



# 유전율 측정을 통한 아스팔트 콘크리트의 공극률 추정 연구

## Evaluation and Determination of Air Void for Asphalt Concrete using a dielectric constant measurement

김 부 일\*      김 영 민\*\*      조 인 선\*\*\*  
Booil Kim      Yeong Min Kim      In Sun Cho

### Abstract

This study was conducted to evaluate the relationship between the dielectric constant and air void of asphalt concrete. Standard specimens that have air voids of various range (0% ~ 20%) were used to measure the dielectric constant using parallel plate method that measures low frequency dielectric constant. From the tests, dielectric constant of asphalt concrete was tend to decrease as the frequency was increased, and the decrement slope was varied with the types of asphalt binders. Dielectric constant was decreased linearly as air void was increased from zero to twenty percent. Consequently, the effect of temperature and moisture content on dielectric constants of asphalt concrete was evaluated to develop the standard curve between dielectric constant and air void of asphalt concrete. The standard curve developed in this study can be used to calibrate or develop the algorithm of non-destructive density gauge.

**Keywords :** asphalt concrete, density, air void, dielectric constant

### 요 지

본 연구는 아스팔트 콘크리트의 유전율과 공극률의 상관성을 평가하기 위해 수행되었다. 이를 위해 다양한 범위 (0%~20%)의 공극률을 갖는 아스팔트 콘크리트 시편을 제작하였고, 저주파 유전율 측정법인 parallel plate법을 사용하여 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율을 측정하였다. 아스팔트 콘크리트 시편의 경우 주파수가 증가함에 따라 유전율은 감소하는 경향을 나타내었고, 사용한 아스팔트 바인더의 종류에 따라 그 감소폭이 다르게 나타났다. 또한 공극률 0~20% 사이에서 공극률이 증가함에 따라 유전율 값은 선형적으로 감소하는 경향을 보였다. 더불어 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율에 대한 온도 및 함수량 영향을 보정하여 유전율에 따른 공극률의 상관식을 제시하였다. 본 연구를 통해 제시된 아스팔트 콘크리트의 유전율과 공극률의 상관식은 현재 국내외에서 사용하고 있는 유전율을 활용한 비파괴 밀도 측정장비의 보정모델로 활용 가능하며, 향후 국내에서 개발하고자 하는 아스팔트 포장 비파괴 밀도 측정장비의 기본적인 알고리즘으로 활용이 가능할 것이다.

**핵심용어 :** 아스팔트 콘크리트, 밀도, 공극률, 유전율

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 선임연구원 · 공학박사  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 연구원 · 공학석사  
\*\*\* 비회원 · 서울대학교 신소재공동연구소 연구원 · 공학박사수료



# 1. 서론

아스팔트 콘크리트 포장의 다짐 과정에서 다짐밀도 확보는 포장층의 공용성능을 좌우하는 공극률과 관련이 있다. 특히, 아스팔트 콘크리트 포장의 적정 다짐 밀도는 포장의 내구성에 영향을 미치는 중요한 요소이다 (US Army Engineers, 2000 and Freddy L. Roberts, 1996). 국내의 경우, 현장에서의 다짐밀도는 일반적으로 실험실에서 구한 아스팔트 혼합물의 이론최대밀도와 현장에서 채취한 코어시료의 겉보기 밀도를 이용하여 측정한다. 미국이나 유럽의 여러 선진국에서는 다짐밀도의 측정을 위해 현장에서 코어링(Coring)하는 불편함이 없는 비파괴방식을 이용하여 간편하게 다짐밀도를 측정하기도 한다. 다짐밀도를 측정하기 위한 비파괴방식에는 방사능 동위원소를 활용한 측정방식과 재료의 전자기적 특성인 유전율을 활용한 측정방식이 주로 사용된다. 이 중 방사능 동위원소를 활용한 측정장비를 사용할 경우 방사능 유출의 위험성, 장비사용자의 자격요건 등 갖춰져야 할 부가적인 부분이 많은 단점을 안고 있다.

유전율은 재료에 따라 혹은 그 재료의 밀도나 공극 정도에 따라 차이가 있다 (김만일 외 2003 and A. C. Rust 외 1999). 그러나 국내에서는 아스팔트 콘크리트의 유전율과 관련된 평가나 실험이 거의 수행되지 못하여 아스팔트 콘크리트에 대한 비파괴 밀도 측정장비의 개발이나 보정은 불가능한 실정이다. 일반적으로 모든 물질의 공극률(밀도)은 그 물질의 유전율에 따라 선형적으로 변한다. 따라서 그 물질의 유전율을 측정함으로써 공극률(밀도)을 측정할 수 있다 (Jaselskis 외, 2003). 그러나 국내에서는 아스팔트 콘크리트 포장과 그 재료의 유전율과 관련된 평가나 실험이 거의 전무한 실정이다.

