

# 선회다짐기를 이용한 노상토의 다짐특성

이관호

국립공주대학교 건설환경공학부

## Characteristic of Subgrade Soil using Gyrotory Compactor

Kwan-Ho Lee

Department of Civil & Environmental Engineering, Kongju National University

**요약** 본 선회다짐기는 도로 현장에서 가장 많이 사용하는 다짐 롤러의 다짐 특성을 반영하기 위해 개발된 실내 다짐장비이다. 기존의 충격을 이용한 프록터 다짐과는 달리 압축력과 회전을 통한 전단력을 이용한 현장 롤러의 다짐특성을 모사하였다. 본 연구의 목적은 기존의 프록터 다짐과정에서 얻기 힘든 전단응력 및 다짐중의 밀도변화 특성 등을 선회다짐기를 이용하여 평가하고, 이를 도로설계에 반영할 수 있는 기초자료로 활용하는 것이다. 이러한 선회다짐기를 이용하여 도로 현장 및 지하매설물 시공 시 가장 많이 사용되는 모래 및 노상토의 다짐 특성을 분석 및 평가하였다. 선회다짐기를 이용한 다짐 특성은 기본적으로 선회다짐 횟수와 시편의 높이, 다짐밀도, 간극비, 포화도 및 전단응력이다. 선회다짐 횟수가 증가할수록 시편의 높이는 작아지고, 간극비는 작아지고, 다짐 밀도는 증가하고, 포화도는 증가하며, 전단응력은 커지는 경향을 보였다. 전단응력은 다짐 초기에 200kPa 수준에서 시작하여 선회다짐 횟수 50회 정도가 되면 대략 330-350 kPa 수준으로 증가하였다. 동일한 시편의 경우 함수비가 커짐에 따라 다짐 밀도, 포화도 및 전단응력이 증가하는 경향을 보였다. 선회다짐기를 이용한 다짐은 밀도 및 전단응력 등 도로 설계 시 필요한 물성을 측정할 수 있는 장점을 가지고 있어 이를 도로설계시 반영한다면 더 공학적인 도로설계를 할 수 있을 것이다.

**Abstract** A gyrotory compactor was developed to reflect the field compaction roller, which is commonly used in road construction. Unlike the compaction of the proctor using a conventional impact load, the gyrotory compactor simulated the field roller compaction characteristics using the compressive force by the roller weight and the shear force through the rotation of a roller. The purpose of this study was to evaluate the shear stress and density change characteristics during compaction, which are difficult to obtain in the existing compaction process of the proctor, and to utilize it as a basic data for road design. The compaction characteristics of sand and subgrade soils were also analyzed and evaluated using the gyrotory compactor. The compaction characteristics obtained using the gyrotory compaction are basically the number of gyrations, height of the specimen, compaction density, void ratio, degree of saturation, and shear stress. As the number of gyrations increased, the height of the specimen decreased, the compaction density increased, the void ratio decreased, the degree of saturation increased, and the shear stress tended to increase. The shear stress of the compacted specimens started at 200 kPa in the initial stage of compaction and increased to approximately 330 to 350 kPa at 50 gyrations. The compaction density, degree of saturation and shear stress tended to increase with increasing water content in the same specimens. Compaction using turning compaction has the advantage of measuring the physical properties required for road design, such as density and shear stress, so that more engineering road design will be possible if it is reflected in road design.

**Keywords** : Gyrotory Compactor, Maximum Dry Density, Optimum Moisture Content, Proctor Compactor, Shear Stress

\*Corresponding Author : Kwan-Ho Lee(Kongju National Univ.)

