

마이크로波를 이용한 非磁性 物質의 誘電常數 測定 (Method for Dielectric Constant Measurement of Nonmagnetic Materials at M/W Frequency.)

姜 亨 穆* · 朴 漢 奎**

(Kang, Hyung Mok) (Park, Han Kyu)

要 約

마이크로波周波數 帶域에서 非磁性體의 精密한 誘電常數를 求하는 方法을 叙述하였다. 在來式 方法인 空胴共振法이나 임피던스 測定에 의한 方法보다 精密한 結果를 얻을 수 있었고 간단한 計算式에 代入하여 比較的 적은 誤差範圍에서 쉽게 結果를 얻을 수 있음을 證明하였다.

Abstract

The precise measurement technique for dielectric constant of high-loss nonmagnetic materials is described. This technique used is based upon cavity resonance method and impedance method. Dielectric constant can be calculated from simple formulas without using transcendental equations.

The error contained in x-band yields loss tangent, 3%, and dielectric constant, 1%, for materials filled in cross section of waveguide.

I. 序 論

물질의 성질은 두개의 복소상수인 복소유전상수와 복소 도자율 μ 로 정해진다. 이 상수의 실수부와 허수부는 각각 다음식으로 표시된다.

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

$$\mu = \mu' - j\mu'' = \mu_0$$

여기서 ϵ 는 유전상수, ϵ'' 는 손실계수를 나타낸다. 물질이 비급속인 경우에 $\mu = \mu_0$ 로 된다. 물질의 유전성은 물질에 전자파를 투과시킬 때 傳播特性을 고찰하므로 마이크로파에서 측정할 수 있다. 이러한 원리에 의한 측정기술이 여러 가지로 이루어질 수 있는데 이는 주파수 범위에

따라 다르고 물질의 성질, 물질의 크기 및 양에 따라 다르다. 이 논문에서 서술된 것은 마이크로파 주파수대에서 비자성 물질로서 손실이 큰 유전상수를 결정하는데 거의 완전한 방법을 사용하였다.

이러한 물질의 비유전상수와 損失正接은 흔히 사용하는 일반적인 방법으로는 쉽게 구할 수 없다.

이러한 물질은 도파관내에서 감쇄시키는데 이용된다. 이들은 일반적으로 낮은 유전상수를 가지며 또한 손실이 큰 물질들이므로 적은 양으로 측정할 수 있는 空胴내 攝動에 의한 測定에 사용할 수 있도록 원통형으로 만들면은 정확한 결과를 얻을 수 없다. 여기에 서술되는 방법은 비교적 정밀하고 정확하며 고손실 비자성체 물질인 고체나 액체상 물질의 유전상수 측정에 널리 이용될 수 있다. 도파관을 이용한 干流計 또는

* 경희대학교 전자공학과

Dept. of Electronics, Kyung Hee Univ.

** 대전대학 전자공학과

Dept. of Electronics, Taejon College

接受: 1970. 7. 21

브릿지에 의한 정밀한 방법은 흔히 사용되고 있지 않다. 측정 결과 및 과정으로 보면 이 측정 방법은 광범위하게 측정 취급될 수 있음을 알 수 있다. 위의 방법 이외에 가장 많이 사용되는 방법은 傳送線路 내에 재료를 넣고 한쪽 끝을 중단시킨 후 정재파측정 장치를 사용하여 임피던스를 구함으로 상수를 결정하는 방법이다. 이러한 방법이 표준화되고 나서 이 측정과정 및 기술을 마이크로파 회로망으로 변환하여 시료의 길이나 위치에 무관하게 시료의 유전상수를 구할 수 있도록 까지 발전되고 있다. 그러나 이러한 방법은 넓은 계산범위와 무한급수형식의 값을 포함하고 대체적인 실험치로서 유전상수를 구하는 것으로 비교적 오차가 큰 방법이다.

또 共振空胴을 이용한 방법 역시 많이 취급되고 있다. 즉 유전상수를 포함하는 모든 계수는 시료가 장치된 공동에서 공진주파수와 空胴의 Q의 변화로서 측정하는 방법으로 이것은 공동 섭동론에 의한 방법으로 시료가 공동보다 적은 경우에만 사용이 가능하다. 두가지 방법 즉 임피던스 측정에 의한 측정방법과 공동에 의한 측정방법은 현재 많이 사용되고 있다. 그외의 방법이 여기서 서술하는 干流計에 의한 방법으로 비교적 많이 알려지지 않은 것이다.

