

개방 단말 동축선 프로브의 환산모델에 대한 안정성과 정확성

Stability and Accuracy of the Conversion Model of Open-Ended Coaxial Probe

김 의 정 · 조 유 선 · 김 세 윤*

Yee-Jung Kim · Yu-Sun Jo · Se-Yun Kim*

요 약

동축선 프로브법을 사용하여 매질의 광대역 복소 유전율 값을 얻는다. 신뢰할 수 있는 복소 유전율 분포를 얻기 위해서는 먼저 측정된 반사계수의 정확성과 환산 모델의 안정성이 보장되어야 한다. 본 논문에서는 서로 다른 uncertainty를 갖는 계측기를 사용하여 환산 모델의 민감도를 해석하였다. 그리고 측정된 반사계수의 정확성에 영향을 주는 여러 요인에 대해 측정을 통해 조사하였다.

Abstract

Complex permittivities of material in a wide bandwidth are measured by using an open-ended coaxial probe. To obtain a confident complex permittivity profile, the accuracy of measured reflection coefficients and the stability of the conversion model should be guaranteed in advance. In this paper, the sensitivity of our conversion model is analyzed by employing two instruments with different uncertainties. And various factors effected on the accuracy of measured reflection coefficients are investigated in experiment.

Key words : Complex Permittivity, Open-Ended Coaxial Probe, Accuracy, Stability

I. 서 론

매질의 반사계수를 측정하기 위한 방법에는 크게 전송 선로법, 동축선 프로브법, 공동 공진 기법이 있다. 전송 선로법과 공동 공진 기법은 매질의 반사계수 값을 비교적 정확하게 측정할 수 있다는 장점이 있지만 광대역 특성을 알기 어렵다는 점과 매질의 가공이 필요하다는 단점이 존재한다. 동축선 프로브법은 앞의 두 방법보다 광대역 특성을 알 수 있다는 것과 매질의 가공이 필요하지 않다는 장점이 있지만 정확성이 상대적으로 떨어진다는 단점을 안고 있다. 본 논문에서 복소 유전율 환산을 위해 선택한 반사계수 측정 방법은 동축선 프로브법이다. 그 이유는

앞에서 언급한 동축선 프로브법의 장점을 취하기 위해서이다. 즉, 2.2 GHz의 주파수 범위까지 복소 유전율의 값을 얻는 것이 목적이었으며 가능한 매질의 가공없이 측정을 하려 했기 때문이다^{[1]-[6]}.

복소 유전율을 구하는 과정에서 정확한 매질의 반사 계수를 측정하는 것이 중요하다. 그리고 측정된 반사계수를 안정성이 검증된 환산 모델에 대입하여 복소 유전율을 계산할 때 그 결과에 대해 신뢰할 수가 있다. 본 논문에서 사용한 가상의 전송선로 모델은 본 연구실에서 발표한 기존 논문을 통해 다각도로 안정성이 검증되었다^[7].

여러 측면에서 환산 모델의 안정성이 이미 검증이 되었지만 고려하지 않았던 다른 측면에서도 안정

고려대학교 전파공학과(Dept. of Radio Sciences and Eng., Korea Univ.)

*한국과학기술연구원 영상미디어연구센터(Imaging Media Research Center, KIST)

· 논문 번호 : 20040811-102

· 수정완료일자 : 2005년 1월 5일

성을 검증할 필요가 있다. 본 논문에서는 uncertainty 가 서로 다른 회로망 분석기를 사용하여 측정된 매질의 반사계수를 동일한 환산 모델에 대입하여 유전율을 구하여도 그 결과가 안정적인가에 대해 살펴 보았다.

환산 모델의 안정성이 검증된 후 환산된 복소 유전율 값의 정확성에 관한 분석이 필요하다. 앞서 신뢰할 수 있는 복소 유전율 값을 정확한 매질의 반사계수 측정에 기인한다고 하였다. 그렇다면 반사계수의 정확성에 영향을 줄 수 있는 요인들에 관한 고찰이 필요하다. 본 논문에서는 측정 환경상의 요인과 매질이 가지는 특성에 의한 영향이 존재하리라 가정하고 그에 맞는 실험을 통하여 알아보았다.