Tel: +82-41-521-9313 email: kholee@kongju.ac.kr

Received January 25, 2018

Revised (1st February 21, 2018, 2nd March 2, 2018)

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

## 1. 서론

지난 20 년간 도로를 이용하는 차량의 증가가 급속하게 진행되고 있다. 또한, 차량의 축하중 무게가 증가하고 있고, 도로면과 접하는 타이어의 압력도 크게 증가하고 있는 실정이다. 이러한 교통량 증가 및 차량 축하중의 증가는 도로포장의 파손을 유발하는 주요 원인이 되었고, 이를 저감하기 위한 다양한 공법이 개발되어 적용되고 있는 실정이다[1].

현재 국내의 도로설계에서 가장 많이 사용하고 있는 노상토의 물성은 CBR 및 회복탄성계수이다. 이는 미국의 AASHTO 2002 Design Guide 및 국내에서 개발한 한국형포장설계법에서도 중요한 도로공학적 물성으로 사용하고 있다[2]. 노상토의 특성평가를 위한 실내시험은 주로 “충격다짐방법”을 적용한 프록터 다짐으로 크게는 A다짐과 D다짐을 이용하고 있다. 이러한 충격식 다짐방법은 현장에서 주로 사용하는 롤러 형태의 다짐장비의 다짐방법과 차이가 있고, 이러한 실내다짐과 현장다짐 방법의 차이는 실내시험에서 결정한 노상토의 물성 결정에 오차를 포함하게 된다. 이러한 문제를 해결할 수 있는 대안 중 하나가 아스팔트 포장설계에서 사용하는 선회다짐기이다. 선회다짐기는 교통하중에 의해 발생하는 아스팔트 혼합물의 현장밀도를 실내에서 재현하기 위해 제작된 것으로 현장에서 주로 사용하는 롤러의 다짐방식을 적용하여 현장다짐에서 얻을 수 있는 골재입자의 배열과 유사하게 다짐을 할 수 있다는 장점이 있다.

선회다짐기는 1950년대 미육국공병단에서 개발되어 도로포장의 실내다짐공법으로 사용되고 있고, 1990년대 미국의 전략적 도로 연구사업(SHRP- SuperPave) 중 하나의 연구과제로 채택되어 선회다짐장비의 개량 및 이를 이용한 노상토의 도로공학적 물성 평가에 적극 활용하고 있는 실정이다[3][4].

본 연구의 목적은 기존에 사용하고 있는 실내표준다짐시험을 현장다짐조건을 모사할 수 있는 선회다짐기로 대체할 수 있는지를 평가하고, 기존의 다짐과정에서 얻을 수 없는 전단응력 및 다짐밀도 변화 특성 등을 평가하여 도로공학 설계에 활용하는 것이다. 이를 위해 선회다짐기를 이용한 다짐 시험의 다짐특성을 평가 및 분석하여 선회다짐기를 다짐특성 평가용으로 활용할 수 있는 기본 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 선회다짐기 기본특성

선회다짐기는 현장에서 사용하는 다짐롤러와 동일한 방법으로 다짐을 할 수 있도록 개발되었다. 즉, 다짐장비의 하중으로 인한 압축력과 롤러의 회전으로 발생하는 전단력을 작용하여 다짐을 한다. 선회다짐기의 주요 제원은 Table 1 및 선회다짐기 다짐원리는 Fig. 1 과 같다.

Table 1. Properties of Gyrotory Compactor

item	type	subject
mold	diameter	100mm, 150mm
	height	270mm
	thickness	10mm
	hardness	48 Rockwell C
compaction	axle load	max 20kN
	applied stress	max 999 kPa
	speed	5 to 60 gyration/min
	angle	0.02 to 3 (degree)

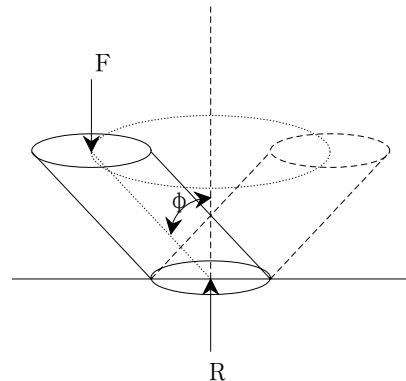


Fig. 1. Principle of Gyrotory Compaction

다짐특성은 주로 선회다짐횟수, 다짐압력 및 다짐각도 등에 의해 영향을 받게 된다. 본 연구에서는 기존의 선행연구결과와 미육국공병단의 연구결과를 바탕으로 다음과 같은 다짐조건을 이용하였다[5][6].

