

비파괴 실험을 위한 모르타르의 전자기적 특성 측정

Measurement of Electromagnetic Properties of Mortar for Nondestructive Testing

정 성 훈*

Jeong, Seong-Hoon

임 흥 철**

Rhim, Hong-Chul

Abstract

The velocity and amplitude of microwaves are affected by the electromagnetic properties of a material through which the wave propagates. And the electromagnetic properties of a dielectric material such as concrete is represented by its permittivity. For the development of an accurate and reliable nondestructive testing (NDT) technique for concrete structures using microwave, it is necessary to have knowledge about the permittivity of concrete. In this paper, mortar specimens are used to serve as a basis for further measurement of concrete. The effect of water on the permittivity was studied using specimens with different water content. To assure the reliability of the measurement results, a statistical method was introduced.

1. 서론

마이크로웨이브 (microwave)를 이용한 건축이나 토목 구조물의 비파괴 검사방법은 광범위한 부분을 빠르게 검사할 수 있을 뿐만 아니라 주파수를 조절함으로써 적절한 해상도와 투과깊이를 얻을 수 있으므로 다양한 용도로 사용될 수 있다 [1]. 이러한 장점때문에 비파괴 검사장비로서 레이다의 사용이 늘어나고 있다. 레이다를 이용한 구조물의 비파괴 검사는 마이크로웨이브가 구조물에 부딪혔을 때 발생하는 반사나 투과손실과 같은 여러 가지 현상을 분석함으로써 이루어지는데 이러한 현상은 마이크로웨이브가 통과하고 있는 매질의 전자기적 특성에 의해 직접적인 영향을 받는다 [2, 3]. 따라서 레이다를 이용한 콘크리트의 비파괴 검사과정에서 그 전자기적 성질을 규정하는 것은 검사의 정밀도와 신뢰도를 높이는 데 필수적이다. 이를 위한 기초단계로서 모르타르의 전자기적 특성을 측정하였다. 모르타르의 전자기적 특성에 대한 정보와 측정방법은 향후 콘크리트의 전자기적 특성을 측정하는데 중요한 기초자료가 된다. 이번 연구에서는 1~6 GHz의 주파수대역에 걸쳐서 모르타르의 전자기적 특성을 측정하였고 이 주파수대역은 지금까지 현장에서 사용되고 있는 많은 비파괴검사용 레이다의 주파수범위를 포함하는 것이다. 측정을 위해서 시편의 가공이 쉽고 시편의 상태조절이 용이한 개방동축선로측정기 (open-ended coaxial probe)와 회로망분석기(network analyzer)를 이용하였다. 모르타르와 콘크리트의 전자기적 특성은 수분함유량에 의해서 크게 영향을 받는다 [4, 5]. 따라서 현장에서 접할 수 다양한 상태의 콘크리트에 대한 정보를 얻기 위해서 수분함유량을 여러 가지로 바꾼 모르타르 시편에 대하여 전자기적 특성을 측정하였다.

* 연세대학교 대학원 건축공학과 석사과정

** 정희원, 연세대학교 건축공학과 조교수, 공학박사

2. 이론 및 측정원리

2.1. 유전체의 전자기적 특성

콘크리트나 모르타르와 같이 전기전도성이 없고 자성을 띄지 않는 물질을 유전체 (dielectric material)라고 한다 [2, 3, 6]. 유전체의 전자기적 특성은 복소유전율 (complex permittivity)로 규정된다. 복소유전율은 일반적으로 식 1과 같이 진공의 유전율 (permittivity)인 ϵ_0 (8.854 pF/m)로 나눈 값인 복소비유전율 (relative complex permittivity)로 나타내며 실수부를 유전상수 (dielectric constant) 허수부를 loss factor라고 한다.

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - j\frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \quad (\text{식 1})$$

여기서, ϵ_r^* 는 복소비유전율, ϵ_r' 는 유전상수, ϵ_r'' 는 loss factor, ϵ' 는 복소유전율의 실수부, ϵ'' 는 복소유전율의 허수부, ϵ_0 는 진공의 유전율, j 는 $\sqrt{-1}$ 을 나타낸다.

