

Pagani Cone Test을 이용한 철도노반 적용성에 관한 연구

A study on the Application of railway using Pagani cone test

이경석*, 박양후**, 조국환†

Kyung-Suk Lee*, Yang-Hoo Park**, Kook-Hwan Cho†

Abstract The ground survey should be performed to analysis before constructions of electrical poles, soundproof walls, and so on. SPT(Standard Penetrometer Test) and CPT(Cone Penetrometer Test), and DCP(Dynamic Cone Penetration) are typical methods for ground survey. However, the SPT and standard CPT tests are difficult to apply in service railway lines due to the interruption with power lines. The DCP test can be used around service lines but it has also has limitation with low operation energy, which cannot penetrate required depth for the ground condition investigation. In this study, the application of Pagani cone which is a DCP and has larger driving energy comparing with standard DCP is investigated and suggested the relationship with plate load test results.

Keywords : Ground survey, Pagani cone test, SPT, CPT, DCP

초 록 기존선에 대하여 침하원인 분석, 전철주 및 방음벽 설치 등의 공사를 시행할 경우 반드시 지반조사를 실시해야 한다. 일반적인 지반조사 방법으로는 표준관입시험(SPT), 콘관입시험 등이 가장 대표적이고 정확한 방법이다. 그러나 표준관입시험(SPT)은 장비가 크기 때문에 운행선 주변 전철주 등에 접촉할 위험이 있어 적용이 불가능하다. 일반적인 콘관입시험 장비 또한 표준관입시험(SPT) 장비와 같은 이유로 기존선 주변에서 사용이 어렵다. 또한, 휴대가 가능한 장비로 알려진 DCP(Drop Cone Penetrometer)의 경우는 타격에너지 부족과 관입되는 cone-rod의 강성부족 등으로 필요깊이까지 관입이 불가능하여 여러모로 사용에 제한을 받고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 휴대용 장비이면서 비교적 큰 타격에너지와 강성이 큰 cone 관입기를 사용하는 Pagani cone의 철도노반 적용성을 검증하고 새로운 노반상태 평가방법을 제시하고자 한다.

주요어 : 지반조사, Pagani cone test, SPT, CPT, DCP

1. 서 론

최근 국내에서는 기존 자갈도상에 대해 200km/h 이상의 고속화를 추진 중에 있다. 하지만 자갈의 노후화, 시공불량 등 기존선에 노반 및 원지반의 침하가 발생하고 있다. 일반적으로 철도분야의 지반조사는 성토가 이루어지기 전 원지반을 상대로 이루어지며, 성토시 평판재하시험 및 반복평판재하시험을 통한 다짐기준에 의해 시공되고 있다.

그럼에도 불구하고 일부 기존선에서는 여러가지 요인으로 인하여 지속적인 침하가 발생하고 있으며, 이에 대한 정확한 지반조사 없이 침하의 원인을 추측하여 보강 및 복원 공사가 이루어지고 있는 실정이다. 그러므로 궤도 및 하부구조물의 유지보수비용을 최소화하기 위하여 도상 및 노반의 정확한 상태조사는 필수적이다. 현재 도상과 노반에 관련된 많은 문제점이 발생하고 있으나, 이를 평가할 수 있는 신뢰할만한 체계는 구축되어 있지 않은 실정이다. 이러한 문제를 해결하고자 최근 다양한 지반조사 방법이 연구되어 왔다.

* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도시스템학과, (주)대한하이텍건설

** 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과

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

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 비파괴시험들은 상대적으로 신뢰성이 떨어지고, 단순히 노반상태를 평가하는데 참고자료로만 사용되고 있다. 그러므로 심도에 따라 직접적으로 철도궤도 하부구조물을 평가할 수 있는 원위치시험에 대한 연구가 필요하다.

원위치시험에는 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 장비의 크기 및 전철주와의 접촉위험성 등의 이유로 적용하기가 까다로운 단점이 있다.

