

## 지반절삭 전기에너지를 활용한 회전굴착토크 예측에 관한 연구

### A Study for Predicting Rotational Cutting Torque from Electrical Energy Required for Ground Drilling

최 창 호<sup>1</sup> Choi, Changho

조 진 우<sup>2</sup> Cho, Jinwoo

이 용 수<sup>3</sup> Lee, Yongsoo

정 하 익<sup>4</sup> Chung, Ha-ik

박 용 부<sup>5</sup> Park, Yong-Boo

#### Abstract

This study proposes a method to estimate drilling torque during ground boring with an aid of electrical energy required for rotating a boring-auger. Ground boring is commonly used in geotechnical engineering such as preboring precast pile installation, soil-cement grouting, ground exploration and so forth. In order to understand the correlation between required electrical energy to rotate the boring auger and the drilling torque, a small laboratory apparatus was designed and a pilot study was performed. The apparatus rotates common drill bits of  $D=5\sim 25$  mm in CBR specimens. The velocity of a bit is 19 RPM and predefined using a reduction gear which connects a main rotation axis to a 25 Watts AC electrical motor shaft. In the middle of drilling the motor current increments and the drilling torque were measured and the correlation between the current and the torque was obtained through linear square fits. Based on the correlation the acquired motor current during drilling was applied to predict the drilling torque in consequent testing and the prediction results were compared to the measured torque. The comparison leads a conclusion that the motor current during drilling using electrical power may be a good indicator to estimate/determine strength characteristics of the ground.

#### 요 지

본 연구는 지반의 회전굴착에 필요한 굴착 토크(torque)를 회전 오거 구동에 소요되는 전기에너지를 활용하여 예측할 수 있는 방법을 제시한다. 지반회전굴착은 선굴착 말뚝 시공, 연약지반 개량을 위한 소일-시멘트 그라우팅(soil-cement grouting), 사전 지반조사 등 지반공학 분야에 흔히 사용되고 있다. 오거를 통한 회전굴착에 소요되는 전기에너지와 회전 토크의 상호 관계를 이해하기 위하여 소형 실내 실험기기를 제작하고 파일럿(pilot) 실험을 수행하였다. 실험기기는 직경  $D=5\sim 10$ mm의 일반 드릴 비트를 회전하여 CBR몰드에 다짐 제작된 토사공시체를 굴착할 수 있도록 설계되었다. 드릴 비트는 감속기어를 통하여 19RPM의 정격 속도로 회전하며, 구동 모터는 25Watt 용량의 교류 유도 전동기이다. 드릴 비트로 공시체를 회전 절삭하며 구동 모터에 소요되는 전류의 증가량과 실제 비트에 작용하는 토크(torque)를 측정하였고, 선형 회귀분석을 통하여 전류 증가량과 토크 증가량의 상호관계를 파악하였다. 구하여진 회귀분석 결과를 활용하여 굴착시 소요되는 전류 증가량으로부터 굴착토크를 예측하여 예측된 토크값과 비교하였다. 비교로부터 굴착에 소요되는 전기력을 활용하여 굴착토크를 예측할 수 있다는 결론을 얻었으며, 이로부터는 굴착 전기력의 분석을 통해 지반의 전단강도 특성을 예측할 수 있음을 증명하고자 하였다.

**Keywords :** Ground drilling, Motor current and drilling torque, Laboratory testing for drilling torque

1 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT, chchoi@kict.re.kr, 교신저자)

2 정회원, 한국건설기술연구원 연구원 (Member, Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT)

3 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT)

4 정회원, 한국건설기술연구원 책임연구원 (Member, Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engrg., KICT)

5 정회원, 대한주택공사 주택도시연구원 책임연구원 (Member, Research Associate, Division of Engr. & Constr. Research, KNHC)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

지반절삭/굴착은 지반공학의 적용분야에 널리 사용되고 있다. 그 예로 선굴착말뚝기초의 시공, 연약지반개량을 위한 soil-cement 그라우팅 공법의 시공, 사면보강을 위한 소일네일의 시공 등에 있어서 드릴비트와 비슷한 형상의 오거를 회전시켜 지반을 굴착하게 된다(박종배 2000; 이원제 2000; Fang 1991). 지반굴착시 굴착력은 주변소음 및 장치의 무게 등을 고려하여 대부분 전기모터를 통하여 제공되어지는데, 굴착에 소요되는 전기 에너지를 파악하고 전기공학적인 이론을 도입하여 지반의 공학적 성상을 파악할 수 있다고 판단되어진다.

