

## DMT를 이용한 해성점토의 수평압밀계수 평가에 관한 연구 A Study on the Evaluation of Horizontal Coefficient of Consolidation for Marine Clay by Flat DMT

김종국<sup>1)</sup>, Jong-Kook Kim, 정혁<sup>2)</sup>, Hyeok Jeong, 채영수<sup>3)</sup>, Young-Su Chae, 윤원섭<sup>4)</sup>, Won-Sub Yoon

- 1) 한국건설품질시험원 지반공학센터 팀장, Chief of Geo-Team., Institution of Korea Construction Quality Test&Analysis.
- 2) 수원대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
- 3) 수원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.
- 4) 수원대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon.

**SYNOPSIS** : In this study, through dissipation test of DMT predicted Horizontal Coefficient of Consolidation at marine clay. CPTu Dissipation test, laboratory consolidation test compared with  $C_v$ , through it examined application. The result, DMT calculated horizontal coefficient of consolidation by  $P_2$ -Log(t) method of DMT-A method and  $C-\sqrt{t}(\text{min})$  method. This horizontal coefficient of consolidation calculated larger than  $P_2$ -Log(t) method.  $P_2$ -Log(t) method of DMT, Torstensson of CPTu and Houlsby & Teh(1991) appeared similar to tend. This approximate value is possible application in marine clay. It'll need to study continuously through collection of data.

**Keywords** : Flat Dilatometer Test(DMT), Horizontal Coefficient of Consolidation( $C_h$ )

### 1. 서 론

연약지반에 건설되는 토목 구조물을 효율적으로 설계하기 위해서는 지반조사를 통한 대상 지반의 공학적 특성 파악이 매우 중요하며, 지반의 공학적 특성은 현장 및 실내시험을 통하여 산정할 수 있다. 실내시험은 응력 및 배수조건을 조절하므로 지반의 공학적 특성을 산정하기 용이하지만, 현장 조건을 반영하기 어려울 뿐만 아니라 시료채취에 따른 교란 등의 문제가 발생할 수 있다. 반면 현장시험의 경우 시험결과에 현장조건이 반영된 결과를 얻을 수 있으나 결과 값을 공학적 특성으로 변환하는데 어려움이 있다. 최근 들어 빠르고 경제적이며 연속적인 지반 데이터를 획득할 수 있다는 장점 때문에 피에조콘관입시험(CPTu)과 딜라토미터시험(DMT)등의 관입형 현장시험이 많이 수행되고 있다. 특히, CPTu와 DMT의 간극수압 소산시험을 통해 수평압밀계수를 산정할 수 있다. CPTu와의 수평압밀계수 산정방법은 Torstensson(1975, 1977), Baligh와 Levadoux(1980), Gupta와 Davison(1983), Levadoux와 Baligh (1986) 그리고 Houlsby와 Teh(1988)등 이외도 많은 연구자들에 의해 발표되었다. DMT의 소산시험의 경우, Robertson et al.(1988), Lutenege와 Kabir(1988) 그리고 Schmertmann(1988, 1991), Marchetti와 Totani(1989) 등에 의해 이론과 경험이 복합된 방법들이 제안되었다. 국내의 연구동향으로는 이승래 등(2001), 김영상(2001, 2003) 등이 DMT를 이용한 수평압밀계수 산정방법과 새로운 해석법 등을 발표하였다. 이처럼 현장시험을 바탕으로 지반의 공학적 특성을 파악하기 위하여 다양한 연구가 이루어지고 있지만 아직까지는 미진한 바와 같이 국내에서도 보다 많은 시험과 국내 지반특성에 적합한 방법의 개발과 보다 신뢰성 있는 자료를 획득하는 것이 중요하다.

따라서 본 연구에서는 연약지반 특성을 파악을 위해 최근 많이 사용되고 있는 DMT의 소산시험을 바

탕으로 수평압밀계수를 산정하고 CPTu의 소산시험, 실내압밀시험 등의 압밀계수( $C_v$ )와 비교·분석을 통해 국내 해성점토지반의 적용성을 평가하였다.

## 2. 이론적 배경

DMT의 간극수압 소산시험은 관입장치를 사용하여 브레이드(blade)를 지반에 관입되어질 때 주변 지반에서는 과잉간극수압이 유발되고, 이 간극수압은 시간이 경과함에 따라 주로 수평방향으로 소산되는 것을 말한다. 수평압밀계수를 산정하는 방법은 Schmertmann 등(1988)의 DMT-C 방법과 Marchetti와 Totani(1989)가 연구한 DMT-A방법으로 크게 나눌 수 있다.

### 2.1 DMT-C 방법

DMT-C 방법은 DMT의 측정된 C값으로 보정한  $P_2$ 압력이 멤브레인에 작용하는 과잉간극수압과 유사하다는 것을 Beligh(1986)의 CPTu의 수평압밀계수 산정방법과 비교한 이론에 근거하여 Torstensson(1977)의 이론해를 이용한 시간계수를 기본으로 하는 방법이다. C값을 이용하여 수평압밀계수( $C_h$ )를 구하는 방법으로는 Schmertmann 등(1988)이 제안한 c-t방법과 Robertson 등(1988)이 CPTu방법과 비교되는  $P_2$ 로부터 수평압밀계수를 얻는  $P_2$ -Log(t)방법이 있다. 즉 Robertson은 DMT-C 소산시험으로부터 소산시간에 따라 DMT의 멤브레인이 1.13mm 팽창 후 원래대로 돌아올 때의 측정값 C값의 대기압과 멤브레인 강성에 대한 보정압력  $P_2$ 가 간극수압이라고 제안하고  $P_2$ -Log(t)방법을 제시하였다.