원위치시험 중 별도의 시추공을 필요로 하지 않고 연속적으로 신뢰할 만한 데이터를 획득할 수 있는 CPT의 비중이 증가하고 있다. 하지만 CPT에 사용되는 장비 또한 철도현장에 적용하기에는 공간적인 제약이 있으며, 국내에서는 적합한 장비확보에 어려움이 있다. 이에 Lee et al.(2008)은 교란을 최소화하기 위하여 표준 Cone(직경 35.7mm)보다 작은 다양한 직경을 갖는 Cone의 개발 및 검증에 대한 연구를 수행하였다. 특히 Byun et al.(2013)은 스크류 룯드에 체결된 소형 콘 관입기를 개발하여 철도지반에 적용하고자 하였다. 그러나 도상자갈층의 상태에 따라 스크류 룯드의 회전 관입에 어려움이 있으며, 도상자갈층에 대한 상태평가를 수행할 수 없다는 한계가 있다. 또한, 직경이 작은 Cone은 관입에너지가 너무 적어 자갈 및 강화노반을 통과하여 원지반을 조사하는데 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 휴대가 가능하고 DCPT에 비하여 비교적 타격에너지가 큰 Pagani cone의 제원과 계측자료 분석방안을 제시하였으며, 현장실험을 통하여 노반의 지반특성을 파악하고, 기존의 지반조사방법과 비교·분석하여 철도노반 적용성을 검증하고 새로운 노반상태 평가기법을 제시하고자 한다.

2. 기존 철도노반에서의 지반조사

2.1 기존 철도노반에서의 지반조사 방법

표준관입시험(SPT : Standard Penetration Test)은 Fig. 1(a)와 같이 원위치에서 지반 조사를 하는 보편적인 방법으로 로드 끝에 외경 5.1cm, 내경 3.5cm, 길이 81cm의 스플릿 스푼 샘플러를 부착하고, 보링 구멍 내에서 무게 63.5kg의 해머를 높이 75cm에서 낙하시켜 30cm 관입시키는데 필요한 타격 횟수(N값)를 측정하는 시험이다. 측정된 N값을 통해 흙의 전단 강도, 압축성, 지지력 등 지반에 대한 기초 구조나 적용공법의 판단을 위한 기초자료를 얻을 수 있다. 철도에서는 설계시 지반조사 방안으로 주로 쓰이며, 기존선에 지반조사를 하는 경우에는 열차 및 전차선 차단을 한 후 지반조사를 실시하여 열차운행에 장애가 되며, 전철주와의 접촉 위험성을 향시 내포하고 있는 단점이 있다.

동적콘관입시험(DCPT : Dynamic Cone Penetration Test)은 Fig. 1(b)와 같이 타격횟수를 기록하는 기록원 및 시험원 등 총 3명이 필요하며 10kg의 해머를 50cm 높이에서 하강시켜 Rod를 10cm 관입하는데 필요한 타격횟수(N값)를 기록한다. 하지만 타격에너지 너무 작아 콘이 자갈도상을 통과하기 힘들며, 보링장비를 이용하여 천공을 할 경우 많은 비용이 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 자갈도상 및 강화노반을 통과하여 원지반까지 조사할 수 있는 장비의 필요성을 확인할 수 있었다.

