

KGS Spring '95 National Conference  
25, March, 1995/Seoul/Korea

Piezocone 시험의 특성 및 측정결과의 이용 사례분석

The Case Study of Piezocone Test and It's Application in south Korea

김수삼, SOO-SAM KIM\*, 정승용, SEUNG-YONG JUNG\*\*, 안명운\*\*\*, MYUNG-WOON AHN, 김형남\*\*\*\*, HUNG-NAM KIM

- \* 정회원, 중앙대 토목공학과 교수, Professor, Chung-Ang University, Seoul
- \*\* 정회원, 중앙대 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Chung-Ang University, Seoul
- \*\*\* 정회원, 아주지오시스템스 사장, President, AH JOO GEO-SYSTEMS, Seoul
- \*\*\*\* 정회원, 아주지오시스템스 차장, Vice chief, AH JOO GEO-SYSTEMS, Seoul

개요(SYNOPSIS) : In this study, piezocone was used as a part of sea-side soft ground investigation. In accordance with this test, its principles and investigation capability of piezocone equipment is introduced, and recommended method for the estimation of soil parameters using the test result is presented. Especially, as an example of its application, the test results from an estuary site of west Nak-dong river was used to compare analytically with the existing results both from the laboratory tests and previous investigations.

As a result, application of piezocone test is found to be useful for domestic use, particularly for the classification of soil layers, estimation for the existence of sand seam, relative density, internal friction angle, undrained shear strength of middle clay layer, and horizontal coefficients of consolidation.

1. 서론

최근 해안지역의 건설공사가 급증하면서 연약지반의 조사, 설계, 시공시 필요한 토질정수의 획득에 대하여 관심이 고조되고 있다. 기존의 연약지반 조사시 수행되는 표준관입시험치는 부정확하여 조사자의 숙련도에 좌우되고 있으며, Dutch Cone을 사용하는 경우도 조사심도에 제한을 받거나 모래층이 존재할 경우 관입이 불가능한 실정이다. 전기식 콘관입시험기의 일종인 Piezocone은 연속적인 유압의 힘으로 콘을 압입하면서 2.0cm 간격으로 선단지지력, 슬리브의 마찰력, 관입간극수압을 측정할 수 있는 장비이다.

본 연구에서는 연약지반 조사의 일환으로 Piezocone을 사용하였으며 10ton급 Piezocone장비에 대한 측정원리 및 조사능력을 소개하고 Piezocone조사결과를 이용한 토질정수의 추정방안을 제시하고자 한다. 특히 적용사례로서 서낙동강 하구언에서 조사한 시험결과를 이용하여 실내시험결과나 기초조사된 결과와 비교, 분석하고자 하였다.

2. Piezocone의 개요

2.1 기존 연구동향

현장시험의 방법에는 SPT(표준관입시험), CPT(정적 콘관입시험), PMT(공내재하시험), PLT(평판재하시험), 등이 있는데 SPT는 1902년에 소개되어 현재 일반화되어 있는 시험이며 PMT는 Menard(1965)에 의해 개발되어 최근 지반에 적용되고 있다. 또한 CPT는 기계식과 전기식으로 구분되는데 본 연구에서 적용하고자 하는 전기식 콘은 1948년 소개되어 1971년에 개량된 형태이다.

CPT에 대한 기존의 연구를 살펴보면 흙 구성형태에 대한 정보는 Begemann(1965), Dayal & Allen(1975) 등이 연구하였고, 흙 조직형태에 대해서는 Marsland & Powell(1979)이 연구한 바 있다. 또한 모래에서  $\phi$ 값을 결정하는데 DeBeer(1948), Meyerhof(1956, 1961), Snaglerat(1974), Janbu & Seneset(1974), Dargunoglu & Mitchell(1975), Schmertmann(1975), Meyerhof(1976), Perez et al(1976) 등이 그리고 점토에서 비배수전단강도를 파악하기 위해 Sanglerat(1972), Dargunoglu & Mitchell(1975), Schmertmann(1975), Marsland & Powell(1979) 등이 노력하였다. 파일의 지지력을 결정하는데 Vander Veen(1957), Bogdanovic(1961), Kerisel(1961), Begmann(1963), Menzenback(1961), DeBeer(1963), Heijnen (1974) 등이 공헌하였고, 비점성토에서의 압축성과 현장밀도를 Meyerhof(1956), Rodia(1961), Meigh & Nixon(1961), Schultze & Melzer(1965), Schmertmann(1975) 등이 평가하였으며, Buisman(1944), DeBeer & Martens(1957), Schmertmann(1970) 등은 모래에서 기초의 침하를 측정하였고, 기초의 설계에는 Lunne & Kelvin(1981)이 CPT 결과를 고려한 바 있다.

또한 CPT의 교란인자를 고려하여 모래의 경우 Jezequel(1969), Begemann(1969, 1977), De Ruiter(1971) 등과 점성토의 경우 De Ruiter(1971), DeBeer(1974), Parez(1974), Carpentier(1976), Nuyens(1973) 등이 연구를 진행하였고, 콘 형태에 대한 연구는 Meyerhof (1961), Baligh & Vivatrat(1979), Roy et al.(1981), Tortensson(1975), Baligh et al.(1978), Roy et

al.(1982), De Ruiter(1981) 등이 수행하였으며 Tip 형태에 따른 결과를 Geuze(1953), Begemann(1969), Heijnen(1973), Schmettmann(1974), Kok(1974), Joustra (1974) 등이 고려하였다. 그리고 관입비(관입속도)를 고려하여 Ladany(1967), Rowe(1972), Bjerrum(1973), Bembem & Myers(1974), Marsland(1977) 등이 연구를 진행하였다. 특히 CPT에서 간극수압을 고려하여 Schmettmann(1974), Wissa et al.(1975), Tortensson(1975), Roy et al.(1981), Baligh et al.(1978, 1981) 등이 그 결과를 발표하였고, 간극수압 소산시험은 Tremblay(1979), Campanella & Robertson(1981), Tumay & Van Zyl(1981) 등이 수행하였다.

