다짐도 측정을 위한 휴대용 콘 관입시험기에 대한 연구

A Study on Portable Cone Penetration Tester to Measure the Degree of Compaction

황성춘*

Hwang, Seong Chun

Abstract

Construction work for soil electric power distribution pipeline are mostly done at night time when road traffic is low. But current tester to measure the degree of compaction cannot operate at night time due to certain limitations. So reliability and safety for night-time construction cannot be achieved so far. I propose that development of new type tester to measure that can be used at night time be initiated. This study was developed portable cone penetration tester to measure the degree of compaction for soil electric power distribution pipeline back filling material. To evaluate developed tester, the compaction tests were performed range of water contents is 2~13% and degree of compaction is 75~95% using the domestic river sands. At the range 3~13% of water content, The correlation coefficient of degree of compaction between cone penetration tests and compaction tests was 0.97. As results of tests, It is considered to able to measure the degree of compaction exactly and reliably using developed cone penetration tester

Key words : Degree of Compaction, Back Filing Material, Soil Electric Power Distribution Pipeline, Cone Penetration tester

요 지

일반적으로 지중배전관로 공사는 차량소통이 적은 심야에 대부분이 이루어진다. 기존의 다짐도 측정장비의 특성상 정확한 다짐도를 야간에서 구하는 것은 거의 불가능하여 시공 현장의 신뢰성 및 안전성 확보에 문제점으로 지적되어 왔다. 따라서 야간에서도 간이적으로 다짐도를 편리하게 측정할 수 있는 측정장비의 개발이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 지중배전관로 되메움재의 다짐도 측정을 위한 휴대용 콘 관입식 다짐도 측정기를 개발하였다. 개발된 시험기를 평가하기 위해서 국내 5개 지역에 분포한 강모래를 이용하여 함수비 2~13%, 다짐도 75~95% 범위에서 시험을 수행하였다. 함수비가 3~13%에서의 다짐도에 대한 콘 관입시험과 다짐시험의 상관관계수가 0.97로 나타났다. 시험 결과 콘 관입시험기를 이용하여 현장에서 신속하고 정확한 다짐도 측정이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 다짐도, 되메움재, 지중배전관로, 콘 관입시험기

1. 서 론

지중 배전 공사의 규모가 나날이 커짐에 따라 그에 따른 품질관리의 중요성이 증가되고 있으며, 되메움재에 대한 다짐도 판정의 신뢰성과 일관성이 확보된 측정장비가 필요하게 되었다.(이대수, 2002) 특히, 지중배전공사의 중요한 품질관리 항목인 배전관로 되메움재의 다짐도 판정이 공사의 특성 때문에 체계적으로 이루어지지 않아 매설관이 파손되는 경우가 빈번하고, 그 결과, 되메움재의 다짐도 판정 불량은 유지보수 비용의 증대뿐만 아니라 계통의 신뢰도에도 큰 영향을 미치고 있다.(이시용, 1993)

또한, 현장에서 손쉬운 다짐도 판정방법이 전무하다 보니 지중배전공사 완료 후에 도로와 배전관로 내부로 우수가 스

며들어 정전사고의 원인이 되기도 한다. 더욱이, 관로 파손으로 인해 스며든 우수가 맨홀내부로 침투하여 분기별 맨홀청소비용 또한 증가하고 있는 상황이다.

그러나, 지중배전관로 공사는 차량소통이 적은 심야에 단시간에 걸쳐 공사를 마무리해야 하는 최악의 조건에서도 되메움재의 품질관리를 적절하게 수행해야 하기 때문에 현장 감독자들이 적정 품질관리에 많은 어려움을 겪고 있다.(조성수, 1999) 더욱이, 기존의 다짐도 측정 장비는 측정시간이 오래 걸리고 조작이 불편하며 장비가격이 비싸다는 단점을 가지고 있어 지중배전관로 되메움재의 다짐도 품질관리에는 적합하지 않기 때문에 현장 감독자들은 적합한 다짐도 측정 장비를 요구하고 있는 것이 현 실정이다.