$P_2$ -Log(t)의 수평압밀계수 산정방법은 DMT-C 소산시험으로부터 측정된 값을 이용하여 시간- $P_2$ 관계를 도시한 다음 평형 C압력으로부터  $P_2$  소산시험의 50%에서의 C압력  $C_{100}$ 소산시험의 커브에서  $C_{50}$ 에 도달되는데 요구되는 시간( $T_{50}$ )을 결정한다. 결정된  $T_{50}$ 과 시간계수(T)를 이용하여 수평압밀계수를 산정하면 식 (1)과 같다.

$$c_h = \frac{R^2 T}{t_{50}} \quad (1)$$

여기서  $R^2$ 는 등가반경(2.057mm), T는 시간계수,  $t_{50}$ 는 50%소산 까지 걸리는 시간이다.

그리고 Schmertmann은 Robertson(1988), Beligh(1986)의 이론을 조합하여 C압력이 간극수압이라는 가정 하에 근거를 두고  $C-\sqrt{t}(\text{min})$  방법으로부터  $t_{50}$ 을 구하여 식 (2)에 의해 수평방향 압밀계수를 산정하였다. 소산시험 및 강성지수 산정은 Robertson 등(1988)이 제안한 방법과 동일하다.

$$C_h = 600 \left( \frac{T_{50}}{t_{50}} \right) \cdot \left( \frac{\text{mm}^2}{\text{min}} \right) \quad (2)$$

여기서  $t_{50}$ 은 소산시험 곡선에서  $C_{50}$ 에 도달하는데 걸리는 시간이다.

또한 CPTu의 소산시험의  $T=50$ 일 때의 압밀계수 산정과 동일하게 DMT소산시험의 50%에서의 C압력,  $C_{50}$ 에 도달되는데 요구되는 시간  $t_{50}$ 을 결정하고 강성지수 ( $I_R = E/s_u$ )를 사용하여 시간계수를 산정하는 방법으로 Gupta(1983)는 무차원시간계수를 산정하였다.

### 2.2 DMT-A 방법

Marchetti와 Totani(1989)가 제안한 것으로 A-log(t)소산 곡선의 감쇠비율로부터 수평압밀계수를 산정하는 시험적인 방법이다. 산정방법으로 A-log(t)소산곡선 도시, 소산 곡선으로부터 변곡점에서의 시간

$t_{flex}$ 을 구한 후 평균 수평압밀계수의 산정은 식 (3)과 같다.

$$C_h \approx \frac{5 \sim 10 \text{ cm}^2}{t_{flex}} \quad (3)$$

여기서  $t_{flex}$ 는 A-log(t)소산 곡선에서 변곡점의 시간이다.

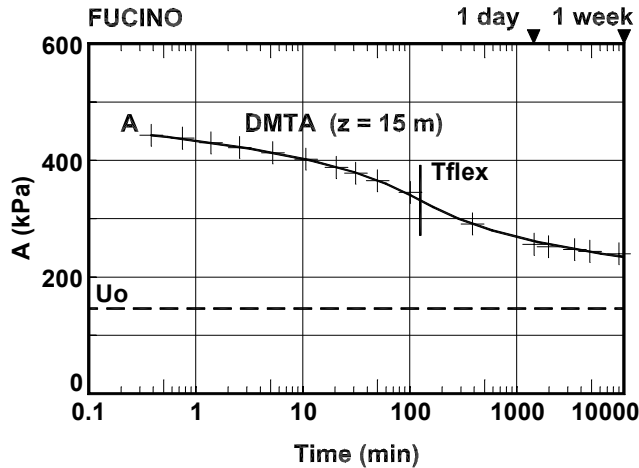


그림 1. DMT소산시험의 DMT-A의 소산곡선 (예)

이와 같이 DMT의 소산시험을 이용하여 수평압밀계수의 산정할 수 있어 신뢰성 있는 결과를 제공한다고 연구되고 있다. 성주현 등(1999)은 국내지반에서 DMT-C방법이 DMT-A보다 신뢰성이 있다고 보고하였고, Totani(1988)는 위 식 (3)에서 정규압밀  $5\text{cm}^2 \sim 15\text{cm}^2$ 을 약간 과압밀 된 점토지반에서는  $6\text{cm}^2 \sim 7\text{cm}^2$ 에서 적용이 가능하며, DMT-A 방법이 DMT-C 방법의  $t_{50}$ 보다 1/2값을 가진다고 하였다.