각종 현장시험의 비교연구로는 Dayal(1982)이 다음과 같은 사항에 대하여 연구한 바 있다. 탄성계수(E)의 관계식은 CPT의 경우 CFEM(1978), SPT의 경우 Schultze & Melzer(1965), 그리고 PMT의 경우 Menard(1972)의 공식을 사용하여 상호비교하였는데 Marsland & Randolph(1977), Hartman & Schmettmann(1975) 등도 같은 연구를 수행한 바 있고, 비배수 강도( $S_u$ )에 대해서는 CPT의 경우 Schmettmann(1975), PMT의 경우 Gibson & Anderson(1961)의 방법으로 비교하였으며, 허용지지력( $q_c$ )은 CPT는 CFEM(1978), PMT는 Menard(1972), PLT는 Kee(1972), Jain(1978)의 방법으로 구하여 상호비교하였는데 모든 경우에 CPT의 결과에 신뢰성이 있음이 증명되었다.

마지막으로 Ladany(1967), Bjerrum(1973) 등은 CPT 결과를 실내 삼축압축시험 결과와 비교하여 분석한 바 있다.

## 2.2 시험의 원리 및 영향인자

### 2.2.1 Piezocone시험의 원리

현장시험시 사용하는 CPT는 기계식과 전기식으로 구분되며 기계식의 경우 이중관식의 룯드에 의해 압입단계를 바꾸면서 선단지지력과 슬리브마찰력을 구분하여 측정하는데 반하여 전기식의 경우 연속적인 압입에 의하여 선단지지력과 슬리브마찰력을 2개의 센서로 측정한다. 이때 관입시 간극수압을 조사할 수 있는 경우 CPTU 또는 Piezocone Test라고 부른다.

Piezocone Test의 경우 콘을 유압에 의해 연속적으로 압입시키면서 선단지지력, 슬리브의 마찰력, 관입간극수압을 측정할 수 있는데, 콘을 지반에 압입할 때 선단지지력은 콘 선단에 걸리는 지반의 반발력으로 측정되고 슬리브의 마찰력은 콘 측면에 걸리는 지반의 마찰력으로 나타나며 관입간극수압은 콘 Tip의 선단면, 콘 Tip 뒷면, 슬리브 뒷면에 설치한 Piezo Element를 통해 압입시 발생하는 간극수압의 변화를 계측하게 된다. 특히 전기식의 경우 위의 3가지 계측항목이 3개의 센서에 의해 각각 계측되어 외부로 출력되는데 이때 적용된 콘의 특성을 정확히 파악하여 측정결과 및 해석결과시 영향을 미치는 인자에 대한 보정을 면밀히 검토하고 기존의 연구결과와 비교하여 허용범위 및 적용방법에 유의하여야 한다.

이상과 같은 Piezocone 시험을 통해 토질 및 지층분류, 변형계수와 탄성계수, 사질토층의 상대밀도와 내부마찰각, 점토의 비배수 전단강도, 예민비, 압축지수, 흐름의 특성 등을 파악할 수 있다.

### 2.2.2 시험시 영향인자

측정결과에 영향을 주는 인자는 콘관입시험 결과에 영향을 주는 인자로서 불균등 면적, Piezo Element의 위치 및 크기, 포화도, 온도, 측정의 정확도 및 정밀도, 슬리브 부마찰력의 영향 등이 있고 해석결과에 영향을 주는 인자에는 장비특성, 원위치 지중초기응력, 입자의 크기, 압축성, 입자간 결합력 등이 고려된다.

불균등 면적의 영향은 순면적비( $a = A_N/A_T$ )를 고려하여 최대 간극수압(U) 유발에 따른  $q_c$ 값의 수정으로 보완되는데, 수정된 관입저항치  $q_r = q_c + U(1-a)$ 으로 나타내고 이때  $a$ 값은 일반적으로 0.6~0.9의 범위이며 본 연구에서 이용한 시험기의 경우 0.8의 값을 갖는다. Piezo Element 재질로는 강성이 커서 압축성의 영향을 줄이는 것이 좋으며, 투수성을 고려할 경우 응답시간과 공기투과 저항성의 상반된 요소를 적절히 조합할 필요가 있다. 또한 콘 Tip의 선단면, 콘 Tip 뒷면, 슬리브 뒷면의 3곳에 설치한 Piezo Element의 영향을 비교해볼 때 Tip 선단면에서의 간극수압은 Tip 뒤에서의 값에 비해 10~20%정도 크게 측정되고, 슬리브에 설치한 경우도 과압밀 점토지반이나 세립질 지반에 적용할 경우 부의 간극수압이 발생할 수가 있다. 따라서 단일위치 간극수압 측정용 콘은 모든 지반에 포괄적으로 적용하기 어렵다. 그리고 Tip뒤에 얇은 다공질 필터를 사용할 경우 간극수압의 측정이 과소평가될 수가 있으므로 필터의 크기에 유의해야 한다. 콘 Tip의 직경은 다공질 요소나 마찰슬리브의 직경보다 0.25mm 정도 작은 것이 좋는데, 이때 포화에 주의하여야 양질의 간극수압값을 얻을 수 있으므로 실리콘액 등과 같이 점성이 큰 액체를 이용하여 공기투과 저항성을 높여준다. 또한 지반의 온도는 콘의 변형률계기에 영향을 미치는데 20℃ 이상인 경우 탄성계수가 0.5%정도의 오차를 보이므로 이에 대한 보정이 필요하며 콘관입시에도 초기에 콘을 지반에 관입한 채로 30분간 두어 콘을 지중온도에 가깝게 맞추어 데이터출력오차가 0.05%이하가 되도록 제한해 주어야 한다. 측정의 정확도 및 정밀도를 높이기 위하여 초기 보정오차와 0하중오차가 고려되어야 하는데 전자는 20회이상 사전 재하를 시행하여 보정해 주며 후자는 시험시 주의를 기함으로서 보완할 수 있다. 이때 출력데이터 오차는 0.5~1%이상을 초과해서는 안된다. 슬리브 부마찰력의 측정은 온도변화에 따른 0하중의 (-)값, 슬리브의 측면하중, 불균등 선단면적, 하중셀의 부정확성 등에 의해 나타나는데 그 원인을 분석하여 대응하여야 하며, 최근 콘설계나 시험과정에서 많이 제거되고 있는 실정이다.

