

# LTCC 기판의 고주파 특성 측정에 관한 연구

## (A Study on Measurement for High frequency Properties of LTCC Substrates)

이영신, 김경철, 박성대, 박종철  
전자부품연구원 고주파재료연구센터  
(cockar@nuri.keti.re.kr)

### 1. Introduction

고주파 회로 구현을 위한 기판의 특성 중 핵심적인 요소들은 낮은 전기적 손실, 높은 열 전달율, 낮은 열팽창 계수, 전극 패터닝의 우수한 계면접합 특성 등이라고 볼 수 있다. 이 중 유전손실 특성 혹은 신호전송 손실 특성이 고주파 회로 구현에 있어 매우 중요한 항목이며, 일반적으로  $\tan\delta$ 가 0.001 이하가 되면 우수한 저손실 특성을 가진다고 볼 수 있다. 보고된 바에 의하면 99% Alumina, fused Quartz, Polystyrene, PTFE등이 이러한 유전손실 특성을 나타내고 있다<sup>[1]</sup>. 반면 이러한 기존의 PCB 재료나 HTCC 기판에서 구현하기 어려웠던 수동소자를 기판 내부로 집적화할 뿐 아니라 높은 전기 전도도를 지닌 Ag 전극을 이용, 고성능을 피할 수 있다는 측면에서 최근 LTCC 기판 재료가 각광을 받고 있다. 기판 재료로서의 LTCC는 현재 인덕터, 캐패시터, 저항 등의 수동소자들을 기판 내부에 집적하여 VCO/PLL module, Power Amplifier Module, Antenna Switch Module, Bluetooth Module등에 응용되고 있으며 향후 SOP(System on Package) 형태로의 발전을 꾀하고 있다. 현재 다수의 국내 전자부품 업체들이 LTCC를 이용한 적층 부품 및 모듈의 개발에 나서고 있으나 적층 기판의 구현은 다양한 방식들로 나타나고 있다. 제조된 쉬트를 구매하여 전극 패터닝 및 적층 공정을 통해 기판을 제조하는 것이 일반적이고, 유전체 분말을 구매하여 자체적으로 Casting, 쉬트를 제조하기도 하며 유전체 분말부터 개발하는 경우도 있다. 하지만 자체적으로 개발한 기판의 고주파 특성을 제대로 측정하지 않거나, 유전체 분말을 Pellet형태로 성형 소결하여 Hakki-Colemann 방식을 통해 측정된 단일 주파수에서의 유전률과  $\tan\delta$  값을 응용 주파수와는 무관하게 적용하고 있다. 또한 실제 모듈의 구현에 있어 기판에는 전극이 도포되어 있으며, 따라서 유전체 기판과 전극 패터닝이 하나의 시스템으로서 평가되어야 하며 단일 주파수의 특성이 아닌 다양한 주파수(Swept Frequency)에서의 특성들이 측정되어야 한다.

이 논문은 LTCC의 응용범위가 날로 확장되어 가고 있음에도 불구하고 상대적으로 미약한 기판 시스템의 특성 측정 방식에 대해 논의하고자 한다. 본 연구에서는 마이크로 스트립 Ring 공진기와 Series-Gap 공진기를 이용하여 주파수에 따른 기판의 유전특성 및 신호 손실을 측정하였다. 또한 FR-4, Duroid, Teflon등 기존의 상용 PCB 기판들과의 비교도 시도하였다.

### 2. Experimental

Ring 공진기와 Series-Gap 공진기는 입출력에 Gap을 두고 Gap Coupling을 이용하여 공진기의

공진특성을 측정하는 방식이다. 각 방식들은 각기 구조상 장단점을 가지는 데, Ring 공진기의 경우는 End Effect가 없으므로 Radiation Loss 부분을 무시할 수 있어 기판의 Q값 측정에 많이 이용되고 있다. 그러나 LTCC 기판의 경우 전극과 기판의 동시 수축 소결이 이루어지므로 Ring의 굴곡을 일정하게 유지하는 데 어려움이 있으며 또한 Ring의 전기적 길이를 정확하게 측정하기 어렵다. 따라서 유효 유전률의 측정에는 Ring 공진기보다는 선로의 전기적 길이를 상대적으로 정확하게 측정할 수 있는 Series-Gap 공진기가 유리하다고 볼 수 있다. 그러나 Series-Gap 공진기의 경우 기판 손실의 측정시 방사손실 부분을 보정해주기 위해 Metal Cavity 내부에 시편을 두고 측정해야하는 번거로움이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 각 방식의 장점을 이용하여 유전율 측정은 Series-Gap 방식을 이용하고 기판 손실 특성은 Ring 공진기 방식을 이용하였다.

