

유전체 슬랩이 삽입된 원통형 공진기를 이용한 저손실 물질의 유전 상수 측정

An Approach to Estimate Dielectric Constant of Low-Loss Materials Using Dielectric Slab Loaded Cylindrical Cavity Resonators

이 원 희

Won-Hui Lee

요 약

본 논문에서는 유전체의 유전 상수를 결정하기 위하여 유전체 슬랩을 원통형 공진기에 삽입하여 측정하는 기술을 제안한다. 유전 상수는 빈 공진기와 유전체 슬랩이 삽입된 공진기의 공진 주파수 편차에 의해 측정된다. 특성 방정식은 정확한 필드 해석에 의해 정의되었다. 측정 장치는 HP8719A 벡터 네트워크 분석기와 금속 재질의 원통형 공동 공진기를 이용하였다. 이론적인 증명은 실험과 3D 시뮬레이터인 CST사의 MWS 4.0에 의해 확인되었다. 측정된 결과는 전반적으로 만족하였다. 측정된 테플론과 베이클라이트의 비유전율은 각각 2.03과 4.44이다.

Abstract

In this paper, dielectric slab loaded cylindrical cavity resonator measurement technique is presented to determine the dielectric constant of a dielectric material. The dielectric constant is measured by the resonant frequency deviation of empty and dielectric slab loaded cavity. Characteristic equations are derived by the exact field analysis. The measurement configurations are formed using HP8719A vector network analyzer and an experimental cylindrical metallic cavity with circular cross-section. The validity of the theory is confirmed by experiments and CST MWS 4.0(3D simulator). The results were in the whole satisfactory. The measured dielectric constant of teflon and bakelite are 2.03 and 4.44, respectively.

Key words : Dielectric Constant, Dielectric Slab, Cavity Resonator, Dielectric Material

I. 서 론

물질에 있어서 유전 상수는 매우 중요한 요소(factor)이다. 하나의 시스템이 완성되기까지 기존에는 많은 실험 과정과 경험적인 요소들이 많이 작용되었다. 실험과 경험에 의해 설계되는 많은 시스템들은 적정한 시스템이 설계되기까지 수많은 실험과 경제적인 요인들이 필요하다. 그러나 최근에는 마이크로 웨이브 상용 소프트웨어 해석 툴이 많이 개발되었

고, 그 결과도 실험에 만족하는 데이터를 얻을 수 있다. 그러나 실험과 같은 재현성을 얻기 위해서는 시뮬레이션 과정 중에 각 물질의 유전 상수 데이터를 실험과 같은 값을 넣어 주어야 하는 제약을 받는다. 유전 상수 측정은 이렇게 매우 필요한 것임에도 불구하고, 그 동안 측정하기 매우 어려운 것으로 인식되었다^{[1][2]}.

유전 상수 측정 기술로는 자유 공간법(free space method), 개방 단말 동축 선로 방법(open-ended co-

포항공과대학교 미래정보기술사업단(Educational Institute of Future Information Technology, POSTECH)

· 논문 번호 : 20080707-082

· 수정완료일자 : 2008년 8월 26일

axial line method), 공진기 방법(cavity resonator method), 전송 선로법(transmission line method) 등이 있다. 본 논문에서는 가장 해석이 쉽고, 정확하며, 가장 관심이 많은 공진기 방법을 이용하여 유전 상수를 측정하였다. 공진기 방법은 공진기 안에 유전체를 어떤 구조로 삽입하는 것에 따라서 유전체 봉(rod), 유전체 펍(puck), 유전체 슬랩(slab) 등이 있으며, 유전체 구조에 따라 해석 방법이 다르기 때문에 어떤 구조의 유전체를 삽입하느냐가 매우 중요하다^{[1]-[7]}. 본 논문에서는 측정 과정이 쉽고 제작도 용이하며, 계산도 비교적 편한 유전체 슬랩을 삽입하여, 유전 상수를 측정하는 방법을 연구하였다. 유전체 슬랩을 삽입하는 구조는 공진기와 유전체의 경계면이 한 개(유전체 영역과 공기 영역)로 비소멸 모드(non-decaying) 해석을 이용하면, 정확한 필드(field) 해를 얻을 수 있고^[8], 제작이나 측정이 간단하여 정확한 유전 상수 측정에 이용될 수 있다. 유전 상수 측정 방법의 기본 개념은 빈 원통형 공진기의 공진 주파수를 측정하고, 유전체 슬랩을 삽입한 원통형 공진기의 공진 주파수를 측정하여 그 공진 주파수의 편차와 이론으로 구한 정확한 특성 방정식을 이용하여 측정한다.

