

# 비파괴 시험을 위한 콘크리트의 전자기적 특성의 측정

## Measurement of Electromagnetic Properties of Concrete for Nondestructive Testing



임홍철\*

Rhim, Hong-Chul



정성훈\*\*

Jeong, Seong-Hoon

### ABSTRACT

Characterizing the electromagnetic properties of concrete is essential to the enhancement of accuracy and reliability in nondestructive testing of concrete structures using electromagnetic techniques. To establish a data base for the properties of concrete, a measurement technique has been developed and a set of data has been obtained for the frequency range of 1~6 GHz. As moisture content is one of major contributing factors to determine permittivity of dielectric material, moisture content is varied during the measurement.

An application of a measurement system which consists of open-ended coaxial probe and automatic network analyzer to concrete and mortar specimens is studied. For this, calibration techniques, size of specimens, and number of measurements necessary to obtain reliable data are investigated.

From the measured data, it is shown that moisture content plays an important role to determine the permittivity of specimens. As the moisture content increases, the permittivity of specimens show tendency to approach the permittivity of water.

Keywords : radar, microwave, electromagnetic properties, permittivity, calibration, open-ended coaxial probe, nondestructive testing(NDT)

\* 정희원, 연세대학교 건축공학과 조교수

\*\* 미국 University of Illinois at Urbana-Champaign  
토목공학과 박사과정

· 본 논문에 대한 토의를 2000년 10월 31일까지 학회로 보  
내주시면 2000년 12월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

마이크로웨이브(microwave)를 이용한 건축이나 토목 구조물의 비파괴검사 방법은 광범위한 부분을 빠르게 검사할 수 있을 뿐만 아니라 주파수를 조절함으로써 적절한 해상도와 투과깊이를 얻을 수 있으므로 다양한 용도로 사용될 수 있다<sup>(1)</sup>. 이러한 장점 때문에 비파괴검사 장비로서 레이더의 사용이 늘어나고 있는 추세이다.

레이더를 이용한 구조물의 비파괴 검사는 마이크로웨이브가 구조물에 부딪혔을 때 발생하는 반사와 투과손실 등의 현상을 분석함으로써 이루어지는데, 이러한 현상은 마이크로웨이브가 통과하고 있는 매질의 전자기적 특성에 의해 직접적인 영향을 받는다<sup>(2,3)</sup>. 따라서 레이더를 이용한 콘크리트의 비파괴검사 과정에서 그 전자기적 성질을 규정하는 것은 검사의 정밀도와 신뢰도를 높이는 데 필수적이다.

이를 위한 기초단계로서 콘크리트와 모르타르의 전자기적 특성을 측정하였다. 물질의 대표적인 전자기적 재료 성질로는 유전율과 손실계수가 있으며, 각각 어떠한 매질 내에서 전자기파가 진행할 때 속도와 파의 전력 손실에 큰 영향을 준다. 이 연구에서는 1~6 GHz의 주파수대역에 걸쳐서 콘크리트와 모르타르의 전자기적 특성을 측정하였고, 이 주파수대역은 지금까지 현장에서 사용되고 있는 많은 비파괴검사용 레이더의 주파수범위를 포함한다. 또한, 콘크리트와 모르타르의 전자기적 특성은 수분함유량에 의해서 크게 영향을 받으므로<sup>(4)</sup>, 현장에서 접할 수 있는 다양한 상태의 콘크리트에 대한 정보를 얻기 위해서 수분함유량을 다르게 한 시편에 대하여 개방 동축 선로 측정기(open-ended coaxial probe)와 회로망 분석기(network analyzer)를 이용하여 전자기적 특성을 측정하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험장치

개방 동축 선로 측정기는 Fig.1에서와 같이 측

정 대상 물질의 한 쪽에 밀착시키기만 하면 측정이 가능하므로 시편의 모양이나 크기에 의한 제약이 거의 없어, 다른 측정방법들에 비해서 측정을 위한 시편의 가공과, 수분이나 온도 등 시편의 상태 조절이 용이하다<sup>(5)</sup>.

