

# 지표투과레이더와 적외선카메라를 이용한 아스팔트 포장 시공 관리 방법

## Construction Management Method for Asphalt Paving Using Ground Penetrating Radar and an Infrared Camera

백종은	Baek, Jongeun	정회원 · 서울시 품질시험소 도로포장연구센터장 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jbaek@seoul.go.kr)
박희문	Park, Hee Mun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 (E-mail : hpark@kict.re.kr)
유평준	Yoo, Pyung Jun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 연구위원 · 공학박사 (E-mail : pjyoo@kict.re.kr)
임재규	Im, Jae Kyu	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구소 전임연구원 (E-mail : jklim@kict.re.kr)

### ABSTRACT

**PURPOSES :** The objective of this study is to propose a quality control and quality assurance method for use during asphalt pavement construction using non-destructive methods, such as ground penetrating radar (GPR) and an infrared (IR) camera.

**METHODS :** A 1.0 GHz air-coupled GPR system was used to measure the thickness and in situ density of asphalt concrete overlay during the placement and compaction of the asphalt layer in two test construction sections. The in situ density of the asphalt layer was estimated based on the dielectric constant of the asphalt concrete, which was measured as the ratio of the amplitude of the surface reflection of the asphalt mat to that of a metal plate. In addition, an IR camera was used to monitor the surface temperature of the asphalt mat to ensure its uniformity, for both conventional asphalt concrete and fiber-reinforced asphalt (FRA) concrete.

**RESULTS :** From the GPR test, the measured in situ air void of the asphalt concrete overlay gradually decreased from 12.6% at placement to 8.1% after five roller passes for conventional asphalt concrete, and from 10.7% to 5.9% for the FRA concrete. The thickness of the asphalt concrete overlay was reduced from 7.0 cm to 6.0 cm for the conventional material, and from 9.2 cm to 6.4 cm for the FRA concrete. From the IR camera measurements, the temperature differences in the asphalt mat ranged from 10°C to 30°C in the two test sections.

**CONCLUSIONS :** During asphalt concrete construction, GPR and IR tests can be applicable for monitoring the changes in in situ density, thickness, and temperature differences of the overlay, which are the most important factors for quality control. For easier and more reliable quality control of asphalt overlay construction, it is better to use the thickness measurement from the GPR.

### Keywords

ground penetrating radar, infrared camera, asphalt pavement, construction, QC/QA

Corresponding Author : Baek, Jongeun  
Pavement Research Center, Quality Inspection Office Division,  
Seoul Metropolitan Government, 131 Taebong-ro, Seocho-gu,  
Seoul, 06763, Korea  
Tel : +82.2.3462.6718 Fax : +82.2.3462.6710  
E-mail : jbaek@seoul.go.kr

International Journal of Highway Engineering  
http://www.ksre.or.kr/  
ISSN 1738-7159 (print)  
ISSN 2287-3678 (Online)  
Received Apr. 21, 2015 Revised Apr. 21, 2015 Accepted Nov. 30, 2015

## 1. 서론

### 1.1. 연구배경

포트홀의 발생 원인은 강우, 강설, 기온과 같은 환경적인 요인과 중차량 교통량, 아스팔트 품질 및 시공과

같은 인위적인 요인 등 다양하다. 이 중 아스팔트 혼합물의 품질과 관련된 것 중 중요한 것으로 공극률이 있다. 아스팔트 혼합물의 공극률이 클 경우, 공극 사이로 수분이 포장체로 침투하여 골재를 코팅한 아스팔트가

벗겨지면서 골재간의 점착력이 낮아서 균열이 발생하고 이로 인해서 포트홀이 발생한다. 일반적인 아스팔트 포장의 공극률은 4% 내외이고, 교통에 따른 추가적인 다짐을 고려하여 시공 시 약 8%(다짐도 96%)를 유지하게 된다. 하지만 시공 시 다짐이 충분하지 않아 공극률이 너무 클 경우 포트홀, 소성변형, 균열 등 다양한 손상으로 인하여 조기파손 될 확률이 높아지게 된다. 예를 들어 고속도로 아스팔트 포장의 파손구간에서 원인을 분석한 결과, 다짐 부족으로 인한 공극률 과다(평균 10%)가 전체 파손구간 중 34%로 가장 큰 비중을 차지하고 있다(이경하 등 2008). 일반적으로 아스팔트 혼합물의 공극률이 증가할수록 수분저항성을 나타내는 인장강도비(Tensile strength ratio, TSR)가 감소하는 경향을 나타내고 있다(황성도 2014). 특히 공극률이 현장 시공기준인 8% 이상일 경우 TSR이 70% 이하로 수분저항성이 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 따라서 시공 시 다짐관리를 철저하게 하지 않을 경우 공극률 증가로 포트홀과 같은 조기 파손이 발생할 가능성이 높다고 할 수 있다.

현재 아스팔트 포장의 시공 중 다짐관리는 시험포장 시 결정된 다짐 단계별 다짐횟수를 일률적으로 적용한다. 하지만 실제 포장 시공 시 대기온도, 다짐 롤러 무게 변화 등과 같은 변수로 인하여 일률적인 다짐횟수를 적용할 경우 다짐저하 현상이 발생한다. 아스팔트 포장의 다짐도는 시공 후 Nuclear gauge와 같은 비파괴 밀도 측정기를 이용하여 확인할 수밖에 없어 아스팔트 포장 시공 중 밀도를 관리할 수 있는 보다 다양하고 정확한 방법이 필요하다.

