표준관입시험 수행 과정에서의 문제점과 개선방향

백세환, Se-Whan Paik

주)도화지질 대표이사, President, Dohwa Geotechnical Eng. Co., Ltd.

SYNOPSIS : Although important developments have taken place since ESOPT 1974 both with respect to the test method as well as the interpretation of the results, many uncertainties still remain in the Standard Penetration Test(SPT). The main pitfall of SPT is that it has not been standardized differing from its terminology and further, the possibility of standardization is very low in practice. Therefore, lack of knowledge on the equipment and method of SPT tends to cause some errors in interpretation of the results. It is especially important to understand this tendency in domestic design, because most foundations are designed based on SPT results only. Many researchers have made an effort to minimize the uncertainties of SPT in Korea, it is not cleary defined what the most effective method of execution and interpretation of SPT. Some uncertainties which many geotechnical engineers encounter in practice are introduced to discuss about improvement of test procedure and interpretation.

Key words : SPT, SPT hammer, wash boring, soil classification, hammer energy, residual soil, weathered rock, gravelly layer

1. 서론

표준관입시험은 현재 국내 지반조사에서 수행되는 대표적인 현장 시험이며 따라서 대부분의 설계에 이용되는 토질 정수들이 표준관입시험 N 치에 근거하여 추정되거나 표준관입시험 결과를 이용한 경험식 등을 이용하는 경우가 많다. 그럼에도 불구하고 표준관입시험은 그 명칭과는 달리 시험기구 및 방법 등에 있어서 국제적으로 표준화된 규준을 정립하고 있지 못하여 시험 수행 과정이나 그 결과를 이용함에 있어 많은 혼란이 있어 왔다. 이러한 불합리함을 극복하고자 이미 몇몇 학자들이나 기관들에 의해 새로운 표준화안이 주창되어 왔으며 1989년 ISSMFE는 완전하진 않지만 중요한 사안에 대한 표준안을 제시하기에 이르렀으나 이러한 통일된 규준을 세계 어느 나라에서나 공통적으로 채택한다는 것은 현실적으로 불가능한 일로 판단되어 이후 이에 대한 논의는 거의 중단된 상태에 있는 듯하다. 따라서 특히 표준관입시험을 주로 많이 수행하고 있는 북미 지역이나 아시아 등에서는 각국 나름대로 표준관입시험의 단점을 보완하고자 하는 노력이 집중되어 왔으며 최근 국내에서도 이러한 연구가 활발하게 진행되고 있는 것으로 보고되고 있다. 본고에서는 이미 많은 연구를 통해 보고되었던 표준관입시험의 단점들 중 실제 국내에서 확실한 기준이 성립되지 않아 빈번하게 발생하는 문제점 중 대표적인 몇가지를 현장 기술자들의 의견에 근거하여 소개하고자 한다.

