

## Cone Pressurimeter, PMT, Vane 시험을 이용한 지반조사 사례연구 The practical application of Cone Pressuremeter, PMT, Vane tests to site investigation

이장덕<sup>1)</sup>, Chang-tok Yi, 구자갑<sup>2)</sup>, Ja-kap Koo, 김종수<sup>3)</sup>, Jong-su Kim, 이송<sup>4)</sup>, Song Lee

<sup>1)</sup> B&G 건설엔지니어링 연구소장, Director, B&G Construction Engineering.

<sup>2)</sup> 국립환경대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Hankyong National University.

<sup>3)</sup> 현대산업(주) 토목설계팀, Hyundai Industrial Construction Ltd.

<sup>4)</sup> 서울시립대학교 토목공학과 교수, Professor, University of Seoul

**SYNOPSIS** : The concepts of mounting a pressuremeter module behind a cone penetrometer was applied in the early 1980s. The pressuremeter module is of 40mm diameter with length / diameter ratio of 10 inflated by nitrogen gas. This cone pressuremeter(CPM) is used to obtain the ground characteristics consisted of mainly silty, clay and sand. Field tests such as SPT, PMT, Vane tests are also carried out to understand the ground condition. Undisturbed samples are obtained to carried out Lab tests. The results of these field and lab tests are presented, discussed in detail, and compared with each others.

**Key Words** : CPM, PMT, CPT, Vane, 압밀시험, 비배수전단강도

### 1. 서론

실내시험에서 시료의 교란, 응력경로, 현장상태 재현등의 한계로 인해 지반조사시 보다 신뢰성 있는 지반의 공학적 특성 파악을 위해서 현장시험의 수요는 날로 증대해가고 있는 실정이다. 더구나 전자, 기계 산업의 발달과 더불어 계측장비의 발달은 현장시험 결과의 신뢰도를 향상시켜가고 있으며 새로운 현장시험 장비의 개발로 이어지고 있다. 국내에서도 종래에는 표준관입시험(SPT)으로 대표되는 현장시험들이 최근에는 PMT등의 현장시험에 대한 수요가 증대해가고 있을 뿐 아니라 연약지반의 경우 CPT, Vane시험 등의 현장시험이 일반화되어 가고 있는 추세이다. 하지만 이러한 현장시험의 수요가 증대하여 감에도 불구하고 현장시험의 결과의 체계적인 연구는 국내에서 활발하지 않은 것이 사실이다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 control site를 정하고 이곳에 Cone Pressuremeter(CPM), Menard type PMT, Geonor Vane를 수행하고 piston sampler로 비교란 시료를 채취하여 일축 삼축, Rowe cell 압밀등 실내시험을 수행하여 실내시험과 현장시험의 결과 등을 비교, 분석하였다.

## 2. 현장, 실내시험

### 2.1 현장시험 장비

#### 2.1.1 Cone Pressuremeter(CPM)

Cone Pressuremeter(CPM)은 10cm<sup>3</sup>의 콘 위에 직경이 40mm이고 길이가 40cm인 PMT를 장착하여 콘 관입장치로 관입하면서 콘저항치, 마찰, 간극수압을 콘으로부터 측정하고 원하는 위치에서 PMT시험을 수행할 수 있는 장비로 1985년 해상지반조사를 목적으로 개발되었다. 그러나 1989년부터는 다른 PMT 장비보다 경제적이고 적용지반이 다양하여 육상지반조사에서도 사용되고 있다. PMT 시험에서 시험결과에 중대한 영향을 미치는 것은 지반의 교란으로 이러한 지반교란을 최소화시키고 신뢰성 있는 시험결과를 얻기 위하여 self boring pressuremeter(SBP)가 개발되어 사용되어 오고 있다.