대기온도, 아스팔트 혼합물 운반 중 온도저하현상에 의하여 아스팔트 페이퍼에서 포설된 아스팔트 혼합물의 온도는 일정하지 않다. Milovanovi 등(2012)에 따르면 페이퍼 뒷쪽에서 관측한 아스팔트 매트 표면온도는 경우에 따라 V자 형태로 페이퍼 중앙이 높은 경우도 있고, 전반적으로 유사하게 분포되는 경우도 있다. 아스팔트 혼합물은 다짐 온도가 높으면 다짐이 잘되어 밀도가 높고, 공극률이 작게 된다. 하지만 다짐 시 이러한 온도 변화를 고려하지 않고 일률적으로 다짐을 하게 되므로 아스팔트 매트의 온도에 따라, 다짐 패턴에 따라 공극률이 달라진다. 따라서 이러한 온도 변화를 줄이거나 온도 차이를 다짐 시 고려할 수 있는 방법이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 시공 중 철저한 다짐관리를 할 수 있는 방법으로 지표투과레이더(Ground penetrating radar, GPR)와 적외선(Infrared, IR) 카메라와 같은 비파괴시험을 이용하여 아스팔트 포장 시공 시 공극률(다짐도,

밀도)과 온도를 관리하기 위한 방법을 제안하고자 한다.

## 2. 시공 중 품질관리를 위한 비파괴시험

### 2.1. 지표투과레이더 시험 개요

GPR 시험은 지하를 통과한 전자기파(Electromagnetic waves)의 크기, 속도, 형상 등과 같은 특징으로부터 유적지 조사, 자원탐사 뿐만 아니라 토목 분야의 경우 지하매설물 탐사, 지층구조, 도로포장체 두께 등을 평가하는 목적으로 널리 사용되고 있다. GPR 시험 과정은 송신기에서 전자기파를 지표로 방출하고 지표면을 비롯하여 하부에서 반사, 굴절, 산란된 뒤 수신기로 돌아온 신호를 분석한다. GPR은 안테나의 설치 방법에 따라 비접촉식(Air-coupled) 또는 접촉식(Ground-coupled)으로 구별된다. 일반적인 GPR 조사는 접촉식 안테나(Fig. 1(a))를 지표면에 놓고 이를 견인하는 방식이다. 비접촉식 GPR 안테나(Fig. 1(b))는 지표면에서 약 30~50cm 가량 띄운 상태로 조사한다. 비접촉식 방식의 경우 직접과의 간섭(Direct coupling)을 최소화하여 지표 아래에서의 신호가 깨끗하며, 고속으로 이동하면서 측정할 수 있다. 반면에 비접촉식 안테나의 경우 동일한 주파수의 접촉식에 비해서 조사심도가 50cm 이내로 낮다. 따라서 도로와 철도 같이 조사연장이 길고, 비교적 얇은 조사심도를 요구하는 구조물의 평가를 위해서는 비접촉식 안테나가 바람직하다.

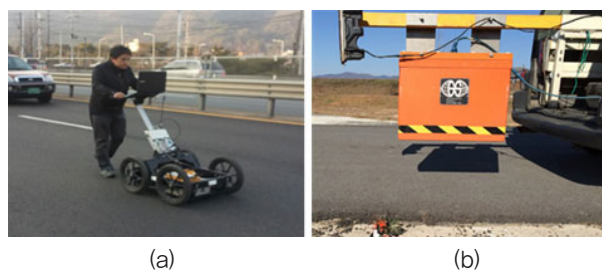


Fig. 1 (a) Ground-Coupled GPR (b) Air-Coupled GPR

GPR 시험에서 가장 중요한 물성은 각 재료의 유전상수(Dielectric constant)이다. 유전상수는 비유전율로 진공(또는 공기) 중 전자기파의 속도 대비 매질에서의 속도를 나타낸 것이다. 대표적인 유전상수로 공기는 1, 물 81, 아스팔트 콘크리트 4~6이다. 아스팔트 콘크리트의 경우 공극률, 골재 종류, 습윤, 건조 상태에 따라 달라진다. 따라서 이러한 유전상수로부터 아스팔트 콘크리트의 상태를 평가할 수 있다. 예를 들어, Saarenketo(2014)는 공용기간 동안 아스팔트 포장의 유전상수를 추적조사

한 결과 공용기간 중 균열부로 침투한 물로 인하여 아스팔트 콘크리트의 유전상수가 점진적으로 증가하는 것을 밝혔다.

GPR 신호부터 유전상수를 측정하는 대표적인 방법으로 반사계수법이 있다. 반사계수법은 노면에서 반사된 반사파의 크기(Amplitude)와 전자기파를 100% 반사하는 금속판에서의 반사파의 상대적 크기로부터 표층의 유전상수를 다음과 같이 계산한다(Lahouar 등 2002).

$$\epsilon_r = \left( \frac{1 + A_0/A_m}{1 - A_0/A_m} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_r$ 는 유전상수,  $A_0, A_m$ 는 포장체 노면과 금속판에서의 반사파의 크기이다.

유전상수를 결정한 후 포장체 각 층의 두께는 Eq. (2)와 같이 계산할 수 있다(Al-Qadi and Lahouar 2005). 이러한 방식은 송수신기가 동일한 위치에 있는 Monostatic 안테나에 적용할 수 있다. 송수신기가 일정 거리로 떨어져 있는 Bistatic 안테나를 이용할 경우 2개의 GPR을 이용하는 공통중간법(Common Midpoint, CMP)을 사용하여 유전상수를 계산할 수 있다(Lahouar 등 2002).

$$d_i = \frac{c \Delta t_i}{2\sqrt{\epsilon_{r,i}}} \quad (2)$$

여기서,  $d$ 는 층 두께,  $c$ 는 공기 중 전자기파 속도( $\approx 30\text{cm/ns}$ ),  $\Delta t_i$ 는 층 통과 시간차,  $i$ 는 층 번호이다.