II. 본 론

2-1 이론적 해석

유전체 슬랩이 삽입된 구조를 그림 1에 도시하였다. 원통형 공진기의 아래 면에 슬랩을 삽입하여 놓고, 모노폴(monopole) 여기(excitation)를 통하여 급전

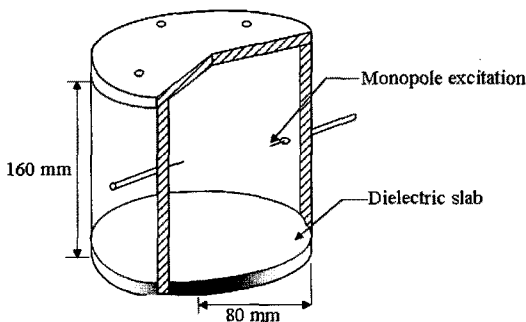


그림 1. 유전체 슬랩이 삽입된 원통형 공진기
Fig. 1. The dielectric slab loaded cylindrical cavity.

하였다.

유전체 슬랩을 삽입하는 구조는 공진기와와 경계면이 유전체 영역과 공기 영역으로 필드 식과 경계 조건을 세워 특성 방정식을 유도할 수 있다. 맥스웰 방정식(Maxwell's equation)과 헬름홀츠 방정식(Helmholtz's equation)에 의해 유전체 영역과 공기 영역의 필드 식을 구하고, 두 영역의 필드 해에 경계 조건을 적용하면, 다음과 같은 TE와 TM 모드의 특성 방정식을 유도할 수 있다.

$$TE \text{ mode: } k_{z1} \tan(k_{z2}L) + k_{z2} \tan(k_{z1}L) = 0 \quad (1)$$

$$TM \text{ mode: } k_{z1} \tan(k_{z2}L) + \epsilon_r k_{z2} \tan(k_{z1}L) = 0 \quad (2)$$

여기에서, 각 영역의 파수(wave number)는 다음과 같다.

$$k_1 = \omega \sqrt{\epsilon_r \mu_r}, \quad k_2 = \omega \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$$

(TE, TM mode)

TE 모드에 대해

$$k_{z1}^2 = k_1^2 - k_{\rho 1}^2 = k_1^2 - \left(\frac{P_{nm'}}{a}\right)^2$$

$$k_{z2}^2 = k_2^2 - k_{\rho 2}^2 = k_2^2 - \left(\frac{P_{nm'}}{a}\right)^2$$

TM 모드에 대해

$$k_{z1}^2 = k_1^2 - k_{\rho 1}^2 = k_1^2 - \left(\frac{P_{nm}}{a}\right)^2$$

$$k_{z2}^2 = k_2^2 - k_{\rho 2}^2 = k_2^2 - \left(\frac{P_{nm}}{a}\right)^2$$

여기서, k_1 은 유전체 영역의 파수이고, k_2 는 공기 영역의 파수이다. $P_{nm'}$ 은 베셀 함수 $J_n'(x')$ 의 $x_{np'}$ 가 0이 되는 값이고, P_{nm} 은 베셀 함수 $J_n(x)$ 의 x_{np} 가 0이 되는 값이다.

