

Pagani Cone Test을 이용한 철도노반 조사 기법 연구

A study on the ground investigation technique of railway using Pagani cone test

강성욱*, 조국환†

Sung-Wook Kang*, Kook-Hwan Cho†

Abstract Standard Penetration Test (SPT) and Cone Penetration Test are widely used in geotechnical investigation methods for railway roadbed. However, the standard penetration test cannot be used on the track in electric lines, since the equipment may contact to the electric lines. On the other hand, in order to avoid electric hazard, portable equipment, drop cone penetrometer (DCP), can be used. A normal portable DCP has usually not enough hitting energy and the rigidity of cone-rod, so it is impossible to required penetration depth. In this study, Pagani cone test which is one of portable drop cone penetrometer is compared with SPT data. As a result of this study, the correlation between Pagani cone test and SPT is proposed.

Keywords : Ground investigation, Pagani cone test, DCPT, SPT

초 록 철도노반에 대한 지반조사방법은 표준관입시험(SPT), Cone 관입시험 등이 널리 이용되고 있다. 그러나 표준관입시험은 시험장비가 크기 때문에 운행선 주변의 전철주 등에 접촉 위험이 있어 적용에 어려움이 있다. 반면에 휴대용 장비인 DCP(Drop Cone Penetrometer)의 경우 타격에너지가 부족하고 관입되는 Cone-rod의 강성이 부족하므로 필요 깊이까지 관입이 불가능하게 되는 등 사용에 제한을 받고 있다. 이에 본 연구에서는 휴대용 장비이면서 타격에너지와 강성이 큰 Pagani Cone Test를 표준관입시험과 동일한 지반에서 실시하여 N 값을 비교·분석하였다. 그 결과 Pagani Cone Test의 N 값과 표준관입시험의 N 값과의 상관관계를 제안하였다.

주요어 : 지반조사, 파가니콘, 동적콘관입시험, 표준관입시험

1. 서 론

최근 국내에서는 철도 경쟁력 확보를 위하여 기존 자갈도상 궤도 구간에 대해 열차의 고속화를 추진 중이다. 하지만 열차가 운행되고 있는 기존선에 자갈의 노후화, 시공불량 등 노반 및 원지반의 침하가 발생하고 있다. 철도분야에서 지반조사는 일반적으로 성토가 이루어지기 전 원지반을 대상으로 이루어지며, 성토시 평판재하시험 및 반복평판재하시험을 통한 다짐기준에 의해 시공되고 있다. 그럼에도 불구하고 일부 기존선에서는 여러 가지 요인으로 인하여 지속적인 침하가 발생하고 있으며, 이에 대해 정확한 지반조사 없이 침하의

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과

† 서울과학기술대학교 철도전문대학원 교수(khcho@seoultech.ac.kr)

원인을 추측하여 보강 및 복원 공사가 이루어지고 있는 실정이다. 그러므로 궤도 하부구조물의 유지보수비용을 최소화하기 위하여 도상 및 노반의 정확한 상태를 평가한 후 보강 및 복원공사가 실시되는 것이 필수적이다.

현재 도상과 노반에 관련된 많은 문제점이 발생하고 있으나, 이를 평가할 수 있는 신뢰할 만한 체계는 구축되어있지 않은 실정이다. 이러한 문제를 해결하고자 최근 다양한 지반조사 방법을 적용한 연구가 진행되어 왔다. Park et al.(2009c)과 Kim et al.(2004)은 GPR(Ground penetrating radar)을 적용하여 철도지반을 검사하고자 하였으며, 이후 Kim et al.(2005)과 Kim et al.(2008)은 PBS(Portable ballast sampler), LFWD(Light falling weight deflectometer), PBT(Plate bearing test)를 추가 적용하여 궤도하부의 상태를 평가하고자 하였다. GPR은 적은 비용으로 넓은 지역에 대한 탐사가 가능한 반면, 층 두께, 함수비, 세립분 함량만을 측정하므로 직접적인 궤도하부 구조물의 강도 및 강성 평가에 어려움이 있다. LFWD와 PBT는 직접적으로 강성과 처짐량을 평가할 수 있는 방법이나, 평가범위가 제한적이기 때문에 노반을 평가하고자 할 경우 침목과 도상자갈층을 제거해야 하므로 적용성에 한계가 있다. 또한 탄성파를 발생시켜 노반을 평가하는 표면파(Surface-wave) 기법과 품질관리에 대한 연구도 진행되고 있으나, 아직 실용화 단계에는 이르지 못하였다. 이와 같은 이유로 비파괴 시험방법들은 신뢰성이 떨어지며 노반상태를 평가하는데 참고자료로 사용하고 있으며, 심도에 따라 직접적으로 철도궤도 하부구조물을 평가할 수 있는 원위치 관입 시험에 대한 연구가 필요하다. 원위치 관입시험에는 SPT(Standard penetration test), CPT(Cone penetration test), DMT(Flat plate dilatometer test), PMT(Pressuremeter test) 그리고 VST(Vane shear test) 등이 있다. SPT의 경우 가장 일반적인 지반조사 방법이지만 Fig.1과 같이 운행선 상 장비의 크기 및 전철주와의 접촉위험성 등의 이유로 적용하기가 까다로운 단점이 있다.

