

# 지반굴착에 소요되는 전기에너지와 표준관입시험 N값과의 상관관계 연구 I : 기초연구(실내토조실험)

## A Study of Correlation between SPT N-value and Exerted Electrical Energy Required for Ground Drilling I : Basic Study (Laboratory Soil Box Test)

최창호<sup>1\*</sup>

Changho Choi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering, Korea Institute of Construction Technology, (Daehwa-Dong)283, Goyangdae-Ro, ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Republic of Korea

### ABSTRACT

Ground drilling is a common method to conduct site investigation, soil improvement, and pile installation. In the point of construction ground drilling requires electrical energy to drill a hole in ground in which the energy exerts into the motor located on the head of auger and generates rotational power. In this paper it is verified that the exerted electrical energy is closely related to the strength characteristics of ground. Measurement sensors, recording system, and drilling system were developed to obtain exerted motor current and drilling depth and laboratory soil box tests were carried out. The measured motor current and boring depth were applied to predict SPT N-value and the prediction results were compared to SPT N-value of laboratory tests. The test results show that the exerted electrical energy to bore ground be a good index to estimate SPT N-value.

### 요 지

지반굴착은 지반조사, 연약지반 개량, 선굴착 말뚝 시공 등 지반공학 분야에서 널리 사용되고 있다. 지반을 굴착하기 위해서는 오거의 상부에 설치된 구동모터를 회전시키는 전기에너지가 필요하게 된다. 본 논문에서는 지반굴착시 구동모터에 소요되는 전기에너지와 지반의 표준관입시험 N값의 상관관계를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 지반굴착시 변화하는 전류값과 굴착깊이를 계측하기 위한 측정센서, 데이터 저장시스템, 굴착시스템 등의 실내실험 장치를 개발하였으며, 모형토조 실험을 수행하였다. 계측된 전류값과 굴착깊이는 표준관입시험 N값 추정에 이용되었으며 추정된 표준관입시험 N값은 실내실험으로부터 실측된 N값과 비교하였다. 비교결과 지반굴착에 소요되는 전기 에너지를 이용하여 표준관입시험 N값을 추정할 수 있음을 확인하였다.

**Keywords :** Ground drilling, Electrical energy, SPT N-value, Laboratory soil box test

## 1. 서 론

지반굴착은 지반조사, 연약지반 개량을 위한 쓰일시멘트 그라우팅 공법의 시공, 선굴착 말뚝기초의 시공, 사면 보강을 위한 쓰일네일의 시공 등 지반공학 분야에서 널리

사용되고 있으며, 드릴비트 형상의 오거를 회전시켜 지반을 굴착하게 된다(Park, 2000; Lee, 2000; Fang, 1991). 지반굴착시 굴착력은 주변소음 및 장치의 무게 등을 고려하여 대부분 전기모터를 통하여 제공되어지는데, 이때, 굴착에 소요되는 전기에너지는 오거의 굴착력에 대한 지반의 저항력으로 작용하게 되며 지반의 강도특성과 일정한 상관관계를 나타낼 것으로 판단된다.

지반굴착에 소요되는 에너지를 활용하여 지반의 강도 특성을 파악하고자한 연구의 예로서 Perko(2000)는 헬리

Received 4 Dec. 2012, Revised 21 Dec. 2012, Accepted 24 Dec. 2012

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0785; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: chchoi@kict.re.kr (C. Choi)

칼(helical) 기초 및 앵커의 설치 중 굴착에 소요되는 기계적 에너지를 활용하여 지반굴착에 필요한 회전 토크를 예측하고자 하였으며, Choi et. al.(2007a)은 지반굴착시 소요되는 전기에너지를 이용하여 지반의 회전굴착토크를 예측하고자 하였고, Choi et. al.(2007b)은 지반굴착에 소요되는 전기에너지와 지반의 표준관입시험 N값의 상관관계를 분석하였다. 또한, 기계공학분야에서는 드릴공정의 효율성 및 생산성을 증대시키고자 금속의 절삭에 필요한 전기에너지를 활용하여 절삭토크를 제어하고자 하는 연구가 진행되었다(Oh, et. al. 2001a; Oh, et. al. 2001b). 이들 연구들은 굴착에 소요되는 에너지와 굴착토크는 일정한 상관관계를 나타내는 원리에 착안한 연구들로 굴착에 소요된 에너지를 측정하여 굴착토크를 예측하고 제어하는 연구들로 기계공학분야에서는 널리 활용되고 있는 연구분야이다. 그러나, 지반공학 분야에서는 지반굴착시 소요되는 에너지와 지반의 공학적 특성간의 상관관계에 대한 연구가 미진한 상황이며, 이는 굴착장비의 다양성과 지반이 가지는 가변성 등 다양한 공학적 요소들에 의한 변동성을 고려하기가 어렵기 때문이다.