한편 CPTu의 간극수압소산시험을 통해 수평압밀계수( $C_h(\text{CPTu})$ )를 산정하고, 이론해는 Torstensson (1977), Baligh와 Levadoux(1980), Levadoux와 Baligh(1986), Housby와 Teh(1991)의 방법이 제안 되었으며, 이 들 제안 식은 표 1과 같다. 다만 이들이 제시한 다양한 이론 시간계수들 중 큰 주변에 유발되는 공동의 형태, 강성지수 그리고 과압밀 등의 지반상태를 고려하여 적절한 시간계수 값을 선택하는 것은 매우 어려운 점을 언급하였다(김영상외, 1997). 본 연구에서는 압밀계수 추정을 위해 시간계수는 실내시험결과를 토대로 비교적 근사한 값인 강성지수( $I_r$ ) 100을 이용하였다.

표 1. CPTu의 수평압밀계수 제안식

| 제안자                    | 제안식  | 비고   |
|------------------------|--|--|
| Torstensson(1977)      | $C_h = \frac{R^2 T_{50}}{t_{50}} \quad (7)$  | R : 등가원추반지름<br>T : 시간계수<br>( $U_{50\%}$ :각각 0.58, 3.65, 5.60, 2.45)<br>$t_{50}$ : 50% 압밀도의 소산시간<br>$I_r$ : 강성지수<br>( $G/Su=Eu/3Su$ ) |
| Baligh와 Levadoux(1980) | $C_h = \frac{R^2 T}{t} \quad (8)$            |  |
| Levadoux와 Baligh(1986) |  |  |
| Housby와 Teh(1991)      | $C_h = \frac{R^2 T}{t} \sqrt{I_r} \quad (9)$ |  |

### 3. 지반 조건

본 연구의 시험연구 대상부지는 영종지역(인천대교), 시화지역 및 광양항지역으로 현장시험으로 DMT와 CPTu 등의 현장시험을 수행하였다. 대상지역의 지반특성은 영종지역의 경우 영종도에서 내륙으로 진입되는 진입부로 염전부지와 전답이 형성된 연약지반구간으로 표층부는 전답토층이 약 1.7m까지 형성되어 있고 퇴적층은 1.7m~10.5m에 실트질 점토(CL)층이 형성되었다. 표준관입저항치(N)는 0/30~5/30으로 매우 연약한 상태이고 그 이하의 퇴적층은 견고한 점토층과 풍화대가 형성되어 있다. 시화지역은 반월특수지역으로 1단계 확장단지구간으로 지층은 해성퇴적층은 약 35m~38m정도이고 연약지반은 10m~30m로 대부분 실트질 점토(CL), 모래질 실트(ML) 및 실트질 모래(SM)층으로서 N는 2/30~7/30정도로 나타났다. 광양지역은 광양시 광양읍과 황길동사이로 광양항 서측인접철도구간으로 여수반도와 남해도로로 둘러싸인 반폐쇄적인 지형으로 단지부는 매우 연약한 준설매립층과 원지반 점토층으로 분포하며 연약층은 고소성 점토(CH)층으로 N치는 자중침하로 0/30~2/30정도를 보인다.

또한 각 지역의 지층특성을 그림 2와 같이 간극수압계수( $B_q$ )와 정규화된 콘 관입저항치( $q_T$ )를 비교하여 상세하게 알 수 있다. 그림 2(a)의 영종지역에서 간극수압계수( $B_q$ )는 -0.4~0.4값에서 원추관입저항치( $q_T$ )는 3kg/cm<sup>2</sup>~100kg/cm<sup>2</sup>값을 보이고 원추관입저항치가 50kg/cm<sup>2</sup>이상일 때의 간극수압계수는 거의 0 부근에 가까운 것으로 나타났으며, 과압밀비가 커질수록 간극수압계수( $B_q$ )는 작았다. 이 지역의 흙의 종류는 대부분 ③번~⑤번 영역에 분포하며 점토, 실트질 점토에서 점토질 실트 내지 실트질 점토가 대부분으로 통일분류법의 실트질 점토(CL)와 일치하였다.

