

LTCC 공정을 이용한 다중칩모듈 설계의 기초

최돈철, 김성욱, 고현중
필코전자 CHIP사업부
dcchoi@pilkor.co.kr

1. 서 론

현재 3세대 이동통신 규격은 크게 WCDMA, TD-SCDMA, EDGE, DECT, CDMA2000 등 다섯개로 나뉘며 2000년 10월 한국에서 처음으로 3세대 이동통신 시스템인 CDMA2000 1x 규격을 제품화하는데 성공하였다. 이러한 2세대 이동통신에서 3세대 이동통신으로의 점진적인 대체는 자료전송속도의 고속화 요구에 있으며 단말기의 고주파단(FEM) 송수신 성능을 개선하는 것이 선행되어야 한다. 그러나 현재 사용되고 있는 CDMA 2000 이동통신 단말기의 경우 IS95 규격에 최적화된 전력증폭기를 사용하므로 선형성 유지를 위해 출력전력을 제한하여 이론적인 자료전송량에 못미치고 있다. 고속의 자료전송은 전력증폭기의 높은 출력전력을 필요로 하며, 제한된 용량의 배터리를 사용하므로 송신단 전력증폭기를 제외한 고주파단의 저전력 요구는 상대적으로 중요하다. 이와함께 휴대폰의 다중대역-다중모드 지원이 보편화되고, 사용자 편의를 위한 다양한 기능을 만족하기 위해 컬러 LCD, MIDI 합성기, CMOS 카메라, 그리고 강력한 신호처리 프로세서 등의 부품이 부가되어 단말기의 총 소모전류는 최대 1A 에 이르고 있다. 따라서 기존 구성부품의 소형화, 저전력화, 집적화가 요구되고 있으며, 고주파단이 하나의 모듈로 고집적 구현되는 SiP(System in Package) 집적모듈 개발에 대한 관심이 커지고 있다. 이러한 관점에서 저전력, 소형화, 고성능, 다기능성을 위한 SiP 고주파단 집적모듈의 핵심의 하나인 집적기판을 제작하기 위한 LTCC(저온동시소결) 기술은 그 중요성을 갖는다.

본 고는 LTCC 공정을 이용한 다중칩모듈 설계에 기


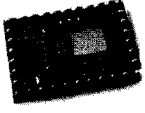

초가 되는 세부 주제로서 LTCC 기술개요 및 응용분야, 유전재료의 고주파 특성평가, FFT(Fast Fourier Transform) 및 MoM (Method of Moment), 수동소자 라이브러리 및 Deembedding, LTCC 고주파 부품 및 모듈 제작 등 다섯 부분으로 구성되며, 각 세부 주제는 정성적 이해 수준으로 언급한다. 본 고는 LTCC 공정을 이용해 고주파 부품 및 모듈을 설계하는 과정에서 저자들이 순차적으로 이해가 필요했던 경험에 기초한 것이다. 또한 국내의 다른 저널에서 LTCC 관련 문헌이 시장수요를 포함한 일반적인 사항을 자세하게 언급하였으므로 다른 각도에서 LTCC 기술을 다루고자 한다.

2. LTCC 개요 및 응용분야

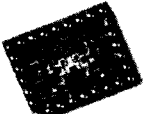

저온동시소결이란 900°C 이하 온도에서 동시소성되는 전극 및 유전체 등 3차원 회로를 구성하는 재료를 기반으로 하여 다층유전체기판에 인덕터, 캐패시터, 저항 등 단위소자를 구현하는 기술과 이들 단위소자를 기판 내 집적하여 기능성 집적기판을 구현하는 기술을 일컫는다. 광의적으로는 저온동시소성이 가능한 유전체 및 전극재료를 기반으로 다기능/고집적/고성능을 목적으로 능동소자와 수동소자를 집적기판 위 표면실장을 통해 단일모듈로 구현하는 기술로서 재료공학, 기계공학, 전자공학이 긴밀히 연계되어야 하는 정보통신분야의 차세대 원천기술이다. 최근에는 페라이트 계열의 자성체를 기반으로 고유전률을 구현하여 자성체도 저온동시소결의 범주에 포함시키는 등 금속, 유전체, 자성체가 집적기판을 구성하는 형태로 발전되고 있다. 즉 전극/유전체/자성체에 대한 동시소성/물질정합 재료기술, 고해상도스

크린/균일박막시트형성/페이스트유동성/정밀적층 공정 기술, 필드해석에 기반한 3차원 회로기술 및 복합모듈의 전자기 시뮬레이션 기법이 종합적으로 요구된다.

