

SASW 실험에 의한 철도 분니현상의 규명 Identification of Mud-Pumping Mechanism by SASW Measurements

강태호¹⁾, Tae-Ho Kang, 조성호²⁾, Sung-Ho Joh, 황선근³⁾, Seon-Keun Hwang, 이성혁⁴⁾, Song-Hyok Lee

¹⁾ 중앙대학교 지구환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil and Urban Eng., Chung-Ang University.

²⁾ 중앙대학교 건설대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang University.

³⁾ 철도기술연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Railroad Research Institute.

⁴⁾ 철도기술연구원 주임연구원, Researcher, Korea Railroad Research Institute.

SYNOPSIS : The railroad transportation system has more advantages over other transportation systems in terms of low cost, safety and mass transportation. The development in economy and social environments lead to the increase of the transportation between cities. As a result, the increased capacity of transportation system is required and maintenance of transportation facilities becomes more important. In the railroad system, mud-pumping is one of the troubles to cause distortion of rails and progressive disrapture of subgrade. In this study, SASW measurements were performed to investigate stiffness structures at the sites with mud-pumping and without mud-pumping. Comparison of the stiffness structures revealed the mechanism of mud-pumping and provided information to choose measures for the mud-pumping.

KEYWORDS : SASW, mud-pumping, V_s profile, railroad subgrade

1. 서론

사회 경제가 발달하면서 도시간의 인적 이동과 물적 이동이 증가하면서 사회간접시설도 역시 증가하게 되었다. 그리하여 좀더 적은 비용, 좀더 안전하고 대량 수송이 가능한 수송 시스템을 필요로 하였고, 그러한 장점을 갖고 있는 철도 수송시스템이 부각되었으며, 그에 따라 유지 관리 시스템의 중요성도 강조되고 있다. 분니 현상은 노반의 흙이 지하수 또는 우수의 침입과 반복되는 열차의 하중에 의하여 진흙화되어, 열차 통과시 생기는 압력에 의한 펌프 현상에 의해서 흙탕물이 도상 표면으로 분출하는 현상으로 철도 노반에 매우 심각한 영향을 미치고 있다. 분니 발생은 기본적으로 불량한 지반상태, 우수 및 지하수, 열차 진동의 세가지 요인의 복합적 작용에 의하여 초래되는데, 본 연구에서는 국내 철도 노반의 분니 현상을 규명하기 위하여 이 세가지 요인중 분니현상을 유발하는 지반상태를 조사하는데 중점을 두고자 한다. 구체적으로는 SASW 기법에 의해서 분니 발생 지역과 분니 비발생 지역의 층상구조와 강성 주상도를 추정하고, 분니 발생 및 비발생 개소에서 채취한 시료에 대하여 다짐, 액·소성, 체분석, 비중, 함수비 시험을 시행하여, 분니현상을 이해하기 위한 분석 자료로 활용하고자 하였다.

이렇게 본 연구에서는 분니 발생 지역과 비발생 지역 각각에 대한 강성 주상도, 현장에서 채취한 시료에 대한 기본 물성 실험 결과 등의 여러 지반공학적 특성을 비교 분석하여 분니 발생 지역의 지반공학적 특성을 파악함으로써, 국내 철도 노반의 분니 발생에 대한 구체적인 원인을 규명하고, 이에 근거하여 본격적이고 영구적인 분니 대책을 강구하는데 필요한 기본자료를 제공하고자 한다.

2. SASW 기법의 개요

SASW (Spectral-Analysis-of-Surface-Waves, 주파수 영역 표면파 해석) 기법은 지반의 깊이별 전단 강성도 (shear stiffness)의 변화를 비파괴적으로 평가하기 위하여 성공적으로 적용되어 왔다. SASW 실험은 그림 1에서 도시한 바처럼, 기본적으로 지표면이나 구조물의 표면에서 물리적인 충격이나 진동을 가하여 응력파를 발생시키고, 일정 거리만큼 떨어진 위치에서 충격이나 진동으로 인한 지반 및 구조물의 진동을 측정함으로써 수행이 되는데, 충격이나 진동을 측정하는 감진기는 발진원과 동일선상에 위치하도록 설치하게 된다. SASW 실험은 두 지점에서 기록된 응력파 진동간의 위상각 차이(phase difference)를 여러 감지기간 거리를 이용하여 측정하는 것이 있다.