- 다짐속도 : 30회/분
- 선회다짐각 : 1.25도
- 선회다짐기 다짐압력 : 600 kPa
- 최대선회다짐횟수 : 300회

선회다짐기의 다짐에너지는 다짐횟수와 다짐곡선과의 상관관계를 이용하며 주로 선회다짐비(Gyrotory Ratio)를 이용한다. 2009년 Bahia는 다짐곡선을 이용한

에너지 해석법을 제시하였다[5].

선회다짐 시 다짐에너지는 다짐시편의 부피변화를 만 들고, 이러한 다짐에너지는 주로 입자의 형상 및 입도에 큰 영향을 받는다. 다짐동안 발생하는 전단응력은 다짐 되는 입자의 마찰특성과 밀접한 관계가 있다. 마찰저항 이 클수록 다짐에너지는 증가하고, 다짐이 어려워진다 [7][8]. 선회다짐기를 이용한 다짐은 다짐하는 동안 동일 한 크기의 선회다짐압력이 작용하고, 이를 이용하여 다 짐에너지를 결정한다. 다짐에너지는 실내표준다짐조건인 다짐시편직경 15cm, 다짐램머 4.5kg, 낙하높이 45cm, 3 층, 55회 다짐을 적용하였다.

### 3. 시험내용 및 결과

#### 3.1 실험재료

실험에 사용한 흙은 노상토와 일반모래를 이용하였 다. 노상토의 비중은 2.65, 일반모래의 비중은 2.61이다. 노상토와 일반모래의 입도분포는 Fig. 2와 같다.

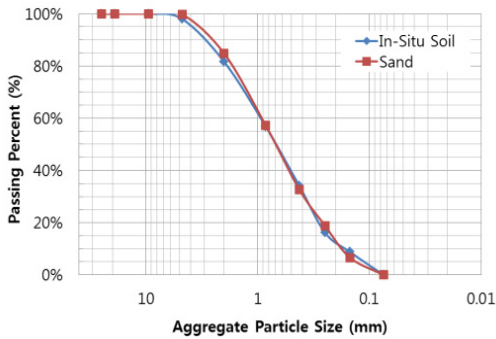
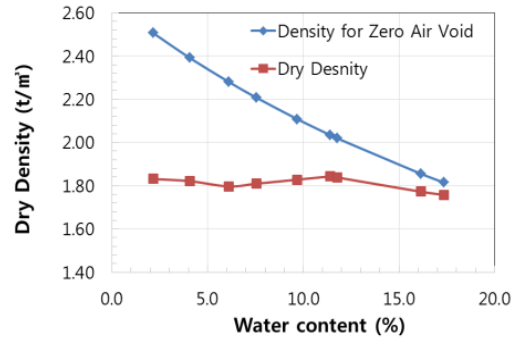


