

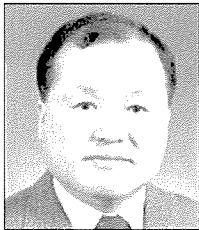
## 1. 개요

최근 들어 국내에서도 연약지반 조사의 중요성이 부각되면서, 다양한 지반조사 기법들이 소개되어 적용되고 있다. 그 중 피에조콘 관입시험(Piezocone Penetration Test, CPTu)은 현재 유럽 및 북미 등 전 세계적으로 많이 시행되고 있는 지반조사 방법으로 룯드(Rod)에 콘 저항체를 부착하고 지반에 삽입한 상태에서 관입이나 인발 또는 회전시키면서 그 저항을 측정하여 지층의 분류, 시추공 사이의 지층변화 파악 등 다양한 지반특성을 비교적 정확하게 구할 수 있을 뿐만 아니라 연속적인 측정으로 인하여 지층 구분을 원활하게 할 수 있고, 다양한 결과를 심도에 따라 일관되게 얻을 수 있기 때문에 국내외에서 크게 활용되고 있는 실정이다. 특히, 비배수 전단강도와 콘 관입저항의 연관성은 피에조콘 관입시험(CPTu)이 개발된 이후 가장 많이 연구되고 있다. 그러나, 피에조콘 관입 저항치를 이용하여 이론적인 해석방법으로 비배수 전단강도를 도출하는 방법은 매우 어렵고 지반 특성치를 광범위하게 고려하지 못하기 때문에 경험적 해석방법을 주로 사용하고 있다.

또한, 비배수 전단강도를 산정하기 위한 경험적 해석방법은 콘계수( $N_{KT}$ )를 결정하기 위한 많은 방법들이 제안되어 왔으나, 대부분 국외에서 개발한 상관식 등으로 국내 지반에 적용 하는데 한계가 있다. 따라서, 현장시험 및 실내시험 등에 의한 비배수 전단강도를 이용하여 국내 지반에서의 신뢰성 있는 콘계수( $N_{KT}$ )를 산정하고자 한다.

본 연구에서는 시화호 주변에서 수행한 현장시험 및 실내시험과 피에조콘 관입시험(CPTu) 결과를 이용하여 국내 지반에 적합한 콘계수( $N_{KT}$ )를 분석·검토하였다.

# 피에조콘 관입 시험(CPTu) 활용을 위한 서해안지역의 콘계수( $N_{KT}$ ) 산정 사례



한국종합기술개발공사 전무  
토질 및 기초기술사  
**김 동 민**



한국종합기술개발공사 차장  
토질 및 기초기술사  
**박 수 범**



## 2. CPTu를 이용한 콘계수( $N_{kT}$ ) 산정

### 2.1 피에조콘 관입시험(CPTu) 특성

피에조콘 관입시험(CPTu)은 흙의 여러 가지 성질을 동시에 측정할 수 있으며, 현장시험 수행시 획득할 수 있는 토질정수 및 특성은 다음과 같으며, 이중 1),2),3)항은 타 조사시험으로는 획득하기 어려운 피에조콘 관입시험(CPTu)의 특성이다.

- 1) 연속적인 지층주상도 및 비배수강도 산정
- 2) 수평방향 압밀특성 파악
- 3) 점토층내의 샌드심(sand seam) 파악
- 4) 지반개량 전후의 전단강도 파악
- 5) 응력경로 및 과압밀비 측정
- 6) 간극수압 측정

### 2.2 콘계수( $N_{kT}$ ) 산정방법

피에조콘 관입시험(CPTu)으로부터 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 콘계수( $N_{kT}$ )를 이용하게 된다. 즉, 피에조콘 관입시험(CPTu)시 측정되는 원추관입 저항력 또는 간극수압은 점성토의 비배수 전단강도와 밀접한 관계가 있으며, 그 관계를 콘계수( $N_{kT}$ )를 이용하여 설정함으로써 비배수전단강도를 결정하게된다. 콘계수( $N_{kT}$ )는 적용 방법에 따라 다음의 3가지로 구분된다.