Whittle(1995)에 의하면 같은 지반에 CPM과 SBP를 수행하여 그 결과를 비교한 결과 CPM과 SBP의 초기응력-변위곡선이 유사하며 실험이 잘된 CPM의 결과는 SBP와 같이 신뢰성 있는 지반의 전단변형 계수등을 얻을 수 있는 것으로 평가하였다. CPM을 mono cell로써 질소 가스로 고무막(rubber membrane)을 부풀리며 cell에 유입되는 유량으로 체적변화를 측정하여 압력-체적변화 곡선을 얻을 수 있다. 여기서 사용하는 고무막은 지반의 강성에 따라 고무막, 알루미늄 보강 커튼등을 사용할 수 있으며 보정압력-체적변화 곡선을 얻을 수 있는 보정계수(calibration factor)가 필요하다.

#### 2.1.2 Cone penetration test(CPT)

CPT는 스웨덴의 Geotech사 제품으로 콘저항치는 최대 50MPa를 마찰력은 0.5MPa 그리고 간극수압은 2.50MPa의 범위를 측정할 수 있으며 시험전 콘을 포화시켜 간극수압이 신뢰성 있게 얻을 수 있도록 하였다.

#### 2.1.3 Pressuremeter(PMT)

Pressuremeter는 Menard 타입으로 Probe는 세 개의 cell로 구성되어 있으며 압력은 질소가스로 measuring cell 주위의 guard cell를 부풀린다. 또한 measuring cell의 팽창시 guard cell과 압력이 균형 이루어져 measuring cell이 일정하게 부풀 수 있도록 하였다. 조사지반의 강성(stiffness)에 따라 각각 강성이 다른 고무막(rubber membrane)을 교환사용 할 수 있으며 체적팽창은 지표면에 있는 control panel에서 읽을 수 있도록 되어있다.

#### 2.1.4 Vane 시험

Geonor Vane 시험기를 이용하여 원지반상태의 비배수 전단강도를 측정하였는데, 보링공 저면에 위치한 시험대상 지층의 단부로부터 시추공 직경의 3배이상 관입시킨 후 룯드를 일정한 속도로 회전시키면서 흙속의 베인이 최대회전각을 나타내거나 속도가 일정하게 유지할 때까지 실시하였고 교란된 흙에 대해 예민비로 산출하도록 하였다.

### 2.1.5 Rowe Cell 압밀시험

지반의 수평 압밀계수를 측정하기 위하여 Rowe cell 압밀시험을 수행하였다. Rowe cell에 사용한 수직배수제는 주문진표준사를 이용하였다.

### 2.2 Control Site의 특성

그림 1은 control site의 지층상태를 보인것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상부 매립토층은 담갈색의 실트질층이며 매립토층 하부는 약 5.5m 깊이의 퇴적층으로 점토질 실트에서 모래섞인 실트층으로 구성되어 있다. 지하수위는 지표면에서 2.0m 아래 위치하고 있으며 풍화암은 지표에서부터 12.8m에 위치하고 있다. CPT, PMT, Vane, CPM 등 모든 현장시험이 지표면에서 하부 8.0m 깊이에서 수행하였으며 피스톤 샘플러를 이용한 비교란 시료도 현장시험이 수행되었던 지층에서 채취하여 실내시험을 수행하였다. 하지만 이러한 지층은 실트질 및 모래질 성분이 우세하여 지반의 배수조건에 따라 지반물성치가 영향을 받을 수 있다. Lunne et al.(1995)에 의하면 입자가 순수 점토와 모래사이에 분포한 점토질 모래나 모래질 실트등은 CPT시험 해석시 점토지반이나 모래지반에 적용했던 해석방법을 적용하는데 한계가 있는 것으로 보고 하고 있으며, Bugno와 McNeilan(1984)는 지반의 투수계수가  $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$  보다 적어야 콘 관입속도인  $2\text{cm/sec}$ 가 비배수 조건에 적합하다고 하였다. 그러므로 지반의 투수계수가  $10^{-6} \sim 10^{-3} \text{cm/sec}$  범위에 있다면 이러한 지반은 대부분 실트질 지반으로 부분적인 배수상태로 거동한다고 보며 이 경우 CPT, PMT, Vane시험 등의 해석시 배수조건에 영향을 고려해야 한다. 그러나 본 지반의 시험결과 표준압밀시험에 의한 지반의 투수계수가  $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$ 로 평가되었을 뿐 아니라 PMT, Vane, CPT 현장시험의 소요시간이 짧아 실트질 지반이지만 비배수 조건을 고려하여 지반물성을 평가하도록 하였다.