GPR 안테나의 물리적인 특성상 주파수가 낮을수록 해상도가 떨어지므로 두께가 얇은 포장의 층 두께를 정확하게 측정하기 어렵다. 따라서 정확한 도로포장체의 두께를 측정하기 위해서는 1.0GHz 이상의 고주파 GPR 안테나를 사용하는 것이 바람직하다. 또한 유전상수를 반사계수법으로 측정할 경우 층 경계면의 물성만을 대변하므로 두께 측정 오차가 커질 수 있다. 특히 포장의 노화로 인한 산화로 인하여 표면의 유전상수가 하부와 상이할 경우 정확한 두께 측정을 위해서는 각 층의 평균 유전상수를 계산할 수 있는 CMP 방법을 이용하는 것이 바람직하다(백종은 등 2012).

GPR 데이터 획득 시 GPR 신호의 대역폭(Bandwidth)을 줄일 수 있는 Deconvolution과 같은 신호처리 방법을 활용할 수 있다. Deconvolution을 통하여 GPR 반사파

에서 입력파의 효과를 제거할 수 있으므로 포장경계층에서의 반사파를 보다 쉽게 분리할 수 있다. 따라서 Deconvolution 기법을 적용하면 얇은 층 두께의 경계를 정확하게 구분할 수 있으므로 층 두께 오차도 12%에서 3%로 감소하였다(Al-Qadi and Lahouar 2005).

## 2.2. 지표투과레이더를 이용한 공극률 평가

최근 들어 GPR을 이용하여 아스팔트 콘크리트의 공극률 또는 밀도를 측정하는 연구가 최근 들어 활발하게 이루어지고 있다(Leng 등 2012, Shangguan 등 2013, Solla 등 2014, Chen 등 2014). 아스팔트 콘크리트는 골재, 아스팔트 바인더, 공기로 구성되어 있으므로 각각의 체적분률과 해당 유전상수를 조합하여 혼합물의 유전상수를 추정할 수 있다(Chang 등 2011). 공기의 유전상수는 1.0으로 골재(유전상수 6.0)와 바인더(유전상수 2.5)보다 작다. 따라서 아스팔트 콘크리트의 공극률이 커질수록 유전상수가 낮은 공기가 차지하는 부피가 많아지므로 유전상수는 작아진다. 예를 들어 아스팔트 혼합물의 공극률이 10%에서 4%로 감소함에 따라 유전상수는 4.8에서 6.3으로 증가하는 것으로 나타났다(Chen 등 2014).

다양한 현장에서 GPR을 이용하여 측정한 현장 공극률과 코어채취를 통하여 실내에서 측정한 공극률의 상관성( $R^2=0.9223$ )이 매우 높은 것으로 나타났다(Saarenketo 2014). 이러한 상관성을 이용하여 아스팔트 혼합물의 공극률을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$AV = Ae^{B\epsilon_{AC}} \quad (3)$$

여기서,  $AV$ 는 아스팔트 콘크리트의 공극률(%),  $\epsilon_{AC}$ 는 아스팔트 콘크리트의 유전상수,  $A, B$ 는 실내 시험으로부터 결정한 회귀분석계수( $A=272.93, B=-1.3012$ )이다. 이밖에 Sebesta와 Scullion(2002)는 조사대상에 따라  $A$ 가 366.79,  $B$ 가  $-0.6354$  또는  $A$ 가 85.713,  $B$ 가  $-0.3435$ 으로, Sebesta 등(2013)은  $A$ 가 218.23,  $B$ 가  $-0.706$ 으로, Chen 등(2014)은  $A$ 가 381.79,  $B$ 가  $-0.613$ 으로 결정하였다.

Fig. 2는 유전상수와 아스팔트 혼합물의 공극률의 관계를 나타내고 있으며 동일한 공극률에 해당하는 유전상수의 차이가 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 혼합물의 종류와 GPR 안테나 특성 등이 유전상수에 미치는 영향이 크기 때문이다. 따라서 신뢰성 있는 현장 공극률 평가를 위해서는 사전 시험을 통하여 해당 혼합물

과 장비에 따른 적절한 보정계수를 사용해야 할 것으로 판단된다.

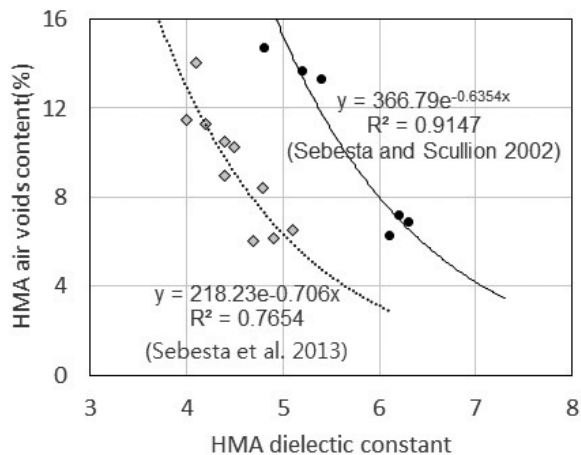


Fig. 2 Relationship between Dielectric Constant and Air Voids Content

일반적으로 현장에서 다짐 시 다짐 롤러에 아스팔트 바인더가 달라붙는 것을 방지하기 위하여 물을 살포한다. 물의 유전상수는 20℃에서 약 80이므로, 살포된 물로 인하여 유전상수를 반사계수법으로 측정할 경우 큰 오차를 발생시킬 수 있다. 예를 들어 소정의 물을 아스팔트 표면에 살포하고 2.0GHz 안테나로 표면 반사파의 크기를 측정된 결과 건조 시에 비해 6.2% 증가한 것으로 나타났다(Shangguan 등 2013). 이러한 물의 영향을 최소화하기 위해서는 GPR 시험을 물이 완전히 증발한 후에 실시해야 하나 이는 시공 중 품질관리라는 연구 목적에 맞지 않는다. Shangguan 등(2013)은 이를 해결하기 위하여 Band-pass 필터 기법을 제안하였다. GPR 신호 내 고주파 영역이 물에 더욱 민감하므로 다양한 주파수 대역에 대한 필터를 비교한 결과 0.2~0.8GHz 폭의 필터를 사용한 경우가 오차가 1% 이내로 가장 적게 나타났다. 이와 같은 필터를 적용한 결과 아스팔트 콘크리트의  $G_{mb}$ 를 비교한 결과 오차가 3% 이내로 나타났다.