표 1. 표준관입시험 N치에 영향을 미치는 요소

원 인	결 과
시추공의 청소가 불량한 경우	시험을 하고자 하는 토층의 일부분에 대해 실시되며 샘플러 관입시 슬라임이 압축되고 타격횟수가 증가한다. 시료채취가 적게 될 수도 있다
시험위치에 샘플러가 놓이지 못하는 경우	부정확한 N치가 측정된다.
케이싱 선단위에서 샘플러가 타입되는 경우	모래지반에서는 N치가 커지며 점토지반에서는 감소된다.
시추공에서 충분한 정수압이 유지되지 못하는 경우	모래지반의 시추공에서 수위는 최소 지하수위가 되어야 하고 그렇지 않으면 모래가 느슨한 상태로 된다.
기능공의 태도	같은 지층에서 같은 장비로 시험해도 기능공의 심적상태와 굴진시간에 따라 측정치가 다를 수 있다.
샘플러의 과도한 타입	보통 N치가 크게 측정된다.
샘플러가 자갈에 의해 막히는 경우	측정치가 크게 되며 느슨한 모래는 과대 평가되게 된다.
케이싱이 막힌 경우	지하수위 아래에서 시험할때 느슨한 모래의 경우 N치는 크게 측정되며 정수압이 모래를 솟아오르게 하고 케이싱을 막히게 한다.
케이싱 밑을 지나치게 청소하는 경우	모래지반이 느슨해져 조밀한 모래층의 N치가 적게 측정된다.
시추방법	시추방법(예, 케이싱으로 공벽을 보호한 경우와 니수를 쓸경우)에 따라 같은 토층에서도 N치가 다르게 측정될 수 있다.
표준해머를 사용치 않은 경우	타격당 에너지가 다르다.
자유낙하고가 부족한 경우	드럼에 로우프를 2 바퀴이상 감거나 와이어케이블을 쓰는 경우 해머의 자유낙하를 방해한다.
해머가 중심에 타격되지 못한 경우	에너지가 감소하여 N치가 크게 측정된다.
유도로드 (guide rod)를 사용치 않는 경우	부정확한 N치가 측정된다.
불량한 샘플러 슈를 사용한 경우	슈가 파손되어 단면적이 커지면 N치가 크게 측정된다.
표준규격보다 무거운 로드를 사용한 경우	타격에너지를 많이 흡수하여 N치가 크게 측정된다.
타격횟수 및 관입을 정확히 기록치 않은 경우	부정확한 N치가 측정된다.
시추가 부정확하게 된 경우	표준관입시험은 수세식시추에서 개발된 것으로 지반을 교란 시키는 시추방법은 N치에 영향을 줄 것이며 예로, 케이블 장비를 사용할 때이다.
시추공이 너무 큰 경우	10cm 이하의 시추공이 추천되며 큰 시추공은 N치를 감소하는 경향이 있다.
부주의한 작업	샘플러가 자갈등에 막혀 갑자기 타격횟수가 증가하는 경우가 가끔 있으며 숙련되지 못한 기능공은 이것을 감지하지 못한다.
펌프용량이 너무 큰 경우	너무 용량이 큰 펌프는 지반을 느슨하게 하여 N치를 작게 측정되게 한다.

2. 현장적용시 문제점

현장에서 표준관입시험의 시험 과정에서 결과의 오류를 유발할 수 있는 요소들을 NAVFAC DM 7.1 과 우리나라 구조물 설계기준에서는 표 1. 과 같이 제시하고 있다. 이 표에 기술된 여러 요소들 중 영향 정도가 크다고 판단되는 몇 가지 항목에 대해 그 원인 및 대안을 제시하기 위한 연구가 집중되어 왔으며 Schmertmann 은 이러한 주요 요소들의 영향 정도를 표 2.와 같이 정량화 하였다.

국내 현장 기술자들의 의견도 크게 차이가 없어 국내에서 가장 주요한 문제점들로 꼽히는 사항들을 요약하면 대체로 다음과 같은 범주로 분류된다.

① 시험자 및 굴진 방법에 따른 결과의 차이
② 햄머 종류 및 효율
③ 심도가 깊어질 경우 N치의 보정문제
④ 기타

표 2. N 치에 영향을 미치는 요소들의 영향 정도

요인		N 치의 변화 범위
착공바닥의 유효응력 (모래)	1. 이수/케이싱과 맑은 물	+100%
	2. 시추공 76mm/457mm	+50%
타격에너지 (모든 지반)	3. 로드이용/자유낙하	+100%
	4. knocking head 대/소	+50%
	5. 로드길이 <3m	+50%
	9~24m	±0%
	>30m	+ 10%
	6. 낙하고의 오차	±10%
샘플러의 구조	7. 라이너 삽입을 위해 내경 치수를 크게 했지만 삽입하지 않을 경우	-10%(모래) -30% (예민하지 않은 점토)
N 치 측정구간	8. 0~30cm /표준 (15~45cm)	-15% (모래) -30% (점토)
	9. 30~60cm /표준 (15~45cm)	+15% (모래) +30% (점토)

2.1. 지층구분의 불확실성

국내 지반조사의 경우 국토가 좁아 대부분 지역의 개략적인 지반 분포가 이미 파악이 된 상태이고 암반이 비교적 얕은 깊이에 위치하는 경우가 많아 기초 형식에 관계없이 조사 심도는 기반암층을 확인하도록 규정하는 경우가 많다. 이 때 지질학적 구분과는 달리 기반암층과 토사층과의 경계를 표준관입시험에 의해 구분하는 것이 보통인데 일반적으로 표준관입시험 N치 50일 때 관입량이 15cm 이하일 경우 풍화암층(Highly Weathered Rock)으로, 그 이상일 때 풍화 잔류토층(Residual Soil)으로 구분하는 것이 보통이나 이 기준 자체가 해당 기관에 따라 다른 경우가 많으므로 기반암층의 경계가 다른 경우가 많다. 특히 잔류토층이 상당한 두께를 가지고 있는 경우 기준의 차이에 따른 오차는 더욱 커질 수 있는데 예를 들어 한국도로공사와 서울시 표준시험 시방서에는 50회의 10cm 관입량을 기준으로 할 것을 규정하고 있다.