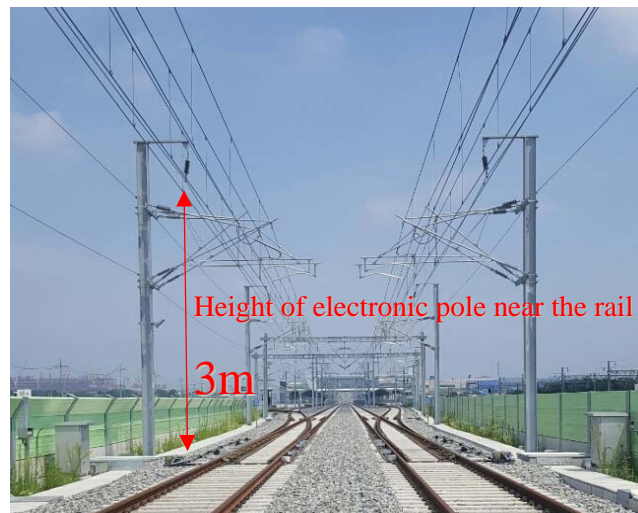


Fig. 1 Height of electric pole near the rail

따라서 원위치 관입시험법 중 별도의 시추공을 필요치 않으며, 연속적으로 신뢰할 만한 데이터를 획득할 수 있는 CPT의 비중이 증가하고 있다. 특히 CPT에 사용되는 관입 장비를 철도현장에 적용하기에는 공간적 제약이 있으며, 국내에서 적합한 장비확보에 어려움이 있다. 이에 Lee et al.(2008)은 교란을 최소화하기 위하여 표준 콘(직경 35.7mm)보다 작은 다양한 직경을 갖는 콘의 개발 및 검증에 대한 연구가 수행된 바 있다. 특히 Byun et al.(2013)은 스크류롯드에 체결된 소형 콘 관입기를 개발하여 철도지반에 적용하고자 하였다. 그러나 도상자갈층의 상태에 따라 스크류롯드의 회전 관입에 어려움이 있으며, 도상자갈층에 대한 상태평가를 수행할 수 없다는 한계가 있다. 하지만 일반적으로 이용되는 콘관입시험기의 해머는 관입에너지가 너무 적어 자갈 및 강화노반을 통과하여 원지반을 조사하는데는 한계를 가지고 있다. 또한 장비의 크기, Cone-rod의 강성부족 등의 이유로 기존선에 적용이 불가능하다. 본 연구에서는 휴대가 가능한 콘관입시험기인 DCP에 비하여 비교적 타격에너지가 큰 Pagani cone의 제원과 계측자료 분석방안을 제시하였으며, 기존의 지반조사 방법, 특히 표준관입시험과 비교·분석하여 철도노반의 적용성을 검증하고 새로운 노반상태 평가기법과 관계식을 제시하고자 한다.