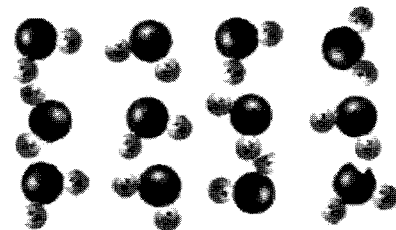
본 연구에서는 다양한 유전율 측정법 중 가장 일반적인 평행도체판법(parallel plate method)을 이용하여 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율을 측정하고 이들 값과 공극률과의 상관관계를 분석하고, 유전율의 온도 및 함수량 의존성을 확인한 후 최종적으로

아스팔트 콘크리트 시편의 공극률을 추정할 수 있는 상관관계식을 제안하고자 하였다. 이를 통해 아스팔트 콘크리트의 일반적인 유전율 특성을 평가하고자 한다. 또한 현재 국내외에서 사용하고 있는 유전율을 활용한 비파괴 밀도 측정장비의 보정모델로 활용할 수 있으며, 향후 국내에서 개발하고자 하는 아스팔트 포장 비파괴 밀도 측정장비의 기본적인 알고리즘으로 활용이 가능할 것이다.

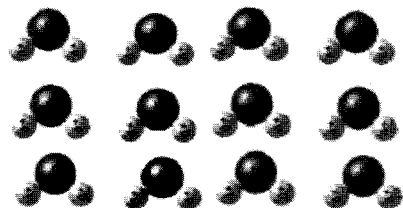
## 2. 공극률과 유전율의 상관관계

### 2.1 유전율

유전율은 외부에서 전기장(Electric field)을 가하였을 때 분극(Polarization)되는 특성 또는 에너지를 저장할 수 있는 능력의 정도를 의미하고, 분극은 외부 전기장에 의해 물질 안의 전하분포가 재배열(Rearrangement or Reorientation) 되는 현상을 의미한다. 이러한 분극의 과정을 통해 물질은 전하를 축적하거나 에너지를 축적할 수 있다. 그림 1은 물



(a) 전기장을 가하지 않았을 때



(b) 일정한 전기장을 가하였을 때

그림 1. 물 분자를 이용한 분극의 개념도



분자를 이용하여 외부에서 전기장이 가해졌을 때 분극의 개념을 보여주고 있다.

일반적으로 물질에 전기장(E)을 가하면 물질의 특성에 따라 다른 양의 전하를 그 물질 내부에 축적하게 되는데, 공기(Air)의 경우 전기장을 가하였을 때  $8.854 \times 10^{-12}$  F/m의 전하를 축적하게 된다. 이를 기준으로 공기보다 k배 더 전하를 축적하면 그 물질의 유전율을 k라고 한다. 예를 들면 물의 경우 공기보다 80배 더 전하를 축적하므로 물의 유전율은 80이 된다. 오래 전부터 공극률과 유전율의 상관관계에 대해 많은 연구가 진행되어왔다. 예를 들어 단일물질과 공극만으로 구성된 바이너리 화합물에서 공극이 전혀 없을 때의 유전율이 1인 물질에 대해 공극률 변화에 대한 유전율 변화를 나타내면 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 공극의 유전율이 1 이므로 공극률이 증가할수록 유전율은 감소하는 경향이 있다. 또한 이들 모델식들을 표 1에 정리하였다(D. J. Bergman and D. Stroud, 1992).

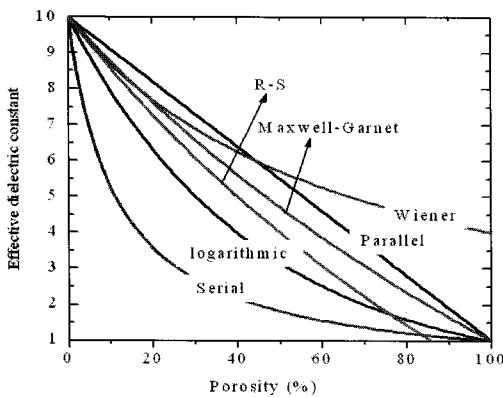


그림 2. 공극률에 따른 유전율 변화 이론곡선

표 1. 공극률과 유전율 상관관계 모델식

1	Serial model	$1/\epsilon' = P + (1 - P)/\epsilon_1$
2	Parallel model	$\epsilon' = P + (1 - P) \times \epsilon_1$
3	Logarithmic model	$\log \epsilon' = (1 - P) \times \log \epsilon_1$
4	Wiener model	$\epsilon' = \epsilon_1 / (1 + 1.5P)$
5	M-G model	$\epsilon_1(1 - [3P(\epsilon_1 - 1)/(2\epsilon_1 + 1 - P + P \times \epsilon_1)])$
6	R-S model	$\epsilon' = \epsilon_1 \times (2 - 2P)/(2 + P)$

$\epsilon'$  : effective dielectric constant,  $P$  : porosity,

$\epsilon_1$  : porosity가 0일 때의 유전율

## 2.2 유전율 측정법

어떤 물질의 유전율은 측정 주파수에 따라 그 값이 달라진다. 따라서 유전율 측정의 경우 측정 주파수 범위에 따라 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있고, 물질의 특성 또는 측정목적에 따라 여러 가지 하위측정법으로 나눌 수 있다.

