



## 비파괴 밀도시험을 통한 아스팔트 콘크리트의 공극률 추정 연구

### Estimation of Air Voids of Asphalt Concrete Using Non-destructive Density Testing

나일호<sup>a</sup> · 이성진<sup>b</sup> · 윤지현<sup>c</sup> · 김광우<sup>d,†</sup>

Na, Il-ho · Lee, Sung-Jin · Yoon, Ji-Hyeon · Kim, Kwang-Woo

#### Abstract

The air-void is known to be one of the influencing factors for estimating long-term performance of asphalt concrete. Most of all, confirming air void or density of pavement layer is important for quality control of field compaction level of asphalt concrete pavement. In this study, a non-nuclear type non-destructive density gage (NDDG) was used to estimate compacted air-voids of asphalt pavement as a non-destructive test method. Asphalt concrete slab specimens were prepared using 6 types of asphalt mixes in laboratory (lab) for lab NDDG test. Four different base structure materials were used to find out if there were any differences due to the type of base structure materials. The actual air-voids and NDDG air-voids were measured from 6 asphalt concrete slabs. Four sections of field asphalt pavements were tested using the NDDG, and actual air voids were also measured from field cores taken from the site where the NDDG air-void was measured. From lab and field experimental tests, it was found that the air-voids obtained by NDDG were not the same as the actual air-voids measured from the asphalt concrete specimen. However, it was possible to estimate air voids based on the relationship obtained from regression analysis between actual and NDDG air voids. The predicted air-voids based on the NDDG air-voids obtained from 50mm depth were found to be reliable levels with  $R^2=0.9$ . Therefore, it was concluded that the air-voids obtained from NDDG could be used to estimate actual air-voids in the field asphalt pavement with a relatively high coefficient of determination.

**Keywords:** Asphalt concrete; non-destructive density; air voids; field asphalt pavement

#### 1. 서 론

최근 들어 폭염, 집중호우 등 이상기후 현상으로 인해 2001~2010년 간의 한반도의 연평균기온은 13.3°C로 과거 30년(1971~2000)간 평균값인 12.7°C보다 0.5°C 상승하였다. 강수량 또한 최근 10년 동안 20세기 초반 10년에 비해 약 19%(220mm) 증가 하고 있어 앞으로도 기온 및 강수량이 계속 상승할 것으로 전망되고 있다(Lee et al., 2011; Kim et al., 2011). 이러한 기상이변은 아스팔트 포장의 영구 변형(Permanent deformation or rutting), 포트홀(Pothole), 균열(Cracking) 등과 같은 조기 파손의 촉진으로 도로 포장의 평균

수명을 현저히 감소시키는 원인이 된다(Kwon, 2014; Kim et al., 2015). 도로 포장의 조기 파손에 대한 주요 대책은 과적 차량의 단속과 같은 외적 요인의 관리도 있지만, 포장 재료의 선정 및 배합 설계 등과 같은 재료 요인, 포설 온도 관리 및 다짐 등의 시공관리 요인 등도 있다.

이러한 다양한 요인들 중 필수적으로 관리되어야 할 요소는 아스팔트 포장의 다짐도를 나타내는 공극률 관리라 할 수 있다. 아스팔트 콘크리트 포장의 적정 다짐을 통한 소요 공극률 유지는 포장의 내구성과 관계되기 때문에 설계 수명 기간 동안 공용성에 큰 영향을 미치는 요소이다(Hwang, 2004; Roberts et al., 1996).

이에, 국내에서는 아스팔트 포장 시공 후 3,000m<sup>2</sup>당 3개 이상의 코어를 채취하여 포장체의 공극률을 관리 하도록 되어 있다(MOLIT, 2014). 하지만 현장의 코어 샘플 확보를 위해서는 포장표면에 인위적으로 구멍을 내는 손상이 불가피하고, 이로 인해 결함이 발생할 우려가 높아져 아스팔트 포장의 공용수명을 단축시키는 요인이 될 뿐만 아니라 교통통제에 따른 불편함 등의 문제점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 비 파괴 현장 밀도 측정기(Non-destructive density gage; NDDG)를 이용한 측정 방법이 개발 중이고, 객관적인 평가를 통해 현장 적용이 시도 되고 있다. 이 장비의 사용은 시공 후 포장 표면에 코어를 뚫지 않는 이점 이외에도, 다짐

<sup>a</sup> Research Engineer, Future Business Development Division R&D Center, Korea Petroleum Industries Company

<sup>b</sup> Researcher, Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

<sup>c</sup> Researcher, Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

<sup>d</sup> Professor, Department of Regional Infrastructures Engineering, Kangwon National University

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-33-250-6467 Fax: +82-33-242-2095

E-mail: [asphalttech@hanmail.net](mailto:asphalttech@hanmail.net)

Received: September 4, 2018

Revised: October 1, 2018

Accepted: October 12, 2018

작업 단계에서 실시간으로 다짐 정도를 확인할 수 있고, 필요한 부분에 추가적인 다짐이 가능하게 되어 품질관리가 용이하다.