본 연구는 지반굴착에 소요되는 전기에너지와 지반의 공학적 특성의 상관관계 규명을 위한 기초연구로서 지반굴착에 소요되는 전기에너지와 표준관입시험 N값에 대한 상관식을 제안하고자 하였다. 이를 위하여 지반굴착시 변화하는 전류값과 굴착깊이를 계측하기 위한 측정센서, 데이터 저장시스템, 굴착시스템 등의 실내실험 장치를 개발하였으며, 모형토조 실험을 수행하였다. 실내실험을 통해

계측된 전류값과 굴착깊이는 제안된 식을 이용하여 표준관입시험 N값 추정에 이용되었으며 추정된 표준관입시험 N값은 실내실험으로부터 실측된 N값과 비교하여 지반굴착에 소요되는 전기에너지와 표준관입시험 N값의 상관관계를 도출하고자 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료

본 굴착실험에 사용된 시료는 통일분류법상 SM로 구분되어지는 실트질 사질토이며, 충청남도 금산시의 주택공사 현장에서 채취하였다. 시료의 200번체 통과량은 약 32%이고  $D_{50}=0.3\text{mm}$  로서, KS F 2312에 따른 다짐시험으로부터 최적함수비 9.0%, 최대건조밀도  $2.0\text{g/cm}^3$ 로 나타났다(Table 1). 시료의 다짐은 함수비를 11%로 조절하여 일본 MIKASA사의 MT55 텀핑람머를 사용하여 3층 다짐을 실시하였다. 다짐 후 시료의 크기는  $1.2\text{m}\times 1.2\text{m}\times 1\text{m}$ 였으며 다짐밀도는 최대건조밀도의 80%로 하였다. Figure 1은 굴착실험을 위한 시료준비 장면을 나타내고 있다.

### 2.2 굴착실험

굴착실험에서는 굴착속도, 소요 전류량 등을 계측하여 지반굴착시 소요되는 전기에너지를 이용하여 지반의 표준관입시험 N값을 예측하고자 하였다. Figure 2는 굴착실험

Table 1. Soil properties of laboratory drilling tests

Soil Properties				
Percent Passing No. 200 Sieve (%)	D50 (mm)	OMC (%)	$e_{dmax}$ ( $\text{g/cm}^3$ )	USCS
32	0.3	9.0	2.0	SM



(a) Tamping rammer



(b) Compaction



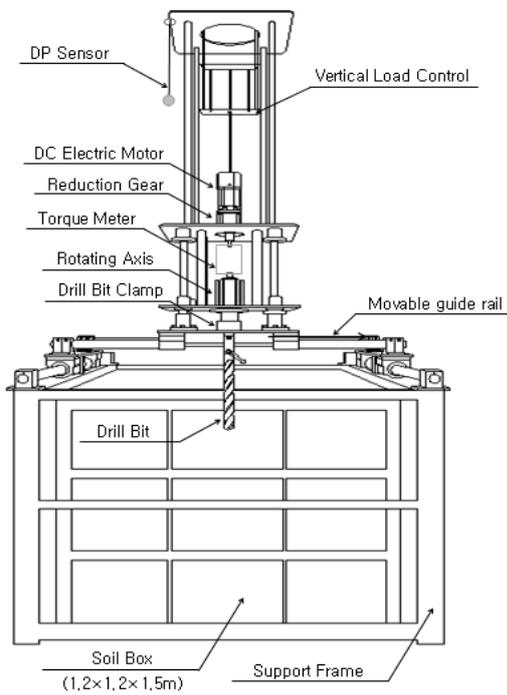
(c) Density evaluation

Fig. 1. Specimen preparation for drilling tests

장비의 개요도와 실제 모습을 나타내고 있는데, 장치의 상부에는 90Watts 출력의 DC 인덕션 모터(induction motor)가 장착되어 있으며 감속기어비는 1:150이다. Table 2는 구동모터와 감속기어의 제원으로, 모터는 90볼트의 전원, 1.3암페어(ampere)의 정격전류, 60Hz의 주파수를 사용하여 구동되어지며, 부하에 관계없이 일정한 속도로 회전하며 전압과 주파수는 변화하지 않는 상수로 작용하게 된다. 모터의 출력축은 감속기어, 구동 샤프트(shaft), 토크 미터(torque meter), 오거 클램프, 오거의 순으로 연결된다. 모터의 구동력은 최하단의 오거를 회전시켜, 토조에 충당집하여 제작된 토사를 굴착하는데 이용된다. 감속기어를 통