에너지 및 토크 개념을 활용하여 말뚝의 거동을 파악하고자한 예로서 Perko(2000)는 헬리칼(helical) 기초 및 앵커의 설치 중 굴착에 소요되는 기계적 에너지를 활용하여 지반 절삭에 필요한 회전 토크를 예측하고자 하였으며, Axelsson and Westin(2000)은 지반에 로드를 관입시킨 후 회전토크를 측정하여 그 값을 사질토 지반에 설치된 말뚝의 지지력 산정에 활용하고자 하였다. 또한, 기계공학분야에서는 드릴 공정의 효율성 및 생산성을 증대시키고자 금속의 드릴링 절삭에 필요한 소요 전기에너지를 활용하여 절삭 토크를 제어하고자 하는 연구가 이미 진행되어왔다(오영탁 외 2001a; 오영탁 외 2001b). 본 연구는 지반굴착시 구동모터에 소요되는 전류량을 이용하여 굴착과괴에 저항하는 지반의 전단강도를 직접 추정할 수 있는 이론적 정립을 위한 기초 연구의 성격으로 실내실험을 통하여 소요 전류량과 굴착토크의 상관관계를 규명하고자 수행되었다.

본 논문에서는 전기모터에 의한 지반 굴착력을 전기공학의 기본원리를 통하여 구하고자 하였으며, 소요전류량을 굴착회전에 필요한 토크와 실내실험을 통하여 비교하고자 하였다. 지반굴착 소요전류를 활용하여 굴착 토크를 예측하기 위한 본 연구의 목적에 부합되도록 실내실험 장비를 설계/제작하였으며, 실내실험은 CBR 몰드에 토사를 최적다짐한 후 지반굴착오거와 비슷한 형상의 드릴 비트를 이용하여 일정깊이를 굴착하여 수행되었다. 실험에서 굴착깊이, 소요 전류량, 소요 토크 등을 측정하였으며, 전류량과 굴착 토크와의 상관관계를 구하였다. 이를 토대로 실험조건을 변화시켜 소요 전류만을 이용하여 굴착 토크를 예측하고, 예측 결과를 실제로 측정한 토크와 비교하였다. 비교로부터 소요 전류량과 토크와의 상관관계를 정확히 규명할 수 있다면,

굴착과 동시에 지반의 강도특성 등을 추정할 수 있음을 증명하고자 하였다.

## 2. 실내실험장비 및 시료

### 2.1 실내실험장비

실내실험장비는 지반굴착 소요전류를 활용하여 굴착 토크를 예측하기 위하여 제작하였다. 그림 1과 그림 2는 장비의 개요도와 실제 모습을 나타내고 있다. 그림 1에서 보는 바와 같이 실험장치의 상부에는 25 Watts 출력의 AC 인덕션 모터(induction motor)가 장착되어 있으며, 감속기어비는 1:90으로, 표 1은 모터와 감속기어의 제원이다. 모터의 출력축은 감속기어, 구동 샤프트(shaft), 토크 미터(torque meter), 드릴비트 클램프, 드릴 비트의 순으로 연결되어지며, 모터의 구동력은 최하단의 드릴 비트를 회전시켜 CBR 몰드에 제작된 토사 공시체의 중심부를 절삭 파괴하는데 이용된다. 모터는 220볼트의 전원, 0.37암페어(ampere)의 정격 전류, 60Hz의 주파수를 사용하여 구동되어지며, 정격 부하에서 일정한 속도로 회전하며 전압과 주파수는 변화량이 무시할 수 있을 정도이므로 상수로 작용하게 된다.

감속기어를 통한 드릴 비트는 일정속도로 회전을 하게 되는데, 전압과 교류 주파수가 고정값으로 간주될 수 있으므로, 굴착 재료의 강성에 따른 부하정도는 모터가 일정속도로 회전하는데 필요한 소요 전류의 양과 비례하게 된다. 따라서 굴착 중 부하정도를 전류값으로 파악하여 이를 토크로 전환시키고자 하는 것이 본 실험기기의 개요라 할 수 있다.

그림 2는 굴착실험장비 및 계측장치이다. 본 실내실험에서는 3가지 계측값을 센서들을 통하여 기록저장하게 되는데, 모터의 부하에 따른 전류 변화값, 드릴비트의 이송거리(절삭/굴착깊이), 절삭에 소요되는 토크 값이다. 모터의 소요 전류는 전력을 인입하는 전선에 연결선을 고정하여, 이를 전류/전압 전환장치를 통해 0~5 암페어를 0~5 볼트로 전환시켜 계측하였다. 이송거리는 KMTL DP-500 (KMTL 2006)의 센서를 사용하여 최대 500mm의 변위를 측정하였으며, 회전 토크는 50kgf-m (490N-m)용량의 토크 트랜스듀서(torque transducer)를 사용하여 계측하였다. 계측값들은 NI-compactDAQ를 통해 PC의 LabVIEW 프로그램과 연결되었고, 샘플은 교류전원의 실효치(RMS, root mean square value)를 고려하여 20Hz의 속도로 저장되었다(NI 2007).