측정 환경 상에 영향을 줄 수 있다고 가정한 요인은 측정 비커의 크기, 프로브 내심 반경, 측정 케이블의 영향이다. 그리고 매질이 갖는 특성에 대해 고려한 가정은 매질의 온도의 영향과 시간에 따른 매질의 변성의 영향이다. 온도에 따라 반사 계수가 달라지는 현상에 대해서는 기존에 많은 논문을 통해서 보여주고 있다^[8]. 따라서 본 연구에서는 온도의 영향에 대한 실험은 수행하지 않았고 온도에 대해서는 항상 동일하게 유지하여 그 영향을 배제하였다.

II. 동축선 프로브를 이용한 복소 유전율 측정

복소 유전율 측정 과정은 관심 매질의 반사계수를 얻는 과정과 얻은 반사계수 값으로부터 환산 모델을 사용하여 복소 유전율을 환산하는 과정으로 나누어 볼 수 있다.

측정에 사용된 프로브는 본 연구실에서 개발한 개방 단말 동축선 프로브이다. 프로브를 사용한 방법의 단점은 매질과의 접촉이 얼마나 잘 되어 있는

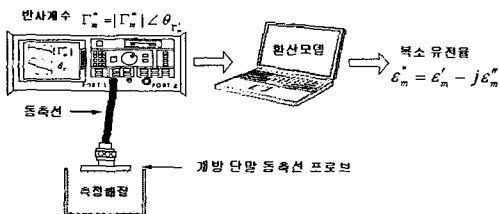


그림 1. 복소 유전율 환산 과정
Fig. 1. Conversion process of complex permittivity.

$a = 1.1305 \text{ mm}$
 $b = 3.7085 \text{ mm}$
 $r = 20 \text{ mm}$
 $\epsilon_r = 2.03$

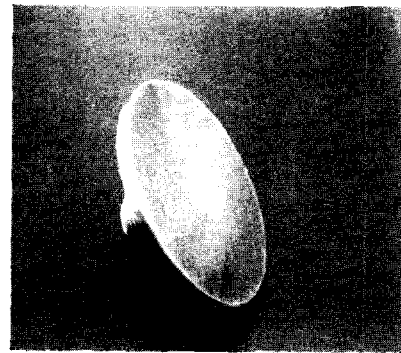
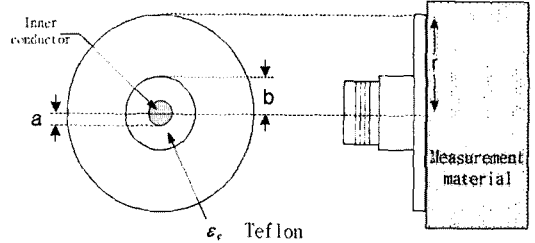


그림 2. 개방 단말 동축선 프로브의 구조와 실제 사진
Fig. 2. Structure of open-ended coaxial probe and real image.

가에 따라 측정 결과에 차이를 보인다는 것이다. 이러한 문제는 프로브의 접촉 면적이 비교적 넓으면 극복할 수 있다. 그림 2에서 개방 단말 동축선 프로브 구조를 보여준다.

동축선 프로브법으로 얻은 매질의 반사계수를 환산 모델에 대입하여 수치계산을 통해 복소 유전율 값을 얻는다. 복소 유전율 환산 모델에도 여러 가지 방법이 존재한다. 본 논문에서는 가상 전송선로 등가 모델을 사용하여 복소 유전율을 환산하였다. 그림 3은 가상 전송선로 모델을 보여준다. 임의의 매질의 복소 유전율을 얻기 위해서 구조적인 파라미터인 Y, D 를 알아야 한다. Y, D 를 구하기 위해서 이미 복소 유전율을 알고 있는 두 가지 매질이 필요하며 정제수와 공기를 기준 매질로 삼았다. 복소 유전율은 Debye 공식에 의해서 유도되어질 수 있으며 식 (1)과 같고 기준 매질에 의해 계산된 구조적인 파라미터 Y, D 에 의해 측정 매질의 반사계수는 복소 유전율로 환산된다^[9].