한 오거는 일정속도로 회전을 하게 되는데, 전압과 교류 주파수가 고정값이므로, 굴착 재료의 강성에 따른 부하정도는 모터가 일정속도로 회전하는데 필요한 소요 전류의 양과 비례하게 된다. 따라서 지반굴착 중 부하정도를 전류값으로 파악하여 이를 표준관입시험 N값으로 전환시키고자 하는 것이 본 장비의 개요라 할 수 있다.

본 실험에서는 2가지의 계측값을 센서들을 통하여 기록 및 저장하게 되는데, 모터의 부하에 따른 전류 변화값과 오거의 이송거리(굴착깊이)이다. 모터의 소요 전류는 전력을 인입하는 전선에 연결선으로 고정하여, 이를 전류/전압 전환장치를 통해 0~5암페어를 0~5볼트로 전환시켜 계측하



(a) Schematic diagram



(b) Picture

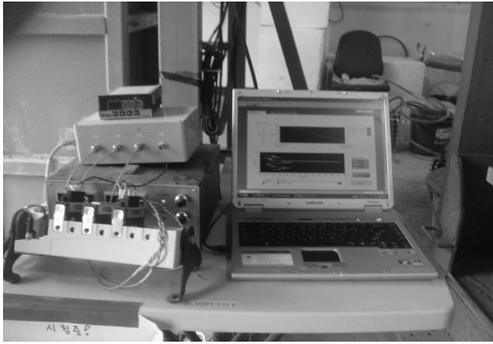
Fig. 2. Schematic diagram and picture of drilling test equipment

Table 2. Specifications of electric motor and reduction gear

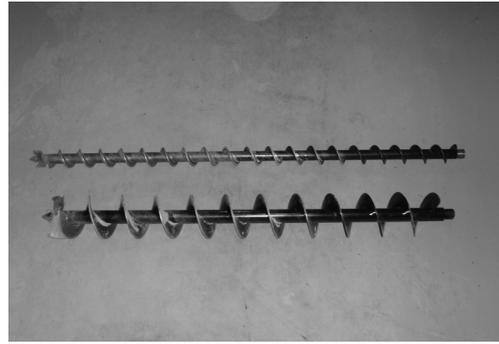
DC motor specification						
Model	Manufacture	Output	Voltage	Frequency	Rated load	Speed (RPM)
S9D90ch (OC99)	SPG Co., Ltd	90 Watts	90 volt	60 Hz	0.165 N-m	2910
Reduction gear specification						
Model	Manufacture	Gear ratio				
S9KH90B	SPG Co., Ltd	1:150				

Table 3. Motor current data acquisition system for drilling equipment

Current to Voltage Converter				
Number of channels	Operating range	Output voltage	Tolerance	Power
2 Ch.	± 4A	± 4V DC	1% FS	220V AC



(a) DAQ system



(b) Drilling auger

Fig. 3. DAQ system and drilling auger

Table 4. Specification of NI-compact DAQ

National Instrument compactDAQ				
compactRIO cRIO-9215			NI 9237	
Number of channels		4 Ch.	Number of channels	
Operating voltage range		$\pm 10V$	Frequency	12.8 MHz
Error	Calibrated type ( $25^{\circ} C; \pm 5^{\circ} C$ )	0.02%	Master time base	Accuracy
	Uncalibrated type ( $25^{\circ} C; \pm 5^{\circ} C$ )	0.6%		Nominal full-scale range

였다. 이 전류/전압 전환장치의 제원은 Table 3에 나타냈으며, 전류와 전압의 변환 비율(A:V)은 1:1의 값을 가진다. 시간당 굴착깊이는 Autonix사의 엔코더(240S6-3600-3-2-24)를 사용하여 측정하였다. 계측값들은 NI-compactDAQ를 통해 PC의 LabView 8.0 프로그램과 연결되었고(Fig. 3(a)), 계측값들은 교류전원의 실효치(RMS, root mean square value)를 고려하여 20Hz의 속도로 저장되었다(NI, 2012). NI-compactDAQ의 제원은 Table 4에 나타내었으며, 굴착 실험에 사용된 오거는 실험을 위하여 직경 60mm로 제작된 제품을 사용하였다(Fig. 3(b)).