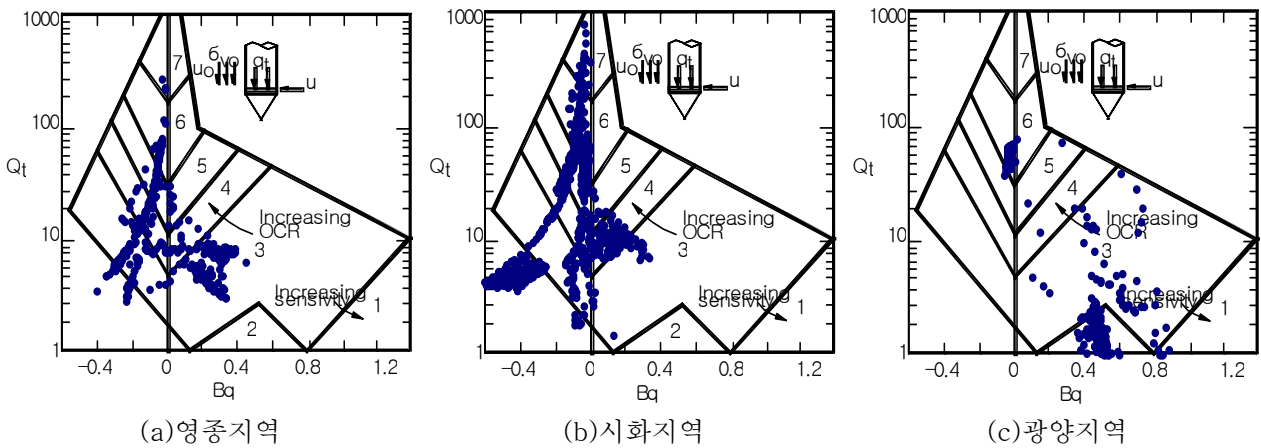


그림 2. 대상지역의 CPTu의 간극수압계수( $B_q$ )을 이용한 흙의 분류

그림 2(b)에서 흙의 분포는 그림 2(a)의 영종지역과 유사한 영역을 보이나 실트와 실트질 모래가 부분적으로 많이 나타난다. 그리고 그림 2(c)의 광양지역에서 간극수압계수( $B_q$ )은 0.0~1.0의 값을 가진다. 원추관입저항치( $q_T$ )는 1kg/cm<sup>2</sup>~5kg/cm<sup>2</sup>값을 보이며 대부분 ②번~④번 영역에 분포하고 점토, 실트질 점토내지 점토가 대부분으로 통일분류법의 CH와 일치하고 있다.

그림 3은 인천 영종지역에서 수행한 DMT시험결과이다. 이 지역은 재료지수( $I_D$ )는 지표면 약 0.6m부터 조사심도 약 9.4m까지 약 0.15~2.15로 흙의 분류는 4m~5.2m사이의 실트층을 제외하면 대부분 점토층으로 그림 2(a)의 CPTu의 간극수압계수( $B_q$ )을 이용한 흙의 분류에 의한 방법과 일치하고 있다. 이때의 수평응력지수( $K_D$ )는 지표면에서 약 0.6m까지를 제외하면 대부분 4이하의 값을 보이고 비배수전단강도( $C_u$ )는 약 0.1~0.7kg/cm<sup>2</sup>를 보인다.

그림 4의 시화지역의 DMT시험결과에 의한 흙의 분류는 지표면에서 0.6m까지를 제외한 대부분의 지층에서 점토층으로 그림 2(b)의 CPTu의 흙 분류와 일치하였다. 그리고 수평응력지수( $K_D$ )는 지표면 상부 약 0.6m까지를 제외하면 대부분 3이하의 값을 보이고 비배수전단강도( $C_u$ )는 0.5kg/cm<sup>2</sup>이하로 연약점토층을 보인다.

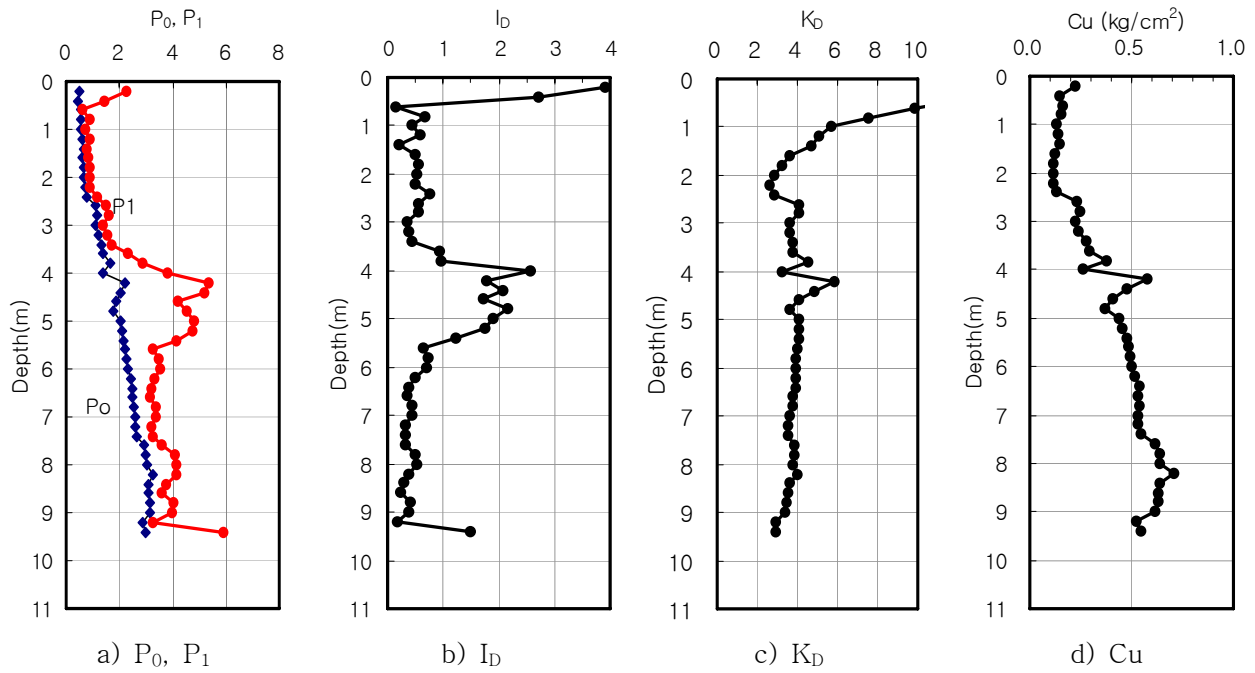


그림 3. 영종지역의 DMT시험결과(인천대교)