현장에서 측정된 위상각 차이로부터 일련의 파장(wavelength)에 대하여 응력파의 위상각 속도(phase velocity)를 결정하는데, 위상각 속도는 상응하는 파장과 유일한 관계를 이루게 된다. 이러한 파장에 대한 위상속도의 관계를 분산곡선(dispersion curve)이라고 한다. 이 분산곡선은 평가 대상인 부지의 서명(書名)과도 같은 것으로, 특정 부지에 대해서 분산곡선은 유일하게 결정되어진다. 현장에서 실험에 의해 결정된 분산곡선은 실험분산곡선(experimental dispersion curve)이라 하며, 각 감지기간 거리에 대한 실험분산곡선들을 모두 종합한 곡선을 복합실험분산곡선(composite experimental dispersion curve)이라고 한다. 이 복합실험분산곡선은 부지의 전단파 속도 추상도를 도출하는데 사용이 된다.

전단파 속도 추상도의 도출은 역산해석(inversion analysis)이나 반복적 정모델링 해석(iterative forward modeling analysis)에 의해서 가능하다. 이는 근본적으로 전단파 속도 추상도를 가정하고 그에 대하여 이론적으로 계산된 분산곡선, 즉, 이론분산곡선(theoretical dispersion curve)과 실험분산곡선이 일치될 때까지 반복적으로 가정한 전단파 속도 추상도를 변화시켜 나가는 것이다. 이러한 전단파 속도 추상도의 가정에 대한 수정이 최적화 이론에 의해서 수행이 되면 이를 역산해석이라고 하고, 인위적으로 인간의 판단에 의해서 수정이 되면 반복적 정모델링 해석이라고 한다. 특히, 역산해석에는 복합실험분산곡선(composite experimental dispersion curve)을 추세선(curve fitting; 회귀분석)등의 기법을 이용하여 하나의 대표분산곡선(representative compact dispersion curve)을 만든 후, 이 대표분산곡선(representative dispersion curve)과 이론분산곡선(theoretical dispersion curve)이 일치시키는 역산 기법인 전반역산(global inversion)과 각 감지기간 거리에 해당하는 일련의 실험분산곡선들을 이에 상응하는 이론분산곡선들과 개별적으로 일치시키는 역산해석인 배열역산(array inversion)해석이 있다.

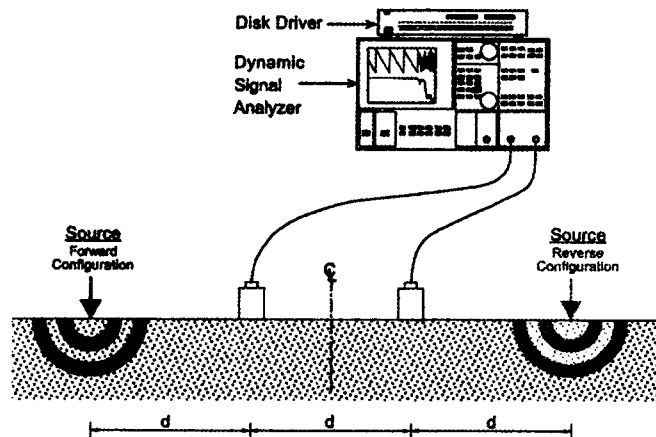


그림 1. 기본적인 SASW 실험 장비와 구성

3. 실험 절차 및 구성

3.1 철도 노반에서의 SASW 실험

분니현상은 철도의 기능 저하를 야기시키는 주요인의 하나로 열차하중을 분산시켜주는 발라스트가 연약한 노반 속으로 관입됨으로써 시작되기에, 노반의 강성도는 분니발생 가능성의 척도로 사용될 수 있다. 본 연구에서는 국내 철도 지반의 분니 발생원인을 규명하기 위하여 분니 발생개소 및 분니 비발생 개소에서 비파괴적·비관입적으로 노반의 상태를 조사하는 SASW 실험을 수행하였으며, 아래에 구체적인 SASW 실험구성과 SASW 실험으로부터 도출한 결과를 제시하였다.

3.2 실험구성

철도기술연구원과 철도청의 협조 하에 경부선 66 km~124 km 구간 중 분니가 심한 지역 5개소와 분니가 발생하지 않는 지역 3개소에서 SASW 실험을 수행하였으며, 구체적인 실험지점과 위치는 표 1에 제시된 바와 같다. 분니 발생 원인을 규명하기 위한 분니발생개소에서의 SASW 실험은 침목과 침목 사이에 감지기를 설치하여 수행하였다.