표 1. 실험에 사용된 전기모터와 감속기어의 제원

AC motor specification						
Model	Manufacture	Output	Voltage	Frequency	Rated load	Speed (RPM)
S8125GB-S12	SPG Co., Ltd	25 Watts	220 volt	60 Hz	0.165 N-m	1750
Reduction gear specification						
Model	Manufacture	Gear ratio				
S8KA90B	SPG Co., Ltd	1:90				

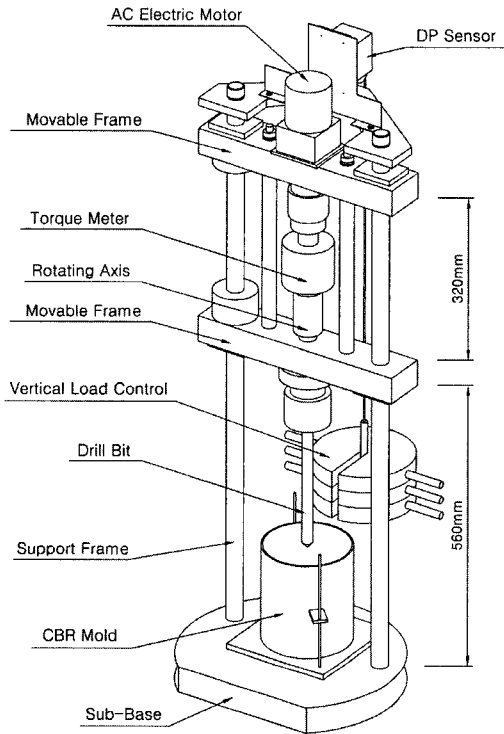


그림 1. 지반굴착의 모터 전류와 굴착 토크 측정 실험장치 개요도

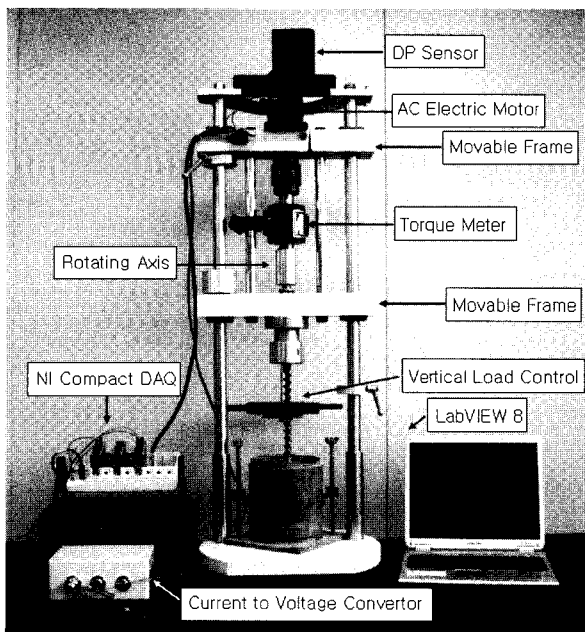


그림 2. 실험 장치 및 계측 장비의 모습

표 2. 실험에 사용된 공시체

Sample No.	$\rho_d$ ( $g/cm^3$ )	$w$ (%)	P(vertical load) (kgf)	comment
1	1.95	10.6	24	For calibration
2	1.98	7.9	36	For prediction
3	1.96	7.9	42	For prediction

## 2.2 토사 공시체

개발된 실험장치의 파일럿(pilot) 실험에 사용된 시료는 USCS의 SM로 구분되어지는 실트질 사질토이며, 충청남도 금산시의 한 현장에서 채취하였다. 시료의 No. 200체 통과량은 약 32%이고  $D_{50} = 0.3mm$ 로서, 최적다짐 실험으로부터 최적함수비  $w = 9.0\%$ , 최대다짐 건조 밀도  $\rho_{d_{max}} = 2.0g/cm^3$ 로 나타났다.

실내 절삭실험에 사용된 공시체들은 KSF 2312에 의거하여 15cm 직경의 CBR몰드에서 준비하였으나, 5층이 아닌 3층 55회 다짐을 실시하였다. 공시체 시료의 강성을 일관되게 유지하기 위하여 흙을 건조로에서 건조한 후 최적 함수비에 해당하는 수분을 첨부하여 시료를 준비하였고 실험 후 함수비를 측정하였다. 표 2는 각 실험 공시체에 관한 사항을 보여준다.

## 3. 굴착 토크 예측을 위한 모델링

그림 1로부터 드릴링 시스템에 작용하는 굴착 토크는 주축 모터에 부하로 작용하게 되며 모터는 일정한 주축 회전수를 유지하며 절삭을 수행하기 위해 굴착 토크를 보상할 수 있도록 더 많은 동력을 요구하게 되므로 모터에 인입되는 전류량 또한 증가하게 된다. 즉, 전류 계측 장치를 이용하여 CBR 몰드에 제작되어진 공시체를 드릴비트로 천공할 때 상부 구동 모터가 사용하는 전류의 양을 파악하여 흙의 전단강도를 분석하는 자료로 활용될 수 있다고 판단되어진다.

