

링 공진기의 체배종속적 전류분포 해석을 통한 Molding Compound의 광대역 유전율 측정 방법 연구

A Study on a Method for Measuring Broadband Permittivity of Molding Compounds through Multiplication-Dependent Current Distribution Analysis of Ring Resonators

임시언 · 윤홍선 · 차준우 · 박초윤 · 강미향 · 박영철

Sieon Lim · Hongsun Yoon · Junwoo Cha · Choyoun Park · Mihyang Kang · Youngcheol Park

요 약

본 연구는 링 공진기를 통한 유전율 측정에 있어 유전율 변환식의 주파수 종속성을 보완하는 알고리즘을 제안하였다. 이를 통해 FOWLP(fan-out wafer level packaging) 공정에서 활용되는 EMC(epoxy molding compound)의 광대역 유전상수를 측정하였다. 제안된 유전율 보정식은 좀 더 정교하고 광대역에서 유효한 복소 유전율 산출을 위하여 마이크로스트립 라인 링 공진기의 체배 주파수에서의 전류분포를 반영하는 유전율 산출식을 제안함으로써, 시료의 유전율 유효범위를 체배주파수 영역으로 확장하였다. 제안된 기법으로 측정된 EMC의 상대 유전율은 3.836, 유전손실은 0.022로서, 기존 알고리즘 대비 상대 유전율의 측정 오차율은 3.95 %p, 유전 손실의 측정 오차율은 8.4 %p 개선되었다.

Abstract

In this study, we propose an algorithm that complements the frequency dependence of the relative permittivity conversion equation applied for the measurement of relative permittivity through a ring resonator. The broadband electrical characteristics of an epoxy molding compound (EMC) used in the fan-out wafer-level packaging (FOWLP) process were measured using our algorithm. By proposing a formula for calculating the permittivity that reflects the current distribution at the multiplied frequency of the microstrip ring resonator, the effective range of the permittivity of the sample was extended to the multiplied frequency region. Thus, a more sophisticated and effective complex permittivity was calculated over a wide band. The relative permittivity of the EMC measured by the proposed technique was 3.836 and the dielectric loss tangent was 0.022. This technique improved the relative permittivity measurement error rate by 3.95 % and the measurement error rate of the dielectric loss tangent by 8.4 %p compared to the conventional method.

Key words: Fan-Out Wafer Level Packaging, Epoxy Molding Compound, Ring Resonator, Relative Permittivity, Dielectric Loss Tangent

「이 연구는 2022학년도 한국외국어대학교 교내 연구비와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 연구임(No.2020 R1F1A1073315).」

한국외국어대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

· Manuscript received September 12, 2022 ; Revised October 11, 2022 ; Accepted November 30, 2022. (ID No. 20220912-071)

· Corresponding Author: Youngcheol Park (e-mail: ycpark@hufs.ac.kr)

I. 서 론

최근 5G 통신 기술이 상용화가 진행됨에 따라 많은 양의 데이터 처리가 필요로 하게 되며 많은 양의 데이터 처리를 위해서는 필연적으로 고주파수 대역을 사용해야 한다. 고주파수 대역에서의 IC의 크기는 매우 소형화되며, 이로 인해 고정된 input/output pad의 크기보다 상대적으로 더욱 작아지는 chip 크기에 의해 bumping 공정과 wire bonding처럼 높은 손실을 갖는 기존 패키징 공정은 적용하기 힘든 상황이다^[1]. 하지만 FOWLP(fan-out wafer level packaging) 공정은 input/output pad와 chip의 interconnection 손실이 적은 RDL(re-distributed layer)을 사용하므로 이와 관련한 다양한 연구가 진행 및 제안되고 있다^[2]. 특히, FOWLP 공정에서 반도체 봉지재로 주로 사용되는 EMC(epoxy molding compound)는 FOWLP 공정뿐만 아니라, 다양한 공정에서도 사용되기 때문에 이러한 합성물이 공정에 잠재적으로 채용되기 위해서는 합성물의 유전체 특성에 대한 정량적 지식이 필요하다. 또한, 높은 주파수에서의 회로 설계는 유전체의 정교한 유전율 특성이 요구된다. 따라서 본 논문은 링 공진기 회로를 활용해 FOWLP 공정에서 성형 합성물로 사용되는 EMC의 물질상수를 링 공진기의 주파수 종속성 알고리즘을 제안하여 정교하게 측정 하는 방안을 제시하였다.