2-2 모드별 공진 주파수 민감도

식 (1), (2)의 정확한 해(exact solution)에 의한 특성 방정식을 바탕으로 유전 상수에 따른 모드별 공진 주파수 민감도를 조사하였다. 공진기 방법으로 유전 상수를 측정하는 것은 빈 공진기와 유전체 슬랩을 삽입한 공진기의 공진 주파수 편차를 이용하므로, 유전 상수에 따른 공진 주파수 민감도가 가장 좋은 모드를 찾는 것이 중요하다. 따라서 유전 상수를 측정하기 이전에 민감도가 가장 좋은 모드를 결정하였

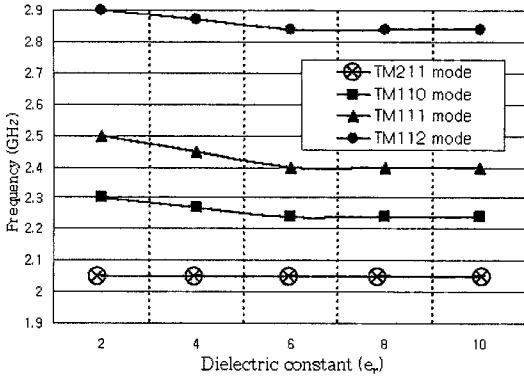


그림 2. 유전 상수에 따른 모드별 공진 주파수 민감도
Fig. 2. Resonant frequency sensitivity of modes classified by dielectric constant.

다. 그림 2는 식 (1)과 (2)를 이용하여 슬래의 두께는 5 mm로 고정하고, 임의 유전 상수 값을 2에서 10까지 대입하여, 공진 주파수를 계산한 결과이다. 모드별 공진 주파수를 보면 TM_{111} , TM_{110} , TM_{112} 모드들이 공진 주파수 민감도가 좋은 것을 알 수 있다. 이 중 가장 공진 주파수 민감도가 좋은 모드는 TM_{111} 모드이므로, TM_{111} 모드를 이용하여 유전 상수를 측정하였다.

그림 2를 보면 전반적으로 공진 주파수 민감도가 좋지 않은 것을 볼 수 있다. 그 중 가장 좋은 공진 주파수 민감도를 갖는 모드를 찾기 위해 각각의 기울기 값을 계산해 보았다. 그 결과, 기울기가 가장 큰 모드는 TM_{111} 모드였다. 공진 주파수 민감도가 가장 큰 TM_{111} 모드를 이용해야 유전체를 삽입하였을 때 공진 주파수 편차가 크게 발생하여, 유전 상수 측정이 용이해진다. 그림 3은 TM_{111} 모드만을 유전체 슬래의 두께를 2 mm에서 5 mm까지 변화시키면서 공진 주파수 민감도를 보았다. 여기서 알 수 있는 사실은 유전체 슬래의 두께를 어느 정도까지 유지시켜 주어야만 민감도가 좋아진다는 것이다. 유전체 슬래가 너무 두꺼워지면, 모드들이 중첩되어 어느 모드가 빈 공진기에 슬래를 추가하였을 때 이동된 모드인지 알 수 없다. 모드들이 중첩되지 않으면서, 공진 주파수의 민감도가 좋은 슬래의 크기는 4 mm에서 5 mm의 높이를 가졌을 때이다. 따라서, 원통형 공진기의 크기는 TM_{111} 모드에서 2.45 GHz에 동작하도록 크기를 설정하였고, 유전체 슬래의 크기는 공

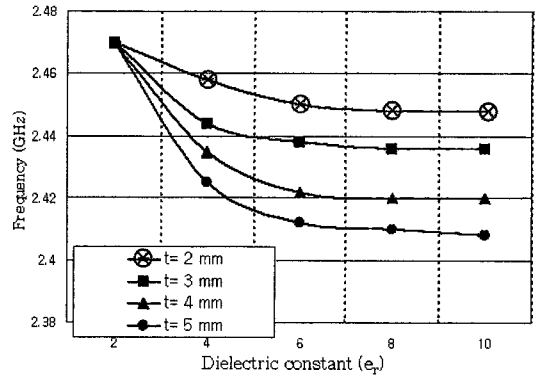


그림 3. TM_{111} 모드의 공진 주파수 민감도(유전체 두께 변화)

Fig. 3. Resonant frequency sensitivity of TM_{111} modes (by the dielectric thickness).

진기와 반지름은 같고, 높이는 5 mm가 되도록 설계하였다. 최종적으로 결정된 원통형 공진기의 크기는 반지름 80 mm, 높이 160 mm이고, 유전체 슬래의 크기는 반지름 80 mm, 높이는 5 mm이다. 측정 모드는 공진 주파수의 민감도가 가장 좋은 TM_{111} 모드로 결정하였다.