#### (1) 전체 선단저항치를 이용한 방법

Schmertmann(1978)은 말뚝의 관입이 콘의 관입과 유사하다고 생각하여 식①과 같이 비배수전단강도를 산정 방법을 제안하였다.

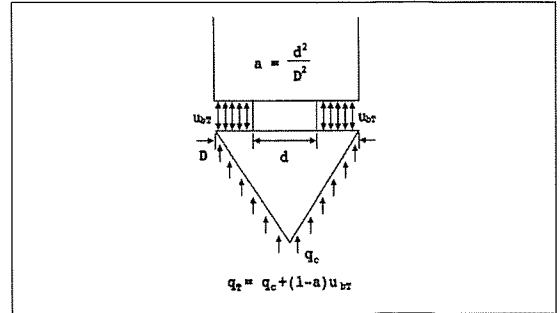


그림 1. 부등단면적 효과

$$S_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_k} \quad \text{①}$$

여기서,  $q_c$  : 원추관입 저항력  
 $\sigma_{vo}$  : 전응력  
 $N_k$  : 무차원 콘계수

그러나, 간극수압을 측정하는 다공질 필터가 <그림1>과 같이 원추 바로 뒷면에 위치한 피조콘을 이용할 경우  $q_c$  는 간극수압 영향을 받기 때문에, Lunne et al.(1986)은 다공질 필터의 면적을 고려한  $q_T$ 를 이용하여 식②와 같이 산정할 것을 제안하였다.

$$S_u = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{N_{kT}} \quad \text{②}$$

여기서,  $q_T$  : 부등단면적 효과를 고려한 원추 관입 저항력

$N_{kT}$  : 수정 전응력 무차원 콘계수

#### (2) 유효 선단저항치를 이용한 방법

Campanella등(1982)은 식③과 같이 원추 관입저항력에서 간극수압을 뺀 값, 즉 유효응 력개념으로 비배수 전단강도를 산정하는 방법을 제안하였다.

$$S_u = \frac{q_T - u_{bt}}{N_{qu}} \quad (3)$$

여기서,  $u_{bt}$  : 측정된 간극수압  
 $N_{qu}$  : 유효응력 콘계수

### (3) 과잉간극수압을 이용하는 방법

Vesic(1972), Randolph와 Wroth(1979), Campanella 등(1985)은 공동팽창이론을 이용하여 식④와 같이 비배수 전단강도를 피에조콘 관입시험(CPTu)에서 측정된 과잉 간극수압의 형태로 나타내었다.

$$S_u = \frac{u_{bt} - u_o}{N_{\Delta u}} \quad (4)$$

여기서,  $u_o$  : 정수압  
 $N_{\Delta u}$  : 간극수압 콘계수

### (4) 적용방법

상기 3가지 경험적인 방법 적용에 있어 비배수강도 측정시험을 피에조콘 관입시험(CPTu)과 병행하여, 각 경우마다 경험적인 관계식을 수립하는 것이 바람직하다. 따라서, Lunne 등(1997)은 다음과 같이 추천하고 있다.

- 1) 피에조콘 관입시험(CPTu) 결과만으로 비배수전단강도를 추정하고자 하는 경우 전체선단저항치( $q_T$ )를 이용하고, 콘계수( $N_{kt}$ )=15~20정도의 값을 적용한다. 단, 정규압밀점토 및 과압밀점토의 경우 콘계수( $N_{kt}$ )는 10이하, 굳은 점토의 경우 30정도까지 높아 질수 있다. 또한, 매우 연약한 점토와 같이 전체선단 저항치의 신뢰성이 낮은 경우 비배수강도는 과잉간극수압으로부터 추정하는 것이 바람직하다.
- 2) 지반조사 규모가 커서 다른 현장 또는 실내시험이 병

행될 예정이라면 그 지반에 맞는 특정한 경험식을 수립하고 이용한다.

## 3. 콘계수( $N_{kt}$ ) 적용 사례

아래 <표1> 및 <표2>는 여러 연구자들이 국외 및 국내의 다양한 지반조건에 대한 시험결과로부터 경험적 방법을 사용하여 제안한 콘계수( $N_{kt}$ )를 나타내고 있다. <표1> 및 <표2>에 나타난 바와 같이 경험적 방법으로 산정된 콘계수( $N_{kt}$ )는 지역에 따라 많은 차이를 나타내고 있다. 이는 시험기 또는 시험조건, 시험지반의 불균질 등의 이유뿐만 아니라, 콘계수( $N_{kt}$ ) 결정을 위하여 사용된 기준 비배수 전단강도 산정방법이 다르기 때문이다.