II. 유전율 및 유전손실 측정 방법

유전율 측정은 여러 가지 방법들이 사용되고 있다. 기본적으로 주파수 대역에 따라서는 그림 1과 같이 측정 방법을 분류할 수 있으며, 측정하고자 하는 MUT(material under test)의 형태, 측정 환경에 따라서는 그림 2와 같이 분류할 수 있다. 대표적으로 사용되는 방법은 크게 3가지로, 동축·도파관법, 자유 공간측정법, 공진법이 있다^{[3]~[7]}. 그림 2(a)는 동축·도파관법이다. 동축·도파관법은 시료를 동축 케이블 또는 도파관 전송경로 내부에 넣어 VNA 측정기를 통해 MUT의 S-parameter를 측정하게 된다. 동축·도파관 측정 방식의 장점은 유전율과 투자율 두 가지의 물질상수값을 얻을 수 있으며, 측정하는 유전율의 주파수 대역폭을 넓게 가져갈 수 있다. 하지만 시료를 정밀하게 가공해야 하며, 완벽한 단차를 맞추기 어려워

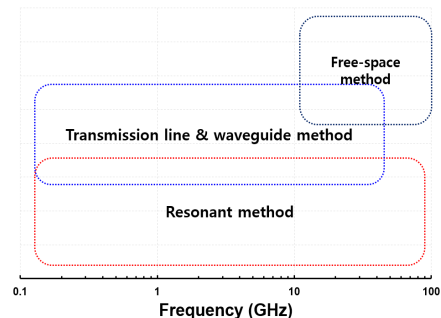
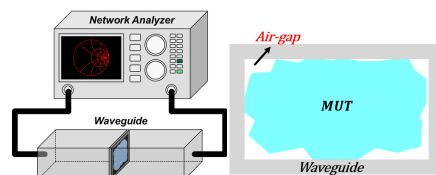


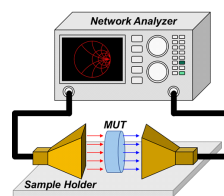
그림 1. 주파수 대역에 따른 유전율 측정 방법

Fig. 1. Measurement method of dielectric constant according to frequency band.



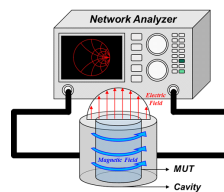
(a) 동축·도파관법

(a) Transmission line and waveguide method



(b) 자유 공간측정법

(b) Free space method



(c) 공진법

(c) Resonant method

그림 2. 유전율 및 유전손실 측정 방법.

Fig. 2. Methods for measuring permittivity and dielectric loss tangent.

air-gap 현상이 발생하게 된다. Air-gap 현상으로 인해 동축·도파관 측정법은 측정의 불확도가 존재한다. 그림 2(b)는 자유 공간 측정 방법이며, MUT를 높은 주파수 대

역에서 측정하고자 할 때 사용되는 측정 방법이다. 자유 공간을 전파하는 전자파를 시료에 입사시키는 방식으로, 두 개의 안테나를 VNA에 체결한 뒤 MUT를 안테나 개구면 사이의 고정 후 *S-parameter*와 반사, 삽입손실 계수를 측정하는 방식이다. 위 방식의 장점으로는 높은 주파수 대역에서의 유전율을 측정할 수 있다는 점과 MUT 크기가 측정하는 파장의 6배 이상의 크기를 요구하기 때문에 MUT를 정밀하게 가공할 필요가 없다는 점을 들 수 있다. 또한, 유전율과 투자율의 물질상수값을 같이 측정할 수 있는 장점이 있다. 단점으로는 MUT의 형태에 따라 다중 반사 및 안테나 가장자리에서의 파장의 회절로 발생하는 측정 불확도가 존재한다는 점을 들 수 있다. 그림 2(c)는 공진법이며 공진기를 이용하는 측정방식이다. 공진법은 cavity 공진기 방식과 공진기 회로를 이용하는 방식이 존재한다. 공진기 방식은 VNA 계측기를 통해 공진 주파수의 변화와 Q-factor의 변화를 측정하며, 공진기의 설계 수식 또는 EM-fields 수식으로 복소 유전율을 환산할 수 있다. 공진기 방식의 장점으로는 위에서 나열한 측정 방식 중 가장 정교하게 측정할 수 있으며, 공진 주파수에서 물질상수값을 비교적 간단하게 측정할 수 있는 장점이 있다. 하지만 측정 가능한 bandwidth가 매우 좁으며, 정밀한 측정을 진행하기 위해서는 해상도가 매우 높은 VNA 계측기를 필요로 하게 된다. 위에서 나열한 3개의 유전율 측정 방식은 측정기를 통해 얻은 MUT의 *S-parameter*값을 추출한 뒤, NRW(Nicholson-Ross-Weir), SCL(short circuit line) 등 여러 가지 변환방식을 통해 유전율과 유전손실 값을 추출할 수 있다^[8]. 본 연구에서는 측정 환경과 주파수 대역을 고려하여 링 공진기를 기반으로 EMC의 상대 유전율 및 유전손실에 대해서 측정을 진행하였다.

III. 링 공진기 이론

3-1 링 공진기 이론

링 공진기는 마이크로스트립 선로 구조로 되어 있으며, 결합 선로와 링으로 구성되어 있다. 링 공진기는 링 형태의 원주의 길이가 파장의 정수배($n=1,2,3,\dots$)일 때 공진이 발생하는 원리를 갖고 있으며, 식 (1)로 표현할 수 있다^[9]. 그림 3과 식 (1)을 통해 알 수 있듯 링 공진기의

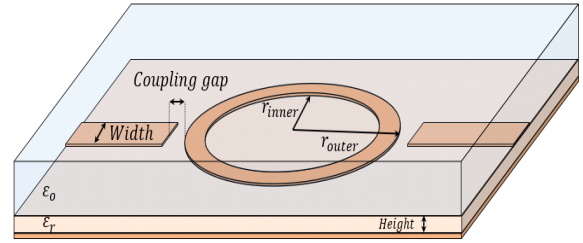


그림 3. 링 공진기 구조

Fig. 3. Structure of a ring resonator.

