

LTCC 기술의 최근 패러다임 변화

글 _ 이효중, 손석호
(주)알엔투 테크놀로지

1. 서론

휴대용 이동 통신 기술의 발달로 각광 받게 된 LTCC (저온 동시 소성 세라믹, Low Temperature Co-fired Ceramic) 기술은 다양한 시장의 요구에 따라 진보를 거듭하고 있다.

1990년대부터 LTCC 소재 (세라믹 기지 및 이와 동시 소결 시 정합을 이루는 후막형 Ag 전극)의 우수한 전기적 특성을 이용한 RF 선단의 부품을 위주로 연구가 진행되었으며, 초기 기술 개발 단계에서는 3D 다층 회로 구조가 가능한 제조 공정의 특징을 이용하여 다수의 수동 소자를 집적하여 소형의 RF 대역 통과 여파기 등을 제조하는 수동 집적 소자 (Multilayer Ceramic Passive Integration)에 대한 개발이 활발히 진행되었다.

이후 Murata (村田, 일본)에서 TDMA 방식의 휴대폰에 적용이 가능한 송수신 모듈로서 다수의 필터류를 (LPF, BPF, Diplexer 등) 내장한 LTCC 기판 상에 능동 소자인

신호 스위칭용 핀 다이오드를 탑재한 ASM (Antenna Switch Module)을 개발함으로써 LTCC를 이용한 MCM (Multichip Module)의 길이 열리게 되었다.

ASM은 SAW Duplexer Filter를 내장하여 One Chip으로 보다 다양한 기능을 수행하는 FEM (Front End Module)으로 진화하여 전 세계 휴대용 이동 통신 단말기 시장의 75% 차지하는 GSM 방식뿐만 아니라 4G용 PCS 및 Wi-Fi까지 지원하며 적용의 폭을 넓히고 있다.

MCM 기술은 보다 복잡하고 다양한 기능의 반도체 칩을 탑재하기 시작하여 Bluetooth One Chip Module을 탄생시켰으며, 이후 SoP (System On Package)로 발전하게 되었다.

전술한 통신 부품류의 개발 단계에서는 주로 재료의 전기적 특성 향상, 고 특성 회로 설계, 소형 적층 공정 개발 등에 연구가 집중되었으며, 이후 SoP 단계에 이르러서 반도체 소재와의(Si, GaAs, SiGe 등) 열 팽창계수 정합, WLP (Wafer Level Package)를 위한 도금 성능의 향상 등 신뢰성 부분에 대한 기술 개발이 이루어져 왔다.

특히 신뢰성 부분에 있어서 2000년대 이후 Bosch (독일)에서 LTCC 기반 기술을 ABS 모듈 등의 자동차용 ECU (Electronic Control Unit)에 적용하여 거대한 신규 시장이 창출되기 시작하면서 관심이 집중되고 있다. 또한 자동차용 전장 부품의 WLP와 SMD 공정을 위한 정밀 Top Patterning의 요구에 따라 LTCC 기판의 ZST 공법(Zero Shrinkage Technology, 무수축 공법)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 기고에서는 현재 혹은 가까운 미래에 도래하게 될 시장의 요구에 대한 대응을 준비하는데 조금이라도 도움

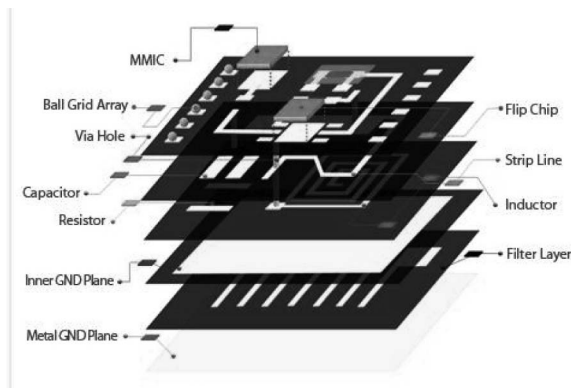


Fig. 1. 3D 회로 적층 구조를 이용한 LTCC Module의 개략도.

