

지표투과레이더를 이용한 아스팔트 혼합물의 공극률 예측에 관한 연구

Estimation of Air Voids in Asphalt Mixtures Using Ground-Penetrating Radar

김제원	Kim, Je Won	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 수석연구원 (E-mail : jewonkim@kict.re.kr)
김연태	Kim, Yeon Tae	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 전임연구원 (E-mail : kyt@kict.re.kr)
김부일	Kim, Booil	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 (E-mail : bikim@kict.re.kr)
박희문	Park, Hee Mun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : hpark@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : The objective of this study was to determine the relationship between the dielectric characteristics of asphalt mixtures and the air voids present in them using ground penetrating radar (GPR) testing.

METHODS : To measure the dielectric properties of the asphalt mixtures, the reflection coefficient method and the approach based on the actual thickness of the asphalt layer were used. An air-couple-type GPR antenna with a center frequency of 1 GHz was used to measure the time for reflection from the asphalt/base layer interface. A piece of aluminum foil was placed at the interface to be able to determine the reflection time of the GPR signal with accuracy. An asphalt pavement testbed was constructed, and asphalt mixtures with different compaction numbers were tested. After the GPR tests, the asphalt samples were cored and their thicknesses and number of air voids were measured in the laboratory.

RESULTS : It was found the dielectric constant of asphalt mixtures tends to decrease with an increase in the number of air voids. The dielectric constant values estimated from the reflection coefficient method exhibited a slight correlation to the number of air voids. However, the dielectric constant values measured using the approach based on the actual asphalt layer thickness were closely related to the asphalt mixture density. Based on these results, a regression equation to determine the number of air voids in asphalt mixtures using the GPR test method was proposed.

CONCLUSIONS : It was concluded that the number of air voids in an asphalt mixture can be calculated based on the dielectric constant of the mixture as determined by GPR testing. It was also found that the number of air voids was exponentially related to the dielectric constant, with the coefficient of determination, R^2 , being 0.74. These results suggest that the dielectric constant as determined by GPR testing can be used to improve the construction quality and maintenance of asphalt pavements.

Keywords

Ground-penetrating radar, dielectric constant, reflection coefficient, air voids

Corresponding Author : Park, Hee Mun, Research Fellow
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 283,
Goyangdae-ro, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea
Tel : +82.31.910.0323 Fax : +82.31.910.0161
E-mail : hpark@kict.re.kr

International Journal of Highway Engineering
http://www.ksre.or.kr/
ISSN 1738-7159 (print)
ISSN 2287-3678 (Online)
Received Jul. 05, 2016 Revised Aug. 01, 2016 Accepted Aug. 01, 2016

1. 서론

도로포장관리시스템(Pavement Management System, PMS)에서는 도로포장의 기능과 성능을 적정 수준으로 유지 및 관리하기 위하여 주기적으로 도로포장의 상태를 모니터링하고 있다. 효과적인 PMS 운영 및 도

로포장의 관리를 위해서는 도로포장의 파손 지점, 유형, 정도의 파악이 필요하다. 이를 위해 PMS에서는 자동노면조사장비, FWD(Falling Weight Deflectometer) 장비, 지표투과레이더(GPR: Ground Penetrating Radar) 장비 등의 측정 결과를 이용하여 한정된 도로유

지보수 예산을 합리적이고 효율적으로 사용하기 위해 노력하고 있다.

이 중 GPR 장비는 전자기파를 이용하여 도로포장층 구조 및 매설물을 비파괴로 조사할 수 있는 장비로, 포장층 두께 측정, 포장층의 밀도 예측, 콘크리트 포장의 다웰바 탐지 등에 적용할 수 있다고 알려져 있으나 국내에서는 아직 많이 활성화되어 있지 않은 상황이다. 국내에서는 일반국도 포장관리시스템에서 주로 포장층 두께 측정을 위해 비접촉식(Air-coupled) GPR 장비를 활용하면서 그 적용범위를 확대하고자 노력하고 있다.

특히 비접촉식 고주파 GPR 장비에서 측정되는 유전상수의 특성으로 인해 아스팔트 혼합물의 밀도 예측이 가능하다. 일반적으로 아스팔트 혼합물의 공극률이 작으면 유전상수가 커지고 공극률이 크면 유전상수가 작아지기 때문이다. 그러므로 유전상수 변화에 따른 아스팔트 혼합물의 공극률 변화를 정립하면 시공 시 혼합물의 다짐도 및 유지관리 시 포장체의 밀도 예측을 통한 포장체의 상태 예측이 가능해지며 향후 아스팔트 혼합물의 품질관리 시 GPR 장비의 적용도 가능해질 수 있다.

