자유공간 물질상수 측정법을 이용한 W-Band 유전율 측정

W-Band Permittivity Measurements Using a Free-Space Material Measurement Technique

강진섭 · 김정환 · 조치현 · 김대찬

Jin-Seob Kang · Jeong-Hwan Kim · Chihyun Cho · Dae-Chan Kim

요 약

본 논문에서는 W-band(75~110 GHz) 자유공간 물질상수 측정법을 논의하였다. 우선 자유공간에서 주위 환경에 영향을 덜 받으면서 피측정물(MUT: Material Under Test)에 의한 산란계수를 정확하게 측정하기 위한 W-band quasi-optical 기술 기반 자유공간 물질상수 측정시스템을 논의하고, 관련 측정시스템의 GRL(Gated Reflect Line) 교정법을 기술하였다. 그리고 공기를 피측정물로 하여 제안된 측정법의 타당성을 보이고, 두께가 1.1 mm, 2 mm, 2.75 mm, 5 mm인 arystal 평판에 대한 측정 결과를 제시하였다.

Abstract

In this paper, a free-space material measurement technique is discussed in W-band(75~110 GHz). For the accurate measurement of *S*-parameters of an MUT(Material Under Test) in free space, a W-band quasi-optical free-space material measurement system, less affected by the measurement environments, is discussed, and GRL(Gated Reflect Line) method for calibrating the measurement system is described. Proposed technique is verified for 'Air' and measurement results for arystal plates of thickness 1.1 mm, 2 mm, 2.75 mm and 5 mm are also shown.

Key words : Permittivity, Free-Space Measurement, Millimeter-Wave, W-Band

I. 서 론

전자파 관련 각종 소자, 부품, 시스템에는 여러 종류의 전자파 재료(유전체, 자성체)들이 다양한 목적으로 사용되고 있으며, 이들의 정확한 특성을 알기 위해서는 전자파 재료의 물질상수(유전율, 투자율) 측정이 반드시 필요하다.

일반적인 물질상수 측정법으로는, 저주파 대역에서는 특수한 구조의 cell을 사용하여 정전용량 등의 임피던스 측정을 이용하는 측정법이 있고, RF 및 초

고주파 대역에서는 동축선/도파관 전송선 및 프로우브를 이용한 광대역 측정법과 더불어 특정 주파수에서 보다 정확한 측정을 위한 밀폐형/개방형 공진기법 등이 사용되고 있다. 한편, 초고주파 및 (서브)밀리미터파 대역에서는 주로 도파관 전송선이나 quasi-optical 기술 기반 자유공간 전송선을 이용한 광대역 측정법과 특정 주파수에서의 정확한 측정을 위한 개방형 공진기법 등이 주로 사용된다^[1].

자유공간 물질상수 측정 시스템에서는 자체 교정된 벡터회로망 분석기의 두 측정 단자에 각각 연

「본 연구는 2013년 정부의 재원으로 한국표준과학연구원의 일반사업(번호 13011011) 지원을 받아 연구되었음.」

한국표준과학연구원 기반표준본부 전자파센터(Center for Electromagnetic Wave, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science(KRISS))

· Manuscript received November 30, 2012 ; Revised February 27, 2013 ; Accepted March 11, 2013. (ID No. 20121130-13S)

· Corresponding Author : Jin-Seob Kang (e-mail : jinskang@kriss.re.kr)

그림 1. 자유공간 물질상수 측정시스템 및 신호 흐름도

Fig. 1. Free-space material measurement system and its signal flow diagram.

결된 두 안테나 #1, #2 사이에 위치한 피측정물에 의한 산란계수를 측정하며, 그림 1과 같이 신호 흐름도로 표현할 수 있다. 여기서 S_{ij} 는 피측정물에 의한 산란계수이고, O_{ij} 는 안테나 #1이 연결된 측정 단자에서 안테나 #1의 특성을 포함하는 피측정물의 왼쪽 표면까지의 영역 특성을 산란계수로 표현한 것이고, T_{ij} 는 안테나 #2가 연결된 반대 영역의 특성을 산란계수로 표현한 것이다.

