

LTOCC 조성 설계에 따른 유전 및 기계적 특성

김관수 박사과정 (강릉대학교 재료공학과) | 윤상옥 교수 (강릉대학교 세라믹공학과) | 김 신 연구소장 ((주)씨모텍)

1. 서 론

저온 동시 소성 세라믹스 (Low temperature Co-fired Ceramics : LTCC) 기술은 전자 패키징에서 다양한 모듈과 기판, 특히 무선 또는 마이크로파 응용 부품을 개발하는데 매우 중요하다 [1]. 즉, LTCC 기술은 전자부품의 소형화 추세에 대응하여 개발되어온 적층 세라믹 기술로 2차원 평면상에 제작되어온 소자를 세라믹 Sheet를 적층하여 3차원으로 제작함으로써 부품의 소형화와 다기능화를 이룰 수 있다. 또한, LTCC 기술은 기존의 컴퓨터 CPU 및 SAW 필터 용 세라믹 패키지에 사용되던 HTCC (High Temperature Co-fired Ceramics ; 고온 동시 소성 세라믹)와 유사하지만, 저용접 및 고전도도 재료인 Ag 와 Cu 등을 내부 배선 회로용 전극으로 사용하기 때문에 900°C 이하의 저온에서 소성이 가능한 기술이라는 큰 차이점을 갖는다. 더욱이 LTCC 기술은 R, L, C 등의 수동소자 및 신호 전달 배선을 기판 내부에 형성하는 것이 가능하며, Si와 비슷한 열팽창계수를 가짐으로서 Si 집적소자와의 Integration이 용이하다는 장점을 가지고 있어 우수한 이동통신용 부품을 제작할 수 있는 이상적인 기술로 여겨지고 있다.

LTCC 기술의 주요 응용 분야는 그림 1과 같으며, 휴대 전화의 필터, 안테나, 듀플렉서 및 ASM (Antenna Switch Module)과 같은 통신 부품에서 시작되어 Post PC 산업분야를 이끌 W-LAN이나 Bluetooth 같은 근거리 이동 통신 분야로 확대되고

있다. 최근 LTCC 기술의 고신뢰성을 바탕으로 자동차 분야의 ABS (Anti-Breake System)와 ECU (Engine Control Unit), 의료 분야의 이미지센서용 모듈과 진단용 CT (Computed tomography), LED 분야의 고출력 LED용 패키지, 반도체 분야의 검사용 프로브 카드 등으로 응용 분야가 확대되고 있다.

LTCC 기술을 더욱 세분화하면 재료, 공정, 설계 및 측정 기술로 이루어져 있으며, 각 요소 기술을 모두 확보하였을 때 선진국과 경쟁이 가능한 고주파 일체화 부품 개발의 초석을 마련할 수 있으며, 다양한 분야에 적용이 가능하다. 특히, 이동통신을 중심으로 하는 정보통신 산업에 있어서 전자부품은 전자제품의 가격, 품질 및 성능을 결정하는 핵심요소로써 전자제품 제조원가의 절반 이상을 차지하고

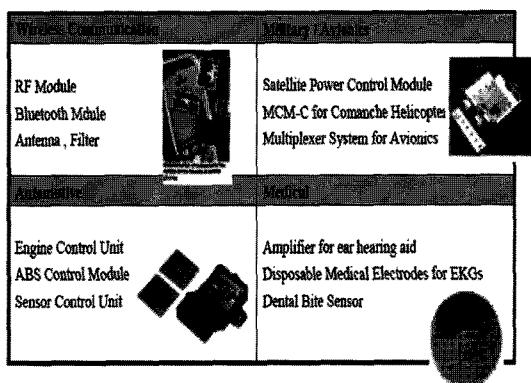


그림 1. LTCC 기술의 응용 분야.



있으며, 부가가치율이 높은 기술집약적 제품군이다. 이처럼 LTCC 기술은 미래 성장 산업에서 많은 비중을 차지할 것으로 기대되며, 결국 소재 기술이 가장 밀거름이 된다. 하지만 국내의 경우 LTCC 부품의 국산화 비율은 날로 증가하고 있는 추세이지만, LTCC 소재는 대부분 수입에 의존하고 있는 실정으로 국내 LTCC 관련 소재 산업의 현실은 매우 열악한 상황이다.

더욱이 LTCC 조성 설계를 통해 전기적, 열적 및 기계적 특성 등 사용범위 및 목적에 따라 다양한 특성을 구현할 수 있다. 예를 들어 유전율 10~60 정도를 가지는 경우에는 고주파 특성을 요구하는 필터 등의 소자 제작에 사용되고, 유전율 10 이하, 특히 7 이하의 경우에는 기계적 특성을 고려한 기판 재료로서 기존의 PCB 기판의 단점을 개선하고, 특성을 향상시킬 수 있다.