### 2.3. IR 평가 방법

아스팔트 혼합물의 다짐은 크게 다짐에너지와 온도에 영향을 받으므로 다짐 시 온도와 다짐횟수를 철저히 관리하여야 한다. 특히 아스팔트 매트 온도 관리가 무엇보다도 중요하다. 일반적으로 시공 현장에서 아스팔트 온도 측정은 주로 한 지점의 온도를 측정할 수 있는 적외선 온도계를 이용하여 측정한다.

이러한 방식은 측정 방법이 간편하고, 장비도 저렴하게 많이 사용되고 있으나, 아스팔트 매트의 전체적인 온도 변화를 확인할 수 없어서 다짐 관리를 위해서는 효율적이지는 않다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 아스팔트 매트의 온도를 영상으로 측정하여, 전체적인 온도차를 측정할 수 있는 IR 카메라가 많이 사용되고 있다. 최근 들어서 보다 효율적으로 아스팔트 매트의 온도 분포를 측정하기 위하여 페이퍼의 후미에 설치한 봉에 여러 개의 IR 센서를 배열(일명 PAVE-IR)하는 방식이 제안되었다(Sebesta 등 2006). PAVE-IR를 이용하여 포설 중 발생할 수 있는 아스팔트 매트의 온도차를 실시간으로 관측하고, 필요 시 온도차를 보정하는 목적으로 사용된다.

포설 시 아스팔트 매트의 온도차가 지점별로 크게 발생할수록 현장 밀도의 차이가 크게 나타나는 것으로 나타났다. 예를 들어 온도차가 14℃ 이하인 구간에서 공극률 차이가 2%보다 크게 나타났으나, 온도차가 14℃보다 큰 경우에는 65% 구간에서 공극률 차이가 2%보다 크게 나타났다(Willoughby 등 2001). 또한 포설 시 온도가 10℃ 떨어지면 공극률이 0.6% 높아지는 것으로 나타났다(Sebesta 등 2013). 하지만 다짐조건이 고려되지 않은 상태에서의 포설온도와 공극률과의 상관성은 낮은 것으로 보고되었다(Heizman 등 2013). 따라서 아스팔트 매트의 온도와 다짐도를 단순히 정의하기는 어려울 것으로 판단된다. 이를 해결하기 위해서는 포설 온도 및 분포에 따른 최적 다짐패턴(다짐횟수, 우선순위 등)이 적용되어야 한다고 판단된다.

## 3. 현장 시험

### 3.1. 시험시공 구간 개요

아스팔트 포장의 시공 중 GPR을 이용한 공극률(또는 다짐도)을 확인할 수 있는지에 대한 가능성을 평가하기 위하여 현장시험을 실시하였다. 시험시공은 수원국토사무소 관내 일반국도 38호선에서 2014년 10월 17일(1차)과 11월 12일(2차)에 실시하였다. 시험시공 구간의 포장이 노후하여 기존 아스팔트 포장을 5cm 절삭한 후 5cm 두께의 아스팔트 덧씌우기를 실시하였다. 1차 시험시공에는 일반 아스팔트혼합물(HMA1), 2차 시험시공에서는 일반 아스팔트 혼합물(HMA2)와 유리 섬유 보강 아스팔트 혼합물(Glass fiber reinforced asphalt, FRA)을 사용하였다. FRA는 일반 아스팔트 혼합물의 인성을 향상시키기 위하여 유리섬유 보강재를 사용하였다(유평준, 김태우 2014).

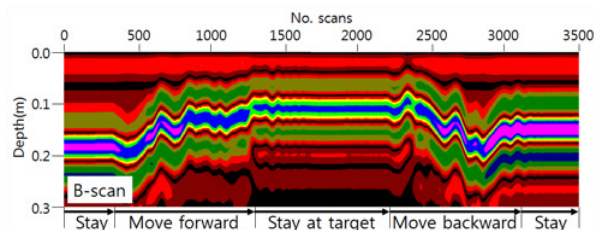
### 3.2. GPR 시험

현장시험에 사용된 GPR 시스템은 중앙주파수 (Central frequency)가 1.0GHz인 비접촉식 안테나와 데이터획득장치인 SIR-20, 분석 프로그램인 RADAN으로 구성되어 있다. GPR 안테나는 Fig. 3과 같이 차량의 후미에 위치하고, 송수신기 사이의 직접파가 표면에서 반사된 반사파를 간섭하지 않도록 표면에서 약 40cm 높이에 장착하였다. GPR 시험 시 다짐롤러의 진행을 방해하지 않기 위하여 조사차량을 갓길에 대기하고 있다가 포설 직후와 1차 다짐롤러 통과 직후 포장체로 이동하여 최대한 동일한 지점에 정착한 후 데이터를 1회 측정하였다. 1차 다짐이 끝날 때까지 이러한 과정을 반복하였다. 시공 완료 후 아스팔트 콘크리트의 유전상수를 반사계수 법으로 측정하기 위하여 동일한 측정 조건에서 알루미늄 판을 포장면에 놓고 GPR 데이터를 측정하였다.