2. 기존 철도노반에서의 지반조사

2.1 기존 철도노반에서의 지반조사 방법

표준관입시험(SPT : Standard Penetration Test)은 Fig. 2(a)와 같이 원위치에서의 지반 조사의 보편적인 방법으로 로드 끝에 외경 5.1cm, 내경 3.5cm, 길이 81cm의 스플릿 스폰 샘플러를 부착한 후 소정의 깊이까지 굴착하고 외경 5.1cm, 내경 3.5cm, 길이 81cm의 분리형 원통샘플러(split spoon sampler)를 시추공 바닥까지 밀어 넣는다. 그 후 샘플러에 연결된 굴착로드(rod)의 상단을 63.5kg의 해머로 76cm의 높이에서 낙하 타격하여 샘플러를 45cm 관입시키고, 마지막 30cm 관입에 필요한 타격횟수를 그 깊이에서의 표준관입시험치(N값)라고 한다. 표준관입시험의 성과를 신뢰할 수 있는 최대깊이는 30cm 정도이고, 표준관입시험을 1회 시행하는데 필요한 최소깊이는 50cm 정도이나 실제로는 1m 간격으로 실시하는 것이 표준이다.

사질토의 경우에는 N값에서 전단 강도나 모래의 압축성 등을 판정할 수 있으며, 지반 지지력의 추정에 쓰인다. 점성토의 경우에도 가늠을 할 수 있으나 토질 자료의 채취를 목적으로 한다. N값을 통해 해당 지반에 대한 기초 구조나 적용공법의 판단을 위한 기초자료를 얻을 수 있다. 철도에서는 설계 시 지반조사 방안으로 주로 쓰이며, 기존선에 지반조사를 하는 경우에는 열차 및 전차선 차단을 한 후 지반조사를 실시하여 열차운행에 장애가 되며, 및 전철주와의 접촉 위험성을 향시 내포하고 있는 단점이 있다. 반면 동적콘관입시험(DCPT : Dynamic Cone Penetration Test)은 Fig. 2(b)와 같이 타격횟수를 기록하는 기록원 및 시험원 2명 등 총 3명이 필요하며 10kg 중량의 해머를 50cm 높이에서 하강시켜 Rod를 10cm 하강시키는데 필요한 타격치를 기록하는 방식으로 시험을 수행한다. 하지만 철도노반에 적용 시키기 위해서는 타격에너지 너무 작아 자갈도상을 통과 할 수가 없으며, 보링기계

를 이용하여 천공을 할 경우 많은 비용이 소요되며, 전철주와의 접촉 위험성을 표준관입시험과 같이 내포하고 있는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 휴대가 가능한 콘관입시험기인 DCP에 비하여 비교적 타격에너지가 커 자갈도상과 강화노반을 지나 원지반까지 조사할 수 있는 장비인 Pagani cone test기를 표준관입시험과 동일한 위치에서 시험하였다.

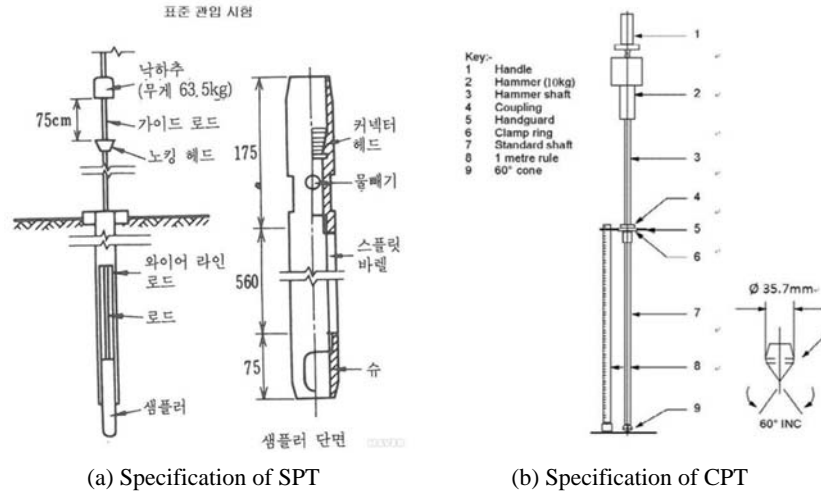


Fig. 2 Specification of geotechnical investigation equipment

3. 파가니콘 시험(Pagani Cone Test)

3.1 Pagani cone 제원

Pagani cone은 지반의 특성을 파악하는 장비로 지반의 종류, 지반의 동정사항, 지반층 두께 등을 파악할 수 있다. Pagani cone test는 30kg의 추를 20cm 높이에서 낙하하여 10cm 관입시 낙하횟수(N)을 측정하며, 일반적으로 사용하는 표준관입시험(SPT)과 원리는 동일하나 낙하높이 및 낙하추의 무게가 다른 차이점이 있다. Fig.3와 같이 시험기기의 구성요소는 hammer, rods, cone tips등으로 구성되며 제원은 Table 1와 같다. 동적원추관입시험기보다 상대적으로 무거운 hammer를 사용한다. Pagani cone test에서 얻어진 타격횟수(N)를 SPT N 값으로 환산하여 기초지반을 형성하는 각 지층의 상대밀도(Relative Density) 및 Consistency를 판정한다. N값의 조사결과로 판별 또는 추정할 수 있다.



