

시화호 주변 연약지반 피에조콘계수 산정에 관한 통계적 분석

Evaluation of Piezocone Factors Applicable to Soft Ground Around Siwha Lake by Statistical Analysis

정진혁¹ Chung, Jin-Hyuck

박수범² Park, Soo-Beom

이송³ Lee, Song

Abstract

Applying graph and correlation developed in other countries to the domestic field has limits. Therefore, it is necessary that Piezocone factor should be determined by including ground characteristics obtained from various test results in the domestic site for better application. In this study, laboratory tests and field tests were performed to find the characteristics of soft ground which was widely distributed around Siwha lake. A comparative analysis of these tests with Piezocone penetration test was performed and the Piezocone factor was estimated by relationship analysis of undrained shear strength and cone resistance. Also, an appropriate Piezocone factor in the study site was reestimated by utilizing statistical analysis method for deriving reliable result.

요 지

국외에서 개발한 상관식이나 도표 등을 활용하여 국내 지반특성을 반영함에 있어 이를 그대로 국내지반에 적용하는 데에는 한계가 있다. 따라서 국내에 적합한 피에조콘계수 활용을 위해서는 국내 지반에 대한 시험결과를 직접적으로 이용하여 피에조콘계수를 결정할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 서해안 시화호 주변에 광범위하게 분포하고 있는 연약지반을 대상으로 실내시험 및 현장시험을 수행한 결과를 피에조콘 관입시험과 비교·분석하고, 비배수전단강도와 콘 관입저항력과의 상관성 분석을 통하여 피에조콘계수를 산정하였다. 또한 산정된 결과의 신뢰성 확보를 위하여 통계분석 기법을 활용하여 연구대상 지역에 적합한 피에조콘계수를 재산정해 보았다.

Keywords : Dilatometer test, Piezocone factor, Piezocone penetration test, Undrained shear strength, Vane test

1. 서 론

최근 들어 국내에서도 연약지반 조사의 중요성이 부각되면서, 다양한 지반조사 기법들이 소개되어 적용되고 있다. 지반조사의 목적은 지반특성 및 퇴적환경, 응

력이력, 각 토층의 토질정수를 산정하기 위한 것이다. 이러한 목적을 이루기 위해 다양한 실내시험 및 현장시험이 이루어지고 있다. 현장시험은 결과를 신속하게 얻을 수 있고, 현장조건이 최대한 반영된다는 장점 때문에 최근 많은 시험이 이루어지고 있으며, 특히 피에조콘

1 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul)

2 정회원, (주)한국종합기술 차장, 토질 및 기초기술사 (Member, Deputy General Manager, Korea Engrg. Consultants Corp.)

3 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., The Univ. of Seoul, scugeo@uos.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다

관입시험은 다양한 지반특성을 비교적 정확하게 구할 수 있을 뿐만 아니라 연속적인 측정으로 인하여 보다 확실한 지층구분 및 다양한 결과를 심도에 따라 일관되게 얻을 수 있어 국내외에서 크게 활용되고 있다.

이러한 피에조콘 관입시험 중 피에조콘계수 산정은 비배수전단강도를 결정함에 있어 중요한 계수로서 피에조콘계수 산정방법에는 이론적·경험적 해석방법이 있으며, 이론적 해석방법의 경우 피에조콘의 관입 묘사, 지반특성 해석과정에서 정확하게 반영하기 어려운 실정으로 경험적 해석방법을 주로 사용하고 있다(윤길립 등, 2004). 그러나 경험적 해석방법의 경우도 피에조콘 계수 결정을 위한 많은 방법들이 제안되어 왔으나, 대부분 국외에서 개발한 상관식이나 도표 등으로써 조건에 따른 분류 없이 단순 제시되어 있기 때문에 국내 지반특성을 반영함에 있어 이를 그대로 국내지반에 적용하는데 한계가 있다.

따라서 국내여건에 맞는 신뢰성 있는 피에조콘계수의 결정을 위해서는 대상지반의 특성을 비롯하여 비교 대상 시험방법들을 고려하여, 국내 지반에 대한 시험결과를 직접적으로 이용한 피에조콘계수를 결정할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 서해안 시화호 주변에 광범위하게 분포하고 있는 연약지반 특성을 파악하기 위하여 수행된 일축압축시험, 삼축압축시험, 현장베인시험, DMT (Dilatometer Test)의 결과를 피에조콘 관입시험과 병행하여 비교·분석하였다. 또한, 상기 결과와 기존의 연구에서 제시한 피에조콘계수를 통계분석 기법을 활용하여 합리적인 피에조콘계수를 산정하였다.

2. 연구동향

콘 관입시험은 원추모양의 콘 프로브를 지반에 일정한 속도로 관입하면서 발생하는 저항력을 측정하여 지반의 공학적 성질을 추정하는 원위치 시험의 일종이다. 현장 콘 관입시험은 20 세기 초 북유럽에서 시작되었으며, 지금의 모델과 유사한 형태는 네델란드의 P.Barensten(1932)에 의해 최초의 화란식 콘 관입시험이 수행된 이후 꾸준한 장비의 개선과 해석기법의 개발로 인해 이미 유럽 등의 선진국에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 시험법중 하나로 정착되었다.

피에조콘계수는 Schmertmann(1978)의 극한 지지력 이론, Vesic(1972) 및 Chen과 Mayne(1993)의 공동팽창

이론, Baligh(1975) 및 Teh & Houlsby(1991)의 변형률 경로법에 근거한 이론적 해석방법으로 구하거나, Robertson & Campanella(1985) 및 Kjekstad(1978) 등이 제안한 실내 및 현장시험 결과에 따라 비배수전단강도를 기준으로 피에조콘 관입시험 결과와 비교하는 경험적 해석 방법으로 구하게 된다(윤길립 등, 2004).

특히, 국내에서 주로 사용되는 경험적 해석방법에 의한 기존의 피에조콘계수는 제안자 또는 대상지역에 따라 값의 변화가 심하다. 이는 각 지역에 흙의 공학적 특성 차이 및 비교하는 비배수전단강도 결정방법의 다양성, 그리고 대상지반의 불균질성 등의 원인이 되어 나타날 수 있다(장인성 등, 2001).

피에조콘계수에 대한 연구는 국외의 경우 Lunne et al.(1985)가 노르웨이 지역에서 실시한 현장베인시험을 이용하여 피에조콘계수를 13~19로 제안하였고, Kjekstad et al.(1978)가 북해 지역에서 등방압밀비배수 삼축압축시험을 이용하여 피에조콘계수를 17로 제안하였으며, 최근에는 Tanaka(1998)가 일본에서 CPT와 DMT를 이용하여 피에조콘계수를 8~16으로 제안하는 등 유럽, 남미, 동남아시아 등에서 현장베인시험, 일축압축시험, 삼축압축시험, 공내재하시험 등을 이용하여 경험적 방법을 통해 피에조콘계수를 제안하였다.

또한, 국내의 경우 이선재(1997)는 영종도, 평택, 아산 등에서 실시한 현장베인시험 및 등방압밀비배수 삼축압축시험, 이방압밀비배수 삼축압축시험, Ko압밀 비배수 삼축압축시험을 이용하여 피에조콘계수를 11.5~24.9로 제안하였고, 김주형 등(2000)은 영종도 지역에서 실시한 현장베인시험을 이용하여 피에조콘계수를 14.5로 제안하였으며, 김종국 등(2001)은 영종도 지역에서 실시한 비압밀비배수 삼축압축시험을 이용하여 피에조콘계수를 18.2로 제안하는 등 국내에서도 피에조콘계수에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 실정이다.

3. 현장 및 실내시험

본 연구에서 수행된 현장시험 및 실내시험 내용은 시추조사 56회, 피에조콘 관입시험 58회, 간극수압 소산시험 21회, 현장베인시험 8회, Dilatometer Test 4회 등을 수행하였으며, 채취된 불교란 시료를 통해 물성시험 1식 및 UU-Test 34회, CU-Test 35회 등을 수행하였다.

또한, 시추조사 성과 및 현장시험 성과를 비교·분석하기 위하여 집중조사구간을 선정, 동일 위치에서 시추

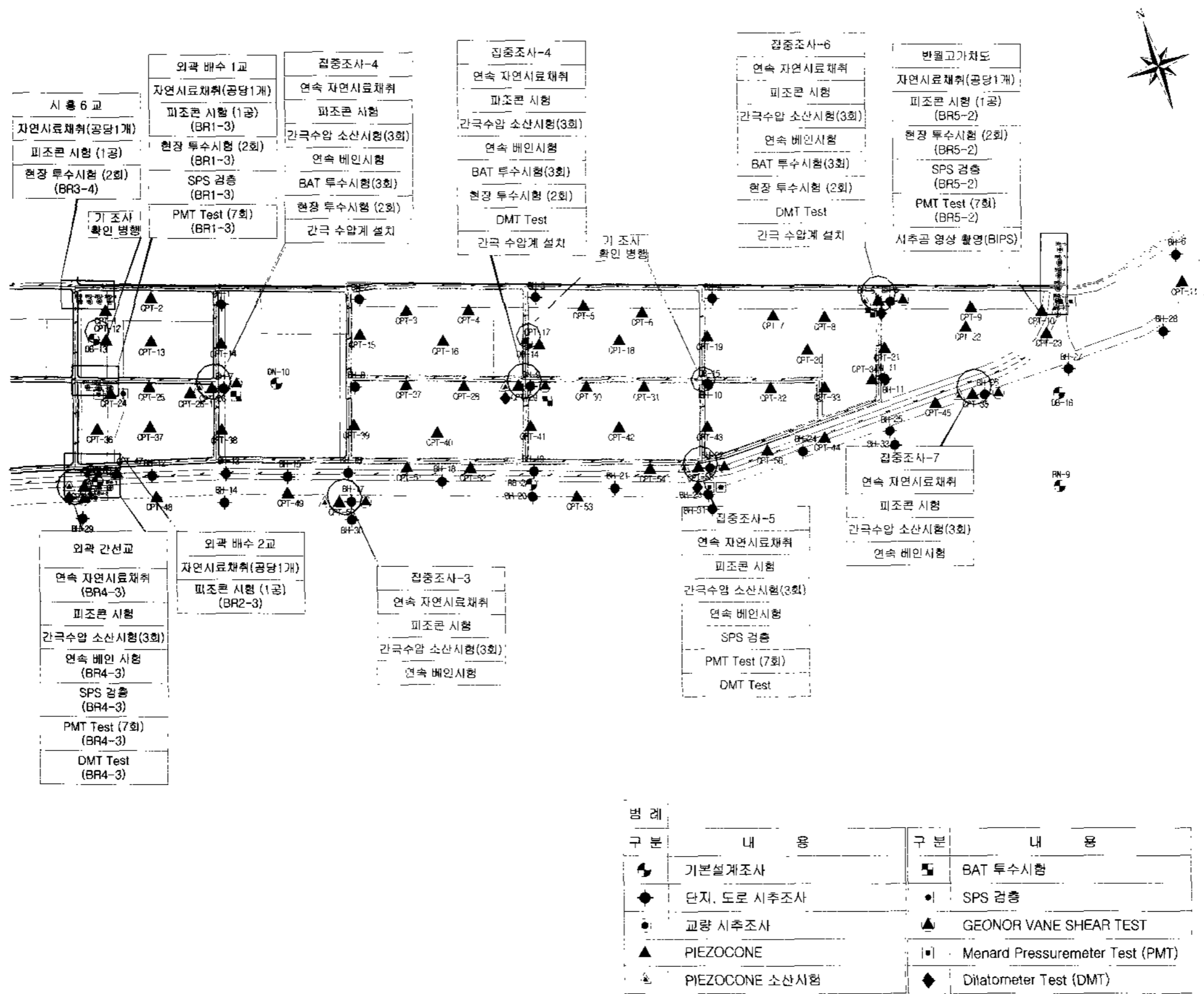


그림 1. 지반조사 위치도

조사 및 다양한 현장시험, 실내시험을 수행하여 지반특성 분석 시 발생할 수 있는 오차를 최소화 하였다.