응용분야는 단위소자에서 복합모듈에 이르기까지 다양하며, 종래의 인쇄회로기판을 기반으로 한 초고주파 모듈 영역을 빠르게 대체하고 있다. 이것은 LTCC 기술을 통해 구현되는 회로 집적에 대한 필요성 이외에 재료 기술 및 공정기술 안정화로부터 제작단가가 급격히 낮아지고 있는데 기인한다. 수년전부터 캐패시터, 인덕터 등 단위 소자의 생산은 일반화되고 있으며 블루투스 모듈을 개발하는 업체들이 국내외에서 줄을 잇고 있다. 아래는 국외의 블루투스 모듈의 예를 나타낸다. 팔호안은 핵심칩을 LTCC 공정으로 모듈화한 업체명이다.


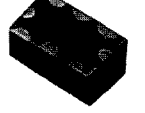


Broadcom(NEC)	Ericsson(Thales)	Philips(Kyocera)
		

이밖에 GSM/DCS, CDMA/PCS, IMT-2000 휴대폰의 RF FEM 부분을 저온동시소결기술로 고집적화하려는 움직임도 일반화되어 있다. 아래는 국외의 RF FEM 일부를 나타낸다.

Sorep	Epcos
	

한편 메모리모듈, BGA 캐리어, 전력증폭기모듈, 밀리미터대역의 각종 RF모듈을 저온동시소결기술로 대체하고 있으며, 칩안테나는 소형화의 필요성 때문에 대역폭 및 신호이득의 열화를 극복하면서 꾸준히 개발되고 있다. 이밖에 대역통과필터(BPF), TDD 통신을 위한 Switch Module, 다중대역용(GSM/DCS/PCS/WCDMA) 안테나 Switch Module 등이 중요한 응용분야이다.

현재 필코전자는 LTCC Foundry Service 제공을 중심으로 저온동시소결기술을 축적하여 휴대폰용 고주파 모듈을 상용화하고 있으며 그 예는 GSM/DCS 안테나 Switch Module, CDMA SAW Duplexer 패키지 등이

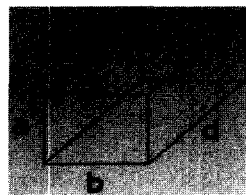
칩안테나	대역통과필터	다이플렉서
		
스위치모듈	전력증폭기모듈	
		

다. 한편 모듈 개발이 목적인 고객사에 대한 설계 지원을 위해 Filter/Balun 등 RF 수동소자, ASIC/Flash/RFIC 등 능동단 회로구성을 위한 고집적 Interconnect 회로 및 SiP(System in Package) 설계에 필요한 Power/Signal 분포의 설계지침 마련을 위한 3차원 회로설계 기준을 구축하고 있다. 개발결과에 대한 사진은 고객사의 허락이 필요하므로 생략한다.

3. LTCC 재료 고주파특성 평가¹⁻³⁾

3차원 회로를 구현하는 구성물질로는 금속전극, 유전체가 일반적이다. 유전체 기판에 대한 유전상수와 손실값을 정량화하는 방법중 Dielectric Resonance 방법에 대해 개괄적으로 다루고자 한다.

Dielectric Resonance 방법은 TE_{018} (공진모드에 대한 Helmholtz 방정식의 해인 Bessel 함수에서 얻은 Mode Chart 를 통해 유전상수와 Loss Tangent 를 구하는 방법으로서 1950년대 말 Illinois 대학의 연구진에 의해 정리되었다. 이를 이해하기 위해 먼저 Rectangular Waveguide Cavity에 대한 기본사항을 정리한다. 도파관 공진기는 양끝단이 접지와 단락된 반파장 전송선 공진기에 해당되며 Rectangular 도파관의 Propagation Constant와 도파관 공진기의 Wavenumber 는 다음과 같이 계산된다.



$$\beta_{mn} = \sqrt{k^2 - \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}, \quad k = \omega\sqrt{\mu\epsilon}$$

$$k_{mnl} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

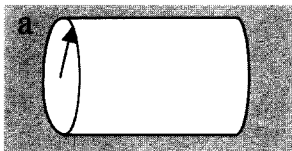
이로부터 TM_{mnl} , TE_{mnl} 모드에 대한 도파관 공진기의 공진주파수는 다음과 같이 표현된다.

$$f_{mnl} = \frac{ck_{mnl}}{2\pi\sqrt{\epsilon_r\mu_r}}$$

$$= c \left[\left(\frac{l}{2d}\right)^2 + \left(\frac{m}{2a}\right)^2 + \left(\frac{n}{2b}\right)^2 \right]^{1/2}$$

위 식에서 단일 공진주파수에 대해 서로 다른 필드 분포를 갖는 다수개의 공진모드가 존재할 수 있음을 주의하게 된다.

