

# 다짐밀도 측정장비(Non-nuclear Type)를 사용한 현장 다짐밀도 평가

## Evaluation of Field Compaction Density by Non-nuclear Density Gauge

김영민	Kim, Yeong Min	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail : choozang@kict.re.kr)
임정혁	Im, Jeong Hyuk	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jhim@kict.re.kr)
양성린	Yang, Sung Lin	정회원 · 한국건설기술연구원 전임연구원 (E-mail : siyang@kict.re.kr)
김기현	Kim, Ki Hyun	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail : kihyun@kict.re.kr)
황성도	Hwang, Sung Do	정회원 · 한국건설기술연구원 연구위원 · 공학박사 (E-mail : sdhwang@kict.re.kr)
정규동	Jeong, Kyu Dong	정회원 · 한국건설기술연구원 수석연구원 (E-mail : kdjeong@kict.re.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** The objective of this study is to compare the densities of asphalt pavements measured both in the field and in the laboratory, and also to evaluate the applicability of field density measuring equipment, such as the pavement quality indicator (PQI), by using statistical analysis.

**METHODS :** For the statistical analysis of the density measured from asphalt pavement, student t-tests and a coefficient of correlation are investigated. In order to compare the measured densities, two test sections are prepared, with a base layer and an intermediate layer constructed. Each test section consists of 9 smaller sections. During construction, the field densities are measured for both layers (base and intermediate) in each section. Core samples are extracted from similar regions in each section, and moved to the laboratory for density measurements. All the measured densities from both the field and laboratory observations are analyzed using the selected statistical analysis methods.

**RESULTS AND CONCLUSION :** Based on an analysis of measured densities, analysis using a correlation coefficient is found to be more accurate than analysis using a student t-test. The correlation coefficient (R) between the field density and the core density is found to be very low with a confidence interval less than 0.5. This may be the result of inappropriate calibration of the measuring equipment. Additionally, the correlation coefficient for the base layer is higher than for the intermediate layer. Finally, we observe that prior to using the density measuring equipment in the field, a calibration process should be performed to ensure the reliability of measured field densities..

### Keywords

compaction density, correlation coefficient analysis, non-nuclear density gauge, pavement quality indicator

Corresponding Author : Im, Jeong Hyuk, Senior Researcher  
Highway Pavement Research Division, SOC Research Institute,  
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,  
283, goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea  
Tel : +82.31.995.0894 Fax : +82.31.910.0161  
E-mail : jhim@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Dec. 12, 2014 Revised Dec. 13, 2014 Accepted Dec. 19, 2014

## 1. 서론

최근 교통량의 증가 및 공용차량의 대형화로 인해 도로포장의 영구변형, 균열 및 포트홀 등의 파손이 발생되고 있으며, 이러한 포장 파손에 대한 보수비용의

증가는 한정된 국가예산의 효율적인 집행을 저해하고 있는 실정이다. 공용 중인 도로 포장의 파손을 예방하기 위해서는 아스팔트 도로의 시공 후 품질관리가 필수적이다.

시공 후 품질관리를 할 수 있는 대표적인 지수는 아스팔트 포장의 공극 또는 밀도이며, 아스팔트 포장의 적정 다짐밀도는 도로포장의 내구성과 관계되기 때문에 포장의 설계수명 기간 동안의 공용성에 큰 영향을 미치는 요소이다. 즉, 아스팔트 포장의 장기공용성은 시공 중 적절한 다짐 관리에 의해 결정된다고 해도 과언이 아니다. 아스팔트 포장의 시공품질관리를 위한 공극 또는 밀도를 기준으로 하는 현장 다짐도의 파악은 무엇보다 중요하다. 특히 다짐 과정은 포장층의 내구성을 좌우하므로 아스팔트 포장 시공 중 다짐 공정에 대한 품질관리가 요구되고 있다(Hwang, 2004).

본 연구에서는 아스팔트 포장의 품질관리 기술지원 사례에서 비파괴 현장다짐밀도 측정장비인 PQI (Pavement Quality Indicator)를 이용한 현장 다짐밀도 측정장비로 측정된 밀도 값이 얼마만큼의 타당성 및 신뢰성을 확보하고 있는지를 검토하고, 또한 현장에서 측정된 실측밀도를 비교·평가하고자 한다. 검토 방법으로는 시험포장구간을 선정하여 각 층별로 현장 밀도 측정장비를 이용한 밀도 값과 측정구간에서의 실측 밀도 값을 측정하여 통계분석을 실시하고, 현장에 포설되는 기층과 중간층의 밀도측정 값에 대한 신뢰도를 평가함으로써 품질관리에 사용되는 현장밀도 측정장비에 대한 타당성을 검토하였다.

