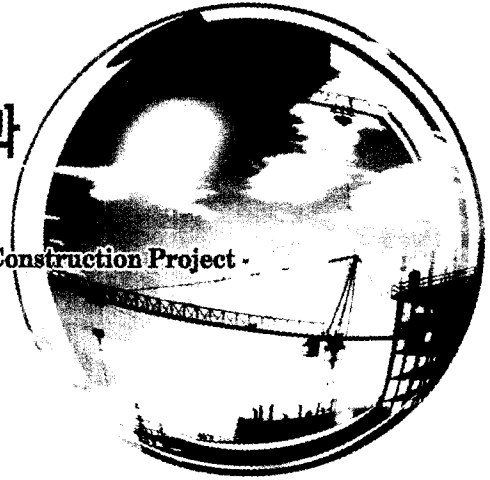


# 연약지반상 피조콘의 활용 및 효과

- 인천국제공항건설공사의 사례를 토대로 -

Application and Effect of Piezocone on Soft Ground

- Based on Case Study of Incheon International Airport Construction Project -



權 五 鉉

Kwon, Oh Hyun

\* 토질 및 기초 기술사,

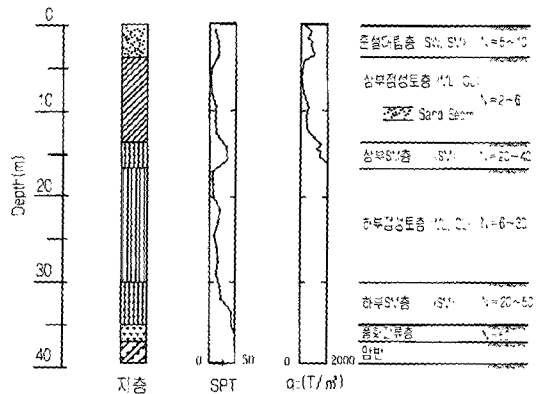
(주) 한석엔지니어링 상무이사.

미래의 항공수요를 담당할 인천국제공항의 건설공사가 2001년 4월 개항을 목표로 공정 추진에 박차를 가하고 있다. 본 인천국제공항 같은 초대형공사는 그 규모나 기술수준에 있어 기존의 상식을 넘고 있어 공사의 안정성 및 품질확보를 위해서는 첨단기술의 전수, 공정관리 및 품질관리에 대한 중점적 개발이 필요하며, 상기 공사가 65% 이상 진행된 현 시점에서 보면 다수의 분야에서 기존의 시공법 및 현장관리기술면에서 괄목할 만한 진전을 보이고 있다.

특히 인천국제공항은 연약지반상에 축조되고 있어 침하 및 지반유동 현상에 대한 세심한 검토가 필요하여 대규모 성토시험시공 및 현장계측이 이루어졌고, 당 지역의 지반 특성인 Sand Seam의 정밀조사를 통한 지반개량 지역의 선정, 정밀한 시공관리 및 엄격한 품질관리로 연약지반공사의 모범현장으로 불리고 있어, 상기 현장에서 적용·입증된 신공법 및 현장관리기술의 확산이 요망되고 있다.

본 논고는 필자가 현장조사, 설계 및 시공감리를 담당하고 있는 인천국제공항 건설공사중

연약지반상에 최신장비인 피조콘을 적용하여 현격한 공사비의 절감과 지반조사의 신뢰성을 높인 사례를 제시하여 국내 기술수준의 향상 및 향후 연약지반상에 축조될 도로 및 구조물의 설계 및 시공시 본 피조콘의 활용 확대를 통한 공사의 안전성 및 경제성을 도모하고자 한다.



〈그림 1〉 전형적인 지반분포 상황

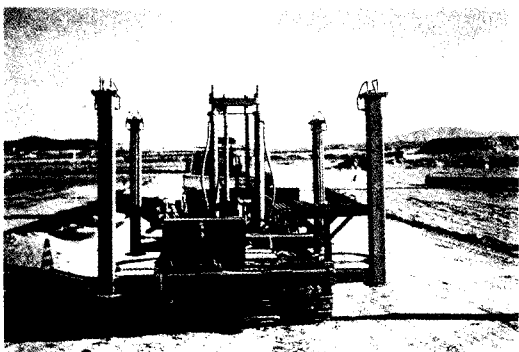
인천국제공항 부지의 전형적인 지층분포는 상부로부터 준설패립층, 상부점성토층, 상부SM



층, 하부점성토층, 하부SM층, 풍화잔류토, 풍화암등의 순으로 나타나며 특히 상부 점성토층이 연약지반으로 판명되어 정밀한 지반조사 및 지반개량이 요구되며 주요지층의 구성은 <그림 1>과 같다.