Fig. 3 Components of Pagani cone

Table 1 Specifications of Pagani cone and DCP

Item	Specifications of Pagani cone	Specifications of Light weight DCP
Hammer weight	30kg	10kg
Cone tips area	10cm ²	10 cm ²
Cone tips diameter	3.56cm	3.56cm
Cone tips angle	60°	60°
Rods length	1m	1m
Rods diameter	2cm	2 cm
Height of hammer hit	20cm	50cm

3.2 Pagani cone과 표준관입시험(SPT), 동적콘관입시험(DCPT)와의 상관관계

Pagani cone과 표준관입시험(SPT), 동적콘관입시험(DCPT)의 상관관계를 파악하기 위하여 관입에너지(Q)를 산정하고 비교 분석하였다. 관입에너지(Q)는 다음과 같은 식(1)으로 정의된다.

$$Q = \frac{M \cdot H}{A \cdot \delta} \text{ (kg / cm}^2\text{)} \quad (1)$$

여기서, M = 질량(Mass)

H = 낙하높이(Falling Height)

A = 단면적(Base Area)

δ = 관입깊이(Penetration Length)

식(1)에 의거하여 Pagani cone(PCT)의 제원과 표준관입시험(SPT), 동적콘관입시험(DCPT)의 제원을 이용하여 각각의 관입에너지(Q)를 산정하면 $Q_{SPT} = 7.87\text{kg/cm}^2$, $Q_{PCT} = 6.0\text{ kg/cm}^2$, $Q_{DCP} = 5.0\text{kg/cm}^2$ 으로 나타났다. 이에 SPT와 DCPT의 관입에너지를 Pagani cone test의 관입에너지와 비교하면 다음 식(2), 식(3)과 같다.

$$N_{SPT} = \frac{6}{7.87} N_{PCT} = 0.76 N_{PCT} \quad (2)$$

$$N_{DCPT} = \frac{6}{5} N_{PCT} = 1.2 N_{PCT} \quad (3)$$

Lee et al.(2000)에 따르면 빠르게 타격하는 자동해머를 장착한 SPT의 에너지효율은 72.3%, ISMES에서 실시한 Pagani cone의 에너지효율은 73%로 나타났고, 같은 낙하방식의 DCP도 Pagani cone의 에너지 효율을 적용하면, 각각의 에너지효율을 적용한 이론식은 식(5), 식(6)과 같다.

$$N_{PCT} = 1.3N_{SPT} \quad (5)$$

$$N_{PCT} = 0.83N_{DCPT} \quad (6)$$

4. 파가니콘 시험(Pagani Cone Test)과 표준관입시험(SPT)의 상관성 분석

4.1 Pagani cone 현장시험

4.1.1 Pagani cone 현장시험 개요

본 연구에서 Pagani cone test와 표준관입시험의 상관관계를 파악하기 위하여 쉘드공법을 실시한 서울시 지하철 9호선의 현장 A공구와 B공구의 터널 상부구간에서 Fig.4와 같이 Pagani cone test와 표준관입시험을 실시하였다. 총 8곳에 걸쳐 Pagani cone test와 표준관입시험이 서로 지반 교란에 따른 영향이 없도록 2m 이상 떨어진 지점에서 시험하였다.



Fig. 4 Pagani cone test on the ground above the tunnel

4.1.2 Pagani cone test와 표준관입시험의 결과 비교

서울 지하철 9호선에서 쉘드공법이 적용된 시공구간 중 A공구와 B공구에서 Pagani cone test와 SPT를 실시하였고, Pagani cone의 10cm 관입시 타수와 SPT의 30cm 관입시 타수를 비교하였다. 데이터 분석결과, A공구에서는 아스콘 하부 기층, 보조기층에 의해 상부에서는 비교적 높은 N치가 나왔다. 그 밑으로 점토와 사질토로 구성되어있다고 파악하였다. B공구에서는 지장물조사에 의한 굴착 후 되메우기로 인하여 2m가량 연약한 매립층으로 구성되어 있었고, 그 밑으로는 점토와 사질토로 파악되었다. A공구와 B공구에서 Pagani cone과 SPT의 N치의 비교를 Fig.5와 Fig.6으로 나타내었다.