Circular Waveguide 또한 TE, TM 모드를 지원하며, 원형 도파관의 양끝을 단락시킨 Cylindrical Waveguide Cavity에 대한 TE_{mnl} 공진모드의 공진주파수는 사각도파관과 같은 방법으로 구한다. 원형 도파관의 Transverse 전자기파는 TM, TE 모드의 전자기파 진행방향인 E_z , H_z 성분을 통해 구하게 된다. 이와 관련된 수식과 공진주파수를 얻게 되는 과정은 간단하게 다음과 같다. Helmholtz 파동방정식의 Cylindrical 좌표계 적용, 미분방정식의 해를 용이하게 얻기위한 수학적 기법, 중간해의 형태, 경계조건, H_z 해로부터 E_ϕ 얻는 등 과정에 대한 설명은 Pozar 책에 개괄적으로 나와있다.



$$\nabla^2 H_z + k^2 H_z = 0$$

$$H(\rho, \phi, z) = h(\rho, \phi)e^{-j\beta z}, \quad h(\rho, \phi) = R(\rho)P(\phi)$$

$$P(\phi) = A\sin k_\phi \phi + B\cos k_\phi \phi, \quad R(\rho) = C J_n(k_c \rho) + D Y_n(k_c \rho) \quad \text{where } k_c = k^2 - \beta^2$$

$$h(\rho, \phi) = (A\sin n\phi + B\cos n\phi) J_n'(k_c \rho) e^{-j\beta z}$$

$$E_\phi(\rho, \phi, z) = \frac{j\omega\mu}{k_c} (A\sin n\phi + B\cos n\phi) J_n'(k_c \rho)$$

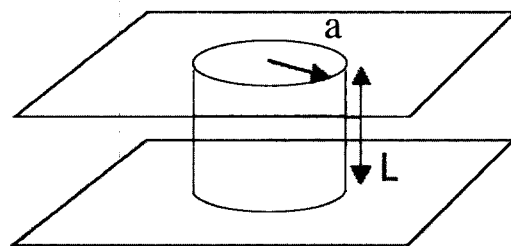
$$J_n'(k_c a) = 0$$

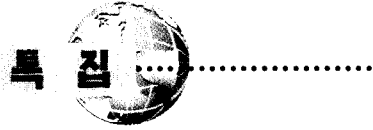
$$f_{lmi} = \frac{c}{2\pi\sqrt{\mu_r\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{p'_{lmi}}{a}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{d}\right)^2}$$

위에서 1종 Bessel 함수의 미분인 $J'_n(x)$ 의 해는 p'_{nm} 이라 정의하며, p'_{nm} 은 J'_n 의 m 번째 해에 해당한다. 즉 p'_{nm} 은 경계조건으로부터 $k_c a$ 와 같게 된다.

한편 Dielectric Resonator 공진모드는 우세한 $TE_{01\phi}$ 공진모드를 갖는 등 Metallic Cavity와 유사하나 인접한 공기중으로 필드 분포가 연장된다는 점이 다르다. 유전체 공진기의 공진모드에 대한 해를 얻는 것은 어렵기 때문에 해를 구하기 용이한 반구(Hemisphere) 공진기를 이용하여 등가적으로 동일한 공진주파수를 얻게 된다. 이때 유전체 공진기가 위치하는 기판의 상태에 따라 필드 분포가 달라짐을 고려해야 한다. 즉 절연성 기판에 놓인 경우 유전체 공진기의 필드는 Oscillating Magnetic Dipole에 의한 것과 유사하게 된다. 한편 접지면에 놓인 경우는 Dipole의 이미지로 인해 Magnetic Quadruple에 의한 것과 유사하게 된다. 다음은 위에서 언급한 사각 혹은 원형 유전체 공진기에 대한 공진주파수를 얻었던 정성적인 이론을 바탕으로 LTCC 재료의 고주파 특성을 얻는 방법을 기술한다.

그림과 같은 봉 형태 유전체 공진기의 TE_{0nl} 모드에 대한 특성 방정식은 Scalar Helmholtz 방정식을 공진기 내부(영역1)와 외부영역(영역2)에 대해 Cylindrical 좌표계에서 풀면 각 영역에 대해서 0차 1종 Bessel Function, 0차 변종 Bessel Function이 포함된 해를 얻게 된다. 이것을 Vector Field로 바꾸면 각 영역에 대해 1차 1종 Bessel Function, 1차 변종 Bessel Function으로 변환된다. 여기에 경계면에서 접선 성분이 연속적이라는 경계치 조건을 통해 0차, 1차의 1종 Bessel Function과 0차, 1차의 변종 Bessel Function이 포함된 TE_{0nl} 모드에 대한 특성방정식을 얻게 된다. 아래에 풀이과정을 간단히 나타낸다.