이것은 두개의 방향성 마이크로파안테나 사이에 시료를 삽입하고 시료가 없을때와 비교하여 투과계수, 진폭, 위상을 측정하여 고손실의 유전상수를 구하는 방법이다. 물론 여기서도 시료 양단에서의 굴절, 제한된 공간내에서 평면파의 傳播 원치 않는 반사파와의 상호관계등 여러가지 문제가 포함된다.

이 干流計方法에 대하여 물질의 시료, 계산방법, 재래식방법과의 비교등으로 간단한 계산과 정확한 유전계수의 산출을 비교하기로 한다.

II. 干流計에 의한 誘電常數의 測定方法 및 과정

干流計에 의한 유전상수. 측정방법은 대체로 정확하고 정밀하다.

이 방법은 시료의 길이가 변할때 시료를 통과

하는 마이크로파 신호의 一方路線에서 일어나는 진폭과 위상차를 측정하므로 상수를 구한다.

단면이 도파관인 경우 측정과정은 다음과 같이 설명할 수 있다. 이 방법은 일반적인 것으로 傳送線路에 시료의 상태가 액체 또는 그 이외의 상태에서도 적합한 방법이다.

- 1) 비자성 고손실 물질이 도파관내에 있을 때 유전상수와 損失正接이 결정된다.
- 2) 유전상수는 傳播常數 γ 를 직접 측정함으로 구한다.
- 3) 계산은 간단하며 초월수의 방정식을 포함하지 않는다.
- 4) 이 방법은 반드시 시료가 적지 않아도 되고 물질의 손실이 너무커서 空胴 방법이나 임피던스 측정에 의한 방법에서 적당한 해가 나오지 않을 때 사용할 수 있다.
- 5) 도파관에 적당히 시료를 넣으므로서 균일한 等方性시료에 대해 높은 정밀도로 측정할 수 있다.
- 6) 시료의 길이가 변하여도 γ 의 값이 일정하면 측정치를 직접 비교 대조할 수 있다.

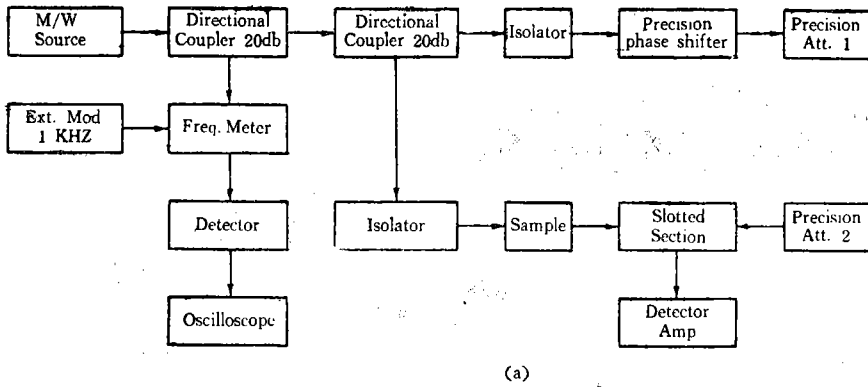
干流計에 의한 방법의 동작을 불력선도로 표시하면 그림 1과 같다.

정밀 감쇄기 1은 로타리형으로 여기서 위상 변위는 이 측정장치의 동작범위에 비하여 거의 무시할 수 있다.

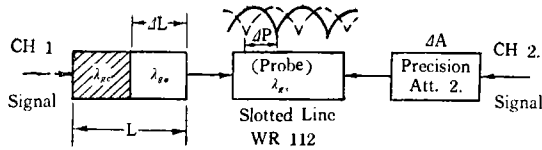
이 장치를 동작시키는데 있어서 干流計는 감쇄기 2를 조정하여 감쇄기 1이 0이 되도록하고 시료가 없을 때 溝上 가장 낮은 0점에 위치하도록하여야 한다. 이것은 두 채널에서 溝부분으로 향하는 신호의 크기가 같도록 하기 위한 것이다.

감쇄기 2는 한번 조정후 변화시키지 않는다. 시료장치용 도파관내에 30db손실의 유전물질이 장치되었다고 가정하고 정밀감쇄기 1이 0점에 조정되면 여기서 변한 감쇄기의 치는 시료를 통하는 一方性 투과손실이다.