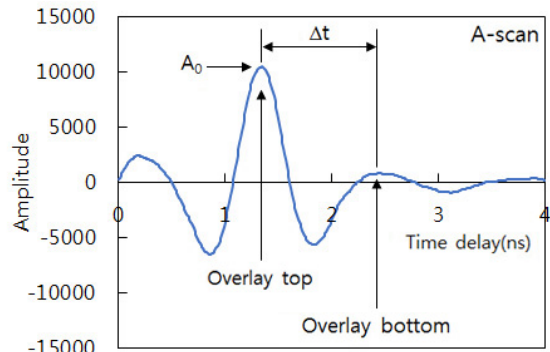


Fig. 3 GPR Test during Construction

Fig. 4는 측정된 GPR 데이터 예를 나타낸다. GPR 데이터를 이동 중에 측정하였으므로 시간에 따른 GPR 신호를 나타내는 B-scan 데이터(Fig. 4(a))로부터 목표 지점에서의 A-scan 데이터(Fig. 4(b))를 추출한다. 추출한 A-scan 데이터로부터 표면에서 반사된 반사파의 크기( $A_0$ )와 아스팔트 덧씌우기 포장 층을 통과한 시간차( $\Delta t$ )를 계산한다. 마지막으로 알루미늄 판에서 측정된 반사파의 크기( $A_m$ )를 측정 후 Eq. (1)과 Eq. (2)를 이용하여 아스팔트 덧씌우기 층의 유전상수와 두께를 계산한다.



(a) B-scan



(b) A-scan

Fig. 4 GPR Data Example

GPR 데이터 측정을 위한 환경 설정은 Table 1과 같다. 덧씌우기 두께가 얇고, 최대한 정확한 층 두께 측정을 위해서는 A-scan 데이터의 개수가 많은 것이 바람직하다. 따라서 데이터 당 샘플수(Samples/Scan)를 최대한 512로, 데이터 길이(Scan length)는 포장두께를 고려하여 최소인 5ns으로 설정하였다. 또한 덧씌우기 표면에서 반사된 파가 시작되는 점을 고려하여 데이터는 96ns부터 기록하였다. 알루미늄 판에서의 최대 반사파의 크기( $A_0$ )를 고려하여 증폭(Gain) 값은 14.0로 설정하였다. 본 시험에서 데이터 획득은 거리에 따라 측정하는 것이 아니라 시간에 따라 측정하였고 이때 초당 데이터 획득(Scans/Second) 값은 153.0으로 하였다. 수분에 의한 영향을 최소화하기 위하여 Shangguan 등(2013)이 제시한 Band-pass 0.3~0.5GHz를 적용하려고 하였으나 현장에서 신호의 감쇠가 크게 나타나 기존 연구(백종은 등 2012)에서 적용하였던 0.5~7.9GHz 폭을 가지는 필터를 적용하였다. 따라서 다짐 중에 의한 영향은 향후 연구에서 확인해야 할 것으로 판단된다.

Table 1. GPR Test Setting

Property	Value
Central frequency (GHz)	1.0
Samples/Scan	512
Scan length (ns)	5.0
Position correction (ns)	96.0
Gain (dB)	14.0
Scans/Second	153.0
Vertical boxcar high pass (GHz)	0.5
Vertical boxcar low pass (GHz)	7.9

### 3.3. IR 시험

두 번째 시험시공에서는 일반 아스팔트 혼합물(HMA2)

과 유리섬유보강아스팔트(FRA)의 시공 중 온도 변화를 관측하였다. Fig. 5와 같이 IR 카메라를 이용하여 운반트럭으로 아스팔트 혼합물이 현장에 도착해서 페이지에 하차할 때부터 다짐 중 아스팔트 매트 온도 측정하였다.



Fig. 5 Asphalt Mat Temperature Measurement Using IR Camera

## 4. 현장 시험 결과

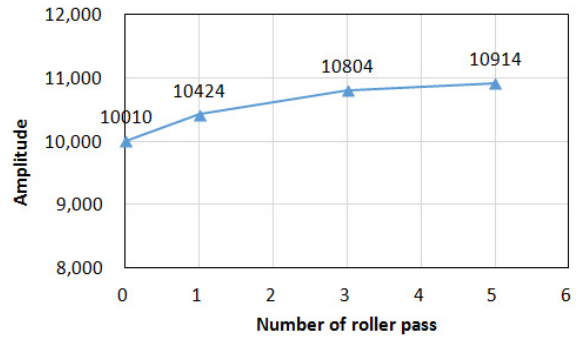
### 4.1. GPR 시험 결과

Fig. 6은 1차 다짐에 사용된 머케덤 롤러의 다짐횟수에 따른 GPR 시험 결과를 나타내고 있다. Fig. 6(a)는 다짐횟수 증가에 따른 아스팔트 덧씌우기 경계면에서 반사된 GPR 신호의 크기( $A_0$ )를 나타낸다. 포설 직후 측정된 반사파의 크기는 10,010이고, 다짐횟수가 1, 3, 5회로 증가함에 따라 반사파의 크기가 10,424(+4.1%), 10,804(+7.9%), 10,914(+9.0%)로 점차적으로 증가하였다.