일반적으로 자갈층은 간극사이가 채워지지 않은 느슨한 상태이였기에 탄성파의 전파가 매우 양호하지 못하였고 SASW 실험에서의 측정된 자료의 상태도 비교적 양호하지 못하였다. 이러한 상태에서 전파를 측정하기 위해서 감지기를 설치할 표면을 인근 지역에서 구한 양질의 토사로 정지한 후에 SASW 실험을 수행하였다. 경부철도의 궤도 위 자갈도상에서 수행한 기본적인 SASW 실험 구성은 그림 1에 도시되어 있는 바와 같다.

SASW 실험 수행을 위해서 하나의 발진원과 두 개의 감진기를 사용하였으며, 발진원으로는 고주파수의 에너지를 발생시키기 위하여 소형 망치를 이용하였다.

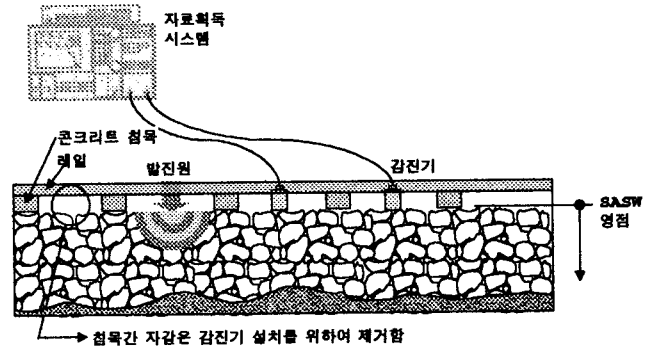


그림 2. 철도 궤도의 자갈도상에서 수행된 SASW 실험의 기본 구성

SASW 실험에 의한 철도 노반의 지반조사는 자갈도상과 노반토의 강성조사에 주목적이 있기에 SASW 실험으로 측정하고자 하는 최소 깊이는 약 1m로 정하였다. 따라서, 1m 심도까지 지반 강성주상도를 구하기 위해서 사용한 감지기간 거리로는 0.2, 0.25, 0.3, 0.6, 0.8, 1.6, 2 m 중 적절한 것을 선택하여 사용하였다. 침목간 거리가 0.58 m 이기에 이 이외의 감지기간 거리는 사용하기가 다소 무리가 있었다.

자갈도상에서의 SASW 실험은 탄성파가 집중하여 전파하지 못하고 쉽게 분산되기 때문에 일반 지반에 비해서 매우 어려운 편이다. 따라서, 본 연구에서 목표로 하였던 철도노반 지반조사를 위하여 소형 컴팩터(compactor), 바이브레이터 (vibrator), 일반 소형 망치 등을 시도하여 보았고, 이 중 현장여건, 실험환경 등을 고려하여 일반 소형망치를 사용하는 것을 원칙으로 하였다.

표 1. 분니현상을 규명하기 위하여 수행된 SASW 실험 부지

부지	분니/비분니	지점	실험위치
조치원 A	분니	경부 상행선 124km+8	침목간 자갈도상
조치원 B	분니	경부 상행선 124km+230	침목간 자갈도상
	비분니	경부 상행선 124km+165	침목간 자갈도상
천안	분니	경부 상행선 95km+590	침목간 자갈도상
성환	분니	경부 상행선 93km+570	침목간 자갈도상
	비분니	경부 상행선 93km+570	노건
평택	분니	경부 상행선 66km+200	침목간 자갈도상
	비분니	경부 상행선 66km+200	노건

4. 자료분석 및 해석

철도 노반에 대한 SASW 실험은 모두 8개소에서 수행되었으며, 각 지점에서의 실험시 현장에서 저장한 Transfer Function은 IBM-PC 호환 퍼스널 컴퓨터의 윈도우즈 환경하에서 실행되는 소프트웨어인 SEISM(Joh, 1997)으로 위상각 스펙트럼을 분석하였고, 분석된 결과를 근거로 결정한 분산곡선에 대하여 FIT7(Joh, 1996)에 의해 역산해석하여 S-파 속도 주상도를 결정하였다. 본 연구에서 위상각 스펙트럼을 분석하기 위하여 사용한 프로그램 SEISM은 WinSASW (Joh, 1992)의 개정판이라고 할 수 있으며, 시간-주파수 영역에서 파동의 전파를 시각화하여 주는 거보 스펙트럼을 형성하여 도시해 주는 기능을 가지고 있다. 위상각 스펙트럼의 분석에 있어서 거보 스펙트럼의 사용은 추가 정보의 확보가 가능하다. 특히, 강성의 대비가 뚜렷한 두 매체가 접해 있는 경우, 거보 스펙트럼은 각 층에

구속되어 전파되는 파군의 존재를 확인시켜주며, 그러한 분석을 근거로 위상각 스펙트럼을 분석하면 더욱 정확한 분석이 가능하다.