아스팔트 포장 시 동일한 품질의 아스팔트 혼합물로 일관성 있게 시공하였더라도 코어를 통한 공극률 측정은 측정방법 및 장비, 측정자간의 차이와 환경적 요인 등으로 인해 오차가 발생할 수 있고(Romero, 2002; Sargand et al., 2005; Kim et al., 2009; Kim et al., 2015), 이를 보완하기 위한 방안으로 NDDG 장비를 적용하고 있다. 하지만 NDDG를 적용하기 위해서는 해당장비와 현장여건 등 다양한 조건들을 고려한 객관적인 검증이 선행 될 필요가 있다(Allen et al., 2003; Henault, 2010).

따라서 본 연구의 목적은 NDDG로 측정된 공극률의 특성을 파악하고, 시험실 및 현장의 공시체로부터 얻은 실측 공극률과 비교 분석하여 신뢰도 있는 현장공극률의 추정 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 실내시험에서 측정된 다양한 공시체의 실측 공극률 값과 NDDG로 측정된 공극률 값 간에 회귀분석을 진행하였다. 또한, 실내 시험에서 얻은 회귀분석 모델을 현장에 적용하여 실측 값을 추정 하고, 이 추정 값은 실제 현장 코어 공시체의 실측 공극률 값과 비교분석됨으로써 신뢰도 있는 아스팔트 포장의 품질관리 방안으로 NDDG의 현장 적용 타당성을 검토하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 재료

#### 가. 아스팔트

본 연구에서 사용한 아스팔트는 국내에서 가장 일반적으로 사용되는 PG64-22등급의 AP-5와 STE(Styrenic thermoplastic elastomer) 2종류를 사용하고, PG76-22등급의 아스팔트 바인더는 SBS (Styrene butadiene styrene), LDPE(Low density poly ethylene), CRM(Crumb rubber modifier)의 폴리머로 개질 된 아스팔트 3종류를 사용하였다. 총 5가지의 바인더에 대하여 침입도 시험기, 연화점 시험기, 점도 시험기, DSR(Dynamic shear rheometer), BBR(Bending beam rheometer) 등을 이용하여 실험을 진행하고 아래의 Table 1와 같이 아스팔트의 특성을 확인하였다.

#### 나. 골재

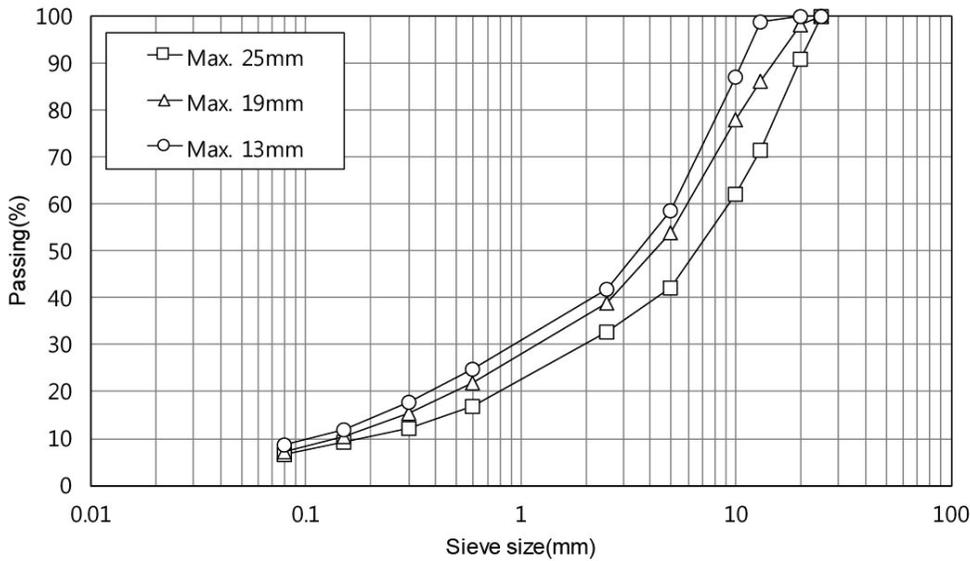
골재의 품질 및 입도는 아스팔트 혼합물의 역학적 특성 및 현장 공용성에 중요한 영향을 미치는 요인이고, 생산지 별로 다르므로 사용 전에 물리적 특성을 파악하여 시방규정에 적합한지 반드시 확인해야 한다. 본 연구에 사용된 골재는 화강암(Granite)으로 쇄석 굵은 골재와 잔 골재(Screenings)를 사용하고, 채움재(Mineral filler)로는 석회석 분을 이용하였다. 본 재료들에 대한 물리적 특성을 확인하기 위해 KS F 2503에 의하여 실내시험을 실시하고, Table 2에서 보는 바와 같이 모두 국내 골재 기준을 만족하고 있다. 골재의 합성입도는 KS F 2502