심도(m)	지 층 설 명	N (심도)	C P T		
			심도(m) ( 평균 )	$q_t \sim F_r$ (Robertson, 1986)	$Q_t(1-B_0) \sim F_r$ (Jefferies & Davies, 1991)
2.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>매립토층</li> <li>심도 0.0 ~ 2.5m</li> <li>느슨 내지 보풍조밀, 습윤, 담갈색</li> <li>실트</li> </ul>	12/30 (0.4m) 9/30 (1.6m) 7/30 (3.0m)	2.5~4.3 (3.4)	Silty sand to sandy silt	Sand-clean sand to silty sand
5.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>퇴적토층</li> <li>심도 2.5 ~ 7.5m</li> <li>느슨, 습윤, 암회색</li> <li>실트</li> <li>- 2.5-5.6m : 점토섞인 실트</li> <li>- 5.6-6.2m : 실트질 모래</li> <li>- 6.2-7.5m : 모래섞인 실트</li> </ul>	5/30 (4.6m)	4.3~5.6 (5.0)	silty sand to sandy silt	Sand-clean sand to silty sand
7.5			5.6~6.6 (6.0)	sand to silty sand	Sand-clean sand to silty sand
8.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>퇴적토층</li> <li>심도 7.5 ~ 8.0m</li> <li>느슨내지 보풍조밀, 습윤, 암회색</li> <li>점토질 세립내지 조립 모래</li> </ul>	4/30 (6.0m)	6.6~7.5 (7.2)	Silty sand to sandy silt	Sand mixtures silty sand to sandy silt
8.0	<ul style="list-style-type: none"> <li>퇴적토층</li> <li>심도 8.0 ~ 11.0m</li> <li>조밀 내지 매우조밀, 습윤, 담회색</li> <li>자갈섞인 세립내지 조립내지</li> </ul>	5/30 (7.5m)	7.5~8.15 (8.0)	Sandy silt to clayey silt	Silt mixtures clayey silt to silty clay
11.0			8.15~8.675 (8.4)	Sand	Sand-clean sand to silty sand

그림1. Control Site 지층

## 2.2.1 지층구분

지층을 구분할 수 있는 현장시험으로써는 SPT, CPT, PMT를 들 수 있다. 그림 1은 시추조사시 채취한 교란시료를 근거로 지층을 구분한 것이며, 그림 2는 CPT 시험결과인 콘저항치, 마찰, 간극수압 및 마찰비등을 보인 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 상부지층에서는 부의 과잉 간극수압이 측정되었는데 이는 상부의 실트질 지층이 어느 정도 과압밀되어 있어 콘관입시 콘주위로 작은 동공(cavities)가 생겨 부의 과잉간극수압이 발생했던 것으로 추정되며 이러한 현상은 조밀한 실트 모래층에 CPT 시험시에도 발생한다. 이러한 부의 과잉간극수압이 발생할 경우 수정 콘저항치( $q_c$ )는  $q_c + (1 - a) u$ 로 표시되는데 본 조사에서 사용한 콘 면적계수  $a$ 는 0.58으로 간극수압( $u$ )가 크지 않은 경우에는  $q_c$ 값을 그대로 사용하는 것이 타당한 것으로 보고있다( Robertson, 1997).

그러므로 CPT를 이용한 지반분류시 보정없이  $q_c$ 값을 그대로 사용하였으며 Douglas and Olsen(1981), Robertson et. al(1986) 분류도표등을 이용하여 지층분류를 하였으며 그 결과를 표 1에 정리하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 Douglas and Olsen과 Robertson(1990)의 분류결과는 시추조사시 발견되지 않은 유기질토로 존재하는 것으로 분류된 반면 Jefferies and Davies(1991)과 Robertson(1990)은 시추조사 결과와 유사한 것을 볼 수 있다.