SASW 실험에 대한 역산해석 결과를 얻은 후, 결과에 대한 분석을 수행한 결과 철도 노반에서의 SASW 실험으로 자갈 도상과 노반까지 층상구조와 각 층의 S-파 속도를 추정할 수 있었다. 본 논문에서는 표 1에 제시된 부지 중 조치원 “B” 분니 개소에 대한 경우를 구체적으로 인용하였다.

4.1 조치원 “B” 분니 개소

조치원 “B” 분니 개소라고 명칭한 경부 상행선 124km+230 지점은 본 연구에서 조사한 전체 분니 개소 중 가장 분니가 심한 곳이었다. 이 지점에서는 총 2회에 걸쳐서 철도 레일 사이의 발라스트를 걷어내고 SASW 실험을 수행하였는데, 첫 번째 시험을 수행한 날에는 다소의 강우가 있어서 열차 통과시에 분니가 심하게 압출되는 현상을 관찰할 수 있었다. 비가 오는 열악한 환경 속에서 수행한 SASW 실험은 얇은 심도에 해당하는 측정치에 있어서 매우 심각한 횡방향 변이성을 제시하여 역산해석을 수행할 수 없었는데, 이는 발라스트에 침투한 강우로 인하여 도상의 발라스트 층이 국부적으로 느슨하게 되어 심각한 횡방향 변이성이 야기되었기 때문으로 추측이 된다. 그리하여, 9월 후 10월 21일 약 2~3일간 전혀 강우가 없었던 날을 택하여 두 번째 SASW 실험을 수행하였다. SASW 실험에 의하여 결정된 복합실험분산곡선, 대표실험분산곡선은 각각 그림 3a와 4a에 도시하였으며, 그림 3의 대표실험분산곡선에 대하여 역산해석을 수행한 결과로 도출한 이론분산곡선과 발라스트 층과 철도 노반의 전단강성 주상도는 각각 그림 5a와 6a에 도시하였다.

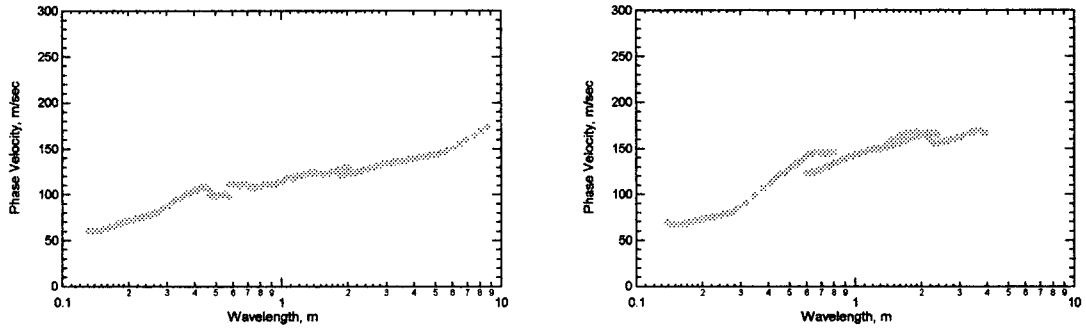
그림 6a의 전단강성 주상도에 의하면, 발라스트 층은 약 30~40cm 정도의 두께를 가지고 있는 것으로 추정이 되며, 그 하부에 이어지는 노반토는 130~160 m/sec의 연약한 강성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이러한 연약층은 심도 2.2 m까지 이어지며, 그 하부에는 평균 200 m/sec의 층이 위치하고 있음이 SASW 실험자료에 대한 역산해석의 결과로 추정되었다.

조치원 “B” 분니 개소에서 추정된 발라스트 하부의 노반토는 본 연구에서 조사한 전체 지반 중 가장 연약한 지반으로 나타났다. 특히, 타지역에서는 심도 1m 이하에서는 대부분 200 m/sec 이상의 강성을 보이고 있지만, 조치원 “B” 분니 개소에서는 불과 140 m/sec 정도의 강성만 나타내고 있다. 이러한 연약한 강성은 발라스트가 열차진동으로 인하여 노반에 관입하기 매우 양호한 조건이라고 할 수 있다. 또한, 두 번째 SASW 실험을 수행한 날 감지기 설치를 위하여 발라스트를 침목 하단까지 걷어내었을 때, 바닥에서 물이 솟아오르고 있음을 알 수 있었다. 이는 이 지점에 물 주머니(water pocket)이 형성되어 있어서 강우가 그친 후 여러 날이 지나도록 물 주머니가 소멸되지 않고 지속적으로 존재하고 있음을 시사하였다. 이러한 두 가지 사실은 조치원 “B” 분니 개소에서 가장 심각하게 분니 현상이 일어나고 있음을 잘 설명하고 있다.