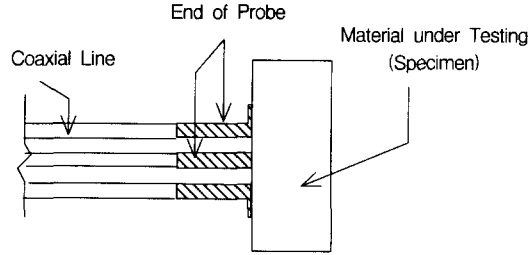


Fig. 1 Open-ended coaxial probe

회로망 분석기에 연결된 개방 동축 선로 측정기(프로브)를 시편에 밀착시키고 회로망분석기와 연결된 컴퓨터의 운용 프로그램을 통해서 측정을 실시한다. 프로브 끝부분의 임피던스(impedance)는 측정 대상 물질의 유전율에 의해 결정된다.

회로망 분석기에서 발생하여 동축 선로를 따라 프로브의 종단에 도달한 마이크로웨이브는 프로브의 종단부와 동축 선로와의 임피던스의 차이에 의해 반사된다. 회로망분석기는 이 반사계수(reflection coefficient)를 측정하고 그 값을 컴퓨터로 전달한다. 컴퓨터는 설치된 운용 프로그램을 통해 회로망 분석기로부터 전달받은 반사계수를 측정 대상 물질의 유전율로 전환한다. 즉, 회로망 분석기에 의해 측정된 반사계수로부터 프로브 종단의 임피던스를 계산할 수 있고 임피던스로부터 측정 대상 물질의 유전율을 알아낼 수 있다.

### 2.2 실험전 보정

실험전 보정은 측정 장치내에 존재하는 측정 오차 요소들을 규정하고 이를 측정에 반영하기 위한 과정이다. 실험전 보정을 통하여 측정 오차 요소들이 제거된 정확한 측정값을 얻을 수 있다.

회로망 분석기를 이용한 반사 계수 측정에서는 세 가지의 보정 기준(calibration standard)을 필요로 하는데 보정 기준은 전체 측정주파수에 걸쳐서 정확한 반사계수가 알려진 소자(device)

이어야 한다<sup>(6)</sup>. 개방 동축 선로 측정기를 이용한 측정에서 액체를 보정 기준으로 사용하면 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있다<sup>(7)</sup>. 이 방법을 사용하기 위해 전자적 특성이 가장 정확히 알려진 액체인 물 (증류수)과 메탄올을 공기와 함께 보정 기준으로 선정하였다<sup>(8, 9)</sup>.

### 2.3 실험횟수

콘크리트와 모르타르는 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 측정 횟수를 무한정으로 늘여갈 수는 없으므로 현실적이고 적절한 측정 횟수를 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 문제라 볼 수 있다. 따라서 한 시편에 대한 n회의 측정값의 평균이 이상적인 측정값과 10 %이내의 차이를 보일 가능성을 측정의 신뢰도라고 정의하면 그 신뢰도는 다음 식에 의해서 구할 수 있다.

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

여기서, M: 이상적인 측정값,  $\bar{X}$ : n회 측정 평균값,  $\sigma$ : 표준편차, n: 측정횟수이다.

식 (1)을 적용하기 위해서는 표본평균은 정규 확률 분포를 이루어야하므로 측정 횟수는 통계학

적 의미로 대표본의 크기에 해당하는 30회 이상이 되어야 한다<sup>(10)</sup>. 모든 시편에 대해서 30회씩 측정하여 식 (1)에 의해 신뢰도를 구하고 식(2)와 같이 측정값의 신뢰도가 0.9 이상이 되면 그 측정값을 채택하고 그렇지 않으면 다음 식의 조건을 만족할 때까지 측정 횟수를 늘인다.

$$P[0.9\bar{X} < M < 1.1\bar{X}] \geq 0.9 \quad (\text{단, } n \geq 30) \quad (2)$$

### 2.4 시편

시편의 두께가 측정결과의 오차 요인이 되지 않으려면 시편은 프로브로부터 나간 마이크로웨이브가 시편의 반대쪽 경계로부터 반사되어 다시 프로브에 도달되지 않을 만큼 두꺼워야 한다.

