 \*3 정회원, (주)유신코퍼레이션 인천국제공항감리단 기술본부장  
 \*4 정회원, 영남대학교 공과대학 토목공학과 교수

히, 연약지반개량 전·후의 다양한 지반조사, 시험 및 계측자료를 근거로 연약지반의 공학적 특성을 규명해 왔다. 일반적으로 가장 널리 쓰이고 있는 지반조사는 표준관입시험(SPT)이 이용하고 있으나, 연약지반에서의 신뢰도가 저하되는 것으로 알려진 바 있다.

최근 들어, CPTu(piezcone penetration test), DMT(dilatometer), 공내재하시험 등과 같은 새로운 시험의 활용이 대두되고 있으며, 이 중 CPTu와 DMT는 전 세계적으로 많이 이용되고 있는 장비로 많은 연구들이 이루지고 있는 실정이다. 이들은 현장 지반조사 장비로 각각의 콘과 브레이드(blade)를 일련의 연결로드 끝에 장착하여 지중에 일정한 관입속도로 압입하여 연속적으로 소정의 심도에서 다양한 지반정수등의 지반정보를 얻을 수 있는 유사한 형태를 가진 시험 방법이다. 이들 두 시험은 지반의 흙의 분류와 흙의 강도 및 변형특성을 파악하는데 유용하게 이용되고 있어 많은 연구가 계속되어 왔으며, 이들의 결과로 이론적인 방법과 경험적인 방법에 의한 많은 지반정수의 산정식들이 제안되어 왔다. 특히, 해안지역의 퇴적점토층사이에 실트나 모래질층이 존재하는 점토지반의 비교란시료의 채취가 어려운 점과 시료채취, 운반등의 시료교란을 유발하는 점을 감안한다면 현장시험에 의해 지반의 공학적인 정보를 획득하는 것이 더 효율적이라 본다.

본 연구에서는 추후 공사가 예정된 2단계 원지반의 해성점토에 대하여 순차적으로 연구시험을 계속하고 있으며, 우선 실트질 점토층을 대상으로 수행된 CPTu와 DMT 및 실내시험 결과를 토대로 흙의 분류는 물론 비배수전단강도 및 압밀계수등의 상호비교 분석을 통해 공학적 특성을 살펴보았다.

## 2. 시험 개요

본 연구의 시험부지는 2단계확정예정부지중 국제업무 지역으로 실트질 점토층이 발달한 원지반을 대상으로 현장조사를 수행하였으며 그림 1과 같이 50m x 50m간격의 6개소로 등배분하였다. 동 부지에서 시추조사를 통해 비교란시료를 채취하였으며, 물성시험과 역학시험을 병행하였다. 본 조사시험에 앞서 CPTu를 먼저 수행해 샌드심(sand seam)이 발달한 실트질 점토층을 파악하였으며, 본 조사계획에 따라 위치 및 심도를 결정하고 CPTu와 DMT을 동일한 지점에 실시하였다. 그리고 비교란시료 채취 위치와 동일한 층에서 CPTu와 DMT를 이용하여 간극수압 소산시험을 수행하였다. 그러나 이들 가운데 BH03에서

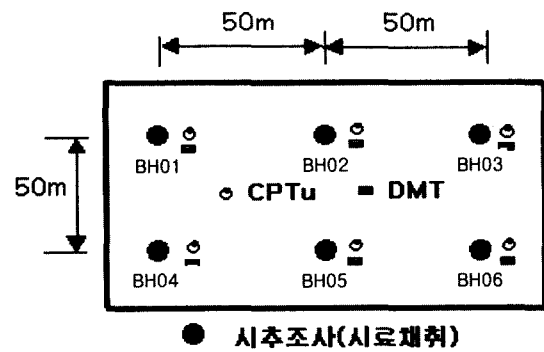


그림 1. 2단계 시험부지 평면도

시험한 현장시험 일부는 심도가 다소 차이가 있어 비교 대상에서 제외하였다.

### 2.1 CPTu시험

CPTu는 10~30t정도의 관입장치, 전기식 콘 그리고 운영장치로 구성되어 있으며, 관입속도  $2 \pm 0.5 \text{ cm/sec}$ , 선단각  $60^\circ$ , 선단면적  $10 \text{ cm}^2$ , 그리고 주면적  $150 \text{ cm}^2$ 을 표준화하고 있으며, 관입심도에 따라 연속적으로 지반의 공학적 특성을 신속하게 파악할 수 있어 설계에 직접 이용할 수 있다. CPTu의 특징은 관입시험 수행을 통해 연속적인 지층 주상도 및 비배수전단강도의 산정, 수평방향 압밀특성 파악, 점성토층내에 분포하는 샌드심층 파악 가능, 지반개량 전·후의 강도 기준치 설정, 응력경로 및 과압밀비 산정은 물론 간극수압 측정할수 있는 특성이 있다.

CPTu의 시험결과를 이용한 토질정수를 예측하는 방법은 Schmertmann(1978), Robertson et al.(1983)등의 많은 연구자들에 의해 개발되었으며, 최근 CPTu를 이용한 국내지반의 지반정수와 관련하여 많은 연구가 수행되고 있다. 본 연구에서는 CPTu의 시험결과를 토대로 흙의 분류와 비배수 전단강도 그리고 압밀계수등의 지반공학적 특성을 살펴보고자 하였다.