4.2 조치원 “B” 비분니 개소

경부 상행선 124 km+165 지점은 분니가 발생하지 않는 개소로서 65m 떨어진 조치원 “B” 분니 개소와 지반공학적 지반특성에 있어서의 차이를 비교하기 위하여 철도 레일 사이의 발라스트를 걷어내고 SASW 실험을 수행하였다. SASW 실험 결과에 대한 역산해석의 결과인 전단강성 주상도가 그림 6b에 도시되어 있는데, 이를 인접지역인 조치원 “B” 분니 개소와 비교하여 보면, 두 지반 사이의 강성차이를 확연하게 알 수 있다. 전반적으로 조치원 “B” 비분니 개소의 측정 심도인 2.2m까지 비분니 개소의 지반강성이 분니 개소의 지반강성보다 지배적으로 크다는 것을 알 수 있다. 그 차이는 발라스트 층, 발라스트 직하의 노반층, 1m 심도 하부의 원지반층 모두에서 나타나는데, 1m 심도 하부의 원지반층의 강성차이는 무려 140 m/sec에 이르고 있다. 따라서, 이러한 비분니 지반의 높은 강성의 노반층은 발라스트의 침투를 용이하지 않게 하며, 특히 1m 심도 하부의 강한 층은 발라스트 직하 노반을 열차진동으로 인한 침목 및 지반의 탄성침하를 저하시키는 효과를 나타나게 된다. 이러한 안정된 노반층으로 인하여 발라스트 층의 강성, 즉, 발라스트 층의 다짐정도도 200 m/sec 이상으로 매우 양호함을 알 수 있다.

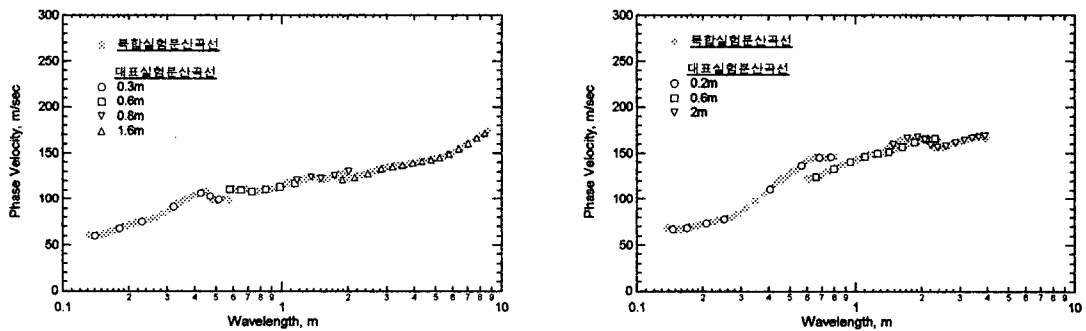
이러한 지반의 강성 측면이외에도 조치원 "B" 비분니 개소에서는 SASW 실험을 위하여 침목간 발라스트를 걷어 내었을 때, 분니발생을 촉진시키는 물 주머니를 발견할 수 없었다. 결국, 조치원 "B" 비분니 개소에서는 분니 발생의 3요건, 즉, 연약한 지반, 물, 진동하중 중 처음 두 가지 요건이 배제되어 있어서 분니가 발생하지 않았다고 사료된다.



