침하가능성 확인을 위한 자갈도상 철도노반의 탄성계수 단층영상화

Cross-Sectional Imaging of Elastic Modulus for Railway Trackbed under Ballast for Identification of Potential Settlement

조성호[†] · 황선근¹ · 라자 하사눌² · 노리나 라만²

Sung-Ho Joh · Seon Keun Hwang · Raja Hassanul · Norinah Abd Rahman

Abstract Recently a limited section of trackbed with ballast at KTX railway were reported to have settled down and led to problems such as reduced speed and passenger discomfort. Therefore, an urgent remedy for the settled trackbed is required to recover normal operation of KTX trains. In this paper, a new technique is proposed to visualize the elastic modulus of cross sections at railway trackbeds under ballast for practical identification of potential settlement. The proposed technique is based on ICSW technique, enabling use of impact source and overcoming inherent limitations of CSW method. To verify validity and feasibility of the proposed method, the method was employed to construct cross-sectional images of elastic modulus of two railway trackbeds and compared with other tests such as SASW, PBT, DCP and portable FWD tests.

Keywords : Elastic modulus, Cross-sectional imaging, Railway trackbed, Settlement, Surface waves

초 록 최근 경부고속철도 자갈도상 구간의 일부에서 침하가 발생되고 이로 인하여 열차의 안전 및 운행속도와 승차감 저하라는 문제가 발생하였다. 따라서 이 문제를 해결하고 KTX 열차 운행을 정상화하기 위한 긴급대책이 요구된 적이 있었다. 본 논문에서는 이러한 현상의 요구에 대처하기 위해 철도노반 단층영상화 기법을 도입하게 되었다. 철도노반 단층영상화 기법은 철도노반의 지반강성을 단층영상의 형태로 가시화함으로써, 잠재적으로 과도한 침하를 유발할 수 있는 철도노반의 연약부위를 찾는 데 있어서 현장기술자의 신속한 판단을 가능하게 하는 기법이다. 제안된 기법의 타당성과 적용성을 평가하기 위하여 실제 자갈도상 철도노반과 신설 철도노반 등 두 현장에 적용하여 보았고, SASW, PBT, DCP, FWD 시험결과와 비교하였다.

주요어 : 탄성계수, 단층영상, 철도노반, 침하, 표면파

1. 서 론

철도노반의 침하는 열차운행시 대형 참사를 초래할 수 있는 중요한 철도시설물의 구조적 문제 중의 하나이다. 일반적으로 철도노반의 침하문제는 원지반의 지반조사 부실, 철도노반의 재료 및 다짐시공의 불량 등의 다양한 원인으로 초래된다. 일단 철도노반에 침하가 야기되면 철도노반의 변형과 휨으로 이어지게 되고, 궁극적으로 열차운행의 안전성 문제, 현저한 승차감 저하 등의 후속 문제를 초래하게 된다. 예를 들어, 최근 경부고속철도선의 자갈도상 중 일부 구간에서 침하가 발생되었고, 이 문제에 대한 원인규명과 대책강구를 위한 연구가 진행 중이다.

일단 철도노반에 침하문제가 야기되면, 이에 대한 원인을 규명하기 위한 첫 번째 단계가 철도노반의 지반공학특성을 평가하는 것이다. 즉 철도노반의 침하특성을 평가할 수 있는 노반재료의 공학적 특성, 탄성계수 등을 현장조사해야 한다. 그런데 운행선의 경우 열차통과의 빈도가 매우 높

아서 시추공 조사와 같이 많은 시간이 소요되는 현장조사 기법은 사용할 수 없는 문제가 있다. 따라서 운행선의 특수한 상황에서 노반재료의 공학적 특성을 조사하기 위하여는 표면파기법과 같은 비파괴적 기법을 도입하지 않을 수 없는 상황이다. 여러 비파괴 기법 중에서 표면파기법이 가장 타당한 것은 무엇보다도 탄성계수와 같은 노반재료의 공학적 특성을 평가할 수 있고, 또한 신속하며 높은 신뢰성을 갖는 결과를 얻을 수 있기 때문이다.