흙의 분류 방법은 CPTu 결과를 토대로 원추관입저항력, 간극수압계수, 그리고 마찰율을 동시에 사용하는 흙의 분류방법을 제안한 Campanella & Rodertson(1988)의 도표와 이선재(1997)가 제안한 흙의 분류도표를 이용하였다. 콘 저항력을 이용하여 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 이론적인 방법보다는 경험적인 방법을 많이 사용하고 있어, 참조강도로 실내시험을 기준으로 경험적인 콘계수를 산정하고 이를 통해 비배수전단강도를 추정하였다. 또한 압밀계수 산정은 간극수압소산결과로부터

Torstensson(1977), Baligh와 Levadoux(1980a), Baligh와 Levadoux(1986) 그리고 Houslyby와 Teh(1991) 등의 이론해를 이용해 산정하였다.

## 2.2 DMT시험

DMT는 1970년대 초에 이탈리아의 Silvano Marchetti 교수에 의하여 고안된 장비로 주로 점토지반에서의 흙의 분류, 정지토압계수, 비배수전단강도, 변형계수, 선행압밀하중 및 간극수압을 구하는 경험식을 제안하였다. Schmertmann(1986)은 DMT를 이용하여 사질토지반에서의 마찰각을 구하는 방법을 제안하였으며, 그 이외도 여러 연구자들에 의해 신뢰성이 높은 제안식들이 발표되었다. DMT는 두께 14mm, 폭 95mm의 강판에 지름 6cm인 스틸 멤브레인이 한쪽면에 부착된 브레이드를 사용하고 있으며, 관입시는 정적콘관입장치를 이용하여 자갈층 및 굳은 지반(N=40이상)을 제외한 모래 또는 점토등 거의 모든 지반에서 쉽게 활용할 수 있다. 특히 20cm 깊이 간격으로 연속적으로 시험이 가능하며 시험방법이 간편하여 토질정수를 추정하는데 매우 효과적이다.

그림 2과 같이 브레이드는 케이블을 통해 압축공기를 주입하면 스틸멤브레인이 팽창되고, 그 압력으로 인하여 지반내에 변형을 발생시켜 A, B, C 값을 얻을 수 있으며, 이를 토대로 달라토미터 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 대상 지반의 특성을 파악하는데 활용할 수 있다. 본 연구에서는 Marchetti(1980)가 제안한 흙의 분류방법을 이용하였고, 비배수 전단강도를 추정하는 방법으로 Marchetti(1980), Roque(1988)등이 제안한 식을 이용하였다. 또한, 소산시험 결과를 바탕으로 Robertson(1988)이 제안한 DMT-C방

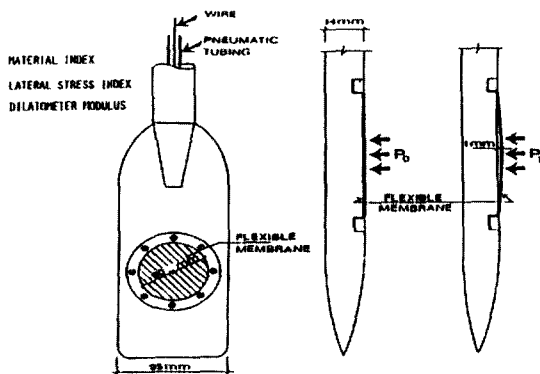


그림 2. DMT 멤브레인에 의한 측정

법에 의해 압밀계수를 산정하였다.

## 3. 지반 조건

본 지역 연약지반의 지층분포상태는 퇴적층, 풍화대 및 기반암으로 나타났다. 지반 조사 결과에 의하면, 연약층의 분포는 2~10.5m로, 지층 구성은 실트질 점토, 점토섞인 실트, 실트섞인 모래로 분류되며, 상부로부터 상부 점토층, 중부 실트층 또는 실트질 점토층, 하부 점토층으로 그림 3과 같이 구성되어 있고 그 하부의 기반암의 풍화대가 분포한 것으로 나타났다. 특히, 이 지역에서 수행된 소산 시험에서는 간극수압이 크게 나타나지 않았으며 소산이 비교적 빠르게 진행되었다. 이러한 원인은 퇴적점토사에 소성지수가 낮은 실트 및 샌드심이 3~20cm두께로 비교적 넓게 분포하고 있고, 상·하부의 점토층 사이에 발달해 있는 것으로 추정되었다.

여기서, 샌드심은 퇴적점토사이에 존재하는 많은 모래성분이 지반에 층상으로 나타나는 것을 말하며, 점토가 침강·퇴적하는 과정에 하천의 범람이나 사면활동 등에 의하여 모래성분이 유입되어 자연적으로 생성되며, 층후가 얇고 지역분포에 따라 변화를 보이는 것이 특징이다. 또한, 1단계 부지의 점토지반에서 존재하는 샌드심을 대상으로 기 수행된 시험결과에 의하면, 모래의 투수계수는  $1.6 \sim 3.6 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 로 점성토의 투수계수 보다 100~1000배 크게 나타났고, 압밀계수( $C_v$ ) 비교에서 실트질 점토에 비해 대략 10배 정도의 큰 차이를 보이고 수평방향의 압밀계수( $C_h$ )가 연직방향의 압밀계수보다 약 5배 정도로 크게 나타났으며, 입도분석결과에서는 #200체 통과량이 32~46%로 샌드 성분이 50% 이상을 함유한 약 2mm이하의 중간크기부터 미세한 입자의 모래가 비교적 느슨하게 분포하고 있는 것으로 보고 된 바 있다. (김중