굴착에 앞서, 오거를 60초간 공회전시키는데 이는 모터에 정격전류가 흐를 수 있는 여유시간을 두어 실험시 모터 자체의 워밍업에 필요한 소요전류 에러를 방지하기 위함이며, 또한 공회전시의 전류값을 측정하여 전체 소요전류로부터 실제 굴착에 소요된 전류를 구하기 위함이다. 이때 각 센서들, 엔코더, 전류의 교정값을 Labview와 비교하며 수정하게 된다. 이러한 작업이 끝나면 약 80cm정도 회전 굴착하였다. 굴착 중 RPM미터를 통해 회전속도를 수시로 확인하여 고정값인 RPM=19.4를 확인하였다.

현재까지 굴착장비에 소요되는 전류량은 정성적으로는 지반의 공학적 특성과 상관관계를 가지고 있으나 정량적인 지

Table 5. Affecting factors for laboratory drilling test

Influence Factor considered in this test	
Thrust Force (f <sub>T</sub> )	45, 75, 105 kgf
Auger Diameter	60 mm

표로서는 사용되지 못하고 있다(Geotechnical Engineering Research Group, 2003; Korea Nation Housing Cooperation, 2004; Chai, 2000; Park et. al., 2004). 이는 굴착장비의 다양성과 지반이 가지는 가변성 및 그 외 다양한 공학적 요소들에 의한 변동성을 전류량만을 가지고 일반화 시키는 것이 어렵기 때문이다. 즉, 동일한 지반을 굴착함에도 다양한 영향인자에 의하여 전류값이 변화하게 되는데, 이러한 문제의 해결방안으로서 본 실험에서는 굴착시간의 개념을 추가한 에너지 개념을 적용하여 다양한 영향인자들을 고려하고자 하였다. 본 굴착실험에서는 전류( $I$ )와 굴착시간( $T$ )에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 오거의 직경과 구동모터에 작용하는 상재하중( $f_T$ , thrust force)을 영향인자로 변화시키며 실험을 수행하였다(Table 5).

굴착실험시 굴착공 간에 서로 영향을 미치지 않는 최소 이격거리에 대한 명확한 규정이나 연구결과는 보고된바 없다. 따라서, 본 실험에서는 각종 설계기준에서 제시하고

있는 말뚝 굴착공간 최소 이격거리에 대한 제안식을 참조하여 최소 이격거리를 3d로 산정하였다(Table 6).

### 2.3 실내 표준관입시험

본 연구의 목적은 지반굴착시 소요 전류량, 굴착속도 등을 계측하여 굴착에 소요되는 전기에너지를 계측하고, 이를 이용하여 지반의 표준관입시험 N값을 추정할 수 있음을 증명하는 것이다.

토조실험에서 지반의 N값을 측정하기 위하여 Fig. 4(a)에 제시된 미국 AMS사의 Flighted Auger Kit을 이용하여 지반의 N값을 실측하였다. Flighted auger kit는 직경 3.81cm의 샘플러와 낙하고 45.5cm, 무게 3.56kgf의 타격햄머를 사용하여 현장에서 수행되고 있는 표준관입시험을 모사할 수 있다. 본 실험에서는 토조 크기를 고려하여 굴착깊이 10cm 간격으로 3cm 관입시 타격수를 산출하였다.

### 3. 지반굴착시 소요 에너지값과 표준관입시험 N값의 관계

지반굴착시 지반의 강도특성은 오거의 굴착력에 저항하게 되는데 이때, 굴착력에 저항하는 지반의 강도특성은 굴착모터에 가해지는 전류( $I$ )와는 비례, 굴착속도( $S$ )와는 반비례 관계를 나타낼 것으로 예상되며 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{지반의 강도 특성치}(\tau, q_u, N \text{ 등}) \propto \frac{I}{S} \quad (1)$$

그러나, 지반의 강도 특성치( $\tau, q_u, N$  등)와 전류( $I$ ) 또는 굴착속도( $S$ )의 상관관계에 관한 기존의 연구동향을 분석한 결과, 기존의 연구들에서는 단순히 전류( $I$ ) 또는 굴착속도( $S$ )와 지반의 강도 특성치( $\tau, q_u, N$  등)의 상관

Table 6. Minimum spacing between adjacent pile foundation (Lee and Yi, 1989)