따라서, 본 연구는 지중배전관로 시공시에 되메움재로 사용

*정회원 · 경주대학교 철도건설환경공학부 부교수 (E-mail : yeons@gju.ac.kr, 교신저자)

되는 강모래의 다짐도 측정시 사용법이 간단하고, 단기간에 측정이 가능하며, 휴대가 용이하면서 비교적 정확한 다짐도 측정이 가능한 콘 관입시험기를 개발하는데 목적이 있다.

2. 기존의 다짐도 측정 방법

단위중량은 흙이 교란되지 않고 본래의 구조골격을 유지하고 있는 상태로 현장에서 측정해야 신뢰성 있는 값을 얻을 수 있다. 그러나 현장에서 소규모 시험공을 굴착하고 부피를 측정하기가 쉽지 않으므로 현장에서 이용 가능한 기구에 따라 여러 가지 방법이 파생되고 있고, 대체로 다음과 같은 방법들이 자주 이용되고 있다(Bowles, 1981).

2.1 모래 치환법

그림 1과 같이 모래 치환법은 현장에서 간편하게 단위중량을 결정할 수 있는 방법으로 도로성토, 구조물 등의 뒤채움을 시공할 때에 다짐흙의 품질관리에 널리 사용된다. 이 방법은 일반적으로 불포화 지반에 적용되며 연약한 지반이나 굴착시 물이 스며 나올 수 있는 곳에서는 시험의 결과에 영향을 미치므로 주의를 요한다. 모래치환법의 장비와 시험방법은 KS F2311에 규정되어 있다(김상규, 2004).

2.2 고무막법

고무막법은 그림 2와 같이 시험공을 굴착하고 시료의 무게와 함수비를 측정하고 끝에 고무막이 붙어있고 부피가 약 10리터인 실린더의 한 면을 지표에 대고 피스톤을 누르면 고무막이 굴착면에 밀착하여 굴착부 부피만큼 실린더내의 액체(보통 물)가 흘러나간다. 따라서 피스톤의 이동거리에 단면적을 곱하면 굴착부의 부피가 구해진다. 작업속도가 빠르고 결과의 신뢰성이 높은 방법이다.

고무막은 약 0.25 mm 이상 두꺼워야 하고 판판한 상태로 접착되어 있어야 한다. 시험공을 굴착하였을 때에 굴착벽이 허물어지지 않으면 사질토나 점성토에 모두 적합하다. 특히 자갈이나 돌맹이 등 굵은 입자가 섞인 세립지반에서 좋은 결

그림 2. 고무막 들밀도 시험기

과를 나타낸다. 모서리가 날카로운 입자가 있는 지반에서는 고무막이 찢어질 수 있다.

2.3 석고 치환법

본 시험법은 현장에 굴착한 시험공을 반죽상태의 석고로 채워서 굳힌 후에 석고덩이의 부피를 액침법으로 측정하는 방법이다. 다소 번거로움이 있으나 현장 여건에 따라 실시할 수 있다.

2.4 액체 치환법

현장에 굴착한 시험공에 부드러운 고무막이나 비닐 등을 놓고 물 등의 액체로 채워서 시험공의 부피를 측정하는 방법이다. 고무막이나 비닐은 굴착면에 완전히 밀착될 수 있는 것이어야 한다. 미세한 공간이 남아 있을 가능성이 있어서 신뢰성이 다소 떨어지긴 하나 특별한 도구 없이도 손쉽게 단위중량을 구할 수 있는 장점이 있다.