본 논문에서는 GPR 시험으로 산정된 아스팔트 혼합물의 유전상수와 밀도간의 상관관계를 정립하고자 한다. 이를 위하여 1.0GHz 중심주파수의 비접촉식 GSSI GPR 장비를 활용하여 국내에서 주로 사용하고 있는 13mm 일반 밀입도 아스팔트 혼합물의 유전상수를 실제 아스팔트 포장 테스트베드 구간에서 측정하였다. 본 구간에서는 아스팔트 포장 시공 시 다짐횟수를 상이하게 적용하여 아스팔트 혼합물의 밀도를 위치별로 총 5단계로 변화되도록 구성했다. 아스팔트 혼합물의 유전상수는 반사계수법과 직접 코어한 아스팔트층 두께를 이용한 두 가지 방법으로 산정하였다. 본 시험을 통하여 아스팔트 혼합물의 공극률과 유전상수의 상관관계를 조사하였으며, 그 결과를 기존문헌 자료와 비교 및 검토를 수행하였다.

2. 유전상수 산정 방법

도로포장 재료의 유전상수는 진공에서의 전자기파의 속도에 대한 도로포장층을 통과하는 전자기파의 상대적인 속도의 비를 의미하며, Eq. (1)(Harry M. Jol, 2009)로 나타낸다.

$$\epsilon_r = \left(\frac{c}{v}\right)^2 \quad (1)$$

여기서,

ϵ_r : 유전상수, c : 빛의 속도($=3 \times 10^8 \text{m/s}$),

v : 도로포장층을 통과하는 전자기파의 속도

Eq. (1)을 이용하여 유전상수를 측정하기 위해서는 포장층을 통과하는 전자기파의 속도를 알아야 하는데, 전자기파의 속도를 알기 위해서는 포장층의 두께와 통과시간을 측정해야 한다. 하지만 GPR 장비를 이용하여 직접적으로 측정할 수 있는 데이터는 반사파의 크기와 이에 대응하는 전자기파의 도달시간이므로 Eq. (1)을 이용하는 방법으로는 유전상수를 계산할 수 없다. 그러므로 현재 GPR 장비를 이용한 포장체의 유전상수 측정은 대부분 반사파의 상대적인 크기(반사계수)를 이용하는 반사계수법을 사용하고 있다. 외국에서는 도로포장층 전체의 평균 유전율을 사용하여 보다 정확하게 층두께를 계산하기 위한 방법으로 전파속도법을 이용하여 유전상수를 측정하는 방법이 연구되었으나, 이를 사용하기 위해서는 두 쌍의 안테나를 장착한 GPR 장비가 필요하다. 본 연구에서는 사용된 GPR 장비는 1개의 안테나를 장착한 1.0GHz 주파수의 비접촉식 장비를 사용하였으므로 반사계수법을 이용하여 유전상수를 산정하였다.

포장체에서 반사계수를 이용하여 유전상수를 산정하기 위해서는 포장표면과 금속판에서 측정한 GPR 데이터를 이용하여야 한다. Fig. 1과 같이 전자기파는 금속판에서 100% 반사되므로 금속판과 포장표면에서 반사된 전자기파 크기의 비를 이용하면 Eq. (2)(Harry M. Jol, 2009)와 같이 포장체의 유전상수를 산정할 수 있다.

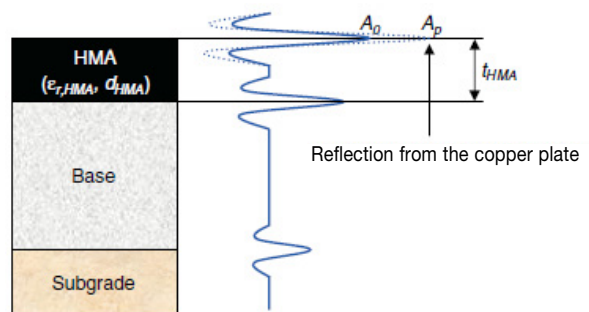


Fig. 1 Typical GPR Signal for Asphalt Pavement (Al-Qadi et al, 2010)

$$\epsilon_{r,HMA} = \left(\frac{1 + \frac{A_0}{A_p}}{1 - \frac{A_0}{A_p}}\right)^2 = \left(\frac{A_p + A_0}{A_p - A_0}\right)^2 \quad (2)$$