$$\begin{aligned} \nabla^2 \psi(r) + \omega^2 \mu \epsilon \psi(r) &= 0 \\ \nabla^2 \psi_1(r) + \omega^2 \mu \epsilon_1 \psi_1(r) &= 0 \\ \psi_1(r) &= A_1 J_0(k_1 r) \sin \gamma z, \text{ where } k_1^2 = \omega^2 \mu \epsilon_1 - \gamma^2 \\ (\gamma &= l\pi / L, l = 1, 2, 3, \dots) \\ \nabla^2 \psi_2(r) + \omega^2 \mu \epsilon_0 \psi_2(r) &= 0 \\ \psi_2(r) &= A_2 K_0(k_2 r) \sin \gamma z, \text{ where } k_2^2 = \gamma^2 - \omega^2 \mu \epsilon_0 \\ \alpha \frac{J_0(\alpha)}{J_1(\alpha)} &= -\beta \frac{K_0(\beta)}{K_1(\beta)}, \text{ where } \alpha = ak_1 \text{ and } \beta = ak_2 \end{aligned}$$

TE₀₁₁ 모드에 대한 특성방정식은 초월함수 형태를 띠므로 Wavenumber (Mode Order), 공진기 직경을 통해 도식적인 그래프를 통해 α, β 값을 얻는다. α, β 값은 위 식을 통해 다음과 같이 나타난다.

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{2\pi a}{\lambda_0} \left[K_1 - \left(\frac{c}{v_p} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad \beta = \frac{2\pi a}{\lambda_0} \left[\left(\frac{c}{v_p} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \\ \text{where } \frac{c}{v_p} &= \left(\frac{l \cdot \lambda_0}{2L} \right) \\ \beta &= \frac{2\pi a}{\lambda_0} \left[\left(\frac{l \cdot \lambda_0}{2L} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \Rightarrow K_1 = \left(\frac{\alpha \cdot \lambda_0}{2\pi a} \right)^2 + \left(\frac{l \cdot \lambda_0}{2L} \right)^2 \end{aligned}$$

즉 공진기 직경 및 길이, 축방향으로의 모드차수(l)를 통해 β 를 얻고, 각 β 에 대한 특정 모드(n)에 해당하는 α 값을 Mode Chart를 통해 구하면 위 수식에 따라 유전상수를 얻게 된다. 즉 유전상수(K_1)는 $K_1 = f(\alpha_n, \beta_l)$ 함수형태로 나타난다. 측정오차를 줄이기 위해 다른 크기의 유전체 공진기를 통해 각 공진모드에 대한 유전상수를 각각 구한후 일치하는 값을 찾게 된다.

한편 유전체 손실값인 Loss Tangent는 모드차수, 유전상수, Unloaded Q 측정으로부터 다음의 식을 통해 얻는다.

$$\begin{aligned} \tan \delta &= \frac{1}{Q_0} \left[1 + \frac{1}{K} F(\alpha) G(\beta) \right] - \frac{l_s R_s}{2\pi f^3 \mu^2 K \epsilon_0 l^3} \left[1 + F(\alpha) G(\beta) \right] \\ \text{where } F(\alpha) &= J_1^2(\alpha_n) / [J_1^2(\alpha_n) - J_0(\alpha_n) J_2(\alpha_n)], \\ G(\beta) &= [K_n(\beta) K_1(\beta) - K_1^2(\beta)] / K_1^2(\beta) \end{aligned}$$

여기서 특정모드에 대한 $F(\alpha), G(\beta)$ 값은 도식적으로 표현된 그래프를 통해 얻게 된다.

4. FFT(Fast Fourier Transform) 및 MoM(Method of Moment)

3D 회로의 고주파 특성을 예측하고자 수치해석적으로 Maxwell 방정식을 풀게 되는 프로그램의 난점은 다양한 경계조건을 수용할 수 있는 범용성에 대한 요구 이외에 신뢰성, 효율성을 함께 만족하는 것이다. 3D Field 계산 프로그램에 적용되고 있는 FEM, FDTD, BEM 수치해석적 알고리즘도 범용성, 신뢰성, 효율성 측면에서 우수하지만 Sonnet에서 적용한 FFT(Fast Fourier Transform) 기반 MoM 방법에 의한 2.5D Field 계산도 LTCC 설계에 적합하다고 판단된다.

Fourier 이론은 복잡한 물리적 현상을 체계적으로 설명할 수 있는 수학적 기법이다. 일례로 재료공학에서는 우리가 살고 있는 3차원 세계에서 관측되는 복잡한 물질구조를 Fourier 이론을 통하여 역격자 공간으로 변환할 때 규칙적인 수학적 모델들의 합으로 해석하는 분야가 있다. 한편 수치해석 분야에서의 Fourier 이론은 복잡한 공학문제를 해석하기 쉬운 형태로 변환하는 수학적 기법으로서 가치를 갖는다. 주로 Linear System 분석, Antenna 해석, Optics, Random Process Modeling, 확률이론, 양자물리, 경계치 문제 등에 응용되어 왔다.