이와같은 영향인자들은 결과분석시 장비특성에 그대로 고려되어야 하며, 또한 원위치 반경방향응력의 적용에 유의하여 지중초기응력의 적용을 고려하여야 한다. 그리고 입자의 크기, 압축성, 입자간 결합력 등은 흙 종류에 따른 콘의 선단지지력이나 슬리브 마찰력, 상대밀도, 마찰각 등과 상호 관련성을 고려하여 분석하여야 한다.

### 3. Piezocone 시험

#### 3.1 시험기 구성

본 연구에 이용된 장비는 <그림.1>에 나타난 것처럼 3성분 전기식 콘(선단지지력, 슬리브마찰력, 관입간극수압 측정), 추진롯드, 유압관입기(디젤엔진 포함), 진공펌프(강제포화기), 데이터 Logger 등으로 구성되어 있고, 항목별 규격은 <표.1>과 같다.

#### 3.2 시험 과정

Piezocone 관입시험의 과정은 크게 콘의 포화과정, 콘관입기의 지반설치, 롯드와 콘의 연결, 콘의 관입, 자료의 기록 및 처리 등으로 진행된다. 먼저 실리콘오일을 채운 진공펌프 압력조에 전기식콘을 담근후 진공펌프를 작동시켜 약 2시간정도 포화시킨 후 멤브레인으로 콘의 필터부를 감싼다. 콘관입기는 관입기의 수평성을 확인하여 지반에 앵커를 설치한다. 콘과 롯드의 연결시에는 멤브레인이 상하지 않고 콘이 지반에 닿지 않도록 유의하면서 롯드와 콘 중간부에 브레이크를 장착하여 콘관입중에 주변마찰력을 감소시킨다. 콘의 주입시 주의사항으로 매립토층이거나 전석층 관입이 예상될 때 Dummy콘을 이용하여 사전 관입시킨 후 전기식 콘을 사용하도록 하며, 관입직전에 데이터 Logger의 각 측정값을 초기화 하고 System의 이상작동유무를 확인한 후 관입을 시작한다. 계측데이터의 측정은 2.0cm마다 수행되고 전송된 데이터는 자체 출력프로그램에 입력되어 현장에서 직접 측정결과를 모니터를 통하여 확인할 수 있다.

#### 3.3 자료분석 방법

Piezocone 시험기를 이용하여 얻을 수 있는 자료는 앞에서 언급한 바와 같이 토질 및 지층분류, 변형계수와 탄성계수, 사질토층의 상대밀도와 내부마찰각, 점토의 비배수 전단강도, 예민비, 압축지수, 간극수압 소산시험을 통한 흐름의 특성 등을 파악할 수 있고 특히 N치와의 비교분석이 가능한데 이를 항목별로 살펴보면 다음과 같다.

##### 3.3.1 토질 및 지층분류

콘관입시험 데이터를 이용한 흙의 분류에는 Douglas & Olsen(1985)이 제안한 흙종류별 거동특성을 파악할 수 있는 토질분류표와 이를 더 단순화한 Robertso(1985)의 분류표가 있다. 그러나 Piezocone의 경우 간극수압의 영향에 대한 보정이 필요한데 Senneset & Janbu(1984)는 <그림.2>와 같은 분류표를 이용하여 12가지 항목으로 흙을 분류하였다. 이 분류표에서는 마찰비( $R_f$ )와  $q_c$ 값의 상관관계를 비교하여 흙을 분류하고, 특히 깊이에 대한 보정을 위해 간극수압계수 보정치  $B_q = \Delta U / (q_T - \sigma_w)$ 를 이용함으로써 간극수압이 크고  $q_c$ 값이 작은 연약점토 및 세립토 지반의 분류에 유용하도록 고안되어있다. 통상 분류표에 포함되지 않는 측정값은 간극수압 소산시험을 통하여 분류의 정확도를 높인다. 즉  $t_{50} < 60$ 초로서 소산속도가 빠를 경우에는 점토질실트로 판단이 가능하며  $t_{50} > 60$ 초일 때는 점토로 판단할 수 있다.

지층분포를 확인하기 위하여 표준콘의 경우 stiff층에서의 최대 관입저항값의 측정가능 최소두께는 36~72cm이고, 연약층에서는 36cm보다 얇은 두께에서도 측정이 용이하다. 그러나 완전히 포화된 Piezocone의 경우 관입에 따른 간극수압의 변화를 0.25초 이내에 측정할 수 있으므로 2cm/sec의 표준관입속도하에서는 0.5cm이하의 간격으로 간극수압 측정이 가능하다.

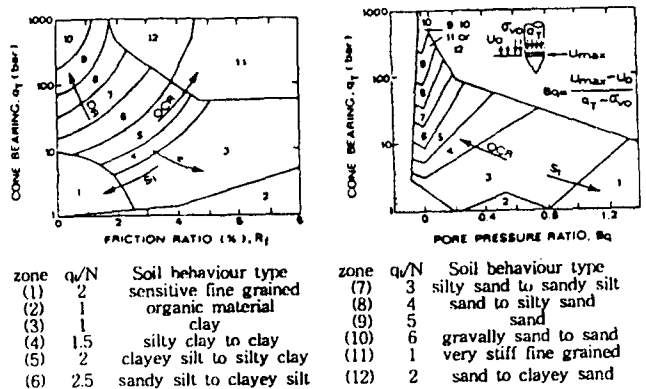
##### 3.3.2 변형계수와 탄성계수

사질토에서  $q_c$ 와 체적변형계수간의 실험적 상관관계는 Mitchell & Gardner(1970)에 의해  $1/m_v = M = \alpha \times q_c$ 와 같이 제시되었으며 이때 상수  $\alpha$ 의 범위는 1.5~4.0인데 판단력과 경험에 따라 주의깊게 결정되어야 한다.