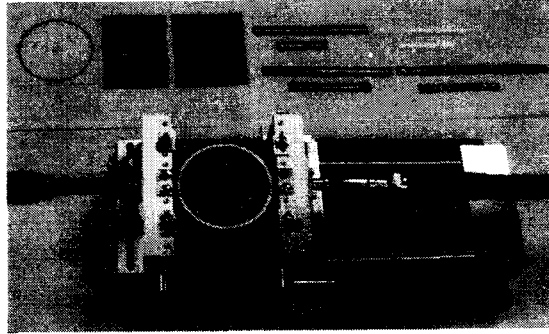
다음의 표 1에 실험에 적용한 기판 시스템들을 정리하였다. 9599 기판은 DuPont사의 9599 Glass-Ceramic Powder를 이용하여 당 연구원에서 자체 제작한 쉬트로 50um Green Sheet를 70℃에서 20초간 5 ton으로 가압한 뒤, 10분간 3000 psi로 유압한 후 소성한 것이다. 전극 패터닝 공정 중 Screen Printing은 325 mesh와 10um Emulsion mask를 사용하였으며 Photo Lithography 공정은 Cofiring과 Post-Firing 모두 실시하였다. PCB들은 Positive Etching 방식을 이용하였으며 노광시간은 모두 2분으로 하였다.

Substrate	Conductor	Patterning Process	ID
9599	DuPont 6146(Ag/Pd)	Screen Printing	[6K]
	DuPont 6142D(Ag)	Screen Printing	[2K]
	대주정밀 (Ag)	Screen Printing	[DJ]
	DuPont 6453 (Photoimagible Ag)	Screen Printing	[3K]
		Photo Lithography(Cofiring)	[F1]
		Photo Lithography(Post-Firing)	[F2]
DuPont 951AT	DuPont 6142D(Ag)	Screen Printing	[2D]
FR-4	1 OZ Cu	Etching	[FR]
Teflon	1 OZ Cu	Etching	[T]
Duroid RO3003	0.5 OZ Cu	Etching	[RO]
Duroid RT5880	0.5 OZ Cu	Etching	[RT]

표 1) 본 연구에 적용한 기판 시스템

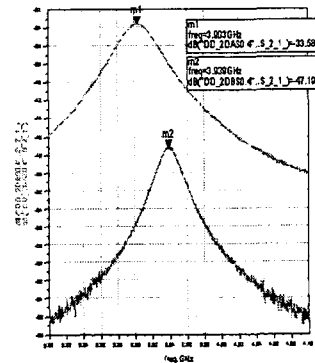
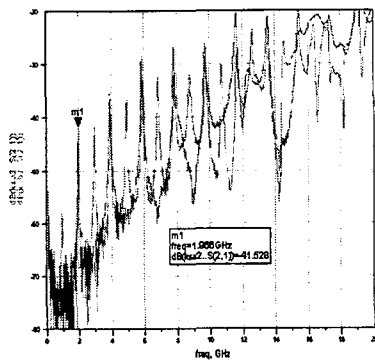
(H=500 $\mu$ m for LTCC, Duroid, H=800 $\mu$ m for FR-4, H=625 $\mu$ m for Teflon)

시편은 모두 마이크로 스트립라인 구조로 측정은 ICM社의 Substrate Test Fixture인 WK3001G를 이용하였으며 측정장비는 HP 8510C Network Analyzer를 사용하였다. 우선 45MHz~20GHz 까지 TRL Calibration을 수행하고 광대역에서의 공진 주파수와 공진유무를 확인한 뒤, 각 공진 주파수를 기준으로 100~200MHz의 협대역으로 다시 Calibration을 한 후 Peak S<sub>21</sub>과 3dB 대역폭을 측정하였다. 측정시 주파수 포인트는 801로 고정하였으며 낮은 신호크기때문에 Averaging Factor를 10~20을 주면서 측정하였다. 그림 1은 측정 시스템을 보여주고 있다.