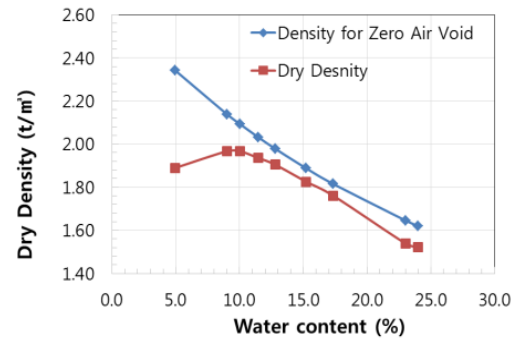
Fig. 2. Gradation of Each Soils

#### 3.2 Proctor 다짐특성

모래 및 노상토를 이용한 다짐시험결과는 Fig. 3과 같 다. 실내표준다짐시험으로부터 최적함수비 및 최대건조 단위중량을 Table 2와 같이 결정하였다. Fig. 4는 모래와 노상토의 CBR시험 결과를 보여주고 있다. 실내표준다 짐시험에서 측정된 최대건조단위중량의 95% 수준을 적 용하여 CBR값을 결정하였다. 모래의 CBR값은 18.0이 고, 노상토의 CBR값은 17.7로 측정되었다.



(a) Sand



(b) In-Situ Soil

Fig. 3. Compaction Curve for Each Soil

Table 2. Compaction Test Results

soil	Sand	In-Situ Soil
Optimum Water Content	11.5 %	9.5 %
Maximum Dry Density	1.84 ton/m <sup>3</sup>	1.98 ton/m <sup>3</sup>

#### 3.3 선회다짐기를 이용한 시험결과

선회다짐기를 이용하여 다짐시험을 하였다. 다짐시험 으로부터 선회다짐횟수에 대한 시료높이, 전단응력, 다 짐밀도, 간극비, 포화도 및 공기량 등을 결정하였다.

##### 3.3.1 다짐횟수와 다짐높이 및 다짐밀도

선회다짐기를 이용한 다짐시험은 실내다짐시험에서 결정된 최적함수비 및 최대건조단위중량을 고려하였다. 선회다짐시험에 이용된 함수비는 4% 및 10% 두 중

류를 적용하였다. 함수비가 많은 경우 선화다짐기를 이용한 다짐 시 시편속의 물의 시편제작용 몰드 밖으로 배출되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 고려하여 다짐 시험은 프록터 표준다짐시험에서 결정된 최적함수비보다 작은 쪽의 함수비를 이용하여 선화다짐을 하였다.

선화다짐횟수에 따른 시편의 높이 변화는 Fig. 5와 같다. 선화다짐횟수가 많을수록 시편의 높이는 작아지고, 동일한 흙의 경우 함수비가 높은 시료의 시편높이가 더 작아지는 경향을 보였다.

선화다짐횟수와 건조단위중량과의 관계는 Fig. 6과 같다. 선화다짐횟수가 증가함에 따라 모든 시편의 건조단위중량은 증가하는 경향을 보였다. 전체적으로 보면 선화다짐횟수 100회를 기준으로 건조단위중량의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 이는 선화다짐기를 이용하여 최적함수비 및 최대건조단위중량 결정시 선화다짐횟수를 100 미만으로 이용하면 됨을 의미한다.