Table 1 Properties of asphalts

Classification		Specification	AP-5	STE	SBS	LDPE	CRM
Penetration, 1/10mm		-	71	48	40	35	38
Softening point, °C		-	49.6	51.7	78.6	80.1	83.3
Viscosity, cP, 135 °C		-	415	713	1,904	2,152	2,025
G*/sinδ, kPa	64 °C	≥ 1.0	1.21	2.81	-	-	-
	70 °C		0.57	1.33	2.58	2.50	2.54
	76 °C		-	-	1.40	1.36	1.48
	82 °C		-	-	0.88	0.81	0.90
After (R)TFOT							
G*/sinδ, kPa	64 °C	≥ 2.2	2.6	2.31	-	-	-
	70 °C		1.1	1.08	6.78	5.20	7.28
	76 °C		-	-	3.25	3.02	3.84
	82 °C		-	-	1.97	1.86	2.06
PAV residue							
Stiffness, MPa	-12 °C	≤ 300	190	124	152	160	156
M-value	-12 °C	≥ 0.3	0.35	0.32	0.31	0.31	0.42
PG grade			64-22	64-22	76-22	76-22	76-22

**Table 2** Properties of aggregates

Classification		Apparent specific gravity	Absorption	Abrasion
Specification		> 2.45	< 3.0%	> 35%
Granite	25mm	2.69	0.67	21.1
	19mm	2.71	1.33	30.7
	13mm	2.65	0.81	19.5
	Fine aggregate	2.67	1.01	-
Filler		2.75	-	-



**Fig. 1** Gradation curve (25mm, 19mm, 13mm)

에 따라 체가름 시험을 실시하여 Fig. 1과 같이 굵은 골재 최대 치수인 25mm, 19mm, 13mm의 합성입도 곡선을 시험에 사용하였다.

## 2. 시험 방법

### 가. 시험체 제조

아스팔트 혼합물을 제조하기 위해 아스팔트 바인더와 골재를 혼합 후 약 150°C에서 1시간의 단기 노화 (Short term aging)를 진행하고, 준비된 305×305×100mm 몰드에 아스팔트 혼합물을 담아 다짐하여 실제 표층의 포장 두께인 약 50mm로 아스팔트 콘크리트를 제조하였다. 이때 공극율은 1~5% 범위 내에서 분포하도록 하고 6종류의 밀입도 슬래브 공시체에 대해 종류별로 각 3개씩 제조하였다. 다짐된 아스팔트 혼합물의 대표적인 체적특성으로는 공극율 (Voids in total mix; VTM), 골재 간극율 (Void in the mineral aggregate; VMA), 포화도 (Voids filled with asphalt; VFA)가 있으며, 이러한 요소들은 아스팔트 혼합물의 포장 공용성에 영향을 미칠 수 있으므로

혼합물의 종류 및 다짐 조건 등의 변경 시 확인하는 과정이 필요하다. 따라서 아래의 식(1)~식(3)을 이용하여 실내에서 제조된 슬래브 공시체와 현장 채취된 공시체를 대상으로 체적 특성을 확인하였다.

$$VTM = \frac{V_V}{V_T} \times 100 = 100 \left( 1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}} \right) \quad (1)$$

여기서, VTM는 공극율(%),  $V_V$ 는 공극의 체적,  $V_T$ 는 다짐된 공시체의 전체 체적,  $G_{mb}$ 는 다짐된 혼합물의 겉보기 비중,  $G_{mm}$ 은 혼합물의 최대 비중이다.

$$VMA = \frac{V_V + V_{EAC}}{V_T} \times 100 = 100 - \left\{ 1 - \frac{(G_{mb} P_s)}{G_{sb}} \right\} \quad (2)$$

여기서,  $V_V$ 는 공극의 체적,  $V_{EAC}$ 는 유효아스팔트의 체적,  $V_T$ 는 다짐된 공시체의 전체 체적,  $G_{mb}$ 는 다짐된 혼합물의

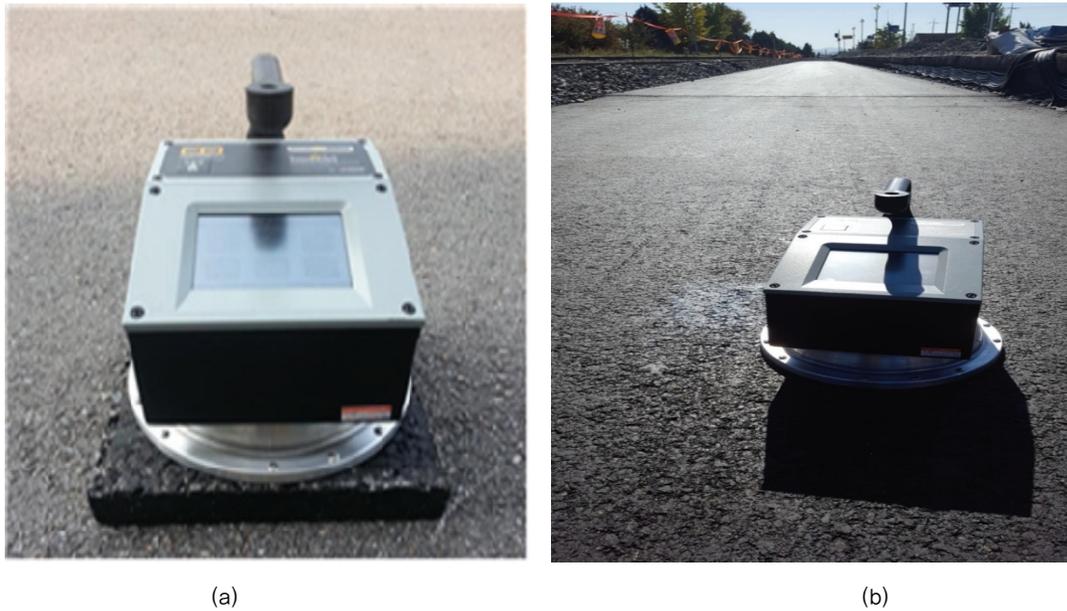


Fig. 2 Density test using NDDG on (a) laboratory slab specimen and (b) field pavement