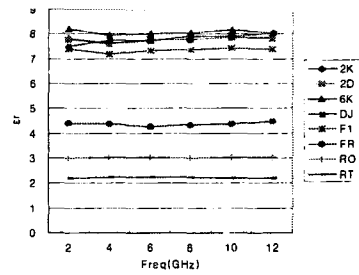
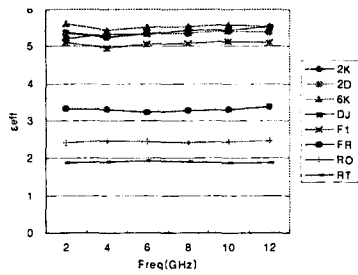


### A. 유효 유전률 측정 :Series-Gap Resonator Method

마이크로 스트립 구조에서는 신호라인이 서로 다른 유전률을 가진 매질사이에 있으므로 신호가 취하는 유효 유전률이 따로 존재하며 또한 주파수에 따른 전자기 필드의 분포 변화는 신호의 위상속도의 변화를 일으켜 Dispersion 특성을 나타내게 된다. 따라서 마이크로 스트립 구조에서 유효 유전률의 정확한 도출은 회로 설계에 매우 중요하다고 볼 수 있다. 앞서 얘기했듯이 Series-Gap 공진기는 Dispersion 특성, 즉 유효유전률 측정에 매우 유용하다. 제작된 시편은 기준 공진 주파수가 1GHz와 2GHz가 되도록 제작되었으며, 측정시 Loading 효과를 줄여  $Q_e$ 가 무시될 수 있도록 Peak  $S_{21}$ 이 약 -30dB 이하의 미약한 커플링이 되도록 커플링 간격을 0.2mm 정도로 하였다. 여기서 적용한 2 포트 Series Gap 공진기는 Open 공진기로 공진은 선로의 전기적 길이가  $\lambda/2$  와 그의 정수배에서 발생하며 Gap에서의 커플링이 작으므로 입사파의 대부분은 반사되는 특성을 갖는다. 입출력과 공진라인은 특성 임피던스가 50Ω이 되도록 설계 했으며 선로의 길이는 Open Effect를 보정한 길이로 적용하였다. 다음의 그림 2는 [2K] 기판 시스템에서 두 공진기의 광대역 특성을 나타내고 있고, 그림 3는 1GHz의 4차 하모닉 성분과 2GHz의 2차 하모닉을 협대역에서 측정 한 결과이다.



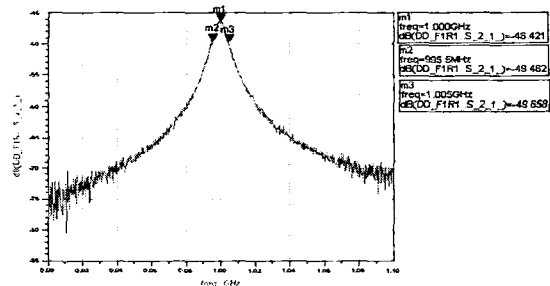
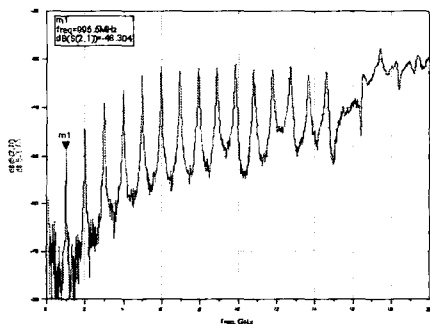
유효 유전률의 유도는 두 공진기의 공진 주파수 차이와 실측정된 공진기 전기적 길이를 이용하게 된다.<sup>[2][3]</sup> 그림 2에서 공진 Peak가 약 15GHz 이상에서는 나타나지 않는 이유는 측정지그에서 공진 주파수의 커플링보다 입출력 커플링이 커지기 때문으로 보인다. 그림 4은 Series-Gap 공진기가 구현된 각 기판 시스템의 주파수에 따른 유효유전률을 나타내고 있으며 이 값을 통해 유도된 상대 유전률은 그림 5에서 보여주고 있다.