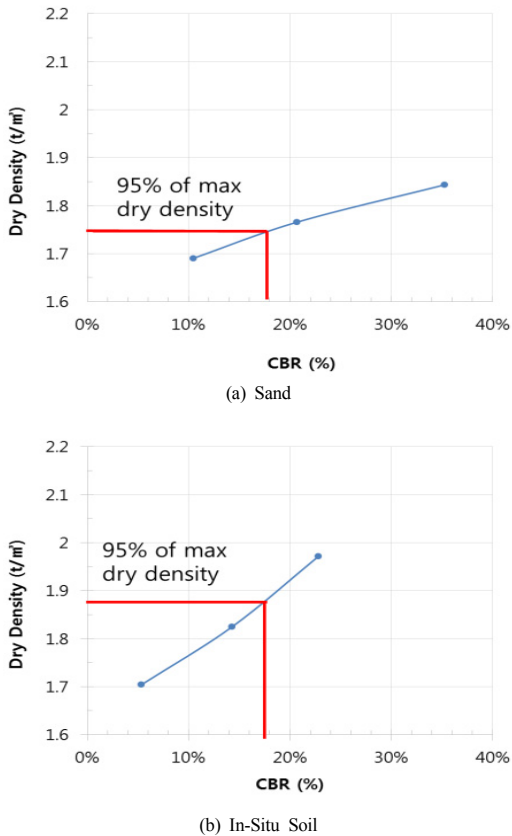


Fig. 4. CBR of Sand and In-Situ Soil

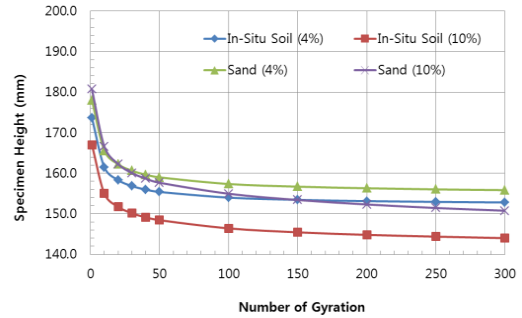


Fig. 5. Specimen Height with Gyration

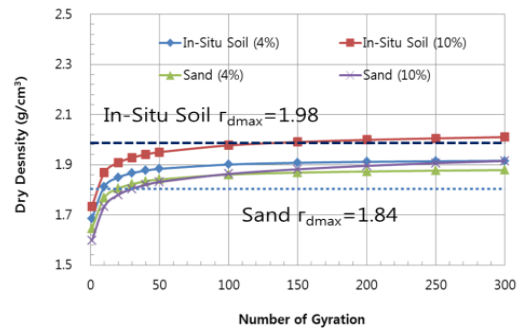


Fig. 6. Dry Density with Gyration

### 3.3.2 다짐횟수와 간극비 및 포화도

모래 및 노상토의 선화다짐횟수와 간극비의 관계는 Fig. 7과 같다. 선화다짐횟수가 증가함에 따라 흙의 간극비는 감소하는 경향을 보이고 있다. 특히, 선화다짐횟수 50회까지 간극비의 감소가 매우 크게 나타났고, 100회 이상에서의 간극비 감소는 상대적으로 작게 나타났다. 노상토의 경우 100회 선화다짐 시 함수비 4%의 경우 0.4, 함수비 10%의 경우 간극비는 0.32 정도로 측정되었다.

Fig. 8은 선화다짐횟수와 포화도의 상관관계를 보여 주고 있다. 선화다짐횟수가 증가함에 따라 포화도는 증가하는 경향을 보여주고, 특히 초기 10-20회 정도의 선화다짐 구간까지 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 모래의 경우 초기 포화도는 20% 전후이고, 300회 다짐 시 포화도는 25-28% 수준으로 측정되었다. 노상토의 경우 초기 포화도는 40-50% 수준이고, 300회 다짐 후 포화도는 함수비 4% 시편은 70%정도, 10% 시편은 84% 수준으로 측정되었다. 노상토에 비해 모래의 함수비에 따른 포화도 변화가 상대적으로 매우 작게 나타났다. 이

는 모래의 투수계수가 노상토의 투수계수에 비해 상대적으로 큰 것으로 판단된다. 노상토의 경우 함수비에 따른 포화도의 차이가 10% 이상 크게 나타났다. 이는 표준다짐시험 시 함수비에 따른 최대건조단위중량의 변화 특성과 밀접한 관계가 있음을 의미한다.

### 3.3.3 다짐횟수와 전단응력

선회다짐을 하는 동안 시편은 점점 높이가 작아지고, 밀도가 높아지게 된다. 즉, 시편을 다짐하는 동안 입자의 맞물림 현상이 점점 증가한다. 이러한 현상을 선회다짐 시험 시 전단응력으로 평가할 수 있다. Fig. 9는 선회다짐에 따른 전단응력의 변화를 보여주고 있다. 전단응력은 다짐 초기에 200 kPa 수준에서 시작하여 선회다짐횟수 50회 정도가 되면 대략 330-350 kPa 수준으로 증가하고, 이후 이 값에서 거의 변화가 없다.