겉보기 비중,  $P_s$ 는 아스팔트 혼합물 전체 질량에 대한 골재 비율(%),  $G_{sb}$ 는 합성된 골재의 겉보기 비중이다.

$$VFA = \frac{V_{EAC}}{V_{EAC} + V_V} \times 100 = 100 - \left(1 - \frac{V_a}{VMA}\right) \quad (3)$$

여기서,  $V_{EAC}$ 는 유효아스팔트의 체적,  $V_V$ 는 공극의 체적,  $V_a$ 는 공기의 체적,  $VMA$ 는 골재 간극률(%)이다.

#### 나. 실내 비 파괴 밀도 시험

실내측정에서 실제 현장의 포장 두께를 고려하여 공시체 두께가 약 50mm가 되도록 제조하고, 모든 공시체에 대해 동일한 온도조건을 유지하기 위해 실내 및 현장이 약 25°C 상태

일 때 비 파괴 밀도 측정 실험을 진행하였다. 아스팔트 혼합물 슬래브의 윗면(다짐)에 Fig. 2(a)와 같이 측정장비를 올려놓은 상태에서 측정하고, 측정 방법은 방향을 돌려가며 정 방향에서 우로 60도의 각도로 회전해 나아가면서 6회 측정을 진행하였다. Fig. 2(b)는 아스팔트 콘크리트가 시공된 서로 다른 현장 4곳을 선정하여 5m 간격마다 가로 50cm 세로 50cm 범위 내에서 비 파괴 밀도 측정기를 이동시켜 약 10개 지점을 선정 후 실내 시험과 동일한 방법으로 60도의 각도로 회전(6회 측정)하여 한 곳(50×50cm 내)에서 약 60회를 측정하고, 평균값을 사용 함으로서 발생할 수 있는 표본 오차를 줄이고자 하였다. Table 3는 실내시험을 진행한 각각의 시험 조건 및 비 파괴 밀도 측정을 위해 사용된 공시체의 구성을 보여준다.

Table 3 Specimen composition and test condition

Method	Depth of measure	No.	Base type below asphalt specimen	Detailed base materials below asphalt specimen
Non-nuclear gage	50mm	1	Lab. floor	Lab. urethane floor on top of concrete slab
		2	Con. slab	Concrete slab specimen
		3	Asp. pavement	Asphalt pavement parking lot
		4	Con. floor	Concrete slab floor
	30mm	1	Lab. floor	Urethane floor on top of concrete slab
		2	Con. slab	Concrete slab specimen
		3	Asp. pavement	Asphalt pavement parking lot
		4	Con. floor	Concrete slab floor



Fig. 3 Wet core specimens



Fig. 4 Dry core specimens

다. 현장 밀도 시험

아스팔트 콘크리트 포장 상면에서 3개 지점을 선정하고 비 파괴 밀도 측정기를 이용하여 공극률 수집을 완료한 후에 동일한 지점에서 Fig. 3과 같이 직경 100mm로 코어 공시체를 약 20cm 깊이로 채취 하였다. 채취된 공시체의 경우 비 파괴 밀도 측정기의 최대 측정 깊이이자 실제 포장두께인 약 5cm로 절단하고 시료의 공극률을 실측하였다. Fig. 4는 채취 된 시료의 건조상태를 보여준다.

III. 결과 및 고찰

1. 물리적 특성 시험

아스팔트 혼합물의 실측 공극률(Actually measured air-voids)은 비 파괴 밀도 측정기로 측정된 공극률(Air-voids by non-destructive gage) 치의 신뢰도 평가에 중요한 요소이다. 이론최대밀도와 겉보기 비중에 따른 공극률, 골재 간극률, 포화도 등의 물리적 특성을 측정된 결과는 Table 4와 같다. 이중 공극률 데이터는 비 파괴 시험으로 측정된 공극률 값과의 비교에 사용되었다.