3.1 시추조사

본 연구대상의 시추조사 결과 점성토층은 통일 분류법상 CL, ML을 보이는 것이 많으며, 심도는 BH-17에서 최대 10.8m 분포하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 사질토층인 모래층은 주로 실트질 모래와 모래, 자갈질 모래의 형태를 보이고 있고, 통일 분류법상 SM을 보이는 것이 많은 것으로 나타났으며, 심도는 BH-5 및 BH-12에서 약 11.0m의 층후를 나타내고 있는 것으로 나타났다.

또한 표준관입시험 결과로부터 점성토의 연경도와 사질토의 상대밀도를 분석한 결과, 점성토는 N치가 2이하인 매우 연약한 층이 약 55%, 연약층이 18.2%, 보통 견고한 층이 17.2%, 견고한 층이 6.1%, 매우 견고 및 고결이 약 3.0%를 나타내고 있어 연구대상 지역 점토층은 대부분 표준관입시험 결과로부터 추정할 수 있는 연경도는 매우 연약한 층을 나타내고 있다.

또한, 사질토의 경우는 매우 느슨한 상태가 10.1%, 느

슨이 30.3%, N치가 15~30인 보통 조밀한 층 42.0%, N치 30이상의 조밀한 층이 약 17.6%로 나타나 연구대상 지역의 사질토층은 대부분 보통 조밀한 층을 형성하고 있는 것으로 나타났다.

3.2 피에조콘 관입시험

시추조사 결과와 동일 위치 및 근접구간에서 수행된 연속적인 피에조콘 관입시험 결과인 콘 관입저항력, 간극수압, 마찰력 등을 이용해서 심도별 세부 지층분류 및 연약층 강도, 샌드심의 존재 등을 파악하였다. 그림 2는 피에조콘 관입시험결과를 나타낸 것으로 심도별 지층분류, 콘 관입저항력, 간극수압 분포를 도시하고 있다.

CPT-9의 시험결과 층후는 0.0~8.7m(CL층), 8.7~15.2m(SM층), 15.2~16.2m(ML층), 16.2~16.9m(SM층)으로 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 콘 관입저항력 분포는 점성토층 상부에서는 2.10~11.3kgf/cm², 하부 점성토층에서는 9.88~23.06kgf/cm²로 나타났다.

CPT-13의 시험결과 층후는 0.0~3.8m(CL층), 3.8~5.2m(SM층), 5.2~13.3m(CL층), 13.3~20.1m(SM층)으

로 분포하고 상부 점성토층과 하부 점성토층 사이에 샌드심으로 추정되는 모래층이 약 1.4m 정도 분포하는 것으로 나타났으며, 콘 관입저항력 분포는 점성토층 상부에서는 0.56~6.83kgf/cm², 하부 점성토층에서는 2.65~26.42kgf/cm²로 나타났다.

CPT-23의 시험결과 층후는 0.0~7.0m(CL층), 7.0~10.0m(SM층), 10.0~15.8m(CL층), 15.8~16.8m(SP층)으로 분포하고 상부로부터 점토층이 일정심도까지 연속적으로 분포하고 있는 것으로 나타났으며, 또한 사질토층이 하부 점성토 사이로 약 3.0m 정도 협재하는 것으로 나타나고 있다. 콘 관입저항력 분포는 점성토층 상부에서는 1.29~12.92kgf/cm², 하부 점성토층에서는 6.22~19.00kgf/cm²로 나타났다.

CPT-26-1의 시험결과 층후는 0.0~0.8m(ML층), 0.8~3.5m(CL층), 3.5~5.5m(SM층), 5.5~12.1m(ML층), 12.1~17.0m(SM층), 17.0~17.5m(ML층), 17.5~19.73m(SM층)

으로 다양한 지층상태가 나타났으며, 콘 관입저항력 분포는 점성토층 상부 ML에서는 7.59~13.87kgf/cm², CL에서는 0.35~7.53kgf/cm²의 분포를 보여 상부 ML의 콘 관입저항력이 크게 나타났다. 또한 5.5~12.1m 하부 ML 구간에서는 3.03~15.71kgf/cm²로 나타났고, 17.0~17.5m의 ML 구간에서는 15.87~83.63kgf/cm²로 나타났다.

3.3 현장베인시험

연구대상 지역의 점성토층 비배수전단강도 특성을 파악하기 위하여 연속적인 현장베인시험을 실시하였으며, 점성토층의 예민비를 파악하기 위하여 교란 상태에서 시험을 실시하였다. 그림 3은 현장베인시험에 의한 심도별 비배수전단강도 분포와 예민비 분포를 95% 신뢰구간에서 나타내고 있다.

연구대상 지역의 베인 시험결과 교란 및 불교란 모두 심도 증가에 따라 비배수전단강도가 증가하는 것으로

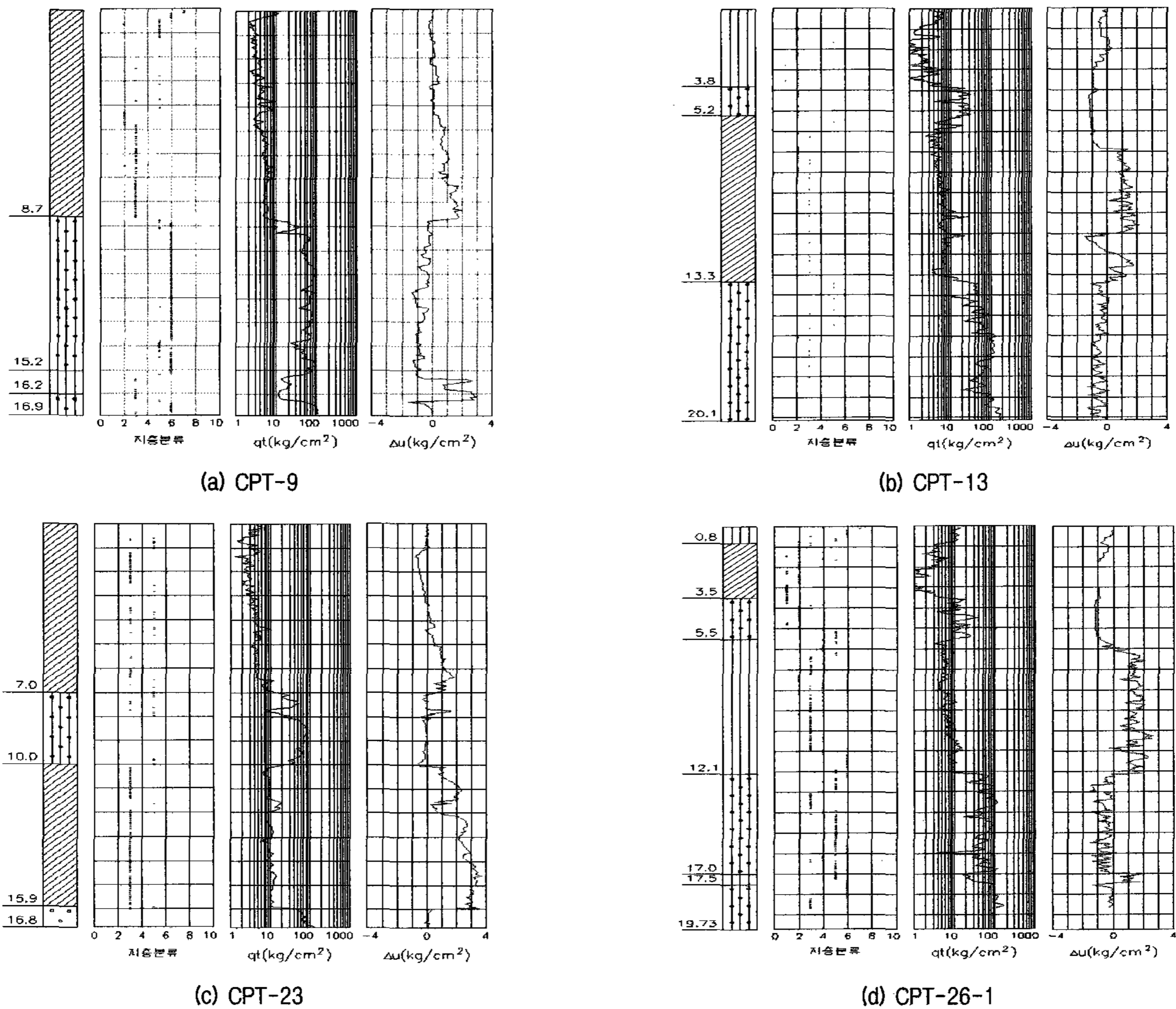
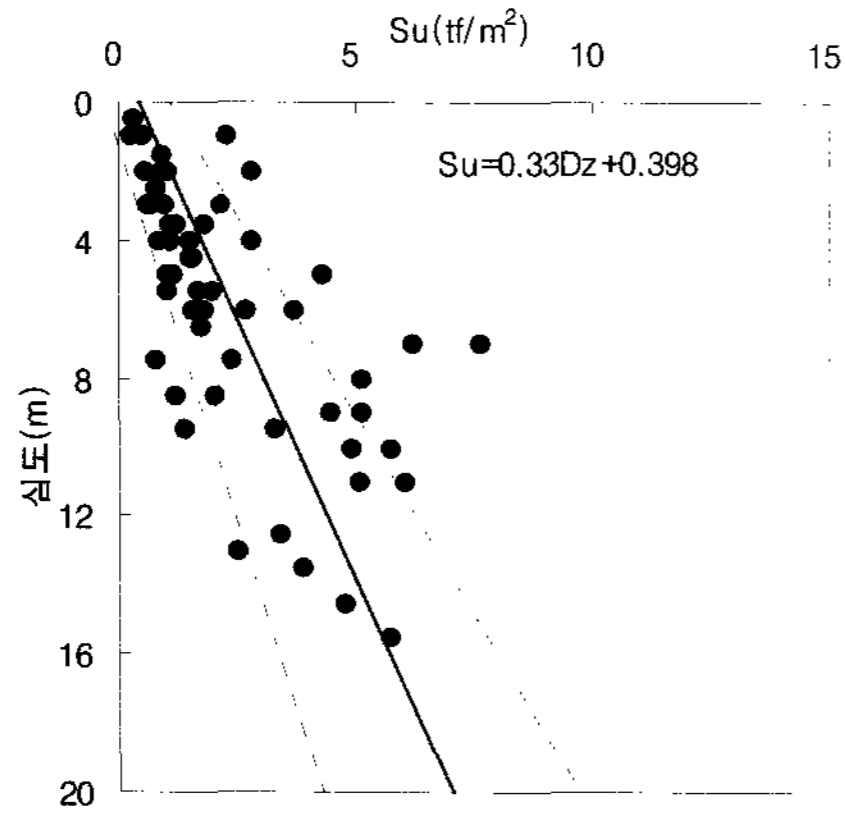
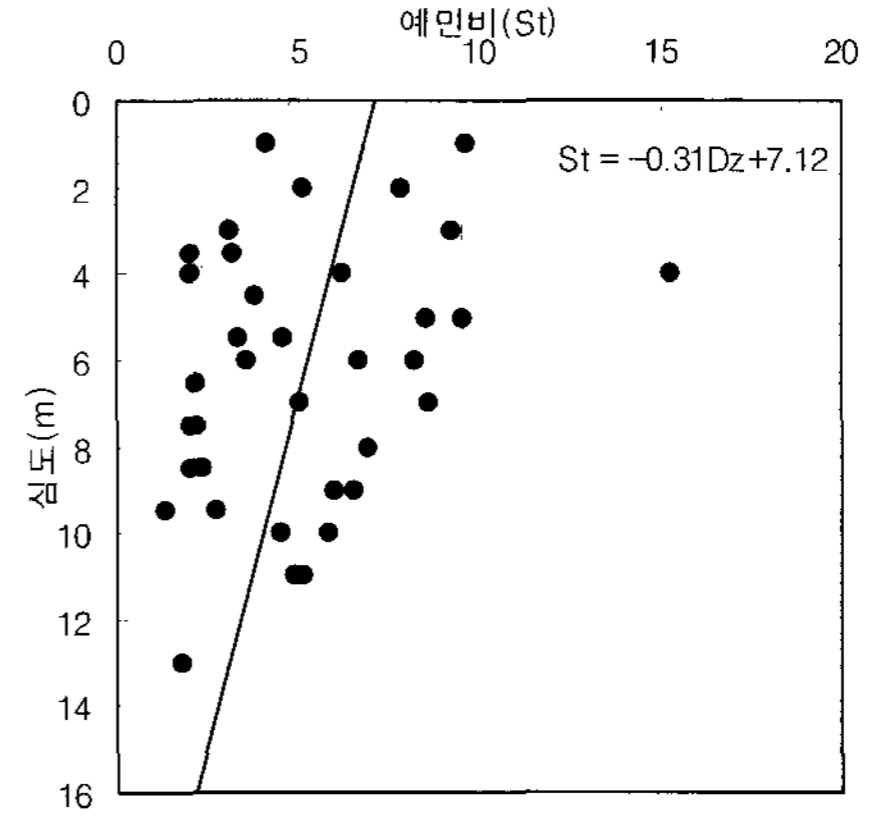


