

아스팔트 포장의 현장 밀도 추정을 위한 유전율 측정에 관한 연구

On the Dielectric Constant Measurement for Asphalt Pavement Filed Density Estimation

김동식*
(Dong Sik Kim*)

Abstract - The asphalt pavement is usually non-uniform since achieving a non-segregated and homogeneous asphalt mixture is very difficult. The segregation can occur in the mixed material before it is fed onto the road and it become segregated as it is being placed onto the road surface. Note that this segregation determines the performance of the asphalt pavement. Hence, it is necessary to check the segregation by estimating the density of the asphalt pavement in the field. In this paper, a research on estimating the density of the asphalt mixture by measuring the dielectric constant of the material is conducted. An RF transceiver and an antenna are designed and tested to a series of asphalt density samples, and discussions are shown.

Key Words: 아스팔트, 포장, 다짐, 밀도추정, 유전율

1. 서론

도로를 아스팔트로 포장을 하는데 있어서, 아스팔트 혼합물의 다짐은 포장의 내구 성능과 밀접한 관계가 있다. 다짐을 통하여 아스팔트 혼합물의 공극률을 낮추어 내구성 있는 포장을 가능하게 하는데, 이때 4-7%의 목표 공극률이 포장 내구 성능에 있어서 효과적이다. 따라서 아스팔트를 포장할 때 적절한 다짐 관리를 수행하여야 하는데, 국내에서는 효율적인 관리가 이루어지지 못하고 있는 실정이다. 미국이나 유럽의 여러 선진국에서는 아스팔트 포장의 시공 중에 다짐의 각 단계에서 방사능을 이용한 비파괴 현장 밀도 측정 장치를 사용하여 아스팔트의 밀도를 현장에서 필수적으로 측정하고 있으며, 현장에서의 코어 공시체의 밀도를 정기적으로 체크하여 상관관계를 분석하는 방법으로 밀도 관리를 하고 있다. 국내 아스팔트 포장의 품질 관리를 위한 방안으로, 이러한 비파괴 다짐 밀도 측정 장비의 보급이 필요한데, 현재 상용화되어 있는 비파괴 장비는 고가의 수입 장비이므로 국내에서의 사용 실적은 거의 전무한 실정이다. 방사능을 이용한 비파괴 현장 밀도 측정 장치는 Cesium-137로부터 방사되는 photon이 아스팔트 포장을 통과하여 나오는 양을 측정하여 밀도를 측정한다. 이러한 방식은 아스팔트 밀도의 절대 값을 수분의 영향을 받지 않고 정확히 측정할 수 있으나 방사선 동위원소를 사용하므로 안전성 문제와 장치의 유지 및 관리가 용이치 못하며, 매우 고가인 단점을 가지고 있다. 따라서 방사능을 사용하지 않고 보다 안전하고 가격이 낮은 비파괴 현장 밀도 측정 장비의 개발이 필요하며, 이미 국외에서는 물질의 유전

율 측정을 이용한 측정 장비들이 개발되고 상용화되기 시작하였다^[1,2]. 이에 국내에서도 유전율 측정에 기초한 현장 밀도 측정 장비의 연구 개발이 시급한 때이다.

본 논문에서는 아스팔트 혼합물의 현장 밀도 측정 장치의 개발을 위한 기초 연구로, 유전율 측정을 위한 RF 송수신 장치와 안테나를 개발하였고, 이를 통한 실제 다짐 밀도가 다른 아스팔트 시편에 대하여 실험을 하여 다짐 밀도와 유전율 간의 상호 관계를 관찰하여, 유전율 측정을 통한 밀도의 추정 가능성에 대하여 연구하였다.