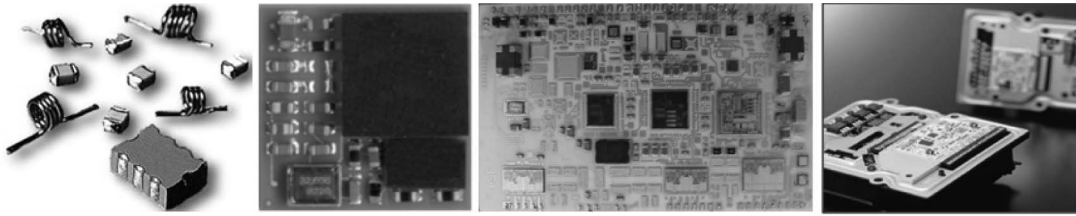


Fig. 2. LTCC 응용 부품 - 좌로부터 수동 집적 소자(L-C BPF), MCM 소자 (블루투스 모듈, LG 이노텍), SoP (광 통합 송수신 모듈, Kyocera), 차량용 ECU (Bosch).

이 되기를 바라며, 향후 LTCC 기반 기술의 개발 동향을 세라믹 소재 중심으로 살펴보고자 한다.

2. LTCC 소재 Review

2.1. 기존의 상용 LTCC 소재

LTCC는 1,350°C 이상인 일반적인 세라믹 기판용 소재의 소결온도를 Ag 전극의 용점이하로 낮춘 세라믹 소재에 기반을 두고 있다.

가장 일반적인 방법은 Al₂O₃ 등의 결정질 세라믹 충전재에 Glass 기반의 지지체를 혼합하는 것이며, 이 때 혼합하는 유리의 특성에 따라 다음과 같이 구분 지을 수 있다.

- 1) 비 반응성 비정질계
- 2) 반응성 결정계
- 3) 2차상 석출형 결정계

Dupont(미국)사의 DP951 모델로 가장 널리 상용화된 비 반응성 비정질계 LTCC 소재의 경우 저유전율의 borosilicate glass (SiO₂-B₂O₃-R₂O, R은 알카리(토) 금속 Li, Na, K, Ca 등)와 α-Al₂O₃ 충전재의 혼합물이며, 1980년대 슈퍼 컴퓨터의 MCM (Multi-Chip Module: 복수의 베어칩을 기판에 직접 탑재하여 기능을 하나로 모은 모듈)용으로 개발되었다. Borosilicate glass는 최초 이화학용 glass로 개발되어 화학적 내구성이 높고 glass의 열팽창 계수는 3-4ppm/C로 낮다.

Glass 분말만을 소성하면 열팽창계수가 높은 cristobalite 결정이 석출되지만, alumina filler와 함께 소성하면,

소성 중에 alumina의 일부가 glass matrix 내부로 확산되어 cristobalite의 석출을 억제함으로써 저 열팽창을 유지할 수 있게 된다. 소성 중에 glass는 결정화되지 않으므로 응력이 걸린 상태에서 재 가열하면 변형이 발생되지만 소결 중 중력에 의해 Warpage가 제거되는 특성 또한 가지고 있다.

그러나 Tg를 낮추어 이러한 응력 회복 효과를 높이기 위해 첨가되는 PbO 성분으로 인해 현재는 사용의 제약을 받고 있기도 하다.

두 번째로 반응성 결정계 유리는 소결 중 Glass와 충전재인 Al₂O₃가 반응하여 Glass가 결정화되는 기구이며, 반응상에 따라 다양한 특성의 LTCC를 구현할 수 있는 장점이 있는 반면, 결정화 온도와 Ag 소결 개시점의 차이에 의해 상호간의 소결 수축을 불일치가 나타나기도 한다. Heraeus(독일)사의 X-200 모델로 알려진 대표적인 조성으로는 RO-Al₂O₃-2SiO₂가 (R: 알카리 토금속, Ca, Sr, Ba) 석출되는 결정성 유리과 Al₂O₃ 충전재의 복합재료이다. Ca의 경우에는 anorthite 결정이, Ba의 경우에는 celsian 결정이 석출되며, Ca > Sr > Ba의 순으로 중(重) 원소일수록 유전율, 열팽창계수가 증가한다.