중심 주파수(f_n)가 결정되면 평균 반경(r_{mean})이 결정되고, 특성 임피던스값에 따라 선폭이 정해지게 된다. 이때 c 는 빛의 속도를 의미하며, ϵ_{eff} 는 마이크로스트립 라인에서의 신호가 quasi-TEM mode로 진행되면서 보이는 유효 유전율이다.

$$f_n = \frac{nc}{2\pi r_{mean} \sqrt{\epsilon_{eff}(f)}} \quad (1)$$

$$r_{mean} = \frac{r_{inner} + r_{outer}}{2} \quad (2)$$

공진 주파수에서 Q-factor는 식 (3)과 같으며, β 는 전파 상수, 링 공진기 회로 기관의 유전체 손실 상수(α_d)와 도체 손실 상수(α_c)에 따라 정해지게 된다^[10].

$$Q_{factor} = \frac{\beta}{2(\alpha_d + \alpha_c)} \quad (3)$$

결합 선로와 링 구조 사이의 거리는 식 (4)로 구할 수 있다^[11]. W 는 기관의 선폭이며, H 는 기관의 두께이다.

$$Coupling\ gap = 0.421H \frac{\epsilon_{eff} + 0.3}{\epsilon_{eff} - 0.258} \frac{\frac{W}{H} + 0.262}{\frac{W}{H} + 0.818} \quad (4)$$

3-2 링 공진기 기반 유전율 측정 방법

링 공진기를 이용한 유전상수를 측정하는 방식은 링 공진기에 시료를 얹어 변화되는 회로의 특성을 이용한 다층 마이크로스트립 라인 해석 방식과 시료 위에 링 공진기 제작 후 회로의 특성을 이용하는 마이크로스트립 라인 방식 2가지가 있으며, 각 방식의 장단점이 존재한다.

다층 마이크로스트립 라인 해석 방식의 경우, 식 (5)를 이용하여 상대 유전율을 도출하며, 식 (6)을 이용하여 유전손실을 도출하게 된다.

즉, 측정하고자 하는 시료의 유전율 $\epsilon_{r,2}$ 는 기관의 상대 유전율 $\epsilon_{r,1}$ 을 이용하여 구할 수 있다^[12]. 식 (5)에서 q_1 과 q_2 는 Wheeler filling factors이며, 마이크로스트립 회로의 기하학적 매개변수로서 마이크로스트립 선의 단면을 채우는 정도를 의미한다^{[13][14]}.

$$\epsilon_{r,2}(f) = \frac{q_2}{q_1 + q_2 - 1 + \frac{(1 - q_1)^2}{\epsilon_{eff,2}(f) - q_1 \epsilon_{r,1}(f)}} \quad (5)$$

식 (6)에서 $p_{i,N}$ 은 기하학적 매개변수이며, Schneider filling factor이다. 기존 기관의 유전율과 도체에 의한 Q-factor와 변환된 Q-factor값의 차를 이용하여 구해진다.

$$\sum_{i=1}^N p_{i,N} \tan \delta_i(f) = \frac{1}{Q_{D,N}} \quad (6)$$

다른 방식인 마이크로스트립 라인 해석 방식의 경우, 추출된 회로의 특성값에서 상대 유전율은 식 (7)~식 (9)를 사용하여 도출되며, 유전손실은 식 (10)~식 (13)을 이용하여 도출된다^{[13][14]}.

식 (7)은 식 (1)을 유효 유전율에 대해 표현한 식이다.

$$\epsilon_{eff}(f) = \left(\frac{nc}{2\pi r_{mean} f_n} \right)^2 \quad (7)$$

식 (8) 및 식 (9)는 마이크로스트립 라인과 관련된 식이며, 주파수에 대해서 구한 유효 유전율을 마이크로스트립 기관의 기하학적 변수들에 관한 식으로 표현한 식이다.

if $W > H$,

$$M = \left(1 + 12 \frac{H}{W_{eff}} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

if $W < H$,

$$M = \left[\left(1 + 12 \frac{H}{W_{eff}} \right)^{-\frac{1}{2}} + 0.04 \left(1 - \frac{W_{eff}}{H} \right)^2 \right] \quad (9)$$

$$\epsilon_r(f) = \frac{2\epsilon_{eff}(f) - 1 + M}{M + 1}$$

유전손실은 식 (10)~식 (13)을 이용하여 도출할 수 있다. 식 (10)은 마이크로스트립 라인의 전체 감쇠상수를 표현하는 수식이며, 링 공진기의 공진 주파수에서 Q-factor 값을 통해 추출된다. 이때 식 (10)에서 α_d 는 기관의 유전체에 의한 감쇠상수, α_r 는 방사 감쇠상수, α_c 는 도체 감쇠상수를 의미한다.

