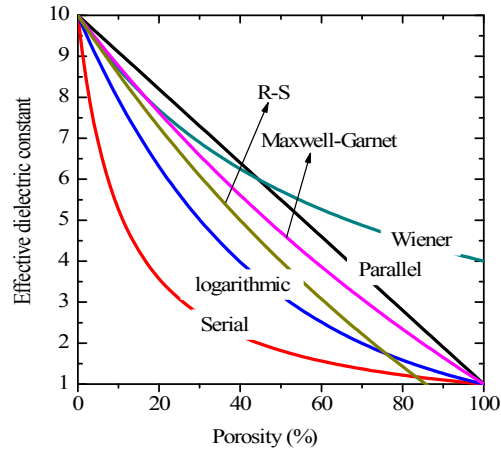


공극률과 유전율과의 상관관계에 대해 많은 연구가 진행되어 왔다. 예를 들어 공극이 전혀 없을 때의 유전율이 10인 시편에 대해 공극률 변화에 대한 유전율 변화를 나타내면 <그림 2>와 같다. 공극의 유전율이 1이므로 공극률이 증가할수록 유전율은 감소하는 경향이 있다.

- 1) Serial model: $1/\epsilon' = P + (1-P)/\epsilon_1$
 - 2) Parallel model : $\epsilon' = P + (1-P)*\epsilon_1$
 - 3) Logarithmic model : $\log \epsilon' = (1-P)*\log \epsilon_1$
 - 4) Wiener model : $\epsilon' = \epsilon_1 / (1 + 1.5P)$
 - 5) M-G model : $\epsilon_1 (1 - [(3P(\epsilon_1 - 1)) / (2\epsilon_1 + 1 - P + P*\epsilon_1)])$
 - 6) R-S model : $\epsilon' = \epsilon_1 * (2 - 2P) / (2 + P)$
- (ϵ' : effective dielectric constant,
P: porosity, ϵ_1 : 공극률0일 때 유전율)

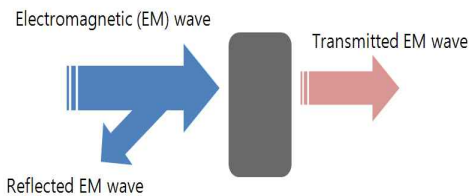


<그림 2> 공극률에 따른 유전율 변화 이론곡선

3. 유전율의 측정

3.1 고주파 유전율 측정법

<그림 3>과 같이 측정하고자 하는 물질에 전자파를 입사시키면 전자파의 일정 부분은 물질에 의하여 반사되고 일정 부분은 물질을 통과하여 진행하게 되는데 반사된 전자파나 투과된 전자파를 입사된 전자파와 비교하여 유전율을 측정할 수 있다. 고주파 유전율 측정 주파수 범위는 300MHz~300GHz 정도를 말하며, 고주파 측정 방법은 크게 4가지의 측정법이 존재하며 간략하게 특징을 아래 <표 1>에 정리하였다.



<그림 3> 고주파 유전율 측정법 원리

<표 1> 고주파를 이용한 유전율 측정 방법

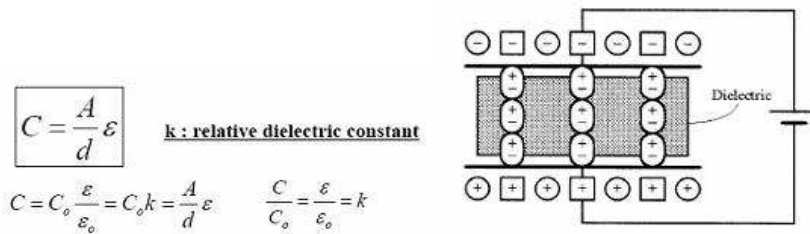
Coaxial probe법	- 반사된 전자기파 이용 - 넓은 주파수에서 측정가능 (0.200 - 50 GHz), 비파괴검사가가능
Transmission line법	- 반사파 또는 투과파 이용 - Broad Band: 넓은 주파수 측정가능 (0.1 - 110GHz)
Free space법	- 안테나를 이용하여 투과파 분석 - 비파괴, 비접촉 (~325GHz)
Resonant cavity법	- 전자기파의 공진을 이용, 측정가능한 시편의 크기가 작음.

3.2 저주파 유전율 측정법

저주파 유전율 측정 주파수 범위는 100kHz~300MHz 정도이며 일반적으로 아래의 방법을 주로 적용한다.