표면파 기법은 최근 국내외적으로 많은 연구가 진행되고 있는 분야로서 1982년 SASW 기법[1]이 개발된 이후 다양한 새로운 기법들이 제안되고 있다. 표면파의 모드 분해를 통하여 획득한 기본모드 특성을 주로 활용하는 기법[2], 시간-주파수 영역해석을 통하여 모드분해의 해상도를 향상시킨 기법[3], 러브파 속도와 레일리파 속도를 모두 활용하여 역산해석의 신뢰도를 향상시킨 기법[4], 다중채널을 활용하여 국부적 이상대의 영향을 최소화시키는 기법[5,6] 등 다양한 표면파 기법이 개발되어 있는 상황이다.

자갈도상 철도노반 평가를 위하여 본 연구에서 활용하는 표면파 기법은 1996년 Menzies 등이 제안한 CSW (Continuous Surface-Wave Method) 기법[5]을 개선하고 보완한 것[7,8]으로, 파장영역의 엘리어싱(aliasing)문제와 전자기식 발전기의

[†]교신저자 : 중앙대학교 공과대학 사회기반시스템 공학부
E-mail : shjoh@cau.ac.kr

¹한국철도기술연구원 철도구조연구실

²중앙대학교 일반대학원 토목공학과

필수사용 문제 등을 해결하고 자료해석의 자동화를 가능하게 함으로써 다짐시공지반, 자갈레도 철도노반 등의 전단강성 평가에 최적화하여 개발하였다. 본 연구에서 제안하는 기법은 ICSW (Impact-Source Continuous Surface-Wave Method) 기법을 근간으로 하여, 실시간으로 탄성계수의 단층영상을 탐사할 수 있는 기법이며, 본 기법의 타당성과 신뢰성 평가를 위해 중앙선 일부 폐구간과 신설 철도노반 현장에 적용하였다.

2. 자갈도상 철도노반 평가를 위한 ICSW 기법

2.1 Continuous Surface Wave (CSW) 기법

CSW 기법은 지반 또는 구조체의 지표면을 따라 전파하는 표면파 속도를 측정하는 표면파기법의 하나로서, Fig. 1에서와 같이 조화함수(싸인파와 같은 주기함수)의 파형을 발생하는 가진기를 이용하여 일정 주파수의 표면파 성분을 개별적으로 발진하고, 그 주파수의 표면파 속도를 측정하는 기법이다. 일정 주파수 성분의 표면파에 대해서 개별적으로 발진하고 측정하기 때문에, 물리적으로 신뢰성이 높고 정확한 측정기법이라고 할 수 있다. 즉, 주파수 변환과 같은 신호처리 기법에 의존하여 수치적으로 해당 주파수 성분의 표면파 속도를 추출해 내는 것이 아닌 것이다. 즉 주파수 변환(DFT, FFT 등)으로 추출한 표면파의 저주파 성분을 인위적인 수치적 산물일 수도 있을 것이라는 우려를 불식하는 것이기 때문에 CSW 기법의 측정 신뢰도는 높다고 할 수 있다. CSW 기법을 적용하는 시험에서는 최소한 4개의 감진기가 일렬로 배치되어야 하고 측정할 수 있는 주파수의 범위는 가진기의 기계적인 특성으로 인하여 5~200 Hz 정도의 범위가 된다. 그러나 한편으로는 측정 주파수에 대하여 개별적으로 가진하고 측정하여야 하기 때문에 측정시간이 상당히 많이 소요되는 문제점이 있다. 예를 들어 약 2시간의 현장시험 동안 측정할 수 있는 주파수의 개수는 개략적으로 10~15개 정도에 지나지 않기 때문에, 시험방법은 현실적으로 비효율적이고 경제적이지 못한 문제점을 가지고 있다.

