

# 불포화특성을 반영한 궤도 상부 흙노반 재료의 변형특성 예측모델 수립 가능성 검토

## Predictive Models for Deformation Characteristics of the Rail Trackbed Soils Reflecting the Unsaturated Soil Properties

임유진<sup>\*†</sup>, 최찬용<sup>\*\*</sup>, 조호진<sup>\*</sup>, 정영남<sup>\*</sup>, 박재범<sup>\*</sup>

Yujin Lim<sup>\*†</sup>, Chanyong Choi<sup>\*\*</sup>, Hojin Cho<sup>\*</sup>, Yeungnam Jeong<sup>\*</sup>, Jaebeom Park<sup>\*</sup>

**Abstract** It is important to construct a prediction model of subgrade soil under track in order to analyze the dynamic behavior of the trackbed foundation accurately. The prediction model of subgrade soil must consider the stress level and characteristics of unsaturated characteristics of the soil such as suction. In this study, RC tests and suction tests (filter paper and pressure pate tests) were conducted at the same condition (degree of compaction and water content) to get SWCC and shear modulus variation with shear strain in order to check possibility of establishing a correlation between unsaturated characteristic parameter and shear modulus prediction model. Development of such a model can make it possible to construct a mechanistic design method of trackbed foundation in the future.

**Keywords :** Trackbed, Degree of Saturation, Unsaturated soil test, Mid-size resonant column test, model

**초 특** 열차 하중에 의해 발생하는 노반의 동적 거동특성을 정확히 분석하기 위해서는 궤도하부구조 구성층의 응력수준 및 포화도변화 특성 등 역학적 물성변화를 반영할 수 있는 거동모델의 수립이 매우 중요하다. 본 연구에서는 다져진 궤도 상부 흙노반 재료를 대상으로 함수비 변화에 따른 불포화시험(Filter paper test, Pressure plate test)과 동일한 조건으로 다져진 시편을 대상으로 중형공진주시험을 실시하였으며, 시험을 통해 산출된 불포화 특성곡선과 진단탄성계수 변화의 상관관계 모델 수립가능성을 분석, 검토하였다. 불포화특성 변화 및 응력수준변화를 반영한 이와 같은 거동모델의 개발은 향후 역학적 궤도노반 설계법에 사용될 수 있을 것이다.

**주요어 :** 노반, 포화도, 불포화시험, 중형공진주시험, 상관모델

### 1. 서 론

현재 철도설계기준(2013)에 의하면 국내 흙 분류규준은 다짐용이성의 판단을 위해 통일분류법(USCS)에 근거하여 흙재료를 먼저 구분하고 이를 [A군], [B군], [C군], [D군] 등으로 분류한다. 그러나 이와 같은 군분류 기준은 구체적인 특성치에 대한 제시가 결여되어 있으며 각 흙재료의 다짐 후 역학적 특성을 간과하고 단순히 입도분포( $P_4$ ,  $P_{200}$  등)와 컨시스턴시( $PI$  등) 위주의 분류기준만을 고려한 것으로서 다짐상태에 따라 크게 변하는 흙재료의 변형특성(탄성계수)에

† 교신저자: 배재대학교 공과대학 건설환경철도공학과(yujin@pcu.ac.kr)

\* 배재대학교 건설환경철도공학과

\*\* 한국철도기술연구원

미치는 근원적인 인자들인 함수비(포화도), 건조다짐밀도 및 응력수준 등을 고려하여 새롭게 분류기준이 수정, 제시되어야 할 필요가 있다. 또한 흙재료는 설계기준에 의한 다짐 후 공용기간 중 기후변화에 따라 영향을 받게 되는데, 이는 흙재료의 공학적 특성이 공용중 함수비의 변화에 따라 다져진 흙노반의 역학적 성능을 좌우할 수 있음을 의미한다. 따라서, 본 연구에서는 함수비 변화 특히, 다져진 흙노반의 흡입력(suction)의 크기 변화에 따라 변형계수의 특성변화를 실험을 통해 분석하고자 하였다. 이를 위하여 철도레도 흙노반 신설구간에서 채취한 흙재료를 대상으로 함수비(포화도)변화에 따른 중형 공진주시험과 불포화시험을 각각 실시, 전단탄성계수 변화와 불포화 특성곡선 상관관계 모델 수립 가능성을 분석하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 함수특성곡선 모델을 이용한 불포화 실내시험

