Journal of the Microelectronics & Packaging Society
Vol. 9, No. 3, p. 7-12. 2002

LTCC 기판 시스템의 고주파 특성 비교

이영신 · 김경철 · 박성대 · 박종철
전자부품연구원 고주파재료연구센터

A Comparison of High Frequency Properties of LTCC Substrate Systems

Y.S. Lee, K.C. Kim, S.D. Park and J.C. Park
High Frequency Material Research Center, Korea Electronics Technology Institute

초 록: LTCC(Low Temperature Cofiring Ceramics) 기판의 고주파 특성 평가에 있어서, 기판은 전극 패터닝 공정 방식이 결합된 하나의 시스템으로 평가되어야 한다. LTCC의 경우 시스템마다 상이한 소결 수축 과정, 전극과 기판의 접합 특성(matching) 차이, 사용 도체간 전기 전도도의 차이 등으로 인해 유전 특성 및 신호손실이 차이를 나타내었다. 본 논문에서는 FR-4, Duroid, Teflon등 기존의 상용 PCB(Printed Circuit Board) 와의 상대적인 비교를 통해 현재 사용되고 있는 LTCC 기판의 주파수 응용도를 확인하였으며, 20 GHz까지 측정을 수행하였다. 측정방식으로는 Ring 공진기와 Series-Gap 공진기를 활용한 마이크로 스트립 공진기 방법을 채택하였으며, 실험 결과 기판손실 측정은 Ring 공진기 방식이 유효하였으며 유전률 측정은 Series-Gap 공진기 방식이 유효함을 확인하였다. 또한 주파수 증가에 따라 LTCC 기판의 전극 패터닝 방식이 시스템의 손실에 미치는 영향에 대해 분석하였다.

Abstract: In the measurement of the RF properties, the LTCC substrate must be considered as a system including various conductor patterning processes. In this paper, the LTCC substrate system is compared with a conventional PCB(Printed Circuit Board) substrate such as FR-4, Duroid and Teflon, etc. The microstrip resonator method is employed for the measurement of the RF properties in the range of DC to 20 GHz. Experimental results show that the ring resonator method is suitable for system loss measurement, and the series gap resonator method for dielectric constant measurement. The process of conductor patterning and its effect on the system loss were also studied.

Key Words: LTCC, Substrate system, Dielectric constant, Loss, Microstrip resonator method

1. 서 론

고주파 회로 구현을 위한 기판의 특성 중 핵심적인 요소들은 낮은 전기적 손실, 높은 열 전달율, 낮은 열 팽창 계수, 전극 패턴과의 우수한 계면접합 특성 등이라고 볼 수 있다. 이 중 유전손실 특성 혹은 신호 전송 손실 특성이 고주파 회로 구현에 있어 매우 중요한 항목이며, 일반적으로 유전손실(Dielectric loss, tanδ)이 0.001 이하가 되면 우수한 저손실 특성을 가진다고 볼 수 있다. 보고된 바에 의하면 99% alumina, fused quartz, polystyrene, PTFE(Polytetrafluoroethylene)등이 이러한 유전손실 특성을 나타내고 있다[1]. 반면 이러한 기존의 인쇄회로용 기판 재료나 HTCC(High Temperature Cofiring Ceramics) 기판에서 구현하기 어려웠던 수동소자를 기판 내부로 집적화할 뿐 아니라 높은 전기 전도도를 지닌 은 전극을 이용, 고성능을 꾀할 수 있다는 측면에서 최근 LTCC 기판 재료가 각광을 받고 있다. 기판 재료로서의 LTCC는 현재 인덕터, 캐패시터, 저항 등의 수동소자들을 기판 내부에 집적하여 주파수 합성기 모듈(Frequency synthesizer module), 전력증폭기 모듈(Power amplifier module, PAM), 안테나 스위치 모듈(Antenna switch module, ASM), 무선 랜 모듈(Wireless LAN module)등에 응용되고 있으며 향후 SOP(System on package) 형태로의 발전을 꾀하고 있다. 현재 다수의 국내 전자부품 업계들이 LTCC를 이용한 적층 부품 및 모듈의 개발에 나서고 있으나 적층 기판의 구현은 다양한 방식들로 나타나고 있다.