굴착 소요 토크와 모터의 소요 구동 전류는 상관 관

계에 있고, 시스템 전체에 작용하는 토크  $T_t$ 는 측정된 모터의 전체 소요 전류  $I_t$ 와 식 (1)과 같은 관계로 근사화 할 수 있다.

$$T_t = K_t I_t \quad (1)$$

식 (1)에서  $K_t$ 는 모터 소요 전류와 굴착 토크의 관계를 나타내는 계수로서 실험결과에 따라 얻어질 수 있는 상수 또는 비선형회귀 분석을 통하여 얻어질 수 있다. 하지만  $I_t$ 는 모터의 기동 및 시스템 자체의 운영에 필요한 전류를 포함하고 있기 때문에 지반의 부하에 의한 토크의 증가 정도를 파악하는데 있어서 전류의 증가에 의한 토크의 증가정도를 적절히 예측할 수 없다. 지반 굴착 소요 토크  $T_c$ 는 모터에 작용하는 전체 토크에서 모터 운전시의 주축의 마찰에 의한 토크를 포함하는 무부하 토크  $T_{tare}$ 를 빼 줌으로서 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$T_c = T_t - T_{tare} \quad (2)$$

지반 굴착 소요 전류  $I_c$  또한 전체 소요 전류로부터 무부하 전류  $I_{tare}$ 를 제외하여 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$I_c = I_t - I_{tare} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)으로부터 지반 굴착에 의한 부하 토크 및 모터 소요 전류는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_c = K_c(I_t - I_{tare}) \quad (4)$$

그러므로 구동 모터의 소요전류를 측정하고 무부하 운전 전류량을 파악하면 식 (4)를 이용하여 굴착 토크를 간접 추정할 수 있다. 비례 계수  $K_c$ 는 굴착에 필요한 토크에 대한 소요 전류 증가량의 비로서 실험을 통하여 구할 수 있다.

실험에 사용된 시스템의 무부하 운전 시 작용하는 토크는 모터 기동 토크와 드릴비트까지 연결체의 베어링 등에서 발생하는 마찰 토크의 합으로 생각할 수 있다. 연결체 자중에 의한 관성력(inertial force)은 중앙 프레임의 베어링이 자중을 지탱하므로 무부하 토크에 영향을 주지 않는다(그림 1). 본 연구에서 사용된 드릴링 시스템의 굴착 주축은 구동 모터의 주축과 기어비 90:1의 감속 기어로 연결되어 있고 모터의 정격 속도는 1750 RPM이며 해당하는 굴착 주축 회전수는 19.4 RPM이다. 무부하 운전 시의 모터의 소요 전류 및 토크를 약 270초 동안 측정하였고 측정된 전류의 실효치(root mean squ-

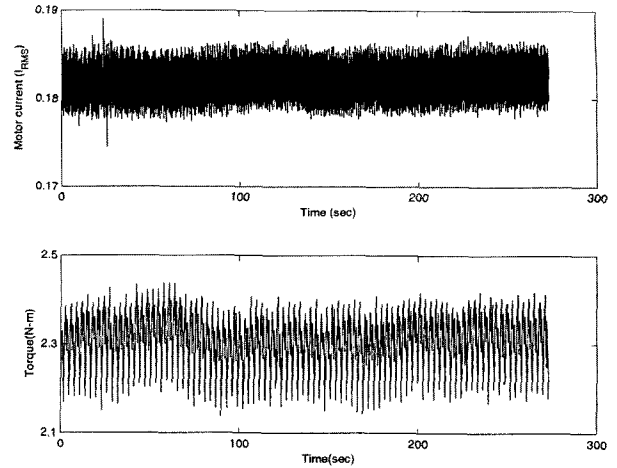


그림 3. 무부하 회전시의 모터 전류 및 회전 토크 결과

are value)를 계산하여 시간별로 그림 3에 도시하였다. 그림으로부터 무부하시의 평균 토크  $T_{tare}$ 와 평균 소요 전류  $I_{tare}$ 의 값을 식 (5)와 식 (6)과 같이 구하였다.

$$T_{tare} = 2.3054 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (5)$$

$$I_{tare} = 0.1820 \text{ A} \quad (6)$$

그림 3은 무부하 즉 굴착이 진행되지 않을 때 전류량과 토크값의 변화율로 각각 최대 4%와 7% 이내로서 크지 않은 것으로 나타났다. 식 (5)와 식 (6)과 같이 무부하 운전 전류량 및 토크를 파악하고 식 (4)의 전류와 토크와의 비례계수인  $K_c$ 를 찾아내어 지반굴착 중 구동모터의 소요 전류로부터 지반굴착 토크를 파악할 수 있다고 판단되어진다.