Fredlund & Xing(1994)은 모관흡입력( $u_a-u_w$ )의 최대 제한 값( $10^6$ kPa)을 고려하여 체적함수비를 나타낼 수 있는 함수특성곡선모델을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta_v = C(h) \frac{\theta_{sat}}{\left[ \ln \left[ \exp(1) + \left( \frac{\psi}{a_f} \right)^{b_f} \right] \right]^{c_f}} \quad (1)$$

여기서,  $\theta_v$ =체적함수비,  $\theta_{sat}$ =포화체적함수비( $=\theta_{opt}/S_{opt}$ ),  $\psi$ =모관흡입력(kPa),  $h_r$ ,  $a_f$ ,  $b_f$ ,  $c_f$ =모델상수이다.

불포화 실내시험(Filter paper, Pressure plate)은 ASTM 규정(D 5298, D 2325)에 근거하여 실시하였다. Filter paper 시험은 원통형 시편( $d=5$ cm,  $h=10$ cm)을 성형 후  $25^\circ\text{C}$ 의 온도가 유지되는 챔버내에 일정기간 방치하여 시편의 수분이 증발되고 필터페이퍼에 수분이 흡수(wet)되는 평형상태를 측정하여 모관흡입력을 산정하였다. Pressure plate 시험은 원통형 시편( $d=5$ cm,  $h=1$ cm)을 성형 후 Pressure 챔버내에 위치하여 일정압력을 가한 후 수분이 건조(dry)되는 상태를 측정하여 모관흡입력을 산정하였다. 함수비와 모관흡입력 관계는 Fig. 1 과 같으며 식(2)가 성립된다.

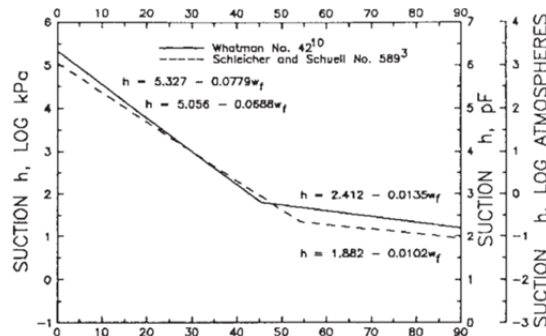


Fig. 1 Filter paper-Suction equation graph (ASTM D 5298)

$$\text{LOG}_{10}(h) = 5.327 - 0.0779\omega_f \quad (2)$$

여기서  $\omega_f$ 는 함수비(%)

## 2.2 함수비(포화도) 변화에 따른 전단탄성계수

지반의 전단탄성계수(G)-변형률( $\gamma$ )의 관계는 흙의 종류, 함수비, 구속응력( $\sigma_3$ ), 하중주파수( $f_r$ ) 등 다양한 조건에 따라서 매우 상이하게 나타난다. Rollins(1998)는 모래 및 자갈질 흙재료에 대한 정규화전단탄성계수 감소곡선 예측식을 식(3)과 같이 제시한 바 있다. 또한 Massarsch(2004)는 소성성분이 존재하는 점성토에 적용할 수 있는 유사한 정규화 전단탄성계수 감소곡선 예측식을 식(4)와 같이 제안하였다.

$$\frac{G_s}{G_{\max}} = \frac{1}{[1.2 + 16\gamma(1 + 10^{-20\gamma})]} \quad (3)$$

$$\frac{G_s}{G_{\max}} = \frac{1}{[1 + \alpha\gamma(1 + 10^{-\beta\gamma})]} \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 모델계수이다.