$$\alpha_{total} = \alpha_d + \alpha_r + \alpha_c \quad (10)$$

식 (11)은 Collin이 제시한 마이크로스트립 라인의 도체 감쇠상수를 표현한 식이다. R_1 은 마이크로스트립 기관의 위 도체 형상의 직렬 저항을 나타내며, R_2 는 접지된 도체의 직렬 저항을 나타낸다^[9].

$$\alpha_c = 8.686 \times \frac{R_1 + R_2}{2Z_c} \quad (11)$$

$$\alpha_r = 8.686 \times \frac{\pi}{Q_{rad} \lambda_d} \quad (12)$$

식 (10)에서 식 (11)과 식 (12)를 통해 구한 도체 감쇠상수와 방사 감쇠상수를 제한값을 계산하여 α_d 를 추출한 뒤, 식 (13)을 통해 기관 유전체의 유전손실을 도출한다.

$$\tan \delta(f) = \frac{\alpha_d \sqrt{\epsilon_{eff}(f)} (\epsilon_r - 1) \lambda_0}{27.3 \epsilon_r (\epsilon_{eff}(f) - 1)} \quad (13)$$

다층 마이크로스트립 라인 해석 방식은 시료의 물성 정보를 모르더라도 기관의 물성 정보를 통해 상대 유전율과 유전손실을 측정할 수 있다. 또한, 비교적 마이크로스트립 라인 해석 방식보다 측정이 간단하다는 이점이 있다. 하지만 제작된 링 공진기 위에 MUT를 얹어 측정을 진행하기 때문에 air-gap 현상과, 측정 환경에 많은 영향을 받는다. 따라서 정교한 측정을 진행하기에는 어려우며, 여러 번 측정을 진행해야 한다는 단점이 있다. 이에 반해 마이크로스트립 라인 해석 방식에는 시료 위에 링 공진기를 제작하기에 어느 정도 시료의 유전율을 알고 있어야 하며, 링 공진기 회로의 제작이 어렵다는 단점이 있다. 하지만 시료로 제작된 회로의 물리적 특성을 이용하여 정교하게 측정할 수 있는 장점이 있다.

3-3 다층 마이크로스트립 라인 해석을 통한 링 공진기 설계 및 제작

링 공진기 평균 반지름을 계산하기 위해서는 기판 재료의 상대 유전율과 유전손실의 값을 알아야 한다. 따라서 유전상수를 알고 있는 FR4 기판으로 링 공진기를 제작하였고, 다층 마이크로스트립 라인 해석 방법을 통해 EMC의 유전율과 유전손실의 근사값을 추정하였다. 위 방식은 측정 환경에 많은 영향을 받는다. 따라서 추정 근사값을 얻은 뒤 시료 위에 링 공진기를 제작하였으며, 마이크로스트립 라인 해석 방식을 이용해 정교한 측정을 진행하고자 하였다. FR4 기판으로 제작된 링 공진기는 기판 특성의 한계로 인해 비교적 저주파수 대역인 1 GHz 링 공진기로 제작되었다.

그림 4는 EMC 삽입 여부에 따른 링 공진기의 삽입 손실의 변화를 보여준다. 그림 5(a)는 상대 유전율, 그림 5(b)는 상대 유전손실 측정값이며, 각각 20번씩 측정된 가우시안 분포도를 나타낸다.

위의 결과로부터 EMC의 근사 유전율과 손실함수를 각각 3.82, 0.02로 설정되었으며, 결과를 토대로 EMC 시료 위에 제작하였다.

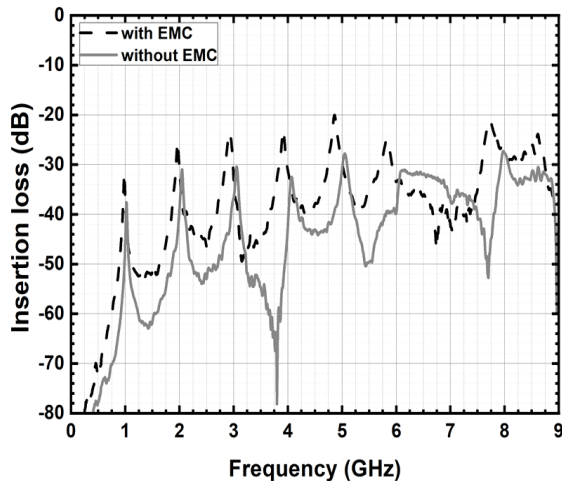
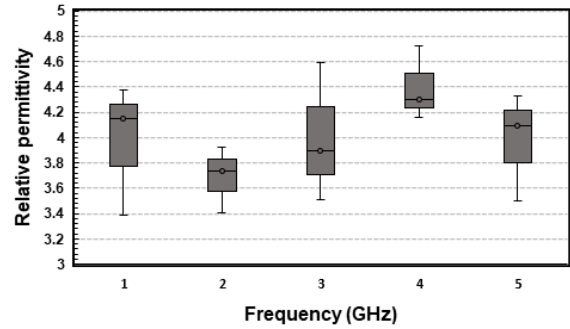
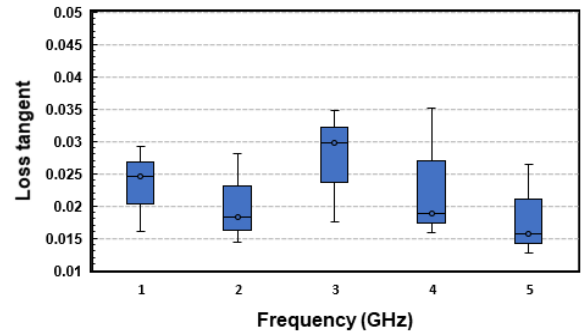


그림 4. EMC 삽입 여부에 따른 링 공진기의 insertion loss
Fig. 4. Insertion loss of ring resonator depending on whether EMC is inserted.