사질토의 탄성계수(E)는 Schmertmann(1970, 1978)이 제시한 Young계수를 통해  $q_c$ 값과 비교할 수 있고 전단탄성계수



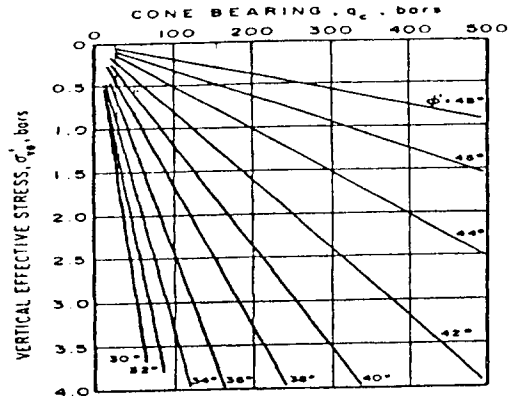
<그림.1> Piezocone 장비의 구성



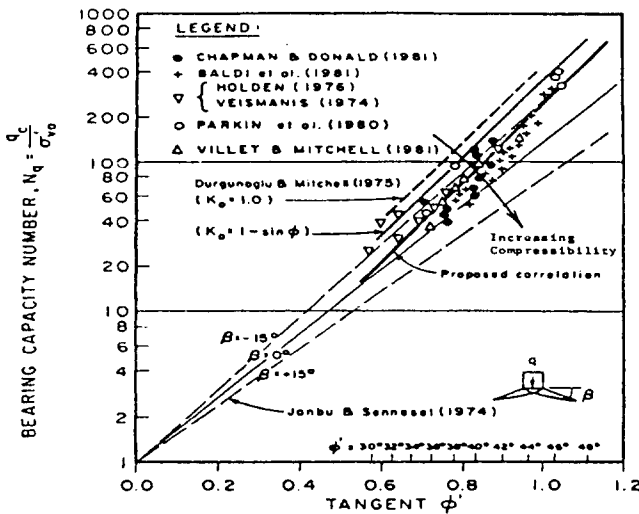
<그림.2> 콘시험에 의한 토질분류표

<표.1> Piezocone 장비의 규격

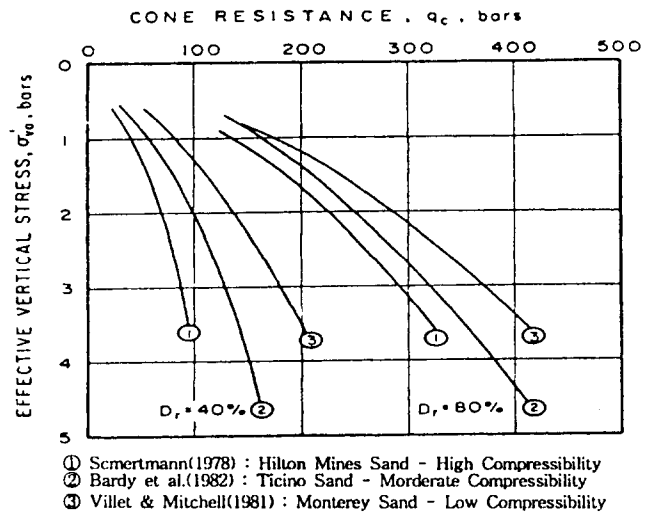
3성분 전기식 콘	추진 로드	유압관입기
콘 규격: ASTM(D3441)	로드형식: 단관	관입능력: 10ton
콘 선단각: 60도	로드직경: 35.7mm	장비하중: 1800kg
콘 선단면적: 10cm <sup>2</sup>	재질: 고강도강철	(N치 30까지 관입가능)
콘 선단직경: 35.7mm	길이: 1m/1본	
슬리브의 마찰면적: 150cm <sup>2</sup>		



<그림.4> 깊이별 qc와 마찰각의 상관도



<그림.3> 극한지지력계수와 마찰각의 관계분석도



<그림.5> qc와 상대밀도의 상관관계

(G)의 경우 Robertson(1982)에 의해  $G_{max}$ 와  $q_c$ 의 실험적 관계로부터 파악할 수 있다. 점성토의 탄성계수( $E_u$ )는 응력수준과 과압밀에 의존하는 상수( $n$ )를 통해  $E_u = n \times S_u$ 와 같이 나타낼 수 있고 전단탄성계수( $G_{max}$ )는 과압밀비와 소성지수를 통해서 추정할 수 있는 도표가 제시되어 있다.

### 3.3.3 사질토의 내부마찰각과 상대밀도

사질토의 배수전단강도와  $q_c$ 의 상관성에 대한 이론적 연구는 극한지지력이론 (Janbu, 1974)과 동공확장이론 (Vesic, 1972)으로 분류된다. 극한지지력이론에서는 흙의 압축성과 전단강도의 만족성을 무시하므로 그 영향의 증가에 따라  $q_c$ 값은 감소하는 경향이 있고 내부마찰각의 추정 정밀도는 떨어진다. 반면에 동공확장이론에서는 흙의 체적변화와 압축특성을 모두 언급하고 있다. 또한 극한지지력 계수와 마찰각( $\phi$ )의 관계를 이용하여 기존의 시험결과를 정리한 것이 <그림.3>과 같이 나타난다. 사질토의  $\phi$ 값을 추정할 수 있는 도표로는 정규압밀, 석영질 모래가 주성분인 적당한 비압축성의 토질인 경우에 <그림.4>와 같이 나타낼 수 있다.

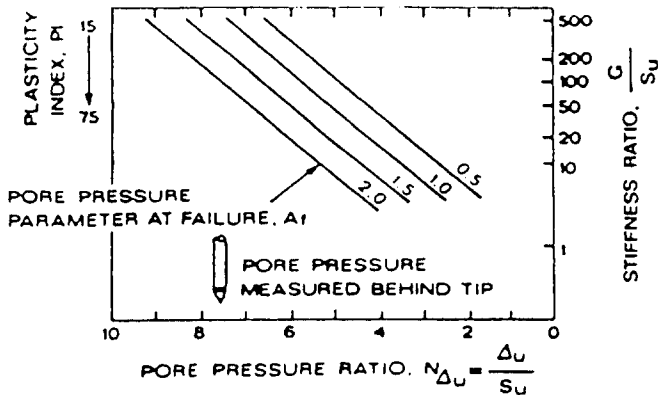
사질토의 경우 유효상재하중을 고려하여  $q_c$ 와 상대밀도의 상관관계를 나타내면 <그림.5>와 같은데 이로부터 실내시험결과와 비교하거나 추정치의 범위를 살펴볼 수 있다.