PMT 결과로는 직접적인 지층구분이 불가능하지만  $P_l$ (limit pressure)와  $E_m$ (pressuremeter modulus)로부터 대략적인 지층구분이 가능하다. 시험결과  $P_l$ 은 1.18~5.4 kg/cm<sup>2</sup>의 범위로 Gambin(1988)의 분류법에 의하면 느슨한 실트질 정도로 분류되어 PMT 결과를 이용한 세부적인 지층구분은 한계가 있는 것으로 판단된다.

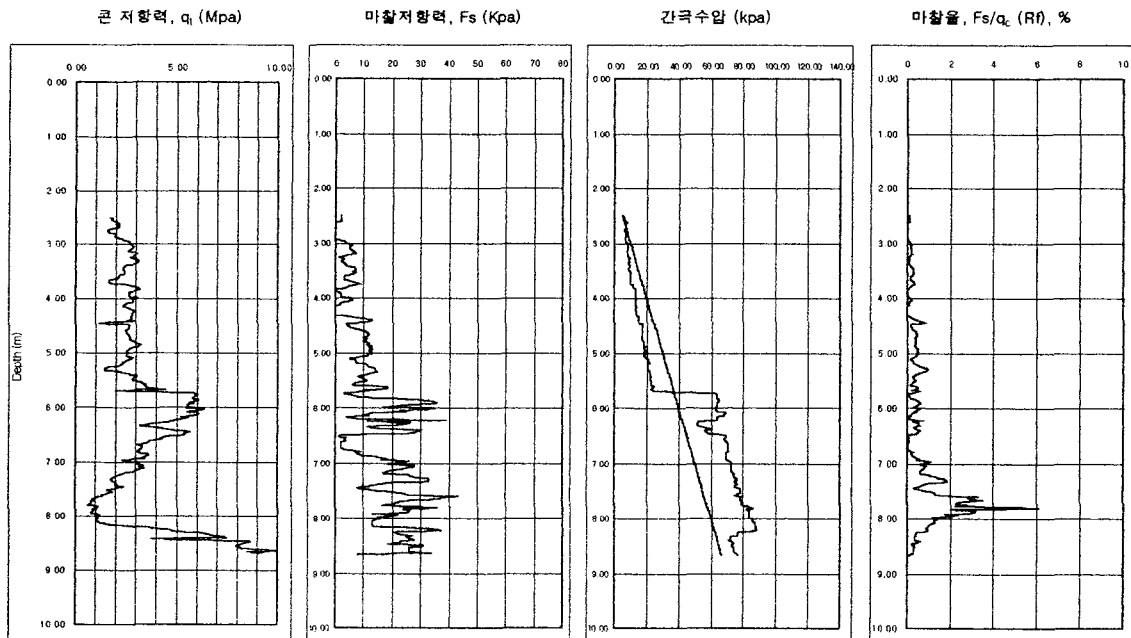


그림 2. CPT 시험 결과

표 1. CPT에 의한 지반분류

심도(m) (평균)	$q_t \sim F_r$ (Douglas & Olsen, 1981)	$q_t \sim B_q$ (Robertson, 1986)	$q_t \sim F_r$ (Robertson, 1986)	$Q_t \sim F_r$ (Robertson, 1990)	$Q_t \sim B_q$ (Robertson, 1990)	$Q_t(1-B_q) \sim F_r$ (Jefferies & Davies, 1991)
2.5~4.3 (3.4)	Metastable sands	Silty sand to sandy silt	Silty sand to sandy silt	Sensitive, fine grained;	Sensitive, fine grained;	Sand-clean sand to silty sand
4.3~5.6 (5.0)	Metastable sands	Silty sand to sandy silt	Silty sand to sandy silt	Sensitive, fine grained;	Sensitive, fine grained;	Sand-clean sand to silty sand
5.6~6.6 (6.0)	Metastable sands	Sand to silty sand	Sand to silty sand	Sensitive, fine grained;	Silt mixtures clayey silt to silty clay	Sand-clean sand to silty sand
6.6~7.5 (7.2)	Metastable sands	Silty sand to sandy silt	Silty sand to sandy silt	Sensitive, fine grained;	Sensitive, fine grained;	Sand mixtures-silty sand to sandy silt
7.5~8.15 (8.0)	Sensitive mixed soils	Sandy silt to clayey silt	Sandy silt to clayey silt	Organic soil-peats;	Organic soil-peats;	Silt mixtures-clayey silt to silty clay
8.15~8.675 (8.4)	Metastable sands	Sand	Sand	Sand mixtures clayey silt to silty clay	Silt mixtures clayey silt to silty clay	Sand-clean sand to silty sand