제조된 쉬트(Sheet)를 구매하여 전극 패터닝(Patterning) 및 적층 공정을 통해 기판을 제조하는 것이 일반적이고, 유전체 분말을 구매하여 자체적으로 쉬트를 제조하기도 하며 유전체 분말부터 개발하는 경우도 있다. 하지만 개발된 기판의 고주파 응용은 유전체 재료의 특성에 의존하는 경우가 많다. 또한 재료의 특성은 유전체 분말을 펠렛(Pellet) 형태로 성형 소결한 공진기를 통해 측정되는 것이 일반적이며, 이 경우 단일 주파수에서의 유전률과 유전손실 값을 응용 주파수와는 무관하게 적용되는 단점이 있다. 실제 모듈을 구현할 경우에는 기판에 전극이 도포되어 있으며, 따라서 유전체 기판과 전극 패터닝(Patterning)이 하나의 시스템으로서 평가되어야 한다. 또한 단일 주파수의 특성이 아닌 다양한 주파수에서의 특성들이 측정되어야 한다.

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

2. 실험방법

Ring 공진기와 Series-Gap 공진기는 입출력에 간극(Gap)을 두고 여기서의 커플링(Coupling)을 이용하여 공진기의 공진특성을 측정하는 방식이다. 각 방식들은 각기 구조상 장단점을 가지는 데, Ring 공진기의 경우는 종단효과(End-effect)가 없으므로 방사손실을 무시할 수 있어 기판의 품질계수(Q)의 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(Radiation loss) 부분을 보정해주는 장치를 이용하여 측정해야하는 번거로움이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 각 방식의 장점을 이용하여 유전율 측정은 Series-Gap 방식을 이용하고 기판 손실 특성은 Ring 공진기 방식을 이용하였다.

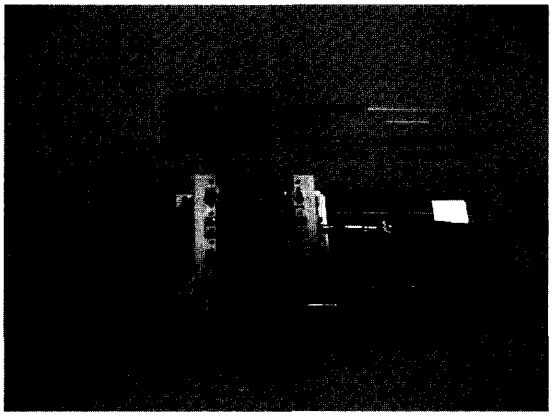

Fig 1. Ring resonator and series gap resonator in fixture.

Table 1. The employed substrate systems for experiment(Substarte height(H) is 500 μm for LTCC, Duroid, 800 μm for FR-4, and 625 μm for Teflon)

Substrate	Conductor	Patterning process	ID
9599	DuPont 6146(Ag/Pd)	Screen printing	[6K]
	DuPont 6142D(Ag)	Screen printing	[2K]
	대주정밀 9086LS (Ag)	Screen printing	[DJ]
	DuPont 6453 (Photoimageable 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]

다음의 Table 1에 실험에 적용한 기판 시스템들을 정리하였다. 여기서 9599 기판은 DuPont社에서 공급한 유전체 분말을 이용하여 제작된 것이다.

제작된 시편은 모두 마이크로 스트립라인 구조로 측정은 ICM社의 기판 측정 치구(Substrate test fixture)인 WK3001G를 이용하였으며 측정장비는 HP社의 8510C 네트웍 분석기를 사용하였다. Fig. 1은 측정 시스템을 보여주고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. Series-Gap 공진기를 이용한 유전률 측정