그림 2. 피에조콘 관입시험 결과

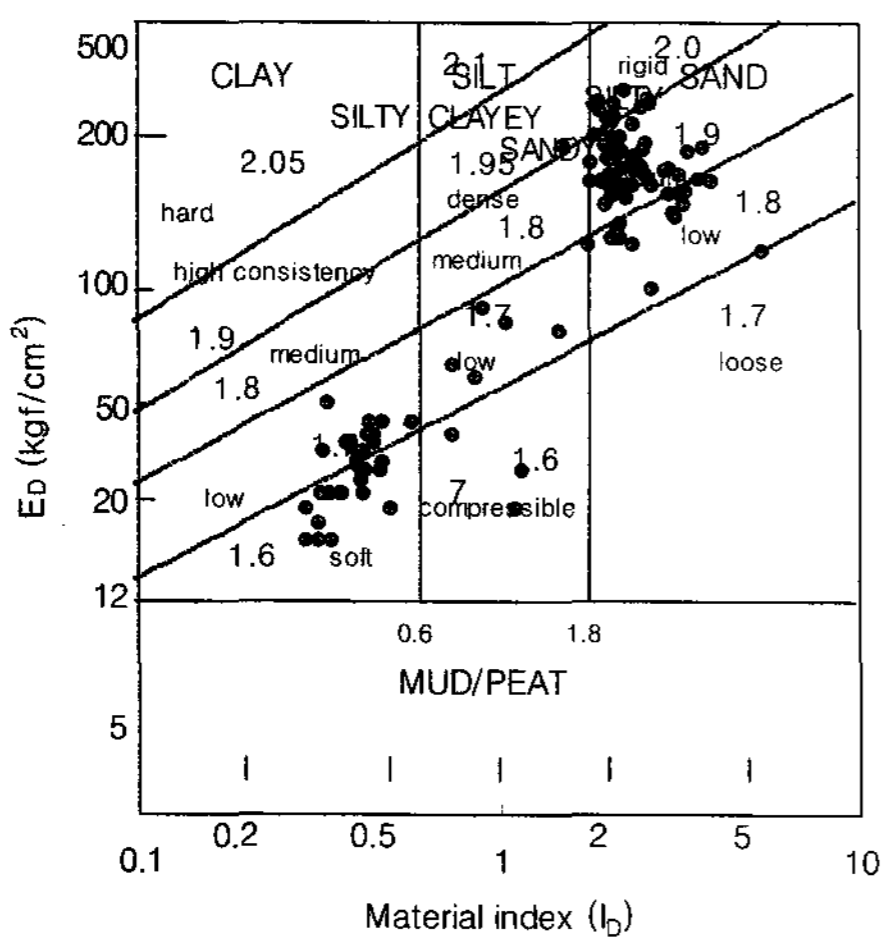


(a) 비배수전단강도

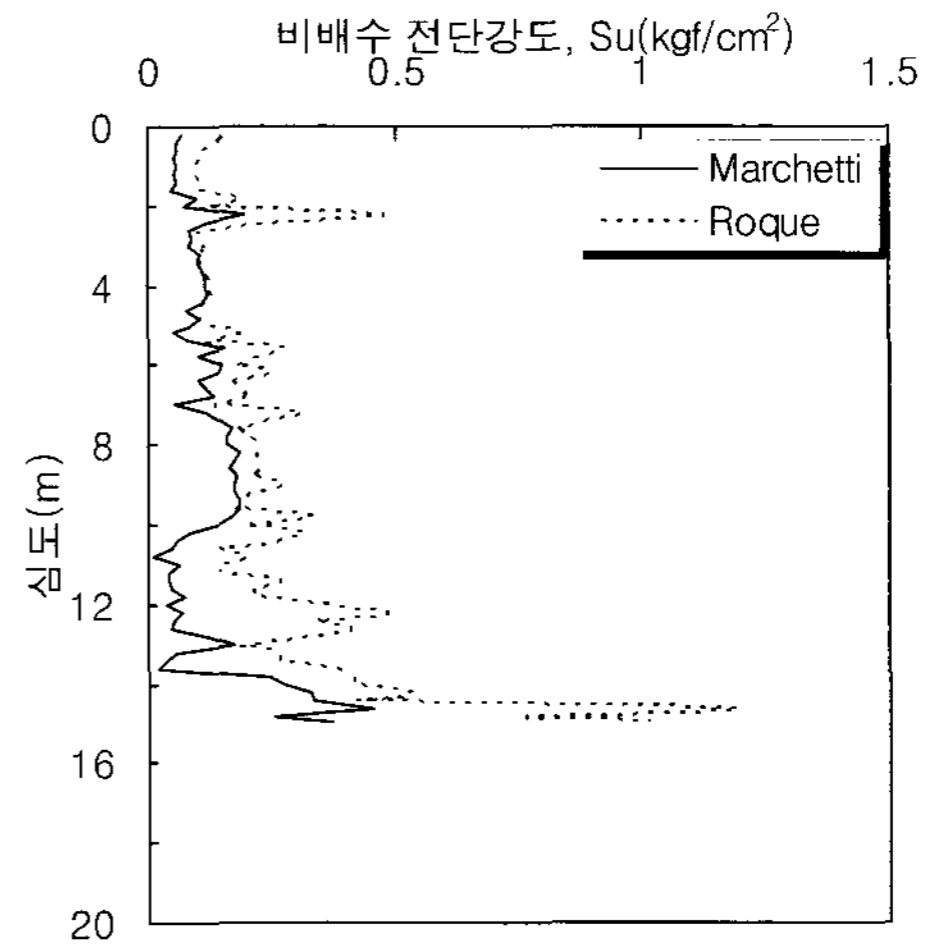


(b) 예민비 분포

그림 3. 심도별 비배수 전단강도 및 예민비



(a) 흙 분류



(b) 심도별 전단강도

그림 4. 흙 분류 및 심도별 비배수전단강도 산정결과(BH-9)

나타났으며, 심도별 비배수전단강도는 $S_u=0.33D_z+0.398$ 의 상관성을 보이고 있다. 비배수전단강도 분포는 최소값이 0.022kgf/cm^2 , 최대값이 0.764kgf/cm^2 이며 평균 0.237kgf/cm^2 로 나타났다.

현장배인시험 시 불교란 상태에 대한 시험 이외에 교란된 상태의 비배수전단강도 시험을 실시하여 불교란 시 비배수전단강도와 교란 시 비배수전단강도의 비로 점토층의 예민비를 산정하였다. 시험결과 예민비는 최소 2.0에서 최대 15.3의 분포로 평균 5.27을 나타내고 있으며, 상부에서 하부로 갈수록 작은 값을 나타내고 있다. 심도 증가에 따른 예민비는 $S_t=-0.31D_z+7.12$ 로 나타나고 있다.