표 1. 기존에 제안된 콘계수(국외)

지역	전단강도 측정방법	콘계수( $N_{kt}$ )
노르웨이일부	현장 배인전단시험	13~19
북해	등방압밀 삼축시험	17
런던	평판재하시험	10~30
영국 북부	등방압밀 삼축시험	12~20
노르웨이일부	현장 배인전단시험	12~19
이탈리아	현장 배인전단시험	8~16
	KO압밀 삼축시험	8~10
벤쿠버	현장 배인전단시험	8~10
	공내재하시험	4~32
캐나다 일부	현장 배인전단시험	2~10
캐나다 일부	현장 배인전단시험	6.2~7.0
대만	등방압밀 삼축시험	5.0~6.8
	이방압밀 삼축시험	6.0~7.2

표 2. 기존에 제안된 콘계수(국내)

지역	전단강도 측정방법	콘계수( $N_{kt}$ )
영종도	현장배인, 실내시험	16.3
강릉	현장배인, 실내시험	11.1
서천	현장배인, 실내시험	16.3
영암	현장배인, 실내시험	26.2
광양	현장배인, 실내시험	10.2
양산	현장배인, 실내시험	10.4
하동	현장배인, 실내시험	11.6
김제	실내시험	8.1
평택	현장배인, 실내시험	24.9
아산	현장배인, 실내시험	11.5



## 4. 서해안지역 지반분포 현황

### 4.1 조사지역

본 현장은 <그림2>와 같이 경기도 안산시 신길동, 대부동 일원으로 총면적 3,170천평의 단지조성공사 현장으로, 전체공구는 1~5공구로 구분되며, 이중 본 현장인 5공구(647천평)는 연약지반상에 성토 후 단지조성을 목적으로 한다.

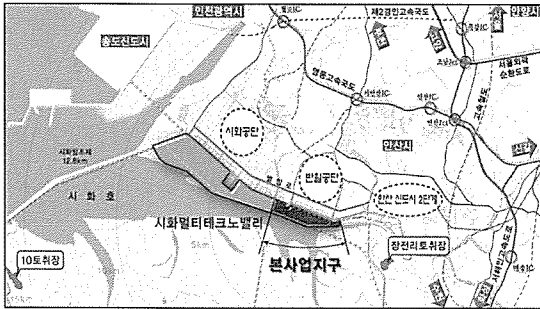


그림 2. 조사지역

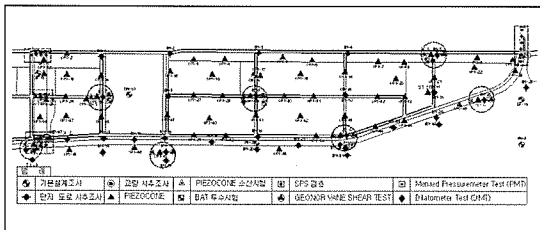


그림 3. 지반조사 현황

표 3. 지반조사 현황

조사항목		수량	조사항목		수량
현장 시험	시추조사	56공	토질 시험	기본물성	330회
	피에조콘	58회		일축압축	66회
	간극수압소산	21회		삼축(UU)	34회
	연속 U.D 채취	7공		삼축(CU)	35회
	현장 배인	8회		Rowe Cell	7회
	D.M.T	4회		CKoU	6회
	간극수압 계측	3공		C.R.S	6회
	상기항목 외 다수 수행			상기항목 외 다수 수행	

### 4.2 지반조사

본 현장의 지반특성을 조사하기 위해 <그림3> 및 <표3>과 같이 시추조사 56공, 피에조콘시험(CPTu) 58회, 현장 배인시험 8회, D.M.T 4회, 실내시험 등을 실시하였다.