두 모델식을 참조하여 포화도 변화를 함께 고려할 수 있는 전단탄성계수(G)-변형률( $\gamma$ ) 모델 수립을 위해 AASHTO 2002 설계법에서 제안한 함수비 영향모델을 고려하였다(식 (5)).

$$\frac{E}{E_{opt}} = 10^{k_w \cdot (\omega - \omega_{opt})} \quad (5)$$

본 연구에서 시험대상으로 활용한 국내 흙노반 재료에 대하여 함수비 영향 대신 포화도에 의한 영향을 고려하고자 하였다. 즉 포화도를 고려한 전단탄성계수 예측모델은 식(6)과 같다.

$$\frac{G}{G_{opt}} = 10^{k_s \cdot (S - S_{opt})} \quad (6)$$

이러한 제안식은 식(4)와 결합하면 식(7)과 같은 형태로 변환할 수 있다.

$$G_s = G_{opt} \cdot 10^{k_s(S - S_{opt})} = \frac{G_{\max}}{[1 + \alpha\gamma(1 + 10^{-\beta\gamma})]} \quad (7)$$

여기서 S는 포화도(%),  $S_{opt}$ 는 최적함수비일 때의 포화도(%),  $G_{opt}$ 는 최적함수비일 때의 최대전

단단성계수(MPa),  $\gamma$ 는 전단변형률(%),  $k_s$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ 는 실험적으로 결정되는 상수이다.

### 2.3 불포화 실내시험 결과

함수비(포화도) 변화에 따른 흙재료의 함수특성을 파악하기 위하여 철도궤도 신설구간(Field 1)에서 노반 흙재료를 채취하여 소요의 다짐조건( $\gamma_{damx}$ -95% 이상)으로 다짐한 후 불포화시험을 실시하였다. Fig. 2의 시험결과는 체적함수비 대비 Pressure plate시험에서의 건조측 시험데이터와 Filter paper시험에서의 습윤측 시험데이터를 MS-SOLVER에 이용, Fredlund(1994) 예측식 곡선과 비교, 도시한 것이며 상당히 일치하는 결과를 획득하였다.

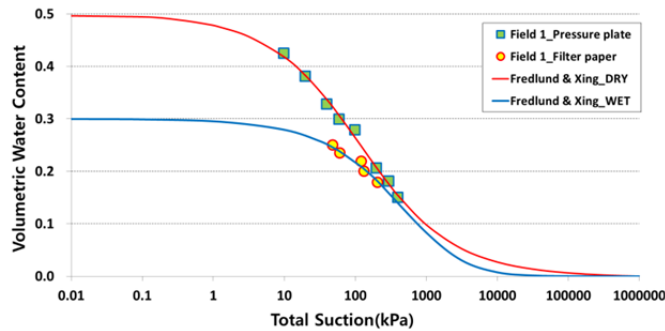


Fig. 2 Unsaturated soil test result

### 2.4 최적함수비 대비 포화도 변화에 따른 전단탄성계수(G)의 변화

Fig. 3은 동일한 철도궤도 신설구간 노반 흙재료에 대한 공진주시험결과를 정리한 것이다. 최적함수비( $\omega_{opt}$ )에 대응하는 최적포화도( $S_{opt}$ )에서 산출한 전단탄성계수( $G_{opt}$ ) 대비 포화도 변화에 따른 전단탄성계수 변화를 전단변형률( $\gamma$ ) 수준에 따라 비교하여 도시한 것이다. 분석결과 포화도가 낮은 상태의 건조측에서 포화도가 높은 습윤측으로 함수비가 증가할수록 최적함수비 대비 전단탄성계수( $G/G_{opt}$ )는 급격히 감소하는 경향을 보였다.