Table 4 Actually measured physical properties

OAC(%) <sup>a</sup>	Asphalt type	Thickness (mm)	Density (g/cm <sup>3</sup> )		Air void (%)	VMA (%)	VFA (%)
			<sup>B</sup> Db	<sup>TM</sup> D <sup>c</sup>			
5.4	ARMA(13mm)	50.2	2.457	2.481	1.2	14.2	91.5
4.8	STE(19mm)	50.5	2.438	2.504	2.6	14.0	81.2
4.4	STE(25mm)	50.5	2.449	2.520	2.8	13.3	78.7
4.7	AP-5(13mm)	50.4	2.439	2.551	4.4	17.3	74.7
4.5	LDPE(13mm)	50.0	2.432	2.510	3.1	16.0	80.5
4.7	SBS(13mm)	50.0	2.475	2.563	3.4	14.8	76.8

a: Optimum asphalt content, b: Bulk density, c: Theoretical maximum density

Table 5 Test results of air voids by non-destructive gage

Class	Depth	No.	Base	AP5 (13mm)	SBS (13mm)	LDPE (13mm)	CRM (13mm)	STE (20mm)	STE (25mm)
Actual	Total	-	-	4.4	3.4	3.1	1.2	2.6	2.8
Non-destructive gage	50mm	①	Lab. floor	9.8	8.7	8.2	1.9	4.6	5.4
		②	Con. slab	10.7	10.2	8.6	2.5	4.3	8.4
		③	Asp. pavement	9.1	8.0	7.8	1.4	3.2	4.6
		④	Con. floor	11.3	10.2	10.2	3.4	4.9	6.1
	30mm	①	Lab. floor	11.3	8.9	10.7	5.7	6.2	9.5
		②	Con. slab	10.9	9.3	10.1	5.4	8.0	8.4
		③	Asp. pavement	10.7	8.3	10.0	5.1	7.5	9.0
		④	Con. floor	10.7	9.6	11.4	6.1	8.8	9.9

## 2. 비파괴 밀도 실내 시험

비 파괴 밀도 실내 측정 결과는 Table 5과 같으며, 아스팔트 혼합물 슬래브의 실측 공극률과 비 파괴 게이지 측정 공극률을 보여준다. 실측공극률과 비 파괴 측정 공극률을 비교 시 유사한 것도 있지만, 그 값이 두 배 이상 높은 것도 있었다. 또한 콘크리트 및 아스팔트 콘크리트 윗면에서 측정된 값이 모두 유사한 상관관계를 보임으로 가장 많이 사용되고 있는 두가지 재료에 대한 아스팔트 콘크리트의 공극률 측정이 가능함을 보였다.

Fig. 5부터 Fig. 8는 각기 다른 바닥 위에 놓인 아스팔트 슬래브 공시체를 이용하여 NDDG 측정 가능 깊이인 30mm와 50mm의 깊이 별 비 파괴 공극율과 슬래브 공시체에 대한 실측 공극률의 상관관계를 나타내며, 위치에 따라 조금씩 차이를 보였다. 50mm 깊이에서는 평균  $R^2=0.8398$ , 30mm 깊이에서는  $R^2=0.7873$ 으로 50mm가 더 높은 상관관계를 보여준다.

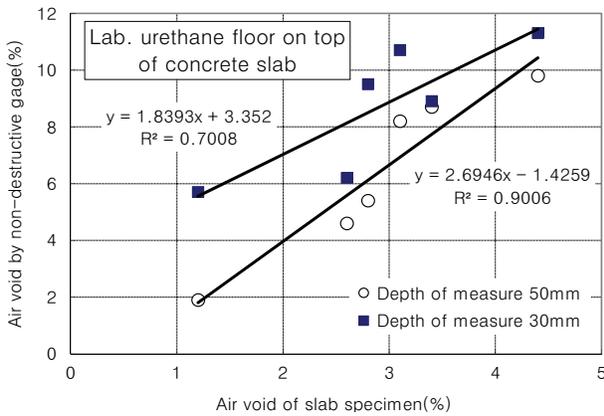


Fig. 5 Relation of actual air voids and the air voids measured by NDDG for the asphalt concrete slab on top of lab urethane concrete floor

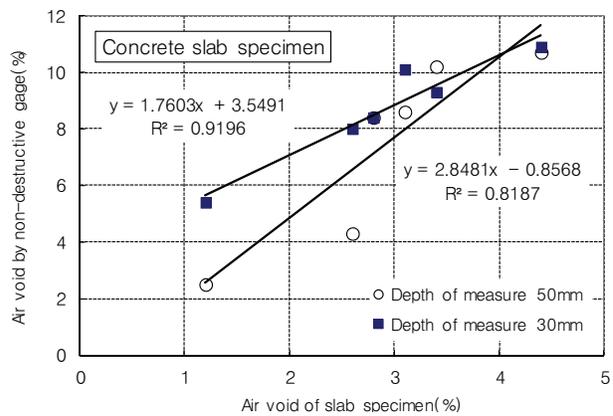


Fig. 6 Relation of actual air voids and the air voids measured by NDDG for the asphalt concrete slab on top of concrete slab specimen

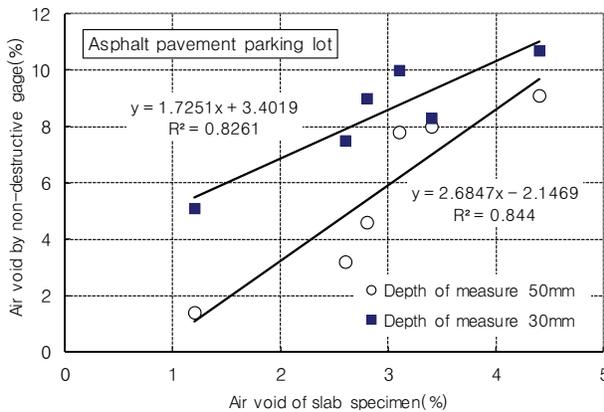


Fig. 7 Relation of actual air voids and the air voids measured by NDDG for the asphalt concrete slab on top of asphalt pavement parking lot.