여기서,

$\epsilon_{r,HMA}$: 포장층의 유전상수,

A_0 : 공기와 1층 경계면에서 반사된 전자기파의 강도,

A_p : 공기와 금속판에서 반사된 전자기파의 강도

아스팔트 혼합물의 유전상수를 측정하는 두 번째 방법으로 아스팔트 포장층의 코어를 채취하고 직접 아스팔트층 두께를 측정하여 유전상수를 산정하는 방법이다. 아스팔트 포장층의 유전상수($\epsilon_{r,HMA}$), 포장층 표면과 하부 사이의 전파시간(t_{HMA})을 이용하여 포장층 두께(d_{HMA})는 Eq. (3)(Harry M. Jol, 2009)과 같이 계산된다. 여기서, 코어를 통하여 측정된 포장층 두께와 GPR 시험으로 측정된 전파시간을 이용하여 아스팔트 혼합물의 유전상수를 Eq. (4)(Harry M. Jol, 2009)를 통하여 계산한다.

$$d_{HMA} = \frac{ct_{HMA}}{2\sqrt{\epsilon_{r,HMA}}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{r,HMA} = \frac{1}{4} \left(\frac{ct_{HMA}}{d_{HMA}} \right)^2 \quad (4)$$

여기서,

$\epsilon_{r,HMA}$: 포장층의 유전상수,

t_{HMA} : 포장층 표면과 하부 사이의 전파시간,

d_{HMA} : 포장층 두께(코어 두께),

c : 빛의 속도($=3 \times 10^8$ m/s)

3. 유전상수와 공극률의 관계에 대한 기존 문헌 고찰

국외에서는 아스팔트 포장의 품질관리를 위한 목적으로 GPR 장비를 이용한 아스팔트 혼합물의 밀도 측정에 관한 연구가 수행되어 왔다. Saarenketo와 Scullion(2000)은 1.0GHz 주파수의 비접촉식 GPR 장비를 이용하여 반사계수법으로 유전상수를 계산하고 현장에서 코어를 채취한 후 실내에서 공극률을 측정하여 유전상수와 공극률의 관계를 제시하였다. 핀란드에서는 GPR 장비의 사용이 도로 포장의 공식적인 품질관리 방법으로 인정되고 있으며, 연구 결과 유전상수와 공극률은 Fig. 2와 같이 지수관계가

있다고 결론지었다.

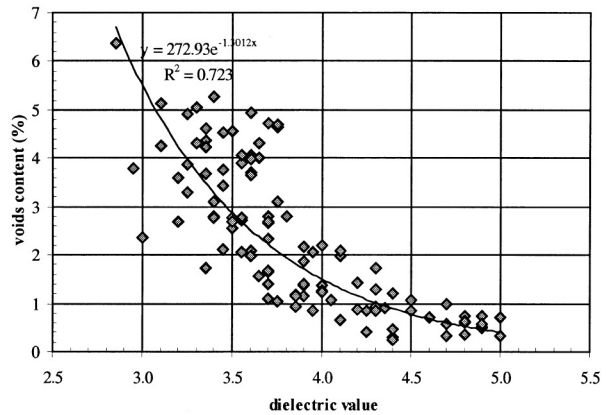


Fig. 2 Relationship between Dielectric Constant and Air Void (Saarenketo and Scullion, 2000)

Al-Qadi 등(2010)은 아스팔트 혼합물의 밀도를 예측하기 위해 기존에 제시된 3가지 모델(Complex Refractive Index Model, Rayleigh Mixing Model, Bottcher Mixing Model)에 대해 동일 혼합물에 대한 실측을 통해 아스팔트 혼합물의 밀도 예측에 가장 적합한 식을 추천하였다. 3가지 모델은 전자기혼합이론(EM mixing theory)을 이용한 모델로써 아스팔트 바인더, 골재, 공기로 구성된 아스팔트 혼합물의 체적과 유전상수의 특성을 이용하여 혼합물의 밀도를 예측하는 모델이다. 밀도가 다른 60cm×60cm×7.5cm 크기의 아스팔트 혼합물 슬래브 4개에 대한 GPR 측정 결과와 각 슬래브에서 코어를 채취하여 걸보기밀도를 측정된 결과를 비교하고 현장 검증을 통해 가장 적합한 아스팔트 혼합물의 밀도예측식으로 Rayleigh Model을 제안하였다.