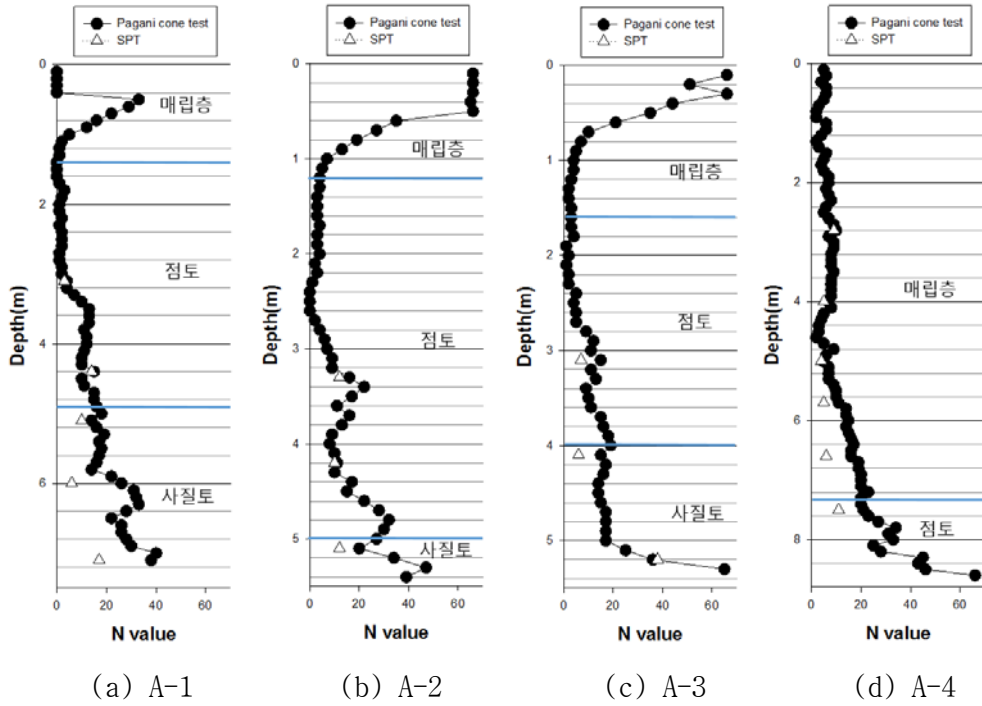


Fig. 5 Comparing N-value of Pagani cone with N-value of SPT (A site)