### 2.2.1 고주파 유전율 측정법

고주파 유전율 측정법의 경우 그림 3에서와 같이 측정하고자 하는 물질에 전자기파를 입사시키면 전자기파의 일정부분은 물질에 의하여 반사되고, 또한 일정부분은 물질을 통과하여 진행하게 된다. 이때, 반사된 전자파나 투과된 전자파를 입사된 전자파와 비교하여 유전율을 측정할 수 있다 (G. Kent, 1996).

일반적으로 고주파 유전율 측정법의 경우 주파수 범위가 300MHz~300GHz 정도에서 측정하게 되고, 표 2에서와 같이 크게 4가지의 하위측정법이 존재한다.

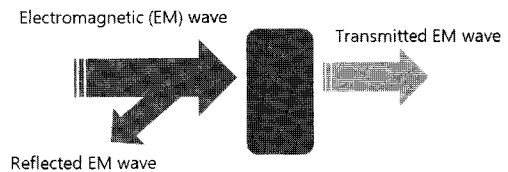


그림 3. 고주파 유전율 측정법의 원리

표 2. 고주파 유전율 측정법의 종류와 특징

고주파 유전율 측정법	특징
Coaxial probe 법	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반사된 전자기파 이용</li> <li>- 넓은 주파수에서 측정가능 (0.200 - 50 GHz)</li> <li>- 측정이 간단하고 편리</li> <li>- 비파괴 검사 가능</li> </ul>
Transmission line 법	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 반사파 또는 투과파 이용</li> <li>- 넓은 주파수 측정가능 (0.1 - 110GHz)</li> <li>- 유전특성 뿐만 아니라 자성특성도 측정가능</li> <li>- 유전손실이 높으면 측정불가</li> </ul>

(표 계속)



고주파 유전율 측정법	특 징
Free space 법	- 안테나를 이용하여 투과파 분석 - 비파괴, 비접촉 - ~325GHz까지 측정 가능 - 비접촉식이므로 온도를 가하면서 측정 가능
Resonant cavity 법	- 전자기파의 공진을 이용 - 측정 가능한 시편의 크기가 작음 - 측정 주파수는 선택성이 없으나, 측정값은 정확함

### 2.2.2 저주파 유전율 측정법

저주파 유전율 측정법의 경우 보통 300MHz 이하의 주파수 범위에서 측정되며, 일반적으로 평행도체판법을 이용하여 측정한다. 평행도체판법의 경우 그 측정값이 넓은 주파수 범위에서 상대적으로 고주파 측정법보다 정확하다. 하지만 이 측정법을 사용하기 위해서는 측정하고자 하는 물질의 양면에 얇은 전도체(금속)가 필요하다. 평행도체판법의 측정방법은 측정하고자 하는 물질의 양면에 전도체(금속)를 코팅 또는 접촉시키고 임피던스 분석기(Impedance analyzer)를 이용하여 Impedance를 측정하고 얻어진 Capacitance(C) 값에 물질의 정확한 크기에 대한 데이터를 보정하여 유전율 값을 측정하게 된다. 이 측정법은 저주파 대역에서 측정이 가능하며 측정하기 위해서는 물질의 크기를 정확히 구해야하고 전도체를 코팅하거나 접촉시켜야 한다는 단점이 있다. 그러나 측정값이 정확하고 주파수 변화에 따른 유전율 변화값을 함께 얻을 수 있는 장점이 있다 (Moulson and Herbert, 2003). 그림 4는 평행도체판법의 측정원리를 개략적으로 보여주고 있다.

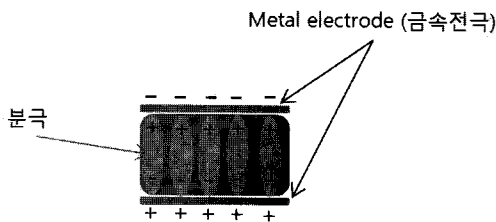


그림 4. 평행도체판법(Parallel plate method) 측정원리

## 3. 실내 시험

### 3.1 아스팔트 콘크리트 시편의 제작

아스팔트 콘크리트 시편제작을 위해 아스팔트 바인더는 PG 64-16과 PG 82-22를 사용하였고 동일한 골재종류 및 입도를 사용하여 제작하였다. 아스팔트 함량은 PG 64-16 바인더를 사용한 아스팔트 혼합물은 5.1%, PG 82-22 바인더를 사용한 아스팔트 혼합물은 4.9%를 각각 적용하였다. 시편제작에 사용된 다짐 장비는 IPC사의 Servopac 선회 다짐기를 사용하였으며, 지름 150mm, 높이 170mm로 제작하였다. 혼합물 양을 조절하여 시편의 공극률을 0%~20%로 제작하였다. 제작된 시편은 두께 25mm로 자른 후, 약 7일 동안 열풍건조기에서 완전 건조상태로 건조시켰다. 실험실에서 밀도측정을 수행하여 표 3과 같이 시편의 공극률을 얻었다. 또한 시편 표면은 구리전극과 시편의 밀착성 향상을 위해 표면연마처리를 하였다.