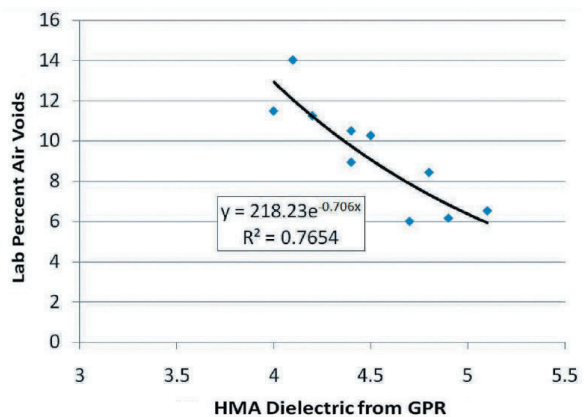


Fig. 3 Relationship between Dielectric Constant and Air Void (Sebesta et al., 2013)

Sebesta 등(2013)은 SHRP 2 Report S2-R06C-RR-1에서 핀란드의 연구와 유사하게 GPR 장비를 이

용하여 유전상수를 계산하고 코어를 채취한 후 실내에서 공극률을 측정하여 Fig. 3과 같이 유전상수와 공극률의 관계를 지수식으로 제시하였다.

이와 같이 외국에서는 GPR 장비를 활용한 아스팔트 포장의 품질관리를 수행하기 위해 유전상수와 공극률 관계를 정립하고자 노력하고 있다. 그러나 아스팔트 혼합물 종류 및 안테나 특성과 환경적 차이에 의해 유전상수와 공극률 관계에 차이가 나타나고 있다. 그러므로 우리나라 상황에 적합한 유전상수와 공극률의 관계 정립이 필요하며 이를 위해 본 연구에서는 우선 일반 밀입도 아스팔트 포장을 대상으로 그 관계를 제시하고자 한다.

4. GPR 시험을 위한 테스트베드 시공

GPR 시험을 통하여 산정된 아스팔트 혼합물의 유전상수와 밀도의 상관관계를 파악하기 위하여 한국건설기술연구원 내 길이 5m, 폭 1m 테스트베드 구간을 선정하였다.

먼저 Fig. 4(a)와 같이 대상 구간의 노면을 20cm 깊이로 굴착한 후 노상다짐을 실시하고 30cm의 보조기층을 설치하였다. 그리고 Fig. 4(b)와 같이 굴착면에 은박지를 종방향으로 설치하였다. 이는 GPR 전자기파는 은박지에서 반사되는 정도가 크므로 아스팔트층 하부에서 반사되는 전자기파의 깊이를 명확하게 파악하기 위함이다. 그 후 Fig. 4(c)와 같이 아스팔트를 표층과 기층 구분없이 20cm를 포설한 후 다짐을 실시하였다. 아스팔트 혼합물은 중교통량 이하 내마모층 표층에 일반적으로 사용하는 13mm 밀입도 아스팔트 콘크리트를 사용하였으며, 다짐은 길이방향으로 1m 구간씩 다짐횟수를 0회, 1회, 2회, 4회, 6회로 조절하여 다짐도에 차이를 두어 아스팔트 혼합물의 공극률 변화가 발생하도록 하였다. 시공 후 전경은 Fig. 5와 같다.



Fig. 4 Construction Process of Testbed



Fig. 5 View of the Testbed after Construction

또한 다짐횟수 차이에 대한 아스팔트 혼합물의 실제 공극률 측정을 위해, Fig. 6과 같이 은박지가 설치된 위치에서 다짐횟수에 차이가 있는 5구간에 대해 각각 6개씩 총 30개의 코어를 채취하여 아스팔트 혼합물의 공극률을 실내에서 측정하였다. Fig. 6에 표시된 숫자는 코어 번호를 의미한다.