5 mm 두께의 콘크리트 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 mm인 시편에 대해서도 실시한 결과 시편의 뒷면에 동판이 있을 때와 없을 때의 측정값은 차이가 없었다. 즉 콘크리트 시편의 경우에 두께가 5 mm 이상이면 측정값은 두께의 영향을 받지 않았다.

이번 실험에서 콘크리트 시편은 지름 100 mm의 원반형으로 두께 10 mm로 제작하였으며, 물-시멘트비는 60%이고 시멘트 : 모래 : 자갈의 중량배합비는 1 : 2.69 : 3.71이며 4주 재령 압축강도는 154.8kgf/cm<sup>2</sup>이다. 모르타르시편은 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 : 5.61이며 4 주 재령 압축강도는 308.1kgf/cm<sup>2</sup>이다.

콘크리트와 모르타르의 유전율을 측정함에 있어서 수분의 함량이 가장 큰 변수로 작용하는 것으로 알려져 있다<sup>(4)</sup>. 이를 조사하기 위해서 다양한 수분함량을 가진 시편에 대해 유전율을 측정하였다. 여러 가지 수분함량을 가진 시편의 종류와 수분함량이 Table 1과 Table 2에 나타나 있

다. 시편의 수분함량은 식 (3)과 같이 계산하였다.

$$\text{수분함량(\%)} = \frac{M - M_0}{M_0} \times 100 \quad (3)$$

여기서, M은 측정시 시편의 무게이고 M<sub>0</sub>는 절건 상태에서 시편의 무게이다.

## 2.5 측정결과

Table 1과 Table 2의 수분함유상태에 대한 콘크리트와 모르타르의 유전율을 측정된 결과가 Fig. 2, Fig. 3, Fig. 6, Fig. 7에 나타나 있다.

### 2.5.1 콘크리트 시편의 유전율 측정결과

Table 1의 6가지 수분함유상태에 대한 콘크리트의 유전율을 측정된 결과가 Fig. 2와 Fig. 3에 나타나 있다. 측정결과로부터 콘크리트 시편수분변화는 유전율에 매우 큰 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 수분함량이 증가할수록 유전율의 실수부와 허수부의 값이 커지는데 특히 수분함량이 6.14%에서 7.44%사이에서 유전율(dielectric constant)과 손실계수(loss factor)가 급격히 증가하여 물의 유전율과 비슷한 양상을 보이고 있다.

Fig. 4와 Fig. 5는 측정의 신뢰도를 구한 것이다. 6가지의 모든 수분함유상태에서 유전율(dielectric constant)은 모든 경우에서 전체 주파수대역에서의 평균 신뢰도가 0.9 이상으로 높

Table 1 Moisture content of concrete specimen

Specimen condition	Moisture content (%)	Moisture control
Dry 1	0	24시간동안 105℃에서 건조 시킨 상태
Dry 2	2.64	대기중에서 건조 (상대습도 57%, 기온 22℃)
Wet 1	4.73	약간 젖은 수건으로써 24시간동안 보존한 상태
Wet 2	6.14	흠뻑 젖은 수건으로써 24시간동안 보존한 상태
Wet 3	7.44	습윤상태에서 표면의 물기만 제거한 상태
Wet 4	8.56	수조에서 24시간동안 담근 후 바로 꺼낸 상태

Table 2 Moisture content of mortar specimen

Specimen condition	Moisture content (%)	Moisture control
Dry 1	0	24시간동안 105℃에서 건조 시킨 상태
Dry 2	2.62	대기중에서 건조 (상대습도 57%, 기온 22℃)
Wet i	6.29	젖은 수건으로써 24시간동안 보존한 상태
Wet ii	7.71	습윤상태에서 표면의 물기만 제거한 상태
Wet iii	9.3	수조에서 24시간동안 담근 후 바로 꺼낸 상태

았으나 손실계수(loss factor)는 10%의 오차한계를 벗어나는 것을 볼 수 있다. 이는 40회 측정의 평균값이 유전율(dielectric constant)의 경우 수많은 측정으로부터 얻은 이상적 측정값과 10%의 오차범위 내에 있을 확률이 0.9 이상이지만, 손실계수(loss factor)의 경우에는 이 범위를 벗어나는 것을 의미한다.