지반조사결과 상부로부터 해성점토층, 사질 토층, 자갈층, 풍화대 및 기반암의 순으로 분포하고 있으며, 상·하부 해성점토층은 실트질 점토(CL, CH), 점토섞인 실트로(ML)로 2.0m ~ 18.5m의 층후로 구성되어 있고, 사질토층의 경우 1.0m~6.4m의 층후로 분포하고 있다. <그림4>는 시추조사 결과와 피에조콘 관입시험 결과를 심도별로 나타내고 있다. 시추조사 결과 GL-5.2m~14.0m 구간은 연약점토(CL)로 구성되어 있으나, 피에조콘 관입시험 결과 시추조사에서 확인하지 못한 해성점토층 중간부에 콘관입 저항치가 상승하고 부의 간극수압이 작용하는 사질층이 분포하고 있음을 알 수 있다.

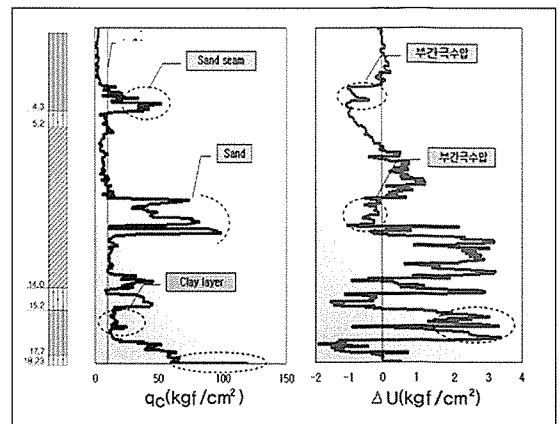


그림 4. 지층단면도

## 5. 피에조콘 계수( $N_{kT}$ ) 산정

<그림5>는 합리적인 피에조콘계수( $N_{kT}$ ) 산정을 위한 분석흐름을 나타내고 있으며 아래의 방법으로 콘계수를 산정하였다.

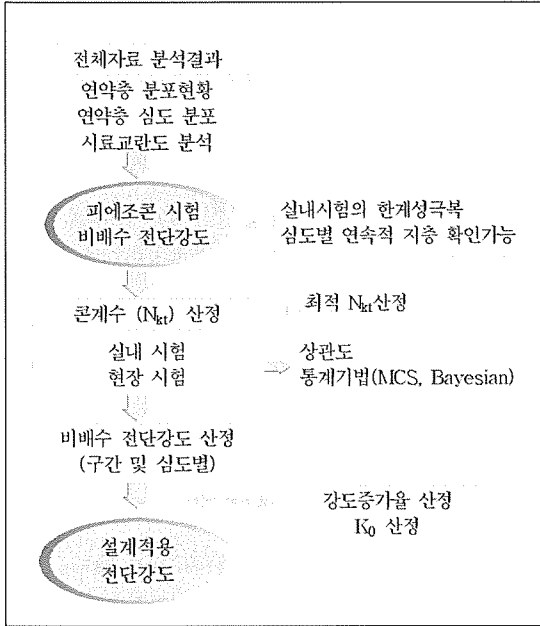


그림 5. 분석흐름도

### 5.1 심도별 비배수 전단강도 특성

큰계수( $N_{kT}$ ) 산정을 위해서 비배수 전단강도 시험인 현장 베인시험, Dilatometer Test, 삼축압축시험을 실시하였다. <그림6>에서 보는 바와 같이 각 시험에서의 비배수 전단강도는 심도별 증가하는 양상을 보이며, 심도별 전단강도 분포 상관성(R)은 삼축압축시험의 경우 59.1%, Dilatometer Test는 54.7%, 현장 베인시험은 52.8%의 상관성을 나타내고 있다.