본고에서는 LTCC 조성 설계 방법과 이에 따른 유전 및 기계적 특성 변화에 대하여 최근 연구와 본 실험실에서 수행한 연구를 토대로 설명하고자 하며, 이를 통해 미약하나마 LTCC 소재 및 부품 개발에 기여하고자 한다.

2. 마이크로파 유전체 특성

마이크로파 (Microwave)란 파장이 짧은 전자기파를 의미하는 것으로 약 300 MHz~300 GHz의 주파수 대역을 의미한다. 따라서 마이크로파 유전체 (Microwave dielectric)란 고주파수 대역에서 사용되는 유전체를 의미하며, 기존의 저주파에서 사용되는 유전체와 구별하기 위해 붙여진 이름이다.

고주파에서는 저주파에 비해 유전손실이 크기 때문에 유전율이 작은 상유전체 (Para-electrics)가 주로 사용된다. 마이크로파 유전체는 대역통과 필터, 전압제어 발전기, 듀플렉스, 안테나, MMIC (Monolithic Microwave Integrated Circuit)의 유전체 기판, 도파선로 및 고주파 콘덴서 등 다양한 분야에서 연구되어지고 있다 [2]. 더욱이 위성방송의 발달과 함께 위성방송 수신기의 핵심 부품인 고주파용 유전체 공진기의 수요는 점점 더 성장되고 있다.

유전율 (Permittivity) [3]이란 어떤 물질에 외부전기장을 가했을 때 쌍극자가 얼마나 잘 유도되느냐를 나타내는 척도를 말하며, 즉, 정전용량 (Capacitance)은 유전체의 면적/거리에 비례하며, 이 비례상수를 유전율이라고 한다. 이와 유사한 유전상수 (Dielectric constant)는 전계가 가해진 두 평행 도체판 사이에 유전체를 삽입을 했을 때와 그렇지 않을 때 대비 유전체에 모인 전하량이 몇 배 증가하였는지 정도를 나타낸다. 즉, 유전율과 유전상수는 진공 유전율 ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-11} \text{ F/m}$)에 의한 크기 차이로 구분되지만, 진공의 크기가 매우 작기 때문에 유전율과 유전상수의 크기는 거의 같다.

일반적으로 마이크로파 대역에서 사용되는 산화물 유전체는 실온에서 상유전성의 이온결정이다. 유전체 재료의 유전율에 기여하는 분극에는 공간전하분극 (Space charge polarization), 쌍극자의 배향분극 (Orientation polarization), 이온분극 (Ionic polarization) 및 전자분극 (Electronic polarization)이 있다. 그러나 그림 2에서 보는 바와 같이 공간전하분극과 쌍극자의 배향분극은 마이크로파 영역에서는 전계의 변화를 따라가지 못하므로 그 기여도는 미미하다. 따라서 전자분극과 이온분극만이 유전율에 기여하게 된다. 그러나 일반적으로 전자분극은 전계의 변화를 충분히 따라갈 수는 있으나 유전율의 크기가 매우 작을 뿐만 아니라 광학영역 ($10^5 \sim 10^6 \text{ GHz}$)에서만 영향을 주기 때문에 마이크로파 영역

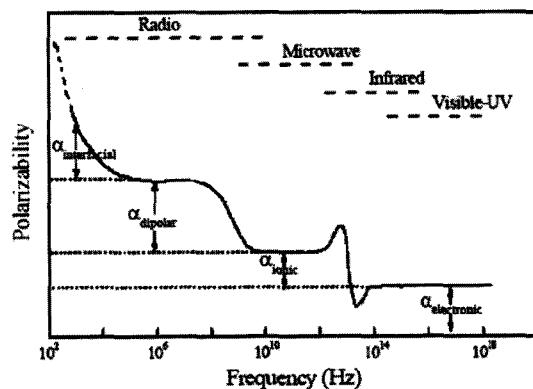


그림 2. 전기장 주파수에 따른 분극 특성.

에서는 이온분극에 의하여 유전특성이 결정된다고 볼 수 있다.

또한 유전율은 유전체 공진기의 공진주파수와 밀접한 연관을 가진다. 유전상수 값이 일정한 값 이상을 가진 유전체의 경우 유전체에 입사된 전자파는 유전체 내부를 진행하여 유전체-공기 계면에 도달했을 때 유전체와 공기의 계면에서 두 환경사이의 유전율의 차이에 의해 일부가 다시 유전체 내부로 반사하게 되고 이 반사파와 입사파가 간섭을 일으켜 유전체 내부에 정상파 (Standing wave)를 형성하면 공진을 일으키게 된다. 예를 들어 이동통신용 듀플렉서나 대역통과 필터의 기본구조인 동축형 (Coaxial) 공진기는 TEM 모드 공진을 하며, 공진주파수 (f_0)는 유전율의 제곱근과 공진기의 길이에 반비례 한다. 따라서 유전율이 일정한 경우 공진주파수가 낮아질수록 유전체 공진기의 크기는 증가되며, 공진주파수가 일정할 경우 유전율이 높아질수록 유전체 공진기의 크기는 작아진다.