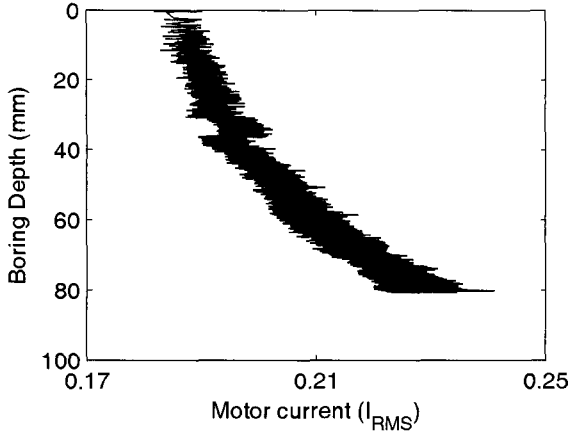
#### 4. 실내실험을 통한 모델 정수의 파악

실험은 3개의 CBR 몰드 시험체에 대하여 수행되었다. 공시체 제작에 사용된 시료는 최적다짐을 통하여 제작되었다. 절삭에 사용된 드릴 비트는 직경이 20mm로 모양이 지반굴착을 위한 오거와 비슷한 것으로 현재 국내에서 공업용으로 흔히 사용되어지고 있다(그림 4).

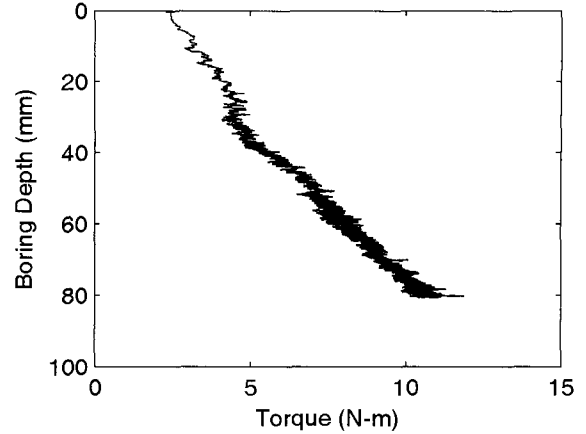
구동 모터는 국내의 일반 가정전원인 220 V<sub>RMS</sub>의 전원에 60Hz의 주파수를 사용하여 일정속도(19.4 RPM)



그림 4. 굴착 실험에 사용된 20mm 직경의 드릴 비트



(a) 굴착 깊이별 모터의 소요 전류



(b) 굴착 깊이별 드릴링 토크의 변화 결과

그림 5. 하중  $P=24\text{kgf}$  하에서의 지반굴착 실험 결과

로 드릴비트를 회전시켜 공시체의 중심부를 굴착/절삭하였다. 본 실험에서 사용된 공시체는 모두 같은 방법으로 제작되었으며, 드릴비트를 위에서 누르는 수직력 즉, 추력(thrust force)이 변수로서 사용되었다. 추력은 드릴비트의 선단과 절삭이 진행됨에 따라 비트 주변의 마찰저항으로 작용하게 되며 실험에서는 24kgf, 36kgf, 42kgf으로 변화하였다.

그림 5는 추력  $P=24\text{kgf}$ 을 재하하며 공시체를 절삭할 시 발생하는 깊이별 모터 전류의 변화와 실제 굴착 토크의 변화를 보여준다. 그림 5(a)와 (b)를 육안으로 관찰하면 상호 스케일의 차이를 볼 수는 있지만 서로 비슷한 변화 경향을 나타내고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 식 (4)의  $K_c$ 를 구하고자 그림 6과 같이 굴착 깊이별 모터 전류와 토크를 한 그래프에 나타낸 후 1차 선형분석을 통하여 상호관계에 관한 식 (7)을 구하였다. 그림 6의 전류 증가량과 토크는 각각 그림 5와 그림 6의 결과에서 무부하 상태의 값인 식 (5)와 식 (6)을 뺀 값이다.

$$T_c(\text{N-m}) = 168.51I_{\text{RMS}} + 0.74 \quad (7)$$

여기서  $T_c$ 와  $I_{\text{RMS}}$ 는 각각 순수 지반 절삭에 필요한 토크와 소요전류이며, 식 (7)의 다항식 차수에 따라 소요 전류와 굴착토크 관계의 에러를 최소화 할 수 있다. 하지만, 전기모터의 기본원리로부터 모터의 주축회전 토크는 소요전류와 선형 관계로 나타내는 것이 적절하므로 상호관계를 1차함수로 제시하였다(Chapman 2004).