### 3-1 피조콘의 특성

피조콘(PIEZOCONE)은 연약지반의 조사장비로 널리 사용되고 있는 기존의 DUTCH CONE을 개량하여 간극수압 및 간극수압 소산을 측정할 수 있도록 1970년초에 SWEDEN에서 개발하였다. 이후 1973년에 NGI (Norwegian Geotechnical Institute)에서 개량시켰으며 1974년에 Janbu 등에 의해 간극수압과 함께 콘저항치를 측정하였다. 그후 콘저항치와 마찰력(Skin Friction), 간극수압을 동시에 측정할 수 있는 현재와 같은 장비가 개발되었으며 연약지반의 상태를 신속·정밀하게 파악하는데 가장 적합한 장비로 알려져 있다.



<그림 2> 피조콘(Piezocone)

피조콘 관입시험 수행시 획득할 수 있는 토질정수 및 특성은 아래와 같으며 이중 1), 2), 3)항은 타 조사시험으로는 획득하기 어려운 피조콘

만의 특수기능이다.

- 1) 연속적인 지층주상 및 강도파악
- 2) 수평방향 압밀특성 파악
- 3) 점성토층내에 분포하는 Sand seam층 파악가능
- 4) 지반개량 전·후의 강도 기준치 설정
- 5) 응력경로 및 과압밀비 측정
- 6) 간극수압 측정
- 7) 연관 토질정수의 측정

### 3-2 표준관입시험과의 차이점

국내의 지반조사시 가장 널리 쓰이고 있는 조사방법은 시추에 의한 표준 관입시험(SPT)이며, 이 방법은 거의 모든 지층에 적용할 수 있으며 장비의 수급이 원활하고 그 동안의 풍부한 경험이 축적되어 있어 매우 실용적이다. 그러나 연약지반의 경우 SPT의 정도(精度)가 매우 떨어져 전체적인 자료의 신뢰도가 저하되는 것으로 알려져 있으며 일본의 경우 N치 4이하의 연약지반에서의 SPT 시행을 기피하고 있다. 따라서 연약지반의 경우 피조콘과 같은 새로운 시험의 활용이 기대되고 있으며 현재 가장 널리 사용되고 있는 표준관입시험과 피조콘관입시험의 장단점 비교를 통하여 본 연약지반 조사시 적용방법 선정 및 조사방향을 설정하기로 한다.

<표 2> 연약지반 조사시 표준관입시험과 피조콘관입시험의 장단점 비교

구 분	피조콘관입시험	표준관입시험
자료의 연속성	○	×
자료의 신뢰도	○	△
간극수압측정	○	×
Sand Seam 유무판정	○	×
시료의 채취	×	△
응력경로, OCR 판정	○	×
조사비	○	○
적용성	◎	

### 3-3 피조콘관입시험의 해석기법

#### 1) 토질분류

피조콘의 기능은 매우 다양하고 획득자료의 신빙성도 뛰어나나 Close End를 가진 콘을 지중에 관입하기 때문에 시료의 채취가 불가능하여 실내시험이나 육안에 의한 토층판정이 불가능한 단점이 있다.

이러한 점을 보완하기 위하여 피조콘 관입시험 결과를 이용한 토층분석 방법이 개발되어 왔으며 이중 Robertson(1985)이 제안한 흙분류 도표 [참고문헌-4]를 이용하여 대상지반의 흙을 정확히 분류할 수 있다.

#### 2) SPT 와 CPT의 관계

$q_c$  값과 N치와의 관계에 관한 많은 연구결과  $q_c/N$ 의 비율은  $D_{50}$  직경의 크기와 관계가 있는 것으로 나타나고 있으며,  $q_c$  값과 N치와의 관련도표 [참고문헌-4]를 이용하여 해당지반의 N치로 추정할 수 있다.

#### 3) 압축계수

Mitchell과 Gardner는 많은 현장시험을 통하여 콘 관입저항치와 압축계수(m)와의 상관 관계를 다음과 같이 식으로 제안하였다.

$$\bullet m = 1/mv = a \times q_c \quad (mv = \text{체적압축계수})$$

#### 4) 수평압밀계수 ( $C_h$ )

피조콘 관입시 소정의 심도에서 관입을 중단하면 콘에 측정된 최대간극수압은 수리역학적 평형 간극수압에 도달될 때까지 소산된다. 이 원리를 이용하여 아래의 식과 같이 지반의 수평압밀계수( $C_h$ )를 구할 수 있어 수평방향의 압밀특성을 파악하는데 매우 유용한 자료를 제공할 수 있다(Baligh and Levadoux, 1980).