## 2. 현장 다짐밀도

### 2.1. 현장밀도 측정장비

아스팔트 포장의 현장 다짐밀도 측정장비의 평가는 대부분의 측정장비가 개발된 미국에서 이루어져 왔다. 미국 일리노이 대학에서는 Non-nuclear 현장 다짐밀도 측정장비의 초기 모델인 PQI 100과 최신 모델인 PQI 300을 실내 코어 시편을 이용하여 비교·평가하였으며, 또한 nuclear 밀도 측정장비와 비교·평가를 실시하여 그 결과들을 논문으로 발표하였다(1999~2000). 이 두 가지 연구에서 연구원들은 다양한 아스팔트 혼합물의 재료, 포장 표층의 수분상태, 장비와 포장 사이의 공극 크기에 따른 밀도변화 등을 측정하였다. 특히 Harrel and Buttlar(1999)는 PQI model 100 장비가 표면의 수분상태, 온도, 공극의 크기에 민감하게 반응하는 것을 발견하였으며 PQI model 100 장비가 nuclear 밀도 측정장비와 일치되지 않는 것으로 결론지었다.

Hausman and Buttlar(2000)의 연구에서는 수분과 온도에 의한 밀도의 변동성을 보정하기 위해 개발된

PQI model 300은 초기 모델보다 기능이 떨어지는 것을 알 수 있었다. 그러나 이 연구의 연구진들 또한 AASHTO T-166 측정과는 상호 상관관계가 없는 것으로 결론지었다. 또한, 표면공극이 Model 300에 미치는 영향을 조사하기 위해 채움재를 사용하여 공극을 감소시켜 실험한 결과, 밀도에 대한 변동성이 크게 향상되지 않는다고 보고하였다.

Henault(2001)은 AASHTO T-166에 이용된 10개의 과제로부터 현장시료의 실내 분석결과와 nuclear 밀도 측정결과를 비교·분석함으로써 PQI Model 300의 현장공용성을 평가하였다. PQI 장비를 이용한 밀도 결과와 실내 밀도 측정결과와의 상관관계를 평가하였으며 평균 상관관계수( $R^2$ )가 0.28로 나타났다. PQI 장비를 이용하여 측정된 밀도를 보정하기 위해 표준시료를 5번 측정 후, 평균값을 적용하여 보정계수를 결정하였으며 이 보정계수는 현장에서 측정된 밀도 값에 적용되었다. 이 연구에서는 PQI 밀도 값과 실내에서 측정된 밀도 값 사이의 통계학적 상관관계가 전혀 없는 것으로 나타났다. 아스팔트 도로 포장 시공 시 일정한 품질의 아스팔트 혼합물을 이용하여 일관성 있는 도로 포장을 목표로 시공하였더라도, 실질적인 다짐밀도의 오차는 밀도 측정방법 및 기술 사이에서 임의로 발생하게 된다. 이러한 오차를 줄이기 위해서는 각각의 프로젝트 별 측정되는 밀도의 상관관계를 찾는 것이 더 바람직하다. 즉, 평균 상관관계( $R^2$ )를 이용하여 보정계수를 측정하여 실제 밀도 결과 값의 보정이 필요하다는 결론을 도출하였다.

Romero(2002)는 Non-nuclear 밀도 측정기를 이용하는데 있어서 설득력 있는 평가방법을 제시하였다. 현장에서 PQI 300 및 PaveTracker™ 2701을 이용하여 밀도를 측정한 후, 두 가지 밀도 측정결과 값과 현장에서 채취한 코어의 밀도 값을 비교·평가하였다. 1999년에 수행된 실내 연구에서는 PQI model 300에 밀도 측정결과 값이 밀도의 변화에 따라 선형으로 변화하는 것을 밝혀냈다. 이는 아스팔트 혼합물의 수분상태와 온도가 일정한 상태를 유지하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 밀도 측정장비의 초기화 과정에서 아스팔트 혼합물이 내포하고 있는 수분상태와 온도를 변화시켜야 한다는 것을 보여주었다. 따라서 현장 밀도측정기를 사용할 경우 반드시 실내 시험을 거쳐 현장에 적용하여야 한다고 보고하였다. 2000년에 시행된 현장 포장 시공 중에 PQI model 300을 사용한 현장 다짐밀도 측정결과, PQI model 300의 밀도측정의 민감도가 부적

격하며 수분과 온도를 보정하기 위해 사용된 알고리즘의 수정을 제안하였다. 2001년에 시행된 현장 다짐밀도 측정결과 PQI 300 및 PaveTracker™ 장비의 사용을 위해 동일한 아스팔트 혼합물을 사용한 보정이 반드시 필요하다고 보고하였다.