- Parallel plate (평행도체판) 법

측정하고자 하는 물질의 양면에 전극을 입히고 임피던스 분석기 (Impedance analyzer)를 이용하여 임피던스를 측정 후 얻어진 정전용량 (Capacitance, C) 값에 물질의 정확한 크기에 대해 데이터를 보정한 후 유전율을 계산한다. 이 측정법은 저주파 대역에서 측정가능하며 측정하기 위해서는 물질의 크기를 정확히 구해야하고 양면에 전극을 코팅해야 한다는 단점이 있으나, 측정값이 정확하고 주파수 변화에 따른 유전율 변화값을 함께 얻을 수 있는 장점이 있다. <그림 4>에 측정원리에 대한 계략도를 나타내었다.



〈그림 4〉 Parallel plate method (평행도체판법) 측정원리

4. 아스팔트 혼합물의 유전율 측정

4.1 표준 시편 제작

표준 시편 제작을 위해 아스팔트 혼합물은 두 가지 종류를 사용하였다. 골재 종류, 골재 입도 및 아스팔트 함량을 한 가지로 고정시키고 두 가지 종류의 바인더 PG 64-16과 PG 82-22를 사용하였다. 표준 시편 제작에 사용된 다짐 장비는 IPC사의 Servopac 선회 다짐기를 사용하였으며, 표준 시편의 크기는 지름 150mm, 높이 25mm로 제작하였다. 유전율 측정을 위해서는 시편의 두께가 작을수록 좋다. 따라서 본 연구의 시편은 실험실에서 제작할 수 있는 최소 두께인 25mm로 제작하였다. 아스팔트 콘크리트 표준 시편은 0%~20%까지의 다양한 공극률을 갖도록 다짐량(다짐횟수)을 조절하여 총 9가지의 공극률을 갖는 시편을 제작하였다. 제작된 각 표준 시편의 높이는 25mm로 자른 후 이론최대 밀도와 겉보기 밀도를 통해 공극률을 측정 후 7일 동안 항온 챔버에서 완전 건조시켰다. 표준 시편은 구리전극과 시편의 밀착성 향상을 위해 표면연마처리를 하였다.

4.2 유전율 측정치구 제작 및 측정

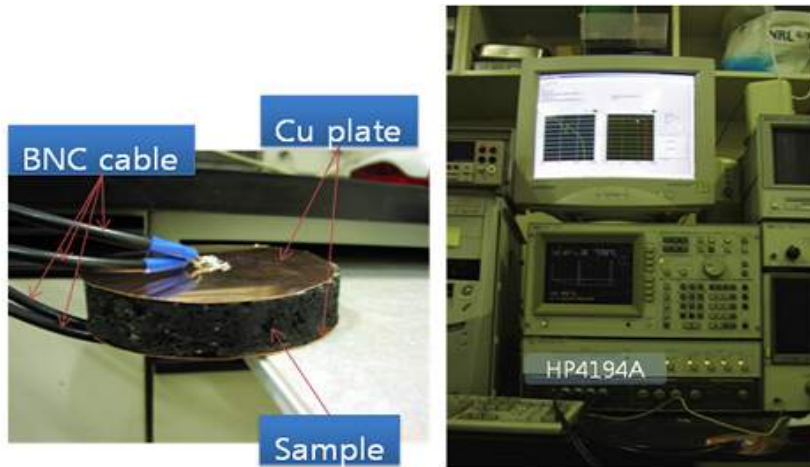
아스팔트 콘크리트 표준 시편은 일정 크기 이상으로 제작할 수밖에 없기 때문에 유전율 측정은 parallel plate법을 사용하여 저주파 (100kHz~50MHz)에서 측정하였다. 저주파에서 측정하였을 때 얻어지는 유전율이 고주파보다 더 정밀한 측정 결과를 얻을 수 있으며, 유전율을 이용한 기존 상용화 비파괴 다짐밀도 측정장비의 경우, 오실로스코프 (oscilloscope)를 이용한 측정 주파수 영역대 확인 결과 저주파(49.3MHz)에서 측정하는 것으로 나타났다. 이는 고주파 영역을 사용하는 장비가 저주파 보다 매우 고가라는 것도 저주파 사용의 이유 중 하나인 것으로 보여 진다. 측정장비, 전하량 계산 방법 및 측정치구에 대한 설명은 아래와 같다.

- 측정장비 : Impedance analyzer (임피던스 분석기, HP 4194A), Z-probe (100MHz까지 측정가능)
- Q(전하량) = C · V, C : capacitance, V : 교류전압

위 식을 통해 C값을 구한 다음 아래 식을 통해 시편의 면적과 높이를 보정하여 유전율을 측정하였다.

- $C = \epsilon_r A/d$, ϵ_r : 유전율, A : 시편의 면적(mm), d : 시편의 높이(mm).