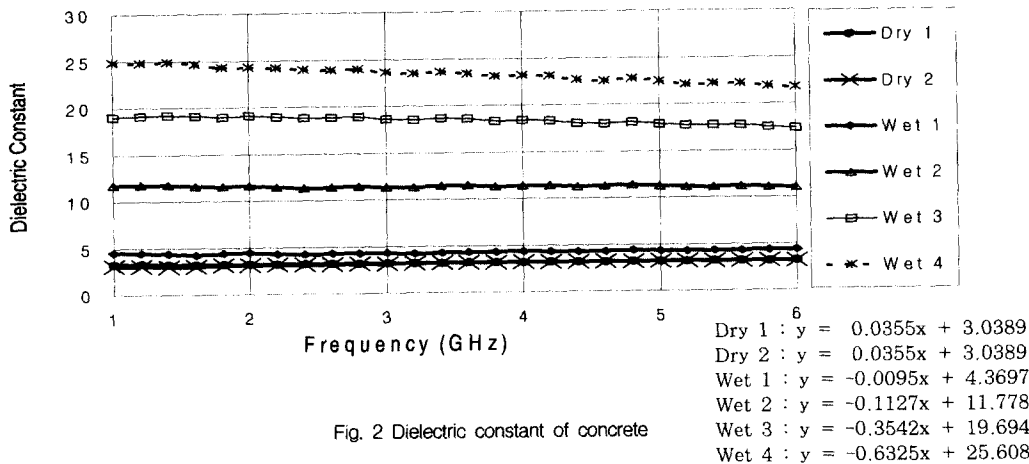
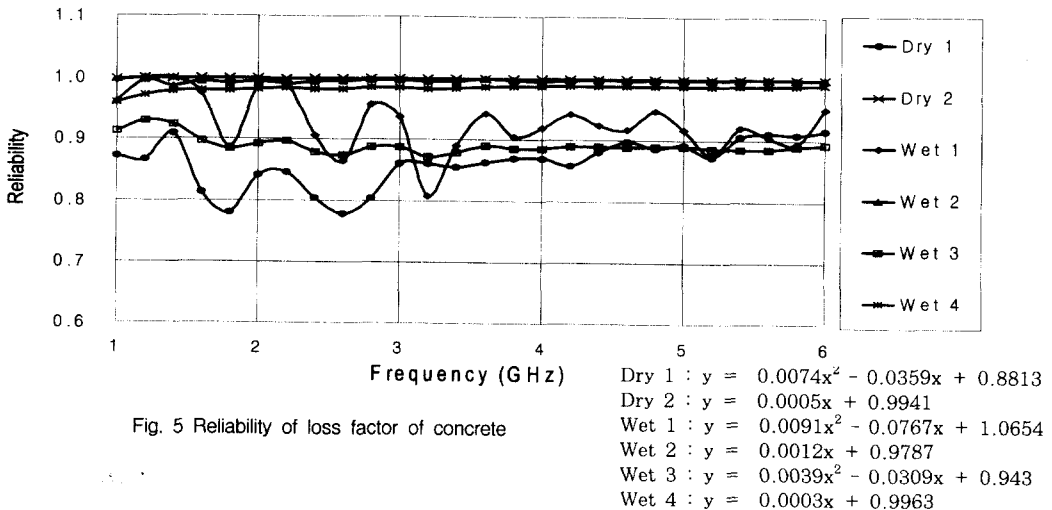