Allen and Schultz(2003)은 현장 채취 코어를 이용하여 PQI Model 300 측정기와 nuclear 측정기를 사용하여 얻어진 밀도 값을 비교·평가하였다. 또한, 비교·평가를 기초로 하여 덧씌우기를 포함하여 시험포장 구간의 밀도를 측정하였다. 시험포장 구간에서 측정된 밀도는 측정기 하나만이 실내에서 측정된 밀도와 95%의 신뢰성을 가지는 것으로 평가되었다. 또한, 동일한 PQI 장비를 이용하여 측정된 코어들은 거의 동일한 측정결과를 나타내는 것으로 평가하였으며 PQI 장비와 코어의 분산은 88%로 나타났다. 또한 PQI 측정값이 nuclear 측정 값에 비해 약 5% 증가된 값을 보여줌을 보고하였으며, 품질관리에 있어서 non-nuclear 측정기의 사용이 가능함을 보고하였다.

Sargand and Kim(2005)은 FHWA/OH-2005/18 연구보고서에서 nuclear density gauge인 Troxler-4640B와 Non-nuclear density gauge인 PQI model 300, PaveTracker™ 2701B를 사용하여 다짐 밀도를 비교하였다. 현장 측정에서 PQI와 Pave Tracker™의 경우 측정 전 지속적인 보정 없이 측정된 결과들이 nuclear density gauge의 밀도 측정 값과 차이가 낮으며, 제조사에서 제안한 방법에 의해 지속적인 보정 후 측정된 결과 PaveTracker™은 현장 코어밀도와 nuclear density gauge의 밀도 값과 잘 일치되지 않았으며, PQI의 경우 nuclear density gauge보다 코어밀도의 측정결과 값과 더 가깝게 일치되었다. 그럼으로, Sargand and Kim의 연구에서는 지속적인 보정을 통한 PQI 장비의 사용을 현장 품질관리를 위한 방법으로 제시하였다.

현장 다짐밀도 측정장비를 평가한 문헌을 고찰한 결과 nuclear density gauge가 non-nuclear density gauge에 비해 조금 더 높은 정확도를 보이는 것으로 나타났다. non-nuclear density gauge의 경우 측정 시 수분에 의한 영향도가 큰 것으로 보고되었다. 또한 non-nuclear density gauge의 경우 측정 전 지속적인 보정을 반드시 거쳐야 한다. Nuclear density gauge의 경우 정확성은 Non-nuclear density gauge에 비해 높지만 방사능 관련 자격증 소지자의 필요, 방사능 유출의 위험성, 장비사용자의 방사능 유출에

대한 정기적인 검사 등 갖춰져야 할 부가적인 부분이 많은 단점을 안고 있다. 상기의 문헌조사 및 각 장비의 장 단점을 비교한 결과, 본 연구에서는 PQI 장비를 이용하여 다짐밀도 평가를 진행하였다.

## 2.2. 현장 밀도측정

현장에서 측정된 밀도 값의 가장 이상적인 결과는 실내에서 측정된 실측 밀도 값과 일치하는 것이다. Fig. 1은 실측 밀도 값에 대한 현장 밀도 값을 45° 선(line of equality)을 따라 도식화 한 것을 나타내며 즉, 가장 이상적인 밀도 값을 나타낸다. 다시 말해서, 현장에서 측정된 밀도 값과 실내에서 측정된 밀도 값이 일치되어야 하며 더 중요한 것은 일치되지 않았을 경우에 그 차이가 어느 정도이며, 어느 정도 추정 밀도 값을 파악할 수 있는냐가 가장 중요한 요소이다. 그러나 현장에서 측정된 밀도 값과 실내 실측 밀도 값은 거의 대부분 일치하지 않은 경향을 나타내고 있다. 따라서 현장 밀도 값과 실내 실측 밀도 값 사이의 신뢰성을 평가하기 위해 student t-test 분석방법과 상관계수(coefficient of correlation) 분석 방법을 이용하였다.

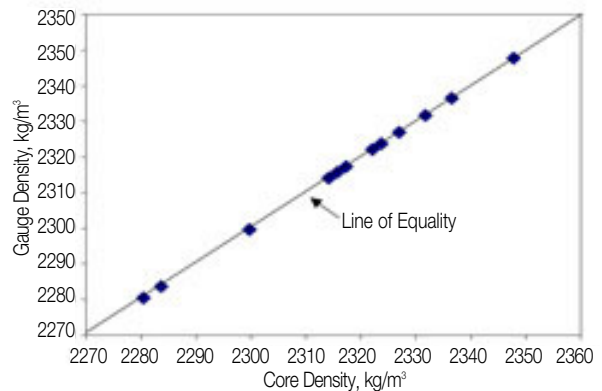


Fig. 1 Ideal Result of Field Density

현장 다짐밀도 측정은 시공현장에서 비파괴 현장 다짐밀도 측정장비인 PQI를 이용하여 측정된 후 측정지점에서 코어를 채취하여 실내 시험에서 실측 밀도를 측정하였다. 측정지점은 아스팔트 포장 시험시공구간 중 Wheel path 구간에서 측정되었다. Fig. 2는 현장 다짐 밀도 측정 및 시료채취를 보여준다.