그러나 이러한 기준의 차이를 통일하더라도 또는 지금 시점에서 어떠한 기준을 적용하더라도 그 판단이 경우에 따라 다를 수 있는데 이는 지층구분에 이용되는 N치는 예비타를 제외한 본타에만 근거하게 되기 때문에 실제 타격을 수행한 전체 구간에서 더 많은 부분을 차지하고 있는 지층이 제외되기 때문이다. 이에 대한 예를 들면 다음과 같다.

표 3. N 치에 의한 풍화암층과 잔류토층의 구분

관입량	타격회수	SPT N 표기	비고
15cm	35		예비타
12cm	50	50/12	본타

따라서 주상도에는 50/12로 표기되므로 풍화암으로 분류되게 되지만 예비타의 경우가 시추공 바닥의 교란의 영향을 전혀 받지 않았다고 인정될 경우 전체 시료는 총 27cm 중 15cm 이상이 잔류토이므로 잔류토층으로 분류하는 것이 실제와 더 부합할 수 있는 것이다.

2.2. 연약지반에서의 표준관입시험

표준관입시험은 지반조건에 관계없이 시험 자체를 수행하는데 있어서는 문제가 없으나 실제 그 결과에 충분한 신뢰성을 부여할 수 있는 지반은 순수한 사질토로 국한시키는 것이 바람직하다. 특히 연약지반에서는 가급적 표준관입시험에 들이는 노력을 배제하고 다른 시험으로 대체하는 것이 효율적인데 현재 국내에서는 연약지반에서도 의무적으로 표준관입시험을 수행하는 것을 관행으로 하고 있다.

이 경우 현장시험을 수행하는 기술자들이 가지게 되는 의문을 요약하면 다음과 같다.

① 롯드(Rod) 및 햄머(hammer)의 자중으로도 관입이 될 경우 무조건 N=0으로 표기해야 하는가?
② 자중으로 관입되는 경우라도 롯드와 햄머를 적절히 제어한 후 타격을 가했을 때는 실제 N치가 측정될 수도 있는데 이 때는 이 타격횟수를 N 치로 표기해야 하는가?
③ ②항과 같은 방법으로 실시했을 경우 1타 타격시의 관입량이 45cm 이상 관입이 됐을때 표기방법은?
예) 60cm 관입시 ⇒ N=1/60으로 표기해야 하는가?

어떠한 경우라도 N 치가 0 또는 1회 타격시 45cm 이상 관입이 될 경우 N 치를 이용한 공학적인 해석은 이론적으로 불가능하므로 시험치는 아무런 의미가 없게 되며 다만 지층의 연속성 등을 채취된 시료나 N 치의 변화 등으로 확인하는 정도의 의미밖에 없다. 그러나 이러한 정도의 성과를 얻기 위해 깊은 심도에서까지 표준관입시험을 수행하는 것은 시간적으로나 경제적으로 극히 불합리한 작업으로 간주될 수 밖에 없는 것이다.

2.3. 자갈층에서의 표준관입시험

자갈층에서의 정확한 강도 특성을 파악하는 것은 표준관입시험 이외 여타의 시험으로도 쉬운 문제가 아니므로 표준관입시험의 문제로 국한시키는 것은 문제가 있으나 샘플러 구경에 비해 큰 입자를 포함하고 있는 지층에서의 시험 결과는 그 신뢰성이 문제가 된다.

다음은 채취된 시료로부터 거의 일정한 입도분포를 가지고 있는 매립토층(Fill)에서 수행한 표준관입시험결과의 예이다. 전체 매립토층의 두께는 약 8m 이상이고 극히 일부 시료를 제외하고는 대부분의 시료가 실트질 자갈(GM)으로 분류되고 있으며 표준관입시험 결과는 매우 불규칙한 양상을 보이고 있으나 인접한 심도에서 큰 차이를 보이는 시험 예를 제시하였다.