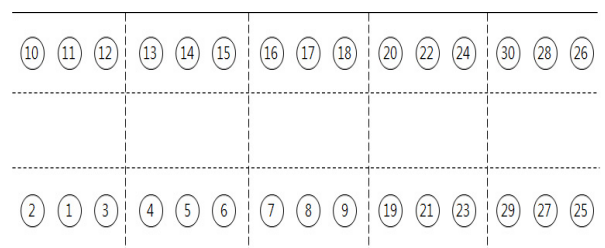


Fig. 6 Core Locations for Measuring Air Void of Asphalt Mixtures

5. 시험 결과

테스트베드 시공 완료 후 1.0GHz 주파수의 비접촉식 GPR 장비를 이용하여 공극률 변화에 따른 아스팔트 혼합물의 유전상수를 측정하였다.

우선 Wheel Survey 방식으로 테스트베드 구간에 대한 B-scan 결과를 획득하여 전반적인 밀도 변화에 따

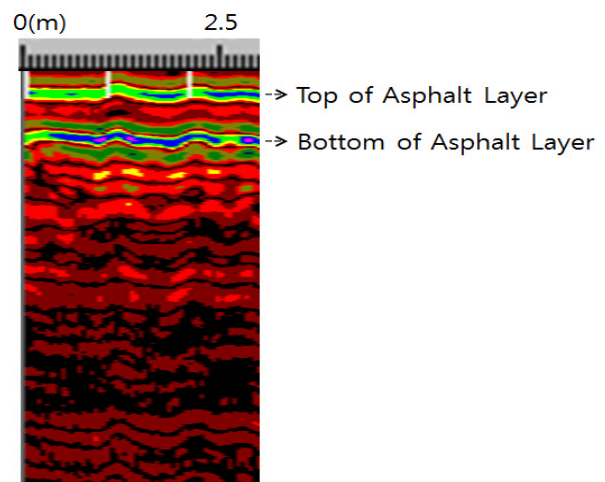


Fig. 7 B-scan Data at Test Section

른 단면 변화를 확인하였다. 테스트베드 우측에 건물이 존재하여 장비 이동에 제약이 발생하였기 때문에 5m 구간 전체에 대한 B-scan 결과를 얻지는 못하였으나, Fig. 7과 같이 장비 이동이 가능한 3m 구간에 대해서는 시공한 것과 같이 1m 간격으로 단면 변화가 발생함을 알 수 있었다. Fig. 7의 한 눈금 간격은 0.5m이다.

B-scan 결과를 확인한 후, Fig. 6에 있는 코어 채취 위치에서 Point Survey 방식으로 Fig. 8과 같은 A-scan 결과를 취득하여 정확한 코어 위치에 대한 유전상수 값을 계산하였다. 그 후 A-scan 측정 위치에서 코어를 채취하여 두께를 측정하였으며, 아스팔트 샘플의 공극률은 실내에서 측정하였다. 이를 통해 유전상수와 공극률의 관계를 정립할 수 있기 때문이다.

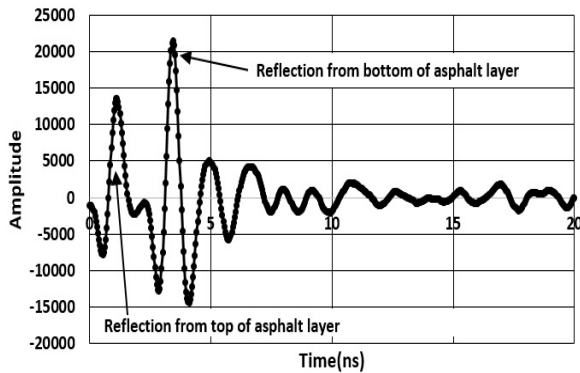


Fig. 8 A-scan Data at Location No. 6

Fig. 9는 반사계수법으로 산정한 아스팔트 혼합물의 유전상수 값과 아스팔트 시편의 공극률과의 상관관계를 나타내고 있다. 코어샘플별 아스팔트층 두께 및 아스팔트 혼합물 공극률 결과는 Table 1과 같다. 다만 코어링 시 5, 26, 30번 아스팔트 코어가 채취 중에 파손되어 이에 대한 값은 구할 수 없었다.