Borosilicate glass계와 마찬가지로 alumina filler가 중요한 역할을 하는데, glass만 소성하면 wollastonite (CaO-SiO₂) 등의 결정이 석출되지만, alumina와 복합화 함에 따라서 alumina의 일부가 glass 내부로 확산되어 장석계의 결정이 석출된다. 또한, glass내부에 alumina성분이 없는 경우에도 glass와 alumina filler의 계면에서 결정화 반응이 일어나서 anorthite가 석출된다. 이 경우에는 glass와 filler의 접착강도가 높기 때문에 고강도의 재료를 얻을 수 있다.



Table 1. 상용 LTCC 소재의 조성 및 물성

LTCC Suppliers	Products(composition)	Dielectric constant (ε)	Resistivity (Ω · cm)	Thermal expansion coefficient (ppm/°C)	Thermal conductivity (w/m · K)	Flexural strength (MPa)
Asahi glass	Al ₂ O ₃ 35 wt% + Forserite 5 wt% +BSG 40 wt%	7.4	>10 ¹⁴	5.9	4.2	235
Kyocera	BSG +SiO ₂ + Al ₂ O ₃ +Cordierite	5.0	>10 ¹⁴	4.0	2	190
	Diopside Crystallized glass + Al ₂ O ₃	9.4	>10 ¹⁴	8.5	4.1	400
Dupont	Al ₂ O ₃ +CaZrO ₃ + Glass	7.8	>10 ¹²	7.9	4.5	200
Sumitomo metal ceramics	(CaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂ -B ₂ O ₃) glass 60 wt% + Al ₂ O ₃ 40wt%	7.7	>10 ¹⁴	5.5	2.5	196
NEC	(PbO-BSG) glass 45 wt% + Al ₂ O ₃ 55 wt%	7.8	>10 ¹⁴	4.2	4.2	300
Hitachi	(BaO-Al ₂ O ₃ -Si ₂) + Al ₂ O ₃ +ZrSiO ₄	7.0	>10 ¹³	5.5	1.7	200
Matsushita	(PbO-BSG) 45 wt% + Al ₂ O ₃ 55 wt%	7.4	>10 ¹²	6.0	3.0	260
IBM	Cordierite crystallized glass	5.0	-	-	3.0	210
NGK	Zn-MgO-Al ₂ O ₃ - SiO ₂ (Cordierite system)	5.0	5 × >10 ¹⁵	3.0	3.0	200
Murata	BaO-Al ₂ O ₃ -SiO ₂	6.1	>10 ¹⁴	8.0	2.0	200
Heraeus	Al ₂ O ₃ + BaAl ₂ Si ₂ O ₈	8.0	>10 ¹²	-	3.0	250
Reference	Si	-	10 × 10 ⁶	3.5	170	-

마지막으로 열처리(소결) 시 Glass 자체의 반응에 의해 2차 결정상이 석출되는 Glass는 이를 제어함으로써 기존의 LTCC 소재가 갖지 못한 특성이 발현되며, 이에 대한 자세한 내용은 다음 절에 설명하기로 한다.

2.2. 초 고강도 LTCC 소재

기존의 LTCC 소재의 문제점으로서의 소결 온도를 낮추기 위해 첨가한 Glass로 인해 기판의 강도와 더불어 신뢰성이 저하되는 것이다. 현재 출시된 LTCC 소재 중에서 기존의 LTCC 소재의 강도를 훨씬 상회하는 재료는 Kyocera (일본) 사가 보유한 GL 950 모델로서 3점 곡강도가 400 MPa를 나타내어 기존 alumina 기반의 HTCC 재료를 대체할 수 있을 것으로 전망되고 있다. 이 재료는 diopside 결정이(CaO · MgO · 2SiO₂) 석출되는 계로 알려져 있다.