유전상수와 loss factor는 유전체를 통과하는 마이크로웨이브의 속도, 감쇠, 반사의 크기에 영향을 준다 [2, 3]. 따라서 정확하고 믿을 수 있는 마이크로웨이브를 이용한 비파괴 검사를 위해서는 콘크리트와 모르타르의 유전율에 대한 정보가 필수적이다.

2.2. 측정장치

개방동축선로측정기는 그림 1에서와 같이 측정대상물질의 한 쪽에 밀착시키기만 하면 측정이 가능하므로 시편의 모양이나 크기에 의한 제약이 거의 없어 다른 측정방법들에 비해서 측정을 위한 시편의 가공이 매우 용이하며 수분이나 온도 등 시편의 상태조절이 용이하다 [7]. 이후 이 논문에서는 개방동축선로측정기를 편의상 프로브 (probe)라고 지칭한다.

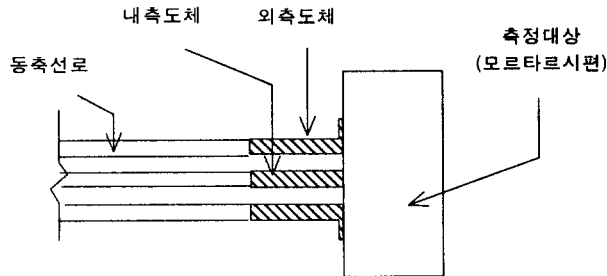


그림 1 개방동축선로측정기 (open-ended coaxial probe)

회로망분석기에 연결된 프로브를 모르타르시편에 밀착시키고 회로망분석기와 연결된 컴퓨터의 운용 프로그램을 통해서 측정을 실시한다. 프로브의 끝부분의 임피던스 (impedance)는 측정대상물질의 유전율에 의해 결정된다. 회로망분석기에서 발생하여 동축선로를 따라 프로브의 종단에 도달한 마이크로웨이브는 프로브의 종단부와 동축선로와의 임피던스의 차이에 의해 반사된다. 회로망분석기는 이 반사계수 (reflection coefficient)를 측정하고 그 값을 컴퓨터로 전달한다. 컴퓨터는 설치된 운용프로그램을 통해 회로망분석기로부터 전달받은 반사계수를 측정대상물질의 유전율로 전환한다. 즉, 회로망분석기에 의해 측정된 반사계수로부터 프로브 종단의 임피던스를 계산할 수 있고 임피던스로부터 측정대상물질의 유전율을 알아낼 수 있다.

3. 측정

3.1. 실험전 보정 (calibration)

실험전 보정은 측정장치내에 존재하는 측정오차요소들을 규정하고 이를 측정에 반영하기 위한 과정이다. 실험전 보정을 통하여 측정오차요소들이 제거된 정확한 측정값을 얻을 수 있다. 회로망분석기를 이용한 반사계수측정에서는 세 가지의 보정기준 (calibration standard)을 필요로 하는데 보정기준은 전체 측정주파수에 걸쳐서 정확한 반사계수가 알려진 소자 (device)이어야 한다 [8]. 개방동축선로측정기를 이용한 측정에서 액체를 보정기준으로 사용하면 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있다 [9]. 이 방법을 사용하기 위해 전자기적 특성이 가장 정확히 알려진 액체인 물 (증류수)과 메탄올을 공기와 함께 보정기준으로 선정하였다 [10, 11].

3.2. 측정횟수

모르타르의 비균질 물질이므로 프로브를 접촉시키는 위치에 따라 측정값이 불규칙적으로 변한다. 따라서 측정값은 여러 번 측정의 평균값으로 나타내게 되는데 한 시편에 대한 측정횟수가 많아질수록 그 평균값은 변동이 작아지고 그 시편의 특성을 보다 정확하게 나타낼 수 있음을 경험을 통해 알 수 있다. 한 시편의 측정면상의 모든 점을 빠짐없이 측정한 다음 그 값들의 평균을 구하면 그 시편의 특성을 가장 정확히 나타낸 이상적인 측정값이 얻어지지만 측정횟수를 무한정으로 늘어갈 수는 없으므로 현실적이고 적절한 측정횟수를 정해야 할 필요가 있다. 적절한 횟수의 측정을 통해서 이상적인 측정값을 예측하고자 하는 것은 통계적 방법에서 보면 조사대상 전체에 대한 조사 대신에 자료의 일부를 조사하여 전체를 추측하는 표본조사의 문제로 볼 수 있다. 따라서 한 시편에 대한 n 회의 측정값의 평균이 이상적인 측정값과 10 %이내의 차이를 보일 가능성을 측정의 신뢰도라고 정의하면 그 신뢰도는 식 2에 의해서 구할 수 있다.