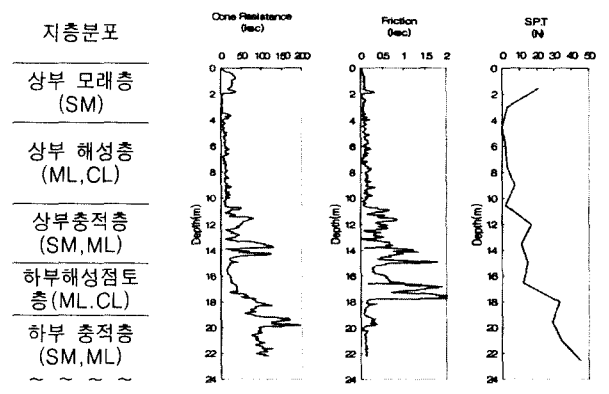


그림 3. 전형적인 지층특성 분포

표 1. 실내토질시험 결과

구분		시험결과	
일축압축강도	$q_u$	kg/cm <sup>2</sup>	0.76~0.83
	$q_{ur}$	kg/cm <sup>2</sup>	0.25~0.32
삼축(UU)시험	C	kg/cm <sup>2</sup>	0.41~0.45
표준압밀 (수직)	$P_c$	kg/cm <sup>2</sup>	0.89~1.05
	$C_c$	-	0.170~0.201
	$C_v$	x 10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /sec	2.63~15.7
표준압밀 (수평)	$P_c$	kg/cm <sup>2</sup>	0.86~1.2
	$C_c$	-	0.274~0.306
	$C_h$	x 10 <sup>-3</sup> cm <sup>2</sup> /sec	4.19~28.9

국 외, 2000)

본 연약지반에서 채취한 시료를 이용하여 수행한 시험 결과, 자연함수비는 액성한계(21~30%)를 넘어 35~39%이며 초기 간극비는 약 1.0이고 소성지수는 1.1~10.3으로 낮은 값을 보이고 실트성분이 85~93%으로 나타났으며,

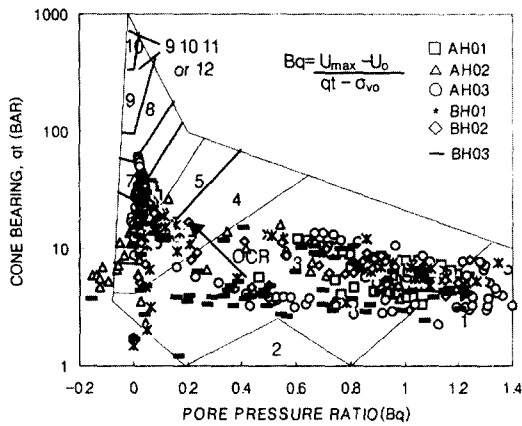
일축 및 삼축등의 역학시험결과는 표 1과 같다.

이러한 실트질 지반은 샌드심등의 영향으로 투수성이 크고 수평방향의 배수가 용이하고, 압밀이 촉진되어 전체적인 압밀거동이 크게 변화하게 되는 특성이 있다.

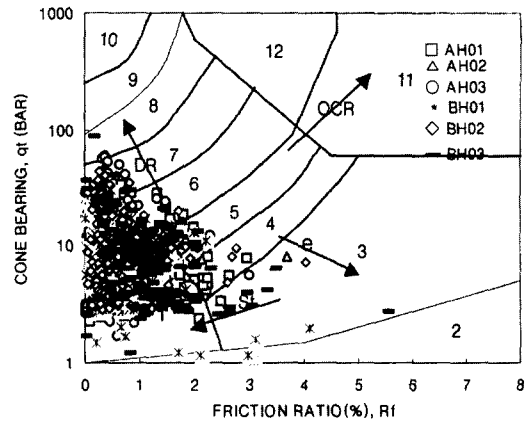
#### 4. 시험결과의 비교 분석

##### 4.1 흙의 분류

흙의 분류 방법으로는 통일분류법을 매우 널리 사용하고 있으며, 이 방법을 이용하여 흙을 분류하는 방법이 가장 확실하나, 연속적인 지반의 성질을 명확하게 나타내기가 매우 어렵다. 이러한 단점을 보완하기 위해 CPTu와 DMT를 이용하여 흙의 분류를 시도하였다. 먼저 CPTu의 경우, Campanella & Robertson(1988)가 제안한 흙의 분류방법과 이선재(1997)가 국내지반을 대상으로 제안한 흙의 분

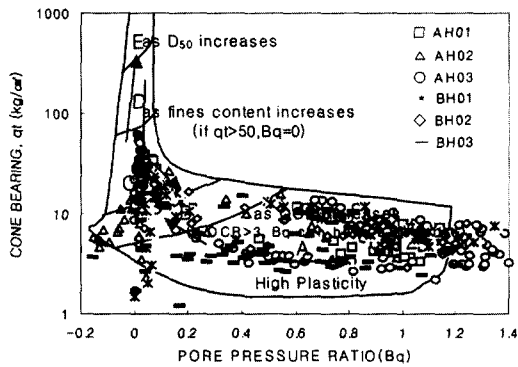


(a)  $q_t$ - $B_q$ 와의 관계

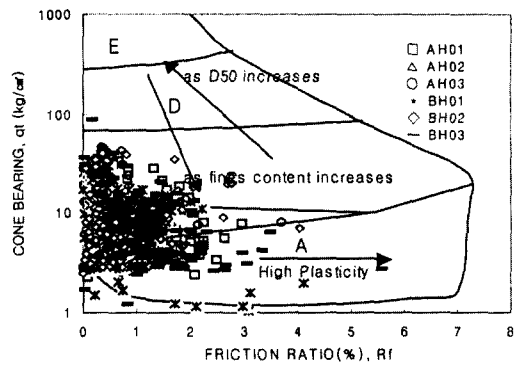


(b)  $q_t$ - $R_f$ 와의 관계

그림 4. CPTu의 분류도표를 이용한 흙의 분류 (Campanella & Robertson, 1988)