3.4 Dilatometer Test

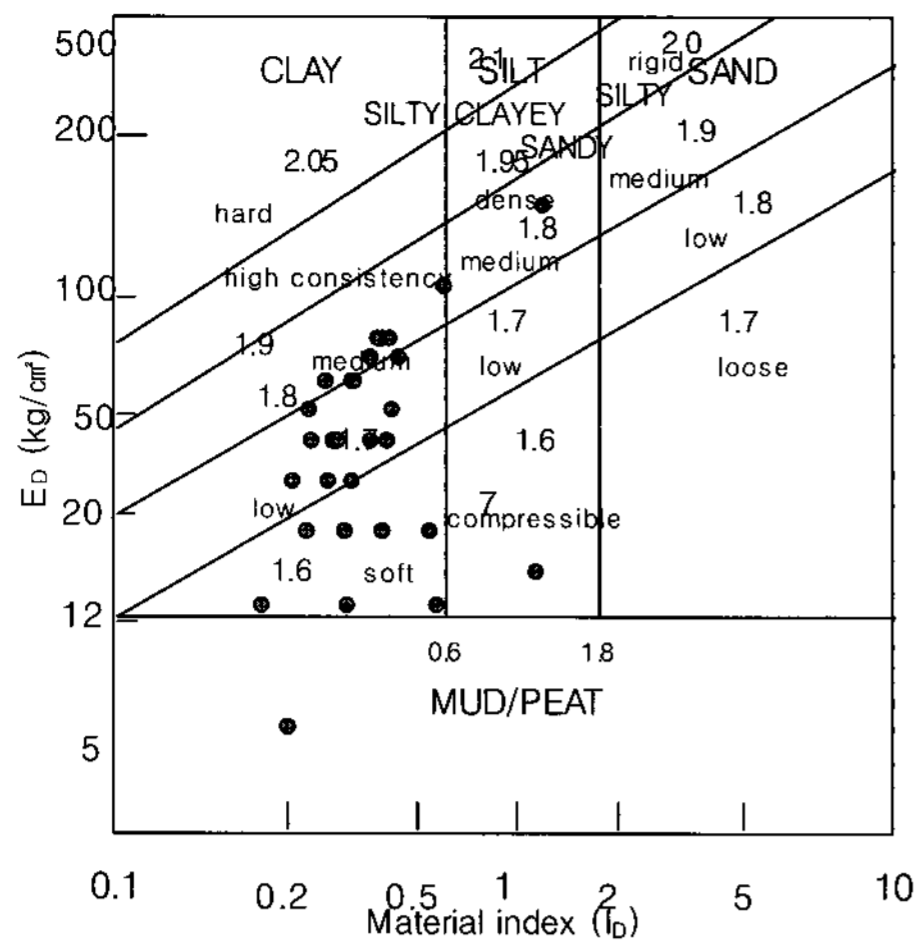
DMT를 실시하여 흙의 분류, 비배수전단강도 등의 연구대상 지역의 지반특성을 파악하였다.

그림 4는 BH-9번에 대한 흙 분류 및 심도별 비배수전단강도 산정결과로 점토층과 실트층 및 모래층이 분포하고 있는 것으로 나타났다. 심도별로 0.0~2.3m는 SM, 2.3~9.8m는 ML 및 CL, 9.8~12.5m는 SM, 12.5~15.0m는 ML로 분류되었으며, 비배수전단강도는 상부 점토층은 $0.05\sim0.19\text{kgf/cm}^2$, 하부층은 $0.02\sim0.45\text{kgf/cm}^2$ 으로 나타나고 있다.

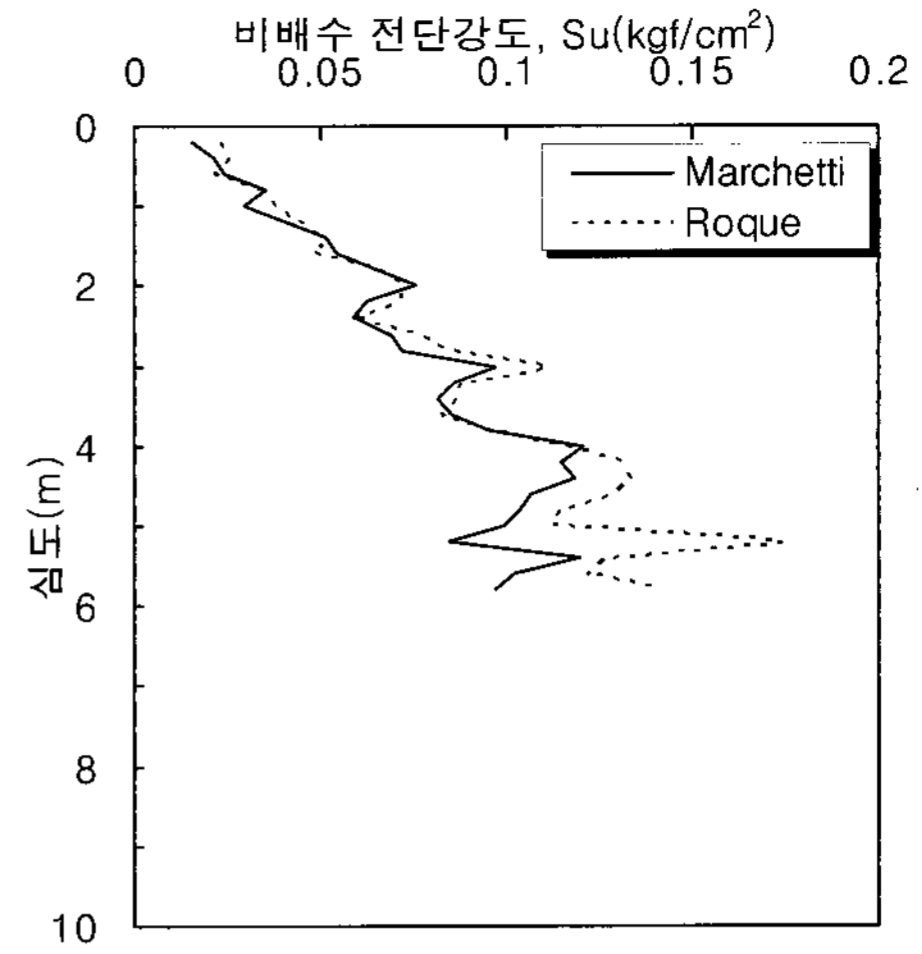
그림 5는 BH-22번에 대한 흙 분류 및 심도별 비배수전단강도 산정결과로 주로 점토층이 분포하며, 일부 실트층이 협재되어 있는 것으로 나타났다. 비배수전단강도는 $0.02\sim0.12\text{kgf/cm}^2$ 의 분포를 보이고 심도 증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다.

3.5 실내시험

연구대상 지역에서의 실내시험결과 중 콘 관입저항

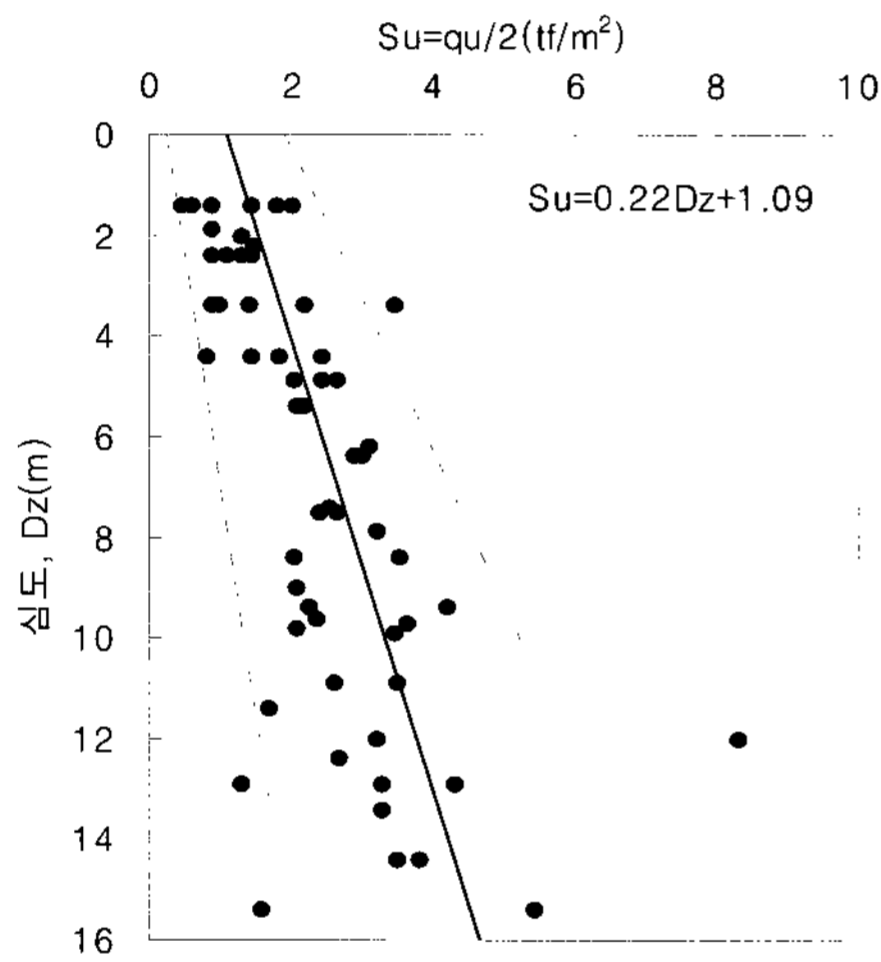


(a) 흙 분류

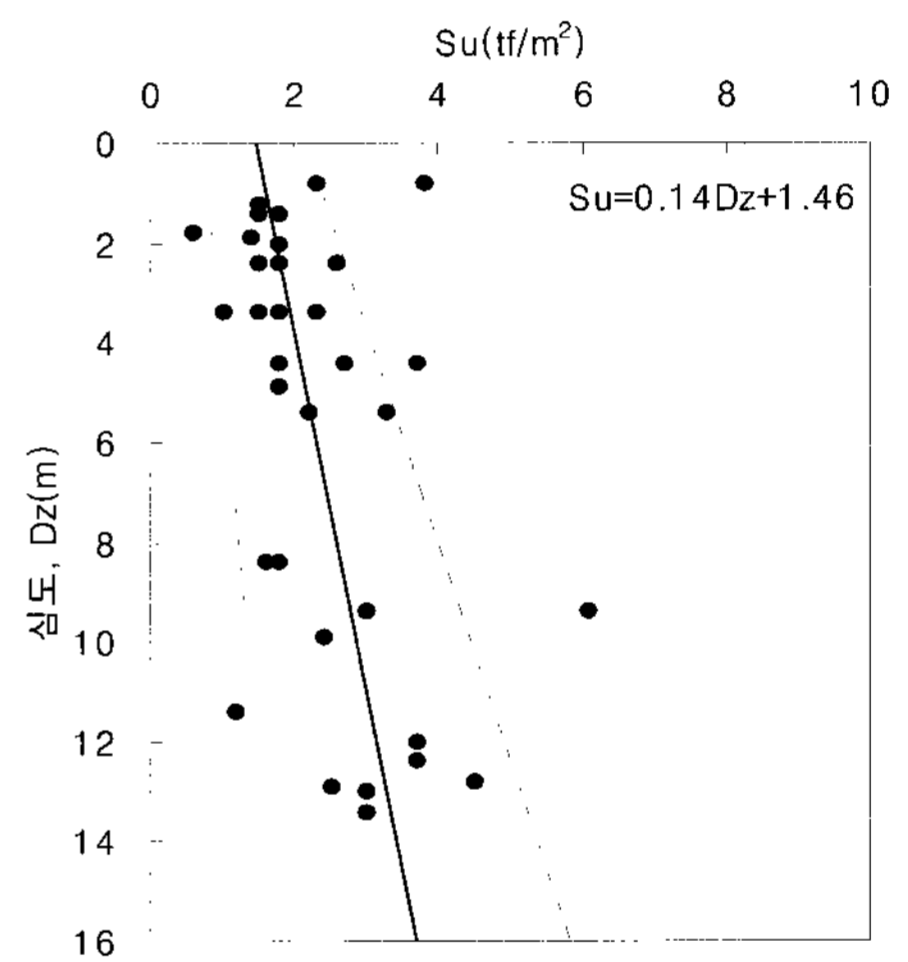


(b) 심도별 전단강도

그림 5. 흙 분류 및 심도별 비배수전단강도 산정결과(BH-22)



(a) 일축압축시험(UCT)



(b) 삼축압축시험(UU)

그림 6. 심도별 비배수 전단강도 분포

력과 직접적인 관련이 있는 심도별 일축압축시험 및 UU-Test에 대한 결과를 정리하였다.