(a) Test area



(b) PCI Measurement



(c) Cores

Fig. 2 Measurement of Field Density

### 3. 시험시공

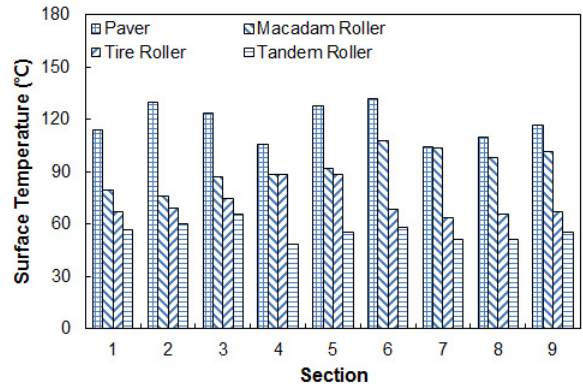
현장에서 측정된 밀도 값의 신뢰성을 검증하기 위해 실제 현장 시공을 하였고, 현장 밀도가 실측된 구간에서 코어를 채취하여 실험실 밀도를 측정 비교·분석 하였다. 본 연구에 적용된 시험시공 현장은 경북 경주시 부곡이

며 총 A와 B 두 구간에서 진행되었다. 현장 밀도측정과 코어 채취는 각 시험시공구간에서 기층과 중간층 모두에서 진행되었으며, 전체 시험시공구간은 각 9개의 작은 구간으로 나뉘었고 다짐횟수를 조절하여 각각 다른 도로 포장의 밀도를 구현하였다. 그러므로 본 연구에서는 다양한 다짐밀도를 갖는 여러 포장 구간에서 현장과 실험실 다짐밀도를 측정하여 비교·분석하였다. Table 1은 자세한 시험시공 현장 정보를 보여준다. 또한, Fig. 3은 현장 다짐 후 측정된 포장 표면의 온도를 나타낸다.

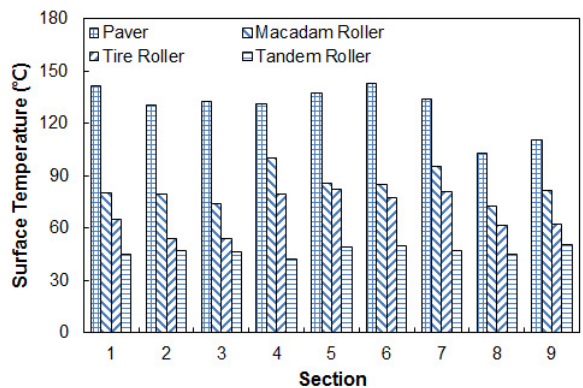
Table 1. Test Section Information

Site	Layer	Section	Compaction	Total compaction
A and B	Base and intermediate	1	1-4-8-4	17
		2	1-4-10-4	19
		3	1-4-12-4	21
		4	1-4-8-4	17
		5	1-4-10-4	19
		6	1-4-12-4	21
		7	1-4-8-4	17
		8	1-4-10-4	19
		9	1-4-12-4	21

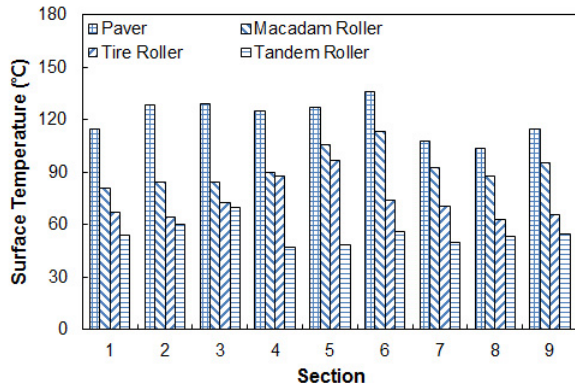
Note: Compaction is conducted as in order of paver, macadam roller, tire roller, tandem roller.