2.5 RI 시험법

2.5.1 밀도 측정의 원리

감마선은 물질을 통과할 때 원자의 궤도전자와의 사이에 여러종류의 상호작용을 일으키며 흙의 밀도측정시는 여러 상호작용 중에 주로 콤프턴효과를 이용하고 있다. 그림 3과 그림 4의 밀도측정원리의 모식도에서처럼 콤프턴효과란 감마선이 에너지의 일부를 궤도전자에 주고 스스로는 작은 에너지를 가져 진행방향을 변화시키는 현상을 말한다. 물질의 궤도전자의 수가 많을수록 콤프턴효과는 일어나기 쉬워진다. 흙을 구성하는 원자의 궤도전자의 총수는 양자와 동일한 수 이므로 흙의 질량과 거의 비례한다. 따라서 콤프턴효과가 일어나기 쉽다는 것은 흙의 질량에 비례한다고 볼 수 있다.

흙속에 방출된 감마선은 흙의 습윤밀도가 높을수록 콤프턴 효과에 의한 산란의 반복에 의해 에너지가 감소하고 최종적으로 전이에너지를 전자에 주고 소멸되어 일부는 지표로 방출을 한다. 따라서 그림 5처럼 습윤밀도가 높을수록 RI계기가 측정하는 감마선의 수는 적어진다. RI계기는 이 성질을 이용

그림 1. 모래 치환법 들밀도 시험기

그림 3. 투과형 밀도계에 의한 밀도 측정원리의 모식도

그림 4. 산란형 밀도계에 의한 밀도 측정원리의 모식도

그림 5. 습윤밀도와 감마선 계수율비의 관계 개념도

하여 흙의 습윤밀도를 측정하는 것이다(Das, 2002).

투과형 밀도계와 산란형밀도계는 콤프턴효과를 이용하는 기본원리는 같다. 선원과 검출기의 배치에 따라 투과형은 선원으로부터 직접투과해온 감마선과 산란한 감마선을 감지하는 구조이고, 산란형은 산란선만을 감지하는 구조로 되어 있다.

2.5.2 함수량 측정의 원리

흙의 함수량측정에는 중성자선원으로부터 방출되는 중성자와 물질을 구성하는 원자의 원자핵과의 상호작용을 이용하고 있다. 그림 6과 그림 7은 함수량 측정원리의 모식도를 나타낸다. 선원으로부터 방출되는 고속의 중성자(速중성자)는 질량이 같은 정도의 수소원자핵과 충돌하면 마치 옥돌처럼 다른 원자핵의 충돌보다 크게 에너지를 잃는다. 수소 원자(H)가 많이 존재하는 만큼 충돌의 반복에 의해 급격하게 에너지

그림 6. 투과형 수분계에 의한 함수량 측정원리의 모식도

그림 7. 산란형 수분계에 의한 함수량 측정원리의 모식도

그림 8. 함수량과 중성자 계수율비의 관계 개념도

를 잃어, 마침내 열중성자로 불리는 에너지의 낮은 중성자가 된다. 따라서, 땅 속의 수소 원자의 대부분이 물(H_2O)을 구성하는 원소로서 존재하고 있으므로, 열중성자가 생기는 비율을 보는 것에 의해 함수량을 측정할 수가 있다.

투과형 수분계는 열중성자까지는 안 되고 에너지가 높은 채 지중을 투과 해 온 고속의 중성자를 검출하는 구조로 되어 있으며, 그림 8과 같이 땅 속의 함수량의 증가에 수반해 측정되는 중성자수는 적게 된다. 한편, 산란형 수분계는 땅 속에서 감속·산란되어 지표면으로 방출된 열중성자를 검출하는 것으로부터, 땅 속의 함수량의 증가에 수반해 측정되는 중성자수는 많아진다.

3. 콘 관입식 다짐도 측정기의 개발

3.1 이론 배경

콘 관입시험은 로드와 콘 저항체를 부착하여 지반에 삽입한 상태에서 관입이나 인발 또는 회전시키면서 그 저항을 측정하여 지층의 분포나 지지력, 상대 다짐도 등을 조사하는 사운드(Sounding)시험으로 지반조사의 초기에 지반의 개황을 파악하기에 적합한 시험이다. 이러한 사운드는 현장의 원 위치에 있는 지반에서 직접 측정하기 때문에 원위치 시험으로서의 신뢰성이 높다(Robertson et al., 1986).