Minimum spacing between adjacent pile foundation		
Proposed by	Tip resisting pile	Friction pile
BOCA, 1984	2d or 1,75H ≥ 24 inch	2d or 1,75H ≥ 30 inch
NBC, 1976	2d or 1,75H ≥ 24 inch	2d or 1,75H ≥ 30 inch
Chicago, 1987		1d or 1,75H ≥ 30 inch
Sweden manual	3d or 3,4B L < 10m	4d or 4,5B L < 10m
	4d or 4,5B 10 < L < 24m	5d or 4,5B 10 < L < 25m
	5d or 5,6B L > 25m	6d or 6,8B L < 25m
	Any condition > 0,8m	Any condition > 0,8m
BS CP 8004	2d	$\pi d$ or 3d
DIN	3d ≥ 1m + d	3d ≥ 1m + d
Norway manual	3d L < 12m	Sand 3d, Clay 4d L < 12m
	4d 12 < L < 24m	Sand 4d, Clay 5d 12 < L < 24m
	5d L > 24m	Sand 5d, Clay 6d L < 24m

In here, d=pile diameter, B=side length of square pile, H=diagonal length of H-pile



(a) Flighted Auger Kit manufactured by AMS



(b) SPT test

Fig. 4. SPT equipment and testing in soil box

관계를 회귀분석 등의 통계적 기법에 의한 비교에 그치고 있다. 그 결과, 굴착장비에 소요되는 전류와 굴착속도는 지반의 강도특성을 직접적으로 예측하는데 사용되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 기존 연구들의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 에너지 개념에 의한 접근방안을 제안하고자 한다.

지반굴착시 굴착장비에 소요되는 전기에너지( $E_{drilling}$ )는 다음 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{drilling} = V \text{ (전압)} \cdot I \text{ (전류)} \cdot T \text{ (시간)} \quad (2)$$

위의 식에서 전압( $V$ )은 고정된 상수이므로 굴착깊이에 따른 전류값( $I$ )과 굴착시간( $T$ )을 측정할 수 있다면, 지반을 굴착하는데 소요되는 전기에너지를 계산할 수 있다.

또한, 표준관입시험 수행시 위치에너지는 다음과 같은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{위치에너지} = m \text{ (질량)} \cdot g \text{ (중력가속도)} \cdot h \text{ (높이)} \quad (3)$$

표준관입시험의 위치에너지와 타격횟수인 N값을 곱하면 표준관입시험시 지반 30cm를 굴착하는데 필요한 에너지( $E_{SPT}$ )를 구할 수 있다. 그러나, 실제로 위치에너지가 모두 표준관입시험의 샘플러를 관입시키는데 사용되지 않으며 위치에너지가 운동에너지로 변환되면서 에너지의 손실이 발생하게 된다. 따라서 표준관입시험 샘플러를 30cm 관입시키는데 필요한 에너지는 효율( $\eta$ )을 고려하여 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{SPT} = m \cdot g \cdot h \cdot \eta \cdot SPT \text{ N-value} \quad (4)$$

표준관입시험 샘플러의 관입은 지반굴착시 오거의 굴착과 동일한 역학적 개념을 나타내게 됨으로, 굴착장비를 이용하여 지반을 30cm 굴착하는데 필요한 전기에너지와 표준관입시험 샘플러를 30cm 관입시키는데 필요한 에너지는 다음 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{drilling}(V \cdot I \cdot T) \\ = E_{SPT}(m \cdot g \cdot h \cdot \eta \cdot SPT \text{ N-value}) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 표준관입시험 N값( $SPT \text{ N-value}$ )에 대해서 정리하면 다음 식 (6)과 같은 표준관입시험 N값을 계산

할 수 있는 식이 되며, 이 식에 의해 계산된 N값은 에너지를 이용하여 추정된 N값( $N_{EPT}$ , Energy Penetration Test)이라 할 수 있다.

$$\begin{aligned} SPT \text{ N-value} &= \frac{E_{EPT}(V \cdot I \cdot T)}{E_{SPT}(m \cdot g \cdot h \cdot \eta)} \\ &= N_{EPT} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서 오거 및 샘플러의 직경을 환산하여 식 (7)과 같은 에너지를 이용하여 추정된 N값(EPT, Energy Penetration Test)을 산정할 수 있다. 여기서,  $f(d_{pile}, d_{SPT})$  항은 굴착 오거의 직경과 샘플러의 직경의 크기가 다양하므로 보정해야 할 변환식으로 많은 실험데이터를 바탕으로 상관관계가 규명되어야 한다.

$$N_{EPT} = \frac{E_{EPT}(V \cdot I \cdot T)}{E_{SPT}(m \cdot g \cdot h \cdot \eta)} \times f(d_{auger}, d_{SPT}) \quad (7)$$