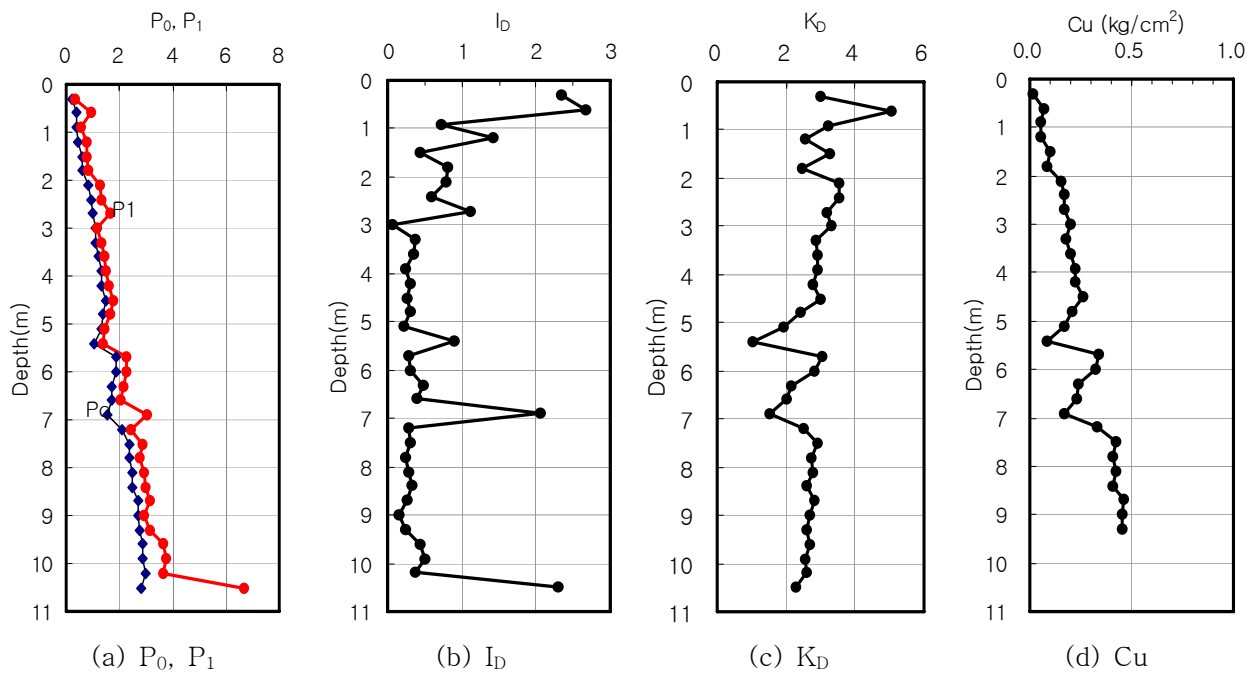


그림 4. 시화지역의 DMT시험결과

광양지역에서 수행한 DMT시험결과는 그림 5이다. 이 지역은 고소성 점토(CH)층으로 재료지수( $I_D$ )가 0.6이하를 보이고 수평응력지수( $K_D$ )는 지표 상부층을 제외하면 대부분 2이하의 값으로 정규압밀점토이며 이때의 비배수전단강도(Cu)의 크기는 약  $0.05\text{kg/cm}^2 \sim 0.53\text{kg/cm}^2$  정도로 매우 연약한 점토층이다. 이는 그림 2(c)의 CPTu의 흙 분류와 통일분류법의 CH와 일치한다.