(a)  $q_t$ - $B_q$ 와의 관계



(b)  $q_t$ - $R_f$ 와의 관계

A : Clay(CH, CL), B : Clay(CL) or Silt(MH, ML), C : Clay(CL), Silt(ML) or Sand(SM, SP) D : Sand(SM, SP, SW), E : Sand(SW)

그림 5. 국내지반을 고려한 흙의 분류(이선재, 1997)

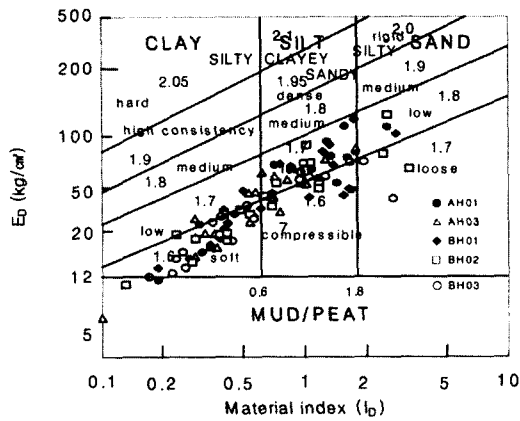


그림 6. DMT에 의한 단위중량과 흙의 분류

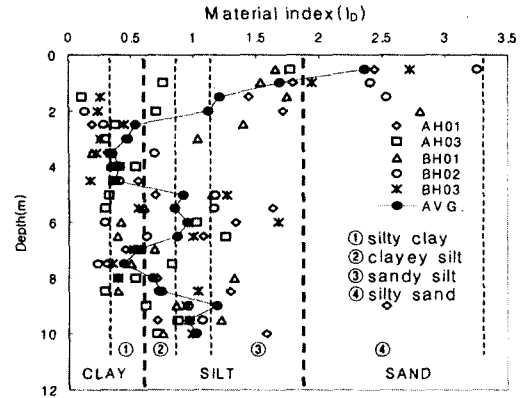


그림 7. Ib값을 이용한 지반의 종류 구분

류 도표를 이용 콘관입저항치( $q_t$ )와 간극수압계수( $B_q$ ) 및 콘관입저항치( $q_t$ )와 마찰비( $R_f$ )와 관계를 비교분석하였으며, 흙의 거동상태는 그림 4, 그림 5와 같이 나타났다.

그림 4의  $q_t$ - $B_q$ ,  $q_t$ - $R_f$ 와의 관계에서 나타난 흙의 상태는 1의 예민한 세립토, 3의 점토, 4의 실트질 점토, 5의 점토질 실트 또는 실트질 점토, 6의 모래질 실트 내지 점토질 실트의 상태를 보이고 있다. 선단저항력과 마찰율 그리고 간극수압계수의 영향 범위를 보면, 대체적으로 콘관입저항치( $q_t$ )는 0.1~62.5 bar, 마찰율( $R_f$ )의 범위는 0~6%를 보이고, 과압밀비가 증가할수록 콘관입저항치는 증가하는 것으로 나타났다. 이들 중 점토층에서 나타난 콘관입저항치는 2.0~25.5 bar, 간극수압계수는 -0.2~1.4, 마찰율은 0~2%의 범위를 보이고 있고, 실트의 경우 콘관입저항치는 5.1~51.0 bar, 간극수압계수는 -0.1~0.3, 마찰율은 4%이하의 범위를 보이며 소성이 증가할수록 콘관입저항치와 마찰율이 감소하는 것으로 나타났다. 특히 해성점토층에서 나타나는 관입저항치는 일관성 있는 범위내에서 저항치가 일정하게 증가하는 것으로 나타난 반면, 샌드심층이 존재하는 경우 콘관입저항치는 3~20cm 정도의 두께로 갑자기 증가하였다가 떨어지는 경향을 보이고 있으며, 간극수압은 주변의 분포보다 급격히 감소하거나 부의 간극수압이 나타나기도 하며, 점토층에서 나타나는 마찰율(0~2%)보다 급격히 저하되는 점을 비롯하여 모래성분이 우세한 입도분포를 보이는 경향을 알 수 있었다.

그림 5의 도표에서도 보편적으로 점토질 실트 또는 실트질 점토, 모래질 실트 내지 점토질 실트 등의 범위인 A영역과 B영역이 우세한 것으로 나타났다. 이는 과압밀비와 소성지수가 다소 적은 범위를 보이고 있다.

한편, Marchetti는 재료지수 ( $I_b$ ) 값을 사용하여 흙의 분

류 및 흙의 분류와 단위중량을 결정하기 위하여  $I_b$  값과  $E_D$  값을 이용하여 상관관계도를 제안하였다. 여기서,  $I_b$ 는 DMT

시험결과에 의하면  $I_b$ 는 0.19~3.15 정도, 단위중량은 1.5~1.8 g/cm³를 보이며,  $E_D$ 는 2.2~108로 나타났으며, 그림 6은 Marchetti(1980)의 제안한  $I_b$ 와  $E_D$ 를 이용한 상관관계도를 이용하여 흙의 분류를 도시하였다.

그림 7과 같이  $I_b$ 를 이용한 간편적인 흙의 분류는 0.1~0.6의 범위는 점토, 0.6~1.8의 범위는 실트, 1.8~10의 범위는 모래로 구분하기도 하는데, 이는 실내시험에서 구한 FC와 DMT시험을 통해 얻은  $I_b$ 사이의 관계에서 조립분 함유량이 많으면  $I_b$ 가 증가하고, 세립질이 증가하면  $I_b$ 가 감소하는 추세를 보이고 있음을 알 수 있다. 이와같이 이 지역에서 나타나는  $I_b$ 가 1.2보다 작은 값을 나타내고 있어 지반특성은 연약하고 중간정도의 압축성의 지반으로 점토와 실트 성분이 많은 것으로 사료된다(전창대의, 1999).