### 3.2 유전율 측정치구 제작 및 측정

일반적으로 유전율 측정은 시편의 두께가 얇을수록 더 정확한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 아스팔트 콘크리트의 경우 골재의 최대크기가 10mm를 넘고 시편을 절단하는 커터 날이 두껍기 때문에 시편을 잘라 얇게 만드는데 한계가 있어 시편의 크기가 제한적일 수밖에 없다. 이러한 이유 때문에 비교적 시편의 크기에 영향을 덜 받는 평행도체판법을 이용하여 100KHz~50MHz 주파수 범위에서 유전율을 측정하였다. 또한 임피던스분석기를 이용한 유전율 측정은 아래 식들을 이용하여 계산하였다.

- 측정장비 : Impedance analyzer (임피던스 분석기, HP 4194A), Z-probe (100MHz까지 측정가능)
- 측정치구 : 시편의 크기에 맞게 구리 도체판 (Cu



표 3. 아스팔트 시편의 실측 공극률

아스팔트 바인더 PG 64-16 사용				아스팔트 바인더 PG 82-22 사용			
시료번호	이론최대 밀도	시료체적	실측된 공극률 (%)	시료번호	이론최대밀도	시료체적	실측된 공극률 (%)
1	2.543	164.38	2.3	1	2.503	203.78	1.7
2	2.543	158.89	1.8	2	2.503	192.35	0.8
3	2.543	166.57	0.8	3	2.503	195.87	2.2
4	2.543	162.29	3.8	4	2.503	198.41	1.3
5	2.543	163.8	5	5	2.503	197.73	4.4
6	2.543	168.88	4.8	6	2.503	199.01	6
7	2.543	152.33	7.2	7	2.503	195.02	6.5
8	2.543	151.23	5.9	8	2.503	197.5	8.2
9	2.543	152.03	8.5	9	2.503	195.78	8.6
10	2.543	161.12	9.9	10	2.503	201.69	8.7
11	2.543	148.24	9.3	11	2.503	194.61	9.9
12	2.543	177.49	10.7	12	2.503	200.61	11.5
13	2.543	161.13	12.6	13	2.503	203.76	13.7
14	2.543	151.25	13.4	14	2.503	195.99	11.7
15	2.543	159.03	13	15	2.503	200.66	12.3
16	2.543	225.71	14.2	16	2.503	193.01	13.6
17	2.543	181.29	13.8	17	2.503	196.81	15.3
18	2.543	200.57	15.8	18	2.503	196.33	9.1
19	2.543	198.07	14.9	19	2.503	200.02	8.6
20	2.543	194.68	16.7	20	2.503	193.26	9.8
21	2.543	157.64	15.2	21	2.503	199.84	13.7
22	2.543	161.13	14.2	22	2.503	196.25	13.9
23	2.543	159.85	17	23	2.503	199.06	17.1

plate)을 절단, BNC cable (전자기파 전달통로, 500hm matched) 4개를 사용하여 구리판의 중심에 연결 후 그림 5에서와 같이 임피던스 분석기에 연결한다. 구리 전극과 아스팔트 콘크리트 시편의 표면에 들뜸이 생기게 되면 극저주파 (10-100KHz)에서 측정된 유전율 값의 오차가 심해지게 된다. 따라서 밀착성 향상을 위해 알루미늄 호일을 삽입하여 이러한 오차를 줄였다.

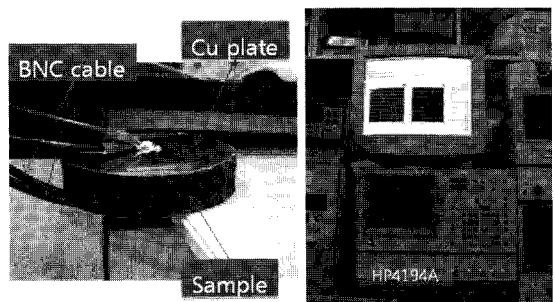


그림 5. 제작한 유전율 측정 치구 및 임피던스 분석기와 컴퓨터

- $Q$  (전하량) =  $C \times V$ , ( $C$  : capacitance,  $V$  : 교류전압)
- $C = \epsilon_r \times (A/d)$ , ( $\epsilon_r$  : 유전율,  $A$  : 시편의 면적 mm,  $d$  : 시편의 높이 mm)

### 3.3 온도에 따른 유전율 측정

온도(25℃, 40℃, 60℃)에 따른 유전율 변화를 측



정하기 위해 온도조절기(hot plate)위에 아스팔트 콘크리트 시편과 측정치구를 올려놓고 일정 온도가 될 때까지 10분정도 유지시킨 후 동일한 방법으로 유전율을 측정하였다. 이때 온도 오차범위는  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  를 유지하였다.

### 3.4 함수량에 따른 유전율 측정

함수량의 영향을 확인하기 위해 아스팔트 콘크리트 시편을 항온습습기를 이용하여 0%, 50%, 100%로 포화시킨 후 동일한 방법으로 유전율을 측정하였다.