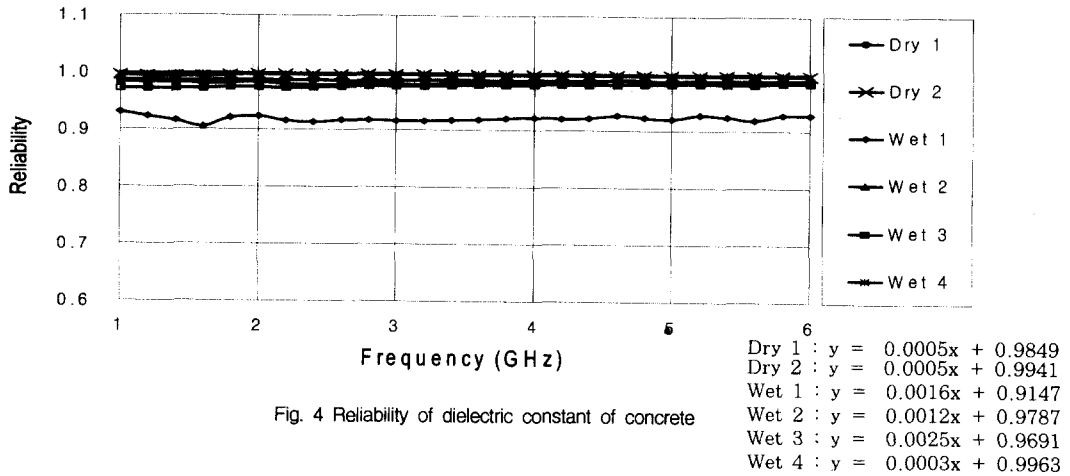
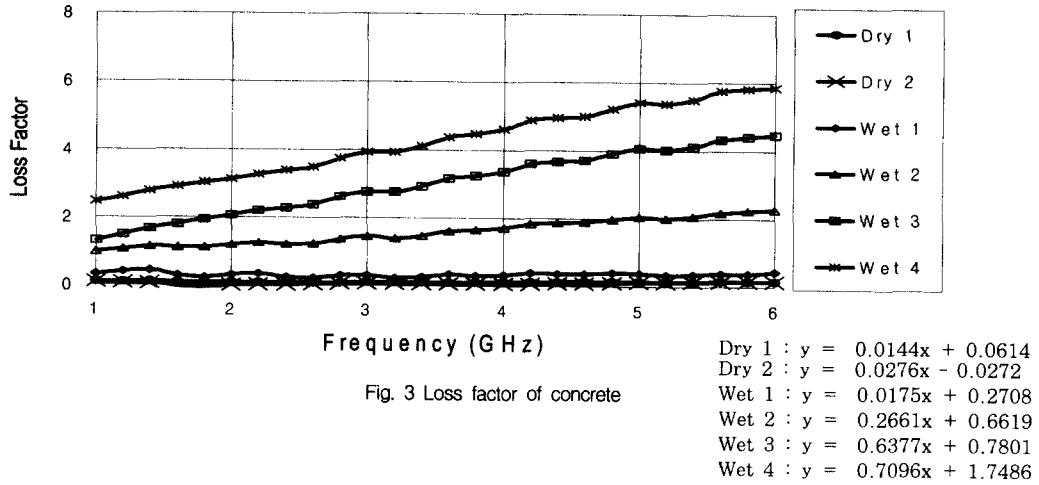