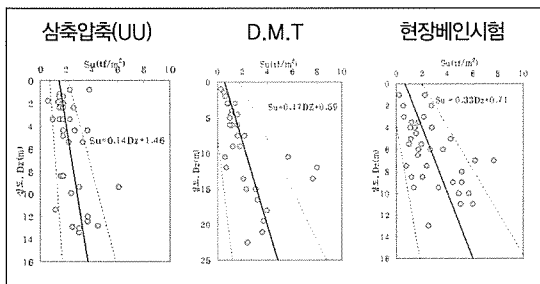


그림 6. 심도별 비배수 전단강도 분포

### 5.2 각 시험별 큰계수( $N_{kT}$ ) 산정

<그림7>은 심도별 비배수 전단강도와 콘관입 저항치와의 상관성 분석을 통해 큰계수( $N_{kT}$ )를 산정한 결과를 나타내고 있다. 각 시험별 상관성 분석결과 큰계수( $N_{kT}$ )는 삼축압축시험의 경우 20.27, Dilatometer Test의 경우 24.1, 현장 베인시험의 경우 17.54로 각각 산정되었으며, Dilatometer Test의 상관성이 82%로 가장 높게 나타났으나, 전체적으로 상관성이 낮게 나타났다. 이와 같은 결과는 각 시험에 따른 오차, 시료 채취시 발생하는 교란 및 심도별 분포하고 있는 샌드심(Sand Seam)등의 영향으로 판단된다.

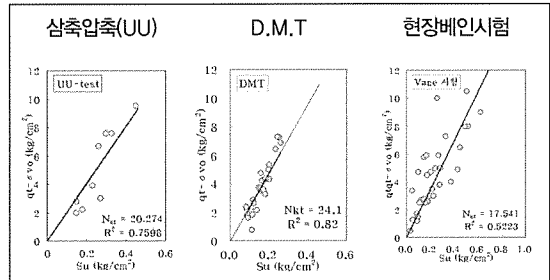


그림 7. 상관성분석에 의한 큰계수 산정결과

### 5.3 통계분석에 의한 큰계수( $N_{kT}$ ) 산정

상기와 같이 여러 가지 원인에 의한 영향성 및 오차를 보완하기 위하여 통계기법을 적용하여 각 시험별로 통계분석을 실시하였다. 신뢰성 향상을 위한 통계기법은 랜덤 샘플링 기법(Random Sampling Technique)인 몬테카를로 시뮬레이션 기법(Monte Carlo Simulation Technique)을 적용하였으며, 정규분포 곡선을 위하여 상관성이 크게 벗어난 데이터는 분석에서 제외하고 실시하였다. 통계분석은 각 시험별로 산정된 큰계수( $N_{kT}$ )의 평균 및 표준 편차를 가지고 2000개의 자료를 무작위로 추출하여 시험별로 산정하였다.



〈표4〉는 Monte Carlo 통계분석 결과를 나타내고 있다. 통계분석결과 콘계수( $N_{KT}$ )는 삼축압축시험의 경우 18.97, Dilatometer Test의 경우 24.95, 현장 베인시험의 경우 17.71로 산정 되었으며, 각각의 비배수강도 시험결과를 통합 분석한 결과는 20.79와 표준 편차가 5.477로 산정되었다.

랜덤 샘플링 기법(Random Sampling Technique)을 이용한 콘계수( $N_{KT}$ ) 산정결과 국내 서해안 지역에서 산정된 콘계수( $N_{KT}$ ) 값들과 비교하여 비교적 높은 쪽으로 산정되었다.

표 4. Monte Carlo Simulation Technique 결과

시험방법	MCS결과	분석결과
삼축압축(UU)		- 데이터수 : 2000개 - 콘계수 : 18.97 - 표준편차 : 5.67
D.M.T		- 데이터수 : 2000개 - 콘계수 : 24.95 - 표준편차 : 4.995
현장 베인 시험		- 데이터수 : 2000개 - 콘계수 : 17.71 - 표준편차 : 4.953
삼축압축(UU) + D.M.T + 현장베인		- 데이터수 : 2000개 - 콘계수 : 20.79 - 표준편차 : 5.477

〈표5〉는 산정된 값의 신뢰성 향상을 위하여 국내외 제안된 콘계수( $N_{KT}$ )들을 사전정보로, 금회 시험자료를 표본

정보인 우도함수로 Bayesian 기법을 적용하여 과업구간의 콘계수값( $N_{KT}$ )을 산정한 결과이다.