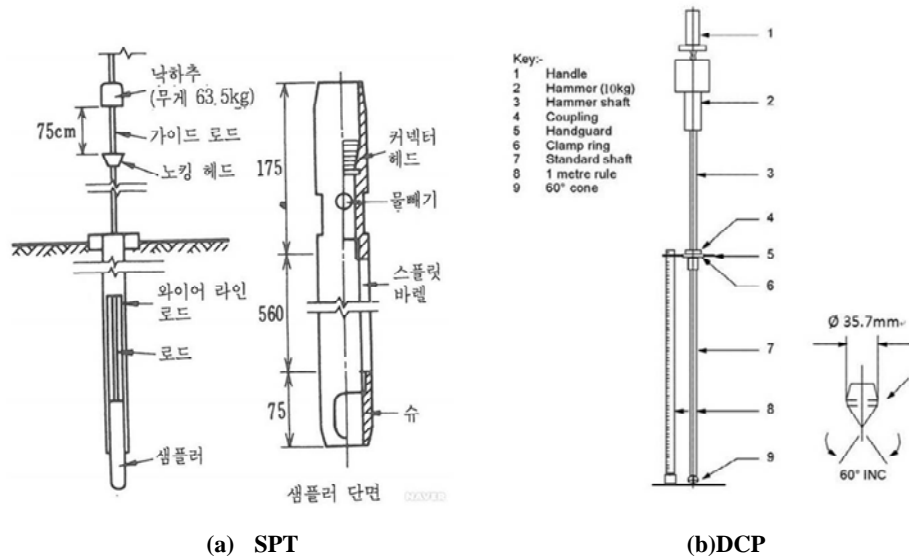


Fig. 1 Equipments of ground survey

3. Pagani Cone Test

3.1 Pagani cone

Pagani cone test는 30kg의 추를 20cm 높이에서 낙하하여 10cm 관입시 낙하횟수(N)을 측정하며, 일반적으로 사용하는 표준관입시험(SPT)과 원리는 동일하나 낙하높이, 추의 무게가 다른 차이점이 있다. Fig. 2와 같이 시험기기의 구성요소는 hammer, rods, cone tips등으로 구성되며 제원은 Table 1과 같다. Pagani cone test에서 얻어진 타격횟수(N)를 SPT N값로 환산하여 기초지반을 형성하는 각 지층의 상대밀도(Relative Density) 및 Consistency를 판정한다.



Fig. 2 Pagani cone

Table 1 Specification of Pagani cone

Item	Specifications
Hammer weight	30kg
Cone tips area	10cm ²
Cone tips diameter	3.56cm
Cone tips angle	60°
Rods length	1m
Rods weight	2.4kg/ea
Rods diameter	2cm

3.2 Pagani cone과 표준관입시험(SPT), DCP와의 상관관계

표준관입시험(SPT)과 Pagani cone, DCP의 지지력에 대한 상관관계를 파악하기 위하여 관입에너지(Q)를 산정하고 비교 분석하였다. 관입에너지(Q)는 다음과 같은 식(1)으로 정의된다.

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

여기서, M = 질량(Mass)

H = 낙하높이(Falling Hight)

A = 단면적(Base Area)

δ = 관입깊이(Penetration Length)

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

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

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

4. Pagani Cone Test을 통한 현장 적용성 평가

4.1 Pagani cone을 통한 지반상태 평가(철도 하부노반 성토시)

4.1.1 현장시험 개요(철도현장 A)

A 철도현장 성토구간에서 Pagani cone test를 실시하였으며, 시험 위치는 Sta. 13Km 040로 15.3m 높이의 성토체에서 5m 간격으로 3곳을 선정하여 실시하였다. 본 절에서는 Pagani cone 과 반복평판재하시험, LFWD 데이터 비교·분석하였다.

4.1.2 시험결과 및 분석

Fig. 3에서 보는 바와 같이 Pagani cone test를 실시한 3곳 모두 30cm 깊이를 기준으로 N값의 변화가 있음을 알 수 있다. 이는 성토시 30cm를 기준으로 다짐작업이 이루어졌음을 추측할 수 있다. 70cm 깊이 이하에서는 표준관입시험(SPT) N값 30이상의 지반이 구성됨을 알 수 있었다. 또한, 일반적으로 알려져 있는 성토 다짐시 최상층의 다짐효과가 크지 않는 것을 본 데이터를 통하여 증명할 수 있었다.