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \exp(-j2\pi xs) dx, \quad f(w) = \int_{-\infty}^{\infty} F(s) \exp(-j2\pi ws) ds$$

Fourier 변환은 위와같이 임의의 파형을 주파수 성분과 각각에 해당하는 특정한 진폭크기를 갖는 사인파의 합으로 분리하는 것에서 출발한다. 수학적으로 Convolution Theorem, Correlation Theorem, Parseval Theorem 등의 정리를 통해 여러 응용분야에서 유용하게 사용된다. 수치해석의 경우, Discrete Fourier Transform (DFT) 을 통해 Sampling 된 값을 기반으로 응용되며 다음과 같은 형태를 갖는다.

$$\begin{aligned} F_r &= \sum_{k=0}^{N_0-1} f_k \exp(-jr\Omega_0 k), \quad f_k = \\ N_0^{-1} &\sum_{r=0}^{N_0-1} F_r \exp(-jr\Omega_0 k) \quad \text{where } \Omega_0 = 2\pi N_0^{-1} \end{aligned}$$

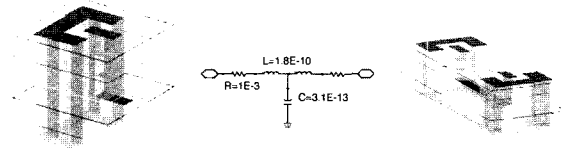
FFT는 1965년 Tukey, Cooley에 의해 개발된 DFT의 개선된 방법론으로 계산해야 할 N_0^2 개수를 $N_0^2 \cdot \log(N_0)$ 로 획기적으로 줄인 기법이다. 크게 Decimation-in-time, Decimation-in-frequency 로 나누는데 Sonnet 같은 2.5D Field 계산 프로그램에서는 이

를 발전시킨 FFT 수치해석적 기법이 사용되어 3차원 고주파회로의 구성 최소단위인 셀에 대한 모든 경우의 Coupling을 계산하는데 사용되었다. 즉 해석하려는 시스템의 셀수를 N 이라고 할 때 $N \times N$ Coupling 행렬을 효과적으로 계산한다고 보여진다. 이로부터 업계에서는 해석하고자 하는 3D 회로가 매우 얇고 매우 두꺼운 유전기판을 동시에 포함할 경우나 저유전률, 고유전률 물질을 동시에 포함할 때 등 입력변수의 범위가 클 때 FFT 기법이 효과적으로 고주파 특성을 계산해 낸다고 평가하고 있다.

한편 3D Field 계산 프로그램에서 고주파 특성을 계산하는 중간과정에 해당하는 Green Function을 얻는 수치해석적 기법이 MoM 방법이다. 즉 MoM은 $L\Phi=g$ 형태의 지배방정식의 해를 구하는 수치해석 기법중 하나이다. 3차원 회로의 전자기 해석은 Load Matrix에 해당하는 Source인 g 를 단위 Impulse Function으로 대체한 경우의 경계치 문제에 대한 해를 구하는 Green Function의 문제로 귀결되므로 적층형 수동소자 및 모듈의 경우 MoM 기법이면 원리적으로는 충분하다고 할 수 있다. Green Function은 다음의 4단계를 거쳐 구한다. 먼저 적당한 적분방정식 구한후, 적분방정식에 대해 Basis Function과 Weighting Function을 이용하여 Matrix 방정식 형태로 변환한다. 이후 Matrix Elements를 구한후 Matrix 방정식을 풀고 관련된 변수들을 계산하게 된다.

5. 수동소자 Library 및 Deembedding 기법 ⁴⁻⁸¹

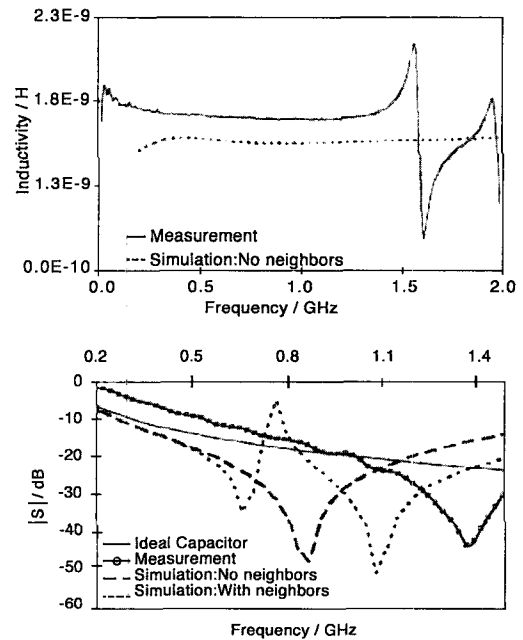
LTCC 집적기판 속에 다층회로 형태로 구현된 수동소자를 등가회로로 모델링하는 것은 전기적으로 정확히 모델링된 기본구조들의 결합을 통해 구축되는 체계적이고 실험적인 과정이다. 따라서 여러종류의 수동소자를 구성할 수 있는 간단하며 적은수의 기본구조를 설정하는 것이 중요한 시작점이 된다. 보유한 공정 및 측정설비에 적합한 최소한의 기본구조들을 결정 한 후 이것들로 구성된 여러 테스트구조를 제작하여 각 기본구조에 해당하는 등가회로 모델을 각각 추출하게 된다. 이때 체계적인 Deembedding 기법은 정확한 기본구조 모델링에 핵심이 된다. 여기서 테스트구조에 대한 측정을 통해 얻