$$P[0.9\bar{X} < M < 1.1\bar{X}] \quad (식 2)$$
$$= \int_{0.9\bar{X}}^{1.1\bar{X}} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma/\sqrt{n}}} e^{-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2/n}} \right) dx$$

여기서, M : 이상적인 측정값, \bar{X} : n 회 측정 평균값, σ : 표준편차, n : 측정횟수

식 2를 적용하기 위해서는 표본평균은 정규확률분포를 이루어야하므로 측정횟수는 통계학적 의미로 대표본의 크기에 해당하는 30회 이상이 되어야 한다 [12]. 모든 시편에 대해서 30회씩 측정하여 식 2에 의해 신뢰도를 구하고 식 3과 같이 측정값의 신뢰도가 0.9 이상이 되면 그 측정값을 채택하고 그렇지 않으면 식 3의 조건을 만족할 때까지 측정횟수를 늘린다.

$$P[0.9\bar{X} < M < 1.1\bar{X}] \geq 0.9 \quad (\text{단}, n \geq 30) \quad (식 3)$$

3.3. 시편

시편의 두께가 측정결과의 오차요인이 되지 않으려면 시편은 프로브로부터 나간 마이크로웨이브가 시편의 반대쪽 경계로 부터 반사되어 다시 프로브에 도달되지 않을 만큼 두꺼워야 한다. 5 mm 두께의 모르타르 시편의 뒷면에 마이크로웨이브를 전반사(total reflection)시키는 동판을 붙인 경우와 뒷면에 공기만이 존재하는 경우의 측정값을 비교한 실험에서 두 경우의 측정값의 차이는 없었다. 또 이와 같은 실험을 두께가 12 mm, 25 mm, 150 mm 인 시편에 대해서도 실시한 결과 시편의 뒷면에 동판이

있을 때와 없을 때의 측정값은 차이가 없었다. 즉 모르타르 시편의 경우에 두께가 5 mm 이상이면 측정값은 두께의 영향을 받지 않는다. 시편은 지름 100 mm의 원반형으로 두께 5 mm와 두께 12 mm의 두 가지 종류를 제작하였다. 제작된 모르타르 시편은 물 : 시멘트 : 모래의 중량 배합비가 1 : 2.22 : 5.61 이며 4 주 재령 압축강도는 308.1 kgf/cm²이다. 모르타르의 유전율을 측정함에 있어서 수분의 함량이 가장 큰 변수로 작용하는 것으로 알려져 있다 [4, 5]. 이를 조사하기 위해서 다양한 수분함량을 가진 시편에 대해 유전율을 측정하였다. 여러 가지 수분함량을 가진 시편의 종류와 수분함량이 표 1에 나타나 있다. 표 1에서 '표건내포'란 표면건조 내부포수상태를 말한다. 시편의 수분함량은 식 4와 같이 계산하였다.

$$\text{수분함량(\%)} = \frac{M - M_o}{M_o} \times 100 \quad (\text{식 4})$$

여기서, M은 측정시 시편의 무게이고 M_o는 절건상태에서 시편의 무게이다.

표 1 모르타르시편의 수분함유상태

시편상태	수분함량 (%)	수분조절방법
절건상태	0	24시간동안 105℃에서 노건조 시킨 상태
기건상태	2.62	대기중에서 건조 (상대습도 57%, 기온 22℃)
흡수상태	6.29	젖은 수건으로써서 24시간동안 보존한 상태
표건내포	7.71	습윤상태에서 표면의 물기만 제거한 상태
습윤상태	9.3	수조에서 24시간동안 담근 후 바로 꺼낸 상태

4. 측정결과

표 1의 5가지 수분함유상태에 대한 모르타르의 유전율을 측정한 결과가 그림 2와 그림 3에 나타나 있다.