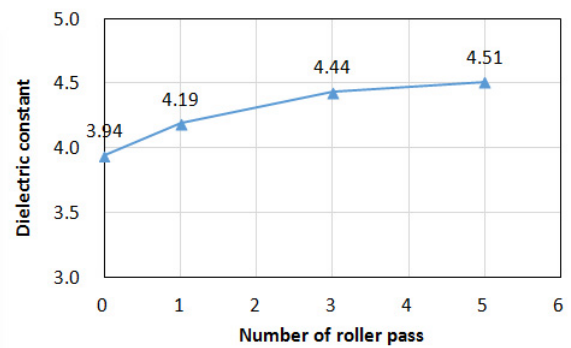
반사계수법을 이용하여 계산한 다짐횟수별 유전상수는 Fig. 6(b)와 같다. 포설 직후 측정된 유전상수는 3.94로 일반적인 아스팔트 콘크리트의 유전상수 범위(4~6)의 하한값 수준으로 나타났다. 다짐횟수가 증가함에 따라 유전상수는 4.19(+6.4%), 4.44(+12.6%), 4.51(+14.5%)로 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다.

측정한 유전상수를 이용하여 아스팔트 덧씌우기 포장의 공극률을 계산하였다. 다짐횟수에 따른 아스팔트 포장의 현장 공극률은 Fig. 6(c)와 같다. 실제 아스팔트 포장의 현장 공극률을 측정하기 위해서는 실내 또는 현장 시험을 통하여 공극률-유전상수 관계식이 필요하다. 하지만 시험시공 구간의 여건상 본 연구에서는 Eq. (3)의 기존 공극률-유전상수 관계식을 이용하여 현장 공극률을 추정하였다. 분석결과, 포설 직후 현장 공극률은 12.6%였으나 다짐이 진행됨에 따라 점차 감소하여 1차

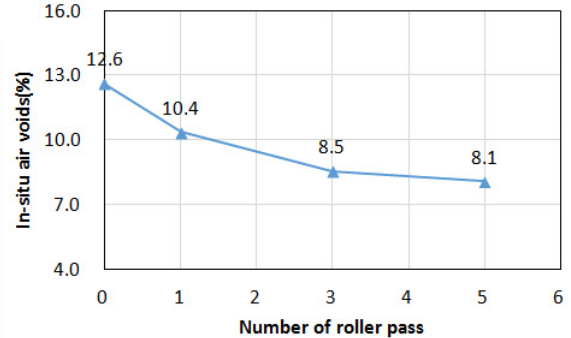
다짐이 완료되었을 때 8.1%까지 감소하는 것으로 나타났다.



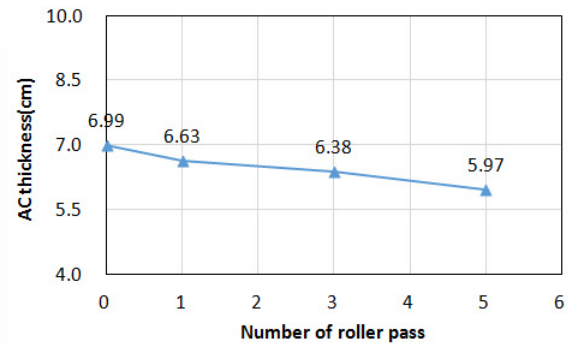
(a) Amplitude



(b) Dielectric Constant



(c) In-Situ Air Voids



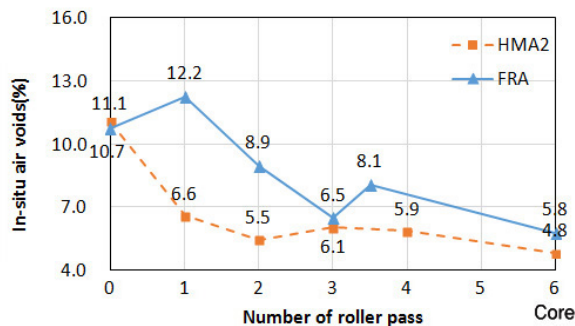
(d) AC Overlay Thickness

Fig. 6 GPR Measurement Versus Number of Roller Pass (1<sup>st</sup> Field Test)

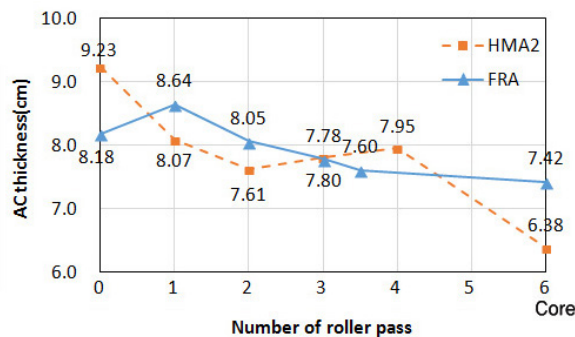
시공 중 아스팔트 포장의 두께는 측정된 아스팔트 콘크리트의 유전상수와 층 통과시간을 이용하여 계산하였다. 설계두께가 5cm인 아스팔트 덧씌우기 포장의 두께가 Fig. 6(d)와 같이 포설 직후에는 약 7cm이고, 5회 다짐 후 약 6cm 정도로 14.7% 감소하였다. 현장 공극률을 추정하기 위해서는 유전상수-공극률 관계식이 필요한데 비해, 포장 두께는 GPR 신호로부터 직접 계산할 수 있으므로 별도의 실내시험 없이 추정할 수 있다. 따라서 GPR 시험을 이용하여 시공 중 다짐과 관련한 품질관리하기 위한 항목으로는 포장 두께가 보다 적합할 것으로 판단된다.

2차 현장 시험에서 측정된 HMA2와 FRA의 다짐횟수별 공극률과 층 두께는 Fig. 7과 같다. Fig. 7(a)와 같이 HMA2의 경우 공극률이 1차 다짐으로 10.7%에서 6.6%까지 감소하는 것으로 나타났고, FRA의 경우 11.1%에서 6.5%까지 감소하는 것으로 나타났다. 시공 후 GPR 시험을 실시한 지점에서 채취한 코어 샘플의 공극률은 HMA2가 4.8%, FRA가 5.8%로 나타났다. 따라서 2, 3차 다짐동안 약 1% 정도 공극률이 감소된 것으로 판단된다.