### 2.2.2 비배수 전단강도

흙의 파괴형태(mode of failure), 흙의 이방성, 변형속도, 응력경로 등에 따라 지반의 비배수 전단강도는 영향을 받는다. 현장시험으로부터 지반의 비배수강도를 구할 때 흙의 이방성, 변형속도의 영향은 피할 수 없으므로 가능한 지반교란과, 흙의 이방성, 변형속도를 고려한 경험적인 보정식이 비배수 전단강도를 구하는 식으로 사용되고 있다. 그러므로 CPT를 이용한 비배수 전단강도의 산정을 위해서  $q_t$ 와  $q_c$ 를 이용하여 다음과 같은 식으로부터 비배수 전단강도를 구할 수 있다.

$$S_u = \frac{(q_c - \sigma_{vo})}{N_k} \qquad S_u = \frac{(q_t - \sigma_{vo})}{N_{kt}}$$

여기서  $N_k$ 는 11~19까지 변하는 상수로 평균치 15를 사용하였으며(Kleven, 1981)  $N_{kt}$ 는 Aas et al.(1986)에 의한 OCR과 소성지수(plasticity index)의 영향으로부터 구한 14를 사용하였다. PMT나 CPM 시험결과로부터 비배수 전단강도 산정은 cylindrical 동공확장이론으로부터 공벽에 변형이 발생시 체적변화가 없는 것으로 가정하여 다음과 같은 식으로부터 얻을 수 있다.

$$\tau = dp/d[\ln(\Delta v/v)]$$

PMT나 CPM 결과를 그림3과 같이 P와  $\ln(\Delta v/v)$ 의 관계를 그려보면 변형이 어느 정도 발생후 곡선은 직선형태로 바뀌는데 이는 지반을 탄소성이라 가정하면 어느 정도 변형 발생후 전단강도는 일정하게 되므로 직선부의 기울기가 지반의 비배수 강도가 된다.

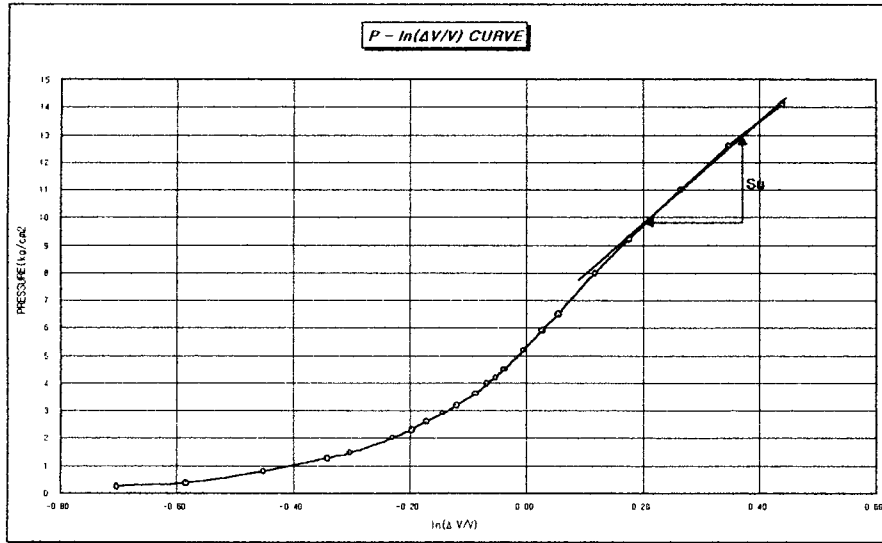


그림 3. P - ln(ΔV/V) 곡선으로 구한 비배수 전단강도

표 2. 비배수 전단강도 (kg/cm²)