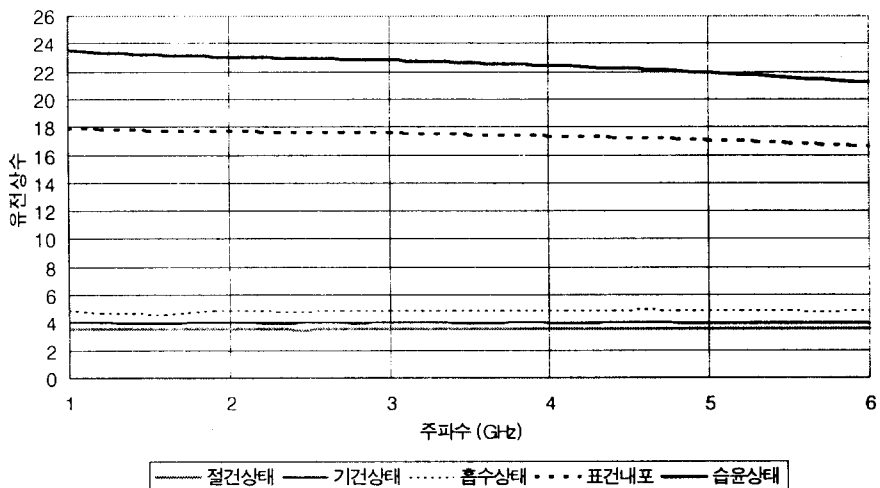


그림 2 모르타르시편의 유전상수

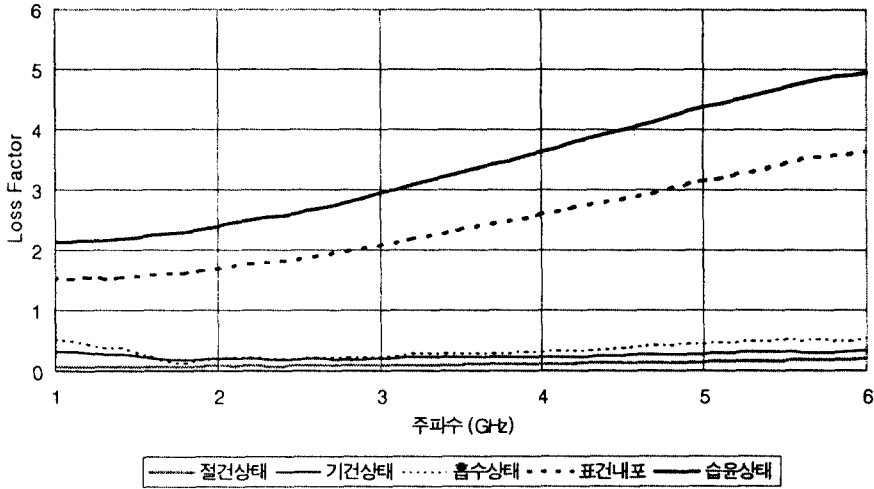


그림 3 모르타르시편의 loss factor

표 2 측정결과와 추세곡선식

시편상태	측정결과와 추세곡선	
	유전상수	loss factor
절건상태	$-0.003x^3 + 0.036x^2 - 0.117x + 3.615$	$0.001x^4 - 0.002x^2 - 0.003x + 0.07$
기건상태	$-0.013x^3 + 0.136x^2 - 0.439x + 4.394$	$0.001x^4 - 0.0234x^3 + 0.165x^2 - 0.462x + 0.63$
흡수상태	$-0.022x^3 + 0.223x^2 - 0.627x + 5.342$	$0.005x^4 - 0.091x^3 + 0.571x^2 - 1.447x + 1.461$
표건내포	$-0.026x^3 + 0.243x^2 - 0.872x + 18.65$	$0.015x^4 - 0.221x^3 + 1.199x^2 - 2.254x + 2.853$
습윤상태	$-0.042x^3 + 0.398x^2 - 1.489x + 24.74$	$0.017x^4 - 0.265x^3 + 1.456x^2 - 2.705x + 3.705$

* 여기서, x는 주파수(GHz)를 나타낸다.

식 2에 의하여 측정의 신뢰도를 구해본 결과 5가지 경우 모두 유전상수의 경우는 0.98 이상이며, loss factor의 경우는 0.91 이상으로서 높은 신뢰도를 보였다.