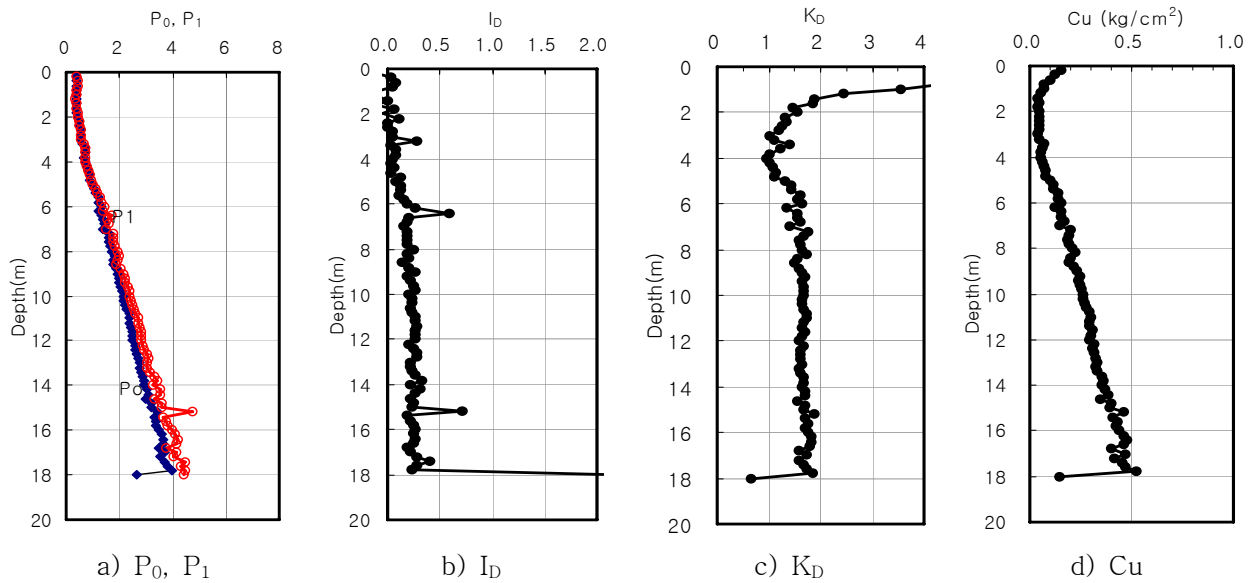
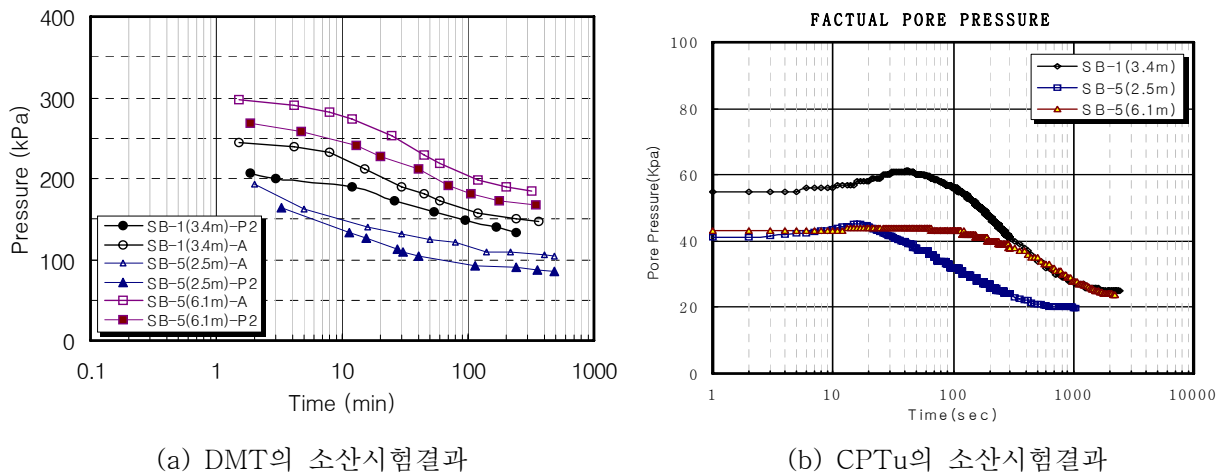


그림 5. 광양지역의 DMT시험결과

#### 4. 시험결과 및 분석

본 연구지역의 연약점토층을 대상으로 해성점토의 수평압밀계수를 평가하기 위하여 DMT의 소산시험 결과와 CPTu의 소산시험결과는 그림 6에서 그림 10과 같다. 그림 6은 인천 영종지역의 DMT와 CPTu의 소산시험결과로 그림 6에서 그림 9(a)에서는 Robertson 등(1988)이 제안한  $P_2$ -Log(t)방법과 Marchetti와 Totani (1989)가 제안한 것으로 A-log(t)소산 곡선의 시험결과이고 그림 6에서 그림 9(b)는 CPTu의 소산시험의 실측값이다.



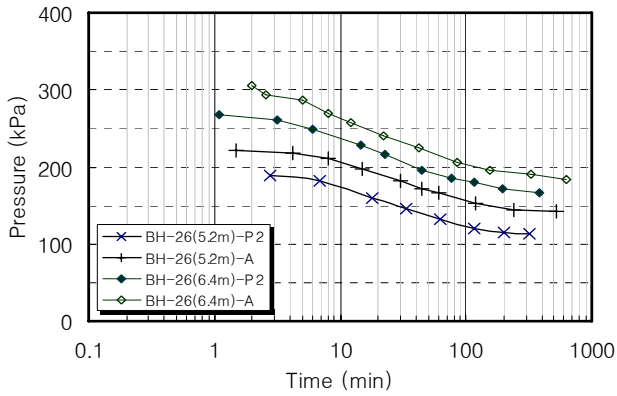
(a) DMT의 소산시험결과

(b) CPTu의 소산시험결과

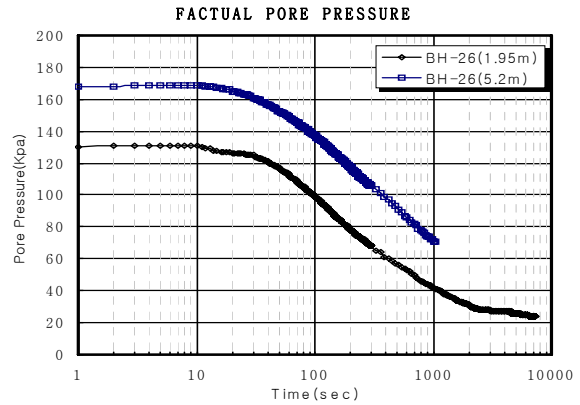
그림 6. DMT 및 CPTu의 소산시험결과(영종지역(인천대교))