은 산란계수와 광대역 등가회로의 입출력 산란계수 (S_{11} , S_{21})을 가능한 일치시키는 모델링 작업에서 3차원 전극 구조에 대한 등가회로 추출기법인 Partial Element Equivalent Circuit (PEEC)와 3D Field Solver를 통한 Simulation 과정을 적절히 이용한다. 최적화 초기 단계에는 테스트구조의 구성단위인 기본구조들과 예측되는 Coupling 효과를 통한 물리적인 개념에 의거한 등가회로를 선정하게 되며 점차 최적화를 위한 튜닝작업을 통해 측정거동을 잘 따르는 등가회로를 구축한다. 다음 그림은 Grided Plate Capacitor 모델링을 위해 사용되는 기본구조의 예와 그에 해당하는 등가회로 및 테스트구조를 나타낸다.

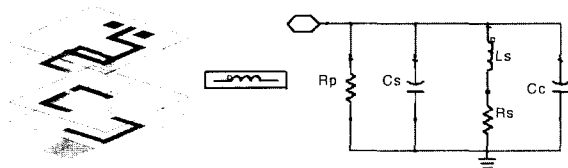
아래 그림은 다층회로로 구현된 인덕터 및 캐패시터의 측정치로 이상적인 Simulation 결과와는 달리 인접한 곳에 다른 전극이 위치할 경우 소자값이나 소자특성이 크게 변함을 나타내기 위한 것이다.

모듈 제작 관점에서 우수한 특성의 Helical 인덕터 제

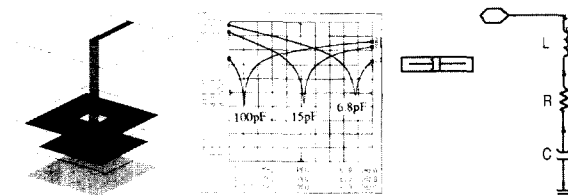


작은 캐패시터 제작보다 중요할 때가 많다. 예로들면, 발진기의 Phase Noise, 저잡음증폭기의 잡음지수, 전력 증폭기의 전력효율 등은 인덕터의 품질계수로부터 많은 영향을 받는다. 따라서 인덕터의 라이브러리 구축시에도 Q 값, SRF, 인덕턴스 값을 동시에 최적화한 회로 구성을 충분히 고민해야 한다. 간단하게 언급하면 Helical 구조에서 Inter-turn Gap Via 길이와 코일면적을 적절히 선택하여 품질계수 열화를 최소화하면서 Coupling Capacitance를 낮춰 SRF 를 높이고 적절한 인덕턴스 값을 갖도록 해야한다. 인덕터의 Q 값은 1 Port 에 대한 산란계수를 측정 한 후 임피던스 실수부와 허수부의 비로서 얻게 된다. 이때 CPW 형태의 검침패드에 대한 Deembedding 이 필요하게 된다. 아래에 1 Port 인덕터의 다층구조와 등가회로를 나타낸다. 여기에는 Substrate Capacitance, Coupling Capacitance, Finite Conductivity 등의 기생성분이 병렬로 고려되고 있다.

이때 $R_s < 1\Omega$, $R_p > 20k\Omega$, $C_s + C_c > 1pF$ 정도의 값을 가지며 측정값과 Field Simulation 값으로 적절히 정한다.



다음은 다층기판에 구현된 Bypass Capacitor에 대한 등가회로 모델링 방법이다. 인덕터와 마찬가지로 회로 구조의 크기가 동작주파수의 파장길이보다 1/10 이하이므로 집중소자로 등가회로를 구성한다. 아래에 Bypass Capacitor 회로구조와 기존의 MLCC 측정결과 그리고 이로부터 유추한 등가회로를 나타낸다. 캐패시턴스가 낮을수록 공진주파수가 높아지므로 등가회로는 직렬 공진회로가 등가회로의 틀이 된다.



여기에서 C는 위/아래 접지와 Microstrip과 연결된 전극 사이의 용량값과 비아와 전극의 Stray Capacitance 값을 더하게 되며 Static Field Simulation 과정에서 얻게 된다. R은 Eddy Current 분석에서 얻으며, L 은 앞에서 구한 C와 측정에서 얻은 공진주파수를 통해 구한다. 이때 Microstrip과 접지사이의 전극간 비아 길이가 길어질수록 이 방법은 어느정도 신뢰성을 갖으나 비아 길이가 200 μm 이하로 짧아지면 계산된 용량값과 측정값의 차이가 급격히 증가한다.