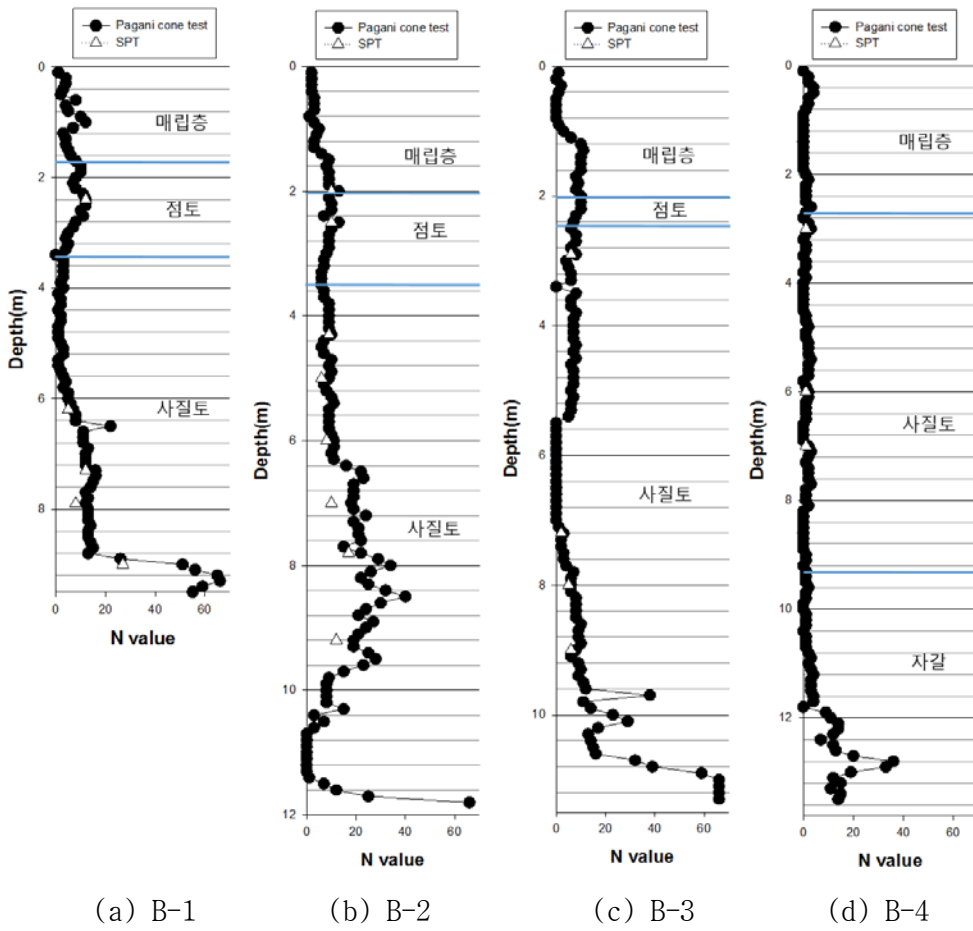


Fig. 6 Comparing N-value of Pagani cone with N-value of SPT (B site)

Pagani cone test와 SPT의 비교를 통하여 지반의 종류에 따른 관계식을 Fig.7과 같이 나타내었다. 데이터를 분석한 결과 N_{PCT} 값은 사질토에서 N_{SPT} 의 1.43배, 점토에서 N_{SPT} 의 1.36배로 앞서 추론한 이론식과 유사하게 나타났다.