식 (7)에서 전압( $V$ ), 오거와 샘플러 직경의 상관관계식  $f(d_{auger}, d_{SPT})$ , 표준관입시험의 위치에너지( $m \cdot g \cdot h \cdot \eta$ )는 고정된 상수이고, 전류( $I$ )와 굴착시간( $T$ )이 지반강도에 따라 변화하는 변수가 된다. 따라서, 지반굴착시 전류( $I$ )와 굴착시간( $T$ )을 측정할 수 있다면 지반의 N값을 추정할 수 있게 된다. 식 (7)은 에너지보존법칙에 의하여 외부인자에 의한 영향을 배제할 수 있는 관계식을 나타낸다. 즉, 영향인자로 의하여 전류( $I$ )가 증가하게 되면 굴착시간( $T$ )이 감소하여 전체 소요에너지는 일정하게 되는 것이다.

## 4. 지반굴착시 소요 에너지값을 통한 표준관입시험 N값 예측

### 4.1 에너지개념을 이용한 표준관입시험 N값 예측의 타당성 분석

본 연구에서는 기존의 연구들이 단순히 전류( $I$ ) 값과 지반의 강도 특성치( $\tau$ ,  $q_u$ ,  $N$  등)의 상관 관계를 분석한 문제점을 해결하기 위하여 에너지 개념에 의한 접근방안을 제안하였다. Figure 5는 지반굴착시 구동모터에 소요되는 전류치와 에너지를 비교한 것이다. Figure 5(a)로부터 직경 60mm의 굴착오거와 상재하중  $f_1$ 의 외부 영향인자 변화에 따라 같은 지반을 굴착함에도 전류치의 변화양상

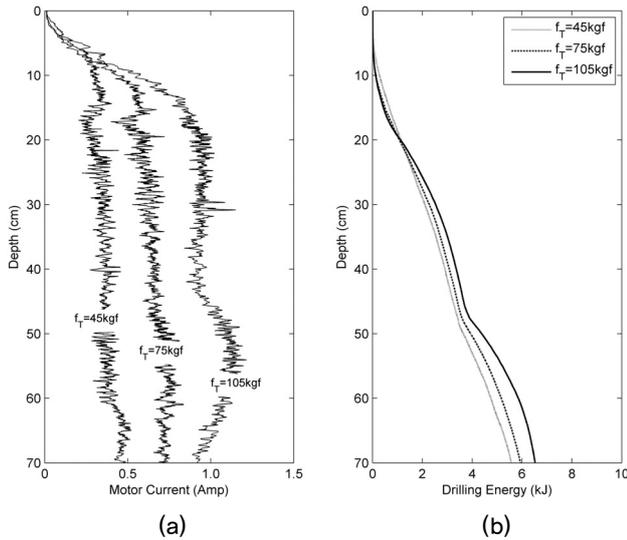


Fig. 5. Drilling current and energy with different thrust force: (a) depth vs. motor current and (b) depth vs. drilling energy

이 다양함을 알 수 있다. 반면에 Fig. 5(b)는 굴착에 따라 구동모터에 소요되는 에너지는 외부 영향인자에 크게 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 상재하중이 증가함에 따라 오거 하단에 작용하는 저항력이 커져 전류( $I$ )가 증가하지만, 굴착속도(RPM)가 일정하므로 전류( $I$ )가 증가하게 되면 굴착시간( $T$ )이 감소하여 전체 소요에너지는 일정하게 되는 것이다. 따라서, 본 연구에서 제안한 에너지 개념을 이용한 표준관입시험 N값 예측의 타당성을 확인할 수 있다.

#### 4.2 에너지개념을 이용한 표준관입시험 N값 예측

식 (4)를 이용하여 지반 3cm 관입시 소요되는 타격에너지  $E_{SPT-3cm}$ 는 실내에서 수행된 표준관입시험 장비에 관련된 상수들( $m, g, h, \eta$ )과 이를 사용하여 지반 3cm 굴착시 타격횟수( $SPT_{3cm}$ , N-value)를 사용하여 다음 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 표준관입시험의 효율  $\eta$  값은 Bowles(1996)가 제안한  $\eta=70\%$ 의 효율을 적용하였다.

$$E_{SPT-3cm} = m \cdot g \cdot h \cdot \eta \cdot SPT_{3cm} \text{ N-value} \\ = 3.56 \cdot 9.81 \cdot 0.455 \cdot 0.7 \cdot SPT_{3cm} \text{ N-value} \quad (8)$$