2-3 시뮬레이션(전산모사)

시뮬레이션은 상용 3D 시뮬레이터인 CST사의 MWS 4.0을 이용하였다. 이론 결과의 타당성을 증명하고자 시뮬레이션과 실험 결과를 이용하였다. 시뮬레이션도 이론과 같이 적정 유전체 슬래의 두께를 확인해 보기 위해 TM_{111} 모드에서 유전 상수에 따른 공진 주파수의 민감도를 조사해 보았다.

표 1~3에의 시뮬레이션 결과에서도 이론 값과 마찬가지로, 유전체 슬래가 적정 높이(5 mm)일 때 공진 주파수 민감도가 가장 좋았고, 너무 슬래의 높이가 커지면(20 mm) 모드 겹침 등으로 공진 주파수 편차가 불가하였다.

그림 4는 테플론(teflon) 슬래를 삽입하고 시뮬레이션한 S_{21} 데이터이다. 점선은 빈 원통형 공진기의 S_{21} 를 시뮬레이션한 결과이고, 실선은 테플론 슬래를 삽입하고 시뮬레이션한 S_{21} 결과이다. 그림 4에서 점선과 실선 사이가 가장 많이 벌어지는 것이 TM_{111} 모드이며, TM_{111} 모드가 공진 주파수 민감도가 크다는 것을 확실히 증명할 수 있다. 앞으로의 모든 실험

표 1. 유전체 슬랩의 높이가 1 mm일 때의 공진 주파수 민감도

Table 1. Resonant frequency sensitivity of dielectric slab's height 1 mm.

비유전율	공진 주파수(GHz)	Mesh
1.5	2.4655	159,885
2	2.4625	159,885
2.5	2.4615	159,885
3	2.4050	159,885
3.5	2.4595	159,885
4	2.4595	159,885
4.5	2.4595	159,885
5	2.4595	159,885

표 2. 유전체 슬랩의 높이가 5 mm일 때의 공진 주파수 민감도

Table 2. Resonant frequency sensitivity of dielectric slab's height 5 mm.

비유전율	공진 주파수(GHz)	Mesh
1.5	2.4453	164,730
2	2.4334	164,730
2.5	2.4264	164,730
3	2.4224	164,730
3.5	2.4184	164,730
4	2.4154	164,730
4.5	2.4134	178,534
5	2.4114	194,922

표 3. 유전체 슬랩의 높이가 20 mm일 때의 공진 주파수 민감도

Table 3. Resonant frequency sensitivity of dielectric slab's height 20 mm.

비유전율	공진 주파수(GHz)	Mesh
1.5	2.3934	178,534
2	2.3934	178,534
2.5	2.3594	178,534
3	2.3514	178,534
3.5	모드 겹침(판정 불가)	-
4	모드 겹침(판정 불가)	-
4.5	모드 겹침(판정 불가)	-
5	모드 겹침(판정 불가)	-

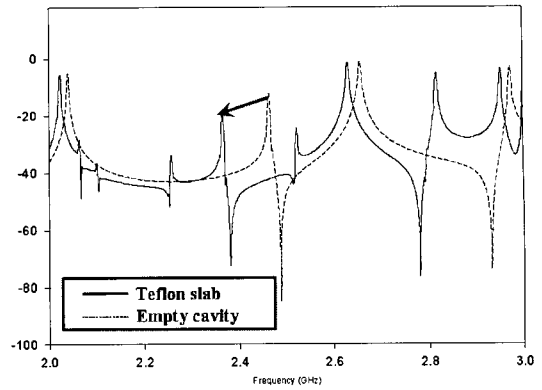


그림 4. 빈 공진기와 테플론 슬랩을 삽입한 공진기의 S_{21} 시뮬레이션 결과.

Fig. 4. S_{21} simulation results of empty cavity and teflon slab loaded cavity.

과 시뮬레이션은 이 TM_{111} 모드를 이용하여 진행하였다.

III. 실험 및 결과

그림 5와 같이 원통형 공진기를 제작하고, HP-8719A 네트워크 분석기를 이용하여 S_{21} 을 측정하였다.