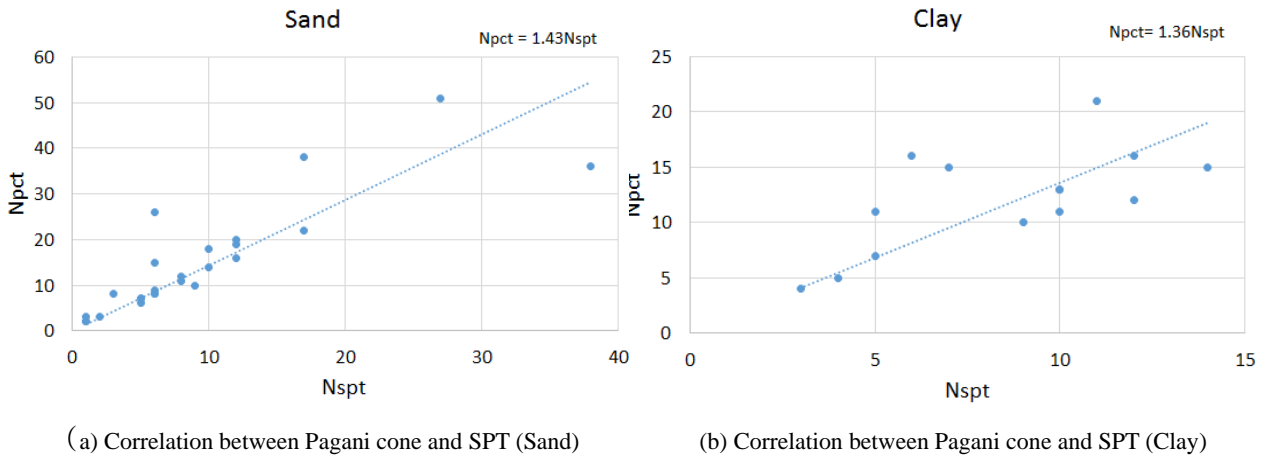


Fig. 7 Correlation between Pagani cone and SPT according to the type of soil

5. 결론

본 연구는 통하여 Pagani Cone의 철도노반 적용성 평가하기 위하여 DCP와 타격에너지를 비교하고 SPT와의 상관관계를 분석하여 관계식을 제안하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1. Pagani cone test는 자갈층을 통과할 수 있는 충분한 관입에너지를 가졌으나, SPT의 N값과는 상관관계가 드러나지 않았다.
2. DCPT에 비해 120%의 관입에너지를 가진 Pagani Cone Test를 통하여 원지반 상태를 10cm마다 평가 할 수 있었으며, 비교적 큰 에너지가 발휘되어 하부 13m까지 관입시켜도 문제가 없음을 알 수 있었다.
3. N_{PCT} 값은 사질토에서 N_{SPT} 의 1.43배, 점토에서 N_{SPT} 의 1.36배로 앞서 추론한 이론식 ($N_{PCT}=1.3N_{SPT}$)과 유사하게 나타났다
4. Pagani cone test은 SPT보다 이동이 편리하고 궤도 주변 전철주에 대한 접촉 위험이 없으며, DCPT에 비해 강한 관입에너지를 가지고 있어 철도노반에 적합한 지반조사법으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Byun, Y. H., Kim, J. H. and Lee, J. S. (2013), Cone penetrometer with a helical-type outer screw rod for evaluation of the subgrade condition, *Journal of Transportation Engineering*, 139, pp. 115~122.
- [2] De Lima, D. C. and Tumay, M. T. (1991), Scale effects in cone penetration tests, *Proceedings of the Geotechnical Engineering Congress*, Boulder, Colorado, 1, pp. 38~51.
- [3] Kim, D. S., Hwang, S. K., Shin, M. H. and Park, T. S. (2005), Evaluation on the condition of track substructure using GPR/PBS/LFWD, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 21(5), pp. 163~170 (in Korean).
- [4] Kim, D. S., Lee, S. H., Kang, S. G. and Son, K. H. (2004), Research for assessing railway trackbed condition, 2004 Spring Conference of Korean Society for Railway, Korea, pp. 54~60 (in Korean).
- [5] Kim, D. S., Park, S. Y. and Kim, S. I. (2008), Evaluation of correlation between subgrade reaction modulus and strain modulus using plate loading test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 24(6), pp. 57~67 (in Korean).
- [6] Kim, M. C., Park, Y. G., Lim, H. J., Park, S. H. and Ryu, J.Y. (2013), A study on the condition assessment of ballasted tracks of various substructure types of in-service railway line, 2013 Autumn Conference of Korean Society for Railway, Korea, pp. 178~186 (in Korean).
- [7] Lee, J. S., Shin, D. H., Yoon, H. K. and Lee, W. (2008), Development and application of ultra small micro-cone penetrometer, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 24(2), pp. 77~86 (in Korean).
- [8] Lunne, T., Robertson, P. K. and Powell, J. J. M. (1997), *Cone penetration testing in geotechnical practice*, Blackie Academic & Professional, London, 352p.
- [9] Mohammadi, S. D., Nikoudel, M. R., Rahimi, H. and Khamehchiyan, M. (2008), Application of the dynamic cone penetrometer (DCP) for de-termination of the engineering parameters of sandy soils, *Eng. Geol.*, 101(3-4), pp. 195~203.
- [10] Park, C. S., Mok, Y. J., Hwang, S. K. and Park, I. B. (2009a), A methodology for quality control of railroad trackbed fills using compressional wave velocities: 1. preliminary investigation, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 25(9), pp. 45~55 (in Korean).
- [11] Park, C. S., Mok, Y. J., Hwang, S. K. and Park, I. B. (2009b), A methodology for quality control of railroad trackbed fills using compressional wave velocities: 2. verification of applicability, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 25(9), pp. 57~66(in Korean).
- [12] Lee, B. J., Lee, J. K. (2014), Correlation Analysis between DCPT Value and SPT Value, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 15(8):23~30(August, 2014)
- [13] Lee, K. S., Park, Y. H., Cho, K.H. A study on the Application of railway using Pagani cone test: *Journal of the Korean Society for Railway*.(October, 2015)
- [14] Park, Y. W., Lee, H. C., Park, J. H., Kim, S. H.(1993) Hammer energy measurement of Standard Penetration Test, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 573~576(October, 1993)
- [15] Lee, W. J., Lee, C. H., Measurements of SPT Hammer Energy and Calculation of Dynamic Efficiency, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*.3695~3700(October, 2003)