그림 6은 심도별 일축압축시험 및 UU-Test 결과를 95% 신뢰구간에서 나타내고 있다. 그림 6(a)의 일축압축시험의 경우 심도별 비배수전단강도는 $0.045 \sim 0.830 \text{ kgf/cm}^2$ 로 분포하고 있으며, 평균 0.283 kgf/cm^2 으로 나타나고 있다. 그림 6(b)의 UU-Test 경우 심도별 비배수전단강도는 $0.061 \sim 0.610 \text{ kgf/cm}^2$ 로 분포하고 있으며, 평균 0.250 kgf/cm^2 으로 나타나고 있다.

또한 심도가 증가 할수록 비배수전단강도는 일축압축시험 및 삼축압축시험 모두 증가하는 경향을 보이고 있으며, 심도와 비배수전단강도와의 상관성은 일축압축시험은 $Su = 0.22D + 1.09$, 삼축압축시험은 $Su = 0.14D + 1.46$ 의 분포를 나타내고 있다.

4. 피에조콘계수 산정

피에조콘 관입시험으로 점성토의 비배수전단강도를 직접 구할 수는 없다. 점성토의 비배수전단강도를 구하기 위해서는 피에조콘계수의 추정이 필요하며, 피에조콘계수를 구하기 위하여 지금까지 고전적 지지력 이론, 공동확장 이론 및 변형률 경로법 등을 이용한 여러 가지 이론적 방법과 삼축압축시험이나 현장배인시험 등을 통하여 피에조콘계수를 추정하고 비배수전단강도를 산정하는 경험적 방법을 사용하고 있다.

이론적 방법을 통한 비배수전단강도 산정에는 적용되는 변수 자체가 많고, 이 변수 또한 현장에서 바로 측정이 불가능하며, 실내시험 등에 의해서 결정되기가 매우 어렵기 때문에 실용적인 측면에서 많은 문제점을 내

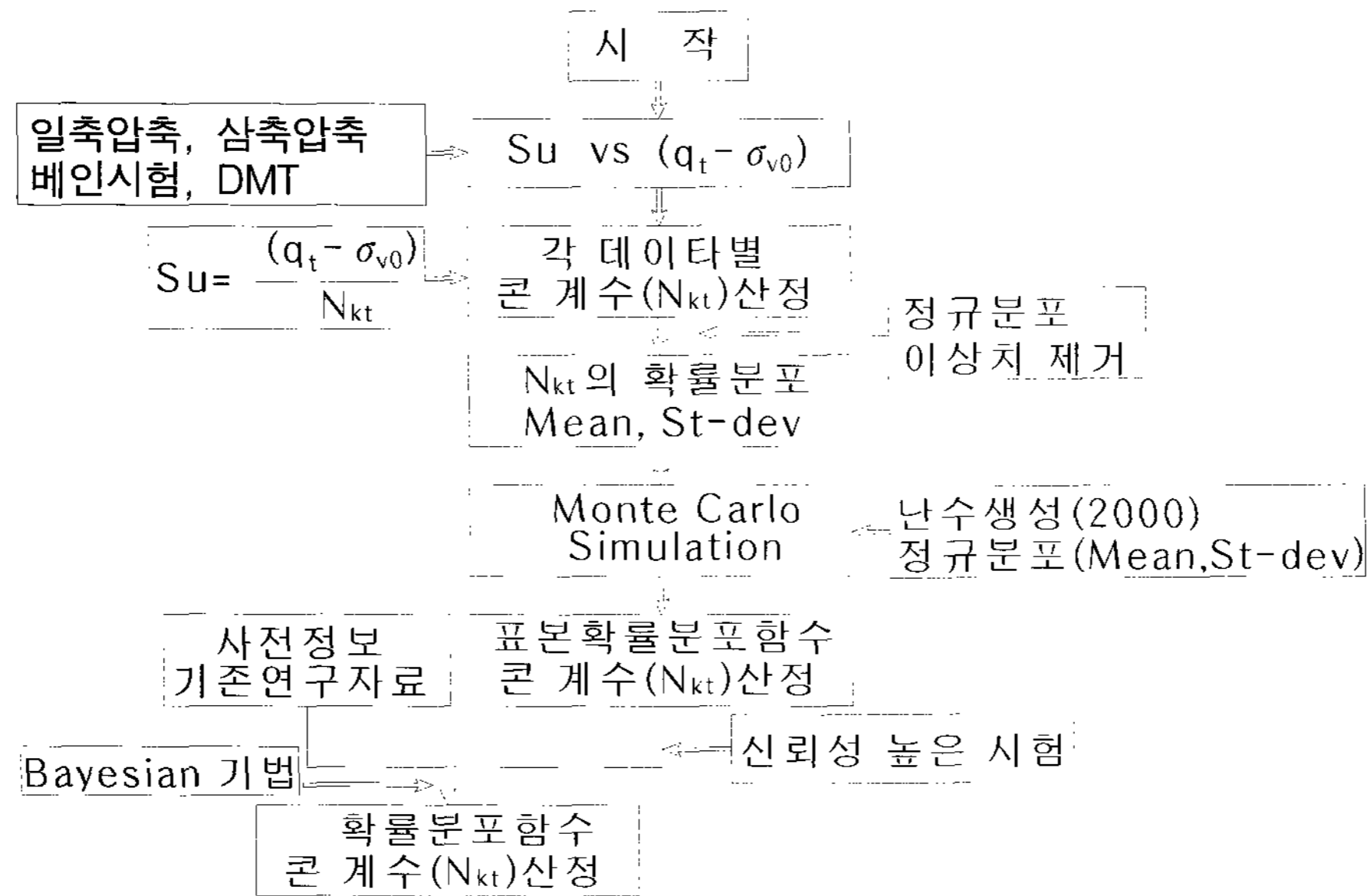


그림 7. 피에조콘계수 산정 흐름도

포하고 있는 실정이다. 특히, 강성지수와 같은 변수는 그 자체가 비배수전단강도의 함수이므로 실제 문제에 더욱 적용하기가 어렵다. 이러한 문제점 때문에 피에조콘을 이용한 비배수전단강도는 주로 경험적 방법에 의한 피에조콘계수를 이용하여 구하고 있는 실정이다.

이에 본 연구에서는 서해안 시화호 주변지역 점성토 지반에서 수행된 피에조콘 관입시험의 결과로부터 점성토의 비배수전단강도를 산정하기 위하여 피에조콘계수 산정 시 1985년 Lunne가 추천한 가장 적용성이 좋은 전체 선단저항치를 이용한 방법을 통해서 산정 하였으며, 또한 실내시험이나 현장시험에서 얻은 값에 대한 오차에 의한 영향을 줄이기 위하여 통계기법을 적용하여 신뢰성을 향상시키도록 하였다.

그림 7은 피에조콘계수 산정을 위한 분석흐름을 나타내고 있다.

4.1 상관성 분석에 의한 피에조콘계수 산정

베인시험 및 DMT 값에 의한 피에조콘계수 산정은 각각의 시험위치 및 시험공 근접구간의 콘관입시험 결과에 의한 콘 저항력과의 상관관계를 비교 분석하여 피에조콘계수를 산정하였다.

또한, 일축압축시험 및 삼축압축시험의 경우는 연구 대상지역내의 특정 지역에서 시험결과를 이용할 경우 획득된 비배수전단강도 자료의 부족 및 심도별 연속적인 값과 콘관입시험에 의한 관입저항력의 상관성을 분석하

기 곤란하여 전체 연구구간에서 실시한 자료를 이용하여 상관관계를 분석하여 피에조콘계수를 산정하였다.

그림 8은 각 시험별로 수집된 비배수전단강도 값과 콘관입시험 결과 값의 분포를 통해 상관성 분석을 수행한 결과이다.

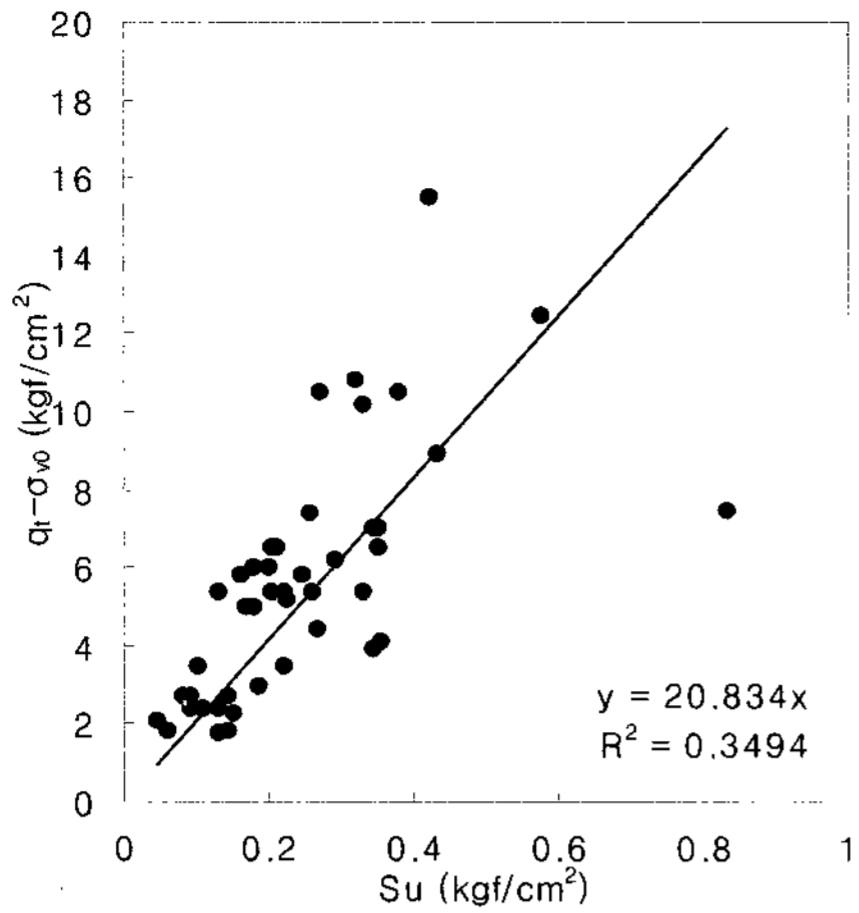
그림 8에서 볼 수 있듯이 x축은 기준이 되는 비배수전단강도 시험값을 나타내고 y축에는 콘관입시험 결과 값을 보여주고 있고, 이 두 값의 상관관계를 회귀 분석한 결과를 실선으로 나타내어 주고 있으며, 여기서 실선의 기울기가 경험적 피에조콘계수 값이다.