2. 유전율과 아스팔트 밀도

본 장에서는 아스팔트 혼합물의 밀도와 유전율의 관계를 고찰해 보았다. D 를 electric flux 밀도, E 는 electric field intensity라고 하면 이들은 다음 식과 같이 서로 비례한다.

$$D = \epsilon_0 \epsilon_r E \quad (C/m^2) \quad (1)$$

식 (1)의 비례상수에서, ϵ_0 는 자유공간의 permittivity로 단위는 F/m 이며, $\epsilon := \epsilon_0 \epsilon_r$ 은 물체의 absolute permittivity로 거리당 capacitance(F/m)로 측정을 한다^[3]. 또한 ϵ_r 은 상대적 permittivity로 유전율(dielectric constant)이라고 한다. 물체는 각각의 고유 유전율을 가지고 있는데, 공기는 1이며, 아스팔트 혼합물의 유전율은 5-6 정도이다. 따라서 다짐이 덜 되어 공기의 함량이 늘어나면 아스팔트 혼합물의 유전율이 낮아지며, 이러한 원리를 이용하여, 아스팔트를 포장하는 현장에서 비파괴 밀도 추정이 가능하다.

유전율은 capacitance와 비례하므로, 어떤 물체의 capacitance를 측정하므로 유전율을 구할 수 있다. 즉 평판 capacitor에서 마주본 평판의 거리를 h 라고 하고 평판의 면

저자 소개

*正 會 員: 한국의국어대학교 전자공학과 교수

적을 S 라고 할 때 capacitance C 는 $C = \epsilon S/h$ 의 관계식을 만족한다. 또한 capacitance에 v 라는 전압을 인가할 때 i 라는 전류가 흐른다고 하면 유전율은 다음 식을 만족한다.

$$\frac{d v(t)}{d t} = \frac{h}{\epsilon_0 \epsilon_r S} i(t) \quad (2)$$

주파수 ω_0 를 가지는 정현파 전압 $v(t) = V_m \cos(\omega_0 t)$ 를 인가하면, 흐르는 전류 i 의 magnitude를 I_m 이라고 할 때, phasor를 사용하여 식 (2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\epsilon_r = \frac{h}{\epsilon_0 S \omega_0 V_m} I_m \quad (3)$$

즉 송신측에서 고정된 ω_0 와 V_m 의 정현파를 일정하게 발생시키고 수신측에서 흐르는 전류의 magnitude I_m 을 측정하여 식 (3)으로부터 유전율 ϵ_r 의 측정이 가능하다.

이제 이렇게 측정한 유전율로부터 아스팔트의 밀도를 추정하는 방법에 대하여 고찰해 보자. 아스팔트 표본의 전체 부피를 V_{total} 라 하고 그 중에 공기가 차지하는 부피를 V_{air} 라 표기하자. 그리고 공극률 a 를 $a := V_{air}/V_{total}$ 로 정의하자. 이때 $0 \leq a \leq 1$ 를 만족한다. 일반적으로 공극률은 백분율(%)로 나타낸다. 공극률 0인 아스팔트의 밀도는 ρ_0 , 유전율은 ϵ_{r0} 라고 하면, 임의의 공극률 a 를 가지는 아스팔트 표본의 밀도 ρ_a 는 $\rho_a = (1-a) \rho_0$ 가 되며 유전율 ϵ_{ra} 는 $\epsilon_{ra} = a\epsilon_{air} + (1-a)\epsilon_{r0}$ 이 된다. 여기서 ϵ_{air} 는 공기의 유전율이다. 따라서 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

$$\rho_a = \frac{\epsilon_{ra} - \epsilon_{air}}{\epsilon_{ra} - \epsilon_{air}} \rho_0 = \left(\frac{\rho_0}{\epsilon_{ra} - \epsilon_{air}} \right) \epsilon_{ra} - \left(\frac{\epsilon_{air} \rho_0}{\epsilon_{ra} - \epsilon_{air}} \right) \quad (4)$$

즉 유전율 ϵ_{ra} 과 밀도 ρ_a 간의 관계는 1차 함수가 됨을 알 수 있다. 식 (4)에서 아스팔트 혼합물 표본의 유전율 ϵ_{ra} 는 식 (3)으로부터 측정할 수 있다. 따라서 식 (4)를 통하여 공극률이 a 인 아스팔트 혼합물 표본의 밀도 ρ_a 를 추정할 수 있다. 또한 관계식 $a = (\epsilon_{r0} - \epsilon_{ra}) / (\epsilon_{r0} - \epsilon_{air})$ 으로부터 측정한 유전율 ϵ_{ra} 를 사용하여 공극률을 추정할 수 있다.