그림 5의 원통형 공진기의 재질은 알루미늄이고, 크기는 반지름 80 mm, 높이 160 mm로 2.45 GHz에서 저차 모드(dominant mode)가 동작되도록 설계되었다.

그림 6은 빈 원통형 공진기와 유전체 슬랩이 삽입 공진기의 S_{21} 실험 결과를 나타내었다. 모드 경향성

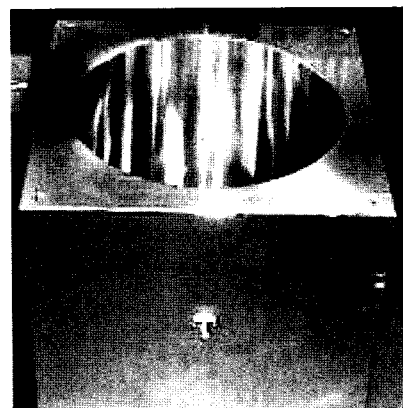


그림 5. 제작된 원통형 공진기
Fig. 5. Fabricated cylindrical cavity.

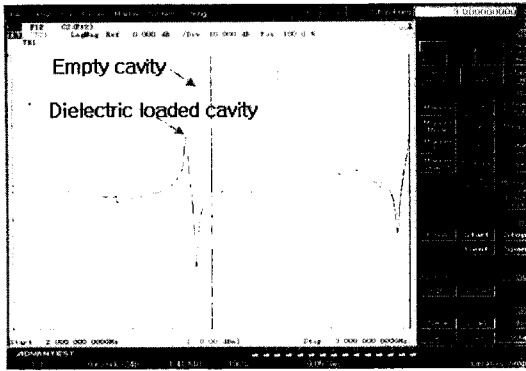


그림 6. 빈 공진기와 테플론 슬랩 삽입 공진기의 S_{21} 측정 결과
 Fig. 6. S_{21} measured results of empty cavity and teflon slab loaded cavity.

표 4. 계산, 시뮬레이션, 측정 결과 비교(테플론 슬랩이 삽입된 경우)
 Table 4. Comparison of calculation, simulation and measurement results(teflon slab loaded cavity).

	계산 (GHz)	시뮬레이션 (GHz)	측정 (GHz)
Mode 1	2.0316	2.0250	2.0294
Mode 2	2.0718	2.0641	2.0761
Mode 3	2.1088	2.1011	2.1035
Mode 4	2.2630	2.2573	2.2641
Mode 5	2.3723	2.3674	2.3723
Mode 6	2.5288	2.5235	2.5302
Mode 7	2.6467	2.6316	2.6445

이 시뮬레이션과 거의 비슷한 것을 확인할 수 있었다.

그림 6의 실험 값과 이론 값, 시뮬레이션 값을 비교하면 표 4와 같이 나타낼 수 있다. 표 4를 보면 계산, 시뮬레이션, 실험 값이 서로 비슷한 결과를 나타내는 것을 볼 수 있고, 따라서, 원통형 공진기의 이론적인 필드 해가 정확함을 확인할 수 있었다.

그림 5의 원통형 공진기에 테플론(teflon) 슬랩과 베이클라이트(bakelite) 슬랩을 삽입하여 공진 주파수를 측정하였다. 유전체의 파라미터는 테플론과 베이클라이트 슬랩 모두 반지름 80 mm, 높이 5 mm로 제작하였다. 높이 5 mm는 시뮬레이션 상에서 공진 주파수 민감도가 가장 좋은 크기이다. 유전체의 선정은 가공하기 쉽고, 구하기 쉬운 테플론과 베이클

표 5. 유전 상수 측정 값
 Table 5. Measured results of dielectric constant.