a. 조치원 "B" 분니 개소

b. 조치원 "B" 비분니 개소

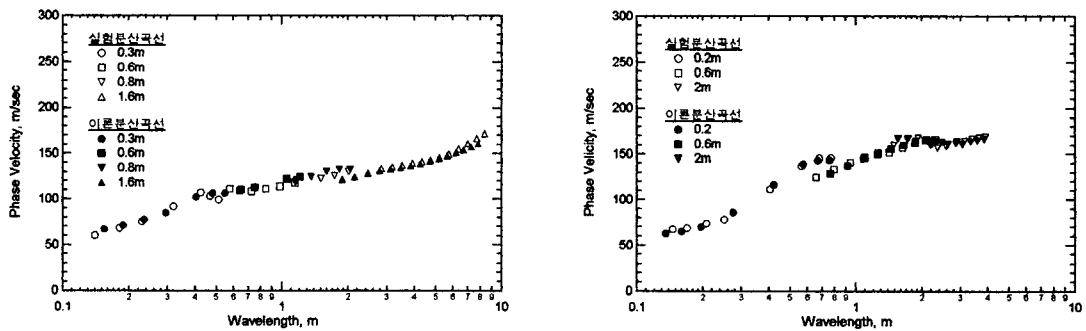
그림 3. SASW 실험으로 측정된 복합실험분산곡선



a. 조치원 "B" 분니 개소

b. 조치원 "B" 비분니 개소

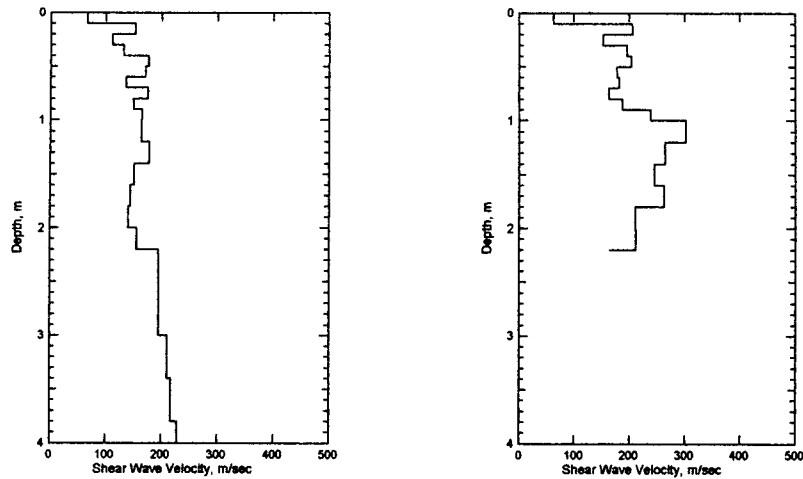
그림 4. SASW 실험으로 측정된 대표실험분산곡선



a. 조치원 "B" 분니 개소

b. 조치원 "B" 비분니 개소

그림 5. 역산해석으로 구한 이론분산곡선과 실험분산곡선의 비교



a. 조치원 "B" 분니 개소

b. 조치원 "B" 비분니 개소

그림 6. SASW 실험으로 구한 S-파속도 주상도

5. 노반토에 대한 실내실험

5.1 서론

철도 분니 현상 규명을 위하여 SASW 기법에 의한 지반조사 이외에 분니 발생 지역 및 비발생 지역의 노반토에 대한 물성을 파악하기 위하여 일련의 실내실험을 시행하였다.

분니 발생지역의 노반토는 약 50cm 이상되는 발라스트를 걷어내고 원지반의 노반토를 채취할 수 없었기에, SASW 실험이 수행된 지역에 인접한 철도 노건에서 채취하였으며, 현장 함수비를 위하여 밀폐 용기에 보관 운송하였다.

분니 발생 원인을 규명하기 위한 노반토에 대한 실내실험으로 현장함수비, 체분석, 액성한계, 소성한계 등을 수행하였고, 참고 자료를 위하여 비중, 다짐시험 등도 수행하였다.

실내실험을 위하여 노반토를 채취한 지역은 표 2에 제시된 바와 같다.

표 2. 노반토 시료 채취 위치

노반토 시료번호	시료채취 위치	비 고
1	경부 상행선 124km+8	조치원 "A" 분니지반
2	경부 상행선 124km+230	조치원 "B" 분니지반
3	경부 상행선 124km+165	조치원 "B" 비분니지반
4	경부 상행선 95km+590	천안 분니지반
5	경부 상행선 93km+570	성환 분니지반
6	경부 하행선 93km+570	성환 비분니지반
7	경부 하행선 66km+200	평택 분니지반
	매우 두꺼운 도상발라스트 두께로 인하여 시료채취 불가하였음.	
8	경부 하행선 66km+200	평택 비분니지반

5.2 노반토의 물성과 분니 발생 가능성

일본 철도기술연구소는 일본 전국적인 규모로 노반 분니가 발생하지 않는 지역에 대한 노반토의 물성에 관하여 조사를 하였고, 그 결과 노반 분니가 발생하지 않는 노반토의 토질조건을 제시하였다. 그 결과 제시된 조건은 흙의 컨시스턴스와 입도에 관한 조건으로서 다음과 같이 정리되어지며, 다음의 네 가지 조건이 동시에 만족될 때, 분니가 발생하지 않는 것으로 보고되고 있다.

$$LL < 35\%, \quad PI < 9\%, \quad P_{0.42} < 0.7, \quad r < 0.65$$

여기서, $P_{0.42}$ 는 40번체 통과백분율, r 은 200번체 통과백분율과 40번체 통과백분율의 비($=P_{0.075}/P_{0.42}$)이다.