심도(m)	CPT		PMT	CPM	VANE
	Su(q <sub>c</sub> )	Su(q <sub>t</sub> )			
7.2	1.667	1.81	2.3	1.82	2.693
7.7	0.425	0.477	0.586	0.464	0.5614

### 2.2.3 예민비

예민비는 교란시료와 비교란 시료의 비배수 전단강도의 비로 표시된다. CPT 결과로부터 예민비는 마찰비(R<sub>f</sub>, friction ratio)로부터 다음과 같이 평가할 수 있다.  $S_t = \frac{N_s}{R_f}$  여기서 N<sub>s</sub>는 5~10까지 변하는 상수로 Rad and Lunne(1986)은 평균값인 7.5를 제안하고 있다. 표 3은 CPT, Vane은 일축시험으로부터 구한 예민비를 나타낸 것이다.

표 3. 현장시험과 실내시험에 의한 예민비

심도(m)	일축	Vane	CPT
7.0	6.1	7	10
7.7		4	2.7

표 3에서 보는 바와 같이 일축시험에 의한 예민비는 현장시험의 결과와 비교하여 볼 때 작게 평가되었는데 이는 시료의 교란, 실트질 성분이 우세하여 시료성형 등의 영향으로 현장시험과 차이를 보이고 있는 것으로 판단된다.

### 2.2.4 수평 압밀계수

CPT의 소산시험으로부터 수평압밀계수를 구할 수 있으며 실내에서는 Rowecell 압밀시험기로부터 구한 수평압밀계수를 비교하였다. 그림 4는 CPT의 소산시험의 결과를 압밀도와 소산시간과의 관계로 그린 것이다.

압밀도와 시간과의 관계는 다음식으로 정의되며,

$$T = \frac{C_h \cdot t}{r^2 \sqrt{I_r}}$$

여기서  $r$ 은 콘의 직경,  $c_h$ 은 수평압밀계수이며  $I_r = \frac{G}{S_u}$ 로 rigidity index라 한다. 50%의 압밀이 진행됐을 때 time factor  $T$ 는 0.245이므로 이 소산시험에 의한 수평압밀계수를 구할 수 있다. 표 4는 CPT와 Rowe cell 압밀시험기로부터 구한 압밀계수이다.

표 4. 압밀계수 ( $cm^2/sec$ )