(a) EMC의 상대 유전율
(a) Relative permittivity of EMC



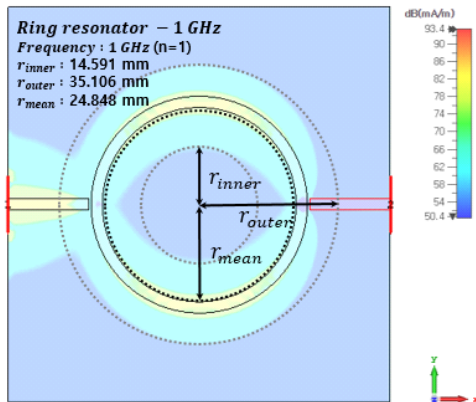
(b) EMC의 상대 유전손실
(b) Dielectric loss tangent of EMC

그림 5. 다층 마이크로스트립 라인 해석 기반 측정된 EMC의 유전율 및 유전손실

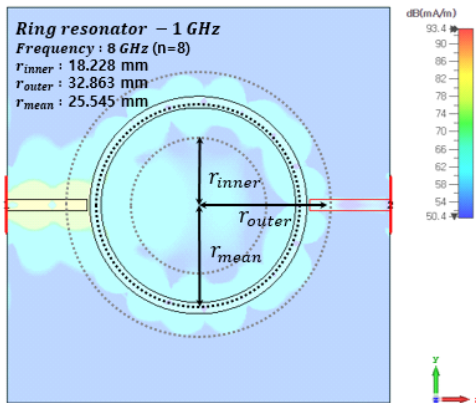
Fig. 5. Permittivity and dielectric loss tangent of measured EMC based on multi-layer microstrip line analysis.

IV. 주파수 종속성 알고리즘을 통한 복소 유전율 보정

링 공진기 기반 유전율 측정방식은 주파수 종속적 오차를 발생시킨다. 이는 표피효과 및 고조파의 peak-null 분포로 인해 나타나는 현상과 링 공진기의 feed line과 ring pattern 사이의 gap이 커패시턴스로 동작하면서 주파수 종속적 측정오차가 발생하게 된다^[15]. 그러므로 본 논문에서는 체배 주파수가 증가함에 따라 전자기적 현상으로 인해 생겨나는 측정 오차를 보완하여, 링 공진기 측정방식의 유전율 유효범위를 체배 주파수 영역으로 확장하고자 하였다.



(a) 1 GHz에서 공진기의 전자기장 시뮬레이션 결과
(a) Results of electromagnetic field simulation of resonator at 1 GHz



(b) 8 GHz에서 공진기의 전자기장 시뮬레이션 결과
(b) Results of electromagnetic field simulation of resonator at 8 GHz

그림 6. 공진 주파수에서 링 공진기의 전자기장 및 전류 밀도 시뮬레이션 결과

Fig. 6. Electromagnetic field and current density simulation result of ring resonators at resonant frequencies.

링 공진기의 주파수 종속적 특성을 분석하기 위해 EM 모의실험 기반으로 회로 분석을 진행하였다. 전류밀도 크기 분포 설정은 체배되는 공진 주파수에서의 최소, 최대값으로 설정하여 일정한 조건을 만들어주었다. 이를 기반으로 공진 주파수마다 전자기장과 전류밀도를 분석하였으며, 그 결과 그림 6과 같이 도출되었다.

그림 6에서 r_{inner} 은 전자기장에 의한 변화된 내부 반지

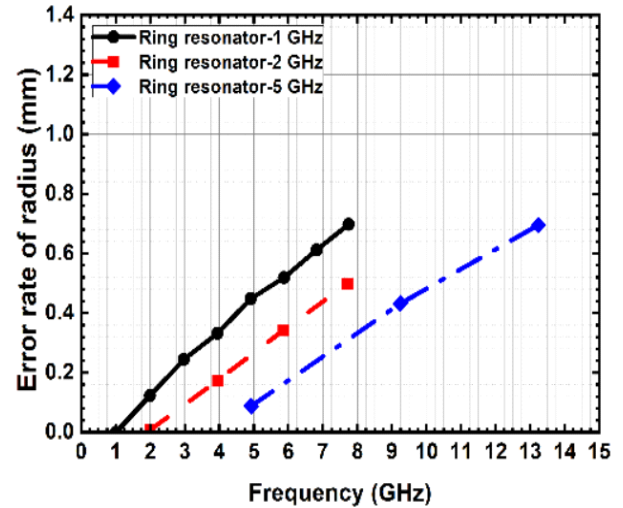


그림 7. EM 모의실험 기반 주파수에 따라 증가하는 반지름의 오차

Fig. 7. Error rate in radius increasing with frequency based on EM simulation.