그림에서 보듯 9599 기판 시스템을 기준으로 볼 때, 6146 Ag/Pd 전극을 사용한 경우에는 유전률이 높게 나왔고, 광 Lithography 공정을 적용한 경우에는 유전률이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이것은 전극과 기판의 동시 소성시 거동의 차이에서 기인한 것이라 볼 수 있으며 또한 수축률의 차이가 이로부터 발생하여 선로의 임피던스가 다소 차이를 가진 것이라고 볼 수 있다. 일반적으로 모듈 제작시 내부전극과 외부전극이 동일 모듈에 혼합되어 소성되므로(Mixed Metal System) 이러한 특성 차이를 고려하여 모듈 설계가 이루어져야 한다고 본다. 또한 흥미로운 점은 유효 유전률이 낮게 측정되었다는 것은 기판 두께가 얇아지는 효과, 즉 Dispersion 특성이 향상됨을 의미한다고 볼 수 있다. 참고로 6142D 전극을 사용한 경우와 PCB 기판의 측정 결과는 기판 공급자가 제시한 사양과 거의 일치하였다.

**\* 기판손실 측정 : Ring Resonator Method**

앞서 말한 바와 같이 Ring 공진기는 End Effect가 존재하지 않으므로 기판 손실 측정시 방사손실을 거의 무시할 수 있어 이 방식을 통해 가장 정확한 측정값을 얻을 수 있다. Ring 공진기는 2-Port 측정시 Ring의 원주가 공진주파수의 한 파장의 길이가 되도록 하였고, 기준 공진 주파수는 1GHz로 하였다. 입출력 라인은 50Ω 선폭이며, 공진기는 신호전송이 잘 되도록 35Ω으로 설계하였다. 역시 Ring 공진기도 Loosely 커플링이 되도록 커플링 간격을 0.2mm로 하였다. 그림 6은 9599 기판에 6453 감광성 은전극을 광 리소그래피 공정으로 제작한 시편([F1])의 광대역 측정 결과이다. 그림 7은 1GHz 기준 공진 Peak를 협대역에서 측정한 결과이다.



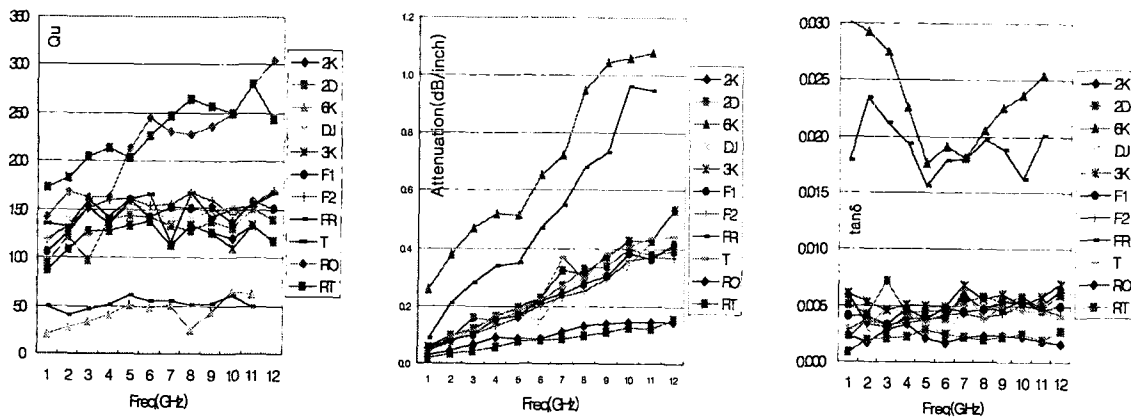
일단 측정된 공진주파수, 3dB 대역폭, Peak S<sub>21</sub>을 이용하여 무부하 Q값을 얻고, 기판의 표면조도 등 측정된 물성치와 계산식을 통해 기판의 신호감쇄특성과 유전손실 값을 구할 수 있다.<sup>[2][4]</sup> 한 예로 [F1]의 기판손실을 유도한 과정을 다음의 표에 정리하였다. [F1]의 경우 전극의 평균 표면조도 측정값은 0.45 $\mu$ m, Skin Depth는 2.037 $\mu$ m, 표면저항은 0.008로 일반적인 계산식에 의거하여 기판 시