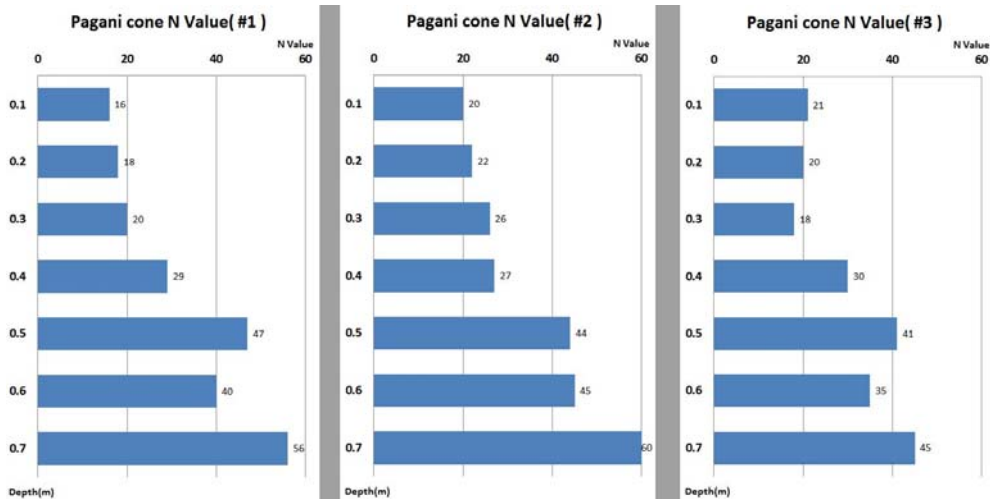


Fig. 3 N value of Pagani cone(Site A)

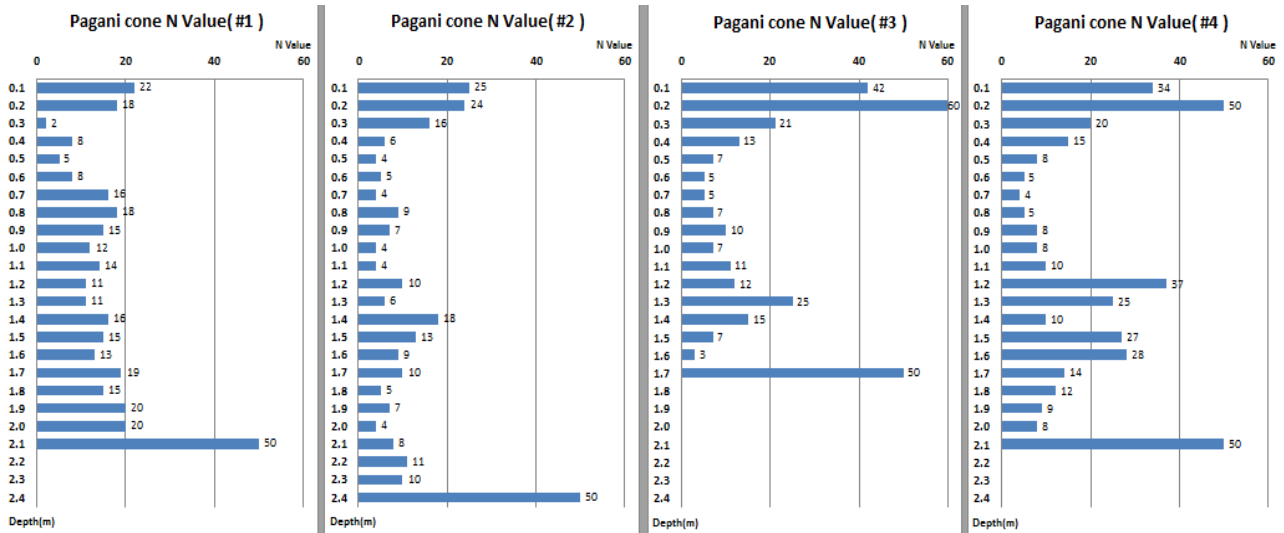
4.2 Pagani cone을 통한 지반상태 평가(기존선)

4.2.1 현장시험 개요(철도현장 B, C)