그림 8(a)와 (b)는 실내시험 결과인 일축압축시험과 삼축압축시험 결과에 의한 비배수전단강도와 관입저항력의 상관관계 분포를 나타낸 것이다.

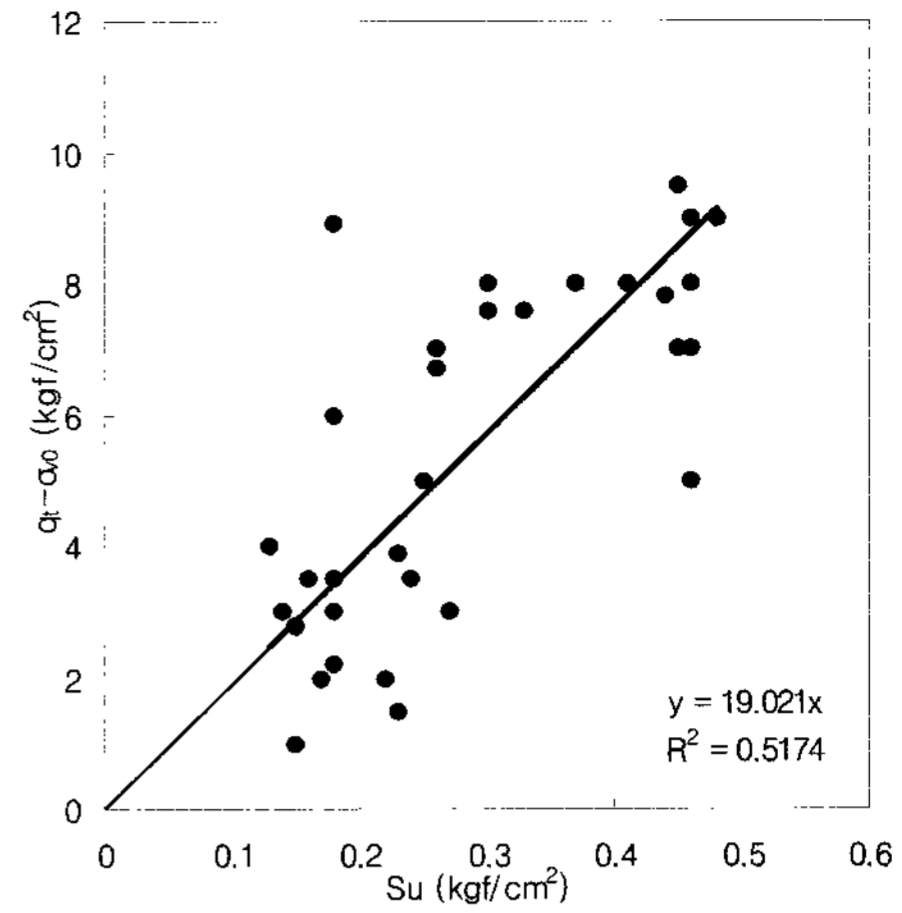
각 시험별 분포로부터 상관성 분석을 실시하여 피에조콘계수를 산정한 결과 일축압축시험 피에조콘계수는 20.834로 산정되었고, 삼축압축시험 피에조콘계수는 19.021로 산정되었다. 산정된 콘계수의 값을 비교해 볼 때 두 실내시험 결과에 의해 산정된 값은 유사한 것으로 나타났으나, 비배수전단강도와 관입저항력의 상관성을 대표하는 R²값을 비교해 보면 일축압축시험은 0.3494, 삼축압축시험은 0.5174로 나타나 두 시험 모두 상관성이 떨어지는 것으로 나타났다.

그림 8(c)와 (d)는 현장시험 결과인 베인시험과 DMT 결과에 의한 비배수전단강도와 관입저항력의 상관관계 분포를 나타낸 것이다.

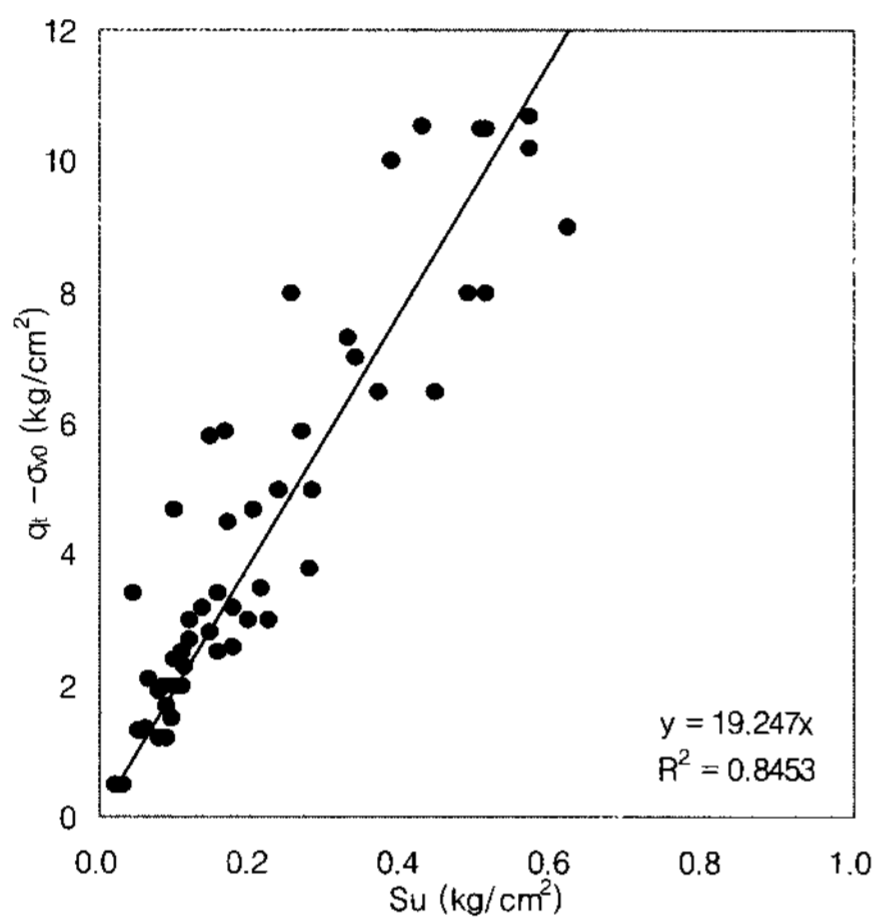
시험별 분포로부터 비배수전단강도와 관입저항치의



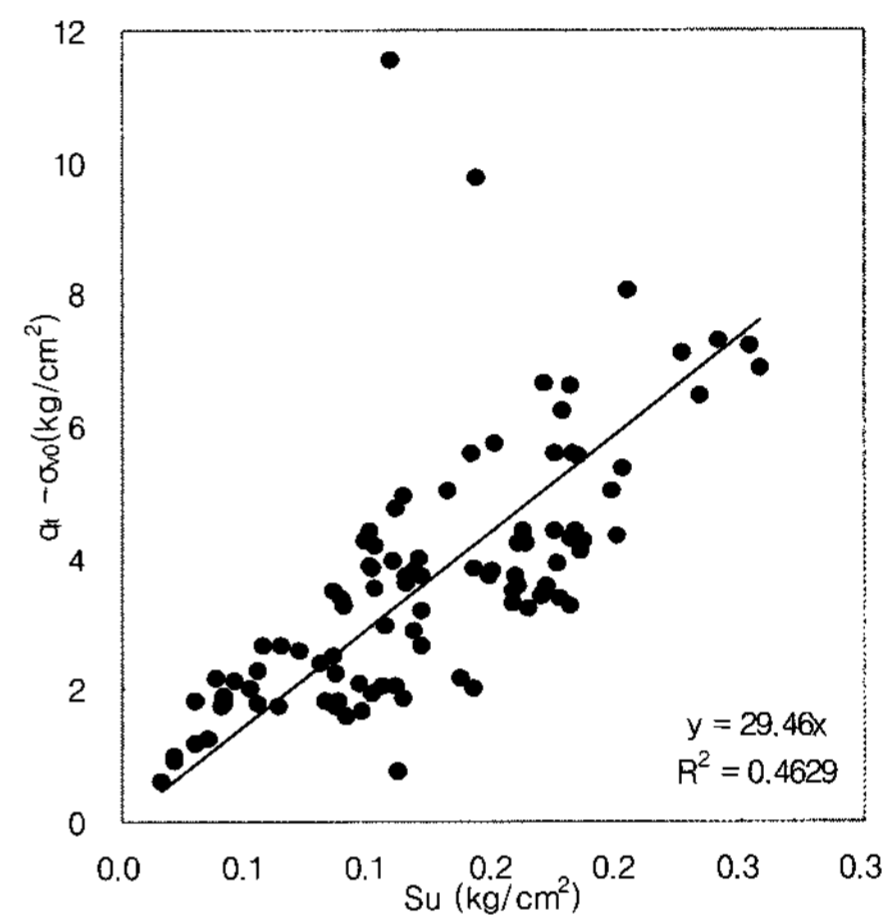
(a) 일축압축시험(UCT)



(b) 삼축압축시험(UU)



(c) 현장베인시험(FVT)



(d) DMT

그림 8. 각 시험별 상관성 분석결과

상관성 분석을 실시하여 피에조콘계수를 산정한 결과 베인시험 피에조콘계수는 19.247로 산정되었고, DMT에 의한 산정 결과 피에조콘계수는 29.460로 분석되었다.

산정된 피에조콘계수 값을 비교해 볼 때 두 현장시험 결과에 의해 산정된 값은 상당히 큰 차이를 나타내고 있으며, DMT 결과는 베인시험 결과에 의한 값보다 약 10정도의 차이를 보이고 있다. 각 시험별로 비배수전단강도와 관입저항력의 상관성을 대표하는 R^2 값을 보면 베인시험은 0.8453, DMT는 0.4629로 나타나 현장 베인시험이 DMT에 의한 값보다 상관성이 높은 것으로 나타났다.

베인시험을 제외하고 대부분 시험에서 시험값들에 의한 상관성이 낮게 나온 원인은 먼저 실내시험인 일축압축시험 및 삼축압축시험은 연구지역 점토층 내에 다량의 모래성분이 포함되어 있고, 그에 따른 각 위치 및 심도별 수행된 시험값들의 차이와 시료 채취시 발생되

는 교란 등의 원인으로 생각된다.