만일 아스팔트를 포장할 때 수분의 함량이 높으면, 물의 유전율은 공기와는 다르게 오히려 $\epsilon_r = 80$ 으로 매우 높으므로 유전율만을 가지고 아스팔트의 밀도를 측정하는데 상당한 오차를 발생시킬 수 있다. 이를 극복하기 위하여 복소수 유전율을 고려하고 사용하는 주파수를 가변하면서 공진하는 주파수를 찾아 수분의 함량도 측정하고 수분 함량을 사용하여 유전율 측정의 정확도를 높이는 연구들이 수행되고 있다. 또한 아스팔트의 온도도 측정하여 보다 정확한 계측을 위한 보정도 필요하다.

3. 유전율 측정 RF 장치

본 장에서는 아스팔트의 유전율 측정을 위해 설계 제작한 RF 송수신 장치와 안테나에 대하여 소개한다. 측정 장치는 50MHz의 RF 신호를 발생시키는 송신부, RF 신호를 받아 그 신호의 magnitude를 측정하는 수신부, 그리고 아스팔트 시료

측정용 안테나로 구성되어 있다. 이러한 각 구성에 대하여 다음 절에 각각 정리하였다.

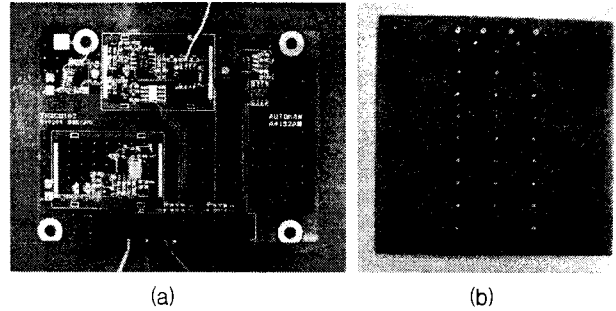


그림 1. 유전율 측정을 위한 RF 장치. (a) RF 송수신 보드. (b) 유전율 측정용 송수신 안테나.

3.1 RF 송신부

이 부분은 식 (3)에서와 같이 일정한 주파수 ω_0 와 출력 V_m 을 가지는 정현파를 생성하는 부분으로, TCXO와 주파수 체배를 통하여 50MHz 부근의 신호를 만든다. 본 측정 장비는 포장 현장에서 사용이 가능하여야 하므로 넓은 온도 범위에서 안정된 주파수와 출력을 내는 송신기의 설계가 중요하다. 이렇게 생성된 정현파는 동축 케이블을 통하여 안테나로 간다.

3.2 RF 수신부

RF 수신부에서는 안테나로부터 수신된 50MHz의 정현파에 동조하여 envelop detector를 통하여 인가된 정현파 전압의 magnitude를 구한다. 이때 이 전압은 식 (3)의 전류 I_m 과 비례한다. 검출된 신호는 증폭되어 ADC를 거쳐서 디지털 신호 처리 부분으로 넘어가서 밀도를 계산하는 알고리즘에 의하여 아스팔트 혼합물 시료의 밀도를 추정하게 된다. 이때 동조회로의 안정된 동작을 위하여 프로그램에서 제어가 가능하도록 programmable potentiometer와 varicap으로 구성된 회로를 사용하였다. 그림 1(a)에는 본 연구에서 설계 제작한 RF 송수신부의 사진으로, 윗부분은 RF 수신부, 아래 부분은 RF 송신부이다.