### 3.3.4 점성토의 비배수 전단강도

콘을 통한 점성토의 비배수 전단강도 추정은 가장 일반화 되어있는 만큼 그 분석의 방법도 다양하다. 그중 Messarch & Broms(1981)의 해법을 살펴보면 <그림.6>에 나타낸 것처럼 소성지수에 따라 민감한 반응을 보이는데 Skempton의 파괴간극수압계수( $A_f$ )를 이용하여 과압밀과 예민비의 영향이 고려된 간극수압비( $N_{dv}$ )로부터 비배수강도를 추정할 수 있다. 또한 간극수압계수( $B_0$ )와  $N_{dv}$ 의 관계를 나타내면 <그림.7>과 같다.

### 3.3.5 점성토의 예민비와 압축지수

점성토의 예민비는 마찰비( $R_f$ )를 이용하여  $S_t = N_s/R_f$ 로 나타낼 수 있는데 이때  $N_s$ 는 6~10의 범위이다. 압축지수의 추정은 Schmertmann에 의해  $S_u/\sigma'_{vo}$ 와 과압밀비의 상관관계에 따라  $C_u/(1+e)$ 의 값을 제안하였다.

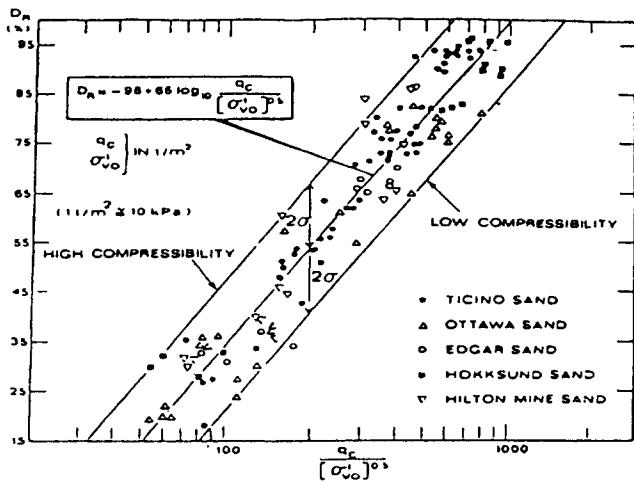


<표.2> 토질별 qc/N의 관계

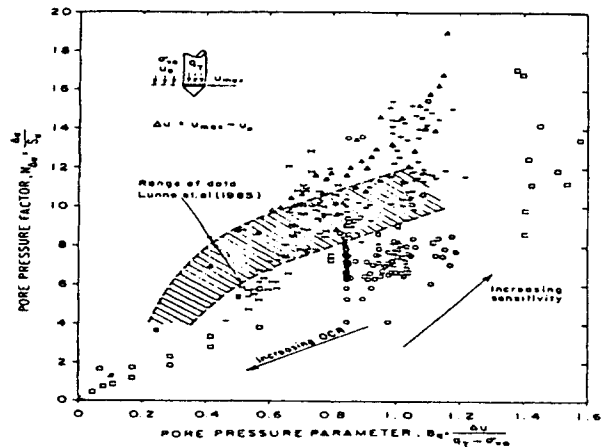
Soil Type	qc/N
Silty or Sandy Clay	2
Sandy Silty	3
Fine Sandy	4
Fine to Medium Sand	5
Medium to Coarse Sand	8
Coarse Sandy	10
Gravelly Sand	8~18
Sandy Gravel	12~18

<표.3> 대상지반의 토층별 공학적 특성

지층 구분	평균층두	N 치	구성 성분	상대 밀도
매립층	1.9 m	2-50/10	실트질모래와 자갈, 잡석 등 함유	느슨함-중간정도공기
상부사질토층	11.0 m	1-38	실트질매립모래, 일부점토다량함유	느슨함-중간정도공기
중간점토층	36 m	1-22	CL 및 CH	--
하부사질토층	0-31.8 m	2-50/10	실트질 모래층과 자갈질 모래층	느슨함-매우 조밀함
하부점토층	9.2 m	2-25	실트질점토, 점토질실트, 사질실트	연약함-매우 견고함
기반암층	--	50이상	잔자갈과 실트질모래	조밀한 상태



<그림.6> 간극수압 측정결과로부터 비배수 전단강도의 추정



<그림.7> 간극수압계수(Bq)와 간극수압비(NΔu/Su)의 관계

### 3.3.6 흐름의 특성

간극수압 소산시험으로부터 흐름의 특성을 파악함으로써 수평방향 압밀계수  $C_h$ 를 추정할 수 있다. Baligh & Levadoux는 CPT로부터  $C_h = R^2 \cdot T / t$ 을 제안하였는데 이때 T는 다공질 필터의 위치와 Tip 형상에 대한 이론적 시간인자이고, t는  $\Delta U_{(t)}/\Delta U_{\text{값}}$ 에 도달하는 시간이며 R는 콘의 반경을 나타낸다.

### 3.3.7 N치와 비교

SPT와 CPT의 관계를 규명하기 위해  $q_c$ 값과 N치간의 비교가 많이 연구되어 있다.  $q_c/N$ 의 비율은  $D_{50}$ 의 크기가 증가할수록 커지는데 토질별  $q_c/N$ 의 관계는 <표.2>와 같이 제시되어 있다.

## 4. Piezocone 이용의 사례분석

### 4.1 대상지반

본 연구의 적용대상 위치는 행정구역상으로 부산광역시 강서구 일대로 지형특성은 서낙동강하구와 남해의 해안선이 만나는 곳에 형성된 삼각주에 해당하며 일부 상층부는 매립지반이 조성되어 있다. 지층구성은 상부로부터 매립층, 상부 사질토층, 중간 점토층, 하부 사질토층, 하부 점토층, 기반암층으로 구성되어 있으며, 각 토층별 공학적 특성을 요약하면 <표.3>과 같다.