모래 및 노상토 모두 함수비가 큰 시편의 전단응력이 크게 나타났다. 이는 흙속의 물이 다짐을 원활하게 하여 동일한 조건에서 다짐밀도를 증가시키고, 이로 인해 흙 입자 간의 맞물림 효과가 상대적으로 크게 나타났음을 의미한다. Fig. 10은 로그스케일을 이용하여 표시한 것으로, 다짐 중에 발생하는 흙속의 전단응력은 초기 5회 다짐까지 선형증가 후 이후 비선형으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 선형과 비선형의 구간을 구분하는 선회다짐횟수는 대략 5-6회 정도로 측정되었다. 이는 5-6회 정도 다짐까지는 느슨한 상태에서 중간정도 조밀한 상태로 다짐이 이루어지고, 이후부터는 흙 입자 사이의 접촉에 의한 전단응력이 크게 발생하는 것을 의미한다.

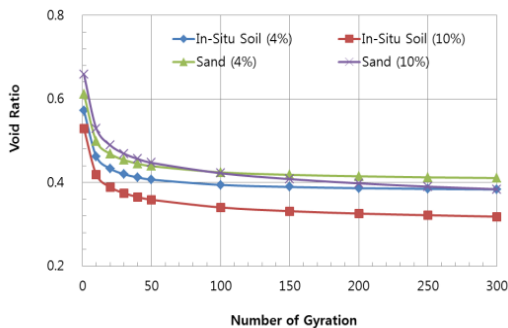


Fig. 7. Void Ratio with Gyration

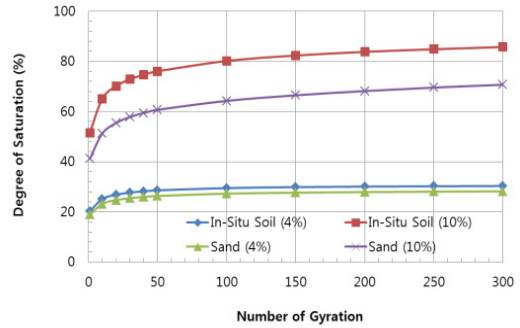


Fig. 8. Degree of Saturation with Gyration

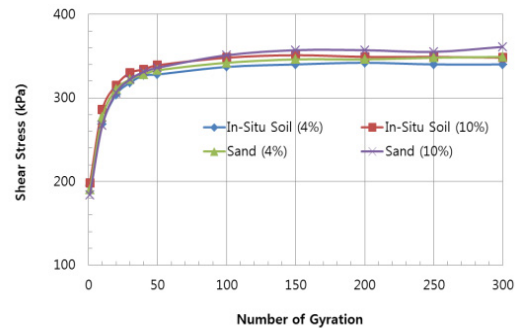


Fig. 9. Shear Stress with Gyration

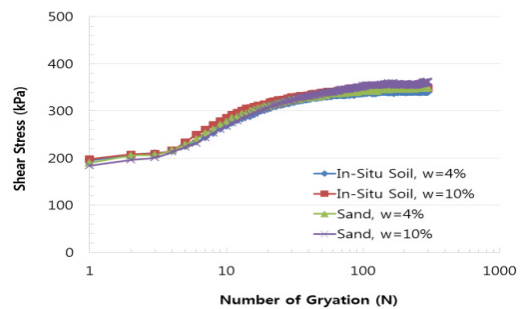


Fig. 10. Shear Stress with Gyration (Log Scale)

### 3.3.4 전단응력과 건조단위중량 및 간극비

Fig. 11은 건조단위중량과 전단응력과의 상관관계를 보여주고 있다. 전체적으로 건조단위중량이 증가함에 따라 선회다짐 시 발생하는 전단응력이 증가하는 경향을 보였다. 모래의 경우 시료의 함수비가 10%인 시편의 전단응력이 4%인 시편에 비해 작게 나타났다. 노상토의 경우 함수비가 큰 시편의 전단응력이 크게 나타났다.