3.2 안테나부

유전율 측정을 위한 안테나는 송수신부가 같이 있으며, 송신된 전자파가 안테나에 접촉하고 있는 아스팔트 시료를 통과하여 수신되도록 설계되어 있다. 송신부 패드와 수신부 패드의 크기 및 간격은 측정하고자 하는 시료의 유효 깊이와 크기에 관련이 있으며, 안테나의 설계에 따라 유전율 측정의 정확도가 결정되므로, 많은 실험을 통하여 적절한 안테나의 설계가 이루어져야 한다. 국외의 경우 원형의 안테나와 N형의 안테나가 개발되어 있다^{[1],[2]}. 그림 1(b)는 본 연구에서 설계한 안테나로, 가운데 접지 패드가, 그 양쪽으로 송신 및 수신 패드가 두 종류의 깊이로 있으며, 반대편엔 모두 접지가 되어 있어 전자파가 한쪽방향으로만 퍼지도록 고안되어 있다.

4. 실험 결과

본 장에서는 건설기술연구원에서 제작한 아스팔트 혼합물

시료 11개를 사용하였는데, 이들은 다짐 정도가 달라서 2.273-2.409g/cm³ 범위의 서로 다른 밀도를 가지고 있다. 각 시료는 300×300mm의 크기를 가지고 있다. 그림 2(a)는 spectrum analyzer의 tracking generator 기능을 이용하여 그림 1(b)의 설계한 안테나의 특성을 실험하는 장면으로, 송신 및 수신을 통하여 일정한 주파수 대역에서의 안테나 특성을 관찰한다. 그림 2(a)의 하단에 있는 검은 물체들이 실험용 아스팔트 혼합물 시료이다. 일반적으로 아스팔트 혼합물의 위치에 따른 부정확성을 완화하기 위하여, 본 실험에서는 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 안테나를 다섯 개의 위치(A-E)로 이동하며 측정을 하고 그 평균을 구했다.

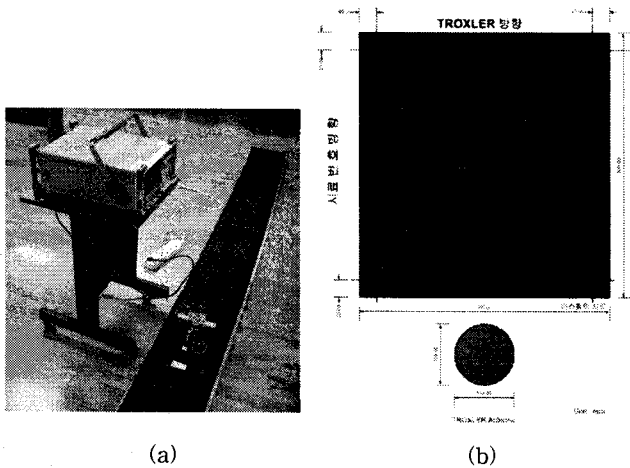


그림 2. 실험용 아스팔트 혼합물 시료와 유전율 측정. (a) 유전율 측정 실험 및 아스팔트 시료. (b) Troxler 사의 안테나 측정 실험 예(아래 작은 원은 실제 안테나의 크기).

그림 3에는 시료의 실제 밀도와 기존의 측정 장비(Troxler사와 PQI 사)를 사용한 밀도 추정 결과를 비교하여 도시하였다. 실제 값과는 어느 정도 오차가 존재하지만 시료의 밀도가 증가하면서 측정된 결과도 비슷한 추세로 증가함을 알 수 있다. 하지만 실제 밀도와는 어느 정도 오차가 존재하는 것을 발견할 수 있다. 특히 Troxler 사의 것은 일정한 크기의 바이어스가 있는데, 이러한 문제를 해결하기 위하여 계측장비의 주기적 오차 보정뿐만 아니라, 현장에서 시험하고자 하는 주어진 아스팔트 혼합물에 대한 보정도 실시하여 보다 정확한 밀도 추정을 가능하게 하는 연구가 필요하다.