측정심도가 한정되지만, 보링을 하지 않으므로 간단하고 비용이 적고, 깊이 방향으로 연속적인 지층의 강성도, 성토의 다짐상태, 지층의 배열, 지반개량 효과, 압밀에 의한 강도증가 등을 판정할 때에 적용할 수 있다. 또한, 지표부근에서 실시하여 교통량하중의 영향에 의한 주행성을 판정할 수 있다.

콘 관입시험의 결과는 콘의 치수와 표면상태 및 각도에 대해서 민감하므로 시험 전에 반드시 콘의 상태 및 콘의 선단 각과 표면상태를 확인해야 한다. 콘 관입시험은 크게 정적 콘관입시험과 동적 콘 관입시험이 있다(Seed et al., 1986).

정적 콘관입시험은 연약한 점토지반에 적합하며 원형콘을 일정한 속도로 지반에 압입하면서 관입저항을 구하여 지반의 성상을 구하는 시험이다. 동적 콘 관입시험은 모래나 굳은 점토지반에 적합하며 일정한 중량의 해머를 자유 낙하시켜서 콘을 일정한 깊이까지 관입시키는데 필요한 타격수로부터 관입저항을 구하는 실험이다.

본 시험에서는 모래 지반에 더 적합한 동적 콘 관입시험의 형태로 기계를 제작하였으며, 중량을 가진 해머로 관입시키는 방법은 운용성이 떨어지기 때문에 용수철을 이용하여 콘저항체를 지반에 관입시키는 방법을 적용하였다. 다짐이 잘 된 지반은 관입량이 적고, 다짐이 덜 된 지반은 관입량이 클 것이라는 가정하에 시험을 실시하였으며, 관입량과 지반의 상대 다짐도를 식(1)을 이용하여 상관관계를 분석하였다.

콘 관입시험다짐도(%)

$$= \frac{\text{콘 관입량에 대응하는 건조단위중량}}{\text{실내시험의 최대 건조단위중량}} \quad (1)$$

$$= \frac{\gamma_d(\text{con})}{\gamma_{dmax}} \times 100$$

3.2 시험 방법

3.2.1 기기 설계 및 제원

콘 관입식 다짐도 측정을 위해서 아래의 그림 9와 같이 콘 관입시험기를 제작하였다. 기기는 본체, 손잡이, 변위계, 스프링, 가이드, 로드, 발판, 이중 경사식 콘, 볼 베어링으로 구성되었으며 측정 가능 다짐도 범위는 76%~97%로 다짐기준에 대한 가부가 가능하며 함수비는 자연 상태의 강 모래가 갖는 함수비 3%~13%범위내에서 함수비 측정없이 바로 다짐이 가능하도록 설계되었으며 또한, 최소 97%이상의 기기의 정확도를 가지도록 만들어 졌다. 그리고 측정 현장특성을 반

표 1.콘 관입식 다짐기의 제원

구분	제원
무게	6.3 kgf
폭 × 높이	120 × 564 mm
변위계	Tokyo Sokki사의 DP-500C 모델 (최대변위 50 cm)
손잡이	길이 7 cm, 기계의 운반및 관입시 사용
스프링	내경 74 mm × 길이 210 mm, 110 mm 압축시 17 kgf
가이드	본체의 흔들림 방지, 콘의 수직관입을 유도함.
로드	길이 10 cm, 콘의 관입을 지지
발판	기기의 흔들림 방지 및 지반밀착 유도
콘	이중 경사식 콘

그림 9. 콘 관입식 다짐기

영하여 약 1분 내에 측정결과가 열람 가능하도록 하였으며 무게 6.3 kg, 길이 60 cm로 제조하여 휴대성을 최대한 확보함과 동시에 콘의 최대 관입깊이를 10 cm 이내로 하여 사용자의 안전성을 확보했다. 본 기기의 측정제원은 표 1과 같다.