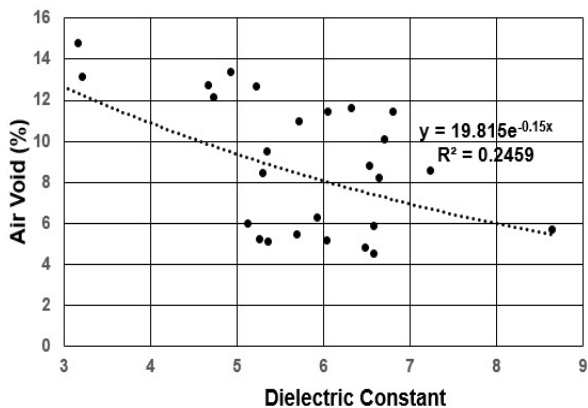


Fig. 9 Relationship between Dielectric Constant and Air Void Computed by Reflection Coefficient Method

Table 1. Average Thicknesses and Air Void of Cored Samples

Core number	Average thickness (mm)	Air voids (%)
1	165.53	13.17
2	170.41	14.77
3	174.85	12.82
4	172.86	10.99
5	N/A	N/A
6	167.58	11.45
7	163.82	10.11
8	163.84	8.81
9	157.10	8.60
10	131.04	12.70
11	137.92	12.71
12	146.01	13.37
13	138.19	11.42
14	146.04	11.63
15	142.63	12.13
16	151.89	9.49
17	156.75	8.47
18	160.75	8.19
19	172.13	6.28
20	160.87	5.46
21	178.55	6.02
22	159.67	4.82
23	163.57	5.90
24	156.42	5.15
25	147.08	5.70
26	N/A	N/A
27	160.02	5.14
28	136.81	4.55
29	166.54	5.23
30	N/A	N/A

Fig. 9에서 나타난 바와 같이 아스팔트 혼합물의 공극률이 증가함에 따라 유전상수값은 전반적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 유전상수와 밀도간의 R²값이 0.24로써 양변수간의 상관관계가 명확하지는 않다. 또한 반사계수법으로 측정된 아스팔트 혼합물의 유전상수값의 범위도 3~9로, 본 접근방식의 측정오차가 심한 것으로 사료된다.

두 번째 방식으로 아스팔트 코어 샘플의 두께를 이용한 방법은 Eq. (4)와 같이 아스팔트 층 두께(코어 두께)와 GPR 전파시간을 이용하여 아스팔트 혼합물의 유전상수를 계산하였다.

Fig. 10은 코어 두께를 이용하여 계산한 유전상수와 공극률 관계를 나타내고 있다. 반사계수법과 유사하게

아스팔트 혼합물의 공극률이 증가함에 따라 유전상수값은 감소하며 산정된 유전상수값의 범위는 3~5이다. 양변수간의 R²값은 0.74로 상관도가 높으며 유전상수와 공극률의 관계는 지수식으로 나타낼 수 있다. 이 결과는 핀란드나 SHRP의 연구 결과와 유사한 결과이다. 그러므로 국내 일반 밀입도 아스팔트 혼합물의 유전상수와 공극률 관계는 본 실험결과를 통해 Eq. (5)로 나타낼 수 있다.

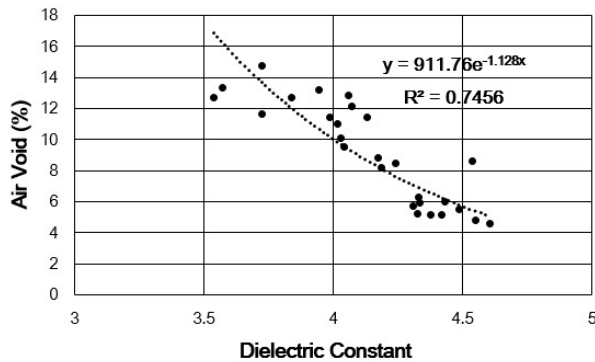


Fig. 10 Relationship between Dielectric Constant and Air Void Computed by Actual Asphalt Layer Thickness

$$\text{공극률 (\%)} = 911.76e^{(-1.128 \times \text{유전상수})} \quad (5)$$

Eq. (5)를 이용하면 시공 및 유지관리 시 유전상수를 측정하여 혼합물의 밀도를 예측할 수 있고, 이를 통해 혼합물의 품질관리가 가능해진다. 또한 GPR 장비는 안테나 특성이 장비마다 상이하고 측정값이 민감하므로 GPR 장비를 이용한 유전상수 측정 시 보다 정확한 결과를 얻기 위해서는 장비의 검교정이 선행되어야 한다.