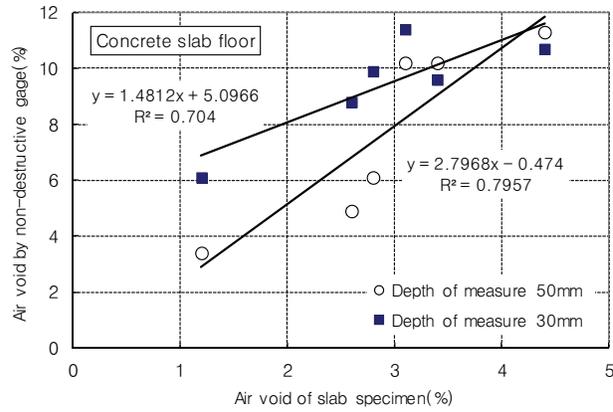
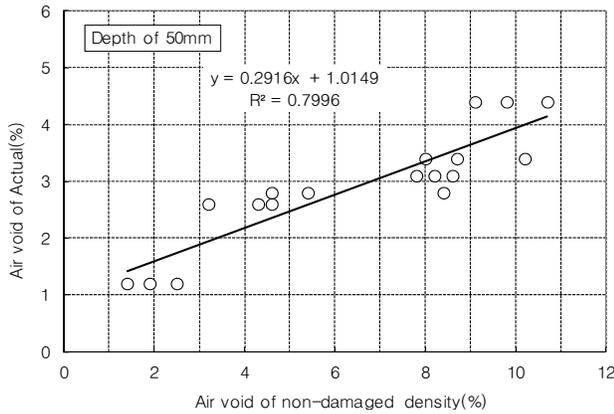


Fig. 8 Relation of actual air voids and the air voids measured by NDDG for the asphalt concrete slab on top of concrete floor

하지만 30mm의 경우 실측공극률이 낮은 2% 이하에서 모두 5~6%의 높은 공극률을 보여 50mm에서의 측정이 변별력이 더 있음을 알 수 있었다.

Fig. 9, 10은 상기 Table 5에서 50mm의 경우 ①, ②, ③의 데이터와 30mm의 경우는 ②, ③, ④의 데이터를 종합하여 두 그룹에 대한 평균은 각각 6.52, 8.87이며 표준편차는 각각 3.03, 2.02임을 확인하였다. 이를 통해 회귀분석을 수행한 결과에서 50mm는  $R^2$ 값이 0.7996, 30mm는  $R^2$ 값이 0.7717로 두 가지 모두 우수하게 나타나서 비 파괴 측정 공극률(Air void of non-damaged density)로부터 슬래브 공시체의 실제 공극률(Air void of actual)을 추정할 수 있는 모델을 얻을 수 있었다.

이중 30mm의 경우 실측 공극률이 낮은 2% 이하에서 비 파괴 값이 모두 5~7%의 높은 공극률을 보여 데이터의 적용 범위(x값)가 5~11%로 좁으므로 유용성이 떨어진다. 하지만

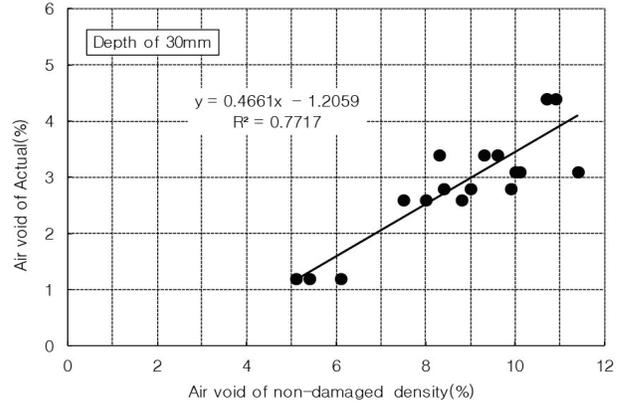


**Fig. 9** Relation of actual air voids and air voids measured by NDDG for asphalt concrete slab at the depth of 50mm

50mm의 경우가 다소 R<sup>2</sup>값은 유사하나 데이터의 적용 범위 (x값)도 약 1~11%로 넓어 실제 현장에서 공시체 채취를 통해 나타나는 공극률이 약 1~10%범위 임을 감안한다면 활용성이 큰 것으로 나타났다. 따라서 Fig. 9의 회귀분석 모델로부터 NDDG에서 얻어진 공극률을 적용한다면 신뢰도 있는 실측 공극률의 추정이 가능하다.