름의 크기, r_{outer} 은 전자기장에 의한 변화된 외부 반지름의 크기를 보여준다. 주파수가 높아짐에 따라 평균 반지름이 늘어나는 현상이 보이며, 이는 표피효과 및 고조파의 peak-null 분포로 인해 나타나는 현상으로 보인다. 결과적으로 이러한 반지름 변화는 계산된 유전율의 주파수 종속적 오차를 발생시키며 전체 주파수 대역에서 일정한 유전율을 가정하는 전자기해석의 결과를 왜곡시키게 된다.

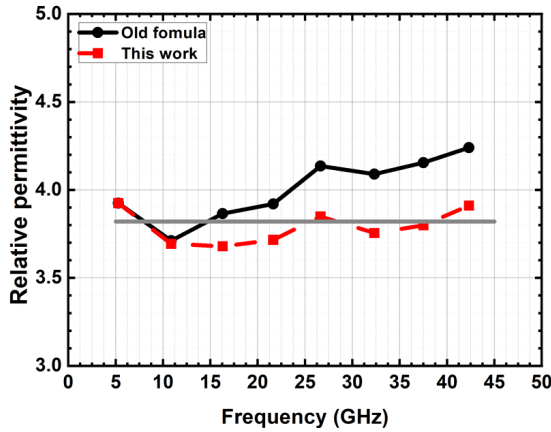
위에서 언급된 바와 같이 링 공진기에서의 주파수 종속적 오차를 보완하기 위해 본 논문에서는 주파수 종속적인 공진 반지름 변화를 식 (14) 및 식 (15)와 같이 제안하였다. 식 (15)는 그림 7의 전자기적 분포 평균 반지름의 주파수 종속 현상을 반영하여 제안된 함수이다. 증가되는 전자기적 평균 반지름의 오차 기울기는 α 로 표현하였으며 각 공진기마다 차이가 존재하지만 차이는 9.7 % 이내의 범위로서 미미하기에 각 3개의 case의 기울기를 산술 평균값으로 계산 및 적용하였다.

$$f_n = \frac{nc}{2\pi[r + \Delta r(f_n)] \sqrt{\epsilon_{eff}(f)}} \quad (14)$$

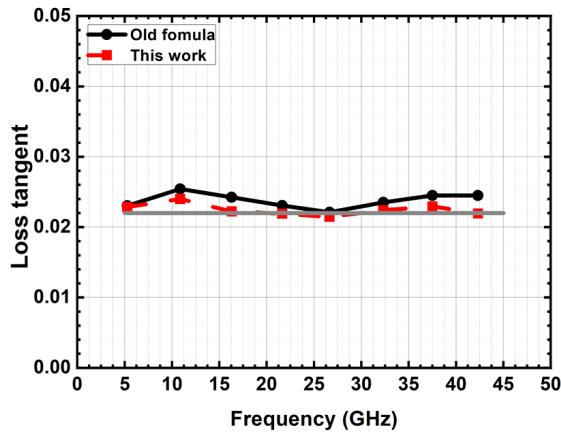
$$\Delta r(f_n) = \alpha \times (f_n - f_1) \quad (15)$$

V. EM 모의실험을 통한 주파수 종속성 보정 검증

제안하는 주파수 종속성 보정방법을 검증하기 위해 EM 모의실험을 이용하여 검증을 진행하고자 한다. 검증 방식은 다음과 같다. EM 모의실험은 모든 주파수에서 입력된 복소 유전율이 일정하게 적용되기 때문에 이를 기준으로 추출되는 복소 유전율이 입력된 복소 유전율의



(a) 상대 유전율
(a) Relative permittivity



(b) 유전손실
(b) Loss tangent

그림 8. EM 모의실험 기반 5 GHz 링 공진기의 주파수 종속성 알고리즘 적용 후 비교 결과

Fig. 8. Comparison result after applying frequency dependence algorithm of 5 GHz ring resonator based on EM simulation.

표 1. 알고리즘 측정 오차율 비교

Table 1. Comparison of algorithms measurement error rate.

	Conventional method	This work
Error rate of ϵ_r	7.62 %	3.67 %
Error rate of $\tan\delta$	23.8 %	15.4 %

복원에 얼마나 가까운지 확인하였다.

그림 8(a)와 그림 8(b)는 공진주파수가 5 GHz인 링 공진기의 EM 모의실험 결과값을 토대로 전류 밀도 반경 보정 전후의 상대 유전율과 유전손실값이다. EM 모의실험 조건은 III절에서 언급된 근사유전율과 손실함수를 넣어 검증을 진행하였다. 해당 방식의 검증을 진행하기 위해 설계된 링 공진기 layout에 유전율과 유전손실값을 대입하여 모의실험 결과와 비교하였다. 레퍼런스값은 EM 모의실험에 입력된 복소 유전율이다.

입력된 레퍼런스값은 유전율 3.82, 유전손실 0.02 값이며, 표 1은 대입한 값을 추출된 값에 나누었을 때 계산되는 오차율이다.