### 3.5 측정된 유전율의 해석 및 평가

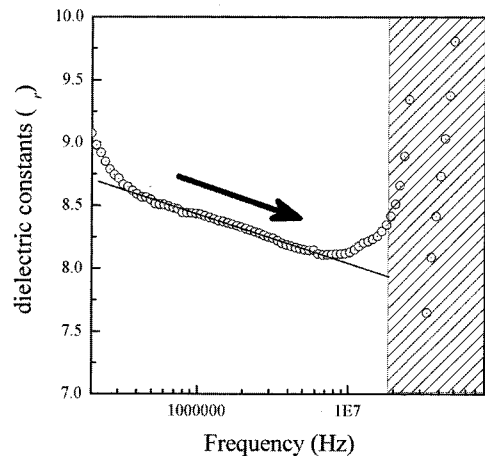
통계처리를 용이하게 하기 위해 동일한 공극률을 가진 아스팔트 콘크리트 시편을 3개 제작하여 평균값을 이용하였다. 온도 및 함수량의 영향을 확인하기 위한 실험 시에도 동일한 방법으로 3회 반복측정 후 평균값을 이용하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

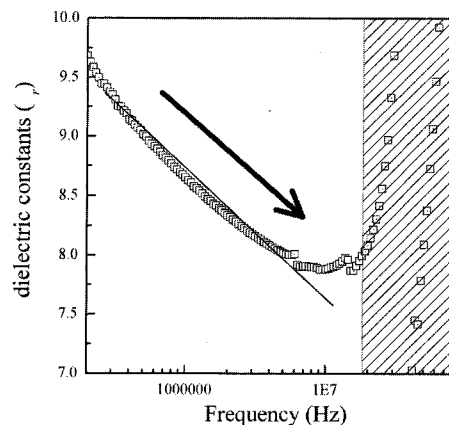
### 4.1 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율 주파수 의존성

그림 6에 아스팔트 콘크리트 시편의 주파수에 따른 유전율 변화특성을 나타내었다. 두 측정결과 모두 실측된 공극률 값이 8%인 시편을 사용하였다. 일반적으로 주파수가 높아짐에 따라 생성된 분극이 주파수를 따라가지 못해서 평균 분극량은 줄어들고, 이로 인해 유전율은 조금씩 작아지게 된다. 마찬가지로 아스팔트 콘크리트 시편의 측정결과도 주파수가 높아짐에 따라 유전율은 감소하는 경향을 보였다. 두 종류의 아스팔트 바인더를 사용한 경우 모두 주파수가 증가함에 따라 유전율이 선형적으로 감소

하였고, 감소정도는 아스팔트 바인더 PG 82-22를 사용한 시편의 경우가 유전율 감소폭이 더 크게 나타났다. 이는 아스팔트 바인더로 사용된 고분자물질에 의한 영향 때문인 것으로 판단된다. 그림에서 20MHz 이상의 주파수에서 유전율이 급격히 변하는 것은 시편의 크기 때문에 나타나는 공진현상 때문으로, 20MHz 이상의 주파수에서 정확한 측정을 위해서는 측정방법 또는 측정치구의 개선이 필요한 것으로 판단된다.



(a) PG 64-16을 사용한 경우



(b) PG 82-22를 사용한 경우

그림 6. 유전율의 주파수 의존성

## 4.2 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율과 공극률 상관관계

그림 7에 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율과 공극률의 상관관계를 나타내었다. 두 종류의 아스팔트 바인더를 사용한 시편 모두 공극률이 증가함에 따라 선형적으로 유전율이 감소함을 알 수 있다. 또한 아스팔트 바인더 PG 82-22를 사용했을 때 그 감소폭이 좀 더 작게 나타났다. 그림 7에서 확인할 수 있듯이 실제 측정된 유전율과 모델식들과는 상당한 차이를 나타내었다. 이는 대부분의 모델식의 경우 바이너리 혼합물 즉, 단일물질과 공극 두 가지 경우만 고려한 것에서 기인한다. 아스팔트의 경우, 적어도 3가지의 혼합물이 존재하기 때문에 이들 모델식에서 상당

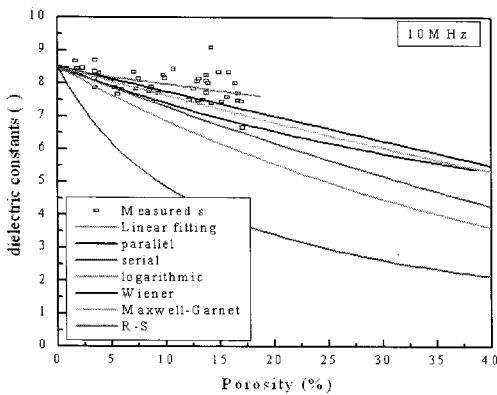
히 벗어나는 것으로 판단된다. 하지만, 모델식들에서도 공극률 20% 미만인 구간에서 공극률이 감소함에 따라 유전율은 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 실제 아스팔트 콘크리트 포장 시에 공극률 변화폭의 경우 20% 미만인 상태이기 때문에 측정된 유전율 값의 경우 Linear fitting을 통해 표준곡선을 얻는 것이 타당할 수 있다. 따라서 측정된 아스팔트 콘크리트 표준시편의 유전율을 공극률의 함수로 나타내고 Linear fitting을 한 다음 1차 함수 관계식을 도출하였다. 그 결과 다음과 같은 유전율과 공극률 상관식을 도출하였다.