Fig. 7(b)에 나타낸 바와 같이 층 두께의 경우 포설 시 9.2cm에서 1차 다짐 후 7.6~7.9cm 정도로 감소폭



(a) In-Situ Air Voids



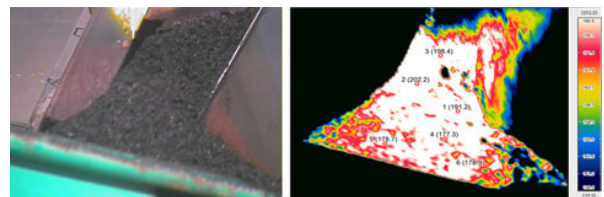
(b) AC Overlay Thickness

Fig. 7 GPR Measurement Versus Number of Roller Pass (2<sup>nd</sup> Field Test)

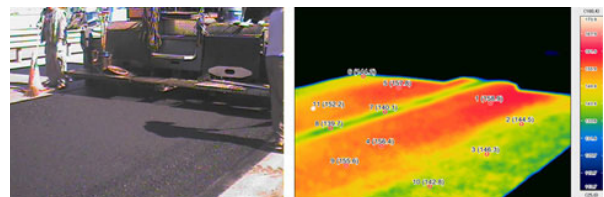
이 HMA1에 비해 크게 나타났다. FRA의 경우 층 두께가 8.2cm에서 7.6cm로 크게 변하지 않는 것으로 나타났다. 시공 후 채취한 코어로 측정된 층 두께의 경우 HMA2의 경우 1.5cm 감소하였고, FRA의 경우 0.2cm만 감소한 것으로 나타났다.

## 4.2. IR 시험 결과

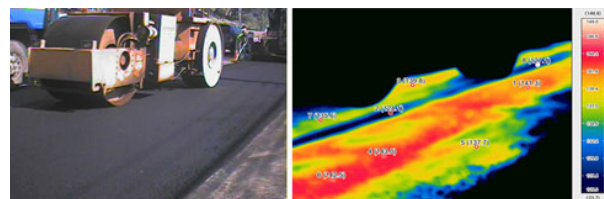
Fig. 8은 두 번째 시험시공 시 HMA2 시공 과정에서 IR 카메라로 측정된 온도변화를 나타낸다. Fig. 8(a)와 같이 혼합물을 페이퍼에서 하차할 때 온도는 약 180~200℃로 트럭 내 위치에 따라서 약 20℃의 온도변화가 발생한 것으로 나타났다. 그림 8(b)에서 나타낸 바와 같이 포설 직후에는 혼합물 온도가 140~160℃로 내려갔다. 특히 페이퍼의 좌·우에서의 온도가 다른 구간에 비해 10℃ 이상 낮게 나타났다. Fig. 8(c)와 같이 1차 다짐을 실시하는 중에는 아스팔트 매트 온도는 포설 시에 비해서 약 20℃ 내려간 120~140℃로 나타났다. 지점별 온도 차는 약 10℃ 정도로 나타났다. 이러한 온도차로 인하여 동일한 다짐이 이루어진다면 공극률이 약 0.6% 증가할 것으로 예상된다.



(a) During Dumping Out



(b) Right After Laydown

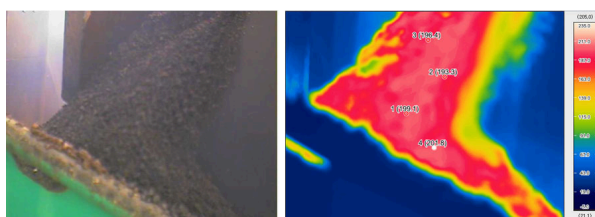


(c) During the 1<sup>st</sup> compaction

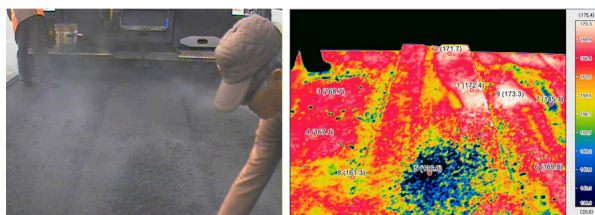
Fig. 8 HMA2 Temperature Distribution (2<sup>nd</sup> Field Test)

Fig. 9는 두 번째 시험시공 구간에서 FRA 시공 과정에서의 온도변화를 나타낸다. 페이퍼 하차 시 FRA의 온도는 약 200℃로 HMA2에 비해 약 20℃ 높게 나타

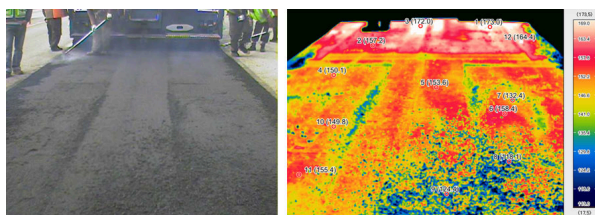
났으나, 온도 차이는 10°C 미만으로 이동 중 온도분리가 적게 발생한 것으로 판단된다. 포설 직후 매트 온도 약 170°C로 내려갔다. 하지만 일부 위치(오른쪽 위쪽)에서는 150°C 정도까지 내려갔다. 따라서 포설 시 약 20°C의 온도 저감이 발생한 지점은 공극률이 약 1.2% 증가할 것으로 예상된다. 1차 다짐 중 온도는 최소 125°C에서 최고 160°C로 온도 차이가 35°C까지 발생하여 부분적으로 공극률이 2% 정도 크게 발생할 수도 있을 것으로 예상된다. 이렇게 온도가 부분적으로 낮은 지점에서는 공극률이 높고, 재료분리(Segregation)가 발생하여 균열 또는 포트홀이 발생할 확률이 높아진다. 따라서 이 부분의 다짐을 좀더 철저히 실시해야 할 것으로 판단된다.