마이크로 스트립 구조에서는 선로가 서로 다른 유전률을 가진 매질사이에 있으므로 신호가 취하는 유효 유전률이 따로 존재하며 또한 주파수에 따른 전자기 필드(Field)의 분포 변화는 신호의 위상속도의 변화를 일으켜 신호분산(Dispersion) 특성을 나타내게 된다. 따라서 마이크로 스트립 구조에서 유효 유전률의 정확한 도출은 회로 설계에 매우 중요하다고 볼 수 있다. 앞서 얘기했듯이 Series-Gap 공진기는 신호분산 특성, 특히 유효유전률 측정에 매우 유용하다. 제작된 시편은 기준 공진 주파수가 1 GHz와 2 GHz가 되도록 제작되었으며, 측정시 측정 시스템에 의한 부하(Loading) 효과가 무시될 수 있도록 최대 전송이득(Peak S21)이 약 -30 dB 이하의 미약한 커플링이 되도록 커플링 간격을 정하였다. 여기서 적용한 Series-Gap 공진기는 단락된 공진기로 공진 주파수는 선로의 전기적 길이가 반파장(λ/2)과 그의 정수 배에서 발생하며 공진기와 입출력에서의 커플링이 작으므로 입사파의 대부분은 반사되는 특성을 갖는다. 입출력 선로와 공진기는 특성 임피던스가 50 Ω이 되도록 설계 했으며 선로의 길이는 단락효과를 보정한 길이로 적용하였다. 다음의 Fig. 2는 Table 1의 [2K] 기판 시스템에서 두 공진기의 광대역 특성을 나타내고 있고, Fig. 3은 1 GHz의 4차 하모닉(Harmonic) 성분과 2 GHz의 2차 하모닉 성분을 협대역에서 측정한 결과이다. 이 때 유효 유전률의 유도는 두 공진기의 공진 주파수 차이와 공진기 전기적 길이를 이용하게 된다[2,3]. 그리고 Fig. 2에서 15 GHz 이상에서 공진특성이 왜곡되는 이유는 기판의 유전률이 상대적으로 높아 측정지그에서 공진주파수의 커플링보다 입출력 커플링이 커지기 때문으로 보인다. Fig. 4는 Series-Gap 공진기가 구현된 각 기판 시스템의 주파수에 따른 유효 유전률를 나타내고 있으며 이 값을 통해 유도된 상대 유전률은 Fig. 5에서 보여주고 있다.

그림에서 보듯 Ag/Pd 전극을 사용한 경우에는 유전률이 높게 나왔고, 광 리소그라피(Photo lithogra-

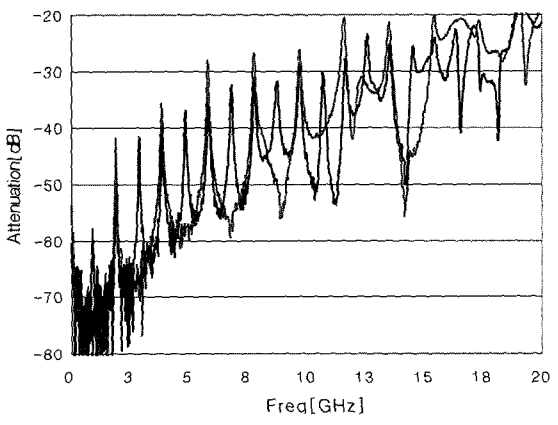

Fig. 2. Broad band measurement of Series gap resonator.

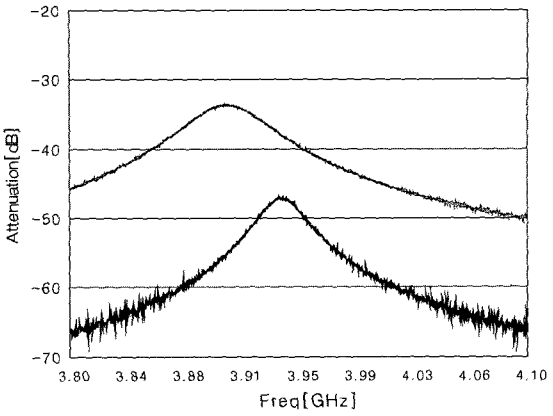

Fig. 3. Narrow band measurement at 4 GHz.

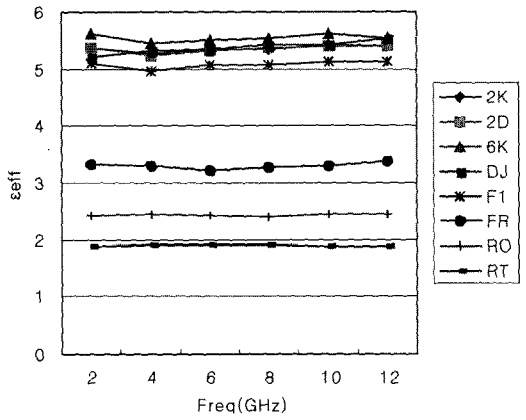

Fig. 4. Effective dielectric constant (ε_{eff}).