Bayesian 통계에 사용된 사전정보는 국내외 제안된 콘계수( $N_{KT}$ )들을 채택하였으며, 그 값들 중 상한 및 하한 값들을 제외한 값들 중 정규분포특성을 보인 값들을 이용하여 사전정보로 채택하였다. 또한, 우도함수인 표본정보는 몬테카를로 시뮬레이션기법(Monte Carlo Simulation Technique) 결과 중 비배수전단 강도시험 전체를 통합한 자료를 적용하여 사전 확률 값을 보정하도록 하였다. Bayesian 통계분석 결과 콘계수( $N_{KT}$ )는 18.97로 산정되어 본 과업구간에 콘계수( $N_{KT}$ )를 19로 적용하였으며 심도별 비배수전단강도 산정에 이용하였다.

표 5. Bayesian 분석결과

Bayesian 분석결과	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사전정보 Mean : 15.22 StDev : 7.77</li> <li>• 표본정보 20.79 Mean : 20.79 StDev : 5.477</li> <li>• Bayesian 값: 18.97</li> </ul>

## 6. 결론

본 지역에서 피에조콘 관입시험(CPTu) 및 Dilatometer Test, 현장 베인시험, 삼축압축시험을 수행하여 점성토 지반의 콘계수( $N_{KT}$ )를 경험적인 방법을 이용하여 산정한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 피에조콘 관입시험(CPTu)을 이용하여 점성토층 사이에 존재하는 샌드심(Sand Seam)층의 확인이 가능하였다.
- 2) 시화지역에 분포하고 있는 점토층에 대한 피에조콘 관입시험(CPTu)을 이용한 비배수 전단강도 평가를

위한 콘계수( $N_{kr}$ )를 각종 시험 및 통계분석을 통해 산정 결과 콘계수( $N_{kr}$ )=19로 분석되었다.

- 3) 산정된 피에조콘계수는 기존 국내에서 제안된 값들과 비교할 때 콘계수( $N_{kr}$ )=19는 다소 높게 나타났으나, 인근 서해안 지역의 콘계수( $N_{kr}$ )=16.3~24.9)와 비교하면 큰 오차는 보이지 않는 것으로 나타났다.
- 4) 국내의 지역별 제안값 및 본 과업지역에서 산정된 콘

계수( $N_{kr}$ )를 비교해 볼 때 오차의 범위가 크게 나타나는 것을 알 수 있었으며, 그 원인은 기준 비배수강도 시험의 신뢰성, 지반이력, 퇴적환경 등의 여러 가지 요인들로 판단된다.

- 5) 정확한 콘계수( $N_{kr}$ ) 산정을 위해서는 기준이 되는 비배수전당강도의 신뢰성 향상 및 지역적 특성 등을 고려하여 적용하여야 할 것으로 판단된다.

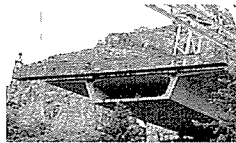
**[참고문헌]**

1. 이선재, "피에조콘을 이용한 국내지반의 공학적특성 연구", 서울대학교 공학박사 학위 논문(1997).
2. 장인성의 3인, "국내점성토 지반의 피에조콘 계수", 한국지반공학회(2001),제17권6호, pp15~24.
3. 김영삼, "피에조콘 소산시험을 이용한 연약지반의 신뢰성 있는 압밀특성 추정", 한국과학기술원 박사학위 논문(1998).
4. 윤길림외 3인, "CPT를 이용한 비배수전당강도 평가", 한국지반공학회(1996)가을학술세미나, pp.321~326.
5. Geotech AB(1998), Geotech cone penetration test(CPTu) equipment user manual, pp.5~6.
6. Lunne,T, P.K.Robertson & J.J.M.Powell,(1997), Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice, Blackie Academic &Professional.

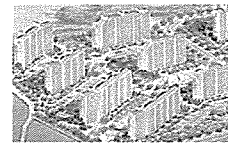
**최 고 의 기 술 을 제 공 하 는 다 술 컨 설 터 트**



◆ 지반공학분야 ◆



◆ 구조분야 ◆



◆ 도로, 택지분야 ◆

**(주)다솔컨설턴트**  
www.dasolcon.co.kr

서울시 강남구 역삼동 790-15 서성빌딩 2층  
전화:(02) 508-2290 팩스:(02) 508-2297