이와 같이 CPTu의 경우 Campanella와 Robertson(1998) 흙의 분류방법과 이선재(1997)가 제안한 흙의 분류방법에 의한 흙분류 결과는 비교적 일치하는 것으로 나타났으며, 선단저항력의 증가와 간극수압의 감소를 토대로 점토층 사이에 존재하는 실트 및 모래층의 존재를 비교적 잘 구별할 수 있었다. DMT의 경우에서도  $I_b$ 와  $U_D$  등에 의해 비교해 볼 때 지층속에 존재하는 실트나 모래층의 존재에 보다 민감한 것을 나타냈다. 또한, 이선재(1997)의 흙분류도표의 A영역과 B영역과 DMT를 이용 흙분류하는 경우  $I_b$ 가 1.2보다 적은 값을 가질 때 서로 일치하는 양상을 보이고 있다. 그리고 표 2에서와 같이 통일분류법과 비교한 결과와도 잘 일치하는 것으로 나타났다.

표 2. 현장 및 실내시험결과에 의해 추정된 흙의 분류

Depth(m)	CPTu	USCS	DMT
1	sand, silty sand to sandy silt	SM, ML	silt sand, sandy silt
2	sensitive fine grained	ML-CL or CL	mud
3			silty clay, clayey silt
4			sandy silt
5	sandy silt to clayey silt	ML-CL	silty clay
6	sensitive fine grained		
7	sandy silt to clayey silt		
8	sensitive fine grained	sand seam	silt
9	sandy silt to clayey silt	CL	clay, clayey silt
10	sensitive fine grained	M L-CL	sandy silt, silty sand
11	sandy silt to clayey silt	sand seam	clayey silt, sandy silt
	clayey silt to silty clay		

4.2 비배수전단강도 비교

CPTu시험의 비배수전단강도 산정방법에는 이론적·경험적인 방법이 있으며, 이론적인 방법이란 공동 팽창이론과 극한 지지력이론에 근거하여 콘관입시험의 결과와 비배수 전단강도의 관계를 유도한다. 경험적인 방법은 콘관입시험의 결과로부터 직접적으로 정하는 것이다. 이론적인 방법보다는 경험적인 방법을 많이 사용하고 있으며, 대표적인 비배수강도( $S_u$ )의 산정 방법들은 표 3에 정리하였다. 이 때, 각 제안식에 나타난 콘계수를 결정하여야 하며 참고강도시험에 의한 비배수전단강도 값이 필요하다. 콘계수는 다양한 지반에 대해 실시한 콘관입시험의 결과와 실내 및 현장시험을 통해 구한 강도와의 상관관계를 통해 경험적 방법에 의해 결정하고 있다. 최근들어 국내 점성토 지반의  $S_u$ 를 산정하기 위한 콘계수들이 이미 여러 가지가 제안되어 있고, 1단계 공항부지에서 기 수행된 각종 실내, 현장시험자료를 토대로 제안한 콘계수  $N_{kt}=15$ , 상재하중을 고려하지 않은 경우에서의 콘계수  $N_t=18$  그리고, OCR에 따라 제안된 콘계수를  $N_{kt}=10$ 을 사용하여 선행재

하 전·후에 실시한 현장배인시험결과의  $S_u$ 를 비교한 바 있다. (이갑열,1997)

시험지반에서 나타나는 일축압축강도는 평균  $0.79\text{kg}/\text{cm}^2$ , 삼축시험결과의  $S_u$ 는 평균  $0.43\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 나타났으며, 이를 기준으로 각 제안방법에 따라 콘계수를 표 4와 같이 산정하였다.

표4에서와 같이 본 연구시험에서 산정한  $N_{du}=2.7$ ,  $N_k=18.2$ ,  $N_{qu}=20.0$  그리고  $N_{kt}=20.0$ 을 적용 CPTu를 이용한  $S_u$ 를 추정할수 있었다.

한편, Marchetti는 경험적인 방법으로 점토지반에서 DMT이용에 있어  $S_u$ 를 추정하는 방법을 제안하였으며  $K_D$ 와 연직유효응력으로 정규화된 비배수강도( $S_u/\sigma_v'$ )와의 관계식을 적용하였다. 이 관계식은  $I_D$ 가 0.6보다 작은 점성토지반에 대하여 비교적 잘 적용된다.(FHWA, 1988)

$$S_u = 0.22 \sigma_v' (0.5 K_D)^{1.25} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_v'$ : 연직유효응력

$K_D$ : 수평응력지수

Roque(1988)는 DMT 브레이드의 삽입이 수평적인 파

표 3. CPTu를 이용한 비배수 전단강도를 추정

제안자	적용 사항	제안식
Vesic(1972)	과잉간극수압을 이용	$S_u = \frac{u_{bt} - u_o}{N_{\Delta u}}$ (1)
Schmertmann (1978)	전체선단 저항치를 이용	$S_u = \frac{q_c - \sigma_o}{N_k}$ (2)
Campnella (1982)	유효선단저항치 이용	$S_u = \frac{q_t - u_{bt}}{N_{qu}}$ (3)
Lunne 등 (1985)	부등단면비를 고려	$S_u = \frac{q_t - \sigma_o}{N_{kt}}$ (4)