선형회귀분석을 통하여 식 (7)을 얻었지만, 그림 6으로부터 소요전류가 증가함에 따라 토크와 소요 전류간의 관계가 비선형화되고 있음을 알 수 있다. 이는 모터

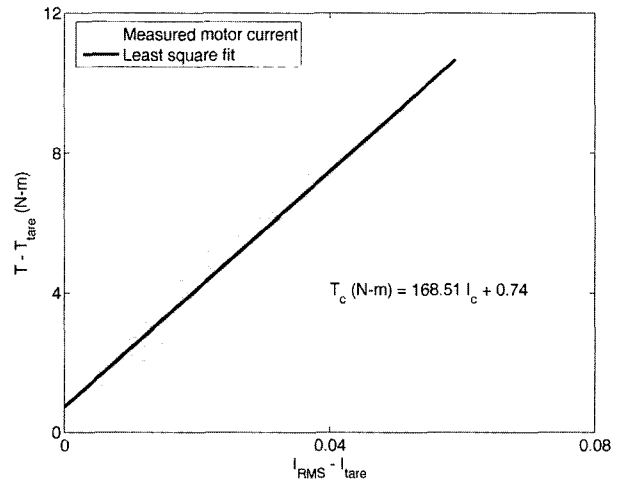


그림 6. 모터 전류와 굴착 토크의 상관관계

내부의 코일(coil)에 작용하는 저항(resistance)이 토사의 굴착저항과 함께 증가되어 나타나는 현상으로 판단되어진다(Chapman 2004). 즉, 에너지의 개념으로 살펴볼 때 모터에 인입된 전력  $P_{in}$ 은 전압과 전류의 위상차가 없다는 가정 하에 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$P_{in} = V_{\text{RMS}} \times I_{\text{RMS}} \quad (8)$$

또한, 부하가 증가되며 발생하는 전력 손실  $P_{loss}$ 와 모터의 출력  $P_{out}$ 은 각각 식 (9)와 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$P_{loss} = I_{\text{RMS}}^2 \times R \quad (9)$$

$$P_{out} = T \times S \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서,  $R$ 은 서킷(circuit)내부의 저항(resistance)을 나타내며,  $S = \frac{\text{RPM} \times 2\pi}{60\text{sec}}$ 로 회전각속도

를 나타낸다. 인입되는 전력과 토크로 발생되는 출력의 평형방정식은 식 (8)~식 (10)으로부터 아래의 식 (11)과 같이 구할 수 있다.

$$V_{RMS} \cdot I_{RMS} - I_{RMS}^2 \cdot R = T \cdot S \quad (11)$$

식 (11)로부터 전류가 증가함에 따라 전압 또는 일을 할 수 있는 에너지의 손실(loss)이 많이 발생한다는 것을 알 수 있고, 이러한 현상이 그림 6에서와 같이 전류가 증가함에 따라 비선형적인 토크와 전류의 관계를 발생 시키게 되는 원인으로 판단되어진다.

위에서 설명한 바와 같이 식 (8)은 전압과 전류의 위상차가 0°라는 가정 하에 제시되었다. 하지만, 실제 교류 전압과 전류는 부하의 정도에 따라 위상차가 약 30° - 90° 정도 발생하는 것으로 알려져 있다(Chapman 2004). 따라서 향후 연구를 통하여 교류모터에 작용하는 전압과 전류의 파동을 정확히 계측하여 위상차에 의한 발생 토크와 소요 전기에너지의 관계를 규명할 필요가 있다.

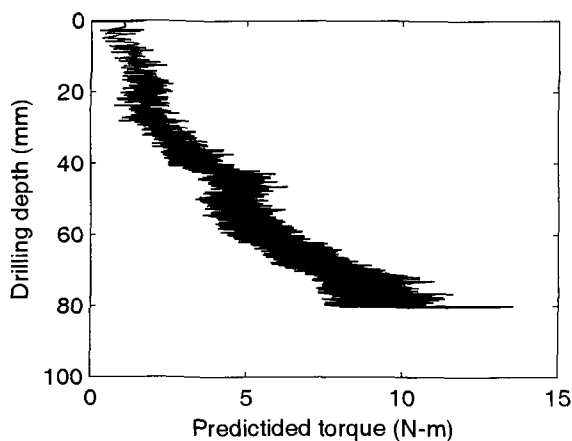
## 5. 모터 소요 전류 계측을 통한 굴착 토크 예측

식 (7)을 이용하여 추력 P를 변화하며 천공 중 발생하는 굴착토크를 굴착전류로부터 예측하였다. 예측된 결과는 실제 토크 미터를 통하여 계측된 값과 비교되었다. 굴착토크 예측을 위하여 수행한 실험에서는 표 2의 2번과 3번 공시체를 사용하였으며 각각 36kgf, 42kgf의 하중을 드릴비트에 재하하며 회전굴착을 실시하였다. 시료는 1번 공시체와 같은 조건으로 CBR 몰드에 3층 다