■ 측정치구 : 아스팔트 혼합물 표준 시편의 크기에 맞게 Cu (구리, 도체) 판을 절단, BNC cable (전자기파 전달통로) 4개를 사용하여 구리판의 중심에 납땜 후 임피던스 분석기에 연결한다(그림 5). 구리전극과 표준 시편의 표면에 들뜸이 생기게 되면, 극저주파 (10~100kHz)에서 측정된 유전율 값의 오차가 심해지게 된다. 따라서, 밀착성 향상을 위해 알루미늄 호일을 삽입하여 오차를 줄였다.

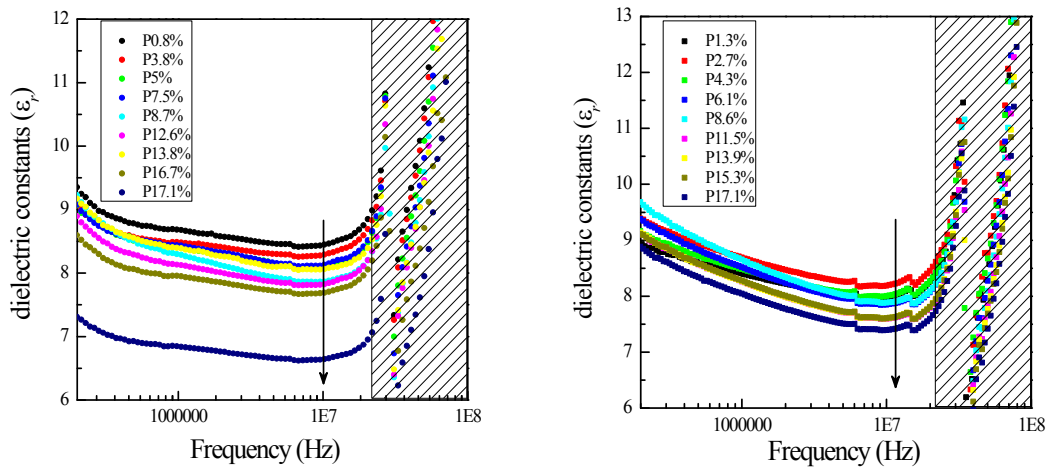


〈그림 5〉 제작한 유전율 측정 치구 및 임피던스 분석기와 컴퓨터

4. 시험 결과 및 분석

4.1 아스팔트 콘크리트 표준 시편의 유전율 주파수 의존성

〈그림 6〉은 주파수에 따른 표준 시편의 유전율 변화특성 보여준다. 대부분의 물질에서와 같이 주파수가 높아짐에 따라 표준 시편의 유전율은 감소하는 경향을 보였다. 두 종류의 아스팔트 바인더를 사용한 경우 모두 주파수가 증가함에 따라 유전율이 선형적으로 감소한다. 유전율 감소 기울기는 아스팔트 바인더 PG82-22 를 사용한 표준 시편의 경우가 아스팔트 바인더 PG 64-16을 사용한 표준 시편에 비해 더 크게 나타났다. 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.



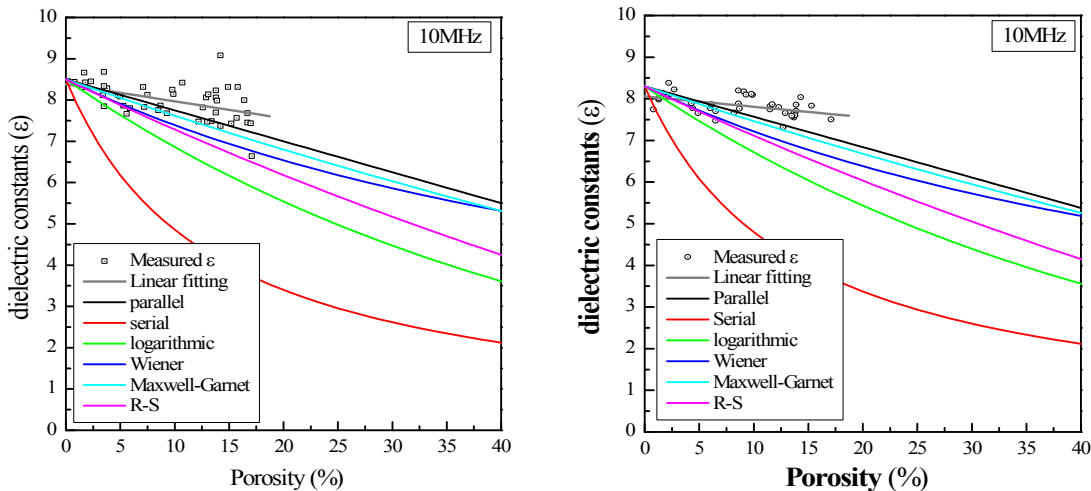
〈그림 6〉 주파수에 따른 유전율 변화특성 (왼쪽: PG 64-16, 오른쪽: PG 82-22)