$$\begin{aligned}
 & - \epsilon_1 = 8.3804 - (0.04124 \times P) \\
 & \quad (@ 10\text{MHz, 상온, 함수량 } 0\%, \text{ PG } 64-16 \text{ 사용}) \\
 & - \epsilon_1 = 8.0567 - (0.02476 \times P) \\
 & \quad (@ 10\text{MHz, 상온, 함수량 } 0\%, \text{ PG } 82-22 \text{ 사용})
 \end{aligned}$$

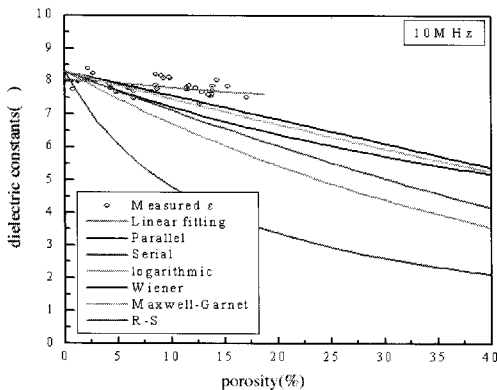
## 4.3 온도에 따른 유전율 변화측정

온도에 따른 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율 변화를 평가하기 위해 온도를 25℃, 40℃, 60℃로 변화시키며 유전율을 측정하였다. 그림 8은 온도변화에 따른 유전율 변화를 보여준다. 일반적으로 유전율이 작은 물질의 경우 온도가 증가함에 따라 유전율은 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 온도 영향을 확인한 결과 아래 그림과 같이 두 종류의 아스팔트 바인더를 사용했을 때 모두 온도가 증가함에 따라 거의 선형적으로 유전율은 증가함을 알 수 있다. 또한 두 가지 종류의 아스팔트 바인더에 따라 그 증가폭은 다르게 나타났으며, 아스팔트 바인더 PG 64-16이 좀 더 증가폭이 크게 나타났다. 위 측정결과를 토대로 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율에 대한 온도영향 보정관계식을 아래와 같이 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 & - \epsilon(T) = \epsilon_0 + (0.0148 \times T) \\
 & \quad (@ 10\text{MHz, 함수량 } 0\%, \text{ PG } 64-16) \\
 & - \epsilon(T) = \epsilon_0 + (0.0129 \times T) \\
 & \quad (@ 10\text{MHz, 함수량 } 0\%, \text{ PG } 82-22)
 \end{aligned}$$