(a) During Dumping Out



(b) Right After Laydown



(c) During the 1<sup>st</sup> compaction

Fig. 9 FRA Temperature Distribution (2<sup>nd</sup> Field Test)

## 5. 결론

본 연구에서는 아스팔트 포장의 다짐 품질관리를 위한 GPR과 IR 시험의 사용 적절성을 평가하였다. GPR 시험을 이용하여 시공과정을 방해하지 않으면서 포설 시 부터 1차 다짐까지의 아스팔트 콘크리트의 현장 공극률과 층 두께를 측정할 수 있었다. 현장 공극률은 유전상수와 공극률 사이의 상관성에 기초하므로 다양한 아스팔트 혼합물에 대한 유전상수-공극률의 상관성 조

사가 선행되어야 한다. 반면에 층 두께의 경우 측정된 유전상수와 이동시간만을 기초로 추정하였기 때문에 실내시험 없이 현장 데이터만으로 충분히 신뢰성 있는 평가를 할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 시험도구가 아닌 실제 현장을 대상으로 시험을 실시하여 다짐공정별 코어 채취를 통한 밀도 및 두께 확인, 여러 구간에서의 샘플링 등이 이루어지지 못했으므로 향후 연구에서는 이러한 점을 보완하여 할 것으로 판단된다.

IR 시험 결과 손잡이형 적외선 센서를 이용한 온도 측정에 비해서 광범위한 범위에 대한 온도 측정이 가능하므로 아스팔트 매트의 온도 분포를 조사하기에 용이하였다. 시공 과정에서 포설 및 다짐 시 약 20°C 정도의 온도 분리가 나타났다. 특히 페이지의 좌우 끝 쪽의 온도가 특히 낮은 것으로 나타나, 양 끝단을 먼저 다짐하는 것이 전체적인 다짐도를 향상 또는 균일하게 할 수 있을 것으로 판단된다. 실제 현장에서의 다짐도를 향상시키기 위해서는 포설 전 현장 재교반을 할 수 있는 방법도 필요하고, 아스팔트 매트의 온도분포에 따라 적절한 다짐 패턴이 필요하므로 이에 대한 연구가 추가로 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업과제 “포트홀 프리 품질관리 체계 개발” 연구와 2012년도 지식경제부 재원인 산업융합원천기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임을 밝힙니다. 이에 도움을 주신 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

## REFERENCES

- Al-Qadi, I. L. and Lahouar, S. (2005) Measuring layer thickness with GPR - Theory to practice, *Construction and Building Materials*, Vol. 19, pp. 763-772.
- Chang, C.-H., Chen, J.-S., and Wu, T.-B. (2011) Dielectric modeling of asphalt mixtures and relationship with density, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 137, No. 2, pp.104-111.
- Chen, D.-H., Hong, F., Zhou, W., and Ying, P. (2014) Estimating the Hot-Mix Asphalt Air Voids from Ground Penetrating Radar, *NDT&E International*, Vol. 68, pp. 120-127.
- Hwang, S.D. (2014) Development of Construction Quality Control Standard and Maintenance Guideline to Prevent Pothole in Asphalt Pavements, *Korea Institute of Construction and Building Technology*.
- Lahouar, S., Al-Qadi, I. L., Loulizi, A., Clark, T. M., and Lee, D. T. (2002) Approach to Determining In Situ Dielectric Constant of Pavements: Development and Implementation at Interstate 81 in Virginia, *Transportation Research Record*, No. 1806, pp. 81-87.



- 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.
- Milovanovi, B., Domitrovic, J., and Rukavina, T. (2012) Application of Infrared Camera for Quality Control during Paving, Presented at 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure, May 7-9, 2012, Dubrovnik, Croatia.
- Saarenketo, T. (2014) Measuring Electromagnetic Properties of Asphalt for Pavement Quality Control and Defect Mapping. Retrieved December 15, 2014, from [http://www.vegagerdin.is/nvf33.nsf/0/6423655ed26a5bd400256de90031ecaf/\\$FILE/Asphalt\\_electromagnetics\\_TimoS\\_030603.pdf](http://www.vegagerdin.is/nvf33.nsf/0/6423655ed26a5bd400256de90031ecaf/$FILE/Asphalt_electromagnetics_TimoS_030603.pdf)
- Sebesta, S. and Scullion, T. (2002) Using Infrared Imaging and Ground-Penetrating Radar to Detect Segregation in Hot-Mix Overlays, Report 4126-1. Texas A&M Transportation Institute, College Station, Texas, 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.
- Sebesta, S., Wang, F., Scullion, T., and Liu, W. (2006) New Infrared and Radar Systems for Detecting Segregation in Hot-Mix Asphalt Construction, Report FHWA/TX-05/ 0-4577-2, Texas Transportation Institute, Texas, USA.
- Shangguan, P., Al-Qadi, I. M., Leng, Z., Schmitt, R. L., and Faheem, A. (2013) Innovative Approach for Asphalt Pavement Compaction Monitoring with Ground-Penetrating Radar, Transportation Research Record, No. 2347, pp. 79-87.
- Solla, M., Lsguela, S., Gonzalez-Jorge, H., and Arias, P. (2014) Approach to Identify Cracking in Asphalt Pavement using GPR and Infrared Thermographic Methods: Preliminary Findings. NDT&E International, Vol. 62, pp. 55-65.
- Yoo, P.J. and Kim, T.W. (2014) Physical Characteristics of Glass-fiber reinforced asphalt mixture, Proceedings of 2014 Korea Society of Road Engineers Fall Conference, pp. 78.