더욱이 유전체 공진기의 공진을 주파수-전달 능력 (Power)으로 나타내면 그림 3과 같다. 실제 그림 3은 주파수의 선택 특성으로써, 이때 사용되는 지표로서 주파수의 반가폭을 많이 이용한다. 즉, 주파수-전달 능력 그래프 상에서 최대가 되는 주파수가 공진 주파수이며 이때 최대 전달 능력의 50% 되는 지점, 즉 주파수의 반가폭 (Δf)이 주파수 선택성을 나타내는 지표가 된다. 입력 안테나와 출력 안테나를

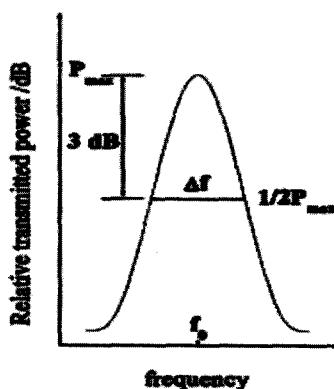


그림 3. 주파수-전달 능력 변화.

사용하였을 때 주파수에 따른 전달량을 나타낸 것으로 공진 주파수에서 전달량이 최대치를 나타내는 이유는 이 주파수만이 유전체 공진기 내에서 정현파를 형성하고 있으므로 출력 안테나는 이 정현파와 만 Coupling되기 때문이다.

품질계수 (Quality factor, Q) [4]란 유전체 외부에서 전자기파가 가해지면 대부분의 에너지는 유전체 내에 저장되고 일부는 유전손실에 의해 열로 변환되며, 이때 저장된 에너지와 손실된 에너지의 비를 나타내는 것으로 유전손실 (Dielectric loss, $\tan\delta$)의 역수를 말한다.

저주파 영역에서 사용되는 단파형 커패시터에서 유전손실이 일어나는 이유는 두 가지다. 첫째, 유전체가 약간의 전기전도도를 가지기 때문에 발생하는 누설전류에 의해 생기는 손실 둘째, 외부전기장의 방향이 바뀌는 속도에 분극 방향이 바뀌는 속도가 따라가지 못하기 때문에 생기는 손실이다.

반면 마이크로파 영역에서 사용되는 마이크로파 유전체의 품질계수 ($Q \times f_0$)는 품질계수 (Q)와 공진 주파수 (f_0)의 곱으로 표현되며, 전자부품의 신호 손실과 직접적인 관련이 있다. 마이크로파 영역에서는 주파수 변화에 대하여 유전율의 변화가 없거나 크지 않지만, 유전손실은 주파수가 증가함에 따라 증가하게 된다. 또한, 마이크로파 영역에서 유전손실이 작은 유전체를 제조하기 위해서는 감쇄정수 (Damping constant, γ)를 작게 해야 한다. 그 이유는 감쇄정수를 작게 할수록 결정내의 산란에 의한 광학적 격자 진동 (혹은 마이크로파)의 감소를 막아 유전손실을 감소시킬 수 있기 때문이다. 완전 결정에서의 감쇄정수는 결정 내에 존재하는 격자진동의 비조화성 때문에 커지며, 한편, 강유전체가 상유전체보다 더 큰 유전손실이 생기는 것은 큐리 온도 이상에서 격자진동의 비조화성과 더불어 자발적으로 분극된 미세분역이 나타나 열적 분극 요동을 일으키기 때문이다. 다결정체의 경우에는 격자결합, 결정립계에 존재하는 제2상과 불순물 등이 감쇄정수를 증가시킨다. 따라서 마이크로파 유전체는 일반적으로 다결정체이며, 품질계수를 증가시키기 위해서는 격자 결합을 최소화하고 불순물을 줄이는 것이 중요하다.

3. LTCC 원료 제조 방법

종래의 HTCC가 1,500°C 이상의 소성온도를 필요로 하는데 비해 LTCC는 50~60% 수준인 900~1000°C 부근에서 저온소성이 가능하다. 이러한 LTCC 원료를 제조하는 방법은 두 가지로 구분할 수 있는데, 세라믹 주성분에 소결조제를 첨가하는 방법과 Glass를 첨가하는 방법(Ceramic/Glass 복합체)이다.