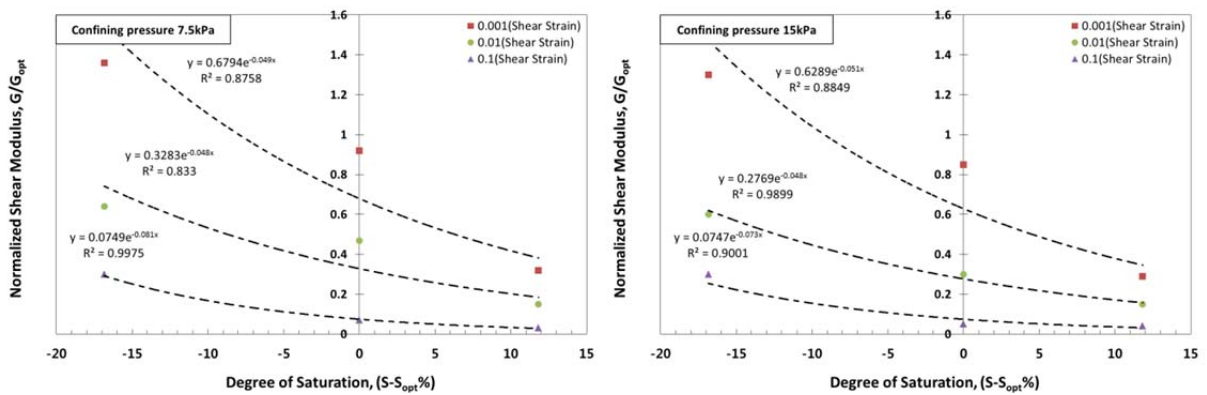


Fig. 3 Variation of  $G/G_{opt}$  at different degrees of saturation with increase of confining pressure

최적함수비 대비 전단탄성계수( $G/G_{opt}$ ) 감소곡선은 케도하부 흙노반의 변형률 수준과 구속압 크기 및 함수비 변화대역을 최적화시킬 경우 케도하부구조를 설계하는데 필요한 설계 파라미터로서 매우 효과적으로 사용될 수 있다.

### 2.5 모관흡입력 변화에 따른 포화도의 상관관계 분석

Fredlund(1994)는 모관흡입력( $u_a-u_w$ ) 대비 포화도( $S$ ) 관계그래프를 이용하여 잔류포화도( $S_r$ )를 추출, 유효포화도( $S_e$ ) 계산이 가능한 산정식(식 (8)) 및 모관흡입력과의 관계식(식 (9))을 함께 제시하였다. 이를 반영하여 불포화시험결과(Fig. 3)를 Fig. 4와 같이 정리하였다. 이는, 불포화시험을 통해 결정된 모관흡입력으로부터 유효포화도를 산정하고, 이를 포화도 변화에 따른 전단탄성계수 관계식(식 (7))에 대입할 경우 전단탄성계수의 전단변형률에 따른 변화식과 불포화 특성곡선과의 상관관계 모델 수립이 가능함을 의미한다. 이로서 현재 사용하는 함수비변화( $\omega - \omega_{opt}$ ) 또는 포화도변화( $S-S_{opt}$ ) 반영모델 보다는 모관흡입력 변화를 변형계수 예측모델에 반영하도록 하여 보다 현장조건에 근접한 역학적 해석이 가능할 수 있음을 의미한다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \tag{8}$$