또한 현장시험인 DMT는 연속적인 비배수전단강도를 획득할 수 있으나, 비배수전단강도를 실내시험이나 베인시험과 같이 직접 구하는 것이 아니고 피에조콘 관입시험의 비배수전단강도를 구하는 방법과 유사하게 상관식이나 제안식 등을 이용하여 산정하고 있는 실정이며, 아직 그 적용성에 대한 연구가 진행 중이므로 시험 위치 및 심도에 따라 상관성이 떨어지는 원인일 수 있다고 판단된다.

4.2 통계분석에 의한 피에조콘계수 산정

4.2.1 각 시험별 확률분포 곡선 특성에 의한 피에조콘계수 산정

피에조콘계수 산정시 통계기법을 적용하기 위해서는 각 시험별로 비배수전단강도와 콘관입저항력과의 관계

에서 얻어지는 각각의 피에조콘계수를 산정해야한다. 이것을 위해서 앞선 상관 분석시 적용된 4개 기준시험 으로부터 얻어진 각 위치 및 심도별 비배수전단강도와 관입저항력에 의한 피에조콘계수를 각 데이터별로 산정하였다.

산정된 각 기준시험별 피에조콘계수를 이용해 각각의 확률분포함수에 의한 피에조콘계수의 평균과 표준편차를 구하였다. 이때의 확률분포함수는 물리현상 등의 예측을 할 때 발생하는 오차분포가 실제로 정규분포에 근사한 경우가 많고, 모집단이 정규분포이거나 또는 표본의 크기가 커지면 표본의 분포는 일정한 값으로 분포한다는 통계의 기본특성을 기반으로 산정하였다.

각 시험별 확률분포에 의해 구해진 평균 및 표준편차는 표 1에 정리하였다. 4개 기준시험에 대하여 산정된 콘계수를 비교해 보면 일축압축시험과 삼축압축시험 및 베인시험에 의해 산정된 콘계수 값은 비교적 유사한 범위를 보이고 있었으나, DMT 결과는 상당히 큰 값으로 3가지 기준시험과는 매우 큰 편차를 보이고 있었다.

4.2.2 Monte Carlo Simulation 기법에 의한 피에조콘계수 산정

Monte Carlo Simulation 기법이란, 구하고자 하는 수치의 확률적 분포를 반복 가능한 실험의 통계로부터 구하는 방법을 가리킨다. 즉, 많은 수의 실험을 바탕으로 통계 자료를 얻어 그 자료로부터 역산하여 어떤 특정한 수치나 확률분포를 구하는 방법이다.

Monte Carlo Simulation 기법은 자료의 제한성 및 한계성 극복, 이론적으로 추적할 수 없는 문제의 유일한 통계적 방법으로 알려져 있어 모든 과학 및 공학 분야에 널리 활용되고 있는 기법이다.

따라서 본 연구에서도 자료의 제한성 극복을 통한 신뢰성 향상을 위해서 Monte Carlo Simulation 기법을 적용하였다.

Monte Carlo Simulation 기법에 적용되는 표본의 추출은 앞서 구한 확률분포에 의해 구해진 각 시험별 피에조콘계수의 평균과 표준편차를 이용해 정규분포 형태를 따르는 난수 2000개를 무작위로 추출 하였다. 그리고 추출된 2000개의 표본에 의해 각 시험별 확률분포함수를 통해 평균과 표준편차를 구해서 각 시험별 해당하는 피에조콘계수를 산정하였다.

표 2에서 실내시험인 일축압축시험은 피에조콘계수 22.45, 표준편차 6.26이며, 삼축압축시험은 피에조콘계수 21.91 표준편차 7.951로 나타났다.

현장시험인 베인시험은 피에조콘계수 19.451, 표준편차 3.944로 가장 작은 표준편차를 나타내고 있으며, DMT는 피에조콘계수 32.58, 표준편차 11.01로 산정 되었다. 이것은 앞서 구해진 제한된 표본수를 사용한 각 시험별 피에조콘계수에 대한 확률분포와 비교 해 볼 때 피에조콘계수가 데이터 2000개에 의해 구해짐으로서 데이터에 대한 신뢰성이 크게 향상된 값으로 평가 할 수 있다.

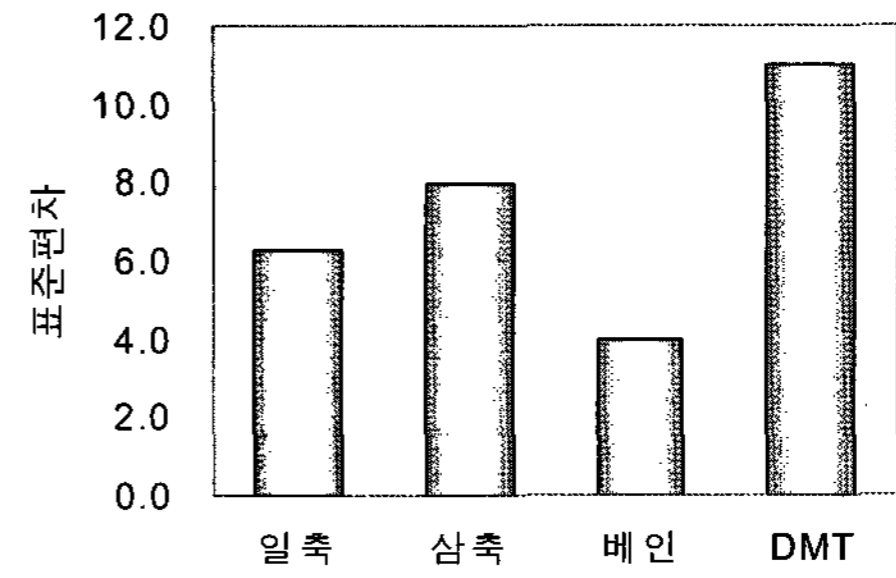
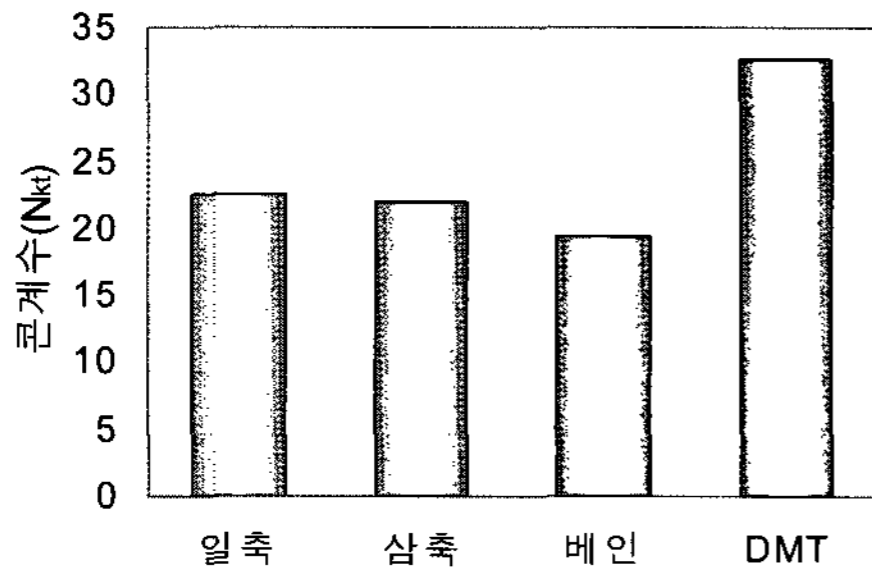
그림 9는 각 기준시험별로 시뮬레이션 결과의 평균과 표준편차를 비교한 그래프이다. 평균값으로 산정된 피에조콘계수와 각 확률분포에 대한 표준편차를 비교해 볼 때 피에조콘계수는 베인시험의 경우 19.451로 가장 작게 산정 되었고, 삼축압축시험은 21.91, 일축압축시험은 22.45, DMT는 32.58 순으로 작게 나타났다. 또한 산정된 피에조콘계수에 대한 표준편차를 비교해 보면 베인시험에 의한 값이 3.944로 가장 작게 산정 되었고, 삼축압축시험은 7.951, 일축압축시험은 6.260, DMT는

표 1. 시험별 확률분포함수에 의한 피에조콘계수의 표본평균 및 표준편차

구 분	일축압축시험(UCT)	삼축압축시험(UU)	현장베인시험(FVT)	DMT
표본수	46	34	61	103
평균(μ)	21.70	20.21	19.34	30.79
표준편차(σ)	6.341	8.221	3.922	11.14
분산(σ^2)	40.168	67.664	15.34	124.12

표 2. Monte Carlo Simulation에 의한 피에조콘계수 산정결과

구 분	일축압축시험(UCT)	삼축압축시험(UU)	현장베인시험(FVT)	DMT
표본수	2000	2000	2000	2000
μ (평균)	22.45	21.91	19.451	32.58
σ (표준편차)	6.26	7.951	3.944	11.01



(a) 기준 시험별 피에조콘계수

(b) 시험별 표준편차 분석결과

그림 9. Monte Carlo Simulation에 의한 피에조콘계수 및 표준편차

11.01순으로 작게 나타나 베인시험에 의해 산정된 피에조콘계수 값의 분산 폭이 가장 작아 신뢰성이 높은 것으로 나타났으며, DMT의 경우는 가장 큰 분산 폭으로 낮은 신뢰성을 보이는 것으로 분석되었다.

4.2.3 Bayesian 기법에 의한 피에조콘계수 산정

본 연구에서는 기존에 알고 있는 피에조콘계수의 사전정보를 가지고 금회 연구에서 산정된 표본정보를 이용해 신뢰성 향상을 도모하는 Bayesian 통계 기법을 이용하여 본 연구대상 지역에서 최적의 피에조콘계수를 산정하였다.

그림 10은 Bayesian 기법에 의한 피에조콘계수의 산정과정과 각 표본에 대한 입력치를 나타낸 그림이다. 그림 10과 같이 사전정보와 표본정보를 활용하여 Bayesian 기법으로 분석하였다.

사전정보는 먼저 국내·외에서 제안된 피에조콘계수들을 채택하였고, 표본정보는 앞서 실시한 각 시험별 Monte Carlo Simulation 분석결과 가장 신뢰도가 높게 평가된 베인시험 결과에 의한 확률 분포함수를 표본정보인 우도함수로 하였다. 이 사전정보인 국내·외에서 제안된 피에조콘계수들의 사전확률 분포와 표본정보인 금회 산정결과에 의한 우도함수를 이용해 Bayesian 기법을 적용하여 사후확률밀도함수로부터 Bayesian값인 과업구간의 피에조콘계수를 산정하였다.