Fig. 2 Dielectric constant of concrete



### 2.5.2 모르타르시편의 유전율 측정결과

Table 2의 5가지 수분함유상태에 대한 모르타르의 유전율을 측정된 결과가 Fig. 6과 Fig. 7에 나타나 있다. 측정결과로부터 모르타르 시편 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 유전율(dielectric constant)과 손실계수(loss factor)가 급격히 증가하여 물의 유전율과 비슷한 양상을 보이고 있다.

Fig. 8과 Fig. 9는 측정의 신뢰도를 구한 것이다. 5가지의 모든 수분함유상태에서 유전율(dielectric constant)은 거의 1에 가까운 매우 높은 신뢰도를 보였다. 손실계수(loss factor)는 유전율(dielectric constant)보다 신뢰도가 떨어지기는 하지만 모든 경우에서 전체 주파수의 평균 신뢰도가 0.9이상으로 높았다. 이것은 30회 측정의 평균값이 수많은 측정의 평균값인 이상적인 측정값과 10%의 오차범위 내에 있을 확률이 유전율(dielectric constant)의 경우에는 거의 1이며 손실계수(loss factor)의 경우에는 0.9 이상이라는 것을 의미한다.

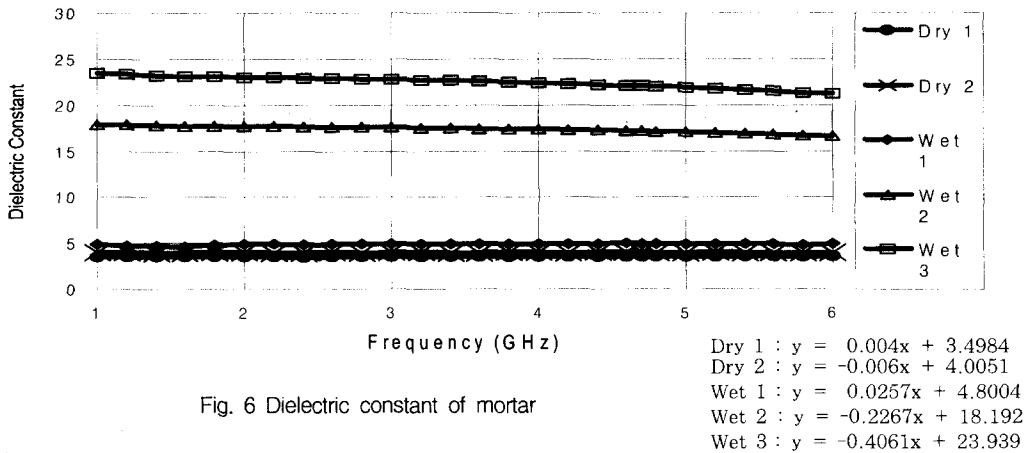


Fig. 6 Dielectric constant of mortar

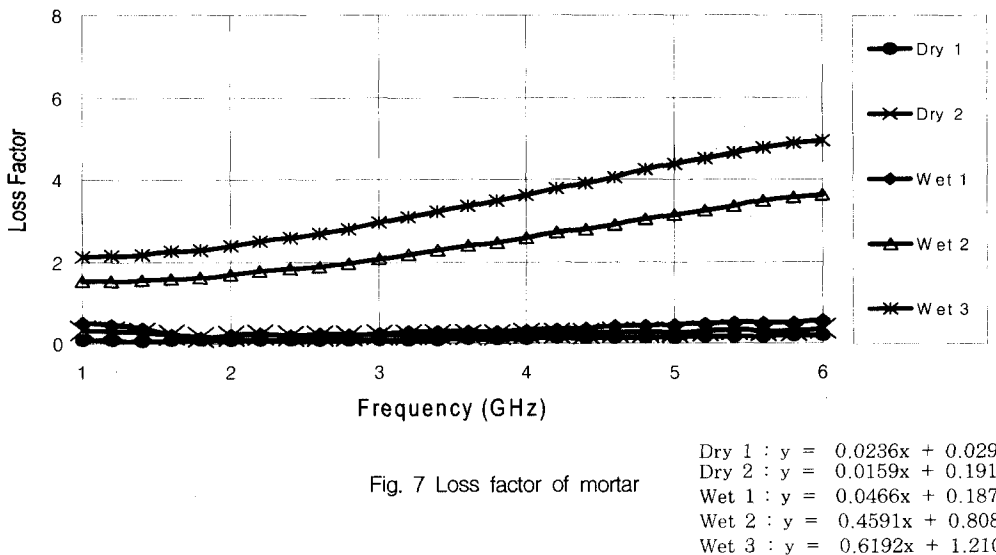


Fig. 7 Loss factor of mortar

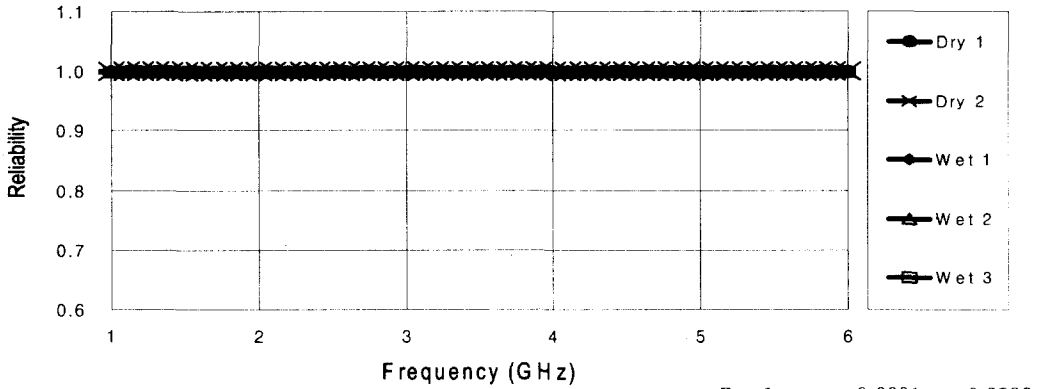


Fig. 8 Reliability of dielectric constant of mortar

$$\begin{aligned} \text{Dry 1 : } y &= 0.0001x + 0.9986 \\ \text{Dry 2 : } y &= 0.0001x + 0.9986 \\ \text{Wet 1 : } y &= 0.0001x + 0.9986 \\ \text{Wet 2 : } y &= 0.0001x + 0.9986 \\ \text{Wet 3 : } y &= 0.0001x + 0.9986 \end{aligned}$$