이때 탐침의 위치를 테이블로 기록하고 다음에 회로를 중단시키면 0에 대한 다른 감쇄량이 다시 구하여진다. 이 0점은 시료에서 먼쪽으로 이동한다. 이 변화에서 신호전파의 위상, 감쇄량의 변화 그리고 시료를 통과하는 투과손실을



(a)



(b)

그림 1. 干流計의 불력선도
Fig 1. Blockdiagram of interferometer.

측정할 수 있다.

이러한 측정치를 관계식에 대입하여 유전계수 등을 결정한다. 여기서 시료의 길이는 20db 손실까지 짧게 잡을 수 있다. 이러한 시료에서 20db 손실은 시료내에서 발생하는 내부반사의 치가 흡수되어서 일방 통행신호의 성분으로 측정할 수 있다는 것을 확인하는데 필요하다.

이러한 시료의 두 내면의 실질적인 고립은 두 내면에서의 임피던스를 공식에 대입하지 않고 식을 간단히 하는데 필요하다.

동작에 필요한 세부과정은 다음과 같다. 동조기는 VSWR이 1.02보다 적도록 설계하여 위상 측정에서 오차를 최소로 감소시킨다. 불력선도에는 표시되지 않았으나 정밀 위상 변위기를 사용할 수 있다. 이때 溝上 탐침은 고정위치에 놓고 위상의 변화를 직접 읽으면 된다. 그리고 도파관상의 溝를 없애고 3db의 하이브리트나 등가 회로를 사용하여 두 채널의 신호를 조합하면 된다.

이 계통도는 동조시키기 위하여 1(KHz)의 矩形波를 사용한다.

그러므로 이 장치는 유전상수 계산과정까지를 구형파 변조기로도 사용할 수 있다. 그 이외에 CW바이아스를 사용한 전원을 동작시키면 스펙트럼 분석기를 검파기 대신으로 사용하여 0점을 찾는 데 정밀을 기할 수 있다. 간류계의 동작 조건이 가장 좋은 조건은 신호가 분리되는 方向性 結合器에서부터 채널 1과 채널 2의 전기적 길이가 거의 같아야 한다. 이러한 조건은 거의 정확히 유지할 수 없는데 이는 신호가 시료에 입사할 때 위상변위가 일어나고 또 시료의 길이가 변화되기 때문이다. 이 조건은 장치의 전기적 중심인 부분에 溝上에서 0인 점을 찾으면 된다. 이 중심점을 찾았으므로 생기는 두가지 이점은 신호원의 주파수 부동이 0인 점에서 안정되고 0점은 신호원이 불필요한 입력주파수 변조를 가져도 가장 낮은 점이기 때문이다. 채널 1과 채널 2의 전기적 길이는 干流計의 전기적 중심 근방에

서 溝上의 탐침이 이동하여 조정될 수 있다.

전기적 중심을 잡는 가장 좋은 방법은 신호를 주파수 변조시켜서 적어도 10(MHz)의 FM 편차를 구하면 된다.

즉 RF 탐침을 溝上에서 동작시켜서 出力을 파형 분석기에 연결한 후 스펙트럼선의 동작으로 탐침이 0에 조정되었는가를 보면 된다.

두개의 스펙트럼선이 같이 0점에 가면 이때 탐침은 전기적 중심에 위치한 것이다. 만일 중심이 아니면 채널 1이나 채널 2 도선의 길이를 길게 혹은 짧게 조정하여 중심을 구한다.

주파수 9.2GHz 에서 간류계 · 평형감도는 감쇄기의 변화 $\Delta A=0.01\text{db}$, 위상변화가 0.4로서 $\Delta P=0.01\text{mm}$ 로 구하여 진다.

Ⅲ. 公 式

물질의 유전상수에 대한 성질을 나타내는 일반적인 정의식을 도입하여 보자.

$$\epsilon = \epsilon^* \epsilon_0 \dots\dots\dots(1)$$

여기서

$$\epsilon_0 = \text{진공의 유전상수} \left(\frac{1}{362} \cdot 10^{-11} \text{Farad/cm} \right)$$

$\epsilon =$ 복소 유전상수

$\epsilon^* =$ 비복소유전 상수

여기에 사용된 식에 길이의 차원은 [cm]를 사용하여 탐침의 변위를 직접 대입하도록 한다.

$$\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon'' \dots\dots\dots(2)$$

$$\epsilon^* = \epsilon'(1 - j\tan\delta) \dots\dots\dots(3)$$

여기서

$\epsilon' =$ 복소 비유전상수의 실수부

$\epsilon'' =$ 손실계수, 복소 비유전상수의 허수부

$$\tan\delta = \epsilon''/\epsilon' = \text{損失正接} \dots\dots\dots(4)$$

비자성 유전물질로 균일하게 채워진 도파관에 Maxwell의 界 方程式을 대입하면 界의 해는 전파상수 γ 를 포함한 식을 얻는다.