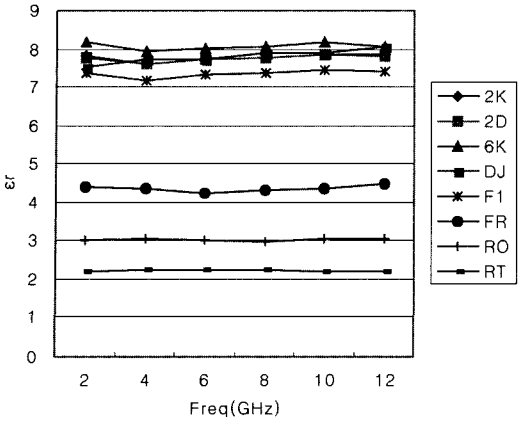

Fig. 5. Relative dielectric constant (ε_r).

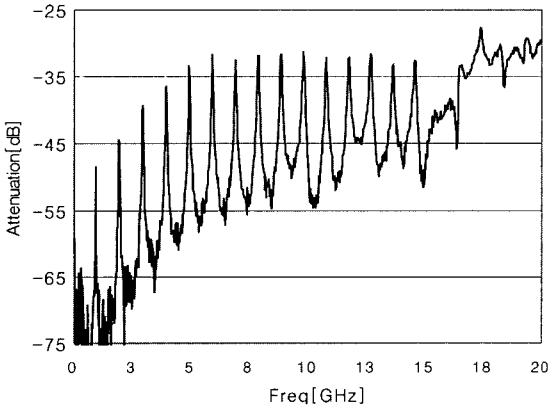

Fig. 6. Broad band measurement of ring resonator.

phy) 공정을 적용한 경우에는 유전률이 낮아지는 경향을 보이고 있다. 이것은 전극과 기판의 소성거동의 차이에서 기인한 것이라 볼 수 있으며 또한 수축률의 차이가 이로부터 발생하여 선로의 임피던스도 다소 차이를 가진 것이라고 볼 수 있다. 일반적으로 모듈 제작시 내부전극과 외부전극이 동일 모듈에 혼합되어 소성되므로 이러한 특성 차이를 고려하여 모듈 설계가 이루어져야 한다고 본다. 또한 흥미로운 점은 유효 유전률이 낮게 측정되었다는 것은 기판 두께가 얇아지는 효과, 즉 신호분산 특성이 향상됨을 의미한다고 볼 수 있다.

3.2. Ring 공진기를 이용한 기판손실 측정

앞서 말한 바와 같이 Ring 공진기는 종단효과가 존재하지 않으므로 기판 손실 측정시 방사손실을 거의 무시할 수 있어 이 방식을 통해 가장 정확한 측정값을 얻을 수 있다. Ring 공진기는 2 포트(Port) 측정시 Ring의 원주가 공진주파수의 한 파장의 길이가 되도록 하였고, 기준 공진 주파수는 1 GHz로 하였다. 입출력 선로는 50 Ω의 임피던스 선폭이며, 공진기는 신호전송이 잘 되도록 35 Ω으로 설계하였다. Fig. 6은 9599 기판에 광 리소그라피 공정을 적용하여 제작한 시편([F1])을 20 GHz까지 광대역에서 측정한 결과이다. Fig. 7은 1 GHz 기준 공진 특성을 협대역에서 측정한 결과이다.

일단 측정된 공진주파수, 3 dB 대역폭, Peak S21을 이용하여 무부하 Q값을 얻고, 기판의 표면거칠기(Surface roughness)등 측정된 물성치와 계산식을 통해 기판의 신호감쇄(Attenuation) 특성과 유전손실 값을 구할 수 있다[2,4]. 한 예로 [F1]의 기판손실을 유도한 과정을 Table 2에 정리하였다. [F1]의 경우 전극의 평균 표면조도 측정값은 0.45 μm, 표피두께(Skin

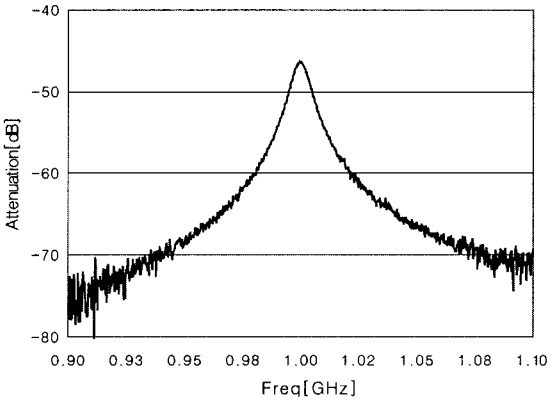

Fig. 7. Narrow band 1st peak of ring resonator.