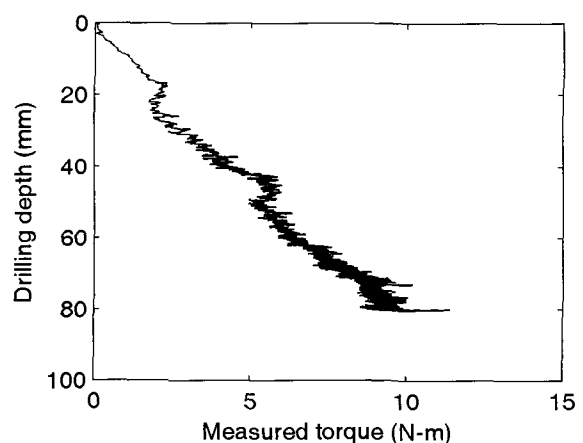
짐을 실시하여 준비되었다.

그림 7(a)와 그림 8(a)는 각각 공시체 2와 3의 굴착 깊이별 순수 절삭 토크값을 식 (7)을 사용하여 예측한 결과를 보여주고 있다. 모터 소요 전류는 실제로 계측한 값으로부터 식 (6)의  $I_{tare}$  값을 뺀 것으로 순수 굴착에 소요된 전류 증가량이다. 그림 7(b)와 그림 8(b)는 굴착 중 토크 미터를 통하여 지반의 저항도를 측정된 것으로서 본 연구에서 예측값과 비교하기 위한 참값으로 이용된다. 그림에서 보여지는 절삭 토크 값들 또한 실제로 계측한 값으로부터 식 (5)의  $T_{tare}$  값을 뺀 것으로 순수 굴착 토크 증가량이다. 그림 7과 그림 8의 상호비교로 부터 굴착에 따른 모터 소요 전류값을 활용하여 지반절삭에 필요한 토크 값을 예측할 수 있다는 것을 알 수 있다. 실제 현장에서 사용되는 굴착장비는 상대적으로 대형이고 기존 장비에 굴착토크미터를 설치하는 것은 쉽지 않다. 즉 현장굴착장비의 모터 소요 전류값으로부터 굴착토크를 예측할 수 있다면 굴착과 동시에 지반의 특성을 파악할 수 있을 것으로 판단되어진다.

모터 소요 전류를 이용한 토크의 예측 결과들(그림 7(a), 그림 8(a))은 실제 토크 계측 결과(그림 7(b), 그림 8(b))보다 상대적으로 많은 노이즈(noise)현상을 보이고 있고, 또한 진폭의 외란 값이 큰 경향을 보이고 있다. 이러한 현상은 모터를 구동시키는 교류의 진동수가 60Hz이고 전류·전압 컨버터의 실효치(root mean square value)를 통해 계측된 모터 소요 전류 또한 진동을 함으로 나타나는 현상으로 판단되어진다. 하지만 예측과 계측결과로부터 굴착 토크가 증가함에 따라 진폭의 외란 값이 증가하는 경향을 파악할 수 있으며, 이는 드릴비트

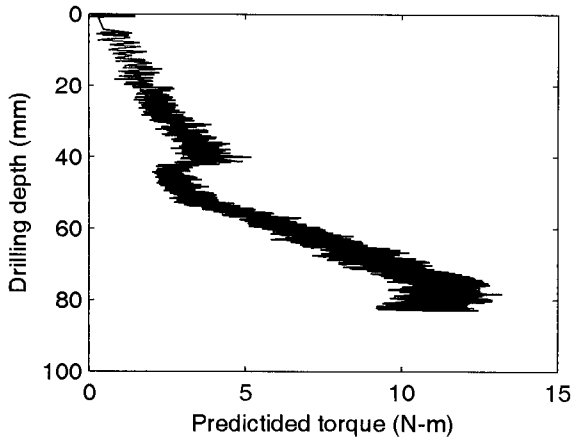


(a) 모터 전류를 이용한 굴착 깊이별 예측토크

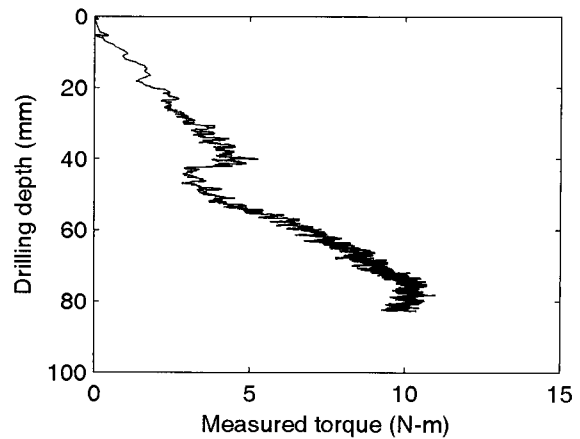


(b) 토크 미터를 통한 굴착 깊이별 계측 토크

그림 7. 2번 공시체의 전류값을 이용한 예측 토크 및 계측 토크 값의 비교



(a) 모터 전류를 이용한 굴착 깊이별 예측토크



(b) 토크 미터를 통한 굴착 깊이별 계측 토크

그림 8. 3번 공시체의 전류값을 이용한 예측 토크 및 계측 토크 값의 비교

의 관입깊이가 깊어짐에 따라 비트와 굴착지반의 마찰면, 즉 마찰 저항력이 증가하여 발생하는 현상으로 판단되어진다. 이러한 현상은 말뚝기초의 주변마찰 지지력 변화와 관련이 있을 것으로 판단되어진다.