본 연구에서 수행한 경부철도노반의 노반토에 대한 실내실험 결과로 Casagrande의 소성도[그림 7]와 세립혼합비율도[그림 8]를 작성하였다. 일본 철도 기술 연구소에서 제시한 분니 비발생 조건과 실험의 결과를 비교 하여 보았다. 하지만 실험에서 나온 결과와 일본 철도 기술 연구소의 조건과는 많은 것이 일치하지 않는 것을 알 수 있었다. 이렇게 일본 철도기술연구소의 분니 비발생 조건을 국내지반에는 적용하는 것이 원활하지는 않는데, 이것은 발라스트 밑의 원지반의 시료를 채취하기는 현실적으로 불가능하여 인접지역에서 원지반에 가장 가까울 것으로 추정되는 시료를 채취하였기에 원지반의 물성과 다를 수도 있고, 일본 철도 기술연구소에서 제시된 기준이 1955년 시행된 분니 지반조사 결과를 기초로 작성된 것으로 모든 지반에 대하여 완벽하게 적용되지 않을 수도 있기 때문으로 보인다. 흙의 컨시스턴스에 대한 조건인 Casagrande의 소성도 기준은 대체로 국내지반에서도 잘 부합하는 것으로 나타났다. 분니 지반의 노반토가 함유하고 있는 점토성분이 분니 현상에 기여하고 있음을 확인 할 수 있었다. 그러나, 일본 철도기술연구소의 분니 비발생 조건 중 세립혼합비율도에 대한 조건은 다소 국내 지반에 부적합한 것처럼 나타났다. 이는 주로 시료 채취 지역에 따른 노반토의 대표성 여부, 일본 철도기술연구소 기준의 적용범위 및 조건 등에 대한 제약조건으로 인한 것으로 판단된다.

일본 철도기술연구소의 기준을 이용한 평가이외에 철도 분니 발생의 3대 요인 중 하나인 물에 대한 확인을 위하여 현장에서 채취한 시료의 함수비를 조사하였는데, 분니가 발생한 지역의 시료가 분니가 발생하지 않은 지역의 시료보다 함수비가 큰 것으로 나타났다. 구체적으로 분니 발생의 함수비 조건을 규명하기는 어려웠지만, 분니발생에 대한 물의 기여를 간접적으로 확인할 수 있었다.

5.3 실내 시험 결과

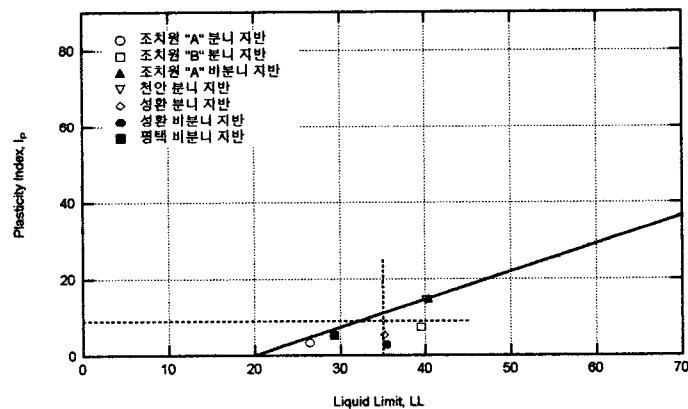


그림 7. Casagrande의 소성도

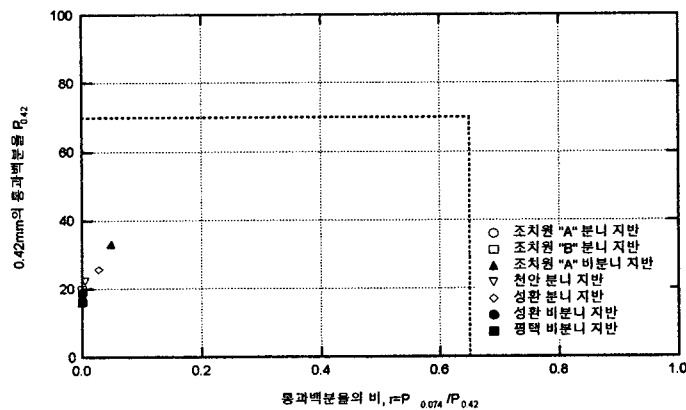


그림 8. 세립혼합비율도

6. 결론

본 연구에서는 국내 분니 발생 지역과 비분니 발생 지역 각각에 전단강성 주상도를 비교하여 분니발생 지역의 지반 공학적 특성을 파악하고, 분니 발생 및 비발생 개소에서 채취한 시료에 대하여 다짐, 액·소성, 체분석, 비중, 함수비 시험을 시행하여 분니 발생 원인을 규명하려고 하였다.