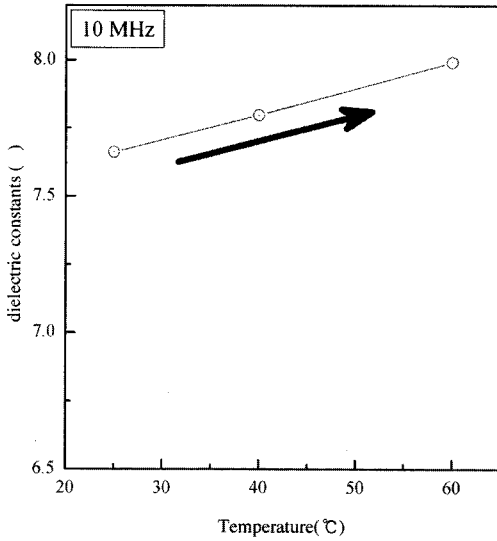


(a) PG 64-16

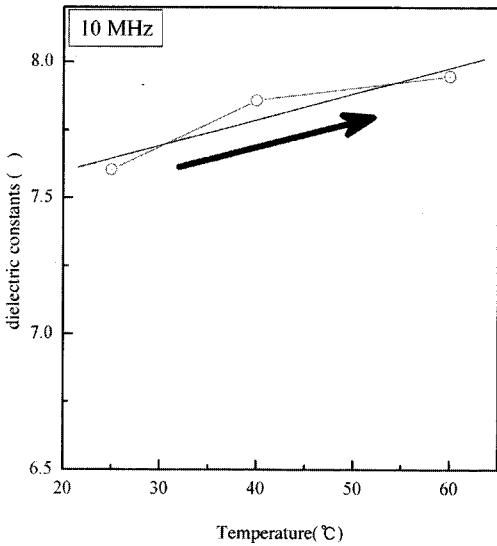


(b) PG 82-22

그림 7. 유전율과 공극률 상관관계



(a) PG 64-16



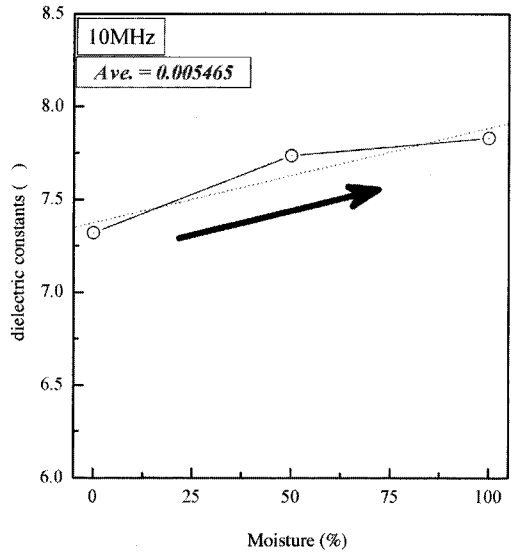
(b) PG 82-22

그림 8. 온도변화에 따른 유전율 변화

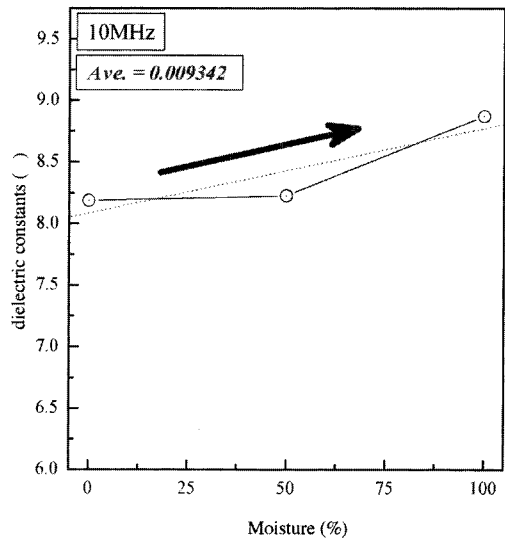
#### 4.4 함수량에 따른 유전율 변화측정

아스팔트 콘크리트 시편의 유전율에 대한 함수량 변화를 평가하기 위해 항온항습기를 이용하여 함수량을 0%, 50%, 100%로 바꿔가며 유전율을 평가하

였다. 그림 9는 유전율의 함수량 의존성을 보여준다. 물(수분)의 경우 유전율 값이 80정도이므로 일반적으로 물의 함량이 많을수록 유전율은 증가하게 된다. 아스팔트 콘크리트 시편에서도 마찬가지로 함수량이 증가할수록 유전율은 증가하는 경향을 나타내었다.



(a) PG 64-16



(b) PG 82-22

그림 9. 아스팔트 콘크리트 유전율의 함수량 의존성





결론적으로, 함수량에 따른 유전율의 변화폭은 아스팔트 바인더 PG 82-22의 경우 훨씬 크게 나타났다. 아스팔트 바인더 PG 64-16의 경우 온도에 따른 유전율 감소율은 10MHz에서 0.00547이고 아스팔트 바인더 PG 82-22의 경우 0.00934임을 확인하였다. 특이한 점은 아스팔트 바인더 PG 82-22를 사용한 시편의 경우 함수량이 50%일 때 유전율이 약간 감소하는 경향을 나타내었는데 좀 더 자세한 분석이 필요하지만, 이는 아스팔트 바인더 PG 82-22의 경우 수분과 반응함으로써 화학적으로 약간 불안정하여 나타난 결과로 생각된다.

이상으로 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율( $\epsilon$ )에 대한 함수량( $\Phi$ ) 의존성을 요약하면 다음과 같다.

- $\epsilon(\Phi) = \epsilon_0 + 0.00547 \times \Phi$   
(@ 10MHz, 상온, PG 64-16)
- $\epsilon(\Phi) = \epsilon_0 + 0.00934 \times \Phi$   
(@ 10MHz, 상온, PG 82-22)

#### 4.5 온도 및 함수량 의존성을 보정한 공극률과 유전율 모델식

이상의 공극률, 온도, 함수량 의존성 결과를 바탕으로 아스팔트 콘크리트 시편의 온도와 함수량을 보정한 최종 유전율과 공극률의 상관관계식을 아래와 같이 도출하였다.

- $P(\%) = (\epsilon_0 - 0.37 - \epsilon_{mea} + (0.0148 \times T) + (0.00547 \times \Phi)) / 0.04124$   
(@10MHz, PG 64-16)
- $P(\%) = (\epsilon_0 - 0.32 - \epsilon_{mea} + (0.0129 \times T) + (0.00934 \times \Phi)) / 0.02476$   
(@10MHz, PG 82-22)

위 식에서  $\epsilon_0$  값은 온도 25℃, 함수량 0%, 공극률 0%일 때 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율이고,  $\epsilon_{mea}$ 는 실측된 유전율,  $T$ 는 온도(℃), 그리고  $\Phi$ 는

함수량(%)을 나타낸다. 아스팔트 바인더 PG 64-16을 사용한 시편의 경우  $\epsilon_0 = 8.38$ , 아스팔트 바인더 PG 82-22를 사용한 시편의 경우  $\epsilon_0 = 8.06$ 이다.  $\epsilon_0$  값의 경우 사용된 골재의 종류와 아스팔트 바인더의 종류에 따라 변하는 값으로 아스팔트 혼합물의 종류에 따라 달라질 수 있다.