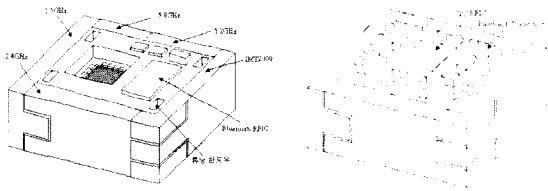
일반적인 사용되는 Deembedding은 Thru-Reflect-Line(TRL) 2 Port 방법을 통해 동축전송선과 Microstrip 사이의 Impedance Mismatch 및 신호감쇄를 보정하고 측정기준면을 DUT 양단으로 이동시킨다. 각각의 포트를 직접 연결하는 Thru, 높은 반사계수를 갖는 동일한 소자를 각각의 포트에 연결하는 Reflect, Thru 때와는 다른 적당한 길이의 전송선으로 포트를 연결하는 Line 절차를 수행하게 된다. LTCC 집적기판에 구현된 수동소자의 고주파 특성을 평가하기 위한 Deembedding은 앞서 논의된 기본구조들을 통해 체계적인 테스트구조를 측정하여 얻게 된다.

6. LTCC 고주파 부품/모듈 제작 ^{9.101}

일반적으로 PCB 기판에 표면실장되는 부품 중 75% 정도가 수동부품에 해당되므로 이들을 기판내에 집적하게 될 경우 이상적으로 그만큼의 크기를 줄일수 있다는 결론이 나온다. 현재 5~10 범위의 유전체료를 가지고 수동소자를 다층회로로 구현할 경우 인덕터는 1~10 nH, 캐패시터는 5~120 pF 범위의 용량값을 얻게 된다. 저온 동시소결되는 은전극을 사용할 경우 일반적인 10 μm 전극두께를 사용하며 1 GHz 에서의 Skip Depth 3배가 되므로 상대적으로 더 작은 유전체 손실을 함께 고려하더라도 이론적으로는 높은 집적도와 우수한 고주파 특성을 갖는 집적기판 제작이 가능해 진다고 할수있다. 그러나 실제로는 재료기술 및 공정기술이 안정화되지 않고는 예상했던 고주파 특성을 얻지 못하는 경우가 대부분이다.

LTCC 고주파 모듈을 제작하는 핵심요소는 크게

LTCC 재료 및 공정기술, 집적기판 설계기술 그리고 측정 및 평가기술로 나눌수 있다. 재료 및 공정기술로는 저유전률/고유전률/자성체 이중접합, 고정밀인쇄 적층공정, 다중공동 (Multi-shape Cavity) 기판, 고주파 튜닝구조, 무전해 도금공정, 칩 및 소자 실장 등을 해결해야 한다. 집적기판 설계기술로는 내장형 고주파소자(칩안테나, 스위치모듈, 적층형필터) 설계, 3차원 신호 및 전력 분포 설계, 수동소자 라이브러리, 공정 내성 설계 및 용이한 튜닝 회로 구현 등을 해결해야 하며 제작된 모듈을 측정하고 평가하여 효과적인 실패 분석 및 문제점 해결을 빠르게 진행하는 매우 체계적인 시스템이 필요하다. 이와 같이 SiP 차원의 고주파 모듈 개발은 장시간의 노력을 요구하고 있다. 아래는 LTCC 고주파 모듈의 예로서 현재 필코전자에서 추진하고 있는 IMT-2000 단말기 기반 다기능성(GPS, Bluetooth, IEEE 802.11 b/a/g) SiP FEM 이다. 이 복합모듈은 BlueQ/GPS 신호처리 기능을 지원하는 Qualcomm MSM6300 모뎀칩을 기반으로 Intersil WiFi 솔루션과 Broadcom BlueQ 솔루션을 사용하고 있다. 외관 그림은 시각적 효과를 위해 두께 방향을 확대하였다.



한편 LTCC 집적기판에 사용되는 기본소자인 Stripline 경우, Ground와의 거리 및 Stripline 폭에 따라 Unloaded Q 값과 Loss Tangent 값이 적잖은 영향을 받으므로 반의 반 파장 Short-Circuit Stripline 공진기를 통해 LTCC 집적기판에서 80정도의 높은 Q 값을 갖는 Stripline의 Impedance 및 Stripline 위치 결정이 중요한 시작점이 된다. 일반적으로 Ground까지의 거리가 클수록, 전극폭이 클수록 전극의 신호손실이 낮고, 품질계수가 높은 것으로 측정되고 있다.