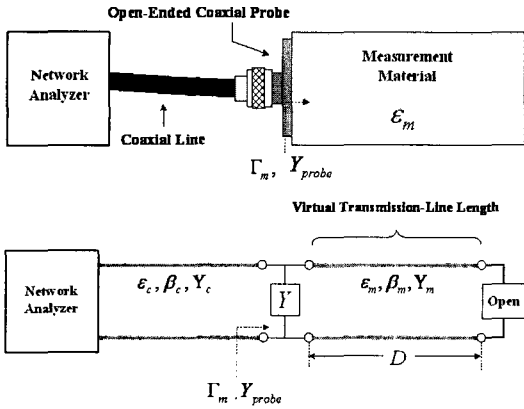


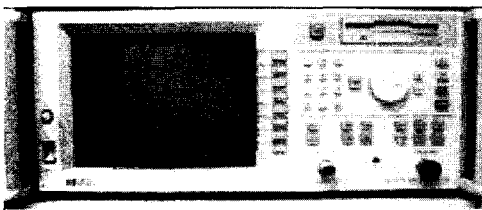
그림 3. 가상의 전송선로 모델
Fig. 3. Virtual transmission line model.

$$\epsilon_m(f) = \epsilon_{m\infty} + \frac{\epsilon_{ms} - \epsilon_{m\infty}}{1 + j2f\pi\tau_m} - j\frac{\sigma_m}{2\pi f\epsilon_0} \quad (1)$$

Debye 공식에서 $\epsilon_{m\infty}$ 은 주파수가 무한대일 때 상대 유전율, ϵ_{ms} 는 주파수가 0일 때 상대 유전율, ϵ_0 은 공기에서의 유전율, σ_m 은 매질의 도전율, τ_m 은 relaxation time을 나타낸다.

III. 환산 모델의 안정성 검증

서로 다른 uncertainty를 갖는 회로망 계측기를 이용하여 환산 모델의 안정성을 검증한다. 측정에 사용된 모델은 미국 Agilent사의 HP8714C 모델과 국내



(a) HP 8714C

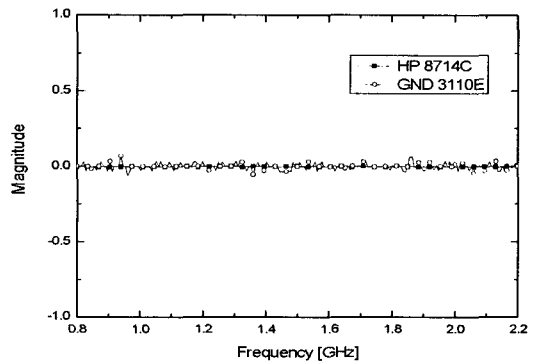


(b) GND 3110E

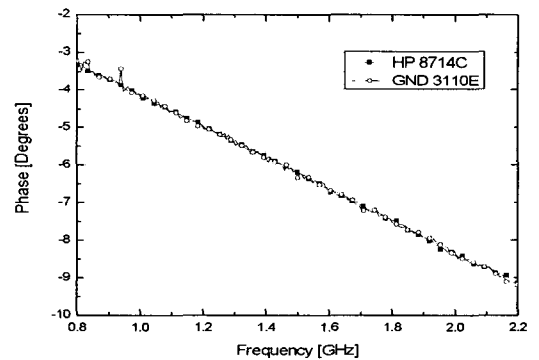
그림 4. 두 대의 회로망 분석기
Fig. 4. Two models of network analyzer.