위의 식에서 샘플러의 무게( $m$ ), 중력가속도( $g$ ), 낙하고 ( $h$ ), 표준관입시험의 효율( $\eta$ )은 고정된 상수이므로 3cm의 지반을 굴착하는데 소요되는 타격횟수를 측정한다면

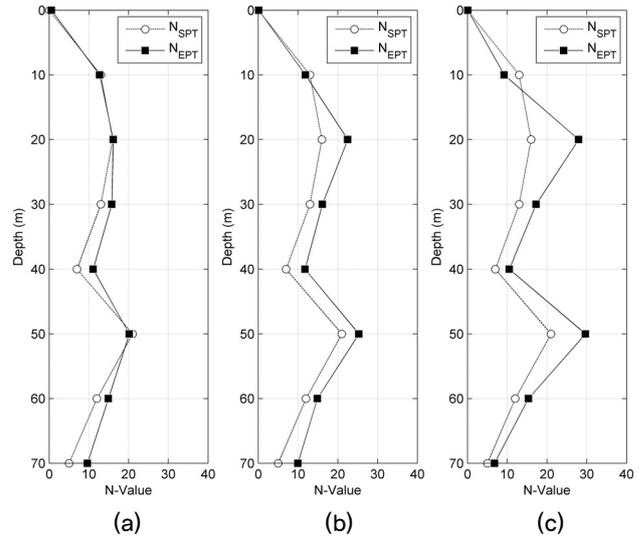


Fig. 6. Comparison of estimated N value from electrical energy for drilling and SPT N value: (a)  $f_T = 45$  kgf, (b)  $f_T = 75$  kgf and (c)  $f_T = 105$  kgf

지반 3cm를 굴착하는데 소요된 전기에너지를 계산할 수 있다. 지반 3cm 굴착시 모터에 소요되는 전기에너지는 식 (2)에 의하여 다음과 같은 식 (9)로 표현될 수 있다.

$$E_{drilling-3cm} = V (\text{전압}) \cdot I (\text{전류}) \cdot T (\text{시간}) \\ = 90 \cdot 3cm \text{ 굴착시 소요전류} \cdot 3cm \text{ 굴착시간} \quad (9)$$

위의 식에서 전압( $V$ )은 고정된 상수(90V)이므로 굴착 깊이에 따른 전류값( $I$ )과 굴착시간( $T$ )을 측정할 수 있다면, 3cm의 지반을 굴착하는데 소요되는 전기에너지를 계산할 수 있다. 따라서, 식 (6)에서 변수는 소요전류( $I$ )와 굴착시간 ( $T$ ) 뿐이며, 본 연구에서 개발한 굴착 시스템을 이용하여 에너지 개념을 이용하여 추정된 N값( $N_{EPT}$ )을 산정할 수 있다.

Figure 6은 토조실험으로부터 지반 3cm 관입시 실측한 표준관입시험 N값( $N_{SPT}$ )과 식 (6)에 의해서 계산된 에너지 개념을 이용하여 추정된 N값( $N_{EPT}$ )을 비교하여 나타내고 있다. 표준관입시험  $N_{SPT}$ 값과 에너지 개념을 이용하여 구한  $N_{EPT}$ 값을 비교해보면 절대값에서 약간의 차이를 나타내고 있으나, 변화양상이 매우 유사한 관계를 나타내고 있다. 또한, 상재하중  $f_T$ 가 증가함에 따라 오차가 커지는 경향을 파악할 수 있는데 이러한 차이는 상재하중이 증가함에 따라 소요전류가 회전토크로 변환되는 효율이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 또한 표준관입시험의 효율( $\eta$ )과 에너지가 작용하는 오거 및 샘플러의 환산단면적에

서 오차가 발생한 것도 원인으로 사료된다. 향후 추가적인 실험과 분석이 필요하겠지만, 본 실험의 결과로부터 지반 굴착시 굴착장비에 소요되는 전기에너지를 이용하여 지반의 표준관입시험 N값을 추정할 수 있음을 보여주고 있다.