단순 diopside 조성만으로도 유리화가 가능하나, 결정성이 매우 강하기 때문에 양산에는 어려움이 많다. 그러나 강도가 높고 유전손실(tan δ)이 낮아 고주파수영역에서 사용되는 부품에 적합하다. Alumina 또는 다른 결정질 세라믹을 충전재로 사용하며 장식계 glass 세라믹스와는 달리 glass 내부로 충전재의 일부가 확산되지는 않는 장점을 가지고 있다.

Kyocera의 등록 특허 (일본 특허 3904838)에서 Diopside 조성으로 소결온도 900°C에서 강도 400 MPa의

결과가 실시예에 언급되고 있어 상용화된 GL 950의 조성을 이것으로 유추할 수 있다.

2.3. 고 열팽창 계수 LTCC

LTCC 소재의 가장 큰 특징은 Si 등의 반도체 소자와 유사한 3~5 ppm/°C의 열팽창 계수를 가지고 있어 WLP를 통해 별도의 하우징 없이 능동 소자를 기판상에 수납할 수 있다는 점이다. 그러나 능동 소자를 탑재한 SoP 형태의 LTCC 패키징 기판은 또 다른 One Chip Module로서 FR-4 소재의 PCB 기판에 표면실장이 되는 경우가 대부분이다.

날로 경박화 되고 있는 패키징 기판의 현실로 볼 때, 강도가 낮은 LTCC 기판이 열 팽창 계수가 크게 다른 PCB에 접합되어 지속적인 온도 변화에 의한 열 수축/팽

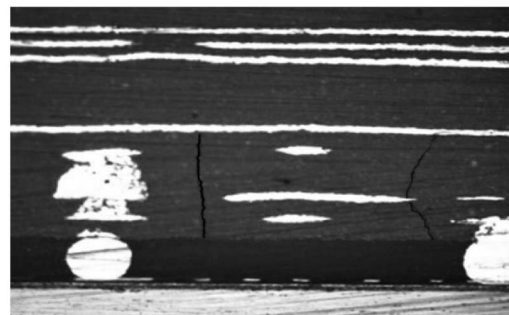


Fig. 3. 온도 Cycle 시험에 의한 PCB상에 실장된 LTCC 기판의 파손.

창 응력을 받을 경우 심각한 신뢰성 문제가 발생할 수 있다. (Fig. 3 참조)

현재 일본에서 개발 중인, FR-4의 열팽창계수와 (15ppm/°C) 근접한 물성을 갖는 LTCC 소재는(HiTcE®) 1.2 mm 두께의 패키지 기판으로 제작하여 -40~+125°C의 열 사이클 시험을 할 경우 70% 누적 고장율이 4,000 사이클로 보고되고 있다. 이는 동일 두께의 Al₂O₃ 기판의 4 배에 달하는 수명이다. 상기 고 열팽창 계수 소재는 다음 표에서 보는 바와 같이 강도와 탄성 계수가 낮음에도 불구하고 PCB와의 수축-팽창 정합만으로도 이러한 우수한 신뢰성을 나타내고 있다.

Table 2. 고 열팽창 LTCC 소재의 물성

소재	유전율 (k)	CTE (ppm/°C)	Flexural Strength (MPa)	Young's Modulus(GPa)
Al ₂ O ₃	9.8	7.1	400	310
HiTcE LTCC	5.3	12.3	170	74

특히 이 소재의 경우 실장 밀도를 높이기 위하여 BGA를 이용한 Flip Chip 형태의 표면 실장이 많아지는 시장에서 위력을 발휘할 것으로 기대가 된다.

2.4. 초 고주파 대응 LTCC 소재

그 동안 LTCC 소재는 우수한 전기적 특성으로 말미암아 RF 부품으로의 개발이 활발히 이루어져 왔다. 현재까지의 상용 이동 통신을 위한 주파수의 범위는 800 MHz에서 5 GHz까지가 대부분이었으며, 이러한 주파수 범위에서는 기존의 LTCC 소재를 사용하는데 큰 무리가 없었다 해도 과언이 아니다.