자유공간 물질상수 측정법은 그림 1에서와 같이 우선 두 안테나 사이에 피측정물을 놓고 피측정물에 의한 산란계수 S_{ij} 를 측정하고, 측정된 산란계수로부터 피측정물의 물질상수를 추출 계산하는 두 과정으로 구성된다. 첫 번째 과정은 개념적으로는 단순하나, 실제 상황에서는 산란계수 S_{ij} 측정이 개방된 공간에서 수행되므로 안테나 자체 특성, 측정 주위 환경, 안테나와 피측정물 사이의 다중 반사 등의 영향을 제거해야지만 피측정물만의 산란계수를 측정할 수 있다. 이 과정은 그림 1의 신호 흐름도에서 벡터회로망 분석기로 측정된 산란계수로부터 산란계수 O_{ij} 와 T_{ij} 의 효과를 제거하는 과정이다. 한편, 측정된 자유공간 산란계수로부터 물질상수를 추출하는 두 번째 과정에서는 Nicholson-Ross-Weir 방법, NIST 방법, 전송 모델 방법 등이 사용되고 있다^[2].

자유공간 물질상수 측정시스템에서 산란계수 O_{ij} 와 T_{ij} 의 효과를 제거하기 위해 사용되는 측정시스템 교정법으로는 TRM(Thru Reflect Match), TRL(Thru Reflect Line), GRL(Gated Reflect Line) 방법 등을 적용할 수 있다. TRM 교정법은 광대역에서 반사

특성이 우수한 전자파 흡수체가 필요하고, 이들 방법 중 가장 정확한 TRL 교정법은 원하는 만큼 위상 지연을 줄 수 있는 정밀 이송장치가 필요한 반면, 상대적으로 간단한 GRL 교정법은 시간 영역에서 time-gating 기법과 기준 반사물을 사용하여 측정시스템을 교정한다^[3].

본 논문에서는 차량 충돌 방지 레이더에 사용되는 평판 물질 등에 대한 물질상수 측정 수요에 대응하기 위해 개발된 W-band(75~110 GHz) 자유공간 물질상수 측정법을 논의하였다. 관련 선행 연구는 국내에서 아직 수행되지 않은 것으로 파악되고 있다.

본 논문에서는 우선 자유공간에서 주위 환경에 영향을 덜 받으면서 피측정물 만에 의한 산란계수를 정확하게 측정하기 위한 W-band quasi-optical 기술 기반 자유공간 물질상수 측정시스템을 논의하고, GRL 방법을 사용한 물질상수 측정시스템의 교정 과정을 기술하였다. 그리고 공기에 대한 측정 결과로써 제안된 측정법의 타당성을 보이고, arystal 평판에 대한 측정 결과를 제시하였다.

II. Quasi-optical 기술 기반 자유공간 물질상수 측정시스템

W-band 자유공간 물질상수 측정시스템은 산란계수 측정시스템과 자유공간 quasi-optical 시스템으로 구성된다(그림 2).

산란계수 측정시스템은 주 측정기 역할을 하는 벡터회로망 분석기와 W-band 신호를 발생시키는 주파수 변환기로 구성된다. 벡터회로망 분석기는 동작 주파수 대역이 0.01~67 GHz이며, 주파수 변환기는 벡터회로망 분석기로부터 공급된 20 GHz 이하의 RF/LO 신호를 체배하여 W-band 신호를 발생한 후,

그림 2. W-band 자유공간 물질상수 측정시스템

Fig. 2. W-band free-space material measurement system.

피측정물에 의한 반사 신호 및 투과 신호를 획득하여 벡터회로망 분석기의 수신기로 IF 주파수 변환된 기준 신호, 반사 신호, 투과 신호를 공급한다. 자유공간 quasi-optical 시스템은 피측정물 고정대가 설치되는 base bench와 안테나가 설치되는 2개의 splitted-form bench로 구성된다. 피측정물은 두 안테나 사이 중간에 위치하는 개구면 직경이 110 mm인 피측정물 지지대에 고정된다. 주요 특징은 다음과 같다.

- 개구면 직경을 일정하게 유지하면서 길게 제작된 안테나를 사용하므로 길이가 짧으면서 동일한 개구면 직경을 갖는 안테나에 비해 방사되는 전자파 신호가 전파되면서 적게 퍼져나가고, 도중에 mirror를 사용하여 전자파 신호를 다시 집속하므로 주위 측정 환경 영향을 적게 받으면서 quasi-optical 개념으로 자유공간 산란계수를 측정할 수 있다. 제작사 자료에 의하면 피측정물 고정대에서 개구면 중앙에서의 신호 크기에 비해 중앙에서 55 mm 떨어진 개구면 경계에서 신호 크기가 약 35 dB 작아짐으로 피측정물 고정대 위치에서 대부분의 전자파 에너지가 개구면 경계에서 회절 없이 개구면을 통과함을 알 수 있다. 이는 주위 환경에 영향을 받지 않고 피측정물 만에 의한 산란계수를 측정할 수 있음을 의미한다.
- Splitted-form bench는 추후에 조금 더 정확한 TRL 교정법으로 자유공간 산란계수를 측정하기 위해, 피측정물 고정대 양쪽 방향으로 각각 1 μ m 이상의 분해능으로 최대 25 mm 움직일 수 있도록 설계하였다.