### 4.2 시험항목 및 결과

#### 4.2.1 실내시험

대상지반을 서낙동강 하구언 지역의 점성토(CH, CL)에 대하여 실내시험한 결과, 자연함수비( $\omega_n$ ), 비중( $G_s$ ), 액성한계(LL), 소성지수(PI), 압축지수( $C_c$ ), 일축압축강도( $q_u$ ), 비배수 전단강도( $C_u$ )의 범위와 평균값을 구하면 <표.4>과 같이 나타난다.

#### 4.2.2 Piezocone 시험

현장에서 전기식 콘을 사용하여 2cm간격으로 측정된 값은 심도별로 콘선단저항값( $q_c$ ), 슬리브의 마찰력( $f_s$ ), 관입간극수압( $U$ ) 등이 있는데 그 결과는 <표.5>과 같고, 이로부터 매개변수인 수정 관입저항값( $q_t$ ), 마찰비( $f_s/q_t$ ), 간극수압비( $\Delta U/q_c$ ,  $\Delta U/q_t$ ) 등을 구한다.

콘선단 저항값으로부터 상부 실트질 모래를 확인하였는데 <그림.8>에서 보는 바와같이 모래층내 일부에서 점토가 다량 함유되어 있으며, 상부 실트질 모래층 하단부에는 1m 두께의 실트질모래와 점토의 교호층을 발견하였다.

상부 모래층에서의  $q_c$ 값은 평균  $320t/m^2$ 이고 관입간극수압은 정수압 또는 정수두의 80~90%의 측정치를 보였다. 점토층내에서  $q_c$ 값은 심도 증가에 따라 약간 증가하였는데 이는 불균등 단면적의 효과에 기인하였으며  $q_t$ 값은 심도증가에 따라 확연히 증가하였다. 중간점토층 상·하부에서 부분적으로  $q_c$ 값 및  $U$ 의 상호측정결과로부터 Sand Seam의 발달 유무를 확인할 수 있었다. Sand Seam 두께의 추정은  $q_c$ 값의 증가량으로부터 추정가능한데 Sand Seam의 두께가 얇은 때에는  $q_c$ 가 과소평가되는 경우도 있으므로 유의하여야 한다.

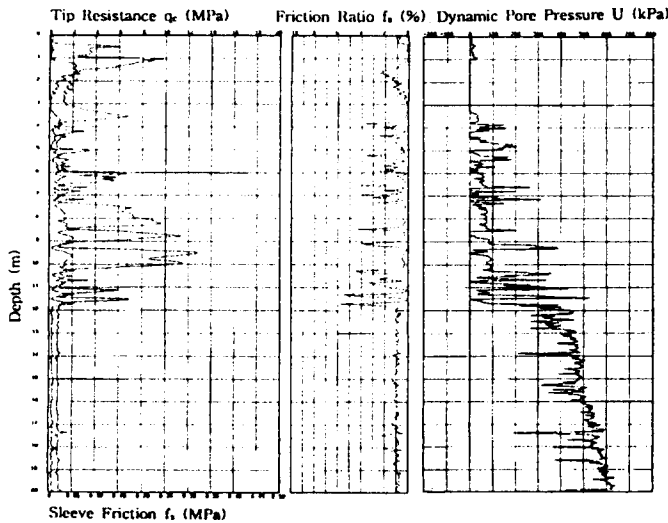
관입간극수압의 측정으로부터 상부 모래층에서는 간극수압비가 0.8~1.0 정도로 관입간극수압이 거의 발생하지 않았으나 점토층에서는 2.5~4.0의 변화를 보였다. 따라서 관입간극수압의 변화로부터도 Sand Seam의 유무 및 크기를 확인할 수 있었다.

<표.4> 실내시험 결과표

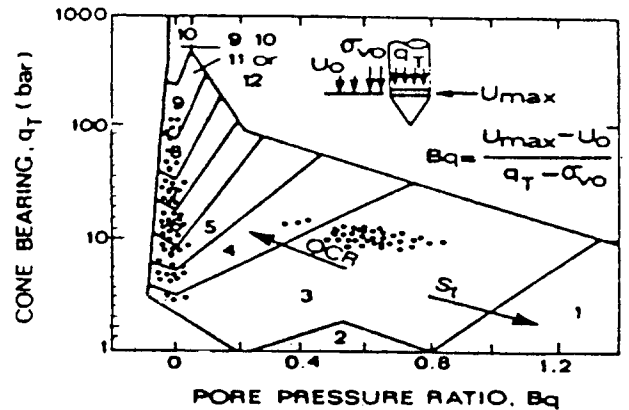
구분	범위	평균
자입함수비( $w_n$ )	40.1~63.6%	49.47%
비중( $G_s$ )	2.625~2.725	2.70
액성한계(LL)	39.0~65.8%	57.0%
소성지수(PI)	18.6~41.6%	29.82%
압축지수( $C_c$ )	0.16~1.04	0.65
일축압축강도( $q_u$ )	0.14~0.86 kg/cm <sup>2</sup>	0.67 kg/cm <sup>2</sup>
비배수전단강도( $C_u$ )	0.28~0.65 kg/cm <sup>2</sup>	0.37 kg/cm <sup>2</sup>

<표.5> 조사지역의 심도별 측정결과 평균치

측정심도	$q_c$ (t/m <sup>2</sup> )	Rfr (%)	$q_t$ (t/m <sup>2</sup> )	U (t/m <sup>2</sup> )
1	250	0.8	250	0.5
2	176	0.43	176.5	2.54
3	220	0.61	220.5	2.7
4	210	0.61	211.12	5.6
5	216	0.85	217.4	7.1
6	290	1.03	291.3	6.3
7	220	1.73	222	9.4
8	500	0.82	502	9.6
9	730	1.08	733	16.1
10	400	1.45	423	17.5
11	300	1.84	305	23
14	83	1.04	91.5	42.3
20	98	0.89	111	64.3
25	112	1.04	128	77.5
30	125	0.75	142	83.4
35	200	0.88	219	95.4