## 5. 결론

본 논문은 지반굴착시 소요되는 모터의 전류값과 굴착 시간을 이용한 표준관입시험 N값 예측을 위한 기초연구로서 실내에서 토조를 이용하여 굴착실험을 수행하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- (1) 전기에너지와 지반강도의 관계 규명을 위하여 굴착모터에 소요되는 전류값, 굴착깊이를 계측할 수 있는 실내 토조 실험장비를 개발하였다.
- (2) 실내토조실험 결과 모터에 소요되는 전류치는 굴착깊이에 따라 표준관입시험 N값과 유사한 변화양상을 나타냄을 확인할 수 있었다.
- (3) 동일 지반을 굴착함에도 상재하중  $f_T$ 의 변화에 따라 소요전류와 굴착시간이 변화한다는 것을 확인하였으며, 지반의 특성치를 예측하는데 있어서 단순 전류값을 이용하는 방법보다는 에너지 개념을 이용하는 방법이 더 타당함을 확인하였다.
- (4) 에너지 개념으로부터 지반굴착에 소요되는 전기에너지와 표준관입시험 N값과의 상관식을 제안하였다. 실측한 표준관입시험  $N_{SPT}$ 값과 에너지 개념을 이용하여 구한  $N_{EPT}$ 값을 비교해보면 절대값에서 약간의 차이를 나타내고 있으나, 변화양상이 매우 유사하다. 절대값의 차이는 표준관입시험의 효율( $\eta$ )과 에너지가 작용하는 오거 및 샘플러의 환산면적에서 오차가 발생한 것으로 예상된다. 본 실험의 결과로부터 지반굴착시 굴착장비에 소요되는 전기에너지를 이용하여 지반의 표준관입시험 N값을 추정할 수 있음을 확인하였다.
- (5) 지반굴착시 소요되는 전기에너지를 이용하여 지반의 특성치를 보다 정확하게 예측하기 위해서는 현장시험 시공을 통한 데이터의 확보가 필요하며, 추후 많은 양의 데이터가 확보될 경우 지반굴착시 소요되는 전기에너지를 통한 지반특성치의 규명이 가능할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

This study was financially supported by grants from the “Development of Foundation Design Evaluation System for Cold Region Ground Condition,” a project of the Korea Institute of Construction Technology.

## 참고문헌

1. Bowles, J. E. (1996), *Foundation Analysis and Design*, 5th Ed., McGraw-Hill, pp.154-162.
2. Chai, S.-G. (2000), “Q&A: Characteristics and application of prebored pile method”, *Geotechnical Engineering*, Korean Geotechnical Society, Vol.16, No.7, pp.83-88.
3. Choi, C., Cho, J., Chung, H., Lee, Y. (2007a), “SPT N-value Estimation from Exerted Electrical Motor Energy for Preboring Pile Installation,” *Proceedings of 7<sup>th</sup> Japanese-Korean-French Seminar on Geo-Environmental Engineering*, Grenoble, France, pp.293-298.
4. Choi, C., Cho, J., Lee, Y., Chung, H.-I., Park, Y.-B. (2007b), “A Study for Predicting Rotational Cutting Torque from Electrical Energy Required for Ground Drilling”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.23, No.7, pp.1-8.
5. Fang, H.-Y. (1991), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp.123-456.
6. Geotechnical Engineering Research Group (2003), *Plan, design, and construction of pile foundation in practice*, Gunsul-JeongBo, pp.456-463.
7. Korea Nation Housing Cooperation (2004), *Solutions of Structural Problems for Engineers*, pp.40-48. (in Korean)
8. Lee, M. W. and Yi, C. T. (1989), *Improvement of design and construction quality control of pile foundation*, Korea Institute of construction Technology, Research report, pp.123-456.
9. Lee, W. J. (2000), *Measurement of pile load transfer using fiber-optic sensor and characteristics of bored precast pile bearing capacity*, Ph. D. Thesis, Dept. of Civil and Environmental Engr., Korea University.
10. NI (2012), National Instrument web site, www.ni.com.
11. Oh, Y. T., Kwon, W. T. and Chu, C. N. (2001a), “Cutting Torque Control in Drilling Part 1 : Design of a Cutting Torque Controller”, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.18, No.8, pp.96-106.
12. Oh, Y. T., Kim, G. D. and Chu, C. N. (2001a), “Cutting Torque Control in Drilling Part 2 : Drilling Torque Control Using Spindle Motor Current and Its Effect on Drill Flank Wear”, *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol.18, No.8, pp.107-115.
13. Park, Y.-H., Kim, N.-Y. and Yook, J.-H. (2004), *Design and Construction of SIP Method(II)*, Korea Expressway Corporation

Research Report, pp.35-39.

14. Park, J.-B. (2000), *Bearing Capacity of Displacement in-situ Concrete Pile*, Ph. D. Thesis, Dept. of Civil Engr., Hanyang University.
15. Perko, H. A. (2000), "Energy Method for Predicting the Installation Torque of Helical Foundations and Anchors", *New Technological and Design Developments in Deep Foundations*, ASCE, Geotechnical Special Publication No.100, pp.123-456.