측정한 시간영역 신호로부터 표면파 속도를 구하기 위해서는 단위길이당 표면파 위상각의 증가분, 즉 파수(wave number)를 결정하고 이를 식 (1)에 대입하면 된다.

$$v_{ph} = 2\pi f \frac{\Delta r}{\Delta \phi} = 2\pi f \frac{1}{k} \quad (1)$$

여기서 v_{ph} 는 표면파 속도, f 는 주파수, $\Delta r/\Delta \phi$ 는 단위길이당 표면파 위상각 증가분의 역수, k 는 파수이다.

CSW 기법이 가지고 있는 근본적인 문제점 중 하나는 위상각의 표현인데, 삼각함수의 원초적 문제로 인하여 주파수 변환 과정에서 결정되는 위상각은 -180도와 +180도 사이의 값으로만 표현되게 된다. 따라서 고주파의 경우에는 표면파 위상각 증가분이 ± 180 도 보다 매우 큰 값이지만 반드시 ± 180 도 이내의 값으로 표현되어야 하기 때문에 정확하게 표현되지 못한다. 또 다른 문제점은 CSW 시험에서 사용하는 가진기는 최대 약 200Hz 까지의 표면파만 발생가능하기 때문에, 심도 1m 이내의 매질을 평가하기 위해 필요한 고주파의 표면파를 측정할 수 없는 문제가 존재한다. 이와 같은 CSW 기법의 한계를 극복하기 위해 조성호 등은 파수복원 기법[7]을 도입하였다.

2.2 Impact-Source CSW (ICSW) 기법

충격 가진원을 사용하는 ICSW 기법은 기존 CSW 기법의 가진원 문제를 해결한 기법으로서, 일정 주파수를 발생시키는 가진원을 사용하지 않고, 해머와 같은 충격 가진원을 사용하여 CSW 시험을 수행할 수 있도록 하는 기법이다[7]. 해머와 같은 충격 가진원을 사용하면 발생가능한 최고 주파수도 약 수 킬로 Hz로 증가하게 된다. 자갈도상 궤도에서는 슬래지 해머와 같은 충격원을 가진원으로 사용할 수 있다.

충격 가진원을 사용하였을 때의 해석은 전달함수의 위상각을 이용해서 단위거리당 위상각 증분을 결정하게 된다. CSW 기법에서는 모든 감진기의 위상각을 직접적으로 구하여, 이를 근거로 단위거리당 위상각 증분을 구했지만, ICSW 기법에서는 감진기 1번을 기준으로 하여 감진기 2~4번의 신호에 대해 전달함수를 결정하고, 전달함수의 위상각을 이용하여 단위거리당 위상각 증분을 결정하게 된다. 이렇게 일단 단위거리당 위상각 증분이 결정되면 CSW 기법과 동일한 방법으로 즉 식(1)을 이용해서 표면파 속도를 결정할 수 있다.

2.3 ICSW 시험결과로부터 지반강성의 이차원 단층영상 결정

ICSW 시험은 한번의 시험으로 표면파속도 분산곡선을 결정하게 되는데, 연속되는 측선에서 ICSW 시험을 계속적으로 수행하게 되면, 각 측선에 대한 표면파속도 분산곡선을 획득하게 된다. 이렇게 획득한 다수의 표면파속도 분산곡선을 결합하여 이차원 보간법을 적용하여 컨투어를 형성하여 이차원 단층영상을 구한다. 이를 보다 구체적으로 Fig. 2를 이용하여 설명하면 다음과 같다.

Fig. 2에 도시한 바와 같이 4개의 감진기를 이용하여 ICSW 시험을 수행하면, 하나의 표면파속도 분산곡선을 결정하게 되고 이를 4개 감진기가 위치하였던 측선의 중심에

Fig. 1 Schematic diagram of the CSW method

Fig. 2 Procedure to construct a cross-sectional image of dispersion curves or shear-wave velocity profiles from ICSW measurements

해당되는 정보라고 할 수 있다. 이제 전체 감진기 세트를 다음 시험위치로 이동하여 동일한 과정을 반복하게 되고, 그 결과 또한 감진기 세트의 중심부에 대한 정보를 구하게 된다. 이와 같은 과정을 필요한 만큼 반복한 후, 이차원 보간법과 컨투어 작성 알고리즘을 이용하면 최종적으로 Fig. 2에 도시된 바와 같은 지반강성의 이차원 단층영상을 결정할 수 있다.