3.2.2 시험 재료 및 모형 토조

최적의 콘 관입 시험기를 개발하기 위해서 지중배전공사시 일반적으로 되메움재로 사용되는 강모래를 이용하였으며 채취 위치와 각각의 물성값은 표 2와 같으며 그림 10은 입도 분포곡선이다.

시험에 사용된 모형 토조는 지름 40 cm, 높이 20 cm의 원통형 토조를 제작하였으며, 다짐 램머는 무게 5 kgf, 다짐 직경 15 cm, 낙하고 40 cm로 제작하여 시험에 이용하였다.

3.2.3 시험 방법

그림 11과 같은 기구로 콘 관입시험기의 다짐도 적절성을 평가하기 위해서 아래의 시험방법을 이용하여 시험을 실시하였다. 시험 방법은 다음과 같다.

- (1) 각 지역에서 채취한 강모래를 건조로에 24시간 건조 후에 공기중에서 식히고, 실험에 적용할 각각의 함수비 (2~13%)로 맞추기 위해 모래에 물을 섞어 배합한다.
- (2) 그림 12와 같이 모형 토조에 모래를 넣고 3층으로 나누어 4 kgf 램머로 층마다 골고루 다짐에너지가 가해지도록 다짐을 실시한다. 낙하횟수 및 낙하고는 다짐도 75~95%에 따라 다르게 실시한다.
- (3) 그림 13에서 나타난 것과 같이 다짐이 끝나면 토조에 담긴 모래를 저울에 올려 무게를 측정한다.

표 2. 시험에 사용된 5개 지역 및 강모래의 물성값

구분	경남합천군 황강 모래	충북충주시 남한강 모래	충남금산시 금강 모래	전북남원시 섬진강 모래	강원도 원주시섬강 모래
Cu	2.39	5.15	2.88	6.4	5.28
Cg	0.97	1.75	1.18	1.17	1.18
Gs	2.64	2.64	2.67	2.64	2.63
	1.7	1.76	1.78	1.83	1.86
O.M.C	11.3	12.9	11.3	13.8	11.6
USCS	SP	SP	SP	SW	SP

그림 10. 입도분포곡선

그림 11. 토조와 램머

- (3) 토조안에 다짐된 모래의 무게를 저울을 이용해 측정한 후, 토조의 부피로 나누어 습윤단위중량(γ_t)을 구하고, 함수비를 캔 채취법을 이용하여 측정후 다음 식(2)를 이용하여 건조단위중량(γ_d)을 구한다.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_t}{1+w} \quad (2)$$

토조 안에 셋팅된 모래의 상대 다짐도는 식(3)에 의해 구할 수 있는데, 모래의 최대 건조단위중량($\gamma_{d(max)}$)은 표준 다짐 시험 방법(KS F2312 D다짐)에서 구한값을 입력하고 모형토조 건조단위중량(γ_d)은 식(2)에서 구한 값을 대입하여 구한다.

상대다짐도(%)

$$\begin{aligned} &= \frac{\text{모형토조 건조단위중량}}{\text{살내시험의 최대 건조단위중량}} \\ &= \frac{\gamma_{d(con)}}{\gamma_{dmax}} \times 100 \end{aligned} \quad (3)$$

다짐도 측정을 위한 휴대용 콘 관입시험기에 대한 연구

그림 12. 강모래 다짐

그림 13. 무게 측정

- (4) 콘 관입식 측정기와 데이터 로거를 연결하여 변위에 대한 0점을 잡는다.
(5) 그림 14와 그림 15와 같이 토조내 다짐된 모래시료에 그림과 같이 콘 관입식 측정기를 1회 관입시켜 관입량을 데이터로거를 이용해 읽는다.
(6) 콘 관입시험시 사용된 토조의 건조단위중량과 표준 다짐시험에 의해서 구한 최대건조단위중량을 이용하여 식 (1)에 대입하여 콘 관입시험 상대 다짐도를 계산하고,