4.2. 아스팔트 콘크리트 표준 시편의 유전율과 공극률 상관관계

〈그림 6〉에 화살표로 표시한 부분에서 같은 주파수일 때 공극률이 증가함에 따라 유전율은 감소함을 알 수 있다. 〈그림 7〉에 아스팔트 표준시편의 유전율과 공극률의 상관관계를 나타내었다. 두 종류의 아스팔트 바인더를 사용한 시편 모두 공극률이 증가함에 따라 선형적으로 유전율이 감소함을 알 수 있었다. 또한 아스팔트 바인더 PG82-22를 사용했을 때 그 감소폭이 좀 더 작게 나타났다. 다음의 그림에서 확인할 수 있듯이 실제 측정된 유전율과 모델식들과 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 많이 벗어나는 것으로 판단된다. 그러나 모델식들에서도 공극률 20% 미만인 구간에서 공극률이 감소함에 따라 유전율은 거의 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 또한 실제 아스팔트 포장 시에 공극률 변화폭의 경우 20% 미만인 상태이기 때문에 측정된 유전율 값의 경우 Linear fitting을 통해 표준 곡선을 얻는 것이 타당할 것이다. 따라서 측정된 아스팔트 표준 시편의 유전율을 공극률의 함수로 나타내고 Linear fitting을 한 다음 1차 함수 관계식을 도출하였다. 그 결과 다음과 같은 아스팔트 표준 시편의 유전율과 공극률 상관관계를 도출하였다.

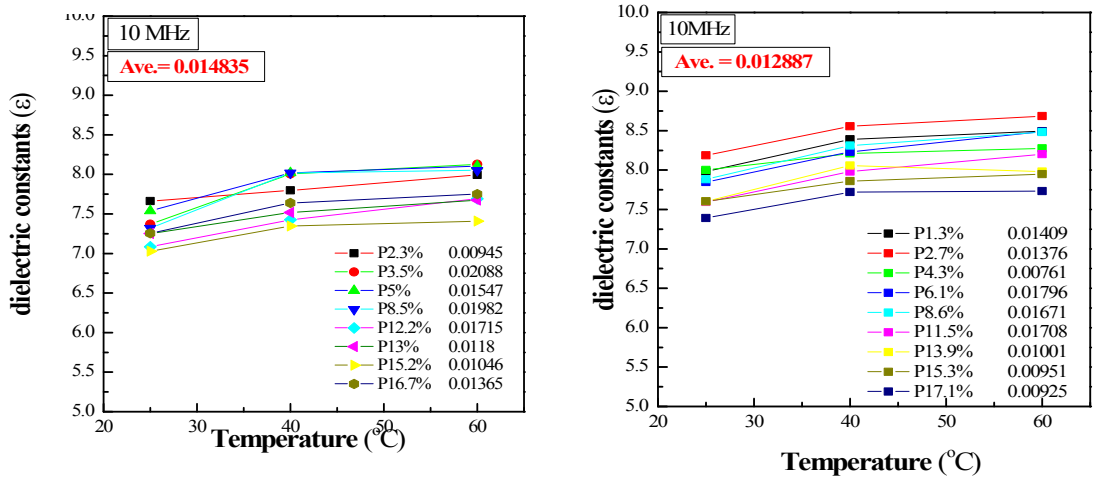
- $\epsilon = \epsilon_1 - (0.04124 * P)$, $\epsilon_1 = 8.3804$ (@ 10MHz, 아스팔트 바인더 PG64-16)
- $\epsilon = \epsilon_1 - (0.02476 * P)$, $\epsilon_1 = 8.0567$ (@ 10MHz, 아스팔트 바인더 PG82-22)



〈그림 6〉 주파수에 따른 유전율 변화특성 (왼쪽: PG 64-16, 오른쪽: PG 82-22)

4.3. 온도에 따른 유전율 변화

〈그림 8〉은 아스팔트 시편의 온도증가에 따른 유전율 변화를 나타낸다. 일반적으로 유전율이 작은 물질의 경우 온도가 증가함에 따라 유전율은 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서 온도영향을 확인한 결과 아래 그림과 같이 온도가 증가함에 따라 측정된 유전율은 선형적으로 증가하였다. 또한 두 가지 종류의 아스팔트 바인더에 따라 그 증가폭은 다르게 나타났으며, 아스팔트 바인더 PG 64-16를 사용한 아스팔트 시편의 경우가 좀 더 증가폭이 크게 나타났다.