동일한 건조단위중량에서 전단응력을 비교하면, 모래의 전단응력이 노상토에 비해 크게 나타났다. 동일한 전단응력에서 건조단위중량을 비교하면 노상토의 건조단위중량이 모래에 비해 큰 것으로 나타났다.

Fig. 12는 전단응력에 따른 모래 및 노상토의 간극비 변화특성으로 건조단위중량과 반대 경향을 나타내고 있다. 동일한 전단강도 적용 시 모래의 간극비가 노상토의 간극비에 비해 크게 나타났다.

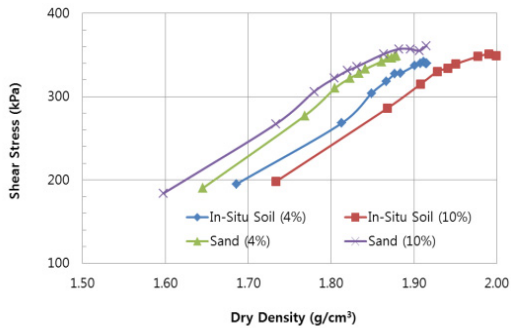


Fig. 11. Dry Density with Shear Stress

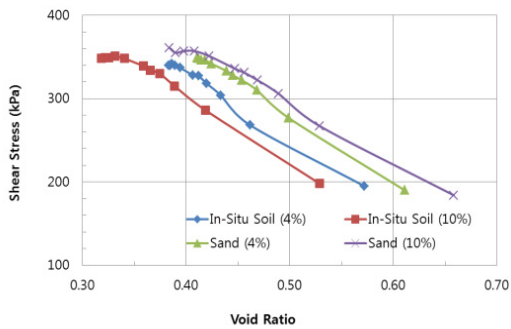


Fig. 12. Void Ratio with Shear Stress

### 3.4 일축압축강도 및 탄성계수

선회다짐 한 시편을 이용하여 일축압축시험을 시행하였다. 일축압축시험 결과를 이용하여 할선탄성계수( $E_{50}$ )를 결정하였다. Fig. 13은 일축압축강도와 할선탄성계수의 상관관계를 보여주고 있다. 시험시편의 수가 작아 일반화하기는 어렵지만, 일축압축강도가 증가함에 따라 탄성계수가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 모래의 경우 일축압축강도에 따른 탄성계수 변화가 매우 작은 편이고, 이에 반해 노상토는 일축압축강도에 따른 탄성계수

가 크게 변하는 경향을 보였다.