업체 Gammanu에서 제작한 GND 3110E 모델이다. 측정 상황을 동일하게 하기 위해 두 회로망 계측기를 HP 8714C 모델의 N-type Cal kit을 사용하여 Calibration하였다. 그리고 측정 주파수 대역을 800 MHz ~ 2,200 MHz로 제한하였다. 그 이유는 측정 회로망 분석기중 하나인 GND 3110E의 주파수 범위가 위와 같은 협대역이기 때문이다. 2~3번의 Calibration을 통해 두 Model이 모두 제품 규격으로 정해진 uncertainty 범위 안에 들어오는 것을 확인하였다. 그림 4는 실제 두 Model의 사진을 보여주며, 그림 5는 두 Model의 Calibration을 마친 후 Open Cal kit에 대한 크기와 위상을 보여주고 있다.

케이블 끝단에서 Calibration을 마치고 그림 2에서 보여준 개방 단말 동축선 프로브를 연결한다. 프로브를 연결하면서 늘어난 길이만큼의 크기 보정과 위상 보정이 필요하다. 프로브의 길이는 약 1.5 cm 정



(a) 크기
(a) Magnitude



(b) 위상
(b) Phase

그림 5. 개방 교정기
Fig. 5. Open Cal. kit.

도로 측정 주파수 대역에서 크기는 거의 감쇠가 발생하지 않기 때문에 크기에 대한 교정은 배제하였

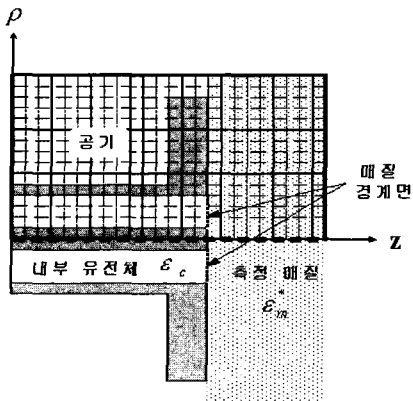
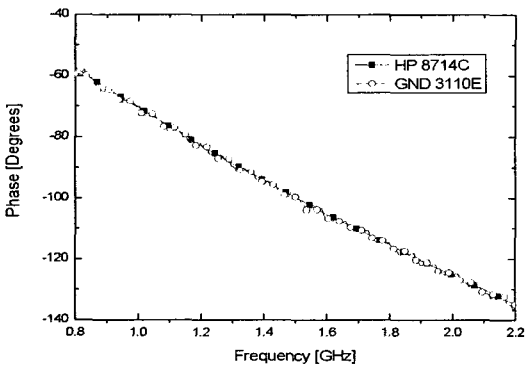


그림 6. FDTD 모델링
Fig. 6. FDTD modeling.

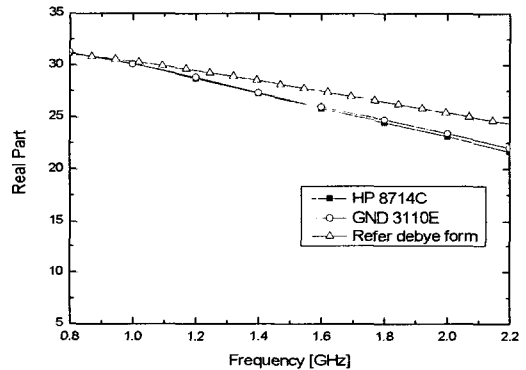
다. 위상 차이에 대한 교정은 기준 매질인 정제수에 대해서 FDTD로 수치계산된 값에 의해 Calibration하였다^[7]. 교정에 사용된 FDTD 구조는 그림 6과 같다.