그림 6은 인천 영종지역의 DMT와 CPTu의 소산시험결과는 그림 6이다. 그림 6(a)에서는 Robertson 등(1988)이 제안한  $P_2$ -Log(t)방법과 Marchetti와 Totani(1989)가 제안한 것으로 A-log(t)소산 곡선의 시험결과이고, 그림 6(b)는 CPTu의 소산시험의 실측값이다. 그림 7은 시화지역의 DMT와 CPTu의 소산시험결과이고, 그림 8은 광양지역의 DMT와 CPTu의 소산시험결과이다. 그림 6~그림 8의 DMT와 CPTu의 소산시험결과를 토대로 DMT의 경우 DMT-A방법과 DMT-C는  $C-\sqrt{t}(\text{min})$ 방법과  $P_2$ -Log(t)

방법으로 수평압밀계수를 산정하여 실내 압밀시험의 연직압밀계수와 상호 비교하였으며 CPTu의 경우의 표 1의 방법으로 산정한 수평압밀계수를 상호 비교하였다.

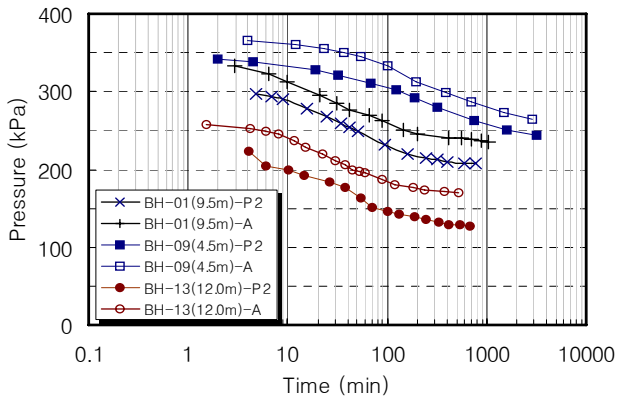


(a) DMT의 소산시험결과

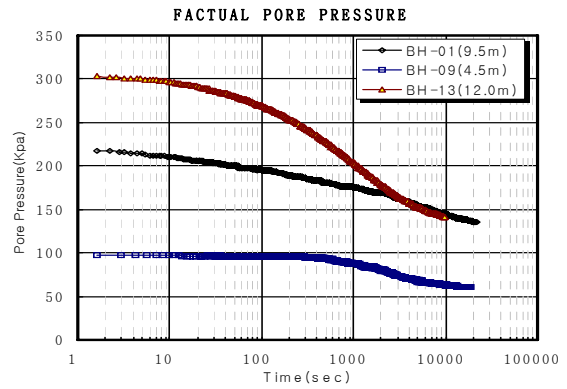


(b) CPTu의 소산시험결과

그림 7. DMT 및 CPTu의 소산시험결과(시화지역)

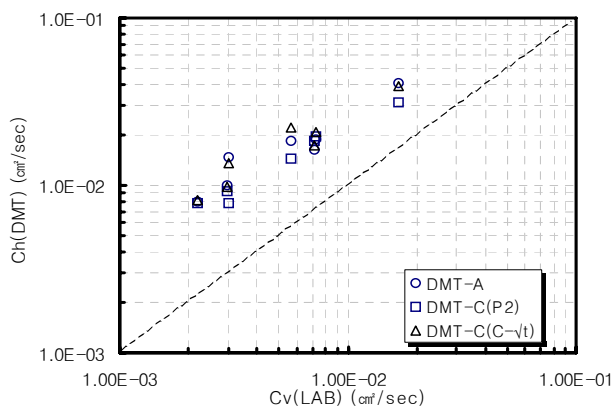


(a) DMT의 소산시험결과

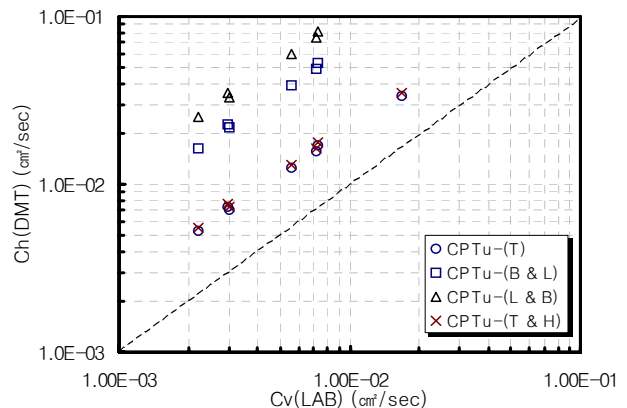


(b) CPTu의 소산시험결과

그림 8. DMT 및 CPTu의 소산시험결과(광양지역)