$$\bullet C_h = \frac{R^2 \cdot T}{t_{50}}$$

#### 5) 흙의 내부마찰각 ( $\phi$ )

$q_c$  와  $\phi$  의 관련도표 [참고문헌-4] 이용

#### 6) 상대밀도( $D_r$ )

상대밀도는 사질토의 상태를 판정하는 중요한 요소이며 피조콘 관입시험 결과치인  $q_c$ 를 이용하여 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\bullet D_r = -98 + 66 \times \log_{10} \frac{q_c}{[\sigma'_{vo}]^{0.5}}$$

#### 7) Sand Seam의 조사 및 판정

##### 4-1. 수평압밀계수

피조콘 관입시 소정의 심도에서 관입을 중단하면 콘에 측정된 최대간극수압은 수리역학적 평형 간극수압에 도달될 때까지 소산된다. 각 심도의 소산율은 해당 토질의 투수성과 압축성에 의존하는 압밀계수와 연관관계를 갖는다.

이 원리를 이용하여 지반의 수평압밀계수( $C_h$ )를 구할 수 있어 수평방향의 압밀특성을 파악하는데 매우 유용한 자료를 제공할 수 있다.

따라서, 신공항 부지의 수평방향 압밀특성 규명을 위해 과잉간극수압 소산시험을 실시하였고, 부지조성지역 4·5·6공구의 자료중 상부점성토층, 하부점성토층 및 Sand Seam층이 고루 분포한 지역의 대표적인 값은 아래와 같으며 상·하부점성토층의 경우 수평압밀계수( $C_h$ )가  $1.76 \sim 2.77 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로 나타나 실내시험에

<표 3> 피조콘관입시험에 의한 지층별 수평압밀계수

대상층	$t_{50}$ (sec)	$C_h$ ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )	비고
SAND SEAM	55	$2.11 \times 10^{-1}$	
상부점성토층	660	$1.76 \times 10^{-2}$	
하부점성토층	420	$2.77 \times 10^{-2}$	

$t_{50}$  : 50% 압밀시 간극수압 소산시간(sec)

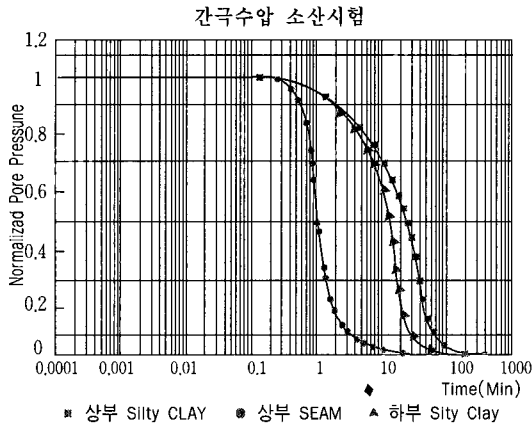
$C_h$  : 수평방향압밀계수 ( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )

T : 압밀상수 = 3.65

R : 피조콘반경 = 1.784 cm



의하여 산출된 수직압밀계수( $C_v$ )  $5.00 \times 10^{-3}$   $\text{cm}^2/\text{sec}$ 의 3~5배 정도의 값을 나타내어 수직 방향보다 수평방향의 투수계수가 큰 특성을 반영하고 있다.



#### 4-2 Sand Seam의 판정법

##### 1) Sand Seam의 정의

Sand Seam이란 점성토 지층속에 Sand 성분이 층상으로 존재하는 것을 의미하며 점토가 침강·퇴적하는 과정중에 하천의 범람이나 사면활동 등에 의하여 Sand 성분이 유입되어 생성된다. 일반적으로 자연적으로 생성된 Sand Seam은 층후가 얇고 지역분포에 따라 변화를 보인다.

따라서 대상지반에 대한 상세한 조사를 실시하여 Sand Seam층의 규모 및 연속성을 확인하여야 하며 본 신공항 부지에 대한 시험시공 결과와 같이 점성토층 속에 Sand Seam이 존재할 경우, Sand의 투수계수는 점토의 100~1000배에 달하므로 압밀 배수거리를 단축시켜 압밀이 촉진되며 이에 따라 전체적인 압밀특성이 크게 변화하게 된다.

##### 2) 피조콘에 의한 Sand Seam 판정

일반적으로 피조콘 관입시험의 Graphic Output 분석시 아래와 같은 특성을 동시에 만족하는 지점을 Sand Seam으로 판단할 수 있다.

① Tip Resistance가 주변에 대하여 급격히 증

가하는 점.

② 간극수압이 주변의 분포보다 저하되는 점.

③ Friction ratio가 급격히 저하되는 점.

④ 토층분석결과 Sand 성분이 우세한 층 (Sandy Silt to Clayey Silt 이상)

피조콘 관입시험의 결과를 이용한 Sand Seam의 판정은 <그림 4>와 같으며, 본 공사의 4, 5공구에 대한 시험시공결과 수직배수재 타설여부 및 연약지반 처리공법의 결정 기준이 제시되었고, 본 피조콘 관입시험 결과를 이용하여 Sand Seam의 판정 및 압밀배수거리 산정을 실시하고, 상기의 기준에 의거하여 수직배수재 타설여부를 판정하였다.