앞서 언급한 두 회로망 계측기를 이용하여 기준 매질과 측정 매질인 메탄올의 반사계수를 측정한다. 그림 7은 메탄올에 대한 반사계수의 크기와 위상을 보여주고 있다. 반사계수의 차이는 최대 약 0.2이며, 위상의 경우 최대 약 2°이다. 두 회로망 계측기로 측정된 결과를 보면 각 주파수마다의 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

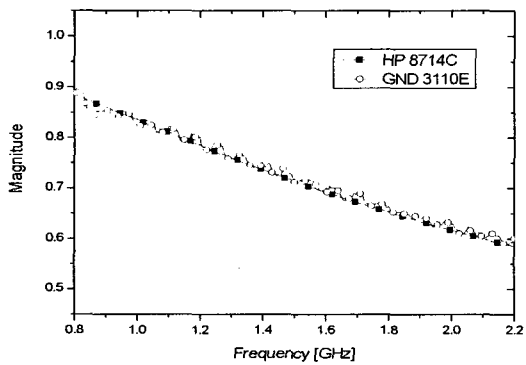
그림 8은 환산모델을 통하여 얻은 메탄올에 대한 복소 유전율의 결과이며 서로 다른 uncertainty를 갖는 회로망 분석기를 사용하여 얻은 복소 유전율의 값이 측정 주파수 대역에서 서로 유사함을 보여준다. 이로써 계측기의 uncertainty가 다르더라도 환산



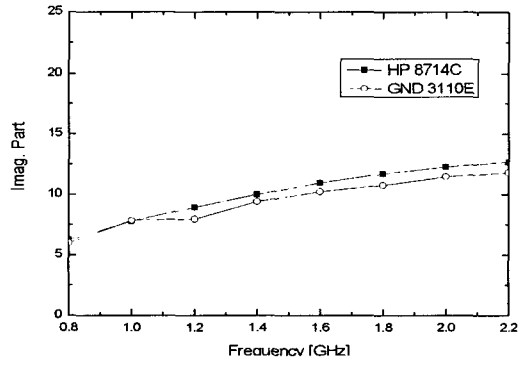
(a) 크기
(a) Magnitude



(a) 실수부
(a) Real part



(b) 위상
(b) Phase



(b) 허수부
(b) Imaginary part

그림 7. 메탄올에 대한 반사계수
Fig. 7. Reflection coefficient of methanol.

그림 8. 메탄올에 대한 복소 유전율
Fig. 8. Complex permittivity of methanol.

모델은 0.8 %의 오차범위 내에서 안정적으로 복소 유전율을 값을 계산한다는 것을 확인하였다. 그렇다면 과연 이 결과는 신뢰할 수 있을 만큼의 정확성을 갖는지 의문을 갖게 된다. 메탄올에 대한 복소 유전율 값의 기준으로 삼았던 자료는 참고문헌 [9]에서 유도된 것으로 식 (1)의 Debye 공식에서 $\epsilon_{ms} = 32.6$, $\epsilon_{m\infty} = 5.6$, $\tau_m = 48[ps]$ 으로 주어졌다.

IV. 복소 유전율의 정확성 검증

복소 유전율의 정확성에 영향을 줄 수 있는 요인을 가정함에 있어 두 가지 측면으로 생각하였다. 첫 번째는 측정 환경상의 요인이 유전율에 영향을 미친다고 가정하였다. 이러한 변수로써 측정 비커의 크기, 프로브 내심 반경의 크기, 측정 케이블의 영향이 있다. 그리고 두 번째로 측정 매질의 불안정한 특성이다. 즉, 매질의 온도, 시간에 따른 매질 특성의 변형 등이 영향을 주리라 가정하고 이를 측정을 통해 확인하였다. 서론에서 언급했듯이 온도에 관한 측정 은 이미 많은 논문을 통해 확인되었기에 배제하였다.

측정 시 유의한 점은 하나의 요인에 의한 영향 볼 때 그 이외의 다른 상황은 가능한 철저히 동일해야 한다는 것이다. 특히 실내 온도의 차이로 인한 매질의 온도 변화에 각별히 신경을 써서 측정을 수행하였다.