W-band 범위에서 주파수 간격은 5 MHz, IF 대역폭 100 Hz, point average 64인 조건에서 TRL 교정법으로 산란계수 측정시스템(벡터회로망 분석기와 주파수 변환기)을 교정한 후, 자유공간 quasi-optical 시스템의 두 안테나 급전부를 각각의 주파수 변환기 단자에 연결하고 측정한 산란계수는 그림 3과 같다. 두 반사계수의 크기가 대략 -20 dB보다 작고 거의 동일($|S_{11}| \approx |S_{22}|$)하므로 측정시스템의 정합이 좋고, 기구적으로 대칭적인 특성을 가짐을 알 수 있으며, W-band(100 GHz에서 신호 파장은 3 mm)에서 두 안테나의 급전부 사이의 거리가 1,750 mm 임에도 불

그림 3. 자유공간 물질상수 측정시스템의 산란계수
Fig. 3. S-parameters of the free-space material measurement system.

그림 4. 기준 반사물의 시간 영역 반사계수
Fig. 4. Time-domain reflection coefficient of a reflection reference.

구하고 두 급전부 사이의 투과계수의 크기가 약 -1 dB이므로 두 급전부 사이의 전송 손실을 약 26 dB 이득의 두 안테나로 보상할 수 있도록 잘 설계·제작되었음을 알 수 있다.

일반적으로 자유공간 물질상수 측정시스템은 GRL 교정 과정에서 사용되는 금속판으로 제작된 기준 반사물이 피측정물 고정대에 있을 때와 없을 때, 해당 위치에서의 신호차가 시간 영역에서 50 dB 이상 되는 것을 권장하고 있으며, 이번에 구축된 측정시스템에서는 신호 크기의 비가 약 55.8 dB로 우수한 성능을 가지고 있다(그림 4).

III. 측정시스템의 GRL 교정

자유공간 물질상수 측정시스템에서 산란계수 O_{ij} 와 T_{ij} 의 효과를 GRL 교정법으로 제거하는 과정은

다음과 같다.

두 안테나와 피측정물 사이 공간이 공기로 채워져 있으므로 매질(공기)의 가역 특성($O_{21}=O_{12}$, $T_{21}=T_{12}$)을 고려하면 GRL 교정에서 결정해야 되는 미지수는 8개에서 6개로 감소하게 된다. O_{11} , T_{11} 은 두 안테나 개구면에서의 반사계수이므로, 안테나 급전 부에서 측정된 반사계수를 시간 영역으로 변환한 후 안테나의 개구면 부근 신호만을 time-gating 기법으로 얻어 이를 다시 주파수 영역으로 변환하여 얻을 수 있다. 나머지 4개의 미지수(O_{21} , O_{22} , T_{21} , T_{22})는 피측정물과 동일한 두께(d)를 갖는 기준 반사물을 이용하여 아래와 같이 표현되는 4개의 반사계수들로부터 결정할 수 있다.

$$\Gamma_{Ref}^1 = -\frac{O_{21}O_{21}}{1+O_{22}} \quad (1)$$

$$\Gamma_{Ref}^2 = -\frac{T_{21}T_{21}}{1+T_{22}} \quad (2)$$

$$\Gamma_{Air}^1 = \frac{O_{21}O_{21}T_{22}}{1+O_{22}T_{22}} e^{-2j\omega\sqrt{\epsilon\mu}d} \quad (3)$$

$$\Gamma_{Air}^2 = \frac{T_{21}T_{21}O_{22}}{1+O_{22}T_{22}} e^{-2j\omega\sqrt{\epsilon\mu}d} \quad (4)$$

여기에서 Γ_{Ref}^1 , Γ_{Ref}^2 는 각각 기준 반사물이 있을 경우, time gating을 통해 안테나 개구면을 제외한 영역만을 측정된 반사계수이며, Γ_{Air}^1 , Γ_{Air}^2 는 기준 반사물이 없을 경우의 반사계수를 의미한다.

한편, GRL 교정을 수행하기 위해서는 기준 반사물(또는 피측정물)의 위치가 시간 영역에서 잘 구분이 될 수 있어야 하며, 크기가 충분히 커서 주위 구조물의 효과가 무시할 수 있어야 되고, 이론적으로는 기준 반사물과 피측정물의 두께가 가급적 같아야 된다. 또한, 시간 영역에서 aliasing 현상이 발생하지 않도록 측정주파수 대역에서 충분히 좁은 주파수 간격으로 측정해야 된다.