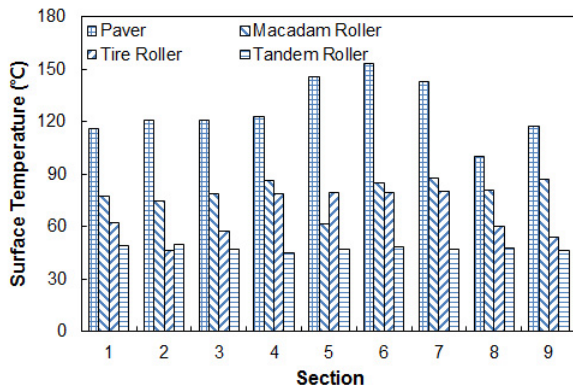
(a) Section A base layer



(b) Section A intermediate layer



(c) Section B base layer



(d) Section B intermediate layer

Fig. 3 Surface Temperatures

## 4. 다짐밀도 분석방법

### 4.1. Student t-test 분석

Student t-test는 표본 평균과 모집단 평균의 차이를 표본의 표준편차(standard deviation, 이하 S)로 나누어 구하게 되며, 본 연구에서는 표본 평균은 실험실 실측 밀도이며 모집단은 현장 측정밀도로 정의하여 결과를 분석하였다. 이 방법은 측정된 현장 밀도와 실험실 실측 밀도 사이의 차이 값에 대한 평균 값을 나타낸다.

$$\bar{X} = \frac{\sum |C - G|}{n} \quad (1)$$

여기서,

A = 현장 밀도와 실측 밀도 차이 값의 평균

C = 실측 밀도

G = 현장 밀도

n = 코어 수

Student t-test 분석에서 현장 밀도와 실측 밀도 사이의 차이가 없는 즉, 두 측정 값 사이의 차이가 0인 것으로 가정, t 통계( $t^*$ )는 다음의 Eq. (2)로 구해진다.

$$t^* = \frac{\bar{X}}{S/\sqrt{n}} \quad (2)$$

여기서,

S = 현장 밀도와 실측 밀도 차이 값의 표준편차

상기의 분석방법은 현장 측정밀도의 검증을 위해 일반적으로 사용되는 분석방법이지만, 이 분석방법만을 이용하여 현장 밀도 측정장비의 신뢰성을 평가하는 것은 평가의 신뢰도가 떨어질 수 있는 가능성을 가지고 있다. 본 연구에서도 실제 시험 포장에서 측정된 밀도와 실험실에서 측정된 밀도 값을 비교·분석한 결과 잘못된 결론에 도달하게 되는 것을 확인하였다. Table 2와 Fig. 4는 실제 시험포장 현장에서 측정된 밀도 값을 나타낸다.

Table 2. Measured Density from Test Section (Average Values)

Section	Density (kg/m <sup>3</sup> )		
	Core	PQI-1	PQI-2
1	2342	2371	2110
2	2332	2360	2136
3	2352	2406	2034
4	2353	2416	2036
5	2354	2392	2031
6	2376	2372	2035
7	2351	2316	2071
8	2339	2342	2104
9	2357	2351	2071

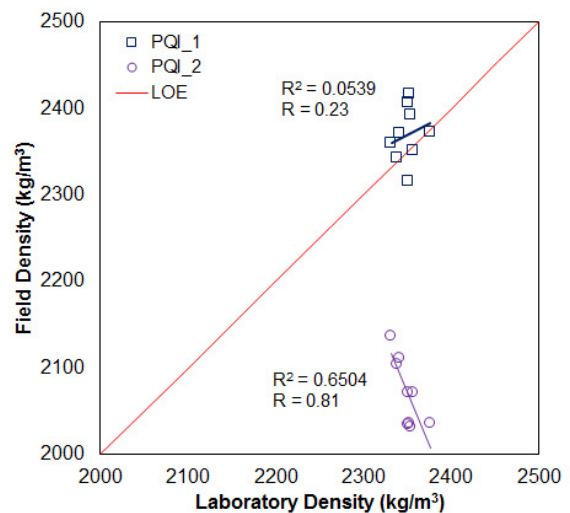


Fig. 4 Density Measured from both Field and Laboratory

Fig. 4에서 PQI-1의 측정밀도는 일정한 경향 없이 산발적으로 나타나며 평균 값을 실험실 실측 밀도와 비교할 경우 거의 비슷한 결과(19kg/m<sup>3</sup> 높은 값)를 보인다. 반면 PQI-2의 경우 선형의 경향을 보이지만 평균 값은 실험실 실측 밀도보다 280kg/m<sup>3</sup> 낮은 결과를 나타낸다. 다시 말해서, 측정장비의 측정 값이 산발적으로 경향이 없는 결과를 보일지라도 평균 값이 실험실 실측 밀도와 차이가 적다면 t-test 결과 값이 매우 작게 나타나며 통계학적으로 신뢰도가 높다는 결론을 얻게 되지만, 이 결론은 잘못된 것으로 판단할 수 있다.