그림 9는 정제수의 반사계수 크기에 대해서 측정 비커의 크기에 의한 영향을 보여주고 있다. 가로, 세로, 높이가 각각 11, 8, 5 cm인 비커와 이보다 상대적으로 큰 42, 18, 12 cm의 비커를 사용하여 측정했을

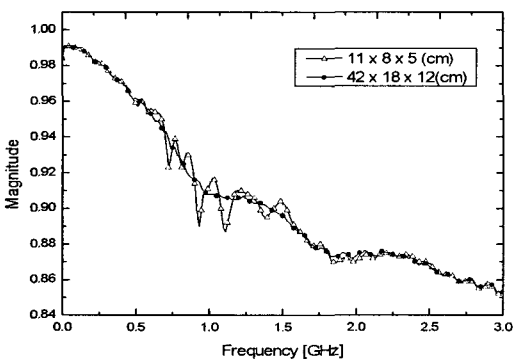


그림 9. 비커의 크기에 의한 영향
Fig. 9. Effect of beaker size.

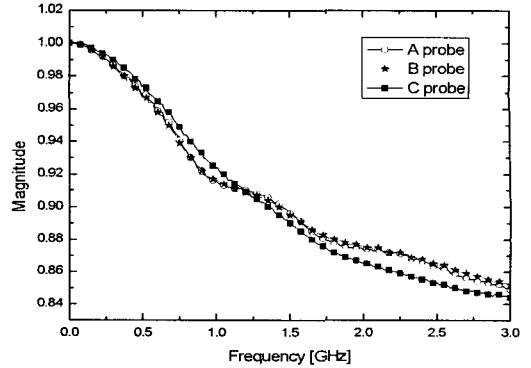


그림 10. 내심 반경의 크기에 따른 영향
Fig. 10. Effect of radius of inner conductor.

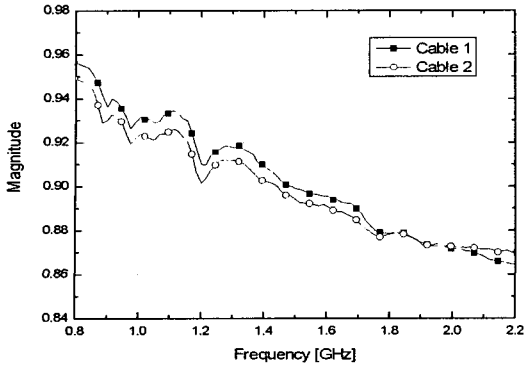
때 결과는 서로 달랐다. 약 0.5 GHz~1.5 GHz 대역에서 비커의 크기가 반사계수 측정에 상당히 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 따라서 정확성을 개선하기 위해서는 측정 비커는 비교적 큰 크기를 사용하는 것이 좋다.

그림 10은 내심 반경의 크기가 다른 프로브를 사용하여 측정한 정제수에 대한 반사계수의 크기를 보여주고 있다. 세 프로브 중에서 내심 반경이 제일 작은 것은 C로서 1.1305 mm이다. 그림을 보면 내심의 크기로 인해 전체적으로 곡선의 경향이 달라진다. 이는 프로브의 반경이 크면 TEM 모드는 유일한 전파모드라는 점은 동일하지만 고차 모드가 상대적으로 감쇠율이 줄어들기 때문이다. 따라서 안정적인 응답을 얻기 위해서는 작은 반경의 프로브를 사용해야 한다.

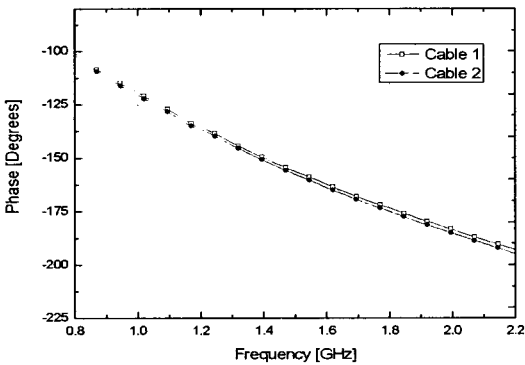
그림 11은 서로 다른 케이블로 측정한 정제수에 대한 반사계수의 크기와 위상을 나타냈다. Cable 1은 Cable 2에 비해 손실이 적은 Cable이다. 계측기가 갖는 uncertainty에 의한 영향을 줄이기 위해서는 삽입 손실이 적은 Cable 1이 유리하다.