5. 결론

측정결과로부터 모르타르 시편의 수분변화는 유전율에 매우 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 수분함량이 증가할수록 유전율의 실수부와 허수부의 값이 커지는데 특히 수분함량이 6.3%에서 7.7% 사이에서 유전상수와 loss factor가 급격히 증가하여 물의 유전율과 비슷한 양상을 보이려 한다.

개방동축선로 측정기를 이용한 모르타르시편의 측정은 시편의 가공이나 상태조절이 용이하지만 모르타르의 불균질성이 측정결과와 불확실성을 야기시키므로 하나의 시편에 대해 30회 이상 측정값의 평균을 측정값으로 채택하였다. 이렇게 하면 확률이론을 도입하여 측정결과와 신뢰도를 구할 수 있으며 원하는 오차한계와 신뢰도를 얻기위해 필요한 측정횟수를 구할 수도 있다. 모르타르시편의 경우 최소측정횟수인 30회 측정값의 평균을 측정결과로 채택하여도 10% 이내의 오차한계에서 매우 높은 신뢰도를 가진 측정값을 얻을 수 있었다.

이번 실험에서 얻은 결과는 레이더를 이용하여 콘크리트 구조물을 비파괴 검사할 때 이용된다. 즉, 콘크리트 내 수분함량의 변화와 레이더의 중심주파수 변화에 따라 각기 다른 해상도와 투과깊이를 가질 수 있다는 상관관계를 찾아내는데 필요한 자료로 사용될 수 있다.

본 연구는 한국과학재단 (KOSEF)에서 설립한 서울대학교 지진공학연구센터 (KEERC)로부터 연구비를 지원받았고 교육부의 1996년도 이공계대학연구소 기자재 첨단화 지원사업에 따라 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소 비파괴구조실험실이 보유하고 있는 첨단기자재를 사용하였다.

참고문헌

- [1] Al-Qadi, I.L., Mostafa, W.S., and Riad, "Measuring Dielectric Properties of Portland Cement Concrete: New Methods," Structural Materials Technology, An NDT Conference, February 20-23, 1996, pp. 16-27
- [2] Cheng, D.K., Field and Wave Electromagnetics 2nd edition, Addison Wesley, 1989
- [3] McMaster, R.C., McIntire, P., and Mester, M.L., Nondestructive Testing Handbook 2nd edition, vol. 4, Electromagnetic Testing, American Society for Nondestructive Testing, 1986
- [4] Rhim, H.C., "Nondestructive Evaluation of Concrete Using Wideband Microwave Techniques," PhD thesis, Department of Civil Engineering, MIT, Cambridge, 1995
- [5] Halabe, U.B., and Kausel, E., "On the Electromagnetic Properties of Concrete," Paper presented at the NSF Workshop "Geographical Techniques for Site and Material Characterization", June 11-12, 1993 in Atlanta, Georgia
- [6] Hippel, Von, *Dielectric Materials and Applications*, John Wiley & Sons, 1954
- [7] Stuchly, M.A., and Stuchly, S.S., "Coaxial Line Reflection Methods for Measuring Dielectric Properties of Biological Substances at Radio and Microwave Frequencies - a Review," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-29, No. 3, September 1980, pp. 176-183
- [8] Hewlett Packard, Network Analyzer User's Manual, 1995
- [9] Kraszewski, A., Stuchly, M.A., and Stuchly, S.S., "ANA Calibration Method for Measurements of Dielectric Properties," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-32, No. 2, June 1983, pp. 385-387
- [10] Langhe, P.D., Blomme, K., Martens, L., and Zutter, D.D., "Measurement of Low-Permittivity Materials Based on a Spectral-Domain Analysis for the Open-ended Coaxial Probe," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. IM-42, No. 5, October 1993, pp. 879-886
- [11] Nyshadham, A., Sibbald, C.L., and Stuchly, S.S., "Permittivity Measurement Using Open-Ended Sensor and Reference Liquid Calibration - An Uncertainty Analysis," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-40, No. 2, February 1992, pp. 305-313
- [12] 김제영, 배현웅, 유진철, 확률 및 통계, 청문각, 1995