Bayesian 통계기법에서 사전정보로 적용된 국내·외

피에조콘계수 정보를 이용하여 사전정보인 기존자료의 평균 및 표준편차는 15.5와 7.78로 적용하였고, 표본정보는 Monte Carlo Simulation 분석결과를 적용하여 평균 및 표준편차는 19.451과 3.944를 Bayesian 기법으로 분석을 실시하였다.

표 3은 본 연구지역에서 실시한 Bayesian 분석결과를 나타내고 있으며, 그림 11은 Bayesian 분석결과에 의한 사전확률밀도함수, 표본확률밀도함수, 사후확률밀도함수를 도표로 나타내고 있다.

사전정보 및 표본정보에 의한 Bayesian 분석결과 피에조콘계수는 18.681로 분석되었고, 표준편차는 3.518로 산정되었다. 또한, Bayesian 분석을 통해 산정된 값을 표본정보인 Monte Carlo Simulation에 의해 분석된 값과 비교해 볼 때 피에조콘계수는 19.451에서 18.681로 나타났으며, 표준편차도 3.944에서 3.581로 작게 나타났다.

상기의 결과부터 본 연구대상 지역의 점토층에서 피에조콘계수는 베인시험 결과로부터 산정된 값을 이용해서 통계분석기법을 적용한 결과 피에조콘계수 값은 18.681로 산정되었다.

표 3. Bayesian 기법에 의한 피에조콘계수 산정결과

구분	사전정보	표본정보	사후정보
평균	15.500	19.451	18.681
표준편차	7.780	3.944	3.518

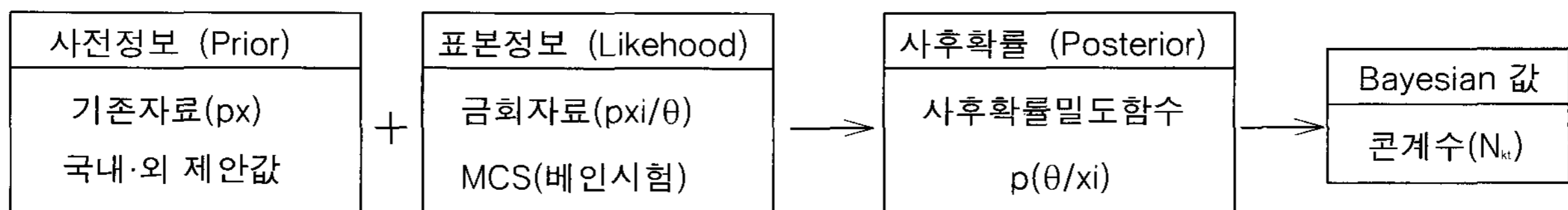


그림 10. Bayesian 기법에 의한 피에조콘계수 산정 흐름도

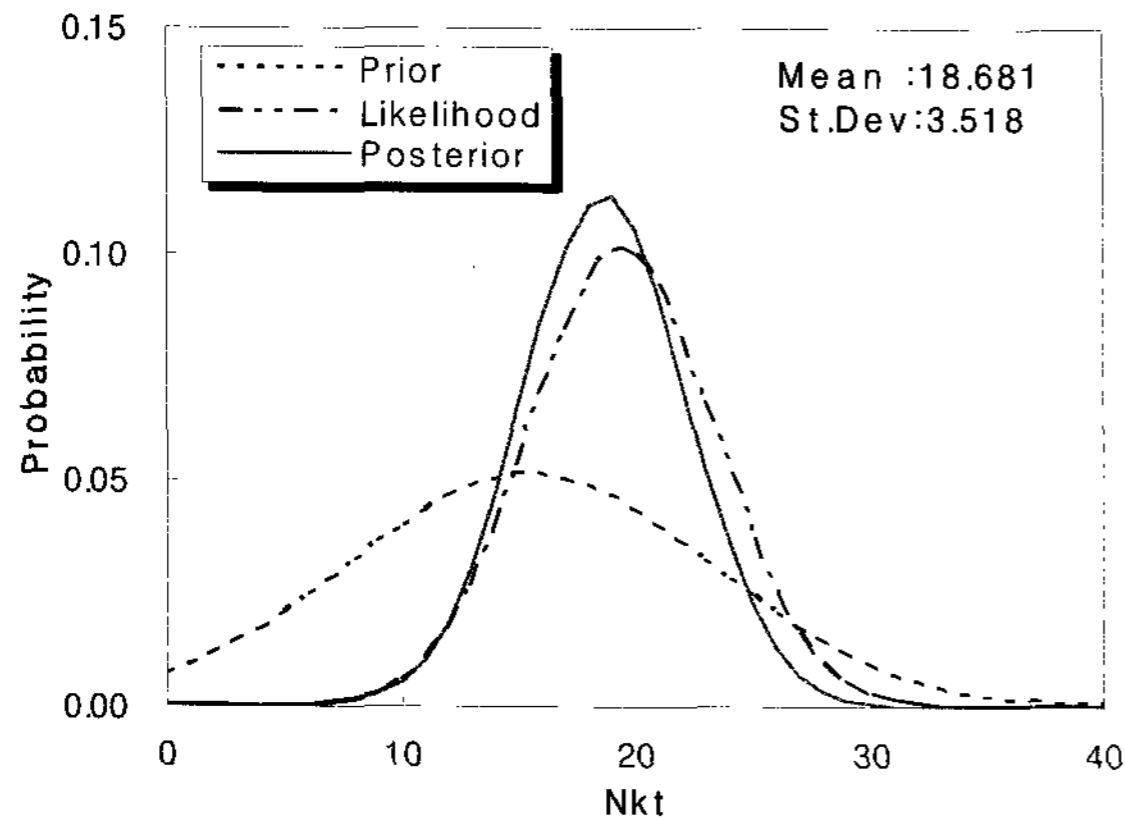


그림 11. Bayesian 기법에 의한 콘계수 산정결과

5. 결론

국내 서해안 지역의 점성토 지반을 대상으로 일축압축시험, 삼축압축시험, 현장베인시험, Dilatometer Test, 피에조콘관입시험 실시한 결과를 활용하여 서해안 시화호 인근 점성토 지반의 피에조콘계수를 산정한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 비배수전단강도와 콘관입저항력과의 상관성 분석을 통하여 피에조콘계수와 결정계수(R^2)를 산정한 결과 일축압축시험은 $N_{kt}=20.834(R^2=0.3494)$, 삼축압축시험은 $N_{kt}=19.021(R^2=0.5174)$, 현장베인시험은 $N_{kt}=19.247(R^2=0.8453)$, Dilatometer Test는 $N_{kt}=29.460(R^2=0.4629)$ 으로 산정되었다. 따라서 현장베인시험의 경우가 결정계수(R^2)가 가장 높게 나타나 신뢰성이 가장 높은 것으로 평가되었다.
- (2) 통계분석 기법인 Monte Carlo Simulation 분석을 적용한 결과 산정된 피에조콘계수와 표준편차는 일축압축시험은 22.450 ± 6.26 , 삼축압축시험은 21.910 ± 7.951 , 베인시험은 19.451 ± 3.944 , Dilatometer Test는 32.580 ± 11.01 로 산정되었으며, 산정된 피에조콘계수를 비교·분석한 결과 현장베인시험에 의한 값이 표준편차가 가장 작게 나타나 신뢰성이 타 시험에 비해 높은 것으로 평가되었다.
- (3) 각 기준시험별 피에조콘계수 산정시 상관성 분석에 의한 결정계수(R^2)와 통계분석에 의한 표준편차 값을 비교·분석한 결과 피에조콘계수 평가를 위한 가장 적절한 기준 비배수전단강도 시험은 상관성 분석 시 결정계수가 $R^2=0.8453$, 통계 분석 시 표준편

차가 $\sigma=3.518$ 로 가장 신뢰성이 높은 베인시험을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

- (4) 신뢰성 향상을 위하여 기존 제안값을 사전정보로 Monte Carlo Simulation 분석결과 가장 높은 신뢰도를 보인 베인시험에 의한 피에조콘계수 값을 표본정보로 하여, Bayesian 통계 분석을 실시한 결과 피에조콘계수는 18.681로 분석되었고, 표준편차는 3.518로 산정되었다.
- (5) 본 연구대상 지역에서 산정한 피에조콘계수와 국내·외 지역별 제안값을 비교해 볼 때 각 기준시험 및 지반특성에 따라 약간의 차이가 나타나는데, 그 원인은 기준 비배수전단강도시험의 신뢰성, 지반이력, 퇴적환경 등 여러 가지 요인들로 판단된다. 따라서 정확한 피에조콘계수 산정을 위해 기준이 되는 비배수전단강도시험의 신뢰성 향상 및 지역적 특성 등을 고려한 연구가 향후 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2007년도 서울시립대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

1. 김종국, 김영웅, 최인걸, 박영목 (2001), "CPTu와 DMT를 이용한 인천국제공항 해성점토의 공학적 특성연구", *한국지반공학회 논문집*, 제17권, 제2호, pp.41-49.
2. 김주형, 김영웅, 조성민, 김명모 (2000), "인천국제공항 부지 해성 세립토에 대한 CPTU와 DMT 결과 비교", *한국지반공학회 논문집*, 제16권 제6호, pp.23-33.
3. 이선재 (1997), *피에조콘을 이용한 국내지반의 공학적 특성 연구*, 서울대학교 대학원 박사학위 논문.
4. 윤길림, 이규환 (2004), "콘관입시험의 활용 및 지반설계", *구미서관*.
5. 장인성, 이선재, 정충기, 김명모 (2001), "국내점성토 지반의 피에조콘 계수", *한국지반공학회 논문집*, 제17권 제6호, pp.15-24.
6. Baligh, M. M. (1975), "Theory of deep site static cone penetration resistance", Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, Cambridge, Mass., Publication No. R75-56.
7. Chen, B. S. and Mayne, P. W. (1993), "Piezocone evaluation of undrained shear strength in clays", *Proceedings of 11th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Singapore, pp.91-98.
8. 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.3, No.1, pp.23-36.

9. Lunne, T., Christoffersen, H. P. and Tjelta, T. I. (1985), "Engineering use of piezocone data in North Sea Clays", *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol.2, pp.907-912.
10. Robertson, P. K., Campanella, R. G., Gillespie, D. G. and Greig, J. (1985), "Recent developments in insitu testing of soils", *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol.2, pp.849-854.
11. Schmertmann, J. H. (1978), "Guidelines for cone penetration test, Performance and Design", Federal Highway Administration, *Report FHWA-TS-78-209*, Washington, July, 145p.
12. Tanaka, H. and Tanaka, M. (1998), "Characterization of sandy soil using CPT and DMT", *Soil and Foundations*, Japanese Geot. Soc., Vol.38, No.3, 55-65.
13. Teh, C. I. and Houslyby, G. T. (1991), "An analytical study of the cone penetration test in clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17-34.
14. Vesic, A. S. (1972), "Expansion of cavities in infinite soil masses", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.98, No.SM3, pp.265-290.

(접수일자 2008. 1. 22, 심사완료일 2008. 3. 10)