### 3. 비 파괴 시험기 현장 검증

아스팔트 콘크리트 포장 현장의 NDDG 공극률 및 실측 공극률 측정된 결과를 Table 6에서 보여주고 Fig. 11와 같이 앞서 실내시험에서 제시된 모델 식을 사용하여 추정된 예측 공극률과 회귀분석을 수행하였다. 현장 NDDG 측정 시에는 실내시험에서와 같은 방법으로 NDDG 자체에서 조정 가능한 측정 깊이 50mm와 30mm로 구분하였으며, 모든 측정결과로



**Fig. 10** Relation of actual air voids and air voids measured by NDDG for asphalt concrete slab at the depth of 30mm

부터 전체적으로 NDDG 측정 값이 6.4~24.9%까지 다양하게 나타났다.

앞서 Fig. 9과 Fig. 10에서 실내시험을 통해 확인된 NDDG 측정 깊이 50mm와 30mm의 상관관계 수식을 사용하여 Table 6과 같이 현장 공극률을 예측하고, 예측한 추정 공극률(Table 6의 Predicted air voids)과 코어 공시체로부터 직접 측정된 공극률(Table 6의 Air voids of field core) 데이터의 회귀분석을 수행하였다. 그 결과 깊이 50mm의 경우 R<sup>2</sup>≃0.9, 깊이 30mm의 경우 R<sup>2</sup> ≃0.78으로 나타났다. 이로부터 깊이 50mm가 30mm에 비해 높은 상관관계를 보임으로써 실내시험의 결과와 마찬가지로 현장 측정 결과에서도 측정 깊이 50mm가 변별력이 있는 것으로 나타났다.

깊이 30mm 추정치는 50mm에 비해 다소 높은 예측 공극률을 나타내는 것을 알 수 있다. 즉, 실측 공극률을 기준으로 볼 때 현장에서 많이 나타나는 실측 4~7%의 경우 Fig. 11의

**Table 6** Results of field test

Section (Max agg. size)	OAC (%)	Test site	Air-voids of field cores (%)	Air-voids at the depth of 50mm		Air-voids at the depth of 30mm	
				NDDG air-voids (%)	Predicted air-voids (%)	NDDG air-voids (%)	Predicted air-voids (%)
Section-I (13mm)	5.6	1	3.7	7.1	3.14	12.1	4.37
		2	3.0	7.8	3.33	7.6	3.28
		3	2.7	6.4	2.94	9.6	3.79
Section-II (13mm)	5.5	1	4.4	13.7	4.72	15.6	5.12
		2	2.7	8.6	3.54	12.2	4.39
		3	3.0	9.1	3.66	13.8	4.74
Section-III (20mm)	5.4	1	5.4	12.6	4.48	23.2	6.55
		2	5.8	16.9	5.38	20.9	6.15
		3	6.0	21.3	6.21	15.8	5.16
Section-IV (20mm)	5.4	1	6.4	20.1	5.99	25.6	6.96
		2	5.9	19.5	5.88	24.8	6.82
		3	7.5	23.1	6.53	24.9	6.84

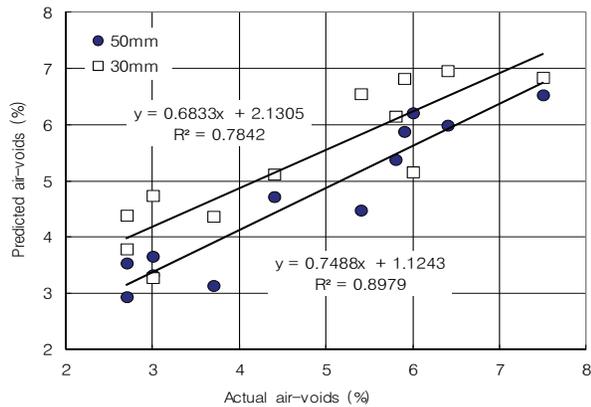


Fig. 11 Relation of actual air voids and the air voids estimated based on the air voids obtained using NDDG from field pavement sections at the depth of 50mm and 30mm

회귀 곡선에 의한 비 파괴 예측 공극률은 측정 깊이 50mm 데이터에서 모두 오차가 10% 이내로 나타나지만, 30mm 데이터는 실측 4%, 5%와 21%, 11%의 큰 오차가 난다. 따라서  $R^2$ 이 훨씬 높은 50mm에서의 NDDG 측정치로부터 공극률 예측이 더 정확하며, 이 정도의 오차 수준이면 현장에서 활용성이 충분할 것으로 사료된다.

또한 NDDG 측정 값은 20% 이상도 나타나 실측밀도 값과의 차이가 크게 나타나므로 향후 보다 심도 있는 연구를 통해 원인을 밝힐 필요가 있다고 판단된다. 그리고 본 연구는 한정적인 실험 의해 얻어진 값이므로 이의 실용화를 위해서는 향후 많은 데이터와 실험 조건으로부터 보다 정확한 추정 식 개발이 필요하다.

#### IV. 결론

본 연구는 아스팔트 콘크리트 포장의 품질관리 방법 중 하나인 비 파괴 밀도 시험기(Non-destructive density gage: NDDG)를 이용한 품질관리 방안을 모색하고, 측정치로부터 신뢰도 높은 추정치를 얻을 목적으로 연구가 수행되었다. 실내 및 현장 실험 결과 본 연구에 사용된 NDDG는 현장 적용 가능성이 충분하다는 결론을 도출할 수 있었으며 세부적인 결론은 다음과 같다.