이와 같은 표면파속도 분산곡선으로 이차원 단층영상을 결정하는 것은 현장에서 시험과 동시에 실시간으로 수행할 수 있는 장점이 있다. 즉 전체 시험 구간에 대하여 ICSW 시험을 수행하여 현장에서 자동화된 소프트웨어를 통하여 표면파속도 분산곡선의 단층영상을 검토할 수 있으며, 이로부터 국부적으로 취약한 지역을 파악한 후, 해당 지역에 대하여 역산해석을 수행하여 보다 정확한 연약부 위치와 심도를 평가할 수 있다.

그리고 만약 현장에서 실시간으로 연약부 위치에 대한 결정이 이루어질 필요가 없고 시간적 여유가 있는 상황이라면, 별도로 모든 표면파속도 분산곡선에 대하여 역산해석을 수행하고 그 결과를 바탕으로 전단파속도 단층영상을 만들어 낼 수 있다.

3. ICSW 기법의 현장적용

3.1 현장적용 개요

본 연구에서 제안한 철도노반 지반강성의 이차원 단층영상 결정방법의 신뢰성과 현장 적용성을 평가하기 위하여 일련의 ICSW 시험을 수행하였다. 시험이 수행된 위치는 경기도 팔당 지역의 중앙선 폐구간과 경기도 양평에 위치한 중앙선 신설 구간이며, 각 시험 구간에서 표면파속도 분산곡선과 전단파속도 주상도를 결정하였다. 본 연구에서는 ICSW 시험으로 결정한 지반강성 단층영상 결과의 신뢰성을 평가하기 위하여 SASW 시험, DCP 시험, 간편형 FWD 시험 등의 결과와 비교하였다.

3.2 팔당지역의 중앙선 폐구간

자갈도상 철도노반의 경우, 적합한 유지관리 없이 장기간 사용하게 되면 해당지역의 노반재료 특성과 배수특성에 따

라 분니현상이 발생할 가능성이 높다. 일단 분니가 발생하게 되면 자갈이 침투한 심도, 노반이 악화된 정도 등을 평가하여야, 분니개소에 대한 보수계획을 수행할 수 있게 된다. 본 연구에서는 이와 같이 분니가 발생하였거나 발생할 가능성이 있는 자갈도상 철도노반의 경우와 또한 잠재적 침하가능성이 있는 철도노반의 지반강성 평가를 위하여 본 연구에서 제안하는 철도노반 지반강성 단층영상 기법을 적용하여 일련의 시험을 수행하였다. 시험을 수행한 지역은 Fig. 3에 현장시험 장면을 소개하였다.

3.2.1 ICSW 시험에 의한 철도노반 단층영상

시험이 수행된 철도노반은 자갈도상이 비교적 오랫동안 관리되지 못한 곳으로서 분니현상으로 의심되는 구간이 곳곳에서 발견되고 있었으며, 철도제방은 인근 지표면에서 약 5m 높이를 이루고 있었다. 시험측선은 총 연장을 54m로 설정하였는데, 이는 3m 측선의 ICSW 시험을 모두 18회 수행함으로써 전 시험측선이 모두 조사되도록 하였다. 각 ICSW 시험은 총 4개의 감진기를 이용하여 수행하였으며 감진기 간격은 약 1m 정도를 유지하였고 정확한 위치는 별도로 측정하여 해석시 반영하였다. ICSW 시험에서 사용한 충격해머로는 슬래지 해머를 사용하였으며, 약 2 kHz 대역까지 고주파 에너지를 발생하는 것으로 측정되었다.