그림 14. 관입전의 모습

그림 15. 관입후의 모습

관입깊이에 대한 다짐도와의 상관관계를 해석 한다.(황성춘 등, 2005)

4. 시험 결과

4.1 경남 합천군 황강모래

그림 16과 그림 17은 함수비를 3~13% 변화시켜서 시험한 결과로 관입깊이에 대한 다짐도와 관입깊이에 대한 건조밀도에 대한 상관관계수가 97%이상의 비교적 정확한 다짐도 측정할 수 있는 것으로 분석되었다.

그림 16. 관입깊이에 대한 다짐도

그림 17. 관입깊이에 대한 건조밀도

4.2 충북 충주시 남한강모래

함수비를 3~13%까지 변화시켜서 관입깊이에 대한 다짐도 값을 실험한 결과 관입깊이에 대한 다짐도 및 건조밀도의 상관관계수가 그림 18과 같이 낮고, 분산이 크게 나타났다. 그러나 그림 19와 같이 함수비의 범위를 2~3%와 3~12%값을 분리하였을 경우 함수비 2~3%에서는 상관관계수가 89%, 함수비 3~12%에서는 96%로 비교적 정확도 높은 값을 측정할 수 있는 것으로 나타났다(그림 20, 그림 21).

4.3 충남 금산시 금강모래

그림 22와 그림 23에서 함수비를 6~9%, 다짐도를 75%~95%범위에서의 상관관계수가 98%이상으로 정확한 다짐도를 측

그림 18. 관입깊이에 대한 다짐도

그림 19.관입깊이에 대한 다짐도

그림 20. 관입깊이에 대한 다짐도

그림 21. 관입깊이에 대한 건조밀도

그림 24. 관입깊이에 대한 다짐도

그림 22. 관입깊이에 대한 다짐도

그림 25. 관입깊이에 대한 다짐도

그림 23. 관입깊이에 대한 건조밀도

그림 26. 관입깊이에 대한 다짐도

정할 수 있는 것으로 분석되었다.

4.4 전북 남원시 섬진강모래

함수비를 2~10%까지 변화할 때 그림 24와 같이 상관계수가 비교적 낮고, 분산이 크게 나타나는 것으로 분석되었다. 그러나 그림 25와 같이 함수비를 2~3%미만의 값과 그림 26에서 3~10%값으로 분리하였을 경우 2~3%에서는 상관계수가 92%, 그림 27과 같이 3~10%에서는 상관계수가 98%로 비교적 정확한 다짐도를 측정할 수 있는 것으로 나타났다.

4.5 강원도 원주시 섬강모래

그림 28과 그림 29에서 나타낸 것과 같이 함수비를 6~11%까지 변화시켜서 관입깊이에 대한 다짐도를 실험한 결

그림 27. 관입깊이에 대한 건조밀도

다짐도 측정을 위한 휴대용 콘 관입시험기에 대한 연구

그림 28. 관입깊이에 대한 다짐도

그림 29. 관입깊이에 대한 건조밀도

그림 30. 관입깊이에 대한 건조 밀도

과 상관계수가 95%로 비교적 높은 다짐도를 측정할 수 있는 것으로 나타났다.

4.6 최종결과

그림 30과 그림 31은 4.1~4.5절의 각 강모래에서 관입깊이에 대한 건조밀도의 상관관계 결과이며, 최대건조밀도가 높은 순으로 추세선에 의한 공식의 y절편 값이 작아지는 경향이 있고, 기울기는 모든 강모래에서 비슷한 값을 보인다.