$$S_e = \left\{ \frac{(u_a - u_w)_b}{(u_a - u_w)} \right\}^\lambda \tag{9}$$

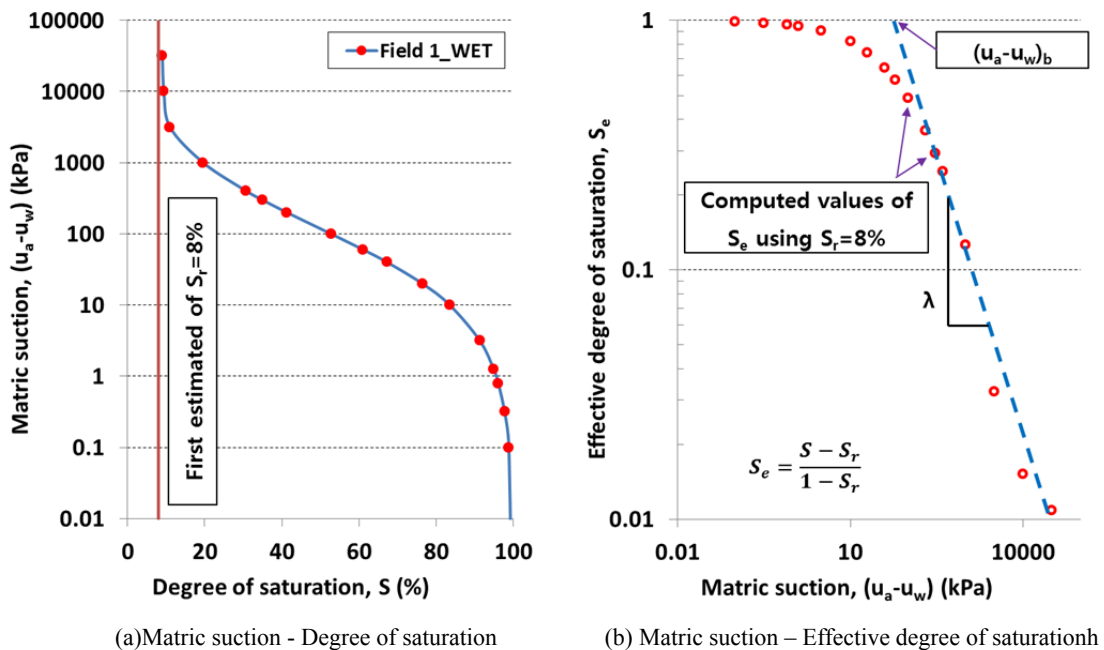


Fig. 4 Degree of saturation( $S$ ) – Matric suction graph

## 4. 결 론

본 연구에서는 철도궤도 흙노반 신설구간에서 채취한 흙재료를 대상으로 함수비(포화도)변화에 따른 중형 공진주시험과 불포화시험을 각각 실시, 전단탄성계수 변화와 불포화 특성곡선 상관관계 모델 수립 가능성을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 포화도 변화에 따른 궤도하부 다져진 흙노반 재료의 함수특성을 파악하기 위하여 불포화 실내시험을 실시하였다. 시험결과, Fredlund(1994) SWCC 예측식 곡선과 상당히 일치하는 결과를 획득하였다.

(2) 철도궤도 신설구간 흙노반 재료에 대하여 공진주시험을 실시하였다. 포화도가 낮은 상태의 건조측에서 포화도가 높은 습윤측으로 함수비가 증가할수록 최적함수비 대비 전단탄성계수는 급격히 감소하는 경향을 보였다.

(3) 불포화시험을 통해 결정된 모관흡입력으로부터 유효포화도를 산정하였으며, 이를 포화도 변화에 따른 전단탄성계수 관계식에 대입하면 전단탄성계수의 전단변형률에 따른 변화식과 불포화 특성곡선과의 상관관계 모델 수립이 가능함을 확인하였다. 이는 모관흡입력 변화를 변형계수 예측모델에 반영할 경우 보다 현장조건에 근접한 역학적 해석이 가능할 수 있음을 의미한다.

## 후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(15RTRP-B067919-03)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

- [1] Korea Rail Network Authority (2013) Design Specification for Railroad: Road bed
- [2] AASHTO (2002) 2002 Design Guide of New and Rehabilitated Pavement Structures, Research Report, National Cooperative Highway Research Program, USA.
- [3] M. Rollins (1998). Shear Modulus and Damping Relationships for Gravels, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, No. 124, pp. 396-405.
- [4] D.S. Kim (2012) Evaluation of Modulus and Load-Settlement Characteristics of Subgrade Soil used in Track Foundation, Master's Thesis, PaiChai University.
- [5] K. R. Massarsch (2004) Deformation properties of fine-grained soil from seismic test, Keynote lecture, *International Conference on Site Characterization*, 19-22 Sept. Porto, pp. 14.
- [6] D. G. Fredlund (1995) Soil Mechanics for Unsaturated Soils, pp. 112.
- [7] C.Y. Choi, D.S. Kim, H.J. Cho, J.B. Park, Y.J. Lim (2015) Analysis of Shear Modulus-Shear Strain-Degree of Saturation Characteristics of Compacted Subgrade Soil used as Railway Trackbed, *Journal of the Korean Society for Railway*, 18(2), pp. 127-138