Fig. 3 Site view and scene of performing ICSW tests

시험결과는 각 ICSW 시험으로부터 표면파속도 분산곡선을 일차적으로 구하고, 이어서 역산해석을 수행하여 전단파속도 주상도를 구하였다. 실제 현장에서는 표면파속도 분산곡선으로 현장관리를 할 수 있지만, 본 연구에서는 전단파속도 주상도와와의 정성적 비교를 수행하기 위하여 추가의 역산해석을 수행하였다. 그리고 총 18개의 표면파속도 분산곡선, 전단파속도 주상도를 취합하여 단층영상으로 정리한 것을 Fig. 4에 도시하였다.

Fig. 4에 도시된 두 가지 단층영상을 전반적으로 비교하며 살펴보면, 표면파속도 단층영상과 전단파속도 단층영상은 실제적으로 그 경향이 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 심도 4-6m 구간에 연약한 층이 횡방향으로 분포되어 있는 것을 알 수 있는데, 이는 원지반의 상단으로 추정되는 심도로서 국부적으로 분포되어 있는 연약대도 표면파속도 단층영

Fig. 4 Cross-sectional image of surface-wave velocity and shear-wave velocity for a total of 54-m long measurement array

Fig. 5 Other Investigations for Comparison with Cross-Sectional Image of Surface-Wave Velocities Developed by ICSW Tests

상에서 거의 유사하게 관찰되고 있다.

또한 좌측 15m 구간에서는 암선이 다소 높게 분포되어 있는데, 이 또한 두 단층영상간에 동일한 경향을 보이고 있다. 따라서 표면파속도에 비해 상당히 많은 노력을 요구하는 전단파속도를 구하기 위한 역산해석을 수행하지 않더라도 그에 상응하는 결과를 표면파속도 단층영상을 통하여 확인할 수 있음을 알 수 있다.

3.2.2 FWD와 DCP와의 비교

철도노반 단층영상 평가가 수행된 전체 측선 중 일부 개소에 대하여 ICSW 시험의 신뢰도를 확인하기 위하여 Fig. 5에 도시한 바와 같이 간편형 FWD 시험과 DCP 시험을 수행하였다. 두 시험 모두 측정 가능한 심도는 모두 0.5~0.6m 범위로서 자갈도상과 철도노반 상부의 일부에 국한해서만 측정이 가능한 특징이 있다. 그리하여 본 연구에서 평가한 단층영상의 자료 중에서 심도 1m 정도 (파장으로는 약 3m) 까지의 자료에 대해서만 비교를 수행하였다.

DCP 지수는 해머타격당 관입되는 깊이를 mm로 표현한 것인데, DCP 지수가 작을수록 지반매질의 강성이 높은 것으로 이해할 수 있다. DCP 시험은 총 4개소에 수행되었고,

Fig. 6 Comparison between DCP Index and the cross-sectional image of surface wave velocity

Fig. 7 Comparison between FWD stiffness and DCP index

그 시험위치는 Fig. 6의 철도노반 단층영상에 수직선으로 표시해 둔 바와 같다. Fig. 6에 표면파속도로 표현된 철도노반 단층영상과 DCP 지수를 비교하고 있다. 표면파속도는 측선 (길이=3m) 하부에 존재하는 지반매질에 대한 평균물성을 나타내고, DCP 지수는 측점 하부의 국부매질에 대한 물성을 나타내고 있다.