표 4. 매립자갈층에서의 표준관입시험 예

관입량	시험 1	시험 2	시험 3	비고
15cm	4	5	5	예비타
15cm	4	15	4	본타
12cm	5	19	15	본타
SPT N	9	34	19	평균치=21

이와 같은 예는 대부분의 자갈층에서 매우 쉽게 찾아볼 수 있는 예이며 과연 이러한 지층의 개략적인 토성 파악을 위한 대표적인 N 값으로 평균치인 21을 제시하는 것이 과연 옳은 것인가 하는 의문을 가지게 된다. 이미 입자가 큰 자갈이 샘플러의 타입시 샘플러의 입구에 맞물려서 관입이 되는 경우 비정상적으로 과다한 N 치가 측정될 수 있으므로 주의해야 한다는 사실은 여러 자료에서 언급된 바 있다. 따라서 이러한 과다한 측정치를 어떻게 보정할 것인가에 대한 고려가 있어야 할 것이며 아니면 측정치의 하한치를 대표값으로 선정하여 다소 보수적이라도 안전적인 방법을 택해야 할 것이다.

2.4. 장비 및 시험자에 의한 차이점

표준관입시험이 장비에 따라, 또는 시험자에 따라 차이를 보이는 것은 시험 과정의 표준화에 있어서 가장 큰 장애임에 틀림없다. 표준관입시험은 시추와 병행되어 수행되므로 지역에 따라 사용하는 시추 장비에서부터 이를 포괄적으로 통일하고자 하는 노력은 전술했듯이 현실적으로 거의 불가능한 일로 인식될 수 밖에 없다. 따라서 장비의 세부적인 내용까지 규격을 통일하는 것은 현 시점에서 기대하기 어려운 실정이며 이에 대한 차이를 정확히 인식하고 해석과정에 있어서 기술자의 판단 (engineering judgement)로써 고려하는 것 외에는 뚜렷한 해결책이 없다.

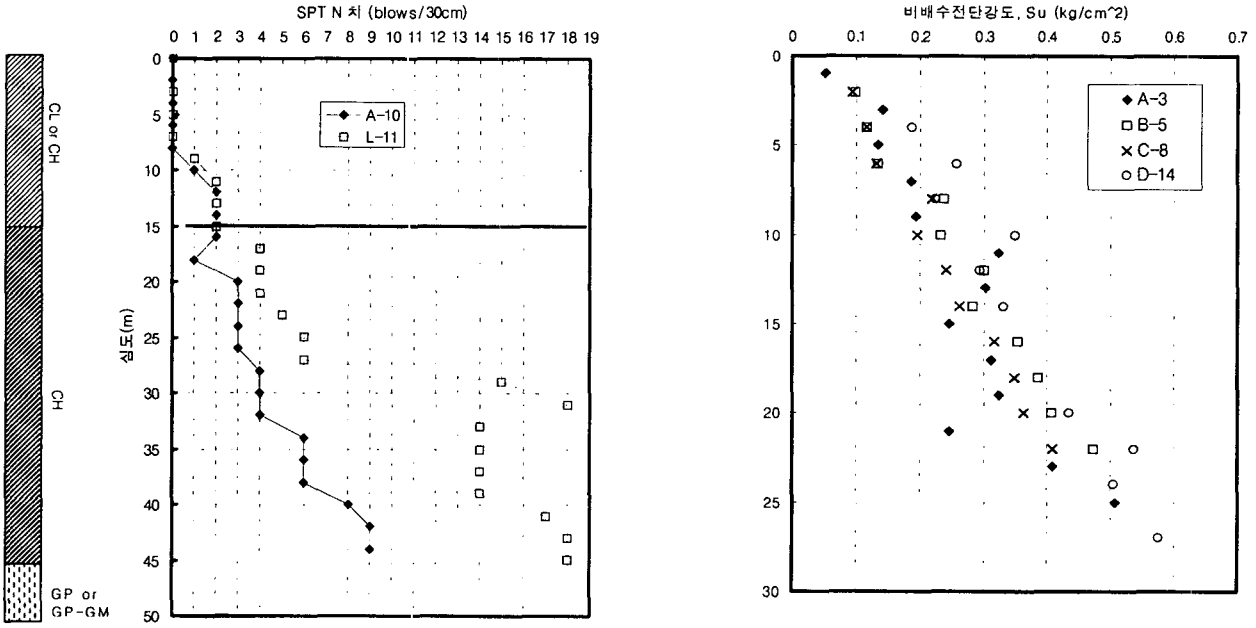
현재 국내에서 장비의 차이에 대한 인식은 거의가 햄머에 차이에 의한 시험 결과의 오차로 인식되고 있는 경향이며 따라서 햄머가 유발할 수 있는 인위적인 오차를 최소화할 수 있는 자동햄머의 개발과 이의 보급을 확산시키려는 방향으로 연구가 집중되고 있는 듯하다. 햄머의 종류별 차이는 기존의 연구에서 이미 여러 차례 언급한 바 있으므로 여기서는 생략하기로 한다. 이와 같이 자동햄머의 사용이 모든 문제점을 해결할 수는 없으나 Cathead-Pully 방식에서 유발될 수 있는 Rope의 굵기나 교체 시기, Cathead 의 크기, rope를 감는 횟수 등 표준화시키기 애매한 규정을 원천적으로 제거할 수 있다는 점에서는 의미가 있다고 볼 수 있겠다.