스텝의 전체손실과 유전체 손실을 유도하였다.<sup>[5]</sup>

$F_r$ [GHz]	1.000	2.001	2.998	3.994	4.982	5.965	6.948	7.919	8.891	9.851	10.825	11.770
3dB BW[MHz]	9.5	16	20	30	32	43	47	54	60	74	70	80
$Q_u$	105.76	126.38	152.48	135.63	159.73	142.50	151.99	151.24	152.62	136.66	158.74	150.93
$a_i$ [dB/inch]	0.049	0.083	0.103	0.154	0.163	0.22	0.241	0.276	0.308	0.382	0.362	0.415
$\tan\delta$	0.00427	0.00428	0.00353	0.00499	0.00394	0.005	0.0045	0.0047	0.0048	0.0056	0.0046	0.0051

표 2) [F1] 의 기판 손실 측정 결과

그림 8에는 각 기판 시스템의 Unloaded Q값을 나타내고 있다. 그림 9에는 기판 시스템의 전체 손실을 dB/inch로 나타내어 비교하였으며 그림 10는 유전체 손실값인  $\tan\delta$ 를 나타내고 있다.



그림에서 보듯 LTCC 기판 시스템의  $Q_u$ 값과  $\tan\delta$ 는 주파수에 따른 변화가 크게 없었으나 전체 시스템의 손실을 나타내는 Attenuation 특성을 보면 주파수 증가에 따라 지속적으로 증가함을 알 수 있었다. 즉 주파수 증가에 따른 전체 시스템의 손실은 전극 손실이 지배적이라는 것을 알 수 있었으며, 상대적으로 스크린 프린팅 방식보다 광 리소그래피 공정을 통한 패터닝이 Attenuation 측면에서 보았을 때 약 20~30% 손실이 줄었음을 알 수 있었다. 그러나 X-band 이상에서 주로 이용되는 Duroid 기판에 비해서는 손실이 매우 컸으면 주파수 의존도도 높다는 것을 알 수 있었고, 따라서 현재의 LTCC 기판 시스템의 주파수 응용범위가 다소 제한적임을 확인할 수 있었다.

### 3. Conclusion

기판의 특성 측정, 특히 고주파 손실 및 유전특성 측정에서 유전체 기판과 사용 전극 및 전극 패터닝 공정이 결합되어 하나의 시스템으로 평가되어야 한다. 앞서 실험 결과에서 보듯이 LTCC의 경우 시스템마다 상이한 소결 수축 과정, 전극의 계면 접합 특성의 차이, 도체간 전기 전도도의 차이등으로 인해 유전특성 및 신호손실도 차이를 나타내었다. 또한 동일한 유전체 기판에서 전극

패터닝을 스크린 프린팅과 광 리소그래피, 두가지로 적용한 결과, 후자가 유전특성 및 Attenuation 모두 향상되었음을 확인하였다. 그리고 현재 본 연구진이 사용하고 있는 9599 기판 시스템을 기존 PCB와 비교해 보았을 때, 모듈의 단자전극에 쓰이는 6146 Ag/Pd 전극을 제외한 내부전극 시스템은 대략 5GHz 이하에서는 Duroid와 유사한 손실값을 보이지만 이 이상의 주파수 증가에 따라 시스템의 전체 손실이 크게 증가함을 확인할 수 있었다.

또한 이번 실험을 통해 기판 특성 방식에 대한 평가도 진행하였다. 앞서 설명한 바와 같이 유전률 측정은 Series-Gap 공진기 방식이 유효했으며, End Effect가 없는 Ring 공진기 방식은 기판의 손실 특성을 측정, 유도하는 데 효과적이었다.

## References

- [1] James Baker-Jarvis et al, Dielectric and Conductor Loss Characterization and Measurements on Electronic Packaging Materials, NIST Technical Note 1520, 2001
- [2] T.C. Edwards, M.B. Steer, 3rd ed, Foundation of Interconnect and Microstrip Design, John Wiley & Sons, p.325-345, 2000
- [3] Donald A. Rudy, Joseph P. Mendelshon, Philip J. Muniz, Measurement of RF Dielectric Properties with Series Resonant Microstrip Elements, Microwave Journal, Mar 1998
- [4] Thomas S. Laverghetta, A Swept Measurement for Wireless Material Dielectric Constant, p.96-108, Microwave Journal, Sep 1997
- [5] Robert A. Pucel, Daniel J. Masse, Curtis P. Hartwig, Losses in Microstrip, p.342-350, IEEE Trans on MTT, Vol 16, No 6, Jun 1968