여기서 표면파속도가 측정한 매질은 표면과 파장의 0.3~0.5 배 심도에 해당되는데, 정확한 심도는 역산해석을 수행하여야 확인이 된다. 따라서 일대일로 비교하는 것은 의미가 없지만 전체적인 경향을 비교평가하는 것은 가능하다. 전반적인 경향은 철도노반 단층영상과 DCP 지수는 잘 일치하고 있다고 판단된다. 예를 들어, 측점 41.8m 지점에서 심도 0.3~0.7m의 DCP 지수는 다른 측점보다 비교적 큰 값, 즉 연

약한 매질을 나타내고 있고 있는데, 이러한 경향은 표면파속도 단층영상에서도 거의 일치하고 있다. 동일지점에서 표면파속도도 약 125m/sec의 값으로 나타나고 있는데 이는 다른 지역보다 낮은 표면파속도 즉 연약한 매질을 의미하고 있기 때문이다. 다른 측정점의 결과에서도 이와 동일하게 DCP 지수가 표면파속도와 역으로 비례하는 경향을 보이고 있기 때문에, DCP 지수와 표면파속도 단층영상은 상호 일관된 경향을 보임을 알 수 있다.

또한 이동형 FWD 시험도 DCP 시험이 수행된 동일지점에서 비교실험으로 수행하였으며, Fig. 7에 두 시험결과를 비교하여 도시하였다. FWD 시험으로 측정된 강성은 70~90 kPa 범위로 측정되었으며, 비교측점 4개소 중 측정점 41.8m 위치의 지반강성이 가장 작은 것으로 측정되었다. 이러한 결과는 DCP 시험과 ICSW 시험으로 측정된 표면파속도 단층영상과 일치하고 있다.

3.3 경기도 양평지역의 신설 철도노반

경기도 양평군의 최근 시공된 철도노반에서 철도노반 단층영상 기법의 신뢰성과 타당성 평가를 수행하였다. 철도노반 단층영상 기법의 신뢰성은 SASW 시험과의 비교를 통하여 평가하였으며, 타당성은 철도노반 단층영상 과정에서 결정된 영탄성계수와 PBT 시험으로 측정된 지반반력계수와

(a) ICSW tests and SASW tests

(b) PBT tests

Fig. 8 ICSW tests, SASW tests, resistivity survey and PBT tests at YangPyong railway trackbed sites

Fig. 9 Comparison of Young's moduli determined by ICSW and SASW tests

Fig. 10 Spatial distribution of shear-wave velocity at railway trackbeds at YangPyung

비교를 통하여 확인하였다. 여기서 영탄성계수는 표층 30cm 매질에 대한 평균값이고, 지반반력계수 또한 직경 30cm 평판으로 구한 수치이므로 대략적으로 표층 30cm 매질에 대한 평균값이라고 할 수 있기 때문에, 두 공학적 물성의 비교는 합리적이라고 할 수 있다. 현장 시험은 두 지역에서 진행되었는데 성토 깊이가 깊으며 토사재료로 성토한 곳이 YP1, 성토 깊이가 얕으며 암석을 파쇄한 재료로 성토한 곳이 YP2이다.

철도노반 단층영상을 획득하기 위한 ICSW 시험은 동일한 시험구성으로 SASW 시험과 동시에 진행되었으며, 시험 결과는 영탄성계수의 값으로 정리하여 Fig. 9에 비교하였다. Fig. 9에 도시된 두 값을 비교해 보면 ICSW 시험으로 획득한 영탄성계수와 SASW 시험으로 획득한 영탄성계수는 거의 동일한 값으로 확인되고 있다. 또한 ICSW 시험과 SASW 시험으로 획득한 철도노반 단층영상을 Fig. 10에 도시하여 비교하였다. 단층영상의 비교에서도 ICSW 시험과 SASW 시험 결과가 동일함을 확인할 수 있다. 이와 같은 두 가지 형태의 비교를 통하여 ICSW 시험의 신뢰성은 SASW 시험의 신뢰성과 거의 동일하다고 할 수 있다. 또한 ICSW 시험 측선 중심부에서 수행된 PBT 시험으로 획득한 결과는 Fig. 11에 도시한 바와 같이 다소의 분산정도는 있지만 거의 선형 관계를 보이고 있다. 즉 ICSW 시험으로 측정된 영탄성계수

Fig. 11 Correlation between subgrade reaction coefficients from PBT and Young's moduli from ICSW tests

(E_{SASW})는 PBT 시험으로 측정된 지반반력계수(k_{30})와 거의 비례관계에 있음도 확인할 수 있다. Fig. 11의 관계식에서 p_a 는 대기압이다.