1. 실내시험에서 NDDG 데이터는 하부구조물 재료 종류와 측정 깊이에 따라 다소 차이가 있었으며, 아스팔트 재료의 종류에 따라라도 공극률 측정치에 차이가 나타나는 것으로 확인되었다.
2. NDDG에서 설정 가능한 50mm와 30mm의 측정 깊이에 따라 실내에서 측정된 공극률이 각각 6.8%, 8.9%로 두

공극률 간에 2.1%의 차이를 나타냈고, 현장 측정에서도 두 측정 깊이에 따른 공극률의 차이가 3.4%를 보여 두 측정 깊이에 의한 공극률 차이가 상이함을 확인할 수 있었다. 이에 NDDG 사용시 측정 깊이에 따라 측정되는 공극률의 값이 달라질 수 있음을 감안하여 실내 검증 후 현장에 적용하는 것이 필요하다.

3. 50mm와 30mm의 깊이에서 측정된 데이터로 실측 공극률과의 회귀분석을 수행한 결과 모두  $R^2 \geq 0.77$  이상으로 높은 상관관계를 보여 비 파괴 측정치로부터 실제 공극률을 추정할 수 있었다. 특히 50mm 데이터가 상대적으로 결정계수  $R^2 \approx 0.9$ 로 높고 데이터의 적용 범위도 1~11%이어서 실제 현장에서의 아스팔트 콘크리트의 공극률 범위를 고려한다면 그 활용성이 클 것으로 사료된다.
4. 현장에서 NDDG로부터 추정된 공극률과 실제 코어로부터 측정된 공극률을 회귀분석 한 결과  $R^2 \approx 0.9$ 로 높게 나타남에 따라 향후 NDDG를 통한 아스팔트 포장의 품질관리 시 비교적 신뢰성 높은 공극률 추정치를 손쉽게 얻을 수 있을 것으로 사료된다.
5. 본 연구는 한가지 NDDG로 한정적인 데이터를 사용한 것이므로 다양한 조건에 따라 측정값이 달라질 수 있다. 그러므로 향후 다양한 현장 데이터들을 축적하여 분석한다면 보다 정확한 추정 식의 개발이 가능하고, 현장밀도를 측정하기 전에는 반드시 측정장비에 대한 보정을 선행하는 것이 NDDG의 신뢰도를 높일 수 있을 것이다.

#### 감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2015 R1D1A1A01058282).

#### REFERENCES

1. Allen, D. L. and D. B. Schultz, 2003. Evaluation of non-destructive density gauges, 4-7. KTC-03-24/FR-115-01-1F. Kentucky Transportation Center.
2. Henault, J. W., 2010. Evaluation of the nonnuclear density gauge for quality control of hot-mix asphalt, 1-20. SPR-2227, Connecticut Department of Transportation.
3. Hwang, S. D., 2004. Improvement of asphalt pavement construction technology-management of field compaction. *Korean Society of Road Engineers* 6(2): 12-18 (in Korean).
4. Kim, B. I., Y. M. Kim, and I. S. Cho, 2009. Evaluation

- and determination of air void for asphalt concrete using a dielectric concrete measurement. *Korean Society of Road Engineers* 11(1): 95-104 (in Korean).
5. Kim, H. C., S. K. Choi, and B. R. Yun, 2011. A statistical analysis on temperature change and climate variability in Korea. *Korea Statistical Society* 18(1): 1-12 (in Korean).
  6. Kwon, S. A., 2014. Development of road pavement construction quality management system for climate change. 3-5. Korea Institute of Construction Technology (in Korean).
  7. Kim, Y. M., J. H. Im, and S. D. Hwang, 2015. Evaluation of emergency pothole repair materials using polyurethane-modified asphalt binder. *Korean Society of Road Engineers* 17(1): 43-49 (in Korean).
  8. Kim, Y. M., J. H. Im, S. L. Yang, K. H. Kim, S. D. Hwang, and K. D. Jeong, 2015. Evaluation of field compaction density by non-destructive density gauge. *Korean Society of Road Engineers* 17(1): 51-58 (in Korean).
  9. Lee, K. M., H. J. Baek, C. H. Cho, and W. T. Kwon, 2011. The recent (2001-2010) changes on temperature and precipitation related to normals (1971-2000) in Korea. *The Korean Geographic Society* 45(2): 237-248 (in Korean).
  10. Ministry of land, infrastructure and transport, 2014. Guidelines for the production and construction of asphalt mixtures, 109-116 (in Korean).
  11. Roberts, F. L., 1996. Hot mix asphalt materials, mixture design, and construction. second edition, Chapter 6. Equipment and Construction.
  12. Romero, P., 2002. Evaluation of non-nuclear gauges to measure density of hot-mix asphalt pavements, 6-24. The University of Utah Department of Civil Environmental Engineering.
  13. Sargand, S. M. and S. Kim, 2005. A working review of available non-nuclear equipment for determining in-place density of asphalt, 19-43. FHWA/OH-2005/18, Ohio Research Institute for Transportation and Environment.