그러나 불행하게도 장비의 차이는 이러한 햄머로부터 유발되는 차이 이외에도 이루 열거할 수 없을 정도로 많은 실정이며 여러 가지 원인이 복합적으로 작용하여 오차를 유발하는 것이 보통이므로 이를 원인별로 분류하여 수정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 예를 들어 심도가 깊고 비교적 연약한 지반에서 표준관입시험과 병행하여 자연시료를 채취하는 경우 시추공의 크기와 작업자의 시추공 처리 방법에 따라 N치가 달라지게 되며 굴진작업시 사용펌프의 수압의 차이 등이 시추공 바닥의 교란 정도와 슬라임의 유무 등의 차이를 유발하는 경우도 있다. 이러한 슬라임의 제거 작업이 확실히 이루어지지 않는 한 시험 결과의 신뢰성에는 심각한 의문을 가질 수 밖에 없다. 그림 1은 이미 기존에 소개된 바 있는 시험 예로 베인전단시험결과에서 보듯이 거의 일정한 지층에서 시험한 결과임에도 표준관입시험은 전술한 이유 등으로 인해 심한 경우 약 5배 이상까지 차이가 날 수 있음을 보여주고 있다.

3. 결언

표준관입시험을 수행하거나 그 결과를 이용함에 있어서 표준화의 미비로 현장기술자들이 의문을 가지는 몇가지 문제점에 대해 기술하였다. 전술한 바와 같이 표준관입시험이 현장작업 상태에 따라 즉, 시험장비와 시험자에 따라 차이를 보이는 것은 시험의 표준화를 가로막는 가장 큰 장애물이며 이러한 시험 수행 과정을 세부적인 면까지 모두 규정을 두어 제한한다는 것은 현실적으로 매우 어

려운 문제이다. 또한 어떠한 현장시험이라도 장비의 개선이나 시험방법의 세부적인 규정보다는 시험자의 숙련된 기술이나 정성이 우선한다는 것은 주지의 사실이다. 특히 설계자와 시험자가 별개이면서도 설계자에 의한 감독이 전혀 이루어지지 않는 시험이 대부분인 국내 여건상 이러한 숙련되고 의식있는 기술자의 양성이 선행되지 않는 한 자칫 현재 논의되고 있는 햄머의 효율 제고를 포함한 시험 방법 및 장비의 개선은 아무 쓸모 없는 작업이 될 가능성이 많다. 따라서 새로운 개선점을 찾으려는 노력 이전에 시험법 자체가 지니고 있는 근본적인 한계를 확실히 인정하는 자세가 필요하다. 즉 현재까지 나타난 문제점을 시험방법의 개선을 통해서만 해결하려 할 것이 아니라 기타 현장시험이나 실내시험에 대한 비중을 높이고 표준관입시험에 대한 의존도를 가급적 줄여나가면서 이러한 한계성을 극복하도록 노력하는 것이 바람직하다고 할 수 있겠다.



(a) 표준관입시험 결과

(b) 현장베인시험 결과

그림 1. 시험장비 및 시험자에 따른 N 치의 차이

참고문헌

1. 吉中龍之進 (1967) 地盤調査 ⑤, 橋梁と基礎, Vol.1, No.5, p.27
2. Fujita, K. (1987), " On the Accuracy of the Standard Penetration Test", Proc. of SE Asian Geotech. Conf., pp. 3-12~3-24
3. Schmertmann, J.(1978), "Use the SPT to measure Dynamic Soil Properties?-Yes, But.....!,"Dynamic Geotechnical Testing, ASTM STP 654, American Society of Testing and Materials, pp.341-355
4. Skempton, A. W.(1986) "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation", Geotechnique, Vol. 36, No.3, pp425~447