	유전 상수 측정값	문헌값 ^[9]
테플론	2.03	2.08
베이클라이트	4.44	3.64

라이트로 정하였다. 유전 상수의 측정 방법은 빈 원통형 공진기와 유전체 슬랩이 삽입된 공진기에서 TM_{111} 모드 공진 주파수를 측정한다. TM_{111} 모드에서의 빈 원통형 공진기와 유전체 슬랩이 삽입된 공진기의 공진 주파수 편차를 측정하고, 측정된 공진 주파수 편차를 빈 원통형 공진기의 공진 주파수 이튼식에 더한다. 이렇게 구해진 공진 주파수가 유전체 슬랩이 삽입된 원통형 공진기의 공진 주파수라 가정하고, 식 (1)과 식 (2)의 정확한 특성 방정식에 공진 주파수 값을 대입하면, 역으로 유전 상수 값을 알 수 있다. 즉, 측정된 유전 상수는 실험 값에 의한 계산 값이라 할 수 있다. 모드별 공진 주파수를 계산하기 위해서는 공진기의 크기, 유전체 슬랩의 크기, 유전 상수 데이터를 넣으면 되기 때문에 만약에 공진 주파수를 알 수 있다면 역으로, 유전체의 유전 상수를 계산할 수 있는 것이다. 이것은 정확한 필드 해에 근거를 두고 있으므로, 유전 상수 측정 값은 정확한 값이라 판단된다.

표 5에는 측정된 테플론과 베이클라이트의 유전 상수 값을 나타내었다.

표 5를 보면 테플론의 경우는 문헌 값과 비슷한 값을 나타내나 베이클라이트는 차이가 많이 발생하였다. 유전체의 유전 상수는 측정 당시의 순수한 유전체 재료와 실험할 때의 주위 온도, 주파수 등에 많은 영향을 보인다. 베이클라이트 시료에 대해서는 정확한 데이터인지를 판단하기 위해 동축형 방법(coaxial method)으로 다시 실험을 해 보았다. 동축형 방법의 실험 장치는 그림 7에 나타내었다. 동축형 방법은 S -파라미터를 측정하는 것에 의해 유전 상수를 측정하는 방법이다. 시료를 삽입 후 S -파라미터를 측정하면, S -파라미터의 데이터 안에 유전 상수의 정보가 존재한다. 동축형 방법에 의한 측정 결과, 베이클라이트의 유전 상수는 원통형 공진 기법과 비슷한 4.3의 측정 결과를 얻었다. 따라서 원통형 공진 기법으로 측정된 유전 상수는 정확한 결과라는 것을 알

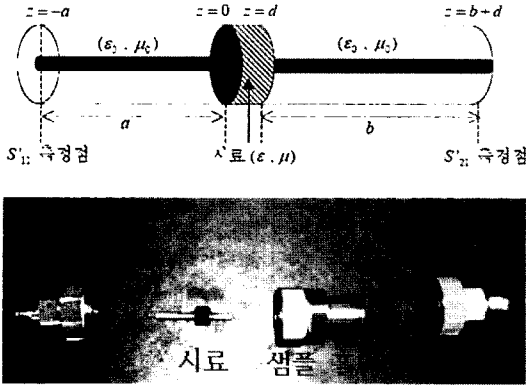


그림 7. 동축형 유전 상수 측정 장치
Fig. 7. Dielectric constant measurement system by coaxial method.

표 6. 공기층에 의한 유전 상수 측정 오차(테플론)
Table 6. Dielectric constant error by air gap(teflon).

모드	공기층 높이	공진 주파수 편차	유전 상수	오차 (%)
TM ₁₁₁	0.05 mm	0.154 %	2.038	0.392
	0.10 mm	0.313 %	2.044	0.685

수 있었다.

유전 상수의 측정 시 유전체 시료가 측정 공진기의 금속면과 완벽하게 접촉되지 않아 부분적으로 공기층(air gap)이 발생하게 된다. 그러한 공기층에 의한 유전 상수 측정 오차를 측정하기 위해 공진기 아래 면에 스티로폼을 넣고 유전체를 스티로폼 위에 설치하여 측정하여 보았다. 스티로폼의 높이는 0.05 ~ 0.10 mm로 공기층이 발생하였다고 가정하였다. 표 6은 공기층에 의한 유전 상수 측정의 오차를 나타내었다.

표 6에 보면 공기층의 높이가 크게 발생할수록 유전 상수 측정 오차가 크게 생기는 것을 확인해 볼 수 있었다. 그러나 측정 시 유전체 시료가 공진기 바닥과 완전히 밀착되도록 삽입하고 오차를 줄이려고 노력하였다. 유전체 가공 오차가 0.05 mm 정도라고 생각할 때 유전 상수 측정 오차는 0.5 % 이하로 크지 않다고 할 수 있다.