IV. 측정 결과

본 논문에서는 상용 프로그램(Agilent Technologies 85071E)을 사용하여 자유공간 물질상수 측정 시스템을 GRL 법으로 교정하고, 이를 통하여 얻은

피측정물의 산란계수로부터 NIST 방법을 적용하여 물질상수를 추출하였다. GRL 교정에는 알루미늄으로 제작된 두께가 4.66 mm, 7.91 mm인 2종의 금속 기준 반사물이 사용되었다. 여기서 피측정물의 두께(d_{MUT})가 기준 반사물의 두께(d_{Ref})보다 얇은 경우($d_{Ref}>d_{MUT}$) $d_{Ref}-d_{MUT}$ 의 영역은 공기로, 만약 반대이면($d_{Ref}<d_{MUT}$) $d_{MUT}-d_{Ref}$ 의 영역은 피측정물로 채워져 있다고 가정하였다.

우선 확보된 자유공간 물질상수 측정기술을 검증하기 위해 두께가 1 mm, 3 mm, 5 mm인 공기(상대 유전율 $1+j0$)를 피측정물로 가정하고 상대유전율을 측정하였고, 그 결과를 그림 5에 도시하였다. 피측정물의 두께가 기준 반사물의 두께와 비슷할수록 이론 값에 가까우며 약 $1.001+j0$ 으로 주어졌다.

다음으로 피측정물 두께가 1.1 mm, 2 mm, 2.75 mm, 5 mm인 상용 arystal 평판의 경우 그림 6과 같이 기준 반사물의 두께에 관계없이 비슷한 결과를 주

(a) 실수부

(a) Real part

(b) 허수부

(b) Imaginary part

그림 5. 공기의 상대유전율

Fig. 5. Relative permittivity of air.

그림 6. Arystal의 상대유전율
Fig. 6. Relative permittivity of arystal.

며, 상대 유전율이 약 $2.66 + j0.045$ 로 측정되었다.
Arystal 두께에 따른 상대 유전율의 차이는 피측정

강 진 섭

1987년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)
1989년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1994년 3월~1995년 3월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 위촉

연구원

1995년 3월~1996년 2월: University of Illinois at Urbana-Champaign Postdoctoral Research Associate

1996년 3월~1998년 2월: 충북대학교 전기전자공학부 초빙교수

1998년 3월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파 측정, 전자파 산란 및 역산란 등

물의 앞, 뒷면을 정밀 가공하여 두 면의 평행도가 개선되면 서로 더 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

V. 결 론

본 논문에서는 W-band 자유공간 물질상수 측정법을 논의하였다. 우선 자유공간에서 주위 환경에 영향을 덜 받으면서 피측정물 만에 의한 산란계수를 정확하게 측정하기 위한 W-band quasi-optical 기술 기반 자유공간 물질상수 측정시스템을 논의하고, GRL 방법을 사용한 자유공간 물질상수 측정시스템의 교정 과정을 기술하였다. 공기에 대한 측정 결과로써 제안된 측정법의 타당성을 보이고, arystal 평판에 대한 측정 결과를 제시하였다. 향후 W-band에서 산학연이 필요로 하는 전자파재료에 대한 물질상수 측정/제공에 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] A guide to characterization of dielectric materials at RF and microwave frequencies, National Physical Laboratory(NPL), Sep. 2003.
- [2] Free Space Materials Measurement Seminar, Agilent Technologies, Jun. 2005.
- [3] NIST Technical Note 1355-R, 1993.

김 정 환

1978년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학사)
1980년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
1981년 10월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 책임연구원

구원 전자파센터 책임연구원

[주 관심분야] 전자파측정표준(RF전압, 전력, 안테나, 물질상수 등)

조 치 현

2004년 2월: 홍익대학교 전자전기
제어공학과 (공학사)
2006년 2월: 홍익대학교 전파통신
공학과 (공학석사)
2009년 2월: 홍익대학교 전자정보
통신공학과 (공학박사)
2009년 2월~2012년 5월: 삼성탈레

스 전문연구원

2012년 6월~현재: 한국표준과학연구원 전자파센터 선임
연구원

[주 관심분야] 전자파 측정 표준, 초고주파 회로 및 안테
나 설계

김 대 찬

1988년 2월: 대전공업대학교 전자
공학과 (공학사)
1988년 7월~현재: 한국표준과학연
구원 전자파센터 선임기술원
[주 관심분야] 전자파 임피던스 및
전자기장세기 측정 등