그러나 차세대 초고속 Wi-Fi 시스템으로 주목 받고 있는 60 GHz, mm wave 대역의 통신 시스템이나 77 GHz를 사용하는 차량 충돌 방지 레이더의 경우 회로 기판의 유전 손실에 의한 신호 감쇄가 심각한 문제로 대두되고 있다.

아래 나타낸 유전 손실에 관한 수식에서 알 수 있듯이 주파수(f_0) 상승에 따른 유전 손실을 최소화하기 위해서는 보다 낮은 유전율(ϵ_r)과 Loss Tan δ 를 갖는 재료가 필요하다.

$$\text{유전 손실} = \frac{1}{Q_d} = 27.3 \cdot \frac{f_0}{C} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot \tan \delta \text{ [dB/m]}$$

다음 그림에는 현재 일반적인 용도로 가장 널리 사용되는 LTCC 소재인 Dupont 사의 DP951 소재와 초 고주파용으로 전문화된 Low loss LTCC 소재의 주파수 별 Tan δ 를 비교하여 나타내었다.

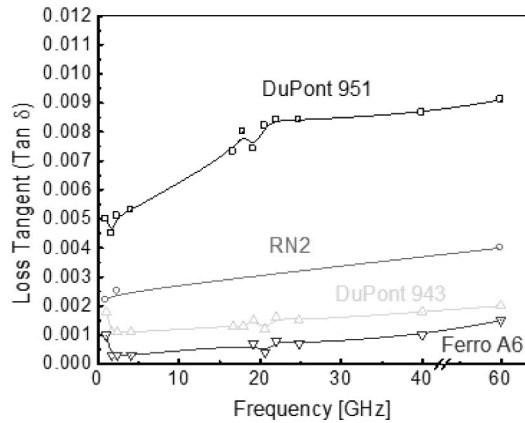


Fig. 4. 작동 주파수에 따른 LTCC 소재의 Loss Tangent 값.

현재 60GHz 대역에서 Tan $\delta = 0.0015 \sim 0.002$ 의 값을 갖는 Ferro (미국) 사의 A6와 Dupont사의 DP 943 소재는 비록 우수한 손실값을 갖고 있지만 취약한 강도와 도금에 대한 낮은 내화학성으로 인해 향후 보다 깊은 연구 개발의 여지가 있을 것으로 판단된다.

3. LTCC 시장 상황의 변화

전자 부품 시장 조사 전문 업체인 Navian사의 2003년과 2009년 자료를 (실제 데이터는 1년전 임) 토대로 한 LTCC 응용 제품 업체의 시장 점유율을 다음 그림에 나타내었다.

지속적으로 세계 시장 점유율 1위는 이동 통신 부품이 주력인 Murata 이지만, 성장률을 고려하면 패키징 기판을 주력으로 생산하는 Kyocera가 가장 두드러진다.

또한 자동차 전장용 LTCC 모듈을 주로 생산하는 독일의 Bosch사의 경우 성장세는 줄었으나 여전히 3위의 시장 점유율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편 2004

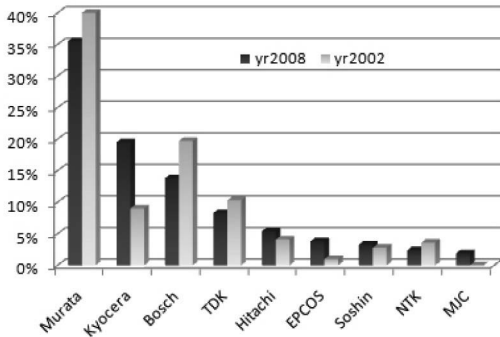


Fig. 5. LTCC 관련 시장 점유율 분석 (2003, 2009 Navian 시장 조사 자료).

년 스미토모의 차량용 LTCC 사업부를 인수한 무라타가 지속적인 시장 점유율 1위를 유지할 수 있었던 배경도 자동차 전장용 LTCC 관련 시장의 잠재력이 얼마나 큰지 예시하는 바가 크다.