CPT	Rowe-cell 압밀
$1.16 \times 10^{-3}$	$5.2 \times 10^{-3}$

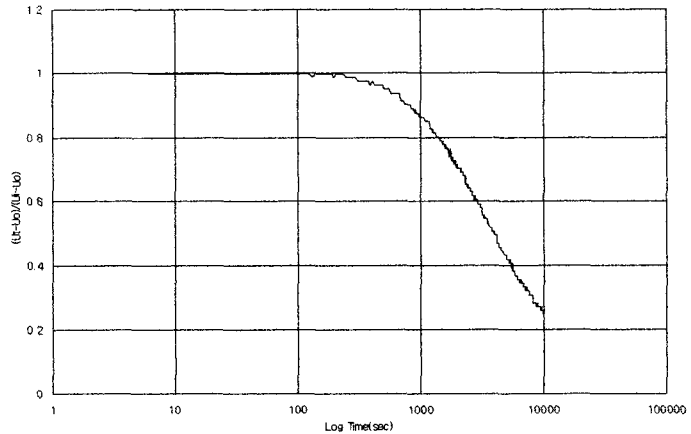


그림 4. 압밀도와 소산시간의 관계

### 3. PMT, CPM

CPM은 아직까지 국내에 널리 보급되지 않았을 뿐 아니라 사용 실적도 전무한 상태로 이에 대한 연구도 활발하지 않은 편이다. Whittle(1995)는 CPM과 self boring pressuremeter(SBP)의 특성을 비교하여 발표하였다. CPM은 콘이 관입되면서 발생하는 간극수압의 영향이 시험의 결과에 영향을 미치는 것 이외에는 SBP와 CPM은 초기 압력-변형곡선이 유사하여 SBP와 CPM에서 구한 전단변형계수가 유사하다고 발표하였다. 하지만 CPM을 국내현장에 적용하기 위해서는 국내에서 사용되고 있는 PMT 결과와 상관성을 확인하는 것이 필요하다. 그림5는 동일한 심도에서 CPM과 PMT의 압력-체적변화 관계를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 초기에는 압력-변형곡선이 차이가 있는데 이는 설치방법에 따른 지반의 교란 또는 공벽과 probe의 접촉정도에 기인한 것으로 판단되며 곡선의 기울기( $E_m$ )과 한계압도 ( $P_\ell$ )도 CPM의 결과가 크게 평가된 것으로 조사되었다.

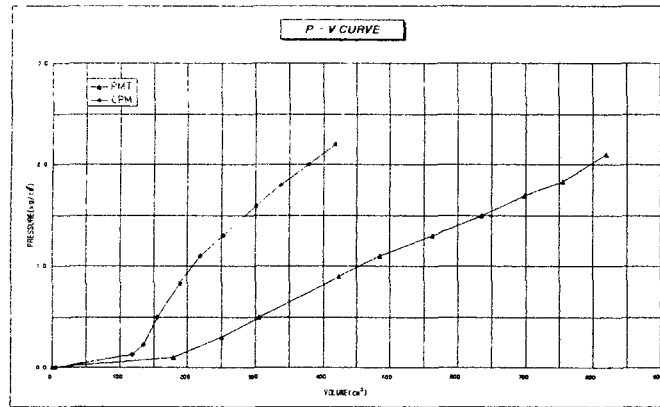


그림 5. CPM과 PMT의 압력-변형 관계

#### 4. 결 론

실트질 점토등이 우세한 퇴적지층에 CPT, PMT, CPM, Vane등 현장시험과 Piston Sampler을 이용한 비교란 시료를 채취하여 실내시험을 수행하여 각 시험 결과를 비교, 검토하였다. 시험개소와 상부 실트질 성분이 우세한 지층에 대한 실내시험의 한계 등으로 시험 데이터가 충분하지 못한 한계가 있었지만 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) CPT에 의한 지반분류결과 시추조사결과와 유사한 지층구조를 갖는 것으로 평가되었다.
- (2) 각 시험 방법에 의한 지반의 비배수 전단강도와 비슷한 양상을 보이는 것으로 평가되었으며 Vane 시험이 약간 크게 평가되었는데 이는 전단속도 등의 요인에 의한 것으로 판단된다.
- (3) 일축압축시험과 현장시험에 의한 예민비는 일축압축시험결과가 작게 평가되었는데 이는 시료에 실트질 성분이 많아 교란의 가능성 때문인 것으로 판단된다.
- (4) 동일심도에서 CPM과 PMT에 대한 압력-체적변화의 관계를 비교한 결과 초기 곡선의 형태뿐 아니라 곡선의 기울기 한계압등이 CPM이 크게 평가되었는데 이는 CPM의 설치시 지반교란의 영향이 적기 때문인 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

1. Gambin, M. (1988), " Interpretation and application of pressuremeter test results to foundation design ", General Memorandum, Menard pressuremeter. 43p.
2. Lunne, T, Robertson, P.K and Powell, J.J.M(1977), " Cone penetration Testing in geotechnical practice ", Blackie Academic & professional. 312p.
3. Mair, R.J. and Wood, D.M(1987), " Pressuremeter Testing-methods and interpretation, CIRIA, 160p.
4. Robertson, P.K(1990), " Soil classification using the cone penetration test ", CGJ Vol. 27 Nol pp.15 1~158.
5. Whittle, R.W(1995), " Recent developments in the cone pressuremeter, Proceeding of International conference on Advances in site investigation practice, pp.533~546.