그러므로

$$\gamma = \alpha + jP = -\frac{2\pi}{\lambda_0} [(\lambda_0/\lambda_c)^2 - \epsilon^*]^{1/2} \dots\dots\dots(5)$$

여기서

$\alpha =$ 감쇄상수(N/cm)

$\beta =$ 위상상수(rad/cm)

$\lambda_c =$ 모드전파 도파관내 차단주파수의 파장(cm)

$\lambda_0 =$ 자유공간내 파장(cm)

式(5)를 양변자승하여 실수부와 허수부를 등식화하면 ϵ' 와 ϵ'' 의 치를 각각 구할 수 있다.

$$\epsilon' = (\lambda_0/\lambda_c)^2 + (\lambda_0/2\pi)^2(\beta^2 - \alpha^2) \dots\dots\dots(6)$$

$$\epsilon'' = (\lambda_0/2\pi)^2 \cdot 2\alpha\beta \dots\dots\dots(7)$$

式(4)에 대입하면

$$\tan\delta = \frac{2\alpha\beta}{(2\pi/\lambda_c)^2 + (\beta^2 - \alpha^2)} \dots\dots\dots(8)$$

이 식은 차단주파수 파장 λ_c 를 알 때 임의의 도파관에 적용할 수 있는 일반적인 해가 된다. 차단주파수의 파장은 모드의 전파에 따라 다르고 단면의 종류에 따라 다르다. 여기서 구형도파관에 대하여 ϵ' 와 ϵ'' 의 식을 필요로 한다.

TE₁₀ 구형파 모드에서 a 가 구형도파관의 넓은 단면의 내부길이일때 $\lambda_c = 2a$ 보다 적은 파장으로 전파시키면 처음 모드에 대하여 식은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon' = (\lambda_0/2a)^2 + (\lambda_0/2\pi)^2(\beta^2 - \alpha^2) \dots\dots\dots(6a)$$

$$\tan\delta = \frac{2\alpha\beta}{(\pi/a)^2 - (\beta^2 - \alpha^2)} \dots\dots\dots(8a)$$

다음 그림 1-(b)에서 측정된 계수로 α 와 β 의 치를 구할 수 있다.

이때 도파관 벽면의 손실은 물질의 損失接에 비하여 극히 적으므로 무시하고 앞에서 서술한 측정과정에서와 같이 시료의 최소 종단손실을 20 db로 하여 물질내에서 발생하는 내부반사에 의한 오차를 최소로 하며 도파관내에 삽입된 물질이 균일하여 단면에 완전히 부착되어 있다고 가정한다.

시료의 길이를 L 이라 정하고 그림 1-(b)에서와 같이 처음에 적은 양으로 종단시키면

$$\alpha = 0.11513(\Delta A/\Delta L) \dots\dots\dots(9)$$

이 된다. 여기서 ΔA 는 시료를 통하여 전송되는 신호 크기의 변화로서 (db)로 표시된다. 이것은 干流計 혹은 브릿지에서 0에 조정된 정밀 감쇄기의 위치의 감소와 같이 변화한다.

ΔL 는 시료길이 감소되는 것으로 (cm)로 표시된다.

$$\beta = (4\pi/\lambda_{g0})(\Delta P/\Delta L) + (2\pi/\lambda_{g0}) \dots\dots\dots(10)$$

여기서 λ_{g0} =공간내 도파관의 파장
 λ_{gs} 는 溝의 영향을 포함한 溝上에서 측정된 도파관의 파장으로 λ_{g0} 보다 약간 큰 값을 갖는다.
 ΔP 는 그림 1-(b)에 표시된 바와 같이 溝上에서 탐침의 변위를 표시한다.

$$\lambda_{g0} = \lambda_0 [1 - (\lambda_0/2a)^2]^{-1/2} \dots\dots\dots (11)$$

여기서 ΔP 는 溝上 탐침의 (+) 변위로 잡는다. 즉 시료가 들어있는 도파관인 干流計의 한 점에서부터 먼거리로 이동하여 가는것을 (+)방향으로 잡는다.