#### 4.2. 상관계수(Coefficient of Correlation) 분석

상관계수 분석에서 상관계수는 변수들 사이의 관계 및 다른 변수를 기초로 하여 변수들을 추정할 수 있도록 사용되는 계수를 말한다. 현장 밀도와 실험실 실측 밀도가 Fig. 1처럼 도식화된다면 현장 밀도는 LOE(line of equality)를 따라서 증가하게 될 것이라고 예상하게 된다. 이는 현장 시험 포장에서 나타나게 되는 밀도변화를 예측할 수 있게 될 것이며 상관계수는 현장 밀도변화를 예측하는데 있어서 통계학적으로 가장 큰 장점을 가진다. 상관계수는 다음의 Eq. (3)과 Eq. (4)에 의해 계산된다.

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left( \frac{C-\bar{C}}{S_C} \right) \left( \frac{G-\bar{G}}{S_G} \right) \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum (C-\bar{C})(G-\bar{G})}{(\sum (C-\bar{C})^2)^{0.5} (\sum (G-\bar{G})^2)^{0.5}} \quad (4)$$

여기서,

R = 상관계수

C = 실측 밀도

$\bar{C}$  = 실측 밀도의 평균

G = 현장 밀도

$\bar{G}$  = 현장 밀도의 평균

SC = 실측 밀도의 표준편차

SG = 현장 밀도의 표준편차

상관계수는 +1과 -1 사이의 범위를 가지며 +1에 가까울수록 현장 밀도와 실측 밀도(-밀도 값 포함) 사이에 더 높은 상관성을 가지는 것을 의미한다. Table 2의 밀도 값을 이용하여 상관계수를 구하게 되면 PQI\_1은

0.23, PQI\_2는 0.81로 PQI\_2의 밀도 측정장비가 더 높은 신뢰도를 가지는 것을 알 수 있으며 이는 Fig. 4에서 R값으로 나타내고 있다. 그러나 상관계수를 이용한 평가 방법도 측정된 시료의 수가 적으면 신뢰도가 감소하게 되며 현장 상황을 고려해 볼 때 많은 양의 시료를 채취하는 것이 불가능하다는 단점을 가지게 된다. 따라서 이러한 단점을 보완하기 위해 상관계수 주위에 신뢰구간(confidence interval)을 형성해 주어야 한다. 신뢰구간은 Fisher Z transformation을 이용하여 구성될 수 있으며 다음과 같은 Eq. (5)에 의해서 구할 수 있다.

$$Z' = \frac{1}{2} \ln \frac{1+R}{1-R} \quad (5)$$

Eq. (5)에서 Z 변환 변수는 정규분포 곡선을 가지며 변수 Z는 1/(n-3)과 동일한 값을 가지게 된다. 이 값을 이용하여 Z 값의 신뢰구간을 다음과 같은 Eq. (6)에 의해서 구할 수 있다.

$$Z = Z' \pm z(1-\alpha/2)^* s(Z) \quad (6)$$

Eq. (6)에서, z(1- $\alpha$ /2)는 정규분포에서 (1- $\alpha$ /2) 백분위와 같은 개념을 가진다. 이 값은 95% 신뢰구간에서 1.645와 같은 값을 가진다. 변환방정식 Eq. (5)와 Eq. (6)에서 얻어진 두 개의 값을 이용하여 상관계수의 신뢰구간을 찾을 수 있다.

$$R = \frac{e^{2Z}-1}{e^{2Z}+1} \quad (7)$$

실측 밀도를 기준으로 하여 이 방정식을 사용하게 되면 Table 2에서 나타난 측정 값들의 신뢰구간이 Table 3에 나타나게 된다. Table 3과 같이 동일한 현장에서 측정된 현장 밀도는 장비에 따라 그 신뢰구간이 매우 큰 차이를 나타냄을 알 수 있었다. 다시 말해서, PQI\_1의 경우 실측 밀도와 비교해 볼 때 상관계수의 신뢰구간이 0.47~0 사이에 있는 것으로 나타났으며, PQI\_2의 경우에는 0.88~0.69로 다소 높은 신뢰구간을 나타내는

Table 3. Confidence Interval of Correlation Coefficient R

Measurement	Confidence interval of R
PQI_1	0.47 > R > 0
PQI_2	0.88 > R > 0.69

것을 알 수 있었다. 그러나 두 경우 모두 신뢰구간의 범위가 광범위하다는 것을 알 수 있었으며 이는 측정 횟수에 따른 결과라 판단된다.