Table 2. The example of measured results of substrate system, [F1]

Fr[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
3 dB BW[MHz]	9.5	16	20	30	32	43	47	54	60	74	70	80
Qu	105.76	126.38	152.48	135.63	159.73	142.50	151.99	151.24	152.62	136.66	158.74	150.93
α_t[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
tanδ	0.00427	0.00428	0.00353	0.00499	0.00394	0.005	0.0045	0.0047	0.0048	0.0056	0.0046	0.0051

depth)는 2.037 μm, 표면저항은 0.008 Ω으로 계산식에 의거하여 기판 시스템의 전체손실과 유전체 손실을 유도하였다[5].

Fig. 8에는 기판 시스템의 전체 손실을 dB/inch 단위로 나타내어 비교하였으며, Fig. 9는 기판의 유전손실을 나타내는 tanδ를 나타내고 있다.

그림에서 보듯 LTCC 기판 시스템의 무부하 Q값과 유전손실은 주파수에 따른 변화가 크게 없었으나 전

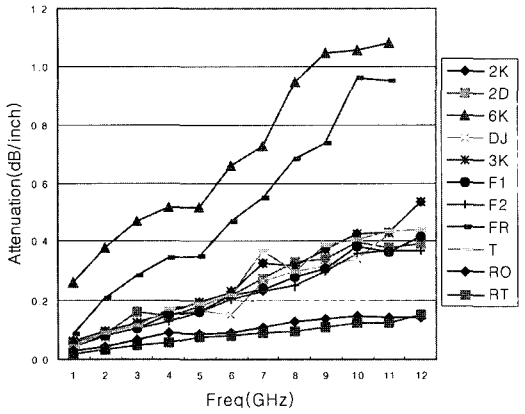

Fig. 8. System loss as frequncy increase.

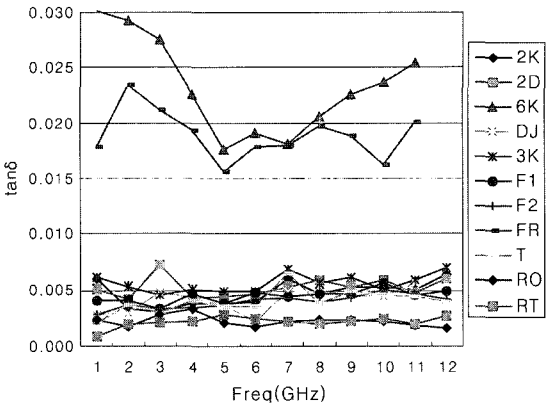

Fig. 9. Dielectric loss as frequncy increase.