<그림.8> Piezocone 시험 결과표



<그림.9> 토질분류표에 Piezocone 시험 결과의 적용

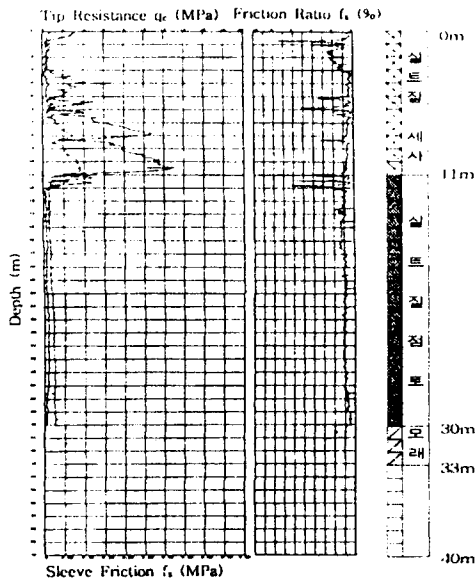
### 5. 결과분석

#### 5.1 지층분류

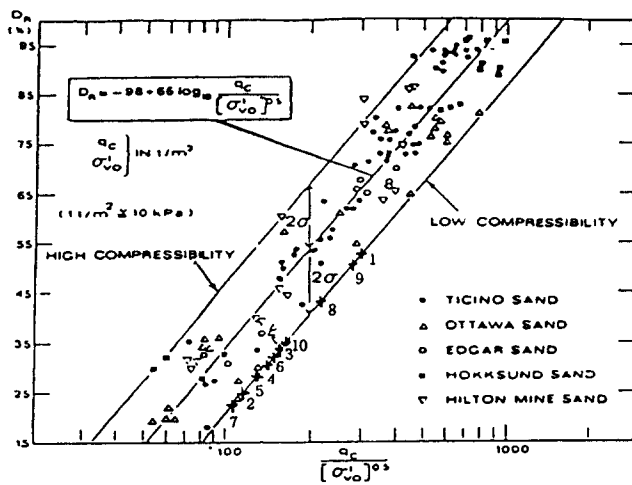
토질분류를 위하여 <그림.2>의 흙분류표에 본 연구의 시험데이터(혹점)를 적용한 결과 <그림.9>와 같이 나타났다. 상부 사질토층은 주로 모래질 실트(zone 6)에서 하부로 갈수록 실트질 모래 및 모래로 분류된다. 그리고 일부 점토(zone 4)로 분류되는 토층이 혼재함을 보여주고 있다. 중간점토층은 주로 zone 3에 해당되어 점토로 분류되었다. 따라서 Piezocone 시험결과를 <그림.10>과 같이 토질주상도와 비교해보면 Piezocone 시험결과와 신뢰도는 매우 좋은 것을 알 수 있다.

#### 5.2 상부사질토층의 상대밀도 측정

상부 사질토에 대한 상대밀도의 추정은 <그림.11>에 의하여 다음과 같은 식을 이용하였다.



a) Piezocone 시험결과 b) 토질주상도  
 <그림.10> Piezocone 시험 결과와 토질주상도의 비교



<그림.11> Piezocone 시험 결과로부터 상대밀도의 추정

$$D_R = -98 + 66 \log_{10} \frac{q_c}{(\sigma'_{v0})^{0.5}}$$

그림에서 도시한 +표(숫자는 심도)들은 <표.5>를 이용하여 상부 모래층에 대하여 상대밀도를 추정한 값이다. 조사결과 본 지역의 상부 모래층의 평균상대밀도는  $\bar{D}_r = 30.2$  로서 중간정도의 조밀도를 갖는 토층으로 판단된다. 또한 시추조사 결과 본 지역의 상부 사질토의 N치는 20이하로서 <표.6>에서 보는 바와 같이 중간정도의 조밀도에 해당되어 <그림.11>의 저압축성 곡선과 일치하였다.

### 5.3 내부마찰각

본 지역에서 측정된 조사결과를 1m층마다 평균  $q_c$  값을 구하여 추정된 내부마찰각은 <그림.12>의 흑점(숫자는 심도)으로 표시할 수 있었다. 이때  $\phi' = 35^\circ \sim 47^\circ$  로서 평균치는  $37^\circ$  로 추정된다. 본 지역은 심도증가에 따라 내부마찰각이 감소하는 경향을 보이고 있는데 이는  $\sigma'_{v0}$ 의 증가량에 비해서 상부 모래층 중간부가 낮은 값을 보이기 때문으로 판단된다.

### 5.4 비배수 전단강도

본 지역에서 비배수 전단강도의 평균치는 <표.3>에 나타난 바와 같이  $S_u = 0.37 \text{ kg/cm}^2$  으로서  $N_k$ 의 평균값은 18이고, <그림.13>에서 흑점으로 표시한 바와 같이  $N_{du}$  값의 평균값은 9.7로서 평균  $N_{du}$  값을 이용한 중간점토층에서의 비배수 전단강도는 다음 식에 의해 결정된다.