7. 맺는말

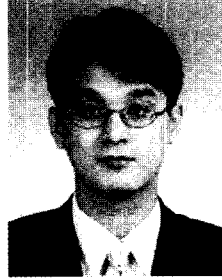
본고는 LTCC 공정을 이용한 고주파 부품 및 모듈 제작을 목적으로 LTCC 기술개요 및 응용분야, 유전재료의 고주파 특성평가, FFT(Fast Fourier Transform) 및 MoM(Method of Moment), 수동소자 라이브러리 및 Deembedding, LTCC 고주파 부품 및 모듈 제작 등 다섯 부분으로 나누어 설명하였다. 독자의 LTCC 전문성을 무시하고, 각 주제에 대해 정성적 이해 수준에 치우친 점을 인정한다. 그러나 한편으로는 LTCC 공정을 이용해 고주파 부품 및 모듈을 제작하는 과정에서 저자들이 순차적으로 이해가 필요했던 주제에 대한 경험에 충실하여 제한된 지면에 옮기고자 노력하였다.

LTCC 기술은 Organic 다층기판 기술 및 기타 최신의 집적모듈 공정기술과 경쟁하면서 지속적으로 발전을 거듭하고 있다. 아직도 해결을 기다리는 많은 문제점이 있지만, 최근 재료기술과 공정기술이 안정화되고 있어 제작단가도 크게 낮아지고 있는 상황이므로 관련업계 종사자로서 밝은 전망을 가지고 있다. 아쁘쫘록 한국의 LTCC 공정 및 설계 전문성을 가진 업체들이 공동 기술 개발에 적극 참여하여 고주파 집적모듈 분야에서 크게 앞서간 유럽 및 일본 업체와 대등하게 경쟁할 수 있는 시기가 앞당겨지길 바란다.

참고문헌

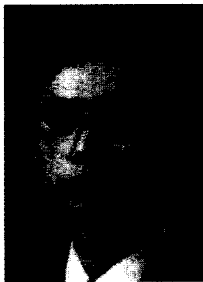
1. D. M. Pozar, Microwave Engineering 2nd Edition.
2. R. E. Collin, Foundation for Microwave Engineering 2nd Edition.
3. B. W. Hakki, P. D. Coleman, A Dielectric Resonance Method of Measuring Inductive Capacities in the Millimeter Range, IRE MTT, 402-410 (1960).
4. R. Poddar, Accurate High Speed Empirically Based Predictive Modeling of Deeply Embedded Gridded Parallel Plate Capacitors Fabricated in a Multilayer LTCC Process, IEEE Transaction on Advanced Packaging, **22**, 26-31 (1999).
5. A. Sutono, *et al.*, Development of Three Dimensional Ceramic-Based MCM Inductors for Hybrid RF/Microwave Applications, IEEE MTT-S (1999).
6. W. Eurskens, *et al.*, Design and Performance of UHF Band Inductors, Capacitors, and Resonators Using LTCC Technology for Mobile Communication Systems, IEEE MTT-S (1998).
7. Hongwei Liang, *et al.*, Material Parameter Characteri

- zation of Multilayer LTCC and Implementation of High Q Resonators, IEEE MTT-S (1999)
8. Makoto Tochigi, *et al.*, Analysis Methods of Circuit Elements Buried in Ceramic Multilayer Substrate, IEEE MTT-S.
 9. R. R. Tummala, Fundamentals of Microsystems Packaging.
 10. M. I. Montrose, Printed Circuit Board Design Techniques for EMC Compliance.



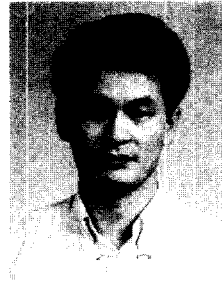
김성욱

- 1992년 연세대학교 요업공학과 졸업
- 1994년 연세대학교 세라믹공학과 석사 (고온재료 전공)
- 1999년 연세대학교 세라믹공학과 박사 (고온재료 전공)
- 1999년 ~ 현재 필코전자 RF소재부품팀 팀장



최돈철

- 1995년 연세대학교 금속공학과 졸업
- 1997년 KAIST 재료공학과 석사 (유전재료 전공)
- 1998년 대우 고등기술연구원 플라즈마 기술센터 연구원
- 1999년 3M Korea, Innovation Center, BGA Tape Engineer
- 2000년 정보통신대학원 초고주파 연구실 박사과정
- 2001년 ASB, CDMA/PCS 대역 SiGe LNA/Mixer 설계
- 2002년 ~ 현재 필코전자 RF소재부품팀 선임



고현종

- 1989년 연세대학교 요업공학과 졸업
- 1989년 동아제약 세라믹사업부 주임 연구원
- 1993년 SKC 중앙연구소 선임연구원
- 1998년 ~ 현재 필코전자 CHIP 사업본부 수석 연구원
- 2001년 연세대학교 세라믹공학과 석사