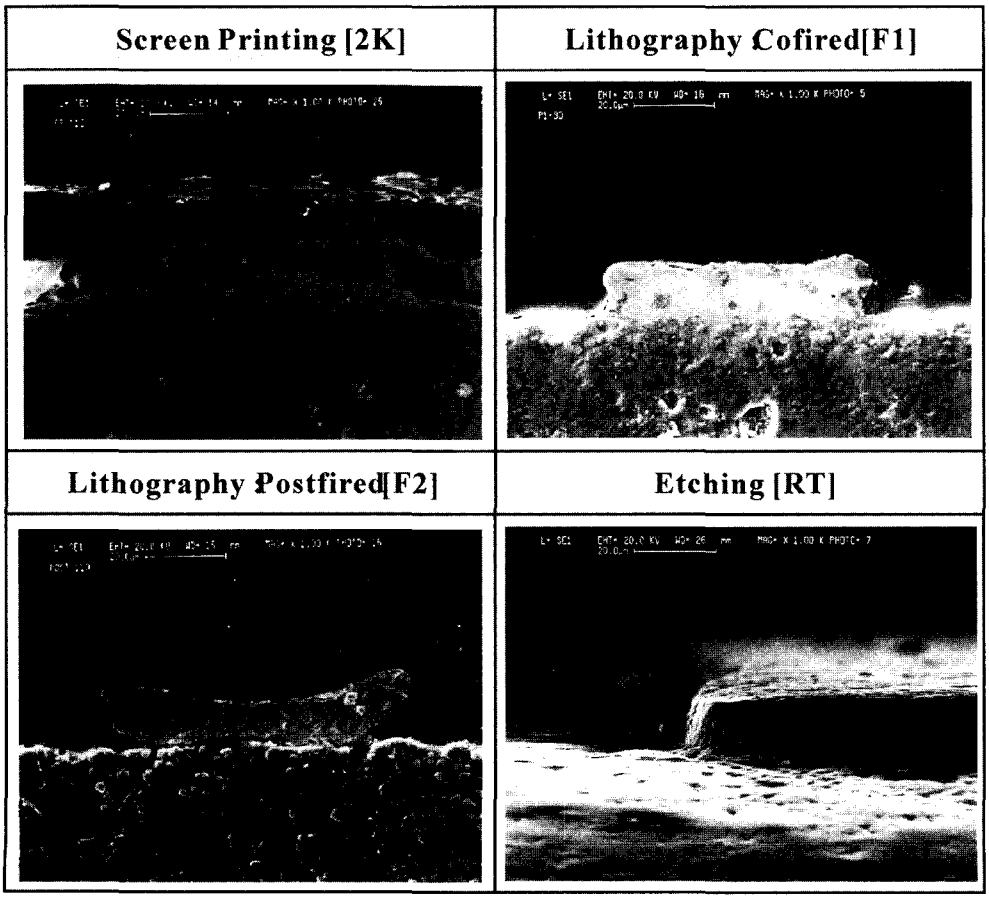

Fig. 10. The line morphology comparison as to patterning processes.

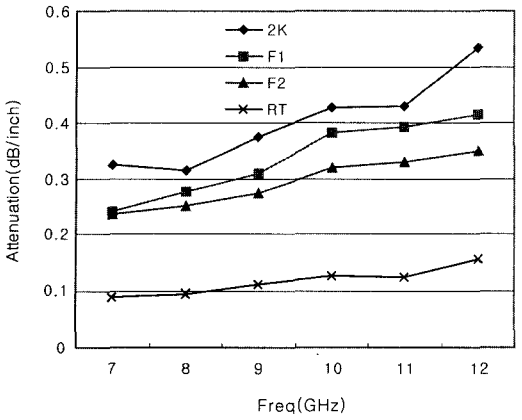

Fig. 11. System loss as to patterning processes at high frequency.

체 시스템의 손실을 나타내는 신호감쇄 특성을 보면 주파수 증가에 따라 지속적으로 증가함을 알 수 있었다. 즉 유전손실은 큰 변화가 없으므로 주파수 증가에 따른 전체 시스템의 손실은 전극 손실에 의한 영향이 지배적이라는 것을 알 수 있었다. 또한 상대적으로 스크린 프린팅(Screen printing) 방식보다 광 리소그라피 공정을 통한 패터닝이 시스템 손실 측면에서 보았을 때 약 20~30% 손실이 줄었음을 알 수 있었다. Fig. 10은 각 패터닝 방식에 따라 형성된 마이크로 스트립 라인의 단면을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 9599 기판 시스템에서 광 리소그라피 방식을 적용한 선로의 물리적 구현도가 스크린 프린팅 방식보다 우수했으며, Fig. 11에서 제시한 것처럼 기판 시스템의 신호감쇄 특성 역시 우수한 것으로 나타났다.

4. 결 론

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 차이 등으로 인해 유전특성 및 신호손실도 차이를 나타내었다. 또한 동일한 유전체 기판에서 전극 패터닝을 스크린 프린팅과 광 리소그라피, 두가지로 적용한 결과, 후자가 유전특성 및 시스템 손실 모두 향상되었음을 확인하였다. 그리고 현재 본 연구진이 고주파 모듈 제작에 적용하고 있는 기판 시스템을 기존 PCB와 비교해 보았을 때, 모듈의 단자전극에 쓰이는 Ag/Pd 전극을 제외한 내부전극 시스템은 대략 6 GHz 이하에서는 Duroid와 유사한 손실값을 보이지만 이 이상의 주파수 증가에 따라 시스템의 전체 손실이 크게 증가함을 확인할 수 있었다.

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

참고문헌

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*, 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*, 86-95, Mar. (1998).
4. Thomas S. Laverghetta, "A Swept Measurement for Wireless Material Dielectric Constant", *Microwave Journal*, 96-108, Sep. (1997).
5. Robert A. Pucel, Daniel J. Masse, Curtis P. Hartwig, "Loses in Microstip", *IEEE Trans on MTT*, 16(6), 342-350 (1968).