측정 매질의 특성이 시간에 따라 변하면 그 매질의 유전율을 정확히 정의하기가 어렵다. 이러한 사실을 확인하기 위해 메탄올의 개봉 직후 복소 유전율과 공기중에 몇 시간 방치해둔 후 복소 유전율을 비교해 보았다. 이 측정에서 온도의 영향을 배제하기 위해 모든 측정시간 동안 실내, 기준 매질, 측정 매질의 온도를 동일하게 유지하였다.

그림 12는 메탄올을 개봉한 직후에 대한 복소 유



(a) 크기
(a) Magnitude



(b) 위상
(b) Phase

그림 11. 케이블 종류가 반사계수에 미치는 영향
Fig. 11. Effect of different types of cable on reflection coefficient.

전율과 비커의 뚜껑을 열어둔 채 약 4시간 정도 공기 중에 방치된 후에 대한 메탄올의 복소 유전율을 보여주고 있다. 측정 주파수 대역에서 곡선의 경향은 같지만 복소 유전율 실수부의 크기가 달라짐을 알 수 있다. 이러한 현상은 알코올 성분의 메탄올이 공기 중에 방치되면 기화현상으로 인해 수분 함유량이 많아지게 되어 매질의 특성이 변하기 때문이다. 이 결과를 보면 측정 매질인 메탄올은 상당히 불안정한 매질임을 알 수 있다. 즉, 다른 매질보다 기화현상이 비교적 빠르고 온도 변화에도 민감하게 반응하는 매질이다. 따라서 메탄올의 불안정한 특징은 복소 유전율의 정확성에 상당히 영향을 주는 요인이다.

그림 8에서 공식 (1)에 의한 기준과 환산된 메탄올의 복소 유전율의 정확성은 앞서 가정한 여러 요

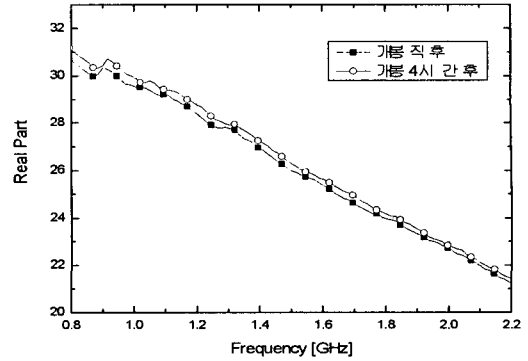


그림 12. 시간에 따른 메탄올의 변성
Fig. 12. Aging effect of methanol.

인에 의해 영향을 받음을 측정을 통해 확인하였다. 측정 환경적 요인은 측정 상황마다 달라지게 된다. 하지만 그것은 비커의 영향이 없도록 비교적 큰 크기의 비커를 사용하고 반경이 작은 프로브를 사용하며 손실이 적은 Cable을 사용하면 정확성을 개선할 수 있다. 그림 12에서 측정 매질인 메탄올은 시간에 따른 특성이 불안정하다는 것을 확인하였다. 즉, 메탄올은 시간에 따라 고유의 특성을 유지하지 않는다. 결론적으로 메탄올과 같이 불안정한 매질에 대한 복소 유전율은 정확하게 정의할 수 없기 때문에 기준과 비교하여 정확성을 확인하는 것은 불가능하며 단지 복소 유전율에 가장 큰 영향을 주는 요인임을 알 수 있다.