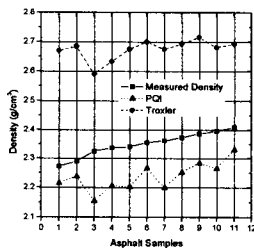


그림 3. 시료의 밀도와 기존의 밀도 측정 장비(Troxler와 PQI 사)의 비교 실험.

다음은 설계한 안테나의 특성을 각 아스팔트 혼합물 시료

에 대하여 고찰해 보았는데, Troxler 사의 안테나와 특성 비교 실험을 하였다. 그림 4(a)에 그 결과를 도시하였다. 여기서 RF 송신 신호의 출력은 9.8dBm이다. 전체적으로 아스팔트 혼합물 시료의 밀도가 증가함에 따라 증가한 결과가 나오지만 중간에 기복이 상당히 심함을 알 수 있다. 이는 아스팔트 혼합물을 구성하는 모래와 자갈이 균일하게 섞여 있는 정도나 자갈의 크기 등에 따라서 유전율을 측정하는 안테나의 위치나 측정하는 깊이의 차이 때문에 발생한다고 추정된다. 따라서 여러 형태의 안테나의 개발이 필요하며, 측정하는 방법도 그림 2(b) 보다 그 횟수를 훨씬 늘려서 효율적이면서 정확하게 측정하는 방법을 모색해야 할 것이다^[1]. 그림 4(b)는 RF 송수신부와 안테나를 결합해서 실험한 결과를 Troxler 사 제품과 비교해 보았다. 만일 정확하게 측정을 하고 있다면 식 (4)에서 보는 바와 같이 아스팔트 혼합물 시료의 밀도가 증가함에 따라 측정 전압이 1차 함수 형태로 증가 되어야 하지만 전체적인 추세만 증가하는 형태를 가지고 있으며 여전히 두 계측장비 모두 기복이 심함을 알 수 있다.

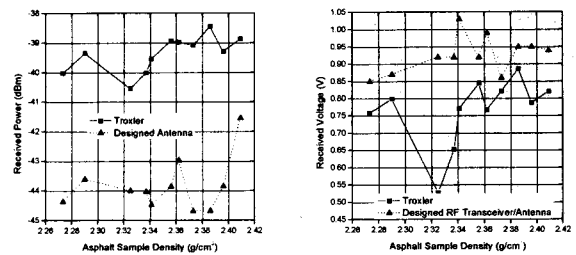


그림 4. 설계한 RF 송수신부와 안테나 실험. (a) Spectrum analyzer를 이용한 제작한 안테나의 실험. (b) 제작한 RF 송수신부와 안테나의 실험.

5. 결론

본 논문에서는 아스팔트 포장에 있어서 아스팔트 혼합물의 공극률 또는 밀도를 현장에서 측정하여 효율적으로 포장이 가능하게 하는 피파피 밀도 검사 장비에 대한 연구를 수행하였다. 싼 값으로 계측장비를 구현하기 위하여, 어떤 시료의 유전율을 측정하여 그 공극률 또는 밀도를 추정하는 방법에 대하여 실험을 해 보았는데, 기복이 심한 측정 결과에 많은 오차가 나온다는 사실을 알 수 있었다. 하지만 측정 방법과 안테나의 개발 등을 통하여 보다 정확한 밀도 추정이 가능할 것이며 이를 위한 지속적인 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] D. J. Geisel, "Material Segregation, density, and moisture analyzing apparatus and method," US Patent US 6,677,763 B2, Jan. 2004.
- [2] R. W. Gamache, R. Hosterman, and S. Pluta, "Material analysis including density and moisture content determinations," US Patent, US 7,219,024 B2, May 2007.
- [3] D. K. Cheng, Fundamentals of Engineering Electromagnetics. NY: Addison-Wesley, 1993.