표 4. 삼축압축시험의  $S_u$ 를 이용한 콘계수 결정

위치	CPTu				DMT
	$N_{du}$	$N_k$	$N_{qu}$	$N_{kt}$	$N_c$
AH01	3.3	18.3	20.3	19.9	5.7
AH02	1.6	19.1	20.5	20.1	-
AH03	1.4	24.8	26.0	28.0	7.3
BH01	4.0	13.1	15.4	15.1	3.1
BH02	3.2	15.7	17.6	17.1	3.9
Aver.	2.7	18.2	20.0	20.0	5.0

괴가 일어나는 기초로 간주된다는 것을 주장한바 토질의  $S_u$ 를 측정하기 위하여 전형적인 지지력 방식을 사용하는 것을 제안하였다.

$$S_u = \frac{P_1 - \sigma_{ho}}{N_c} \quad (6)$$

여기서,  $P_1$  = 초기 (최대) DMT 팽창압력,

$\sigma_{ho}$  = 총 수평응력

$N_c$  = 토질에 따른 콘계수

이들 제안식을 이용하여 DMT의  $S_u$ 를 추정하였다. 이 때, 참고강도로 일축 및 삼축압축시험결과를 통해 얻은  $N_c=5.0$ 을 이용하여  $S_u$ 를 비교하였고, 기존 연구결과에서 나타난  $N_c=6.35$ 을 이용하여 금회 결과에 함께 비교하였다. 여기서,  $N_c$ 는 1단계부지지역의 해성점토를 대상으로 DMT결과를 바탕으로 Roque(1988) 제안식을 적용하여 추정하였다. (전창대의, 1998)

$S_u$  비교결과, 그림 8에서와 같이 경험식에 따라 산정한 각각 콘계수는 분포정도가 크게 분산된 것으로 보이며, CPTu의 상재하중을 고려하지 않은 조건의 콘계수  $N_k=18$ 를 적용한 경우와 DMT의 경우  $N_c=6.35$ 을 적용하는 것이 서로 근접한 값을 가지는 것으로 나타났다.

또한, 삼축압축시험의  $S_u$ 를 기준으로 산정한 콘계수는 CPTu의 경우  $N_k=18.2$ 을, DMT의 경우는 콘계수  $N_c=6.35$  값을 적용하여 추정된  $S_u$ 가 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이는 Kjekstad 등 (1978)가 동일한 삼축압축시험을 참고강도로 하여 산정한 콘계수  $17 \pm 5$ 가 유사한 값을 보이고 있다. 그러나, 이들 관계를 보다 정확히 파악하기 위해서는 보다 많은 시험 데이터의 확보와 현장 배인시험 강도는 물론 추가시험을 통해 다각적인 분석이 필요할 것으로 사료 되어 추가연구시험이 진행중이 있으며, 콘계수

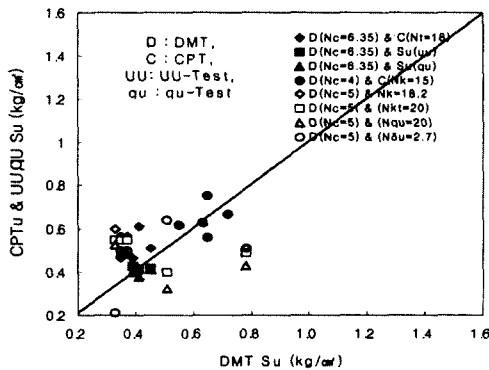


그림 8. DMT, CPTu, 실내시험에 의한  $S_u$  비교

산정에 있어서도 보다 신뢰성을 높이기 위해 많은 데이터를 집계하여 분석하여야 할 것으로 사료된다.

### 4.3 압밀계수

CPTu와 DMT의 간극수압소산시험을 통해 수평압밀계수( $C_{h(CPTu)}$ )를 산정하였다. CPTu의 경우, 소산시험을 토대로 압밀계수 산정 이론에는 Torstensson(1977), Baligh와 Levadoux(1980), Levadoux와 Baligh(1986) 그리고 Houlsby & Teh(1991)의 방법이 제안되었다. 이들이 제시한 다양한 이론 시간계수들 중 콘 주변에 유발되는 공동의 형태, 강성지수 그리고 과압밀도의 지반상태를 고려하여 적절한 시간계수 값을 선택하는 것은 매우 어려운 점을 언급한 바 있어(김영상의, 1997), 본 연구에서는 압밀계수 추정을 위해 시간계수는 실내시험결과를 토대로 비교적 근사한 값인 강성지수( $I_r$ ) 100을 이용하였으며, 각각의 제안식과 가정사항을 표 5와 같이 정리하였다.

DMT의 경우, 압밀계수 산정 원리는 관입장치를 사용하여 브레이드를 지반에 관입되어질때 주변 지반에서는 과잉간극수압이 유발되고, 이 간극수압은 시간이 경과함에 따라 주로 수평방향으로 소산되는 것을 말하며, 압밀계수( $C_{h(DMT)}$ )를 산정하는 방법은 Campanella와 Robertson (1988)와 Marchetti와 Totani(1989)에 의해 제시되었다. 또한, Robertson, Baligh 그리고 Schmertmann은 이들을 조합하여 수평압밀계수산정 절차를 제시하였다.