## 5. 결론

비파괴 밀도 측정장비는 현장에서 실시간으로 포장의 밀도를 측정할 수 있기 때문에 포장의 QC/QA에 매우 편리하게 이용할 수 있는 장비이다. 이 중에서 재료의 유전율을 이용하는 비파괴 밀도 측정장비는 몇몇 외국 제품이 이미 국내에 보급되어 있으며 또한 국내 측정장비가 개발 중에 있다. 이러한 유전율을 이용한 비파괴 밀도 측정장비를 적절히 보정하여 사용하고 또한 새로운 국내 장비를 개발하기 위해서는 아스팔트 콘크리트의 유전율 특성을 파악하고 밀도(또는 공극률)와의 상관성을 면밀히 분석한 자료가 제공되어야 한다.

본 연구에서는 아스팔트 콘크리트의 일반적인 유전율 특성을 파악하고 궁극적으로 공극률과 유전율의 상관성을 도출하고자 하였다. 이를 통해 현재 국내의에서 사용하고 있는 유전율을 활용한 비파괴 밀도 측정장비의 보정모델로 활용이 가능할 것으로 판단되며, 향후 본 측정장비 개발의 기본적인 알고리즘으로 활용하고자 한다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 평행도체판법을 이용하여 다양한 공극률, 온도 및 함수량 조건에서 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율을 측정하였다.
- 아스팔트 콘크리트 시편의 경우 주파수가 증가함에 따라 유전율은 감소하는 경향을 나타내었으며, 아스팔트 바인더의 종류에 따라 그 감소폭이 다르게 나타났다.



- 공극률 0~20% 구간에서 공극률이 증가함에 따라 유전율 값은 선형적으로 감소하는 경향을 보였으며, linear fitting을 통해 상관관계식을 도출하였다.
- 아스팔트 콘크리트 시편의 유전율에 대한 온도 및 함수량 영향을 평가한 결과, 온도 및 함수량이 증가함에 따라 유전율은 선형적으로 증가함을 알 수 있었다.
- 온도 및 함수량을 보정한 아스팔트 콘크리트의 유전율과 공극률의 상관관계식을 아래와 같이 도출하였다

$$- P (\%) = (\epsilon_0 - 0.37 - \epsilon_{mea} + (0.0148 \times T) + (0.00547 \times \Phi)) / 0.04124$$

(@10MHz, PG 64-16)

$$- P (\%) = (\epsilon_0 - 0.32 - \epsilon_{mea} + (0.0129 \times T) + (0.00934 \times \Phi)) / 0.02476$$

(@10MHz, PG 82-22)

여기서,  $\epsilon_0$  값은 온도 25℃, 함수량 0%, 공극률 0%일 때 아스팔트 콘크리트의 유전율,  $\epsilon_{mea}$ 는 실측된 유전율,  $T$ 는 온도(℃),  $\Phi$ 는 함수량(%)

#### 감사의 글

본 연구는 국토해양부의 건설핵심기술연구개발사업 『장수명·친환경 도로포장 재료 및 설계시공기술 개발 연구』 결과의 일부입니다.

#### 참고문헌

김만일, 니시가끼 마코토, “유전율법을 이용한 다공질 매질의 공극률 및 유효공극률의 측정에 관한 연구,” *The Journal of Engineering Geology*, Vol.13, No.4, December, 2003, pp. 419-428.

A. C. Rust, J. K. Russell, R. J. Knight (1999), Dielectric constant as a predictor of porosity in dry volcanic rocks, *Journal of Volcanology and*

*Geothermal Research*, 91, pp79-96.

A. J. Moulson and J. M. Herbert (2003), “Electroceramics: Materials Properties, Applications.” *2nd Edition, Chapter 5. Dielectrics and Insulators.*

D. J. Bergman and D. Stroud (1992), “*Advances in Research and Applications: Solid State Physics*”, (Academic, New York, 1992), Vol. 46, pp. 147-269

Edward J. Jaselskis, Jonas Grigas and Algirdas Brilingas (2003), Dielectric properties of asphalt pavement, *Journal of materials in civil engineering*, 15, pp 427-434.

Freddy L. Roberts (1996), “Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction.” *Second Edition, Chapter 6. Equipment and Construction.*

G. Kent (1996) Nondestructive Permittivity Measurement of Substrates, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 45, pp. 102-106.

US Army Corp of Engineers, (2000), “*Hot-Mix Asphalt Paving Handbook 2000*,” Part III Hot-MIX Asphalt Laydown and Compaction.

접 수 일 : 2008.10. 23  
 심 사 일 : 2008.11. 4  
 심사완료일 : 2009. 2. 23