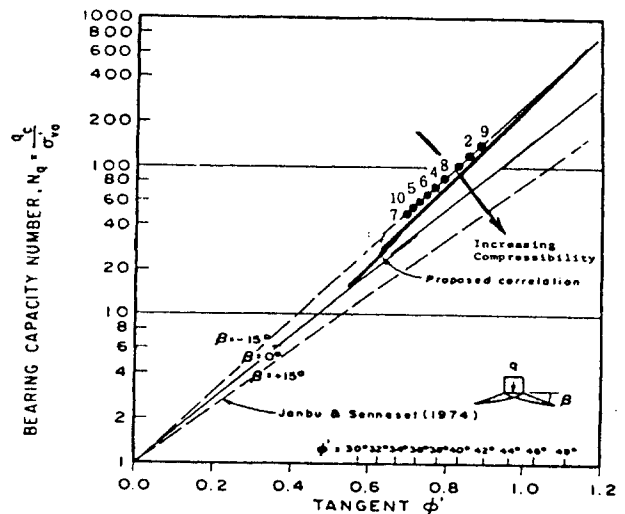
<표.6> N치에 따른 사질토의 상대밀도

표준관입저항치(N치)	상대 밀도
0 ~ 4	매우 느슨
4 ~ 10	느슨
10 ~ 30	중간 조밀
30 ~ 50	조밀
50 이상	매우 조밀

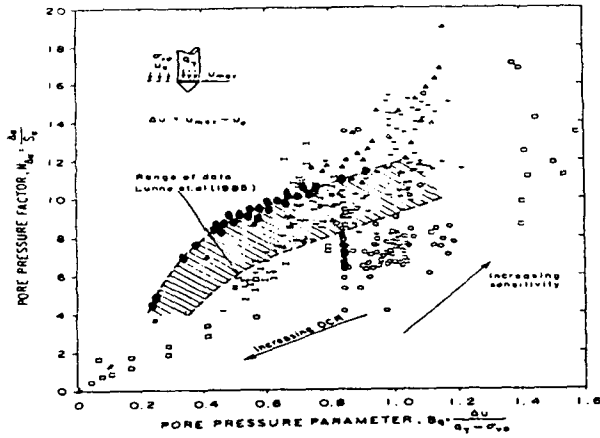
<표.7> Piezocone 시험으로 추정된 비배수전단강도(점토층)

심도 (m)	$\bar{B}_v$	$\bar{N}_{du}$	$S_u(t/m^2)$
14	0.419	0.82	3.45
20	0.581	9.7	4.56
25	0.66	10.2	5.15
30	0.63	10.0	5.34

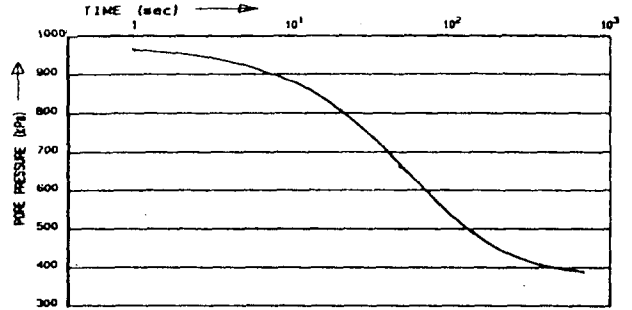
-  $\bar{B}_v, \bar{N}_{du}$ 는 각 층별 12개소의 평균치



<그림.12> Piezocone 시험 결과로부터 내부마찰각의 추정



<그림.13> Piezocone시험 결과를 적용한  $B_q$ 와  $N_{du}$ 의 관계



<그림.14> 수압소산시험 결과

$$S_u = \frac{U_{max} - U_o}{N_{du}} = \frac{U_{max} - U_o}{9.7}$$

따라서 12개소에서 측정된 중간점토층에서의 각 토층별 비개수 전단강도는 <표.7>과 같다.

### 5.5 흐름의 특성

본 지역에서 수행된 수압소산시험은 5.0m 간격으로 수행되었으며 큰 관입중에 발생된 과잉간극수압이 정수압까지 도달되는데는 상당한 시간이 소요된다. 따라서 본 시험에서 점토층에서는 1시간가량 소산시험을 실시하였으므로 정수상태의 수압은 중간점토층에서는 측정하지 못하였다. 그러나 하부 실트질모래층(심도 36.5m)에서의 소산시험결과는 <그림.14>와 같은데 비교적 정수상태에 도달된 것으로 판단되어 실트질 모래층에서의 수평방향 압밀계수  $C_h$ 값은  $0.199 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 을 얻었다.

## 6. 결론

본 연구결과 국내 연약지반에서 Piezocone시험은 유용할 것으로 판단되는데, 특히 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 지층분류의 방법으로 Piezocone의 이용은 기존 연구된 토질분류표에 적용함으로써 만족할만한 결과를 얻을 수 있었다.
- (2) 점토층내의 Sand Seam 추정이 가능하였으며 본 지역에서 상부 모래층의 상대밀도추정 결과 저압축성임을 알 수 있었다.
- (3)  $q_c$ 값으로부터 추정된 상부 모래층의 내부마찰각은 평균  $37^\circ$ 로 나타나고, 중간점토층의 비배수전단강도는 깊이별로  $3.45 \sim 5.34 \text{ t/m}^2$ 으로서 심도에 따라 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (5) 간극수압 소산시험결과 모래층의 수평방향 압밀계수 ( $C_h = 0.199 \text{ cm}^2/\text{sec}$ )를 추정할 수 있었다.

## 7. 향후 과제

본 연구는 아주 지오시스템스가 보유하고 있는 Piezocone을 사용하여 서낙동강 하구인 일대의 지반에 대한 기초적인 현장시험결과를 정리한 것으로 기존의 실내시험이나 현장조사만으로는 부족하기 쉬운 실제 현장지반특성을 파악하는데 중점을 두었다. 향후 Piezocone을 사용하여 전국에 걸친 현장시험을 수행함으로써 적절한 국내 현장특성 및 토질정수를 구하고 Piezocone의 적용성을 파악할 필요가 있을 것이다.

## 8. 참고문헌

- (1) Edited by G. M. Norris & R. D. Holtz (1981), "Cone Penetration testing & Experience", ASCE, Proc., pp.1-479.
- (2) U. Dayal (1982), "Determination of shear strength and soil modulus from CPT and other in-situ tests", ESPT, Second Proc., pp.529-534.
- (3) G. A. Jones & E. Rust (1982), "Piezometer Penetration Testing CUPT", Second Proc., pp.607-613.
- (4) P. K. Robertson (1986), "Guidelines for geotechnical design using the cone penetrometer test and CPT with pore pressure measurement", Hogentogler & Company Inc., p1-p419.
- (5) C. P. Wroth (1988), "Penetration testing - A more rigorous approach to interpretation", Proc. Conf. on Penetration Testing, Isopt-1, Vol.1, p303-p311.