### 5. 현장 다짐밀도 분석 결과

앞 절에서 언급한 것과 같이 현장 다짐밀도 장비에 대한 타당성 평가방법으로는 Student t-test 분석방법보다는 상관계수(Coefficient of correlation)를 이용한 평가방법이 정밀하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 상관계수를 이용하여 여러 현장에서 측정된 현장 다짐밀도와 실측 밀도의 상관성을 조사하였으며 이를 통하여 현장 다짐밀도 측정장비의 타당성을 조사하였다. Table 4는 G현장 구간에 따른 혼합물 종류와 현장 밀도측정 값 및 실측 밀도측정 값을 나타낸다. 또한 Table 5는 G현장 구간에서의 밀도 값을 이용하여 상관계수 R 값을 산정한 결과와 상관계수의 신뢰구간을 결정한 결과를 나타낸다.

Table 4. Field and Laboratory Densities in Section A (Average Values)

Section	Base layer		Intermediate layer	
	Lab. density (kg/m <sup>3</sup> )	Field density (kg/m <sup>3</sup> )	Lab. density (kg/m <sup>3</sup> )	Field density (kg/m <sup>3</sup> )
1	2373	2445	2319	2335
2	2344	2417	2325	2359
3	2328	2432	2288	2344
4	2356	2373	2312	2327
5	2336	2378	2332	2361
6	2302	2378	2296	2337
7	2293	2381	2323	2320
8	2310	2400	2309	2335
9	2312	2421	2211	2338

Table 5. Confidence Interval of Correlation Coefficient R

Layer	R	Confidence interval of R
Base	0.15	0.47 > R > 0
Intermediate	0.4	0.88 > R > 0.69

Fig. 5는 G 구간의 현장 밀도와 실측 밀도 사이의 상관성을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 중간층 및 기층 모두 현장 및 실측 밀도 사이의 상관계수 R 값이 0과 가까워 상관성이 거의 없는 것으로 판단된다. 또한 R 값

의 신뢰구간의 범위가 0.5를 넘지 못하는 경향을 나타내어 현장과 실측 밀도 사이의 신뢰성이 감소되는 것으로 판단된다.

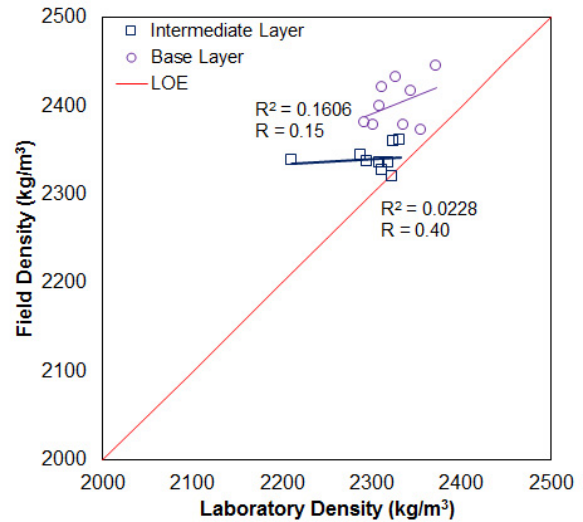


Fig. 5 Field and Laboratory Densities in Section A

Table 6는 G현장 구간과 동일하게 S현장 구간에서의 혼합물 종류와 현장 및 실측 밀도 값을 나타내며 Table 7은 상관계수 R 값과 신뢰구간을 나타낸다.

Table 6. Field and Laboratory Densities in Section B (Average Values)

Section	Base layer		Intermediate layer	
	Lab. density (kg/m <sup>3</sup> )	Field density (kg/m <sup>3</sup> )	Lab. density (kg/m <sup>3</sup> )	Field density (kg/m <sup>3</sup> )
1	2362	1958	2296	2200
2	2367	2125	2347	2112
3	2368	2172	2349	2168
4	2348	2107	2300	2234
5	2359	2146	2316	2220
6	2401	2139	2329	2202
7	2333	1921	2313	2098
8	2340	1851	2322	2032
9	2361	1801	2322	2089

Table 7. Confidence Interval of Correlation Coefficient R

Layer	R	Confidence interval of R
Base	0.51	0.68 > R > 0.28
Intermediate	0.0	-

B현장 구간에서도 A현장 구간에서와 동일한 결과를

나타내었다. 이는 현장에서 시험 포장 시 현장 다짐밀도 측정장비의 보정을 제대로 수행하지 못한 결과라고 판단되며 현장 다짐밀도 측정장비의 보정은 매우 중요한 수행과정이고 이를 제대로 수행하지 못한 경우에는 포장의 품질 및 유지관리에 큰 영향을 미칠 것으로 판단된다.