이를 통해 복원한 값을 입력된 레퍼런스값인 유전율과 유전손실로 나눈 결과 상대 유전율의 측정 오차율은 최대 3.67 % 유전손실의 최대 측정 오차율은 15.4 %로 확인할 수 있다.

VI. 주파수 종속성을 보정한 마이크로스트립 라인 기법 기반 EMC의 복소 유전율 측정

그림 9는 그림 5의 측정 결과를 토대로 유전율과 유전손실을 식 (1) 및 식 (2)에 대입하여 r_{mean} 값을 계산하였고, 이 때 5 GHz 링 공진기의 r_{mean} 은 5.2 mm로 계산되었다. EMC 시료 위에 제작되었으며, 시료의 두께는 170 μ m, metal의 두께는 5 μ m로 제작되었다. 제작된 링 공진기의 공진 주파수는 5 GHz, 10 GHz, 15 GHz, 20 GHz, 30 GHz로 다양하게 설계하였지만, n=1일 때 공진 주파수가 15 GHz 이상의 경우 측정된 삽입 손실이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 공진 주파수가 높아짐에 따라 링 지름의 크기가 작아지게 되는데, 이로 인해 링 회로에서의 커플링 현상이 발생하기 쉬워지게 되며, 삽입 손실이 감소

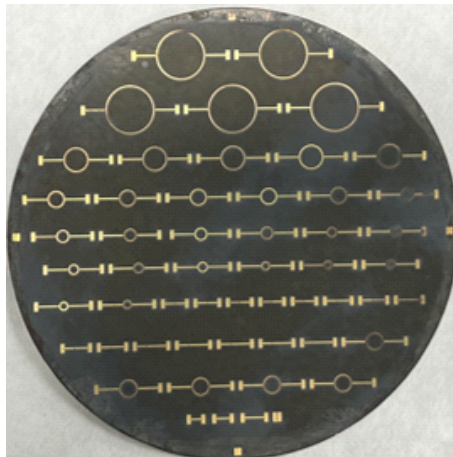


그림 9. EMC 웨이퍼에 제작된 링 공진기
Fig. 9. Fabricated of ring resonator on EMC wafer.

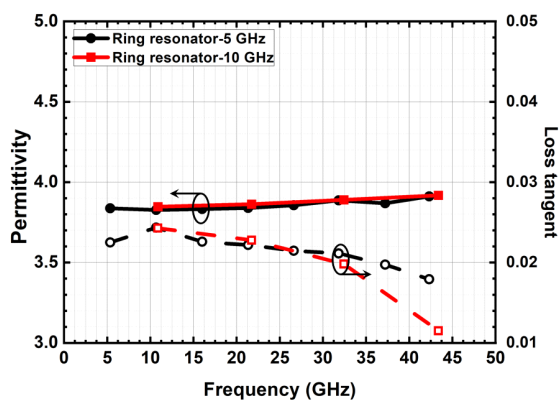


그림 10. 주파수 종속성 알고리즘을 적용하여 추출된 EMC의 상대 유전율 및 유전손실
Fig. 10. ϵ_r and $\tan\delta$ of EMC extracted by applying frequency dependence algorithm.

하는 현상이 발생한다. 결과적으로 $n=1$ 에서 높은 공진 주파수의 링 공진기는 유전손실 측정에서의 불확도가 높아지는 것을 확인하였다^[14].

따라서 정교한 유전율 측정을 진행하기 위해 삽입 손실이 -20 dB 이하로 측정된 링 공진기를 이용하여 산란 계수를 측정하였으며, 제안한 주파수 종속성 알고리즘을 식 (1) 및 식 (8)에 적용하여 EMC 시료의 유전율을 추출하였고, 식 (9)~식 (13)을 이용하여 유전손실을 도출하였다. 결과는 그림 10과 표 2 및 표 3에 나타나 있다. 이때 5.334 GHz에서 도출된 상대 유전율은 3.836이며, 유전손

표 2. 주파수 종속성 알고리즘을 적용하여 추출된 EMC의 상대 유전율

Table 2. ϵ_r of EMC extracted by applying frequency dependence algorithm.

Relative permittivity	Frequency (GHz)							
	5	10	15	20	25	30	35	40
Ring resonator - 5 GHz	3.836	3.827	3.832	3.839	3.856	3.887	3.869	3.911
Ring resonator - 10 GHz	·	3.846	·	3.862	·	3.889	·	3.917

표 3. 주파수 종속성 알고리즘을 적용하여 추출된 EMC의 유전손실

Table 3. $\tan\delta$ of EMC extracted by applying frequency dependence algorithm.

Loss tangent	Frequency (GHz)							
	5	10	15	20	25	30	35	40
Ring resonator - 5 GHz	0.022	0.024	0.022	0.022	0.021	0.021	0.019	0.017
Ring resonator - 10 GHz	·	0.024	·	0.022	·	0.019	·	0.011

실은 0.022로 도출되었다.