IV. 결 론

유전체 슬랩을 원통형 공진기에 삽입하여 유전

상수를 측정하는 방법을 연구하였다. 본 논문의 방법은 유전체 슬랩을 삽입하였을 경우의 정확한 이론적 해석(exact solution)에 근거를 두고 있다. 유전체 슬랩이 삽입된 경우의 이론적인 해석을 하고, 시뮬레이션 데이터와 실험으로 그 정확도를 확인하였다. 실험과 시뮬레이션 결과, 이론적인 해석이 매우 정확함을 확인할 수 있었고, 이론적인 해석을 바탕으로 가장 공진 주파수 민감도가 좋은 모드를 결정하였다. 가장 공진 주파수 민감도가 좋은 모드는 TM₁₁₁ 모드였으며, TM₁₁₁ 모드를 이용하여 테플론과 베이클라이트의 유전 상수를 측정하였다. 테플론의 유전 상수는 2.03으로 측정되었고, 베이클라이트의 유전 상수는 4.44로 측정되었다. 유전 상수의 측정값은 실험에 의한 계산 값이라 할 수 있다. 따라서 정확한 측정값이라 생각된다.

본 논문의 유전체 슬랩을 원통형 공진기에 삽입하여 측정한 유전 상수 데이터는 향후 시뮬레이션할 구조물의 유전 상수 인자(factor)에 유용하게 활용될 것이라 생각하며, 이러한 정확한 유전 상수 데이터를 이용한 시뮬레이션 결과를 활용한다면, 기존의 실험상으로만 수행하였던 많은 시행 오차나 경제적, 시간적인 소모를 줄일 수 있을 것이라 예상된다.

참 고 문 헌

- [1] D. Kajfez, P. Guillon, *Dielectric Resonators*, Artech House, 1986.
- [2] D. M. Pozar, *Microwave Engineering*, Addison Wesley, 1990.
- [3] K. A. Zaki, A. E. Atia, "Modes in dielectric loaded waveguide and resonators", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-31, no. 12, Dec. 1983.
- [4] S. B. Cohn, K. C. Kelly, "Microwave measurement of high dielectric constant materials", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT 14, no. 9, pp. 406-410, Sep. 1966.
- [5] P. Guillon, Y. Garault, "Accurate resonant frequencies of dielectric resonators", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-25, no. 11, pp. 916-922, Nov. 1977.

- [6] Y. Kobayashi, M. Kato, "Microwave measurement of dielectric properties of low-loss materials by the dielectric rod resonator method", *IEEE Trans. on Microwave Theory and Technique*, vol. MTT-33, no. 7, pp. 586-592, Jul. 1985.
- [7] A. Atanaskovic, V. Tasic, and S. Ivkovic, "Automatization of the complex dielectric constant measurement", *TELSIKS 2001*, pp. 691-694, Sep. 2001.
- [8] 최홍주, 이원희, 허정, 최광제, 이상영, "동심 유전체봉이 삽입된 원통형 공진기의 정확한 전자계 표현", *한국전자과학회논문지*, 11(8), 2000년.
- [9] R. F. Harrington, "Time-Harmonic Electromagnetic Fields", *The IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory*, pp. 452-455, 2001.

이 원 희



2000년 2월: 건국대학교 전자·정보통신공학과 (공학석사)
 2003년 2월: 건국대학교 전자·정보통신공학과 (공학박사)
 1998년 3월~1999년 2월: 건국대학교 전자·정보통신공학과 교육조교

1999년 9월~1999년 12월: 전자부품연구원 고주파재료연구센터 위촉연구원

2002년 8월~2008년 1월: LG전자 CTO 디지털어플라이언스연구소 책임연구원

2008년 1월~현재: 포항공과대학교 미래정보기술사업단 책임연구원 (Post Doctoral Fellow)

[주 관심분야] Dielectric Loaded Resonator, Measurement of Dielectric Constant, Design of Microstrip Antennas, Design of Microwave Oven, Microwave Plasma Applications, Artificial Dielectrics, Metamaterial Applications