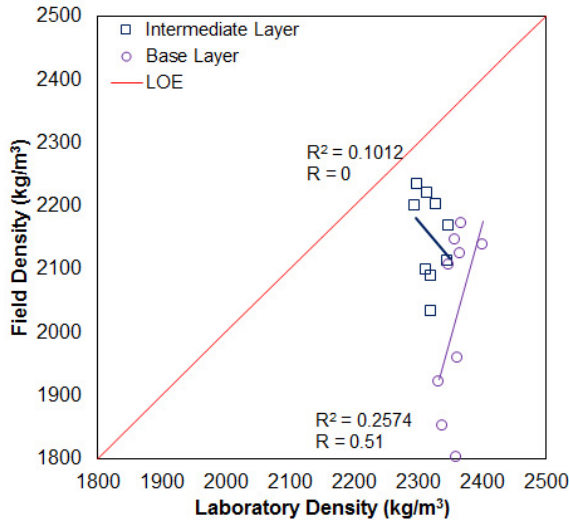


Fig. 6 Field and Laboratory Densities in Section B

## 6. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 아스팔트 포장의 시공 후 품질관리를 위해 비파괴 현장 다짐밀도 측정장비인 PQI(Pavement Quality Indicator)를 이용한 현장 다짐밀도 측정장비로 측정된 밀도 값이 얼마만큼의 타당성 및 신뢰성을 확보하고 있는지를 검토하고, 또한 현장에서 측정된 실측 밀도를 비교·평가하였다. 검토방법으로는 시험포장 구간을 선정하여 각 층별로 현장 밀도 측정장비를 이용한 밀도 값과 측정구간에서의 실측 밀도 값을 측정하여 통계 분석을 실시하였고, 현장에 포설되는 기층과 중간층의 밀도측정 값에 대한 신뢰도를 평가함으로써 품질관리에 사용되는 현장 밀도 측정장비에 대한 타당성을 검토하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 현장 다짐밀도 측정장비를 이용한 신뢰도를 평가하는 방법으로는 Student t-test 분석방법보다는 상관관계수(Coefficient of correlation)에 의한 분석방법을 이용하는 것이 더 정확한 것으로 판단되었다.

2. 또한 실제 현장 시험 포장에서 측정된 현장 밀도와 실측 밀도와의 상관관계수 R 값이 매우 낮은 것으로 나타났으며 이에 따른 신뢰구간 역시 0.5를 넘지 못하는 경우가 대부분인 것으로 나타났다. 이는 현장 밀도를 측정하기 전에 혼합물 종류에 따른 측정장비의 보정을 수행하지 못한 결과로 판단된다.
3. 혼합물 종류(중간층, 기층)에 따른 밀도의 상관관계수 R 값은 상대적으로 굵은골재가 포함되어 있는 기층이 더 높은 것으로 나타났으며 이는 혼합물에 포함되어 있는 골재의 공칭최대치수가 밀도측정에 있어서 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.
4. 현장 밀도를 측정하기 전에 반드시 측정장비에 대한 보정절차를 수행하는 것이 현장 밀도에 대한 신뢰도를 증가시킬 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 국가 R&D 과제인 “공항포장의 Rubber Deposit를 저감시키는 아스팔트 포장 공법 및 보수기술 개발”의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## BIBLIOGRAPHY

Allen, D.L and D.B. Schultz (2003). Evaluation of Non-nuclear Density Gauges. Kentucky Transportation Center.

Hwang, S.D. (2004), Improvement of Asphalt Pavement Construction Technology-Management of Field Compaction. Korean Society of Road Engineers, Special Issue Vol. 6-2, pp. 12-18.

Harrel, M.J. and W.G. Buttlar (1999), Performance Evaluation of the Pavement Quality Indicator (PQI). Illinois Cooperative Highway Research Program, Project IHR-425.

Hausman, J.J. and W.G. Buttlar (2000), Report on Laboratory Analysis of Transtech Modle 300 Pavement Quality Indicator. Illinois Cooperative Highway Research Program, Project IHR-425.

Henault, J.W. (2001), Field Evaluation of a Non-nuclear Density Pavement Quality Indicator. Final Report of Research Project SPR-2227, Connecticut Department of Transportation.

Romero, P. (2002). Evaluation of Non-nuclear Gauges to Measure Density of Hot-Mix Asphalt Pavements. The University of Utah Department of Civil Environmental Engineering.

Sargand, S.M. and S. Kim (2005), A Working Review of Available Non-nuclear Equipment for Determining In-place Density of Asphalt. Report No. FHWA/OH-2005/18, Ohio Research Institute for Transportation and Environment.