본 연구에서는 Robertson이 제안한 DMT-C의 방법에 따라 소산시험에서 얻어진  $P_2$ 값을 이용하여 소산곡선의 50% 에서의 수평방향 압밀계수를 산정하였다. 이 때, 표준 브레이드는 14mm x 95mm로 등가 단면적을 갖는 원형 단면으로 가정하여 구한 반경 R은 20.57mm를 산정하였으며, 선단부로부터 관입 멤브레인까지의 거리를 고려하여 반경의 4배 뒤에 있는 점을 고려하였다. 그리고 강성지수는

표 5. 각 제안모델 및 가정사항

제안자	제안식	비고
Torstensson (1977)	$C_h = \frac{R^2 T_{50}}{t_{50}} \quad (7)$	R : 등가원추반지름 T : 시간계수
Baligh와 Levadoux (1980)	$C_h = \frac{R^2 T}{t} \quad (8)$	(U50%:각각0.58, 3.65, 5.60, 2.45)
Levadoux와 Baligh (1986)		t : 50% 압밀도의 소산시간
Houlsby와 Teh (1991)	$C_h = \frac{R^2 T \sqrt{I_r}}{t} \quad (9)$	Ir : 강성지수 (G/Su=Eu/3Su)

표 6. 실내 및 현장시험에서 산정한 평균압밀계수 비교

	Oedometer (C <sub>v</sub> )	Oedometer (C <sub>h</sub> )	CPTu (C <sub>h</sub> )				DMT(C <sub>h</sub> )
			Torstensson (1977)	Baligh & Levadoux (1980)	Levadoux & Baligh (1986)	Houlsby & Teh (1991)	
평균압밀계수 (cm/sec)	0.00966	0.0418	0.0537	0.0675	0.0988	0.0453	0.0908
압밀계수비 (C <sub>h</sub> / C <sub>v Oedo</sub> )	1	4.3	5.6	7.0	10.2	4.7	9.4
압밀계수비 (C <sub>h</sub> / C <sub>h Oedo</sub> )	-	1	1.3	1.6	2.4	1.1	2.2

Gupta(1988)가 제안한 시간계수(T) 1.1을 적용하였으며 CPTu와 DMT간에 사용한 강성지수에 다소 차이가 있는 점을 감안하였다.

$$C_h = \frac{R^2 T_{50}}{t_{50}} \quad (10)$$

- 여기서, C<sub>h</sub> : 수평방향압밀계
- R : 등가반경(20.57mm),
- T<sub>50</sub> : 50% 소산시 시간계수
- t<sub>50</sub> : 50% 소산시간

CPTu와 DMT의 간극수압 소산시험으로부터 산정한 압밀계수와 Oedometer시험에서 구한 연직압밀계수, 횡방향으로 90° 회전한 조건의 Oedometer에서 얻은 압밀계수를 비교하였으며, Oedometer의 압밀계수를 기준으로 압밀계수비를 산정하여 표 6같이 나타내었다.

표 6에서와 같이 CPTu와 DMT에서 구한 수평압밀계수는 Oedometer시험에서 구한 연직압밀계수보다 상당히 크게 나타났다. CPTu의 경우, 제안된 이론해에 따라 압밀계수비(C<sub>h</sub> / C<sub>v Oedo</sub>)는 4.7~10.2로 큰 차이를 보이고 있으나, 횡방향으로 90° 회전한 조건의 Oedometer에서 얻은 수평압밀계수와 비교할 때, 압밀계수비(C<sub>h CPTu, DMT</sub> / C<sub>h Oedo</sub>)는 1~2.4정도로 나타났다. 이와 같이 수평압밀계수가 연직압밀계수보다 큰 것은 퇴적점성토 사이에 실트질 지반과 샌드심층의 층상화와 해성점토의 구조적 이방성, 토립자의 재배열, 지층상태, 그리고 시험방법, 이론해 등에 따라 큰 차이가 있기 때문으로 사료된다.

Jamiolkowski 등(1985)의 연구에 의하면 퇴적 점성토층의 경우 수평투수계수는 연직투수계수의 2~4배의 큰 값을 보이고 있고, Varved clay와 점성토사이에 투수성이 양호한 층이 존재하는 경우에 있어 투수계수비(k<sub>h</sub>/k<sub>v</sub>)가 3~15로 상당히 큰 차이를 보고한 바 있다. 즉, 퇴적점토에 대한 안쪽방향 수평압밀계수는 바깥방향 수평압밀계수보

다 이론적으로 상당히 작음에도 불구하고 연직압밀계수보다 몇배 크게 나타남을 제시하였다.

이와 같이, 해성점토의 지반상태와 시험방법 및 이론해 등에 의해 얻고자 하는 지반정수들이 크게 차이가 발생할 수 있는 것과 같이 보다 많은 시험 데이터 획득과 연약지반에 샌드심층의 유무 확인, 올바른 지반 특성 파악등의 다양한 지반조사방법을 통해 보다 신뢰성 있는 설계의 접근이 중요할 것으로 판단되며, 실내시험과 현장시험을 병행하여 수행하는 것이 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 5. 결론

2단계 국제업무지역부지의 일부 원지반중 실트질 점토층이 발달한 지층을 대상으로 수행된 CPTu와 DMT 및 실내시험 결과를 바탕으로 공학적 특성을 살펴본 결과 그 결론은 다음과 같다.

- (1) CPTu, DMT의 흙의 분류와 통일분류법에 의한 흙의 분류는 서로 유사한 경향을 보이고 있으나, CPTu의 경우 "sensitive fine grained"과 DMT의 경우 "mud"로 표시되고 있어 세심한 분류가 필요하다. 특히, CPTu시험은 선단저항력의 증가와 간극수압의 감소를 토대로 점토층 사이에 존재하는 실트, 모래층의 존재를 비교적 잘 구별할 수 있어 퇴적점토층에 얇게 산재한 샌드심층을 보다 정확하게 판정할수 있는 것으로 사료되고, DMT는 I<sub>D</sub>와 U<sub>D</sub>등에 의해 비교해 볼 때 지층속에 존재하는 실트나 모래층의 존재에 보다 민감한 것을 알수 있다. 또한, 이선재(1997)의 흙분류도표의 A영역과 B영역과 DMT를 이용 흙분류하는 경우 I<sub>D</sub>가 1.2보다 적은 값을 가질 때 서로 일치하는 양상을 보이고 있다.
- (2) CPTu와 DMT를 이용한 동 지역 실트질점토의 비배수 전단강도 추정치에 있어 삼축압축시험의 Su를 참고강도



로 산정한 콘계수는 CPTu의 경우  $N_k=18.2$ 을, DMT의 경우는 Roque(1988)의 제안식을 이용한  $N_c=6.35$ 값을 적용하는 경우에 있어 비교적 근사한 경향을 보이고 있으나, 경험식에 따라 콘계수의 분포가 크게 나타나 정량적으로 분석하기에는 다소 어려움이 있었다.