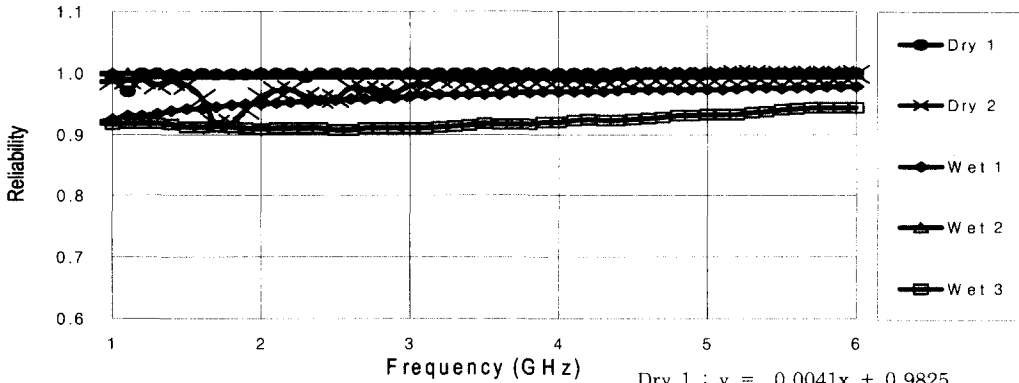


Fig. 9 Reliability of loss factor of mortar

$$\begin{aligned} \text{Dry 1 : } y &= 0.0041x + 0.9825 \\ \text{Dry 2 : } y &= 0.0051x + 0.9667 \\ \text{Wet 1 : } y &= 0.0286\text{Ln}(x) + 0.9287 \\ \text{Wet 2 : } y &= 0.0041x + 0.9825 \\ \text{Wet 3 : } y &= 0.0016x^2 - 0.0044x + 0.9128 \end{aligned}$$

### 2.5.3 콘크리트와 모르타르 비교

식 1에 의하여 측정의 신뢰도를 구해본 결과 모르타르 시편의 경우(30회 측정) 모두 유전상수의 신뢰도는 0.98 이상이며, 손실계수(loss factor)의 신뢰도는 0.91 이상으로서 높은 신뢰도를 보였다. 그러나 콘크리트 시편의 경우(40회 측정) 유전상수의 신뢰도는 매우 높은 반면, 손실계수(loss factor)의 신뢰도는 상대적으로 낮은 것을 볼 수 있었다.

측정 결과로부터 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 손실계수(loss factor)가 급격히 증가하여 물의 유전율과 비슷한 양상을 보이려 한다.

## 3. 결론

개방 동축 선로 측정기를 이용한 콘크리트와 모르타르 시편의 측정은 시편의 가공이나 상태조절이 용이하지만 콘크리트와 모르타르의 불균질성이 측정결과와 불확실성을 야기하므로 하나의 시편에 대해 30회 이상 측정된 값의 평균을 측정

값으로 채택하였다. 이렇게 하면 확률이론을 도입하여 측정결과의 신뢰도를 구할 수 있으며 원하는 오차한계와 신뢰도를 얻기 위해 필요한 측정 횟수를 구할 수도 있다.