3. 결 론

철도노반의 침하문제는 열차운행시 안전문제와 직결되기 때문에, 신속하게 원인 규명을 하여 대책을 강구하는 것이 필요하다. 침하는 결국 매질의 탄성계수와 연계가 되기 때문에, 지반매질의 어떠한 공학적 물성보다 탄성계수를 현장에서 직접 평가하는 것이 중요한데, 본 연구에서는 빈번한 열차통행으로 여유가 없는 운행선에서도 실시간으로 지반탄성계수의 단층영상을 탐사할 수 있도록 본 기법을 제안하게 되었다. 본 연구에서 제안한 기법은 실제 자갈도상 철도노반과 신설 철도노반 현장 등 두 개의 현장에 적용하여 그 신뢰성과 적용성을 확인하였다. 현장적용 단계에서 SASW, PBT, DCP, 이동형 FWD 등의 시험을 동일 현장에 적용하였으며, 본 연구 제안기법의 결과와의 비교를 통하여 확인한 사실은 1. 본 기법과 SASW 기법은 실무적으로 동일한 결과를 제시하였고, 2. DCP시험, 이동형 FWD 시험과 전반적으로 유사한 경향의 결과를 도출하였으며, 3. 본 기법으로 추정된 영탄성계수와 PBT로 측정된 지반반력계수와는 선형적 관계를 가지고 있다는 것이다. 향후 본 연구에서 제안

한 기법을 전용으로 구현할 수 있는 하드웨어와 소프트웨어가 개발된다면 실무에서의 적용성은 현저히 제고될 것이라고 판단된다.

후 기

본 연구는 국토해양부의 “대입경 조립재료 동적물성 산정을 위한 현장시험 기법 개발” 지원으로 이루어진 것으로, 이에 깊은 감사를 드리는 바입니다.

참고문헌

- [1] K.H. Stokoe, II, S.G. Wright, J.A. Bay, J.M. Rössset (1994) Characterization of geotechnical sites by SASW method. *Geophysical Characteristics of Sites, ISSMFE, Technical Committee 10 for XIII ICSMFE*, International Science Publishers, New York, pp. 15-25.
- [2] C.B. Park, R.D. Miller, J. Xia (1999) Multichannel analysis of surface waves (MASW): *Geophysics*, Vol. 64, pp. 800-808.
- [3] S.H. Joh, T.H. Kang, S.A. Kwon, C.W. Moon (2006) Accelerated Stiffness Profiling of Aggregate Bases and Subgrades for Quality Assessment of Field Compaction. In *Transportation Research Record 852*, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 22-31.
- [4] S.-H. Joh, K.H. Stokoe, II, I.-W. Lee, T.-H. Kang, James A. Bay (2005) Joint Inversion for Apparent Phase Velocities of Rayleigh and Love Waves, *Proceedings of GeoCongress*, Atlanta.
- [5] B. Menzies, M. Matthews (1996) The Continuous Surface-Wave System: A Modern Technique for Site Investigation, *Special Lecture: Indian Geotechnical Conference*, Madras.
- [6] M.C. Matthews, V.S. Hope, C.R.I. Cayton (1996) The use of surface waves in the determination of ground stiffness profiles. *Proc. Instn Civ. Engrs Geotech. Engng* 119, April, pp. 84-95.
- [7] S.-H. Joh, H.S. Koh, T.-H. Kang (2004) Wavelength Restoration Technique for the Automated Determination of Dispersion Curves in CSW Measurements. *Journal of KSCE*, pp. 35-47.
- [8] I.-W. Lee (2004) “Analytical Study for dispersed Phase Velocity Information of Love Waves,” *Journal of the Korean Society for Railway*, 7(4), pp.177-185.

접수일(2011년 3월 7일), 게재확정일(2011년 4월 7일)