시료가 종단되므로 α 와 β 는 式(9)와 式(10)에서 계산되어 필요한 상수를 구할 수 있다. 결과적인 해석에서 필요한 데이터는 ΔL 의 값이 클 때 式을 사용하여 구한다. 측정과정에서 처음은 작은 시료를 사용하여 대체적인 상수치를 구한 후 계속하여 정확한 치를 구하는 것이 좋다.

만일 ΔL 이 변할때 α 에 대한 일정치가 구해지지 않으면 이것은 물질의 불균일성(Nonuniformity), 계통의 비동조 및 시료의 기하학적 배치 등이 원인이 된다.

그리고 ΔL 이 변할때 β 가 구해지지 않아도 같은 원인이다.

정밀한 위상변위기를 그림 (1)과 같이 사용할 때 위상변위를 직접 읽을 수 있으므로 式(10)은

$$\beta = (\Delta\phi) / (57.2958\Delta L) + (2\pi/\lambda_{g0}) \dots\dots (10a)$$

가 된다.

여기서 $\Delta\phi$ 는 시료를 통하는 신호의 위상각의 변화로서 위상변위에서 눈금으로 직접 읽을 수 있다.

IV. 實驗結果

고손실 비자성 물질에 대한 유전율 측정이 마이크로파 X-대역 9.2GHz에서 측정되었다. 실험 결과는 표 1과 같다.

물 질	ϵ'	$\tan \delta$
fiber	1.65±0.02	0.72±0.03
polystyrene	2.7±0.18	0.83±0.05
Bakelite	5.0±0.14	0.42±0.04

표 1. 실험 결과

이 실험에서 시료는 도파관 면에 가볍게 밀착되어 空隙에서의 오차를 무시할 수 있을 정도로 적게 하였다. 측정결과는 섭동론에 의한 방법으로 측정된 것과 비교하여 좋은 결과를 얻었다. 측정 시료인 fiber의 방향은 도파관의 전파진행 방향인 z축과 평행으로 하여 측정하였다.

측정된 ϵ' 와 損失正接의 오차는 각각 1%와 3%인 비교적 좋은 결과를 얻었다.

V. 結 論

정밀 감쇄기에 의하여 측정된 결과는 다른 방법에 의한 측정보다 더욱 정밀한 장치가 요구되는 것은 물론 더욱 정밀한 측정기술이 요한다는 것을 알았다. 그리고 이 방법의 사용은 넓은 범위의 측정시료에 적용할 수 있고 액체 역시 측정할 수 있는 일반적인 것이다.

즉 측정시료가 액체인 경우 시료용 도파관을 수직으로 장치하면 측정이 가능하다. 여기서 측정한 결과는 9.2GHz로서, 평균측정에 대한 계산상의 정밀도는 ϵ' 에 대하여 1%, $\tan \delta$ 에 대하여 3%의 오차를 포함하는 비교적 좋은 결과를 얻었다. 이 실험에서 좀더 정확한 측정을 위한 장치의 개선을 고려할 수 있었다. 예로서 감도가 낮은 탐침의 사용대신 채널 1에 정밀한 위상변위기를 사용하고 10db 방향성 결합기로서 신호를 합치는 방법을 이용하므로 溝上 탐침의 변위를 측정하는 방법을 개선할 수 있다.

參 考 文 獻

1. G. Birnboum and J. Franeau, "Measurements of the Dielectric Constant and Loss of Solids and Liquids by a Cavity Perturbation Method" J. Appl. Phys. Vol.20 pp. 817-818, August 1949.
2. D.H. Bowie and K.S. Kelleher, "Rapid Measurement of Dielectric Constant and Loss Tangent." IRE. Trans. Microwave Theory and Techniques. Vol. MTT-4, pp. 137-140, July 1956.
3. T.W. Dakin and C.N. Works, "Microwave Dielec-

- tric Measurements." J. Appl. Phys. Vol. 18, pp. 789-796, September 1947.
4. R.M. Redheffer, R.C. Wildman, and V. O'Gorman, "The Computation of Dielectric Constants." J. Appl. Phys. Vol. 23 pp. 505-508, May 1952.
5. S. Roberts and A.R. von Hippel, "A New Method of Measurement dielectric Constant and Loss in the Range of Centimeter Waves." J. Appl. Phys. Vol. 17, pp. 610-616, July 1946.