이 실험에서 모르타르 시편의 경우 최소 측정 횟수인 30회 측정값의 평균을 측정 결과로 채택하여도 10% 이내의 오차한계에서 매우 높은 신뢰도를 가진 측정값을 얻을 수 있었다. 그러나, 콘크리트 시편의 경우에는 콘크리트의 불균질성이 모르타르의 불균질성보다 정도가 심하여 40회 측정값의 평균을 채택하였다. 이 경우 유전상수는 10% 이내의 오차한계에서 매우 높은 신뢰도를 가졌지만, 손실계수(loss factor)는 10% 오차한계를 벗어나는 것을 볼 수 있었다. 손실계수(loss factor)에서 더 높은 신뢰도를 갖기 위해서는 측정 횟수를 늘이면 된다. 하지만 현실적으로 측정 횟수를 너무 많이 늘리수 없으므로 이와 병행하여 다른 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 필요가 있다.

이번 실험에서 얻은 결과는 레이더를 이용하여 콘크리트 구조물을 비파괴 검사할 때 이용된다. 즉, 콘크리트 내 수분함량의 변화와 레이더의 중심주파수 변화에 따라 각기 다른 해상도와 투과 깊이를 가질 수 있다는 상관 관계를 찾아내는데 필요한 자료로 사용될 수 있다. 추후, 실제 현장에서 사용되는 다양한 물·시멘트비 값의 콘크리트 시편을 측정하여 데이터 베이스화 한다면, 레이더를 이용한 비파괴 검사 방법의 정확성과 신뢰도의 향상에 적용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 (KOSEF)에서 설립한 서울대학교 지진공학 연구센터 (KEERC)로부터 연구비를 지원 받았고, 교육부의 1996년도 이공계 대학 연구소 기자재 첨단화 지원사업에 따라 연세대학교 공과대학 건축과학기술연구소 비파괴 구조 연구실이 보유하고 있는 첨단기자재를 사용하였다. 실험 자료 정리에 도움을 준 연세대학교 건축공학과 대학원 석사과정 이경근 연구원에게 감사의 뜻을 전합니다.

### 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. Halabe, U.B., and Kausel, E., "On the Electromagnetic Properties of Concrete," NSF Workshop "Geographical Techniques for Site and Material Characterization," Atlanta, Georgia, June 11-12, 1993.
5. 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.
6. Hewlett Packard, Network Analyzer User's Manual, 1995.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 김제영, 배현웅, 유진철, 확률 및 통계, 청문각, 1995.



## 요 약

레이더를 이용한 콘크리트의 비파괴 검사과정에서 그 전자기적 성질을 규정하는 것은 검사의 정밀도와 신뢰도를 높이는 데 필수적이다. 이를 위한 기초단계로서 모르타르와 콘크리트의 전자기적 특성을 Database化 하기 위해서, 1~6 GHz의 주파수대역에 걸쳐서 모르타르와 콘크리트의 전자기적 특성을 측정하였다. 이 주파수 대역은 지금까지 현장에서 사용되고 있는 많은 비파괴검사용 레이더의 주파수범위를 포함하는 것이다.

모르타르와 콘크리트의 전자기적 특성은 수분함유량에 의해서 크게 영향을 받는다. 따라서 현장에서 접할 수 다양한 상태의 콘크리트에 대한 정보를 얻기 위해서 수분함유량을 여러 가지로 바꾼 모르타르와 콘크리트시편에 대하여 전자기적 특성을 측정하였다.

실험에 사용된 시스템은 시편의 가공이 쉽고 시편의 상태조절이 용이한 개방 동축 선로 측정기(open-ended coaxial probe)와 회로망 분석기(network analyzer)로 구성되어 있으며, 측정을 위해서 보정방법과 시편의 크기, 적합한 신뢰도를 얻기 위한 실험 회수를 산정하였다.

측정 결과, 수분의 함유량이 시편의 유전율에 중요한 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 수분함유량이 증가하면, 시편의 유전율은 물의 유전율 변화경향과 유사한 결과를 나타내었다.

(접수일자 : 2000. 3. 15)