〈그림 8〉 온도에 따른 유전율변화 특성

위 측정결과를 토대로 아스팔트 시편의 유전율에 대한 온도영향 보정관계식을 아래와 같이 나타내었다.

- 아스팔트 바인더 PG64-16 : $\epsilon(T) = \epsilon_{25} + (0.0148 * T)$ (10MHz에서 측정 시)
- 아스팔트 바인더 PG82-22 : $\epsilon(T) = \epsilon_{25} + (0.0129 * T)$ (10MHz에서 측정 시)

최종적으로 앞서 언급한 유전율과 공극률 상관관계식에 온도영향을 고려한 보정식을 구할 수가 있으며, 그 결과 공극률은 다음과 같은 관계식을 통하여 구할 수가 있다.

- 아스팔트 바인더 PG64-16 : $\epsilon(P, T) = \epsilon_1 - (0.04124 * P) + (0.0148 * T)$ (10MHz에서 측정 시)
- 아스팔트 바인더 PG82-22 : $\epsilon(P, T) = \epsilon_1 - (0.02476 * P) + (0.0129 * T)$ (10MHz에서 측정 시)

따라서 위의 관계식을 공극률(P)에 관하여 정리하면 다음과 같다. 아래 식을 통해 공극률을 모르는 아스팔트 시편의 유전율(ϵ_{mea})을 측정후 측정온도와 함께 대입하면 공극률을 구할 수 있다.

- 아스팔트 바인더 PG64-16 : $P(\%) = (\epsilon_1 - \epsilon_{mea} + (0.0148 * T)) / 0.04124$ (10MHz에서 측정 시)
- 아스팔트 바인더 PG82-22 : $P(\%) = (\epsilon_1 - \epsilon_{mea} + (0.0129 * T)) / 0.02476$ (10MHz에서 측정 시)

5. 결론

본 연구를 통해 국내 아스팔트 콘크리트에 대한 저주파 유전율 측정법 개발과 더불어 궁극적으로 공극률과 유전율의 상관관계를 도출하고자 하였다. 이를 통해 아스팔트 혼합물의 유전율과 공극률 사이의 표준 곡선을 제시함으로써 향후 아스팔트 포장의 유전율을 활용한 비파괴 다짐밀도 측정장비의 기본적인 보정 모델로 활용하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 다양한 공극률을 갖는 아스팔트 표준 시편을 제작하고, 평행도체판법을 이용하여 저주파를 이용한 아스팔트 혼합물



표준 시편의 유전율을 측정하였다.

- 아스팔트 혼합물 표준 시편의 경우 주파수가 증가함에 따라 유전율은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 사용한 아스팔트 바인더의 종류에 따라 그 감소폭이 다르게 나타났다.
- 공극률이 0~20% 구간에서 공극률이 증가함에 따라 유전율 값은 선형적으로 감소하는 경향을 보였으며, 이들의 linear fitting을 통해 상관관계식을 제시하였다.
- 온도영향 보정곡선을 측정한 후 유전율-공극률 상관관계식에 적용함으로써 새로운 모델식을 제시하였다.
 - 아스팔트 바인더 PG64-16 : $P(\%) = (\epsilon_1 - \epsilon_{\text{mea}} + (0.0148 * T)) / 0.04124$ (10MHz에서 측정 시)
 - 아스팔트 바인더 PG82-22 : $P(\%) = (\epsilon_1 - \epsilon_{\text{mea}} + (0.0129 * T)) / 0.02476$ (10MHz에서 측정 시)

감사의 글

본 연구는 국가 R&D과제인 “장수명·친환경 도로포장재료 및 설계시공기술 개발” 의 일부 성과물로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

1. 김만일, 니시가끼 마코토 (2003) 유전율법을 이용한 다공질 매질의 공극률 및 유효공극률의 측정에 관한 연구, The Journal of Engineering Geology, 13, p. 419-428
2. G. Kent (1996) Nondestructive Permittivity Measurement of Substrates, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 45, p102-106.
3. J. Q. Shang (2002) Effects of Asphalt Pavement Properties on Complex Permittivity, The International Journal of Pavement Engineering, 3(4), p. 217-226
4. Edward J. Jaselskis, Jonas Grigas and Algirdas Brilingas (2003), Dielectric properties of asphalt pavement, Journal of materials in civil engineering, 15, p427-434.
5. 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, p79-96.