(3) CPTu와 DMT에서 구한 수평압밀계수는 Oedometer 시험에서 구한 연직압밀계수보다 상당히 크게 나타났으며 CPTu의 경우 제안된 이론해에 따라 압밀계수비 ( $C_h/C_v$  Oedo)는 4.7~10.2로 큰 차이를 보이고 있다. 또한, 횡방향으로 90° 회전 조건의 Oedometer에서 얻은 압밀계수와 현장 수평압밀계수와 비교할 때 압밀계수비( $C_h$  CPTU, DMT)/ $C_h$  Oedo)는 1~2.4정도로 나타났다.

이와 같이 수평압밀계수가 연직압밀계수보다 큰 점을 고려해 퇴적점성토 사이에 실트질 지반과 샌드십의 층상화, 구조적 이방성 등의 지반상태 파악과 시험방법 및 이론해의 적용에 있어 보다 많은 시험자료를 획득하여 심도깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

### 참고 문헌

1. 김중국, 성기광, 김학중, 김영웅, (2000), "인천국제공항지역의 피에조콘조사와 결과의 적용" 한국지반공학회 논문집 제16권 제2호 pp. 115~123
2. 이갑열(1997), "현장시험을 통한 비배수전단강도 산정", 서울대학교 공학석사 학위 논문
3. 이선재 " 피에조콘을 이용한 국내지반의 공학적 특성연구" 서울대학교 토목공학과, 박사학위논문, 1997년 8월
4. 전창대, 김중국, (1998) "Flat Dilatometer 시험을 이용한 인천국제공항 점성토의 비배수 전단강도 추정" 대한토목학회, 학술발표회 논문집(II), pp. 151-154
5. 전창대, 김중국, (1999) "Flat Dilatometer 시험을 이용한 인천국제공항 점성토의 공학적 특성 추정" 한국지반공학회, 지반조사 위원회 논문집, pp. 113-135
6. Baligh, M. M. and Levadoux, J. N.(1980), "Pore pressure dissipation after cone penetration", *Research Report*, Cambridge, Massachusetts 02139.
7. Baligh, M. M. & Levadoux, J. N.(1986), "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration, II: Interpretation," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol 112, No. 7, pp.727-745

8. Campanella, R.G., Robertson, P.K., (1988), Current status of the piezocone test, *Invited Lecture*, 1st International Conference on Penetration Testing Disney World, pp91-116.
9. FHWA(1988). *Guidelines for using the CPT, CPTU and Marchetti DMT for Geotechnical Design*. FHWA-PA-87-922+84-24.
10. Gupta, R. C.(1988), "Determination of the In Situ Coefficient of Consolidation and Permeability of Submerged Soils Using Electrical Piezoprobe Soundings", *PhD. Dissertation to the University of Florida*, 282pp.
11. Jamiolkowski et al., (1985) "New developments in field and laboratory testing of soils", *State-of-the report*, San Francisco, 1, pp. 57-153, Balkema Pub., Rotterdam.
12. Kjekstad, O., Lunne, T. and Clausen, C. J. F.(1978), "Comparison between insitu cone resistance and laboratory strength for overconsolidated North Sea clays", *Marine Geotechnolgy*, Vol. 1. No.4.
13. Marchetti, S.(1980), "In-Situ Tests by Flat Dilatometer", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 106, pp.299-321.
14. Marchetti, S. and Totani, G., (1989) "Ch Evaluations from DMTA Dissipation Curves," *Proceeding, 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, Rio de Janeiro, pp. 281-286
15. Robertson, P. K. and Campanella, R.G.(1983), "Interpretation of cone penetration tests, Part II :Sand", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, No. 4, pp718-733
16. Roque, R. et al.(1988), "Basic Interpretation Procedures of Flat Dilatometer Tests", *Proc. of the 1st International Symposium on Penetration Testing*, ISOPT-1, Orlando, Florida, Vol.1, pp.577-587
17. Robertson, P. K. and Campanella, R.G., Gillespie, D., and By, T., (1988), "Excess pore pressure and the Flat Dilatometer Test," *Penetration Testing 1988*, Preceeding, ISOPT-1, Orlando, Vol. 1, pp. 567-576
18. Schmertmann, J. H.(1978), "Guidelines for cone penetration test Performance and Design", *Federal Highway Administration, Report FHWA-T-78-209*, Washington, July, 145p.
19. Schmertmann, J. H., (1986) " Suggested Method for performing the Flat Dilatometer Test", *ASTM Geotech. Testing Jour* Vol. 9, pp.93-101
20. Torstensson, B. A.(1977) "The Pore Pressure probe", *Nordiske Geoteknise Mote*, Oslo, Paper No. 34, pp. 34.1-34.15
21. Teh, C. I. & Houlby, G. T.(1991), "An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay", *Geotechnique*, No. 41, Vol 1., pp.17-34.
22. Vesic', A. S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil masses", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 98, SM3, pp.265-290

(접수일자 2000. 7. 12)