그림 31은 황강, 남한강, 금강, 섬진강, 섬강의 각 강모래에서 관입깊이에 대한 다짐도의 상관관계 그래프이며 건조밀도에 대해 해석한 것과는 다르게 일정한 회귀선으로 수렴하는 것으로 나타났다.

그림 31. 관입깊이에 대한 다짐도

함수비 3~13%의 범위에 대한 전체 데이터에 대해 회귀분석한 결과, 상관계수가 약 97%로 높은 결과를 나타냈다.

5. 결 론

지중배전관로의 공사시 되메움재로 사용되는 강모래의 다짐도를 측정하기 위하여 휴대용 콘 관입시험기를 개발하였으며, 콘 관입시험기의 적정성을 평가하기 위하여 국내 5개 지역의 강모래를 채취하여 시험을 실시한 결과 다음과 같다.

1) 콘 관입시험기의 적용성을 평가하기 위하여 강원도 원주시 섬강, 전북 남원시 섬진강, 충남 금산시 금강, 충북 충주시 남한강, 경남 합천군 황강에서 강모래를 채취하였으며, 함수비 2~13%, 다짐도 75~95%로 모형시험체를 제작하여 다짐도를 평가하였다.

2) 경남 합천군 황강, 충남 금산시 금강, 강원도 원주시 섬강에서 채취한 모래를 이용한 시험의 경우 관입깊이에 대한 다짐도 및 건조밀도 상관계수가 95~98%의 비교적 정확한 다짐도가 측정되었다.

3) 충북 충주시 남한강과 전북 남원시 섬진강에서 채취한 강모래를 이용한 시험의 경우 함수비 2~3% 범위의 다짐도 및 건조밀도에 대한 상관계수는 낮게 나타났으나, 함수비 범위를 3~13%로 조정하였을 때는 상관계수가 96~98%의 비교적 정확한 다짐도가 측정되었다.

4) 5개 지역에서 채취한 강모래를 함수비 3~13%에서 다짐도 시험을 평가한 결과 상관계수가 97%정도로 높게 평가되었다. 이것으로부터 지중배전관로의 되메움재 다짐도 측정시 함수비 3~13%에서는 강모래의 종류에 관계없이 콘 관입시험기를 이용하여 기존의 방법보다 신속하고 정확한 다짐도 측정이 가능하다고 판단된다.

감사의 글

콘 관입시험기 개발연구에 재정적, 기술적 도움을 주신 한국 전력 연구원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

이대수 (2002) 지중배전공사의 경제적 시공을 위한 신기술 개발,

한국방재학회논문집, 제11권 5호 2011년 10월

전력 연구원 연구보고서.

이시용 (1993) 관로 포설공법의 개선연구, 한국 통신 가입자망 연구소 연구보고서.

조성수(1999) 지중배전 설계편람, 한국전력공사 전력연구원 자료.

김상규(2004) 토질역학 -이론과 응용-, 청문각, pp. 207-227.

황성춘 (2005) 국내 강모래의 다짐특성 분석, 한국도로학회 논문집, 제7권, 제4호, pp. 31-39.

Bowles, J. E.,(1981) *Engineering Properties of Soils and Their Measurements*, McGraw-Hill, pp. 89-96.

Das, B.M. (2002) *Principles of Geotechnical Engineering*, Brooks/cole, pp. 120-125.

Robertson, P.K., Campanella, R.G., Gillespie, D., Rice, A. (1986) *Seismic CPT to Measure in Situ Shear Wave Velocity*, Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 112, No. 8, pp. 791-803.

Seed, H.B., De Alba, P. (1986) *Use of SPT and CPT Tests for Evaluating the Liquefaction Resistance of Sands*, Proc. In Situ '86, ASCE, pp. 281-302.

◎ 논문접수일 : 11년 08월 25일

◎ 심사의뢰일 : 11년 08월 29일

◎ 심사완료일 : 11년 09월 06일