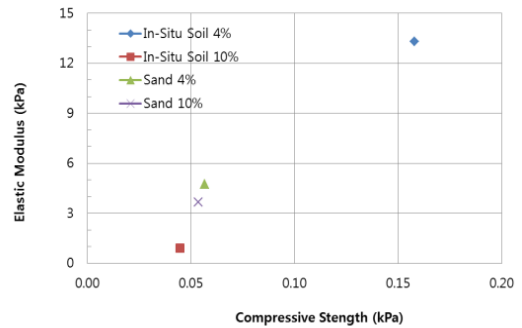


Fig. 13. Compressive Strength with Elastic Modulus

## 3. 결론

선회다짐기를 이용한 모래와 노상토의 다짐 및 분석을 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 실내표준다짐시험에서 측정된 모래의 최적함수비 및 최대건조단위중량은 11.5% 및 1.84 ton/m<sup>3</sup>, 노상토는 9.5% 및 1.98 ton/m<sup>3</sup>이다. 또한, 표준다짐 시험의 95% 수준을 적용하여 결정한 모래의 CBR값은 18.0이고, 노상토의 CBR값은 17.7로 측정되었다.
- (2) 선회다짐횟수가 많을수록 시편의 높이는 작아지고, 동일한 흙의 경우 함수비가 높은 시료의 시편 높이가 더 작아지는 경향을 보였다. 선회다짐횟수가 증가함에 따라 시편의 건조단위중량은 증가하는 경향을 보였다. 전체적으로 보면 선회다짐횟수 100회를 기준으로 건조단위중량의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있다.
- (3) 선회다짐횟수 50회까지 간극비의 감소가 매우 크게 나타났고, 100회 이상에서의 간극비 감소는 상대적으로 작게 나타났다. 노상토의 경우 100회 선회다짐 시 함수비 4%의 경우 0.4, 함수비 10%의 경우 간극비는 0.32 정도로 측정되었다.
- (4) 선회다짐횟수가 증가함에 따라 포화도는 증가하는 경향을 보여주고, 특히 초기 10-20회 정도의 선회다짐 구간까지 크게 증가하는 경향을 보여주고 있다. 모래의 경우 초기 포화도는 20% 전후이

고, 300회 다짐 시 포화도는 25-28% 수준으로 측정되었다. 노상토의 경우 초기 포화도는 40-50% 수준이고, 300회 다짐 후 포화도는 함수비 4% 시편은 70%정도, 10% 시편은 84% 수준으로 측정되었다. 노상토에 비해 모래의 함수비에 따른 포화도 변화가 상대적으로 매우 작게 나타났다.

- (5) 전단응력은 다짐 초기에 200 kPa 수준에서 시작하여 선회다짐횟수 50회 정도가 되면 대략 330-350 kPa 수준으로 증가하고, 이후 이 값에서 거의 변화가 없다. 모래 및 노상토 모두 함수비가 큰 시편의 전단응력이 크게 나타났다.

## References

- [1] Hong, C. W., "Comparison of Hot Mix Asphalt Properties Between Marshall and Gyratory Compaction", Bachelor Thesis, University of Teknologi Malaysia, pp. 27, 2007.
- [2] Lee, K.H., Jang, T.Y., "Analysis of Technical Problem for Soil Compaction by Gyratory Compactor", Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, vol. 10, no. 1, pp. 43-48, 2010.
- [3] Browne, M.J., Mokwa, R., Cuelho, E., "Laboratory Testing of Soil using the Superpave Gyratory Compactor", Transportation Research Board, pp. 1-14, 2008.
- [4] Ping, W.V., Leonard, M., and Yang, Z., "Laboratory Simulation of Field Compaction Characteristics - Phase I", Florida DOT, FL/ DOT/RMC/BB-890(F), pp. 106, 2003.
- [5] Bahia, H.U., Friemell, T.P., Peterson, P.A., Russell, J.S., and Poehnel, B., "Optimization of Constructibility and Resistance to Traffic : A New Design Approach for HMA Using the Superpave Compactor", AAPT, vol. 67, pp. 189-213, 1998.
- [6] Jang, T.Y., "A Study on Comparison of Elastic Modulus Tests of Reinforced Subgrade Soil with Cement", MS Thesis, Kongju National University, pp. 69, 2011.
- [7] Garcia, N.P., Rodriguez, M.A., Anguas, P.G., Cruz, H.G., Fredlund, D., and Luis, R.P., "Compaction and Mechanical Properties of Soils Compacted in the Gyratory Compactor", Revista Infrastructure Vial, vol. 18, No. 31, pp. 20-29, 2016.
- [8] Kollaros, G., and Athanasopoulou, A., "Characterization of Pavement Subgrade Soil Using Gyratory Compaction", 3<sup>rd</sup> International Balkans Conference on Challenges of Civil Engineering, 3-BCCCE, 2016.

이 관 호(Kwan-Ho Lee)

[종신회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 12월 : 미국 Purdue Univ. Civil Eng., (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 현재 : 국립공주대학교 건설환경공학부 교수

<관심분야>  
도로공학 및 지반공학