(a) 압밀시험의  $C_v$ 와 DMT의  $C_h$ 비교



(b) 압밀시험의  $C_v$ 와 CPTu의  $C_h$ 비교

그림 9. 표준압밀시험의 연직압밀계수와 각 제안방법에 따른 수평압밀계수 비교

그림 9는 표준압밀시험의 연직압밀계수와 제안방법에 따른 수평압밀계수를 비교한 것으로 표준압밀시험의 연직압밀계수에 비하여 DMT와 CPTu의 수평압밀계수( $C_h$ )는 각 제안자들의 제안방법에 따라 약 1.8배~8.4배정도로 많은 차이를 보인다. 그림 9(a)의 표준압밀시험의  $C_v$ 와 DMT의  $C_h$ 와의 비교에서도 압밀계수비( $C_h/C_v$ )는 약 1.9배~2.3배 정도의 차이를 보이며,  $P_2$ -Log(t)방법에 비하여 DMT-A방법과  $C-\sqrt{t}$ (min)방법은 약간 크게 산정되었다. 그림 9(b)의 CPTu로 산정한 수평압밀계수는 Torstensson의 이론해와 Houlsby와 Teh(1991)의 이론해가 잘 일치하였으며, 표준압밀시험의  $C_v$ 와 CPTu의  $C_h$ 와의 압밀계수비( $C_h/C_v$ )는 1.8배로 나타났다. 이처럼 DMT의  $P_2$ -Log(t)방법과 CPTu로 산정한 수평압밀계수는 그림 10과 같이 Torstensson의 이론해와 Houlsby와 Teh(1991)의 이론해가 근사한 값으로 일치하였다.

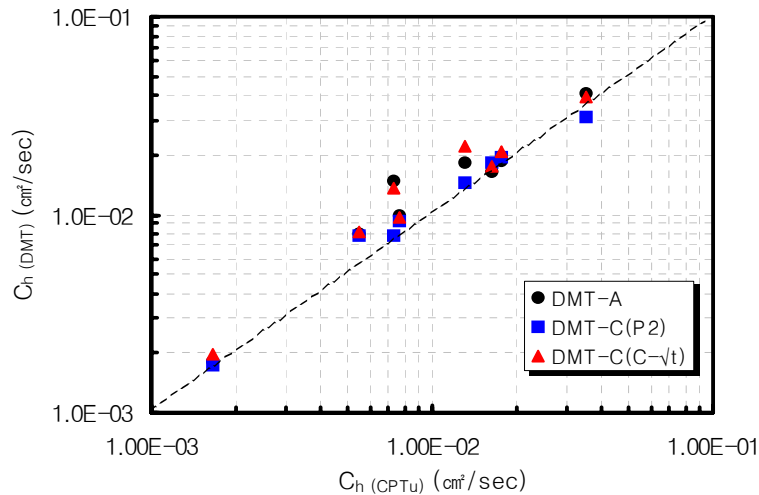


그림 10. CPTu의 Houlsby와 Teh(1991)이론해와 DMT의 수평압밀계수( $C_h$ )와의 비교

## 5. 결론

본 연구에서는 연약지반 특성을 파악을 위해 DMT의 소산시험을 바탕으로 수평압밀계수를 산정하고 CPTu의 소산시험, 실내압밀시험 등의 압밀계수( $C_v$ )와 비교-분석을 한 결과는 다음과 같다.

1. DMT와 CPTu의 수평압밀계수( $C_h$ ) 비교 결과 DMT의 경우  $P_2$ -Log(t)방법에 비하여 DMT-A방법과  $C-\sqrt{t}$ (min)방법은 약간 크게 산정되었으며 실내 연직압밀계수와의 압밀계수비( $C_h/C_v$ )는 약 1.9배~2.3배 정도의 차이를 보였다. CPTu로 산정한 수평압밀계수는 각 제안자들의 제안방법에 따라 약 1.8배~8.4배 정도의 차이를 보였고 Torstensson의 이론해와 Houlsby와 Teh(1991)의 이론해가 잘 일치하며 압밀시험의 압밀계수비( $C_h/C_v$ )는 1.8배로 나타났다.
2. DMT의  $P_2$ -Log(t)방법과 CPTu의 Torstensson의 이론해와 Houlsby와 Teh(1991)의 이론해가 근사한 경향을 보이고 있는데 한정된 시험 결과만을 추정된 것으로 보다 많은 자료축적을 통해 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 이승래, 김영상, 성주현, (2001), "딜라토미터를 이용한 수평압밀계수 추정법의 국내 지반 적용성 평가", 한국지반공학회 논문집, 17(4), pp.153~160.
2. 김영상, (2003), "피에조콘을 이용한 점토의 비배수전단강도 추정예의 인공신경망 이론 적용", 한국지반공학회 논문집, 19(4), pp.287~298.
3. Baligh, M.M., Levadox, J. N., (1986), "Consolidation after Undrained Piezocone Penetration, II:



- Interpretation," Journal of Geotechnical Engineering, 112(7), pp.727~745.
4. Campanella, R.G., Robertson, P.K., (1988), "Current Status of the Piezocone Test", Invited Lecture, 1st International Conference on Penetration Testing, Disney World, pp.93~116.
  5. Marchetti, S., (1980), "In-Situ Tests by Flat Dilatometer", Journal of Geotechnical Engineering, 106, pp.299~321.
  6. Schmertmann, J. H., (1986), "Suggested Method for Performing the Flat Dilatometer Test", ASTM Geotechnical Testing Journal, 9, pp.93~101.
  7. Teh, C.I., Houlsby, G.T., (1991), "An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay", Geotechnique, No.41, 1, pp.17~34.
  8. Torstensson, B.A., (1977), "The Pore Pressure Probe", Nordiske Geotekniske Mote, Oslo, Paper No. 34, pp.34.1~34.15.