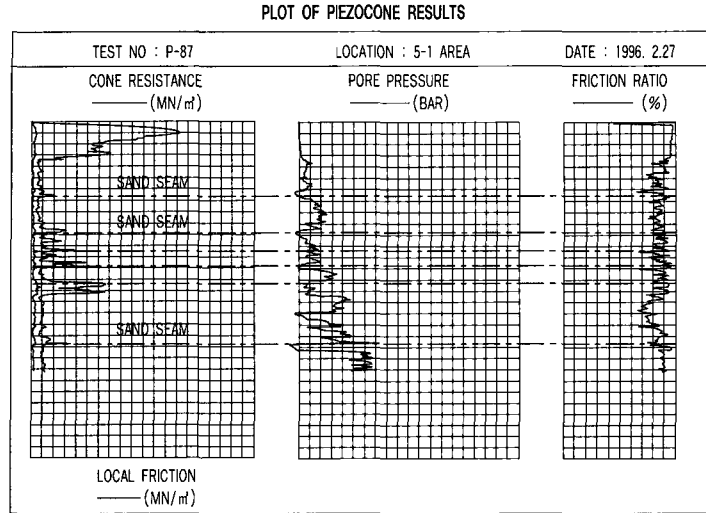
<표 4> 연약지반처리공법 판정기준

구분	연약층두께 (6.0m 이하)		연약층두께 (6.0m 이상)	
상부층적층 (SM층)	유	부		
Sand Seam의 연속성	-	양호	불량	-
적용공법	Preloading	Preloading	수직 배수재 + Preloading	수직 배수재 + Preloading

단, Sand Seam의 분포가 양호하여 배수거리가 3.0m 이내의 경우 Preloading 공법적용(압밀허용기간 3개월), 압밀허용기간이 6개월일 경우는 4.0m까지 Preloading공법은 적용

#### 4-3 수직배수재 타설여부 판정결과

인천국제공항 연약지반 개량공법 적용구간을 대상으로 100m간격을 기준으로 224개소의 피조콘관입시험을 시행하여 수직배수재 타설여부를 판정한 결과는 아래와 같으며 전체 대상부지의 40% 정도가 무처리로 판정되어 약 50억 정도의 공사비 절감을 유도하였고, 대상구간에 대한 계측결과 피조콘조사에 의하여 무처리지역으로 판정된 지역의 침하가 예측기간과 거의 일치하여 성공적으로 시공을 완료하였다.



〈그림 4〉 Sand Seam 판정 예

〈표 5〉 피조콘관입시험에 의한 수직배수재 타설여부 판정결과

	피조콘 관입시험 조사 공수(개소)		
	수직배수재타설지역	무처리 지역	계
여객터미널 부지	20	38	58
제 1 활주로 부지	75	49	124
제 2 활주로 부지	33	9	42
총 계	128 (57.1%)	96 (42.9%)	224

현재 국내에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 지반조사 방법은 시추에 의한 표준관입시험 이다. 표준관입시험은 시험장비 및 시험법이 간편하여 거의 모든 지반의 조사방법으로 사용되고 있다. 단, 표준관입시험은 시험의 정도(精度)가 다소 떨어지는 단점을 갖고 있으며 특히 연약한 점성토지반(N치 < 1~6)에서는 자료의 신빙성이 매우 떨어지는 것으로 나타나고 있어 표준관입시험에 의한 개략적인 지반관정후 연약지반으로 판명되면 이에 적합한 조사장비 및 시험법을 적용하는 것이 필요하다.

피조콘관입시험은 이러한 연약지반의 상세조사 시 가장 적합한 장비로 연약지반에 대한 설계 및 시공에 필요한 대부분의 토질정수를 구할 수 있고, 특히 기존의 방법으로는 추출하기 어려운 수평압밀계수 산출 및 Sand Seam의 판정이 가능하여 설계 및 시공시 안정성 및 정확성을 증대시킨다. 또한, 본 사례와 같이 Sand Seam이 발달한 지역에서는 획기적인 경제성을 도모할 수 있어 연약지반상의 지반조사시 적극적인 활용이 기대된다.

(원고접수일 1999. 1. 18)

1. 신공항건설공단(1997), "인천국제공항 지반조사용역 종합보고서"
2. 한국지반공학회, "연약지반"
3. 김명모(1997), "인천국제공항 다짐공사 시방검토 자문용역 보고서"
4. P. K. Robertson and R. G. Campanella, "Guide Lines For Geotechnical Design Using CPT And CPTU" The University of British Columbia
5. A. C. Meigh, "Cone Penetration Testing" Butter Worths