분니 및 비분니 지반의 공학적 특성을 파악하기 위한 지반조사는 비파괴 비관입적으로 지반의 깊이에 따른 전단강성 구조를 조사하는 SASW 실험에 의해서 수행되었으며, SASW 실험으로 분니발생 지역의 지반이 분니 비발생지역보다 상대적으로 연약하다는 것을 확인하려는 데 주력하였다. 조치원 "B" 분니 개소와 조치원 "B" 비분니 개소를 비교하여 보면, 두 지반 사이의 강성차이를 확연하게 알 수 있다. 전반적으로 조치원 "B" 비분니 개소의 측정 심도인 2.2m까지 비분니 개소의 지반강성이 분니 개소의 지반강성보다 지배적으로 크다는 것을 알 수 있었다. 철도 분니 발생 지역의 발라스트 관입이 연약한 곳에서 발생하는데, SASW의 실험을 통하여 분니 발생지역이 상대적으로 비분니 지역에 비하여 연약한 지층이 존재한다는 것이 확인되었다.

철도 노반토에 대한 실내실험 결과는 Casagrande의 소성도와 세립혼합비율도의 형태로 정리하여 일본 철도기술연구소에서 제시한 비분니 발생지반에 대한 조건과 비교하였다. 이를 통하여 분니 발생개소의 노반토가 함유하고 있는 점토성분이 분니 현상에 기여하고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나, 일본 철도기술연구소의 분니 비발생 조건 중 세립혼합비율도에 대한 조건은 다소 국내 지반에 부적합한 것처럼 나타났는데, 이는 주로 시료 채취 지역에 따른 노반토의 대표성 여부, 일본 철도기술연구소 기준의 적용범위 및 조건 등에 대한 제약조건으로 인한 것으로 판단된다. 철도 분니 발생의 요인의 하나인 물에 대하여 확인을 위하여 현장에서 채취한 시료의 함수비를 조사하였는데, 분니 발생지역의 시료가 분니 비발생 지역의 시료에 비하여 함수비가 큰 것으로 나타났다. 구체적으로 분니 발생의 함수비 조건을 규명하기는 어려웠지만, 분니발생에 물이 기여하고 있다는 것을 확인할 수 있었다.

결과적으로 본 연구에서 지반의 강성이 연약하여 철도궤도의 진동을 흡수할 수 없는 경우에 분니현상이 심화된다는 것이 밝혀졌지만, 분니현상의 가능성이 있는 지반에 대한 절대적인 기준을 제시하기 위해서는 향후 보다 많은 지역의 사례를 축적하여 조사할 필요가 있다고 사료된다.

참고문헌

1. Haack, I. A., Schreyer, J., and Jackel, G. (1995). "State-of-the-art of Non-destructive Testing Methods for Determining the State of a Tunnel Lining," *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 10, No. 4, pp. 413-431.
2. Heisey, J. S., Stokoe, K.H., II, Hudson, W. R. and Meyer, A. H. (1982). "Determination of in situ shear wave velocities from Spectral-Analysis-of-Surface-Waves." Research Report No. 256-2 Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin
3. Joh, S.-H. (1996). "Advances in data interpretation technique for Spectral-Analysis-of-Surface-Waves (SASW) measurements." Ph.D. Dissertation, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
4. Joh, S.-H. (1996). FIT7: Program for Forward Modeling Analysis, Inversion Analysis and Time Trace Generation, the University of Texas at Austin, Austin, Texas, U.S.A.
5. Joh, S.-H. (1998). SEISM: A program for Stable Determination of Experimental Dispersion Curve Using IRF Technique from SASW Measurements, Chung-Ang University at AnSung.
6. Joh, S.-H. and Stokoe, K. H., II (1997). "Impulse response filtration technique for the determination of phase velocities from SASW measurements." 한국지반공학회지, 제 13권 1호.
7. Joh, S.-H. and Kim, D.-S. (1997). "Data Interpretation and Analysis of SASW Measurements," Seventh International Conference Computing in Civil and Building Engineering
8. 일본 철도기술연구소 (1993). 철도노반의 분니현상의 해명과 그 방지대책, 철도기술연구보고.