Fig. 11은 2013년 Sebesta et. al이 제시한 유전상수와 공극률 관계와 본 연구에서 제안된 유전상수와 공극률 관

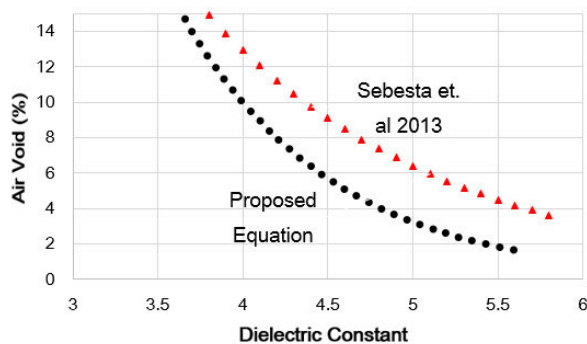


Fig. 11 Comparison of Dielectric Constant and Air Void Relations by Sebesta et. al and Proposed Equation

계를 비교한 결과를 나타내고 있다. 두 관계 모두 유사한 경향을 나타내고 있으나, 유전상수가 일정할 때 본 연구에서 제안된 방법은 Sebesta et. al이 제시한 방법보다 공극률이 최소 1.9%부터 최대 3.4%까지 작게 나타나고 있다. 이러한 차이는 아스팔트 혼합물에 사용된 재료 및 측정 장비가 상이하기 때문에 발생한 것으로 사료된다.

6. 결론

본 논문은 아스팔트 혼합물 품질관리의 일환으로 GPR 시험을 이용한 아스팔트 혼합물의 공극률을 예측하기 위해 수행하였으며, 그 결과를 간략하게 정리하면 다음과 같다.

GPR 시험 결과,

1. 아스팔트 혼합물의 공극률이 작으면 유전상수가 커지고 공극률이 크면 유전상수가 작아지므로 이를 이용하면 아스팔트 혼합물의 공극률 예측이 가능하다.
2. 반사계수법을 사용하여 유전상수를 산정하는 방법보다 아스팔트 포장층의 코어를 채취하고 그 두께를 직접 계측하여 유전상수를 산정하는 방법이 보다 정확하다.
3. 코어 두께를 이용하여 직접 계산한 유전상수와 공극률 관계는 지수식으로 나타나며(R²=0.74), 이를 이용하면 아스팔트 포장 시공 및 유지관리 시 밀도 예측을 통한 혼합물의 품질관리가 가능할 것으로 판단된다.
4. 향후 다양한 환경조건에서 포장 종류에 대한 유전상수와 공극률의 관계 정립에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/ 교통물류연구개발사업의 연구비 지원(과제번호 16TLRP-C099510-02)과 산업통상자원부 / 산업원천기술개발사업인 “도로교통시설물의 내부결함을 검출하기 위한 이동형 비접촉 고정밀 투과영상 탐지시스템 개발” 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Al-Qadi, I. L., Lahouar, S. 2005. Measuring Layer Thickness with GPR-Theory to Practice, Construction and Building Materials, Vol. 19, 763-772.
- Al-Qadi, I. L., Leng, Z., Lahouar, S., Baek, J. 2010. In-Place Hot-

- Mix Asphalt Density Estimation using Ground-Penetrating Radar, Transportation Research Record, Vol. 2152, 19-27.
- Baek, Jongeun, Choi, Jaesoon. 2014. Under Road Exploration Technology using GPR, Korea Society of Road Technical Articles, Vol. 16, No. 3. 11-16.
- Baek, Jongeun, Park, Heemun, Yoo, Pyungjun and Im, Jaekyu. 2015. Construction Management Method for Asphalt Paving Using Ground Penetrating Radar and an Infrared Camera, International Journal of Highway Engineering, Vol. 17, No. 6. 1-9.
- Harry M. Jol. 2009. Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Elsevier Academic Press.
- Leng, Z. 2011. Prediction of In-Situ Asphalt Mixture Density Using Ground Penetrating Radar: The Theoretical Development and Field Verification, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA.
- Sebesta, S., Scullion, T. and Saarenketo, T. 2013. Using Infrared and High-Speed Ground-Penetrating Radar for Uniformity Measurements on New HMA Layers, SHRP 2 Report S2-R06C-RR-1, Transportation Research Board, Washington, D.C., USA.
- Timo saarenketo and Tom Scullion. 2010. Road evaluation with ground penetrating radar, Journal of Applied Geophysics, 43, 119-138.