V. 결 론

개방 단말 동축선 프로브로 측정된 반사계수를 가상의 전송선 모델에 대입하여 복소 유전율을 구하는데, 이 때 사용된 환산 모델의 안정성을 서로 다른 uncertainty를 갖는 회로망 분석기를 사용하여 검증하였다. 이렇게 안정성이 검증된 환산 모델을 사용하여 구한 복소 유전율의 정확도는 입력 자료인 매질의 반사계수 정밀도에 달려 있다. 이를 위해 본 논문에서는 여러 환경적인 요인을 실험적으로 조사하였는데, 동축선 프로브법이 갖는 상대적인 부정확함은 측정 환경적인 요인과 매질의 변질 특성으로 인한 영향이 크다는 것을 확인하였다.

앞으로의 과제는 이러한 점들을 참고하여 현재 보유한 개방 단말 프로브법과 가상의 전송선 환산

모델을 개선함으로써 좀 더 광대역에 대한 복소 유전율을 측정하고자 한다.

참 고 문 헌

[1] E. Tanabe, W. T. Joines, "A nondestructive method for measuring the complex permittivity of dielectric materials at microwave frequencies using an open transmission line resonator", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 25, no. 3, pp. 222-226, Sep. 1976.

[2] E. C. Burdette, F. L. Cain, and J. Seals, "In vivo probe measurement technique for determining dielectric properties at VHF through microwave frequencies", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-28, no. 4, pp. 414-427, Apr. 1980.

[3] 김세윤, 전자파 IMAGING 용 새로운 역산란 기법의 개발, 과학기술부과제, KIST 연구보고서, UCN1743-6304-4, 1998년.

[4] 신현, 현승엽, 김상욱, 김세윤, "복소 유전율 측정용 개방단말 동축선 프로브의 새로운 등가모델", 추계마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, vol. 22, no. 2, pp. 143-146, 1999년.

[5] 신현, 김상욱, 김세윤, "FDTD법을 이용한 유전율 측정용 개방단말 프로브의 에러 해석", 추계 마이크로파 및 전파 학술대회 논문집, 21(2), pp. 285-288, 1998년 9월.

[6] S. Bringham, M. F. Iskander, and M. J. White, "Thin-sample measurement and error analysis of high-temperature coaxial dielectric probes", *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-45, no. 12, pp. 414-427, Apr. 1980.

[7] 조유선, "개방단말 동축선 프로브법의 오차에 관한 연구", 고려대학교 석사학위 논문, 2000년.

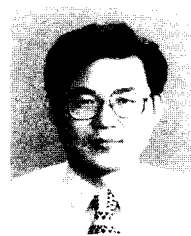
[8] B. G. Colpitts, "Temperature sensitivity of coaxial probe complex permittivity measurements : experimental approach", *IEEE Transactions on Microwave Theory Tech.*, vol. 41, no. 2, pp. 229-233, Feb. 1993.

[9] J. M. Bourgeois, G. S. Smith, "A fully three-dimensional simulation of a ground penetrating radar: FDTD theory compared with experiment", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. GRS-34, no. 1, pp. 36-44, 1996.

김 의 정

2004년 2월: 전북대학교 전자정보공학부 (공학사)
 2004년 3월~현재: 고려대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 복소 유전율 측정기법, FDTD

김 세 윤



1978년 2월: 서울대학교 전기공학과 (공학사)
 1980년 2월: KAIST 전기 및 전자공학 (공학석사)
 1984년 8월: KAIST 전기 및 전자공학 (공학박사)
 1986년 11월: KAIST 전기 및 전자공학과 (Post-doctor)

1986년 12월~현재: KIST 영상미디어 연구센터 책임연구원

[주 관심분야] 파동의 회절 및 복사, 전자파 Imaging, 안테나 설계, EMI/EMC

조 유 선



1999년 2월: 제주대학교 통신공학과 (공학사)
 2002년 8월: 고려대학교 전파공학과 (공학석사)
 2004년 3월~현재: 고려대학교 전파공학과 박사과정
 [주 관심분야] 복소 유전율 측정기법, 수치해석, 전자파 Imaging

법, 수치해석, 전자파 Imaging