여기서 주목할 부분은 MJC와 Kyocera의 괄목할 만한 성장세이다. MJC는 MEMS Probe Card 업체이며, Kyocera 또한 12인치 급 Probe Card용 대면적 LTCC 기관에 주력하고 있어, 반도체 측정 분야에서의 또 다른 LTCC 관련 시장이 향후 크게 확대될 것으로 예상할 수 있다.

2009년 약 2조 8천억 원으로 예상되는 전 세계 시장의 80%를 Bosch를 제외한 일본 소재의 기업이 차지하고 있는데 아쉬움이 남는다.

4. 결론

본격적인 유비쿼터스와 디지털 컨버전스 시대에 돌입한 현재, 초소형의 다기능 이동 통신 기기에 적용되는 LTCC 관련 부품 및 패키징 기관의 가능성은 앞으로도 무궁할 것으로 예상된다. 그러나 기존의 소재 기술로는 향후 도래할 시장의 요구에 부응하는 데에 한계가 있음이 자명하다.

기기의 저배화에 따른 고 강도 LTCC 소재의 경우 이미 선진사에서는 개발이 완료되어 상용화가 이루어지고 있고 차량 전장용의 고 신뢰성-정밀 기관을 위한 무수축 공법 또한 보편화되어 있다.

고 열팽창 계수 소재나 400 MPa의 강도를 갖는 등 현재까지의 사양을 무시할 정도의 소재 기술을 보유한 기업 혹은 MEMS Probe Card 등의 신규 시장을 개척한 업체들의 시장 점유율이 높아져가고 있는 상황으로 이미 LTCC 관련 기술은 무한 경쟁에 돌입했다 하더라도 과언이 아닐 것이다.

앞으로도 저 탄소 녹색성장을 위한 LED용 패키징 소재로 사용될 고 열전도도, 고 반사율 LTCC 소재의 개발은 곧 현실로 다가올 것이며, 박막 회로의 적용을 위한 고 내화학성 LTCC 소재 또한 개발이 진행되고 있다.

원천 소재 기술을 바탕으로 한 응용 제품만이 무한 경쟁에서 살아남을 수 있음을 마음속에 새겨야 함을 다시 한 번 생각할 때이다.

참고문헌

1. Advanced IC Packaging Markets and Trends, Electronic Trend Publications, Inc., 2004.
2. High-Density Packaging (MCM, MCP, SIP): Market Analysis and Technology Trends, The Information Network, 2005.
3. R. R. Tummala, et al., "The SOP for Miniaturized, Mixed-Signal Computing, Communication, and Consumer Systems of the Next Decade," IEEE Trans. Advanced Packag., vol. 27, no. 2, pp. 250-267, May 2004.
4. P. E. Garrou, Multichip Module Technology Handbook, McGraw-Hill.
5. R. R. Tummala et al., Ceramic Packaging Technology, Microelectronics Packaging Handbook. New York: Van Nostrand, 1988.
6. Y. Imanaka, "Multilayered Low Temperature Co-fired Ceramics (LTCC) Technology", Springer (2005).
7. 山本孝 "LTCC의 기술과 응용", 시에엠시어출판 (2005).
8. W.K. Jones et al, "Chemical, Structural and Mechanical Properties of LTCC Tapes", The International Journal of Microcircuits and Electronic Packaging, Volume 23, Number 4, pp469-473.
9. 일본특허 제3904838호
10. Advanced LTCC Technology, Navian Marketing Report, 2002 & 2008.

●● 손석호



- 1994년 연세대학교 금속공학과 학사
- 1997년 연세대학교 금속공학과 석사
- 1999년 LG 금속 부설 연구소 주임연구원
- 2002년 (주) MRW 선임 연구원
- 현재 알엔투 테크놀로지 연구소장

●● 이효종



- 1989년 서울대학교 금속공학과 학사
- 1991년 서울대학교 금속공학과 석사
- 1996년 서울대학교 금속공학과 박사
- 1996년 서울대 신소재 공동 연구소 Post-Doc.
- 1999년 (주)유유 신소재 연구소 연구소장
- 2002년 (주) MRW 연구소장
- 현재 알엔투 테크놀로지 대표이사