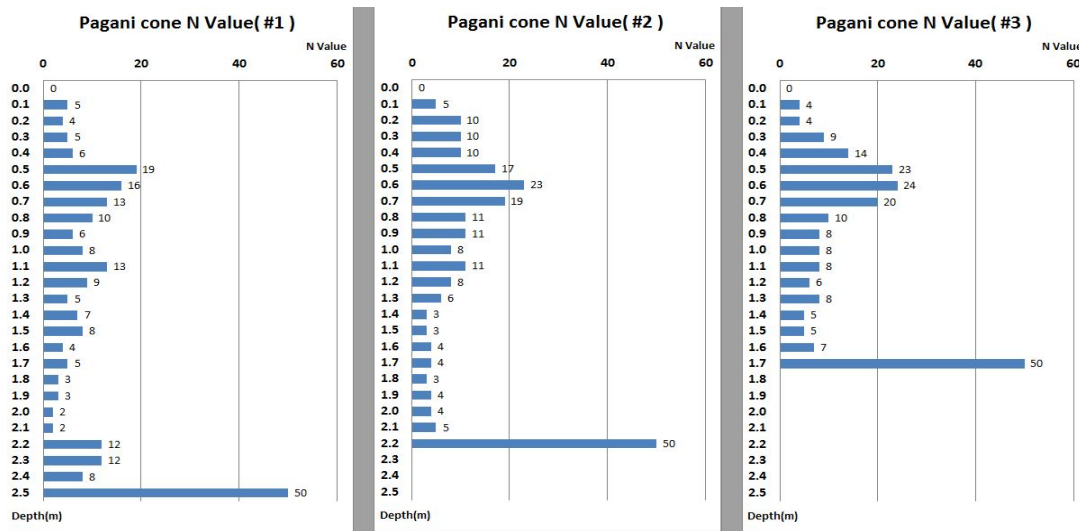
철도현장 B, C는 기존선으로 자갈도상 교량접속부 2곳에서 Pagani cone test를 실시하였으며, 대상구간에서는 침하가 지속적으로 발생하여 침하원인분석을 목적으로 실시하였다. B현장에서는 4개소, C현장에서는 3개소를 선정하였다.

4.2.2 시험결과 및 분석

Fig. 4에서 보는 바와 같이 현장 B, C의 0~30cm 깊이의 N값은 20~40으로 비교적 높은 N값이 나타남을 알 수 있다. 이는 자갈도상층에서의 N값으로 판단된다. 현장 B에서 약 0.8~2.0m 구간은 N값이 10이하로 연약한 지반으로 판단된다. 현장 C는 성토사면 측면으로 상부층에서의 다짐이 제대로 되지 않았음을 알 수 있었다. 이후 약 0.8~2.0m 구간에서는 N값이 10이하로 나타났다. 현장 B, C의 침하원인으로는 성토시 다짐불량, 호우시 세립자의 유출, 설계시 지반조사의 불확실성 등으로 판단된다. Pagani cone을 통하여 침하의 원인 및 노반의 상태를 평가할 수 있었다.



(a) N value of Site B



(b) N value of Site C

Fig. 4 N value of Pagani cone(Site B, C)

5. 결론

본 연구는 기존선 및 신설철도현장에서 Pagani cone test를 실시하였고, N값을 통해 지반상태 및 철도노반의 적용성을 평가하였다. 이에 대한 결론은 다음과 같다.

1. 일반적으로 성토부 다짐을 하는 경우 30cm 깊이로 다짐이 이루어 지고 있으며, 최상층에서는 다짐이 원활이 이루어지지 않고 있다. 본 연구에서 Pagani Cone Test를 통하여 최상층에서의 다짐정도를 분석한 결과 하부노반에 비해 약 50% 정도 다짐이 적게 이루어짐을 확인할 수 있었다.

2. 본 연구에서 알 수 있듯이 Pagani cone test의 철도노반 적용성을 평가해보면 정확한 지반 상태 및 침하원인을 분석할 수 있었고, DCPT와는 달리 비교적 큰 타격에너지가 발휘되어 깊이가 깊은 지반조건에서도 측정이 가능했다. 그러므로 SPT와 같이 다소 큰 장비 투입이 어려운 현장에서 지반조사가 필요할 경우 Pagani cone이 적절한 지반조사 방법이 될 것으로 판단된다.
3. 반복평판재하시험과 LFWD와의 데이터 비교·분석에 대한 신뢰성을 높이기 위해 추가 Pagani cone test가 필요할 것으로 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).