그림 5(b), 그림 7(b), 그림 8(b)로부터 하중에 관계없이 굴착토크의 변화 및 최대값이 비슷하다는 사실을 발견할 수 있다. 이는 굴착력 즉 토크는 추력(P)에 관계없이 깊이별로 일정한 증가경향을 보이나, 굴착속도는 하중에 큰 영향을 받는 것으로 판단되어진다. 이와 더불어 그림 8(b)의 약 50mm 깊이에서 불연속적인 토크값의 변화를 볼 수 있는데, 이는 시료 제작시 층간의 연결부위로 판단되어진다.

## 6. 결론

본 연구에서는 지반 굴착 중 모터에 소요되는 모터의 전기에너지를 활용하여 실제 지반 굴착에 필요한 토크를 산출하고자 실내실험을 수행하였다. 본 논문의 결론은 다음과 같다.

- (1) 전기에너지와 지반강도의 관계 규명을 위하여 굴착 모터에 소요되는 전류값, 굴착깊이, 굴착토크를 계측할 수 있는 실내 실험장비를 개발하였다.
- (2) 굴착모터에 소요되는 전류값과 굴착토크의 상호비교로부터 선형관계식을 제안하였다.
- (3) 제안된 관계식에 의하여 예측된 토크값과 토크미터를 사용하여 직접 계측한 토크값과의 비교로부터 굴착모터에 소요되는 전류값으로부터 지반절삭에

필요한 토크값을 예측할 수 있었다.

- (4) 현장에서 사용되는 지반굴착장비는 상대적으로 대형이고 기존 장비에 굴착토크미터를 설치하는 것은 쉽지 않으므로 모터 소요 전류값으로부터 굴착토크를 예측할 수 있다면 굴착저항력을 통해 지반의 특성을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.
- (5) 본 연구결과를 활용하여 말뚝시공 시 현장에서 굴착토크를 예측할 수 있다면 선굴착 매입말뚝의 정확한 선단위치를 결정하는 시공관리 자료로서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.
- (6) 추후 지반굴착시 지반의 강도특성에 따라 변화하는 전류값에 영향을 미치는 인자들에 대한 추가의 연구가 이루어진다면, 지반굴착과 동시에 지반의 강도를 파악할 수 있는 토크값을 정확하게 산출할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 대한주택공사의 2006년도 중소기업기술개발지원사업의 지원에 의하여 수행된 연구의 일부이며, (주)아이티엠개발의 윤재근 상무님께 감사드립니다.

## 참고 문헌

1. 박종배 (2000), *비배토 현장타설 콘크리트 말뚝의 지지력 특성*, 박사학위논문, 한양대학교대학원.
2. 오영탁, 권원태, 주중남 (2001a), “드릴 공정시 절삭 토크 제어, 제1편 : 절삭 토크 제어기의 설계”, *한국정밀공학회지*, 제18권, 제8호, pp.96-106.
3. 오영탁, 김기대, 주중남 (2001b), “드릴 공정시 절삭 토크 제어, 제2

- 편 : 주축 모터 전류를 이용한 드릴링 토크의 제어와 드릴 플랭크  
 마모에 의한 영향”, *한국정밀공학회지*, 제18권, 제8호, pp.107-115.
4. 이원제 (2000), *광섬유 센서를 이용한 매입말뚝의 하중전이 측정 및 지지력 특성 연구*, 박사학위논문, 고려대학교.
  5. Axelsson, G and Westin, A. (2000), “Torque Tests on Driven Rods for Prediction of Pile Set-Up”, *New Technological and Design Developments in Deep Foundations*, Geotechnical Special Publication No. 100, ASCE.
  6. Chapman, S. J. (2004), *Electric Machinery Fundamentals*, McGraw Hill Higher Education, 4th Ed.
  7. Fang, H-Y (1991), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York.
  8. KMTL (2006), KMTL 종합 카다로그, Korea Measuring Technology Laboratory Co., LTD.
  9. NI (2007), *www.ni.com*, National Instrument web site.
  10. Perko, H. A. (2000), “Energy Method for Predicting the Installation Torque of Helical Foundations and Anchors”, *New Technological and Design Developments in Deep Foundations*, Geotechnical Special Publication No. 100, ASCE.

(접수일자 2007. 5. 11, 심사완료일 2007. 7. 18)