VII. 결 론

본 논문은 FOWLP 공정에서 packaging 시료로 사용되는 EMC의 전기적 특성을 반영하고자 유전율과 유전손실의 측정을 진행하였다. 링 공진기 기반 측정 방식을 이용하여 복소 유전율을 측정하였으며, 기존 식으로 도출되는 유전율의 오차를 줄이고자 체배 주파수에서의 전류분포를 반영하는 유전율 산출 식을 제안하였다. 이를 통해 좀더 정교하게 복소 유전율을 산출하였다. 제안된 기법으로 측정된 5 GHz에서 EMC의 상대 유전율은 3.836, 유전손실은 0.022이며, 기존 알고리즘 대비 상대 유전율의 측정 오차율은 3.95 %p, 유전손실의 측정 오차율은 8.4 %p 개선되었다.

References

- [1] T. Braun, T. D. Nguyen, S. Voges, M. Wöhrmann, R. Gernhardt, and K. F. Becker, et al., "Fan-out wafer level packaging of GaN components for RF applications," in *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference(ECTC)*, Orlando, FL, Jun. 2020, pp. 7-13.
- [2] Y. C. Son, "Fan-out wafer-level packaging(FOWLP) technology trends," *Electrical & Materials*, vol. 34, no. 2, pp. 4-11, Apr. 2021.
- [3] D. Popovic, L. McCartney, C. Beasley, M. Lazebnik, M. Okoniewski, and S. C. Hagness, et al., "Precision open-ended coaxial probes for *in vivo* and *ex vivo* dielectric spectroscopy of biological tissues at microwave frequencies," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 53, no. 5, pp. 1713-1722, May 2005.
- [4] D. K. Ghodgaonkar, V. V. Varadan, and V. K. Varadan, "A free-space method for measurement of dielectric constants and loss tangents at microwave frequencies," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 38, no. 3, pp. 789-793, Jun. 1989.
- [5] R. S. Hassan, S. I. Park, A. K. Arya, and S. Kim, "Continuous characterization of permittivity over a wide bandwidth using a cavity resonator," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 20, no. 1, pp. 39-44, Jan. 2020.
- [6] S. Y. Jang, J. R. Yang, "Double split-ring resonator for dielectric constant measurement of solids and liquids," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 2, pp. 122-128, Mar. 2022.
- [7] A. M. Nicolson, G. F. Ross, "Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, no. 4, pp. 377-382, Nov. 1970.
- [8] C. C. Yu, K. Chang, "Transmission-line analysis of a capacitively coupled microstrip-ring resonator," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 1, pp. 2018-2024, Nov. 1997.
- [9] A. Rashdian, M. T. Aligodarz, and D. M. Klymyshyn, "Dielectric characterization of materials using a modified microstrip ring resonator technique," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 19, no. 7, pp. 1392-1399, Aug. 2012.
- [10] J. Svacina, "Analysis of multilayer microstrip lines by a conformal mapping method," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 40, no. 4, pp. 769-772, Apr. 1992.
- [11] M. V. Schneider, "Dielectric loss in integrated microwave circuits," *The Bell System Technical Journal*, vol. 48, no. 7, pp. 2325-2332, Sep. 1969.
- [12] K. C. Gupta, R. Garg, I. Bahl, and P. Bhartia, *Microstrip Lines and Slotlines*, London, Artech House, vol. 2, pp. 83-87, 1996.
- [13] J. Coonrod, "Characterizing circuit materials at mmWave frequencies: Different dielectric constant measurement methods provide different results," 2019. Available: <https://www.microwavejournal.com/articles/32237-characterizing-circuit-materials-at-mmwave-frequencies?page=2>
- [14] K. Chang. *Microwave Ring Circuits and Antennas*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 77-81, 1996.

임 시 언 [한국외국어대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6902-6730>



2021년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)

2021년 3월~현재: 한국외국어대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] 물질 상수 측정, RF 수동 소자, RFIC 및 전력증폭기 설계 등

박 초 윤 [한국외국어대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5633-8682>



2022년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)

2022년 9월~현재: 한국외국어대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] RF 수동소자 설계, RFIC 설계, 물질 상수 측정 및 모델링 등

윤 홍 선 [한국외국어대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-1990-1648>



2016년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)

2016년 3월~2018년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학석사)

2018년 3월~현재: 한국외국어대학교 전자공학과 박사과정

[주 관심분야] RFIC 및 고효율 RF 전력증폭기 설계, 인공지능 기반 반도체 설계 등

강 미 향 [한국외국어대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7675-9302>



2020년 8월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)

2020년 9월~2022년 9월: 한국외국어대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] RFIC 설계, 딥러닝 기반 RF 전력증폭기 설계 모델링 등

차 준 우 [한국외국어대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-9808-1408>



2020년 2월: 한국외국어대학교 전자공학과 (공학사)

2022년 3월~현재: 한국외국어대학교 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] RFIC 설계, 인공지능 기반 반도체 설계, EMC 등

박 영 철 [한국외국어대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-6275-4957>



1992년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학사)

1994년 2월: 연세대학교 전기공학과 (공학석사)

2004년 2월: 미국 Georgia Institute of Tech. ECE (공학박사)

1994년~2007년: 삼성전자 정보통신총괄

2007년~현재: 한국외국어대학교 전자공학과 교수

[주 관심분야] 딥러닝 기반 RF 전력증폭기 설계 및 모델링, 생체 물질상수 측정 및 모델링, 인공지능 기반 반도체 설계 등