초기에는 마이크로 유전체 원료에 CuO, V₂O₅ 및 B₂O₃ 등의 산화물 소결첨가제를 소량 투입하여 900~950°C 정도에서 저온소성이 가능한 연구가 진행되어 왔다. 이는 일반적인 세라믹 재료의 소성 온도 저하시 생길 수 있는 전기적 특성의 저하를 최소화하고자 하는 것으로, Ceramic/Glass 복합체와 비교했을 때 높은 유전 특성 및 낮은 손실계수를 가질 수 있다. 그러나 소량의 첨가제로 소성온도를 900°C 정도로 낮출 수 있는 세라믹 재료가 많은 편이 아니며, 최적 소결의 온도 범위가 매우 협소하여 원하는 특성 값을 유지하는 일이 쉽지 않다. 더욱이 다량 첨가할 경우 2차상 생성 등에 의해 물성이 크게 저하되는 현상이 발생하며, Ag 전극과의 반응성 문제도 심각하게 대두되어 연구가 감소하고 있다. 반면 Ceramic/Glass 복합체의 경우 소결조제를 첨가한 것보다 물성은 다소 떨어지지만, 최적 소결 온도 범

위가 넓고, Ceramic/Glass 복합체 및 Glass 자체의 Ag 반응성이 매우 적은 편이어서 최근 LTCC용 소재 개발이 활발히 진행 중이이다.

멀티레이어 세라믹 시스템의 하나인 LTCC는 Ceramic/Glass 복합체 소재 및 바인더로 이루어진 Ag 및 Cu전극을 850~1,000°C의 비교적 낮은 온도에서 동시 소성하여 얻어진다. LTCC 부품의 성능이 좌우하는 것은 Glass의 성능과 Ceramic/Glass 복합체의 조합, 즉 LTCC 소재의 성능이다. 그림 4에 LTCC 소재의 제조공정을 나타내었으며, ① Glass 조성 혼합, ② Glass 용해, ③ Glass 조분쇄 및 미분쇄, ④ Ceramic/Glass 복합체의 혼합, ⑤ 소성검사 및 평가의 순으로 제조된다. 특히, Glass의 성능은 Glass의 조성 및 분쇄상태의 영향을 받으며, Ceramic/Glass 복합체의 조합은 Ceramic과 Glass의 매칭성 및 함량 등의 영향을 고려해야 한다.

LTCC용 소재로 사용되는 Ceramic/Glass 복합체 제조 방법은 3가지 정도가 대표적으로 사용되고 있다. 첫째, Glass와 알루미나(Al₂O₃)와 같은 세라믹을 단종 또는 이종 이상 혼합하여 기지 내에 세라믹이 충전제로 혼합된 것으로, 50~90 wt% 정도의 봉규산염(Borosilicate, B₂O₃-SiO₂)계 Glass와 10~50 wt% 정도의 세라믹을 혼합시키는 방법이다 [5]. Glass는 700°C 미만에서 연화(Softening)되고, 800°C 부근에서 액상을 형성하면서 점성 유동을 통해 충전제 기지 사이로 침투한 후, 900°C 미만에서 치밀화(Densification)를 시키며, 충전제로 사용되는 세라믹은 복합체의 형상을 유지하며 기계적 특성을 부여하는 역할을 한다. 둘째, Glass와 세라믹 분말을 혼합하여 열처리과정을 거치면서 서로 반응하여 전기적 및 열적 특성을 향상시킬 수 있는 제2의 결정상을 생성시킬 수 있는 방법으로, 아연봉규산염(Zinc-borosilicate, ZnO-B₂O₃-SiO₂)계 Glass와 알루미나를 혼합시켜 열처리할 경우, ZnAl₂O₄의 제2의 결정상이 생성되면서 유전율(ϵ_r) 5.7, 품질계수($Q \times f_0$) 18,000 GHz의 우수한 유전 특성을 나타낸다 [6]. 셋째, 결정화가 가능한 Glass를 열처리하여 결정화 Glass/Ceramic 복합체를 제조하는 방법으로, 코디어라이트계 결정화 Glass에 대해 많이 연구되어 왔다 [7]. 최근에는 Anorthite와 Diopside

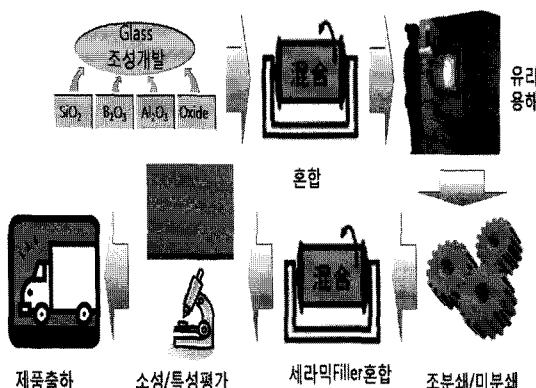


그림 4. Manufacture process of Ceramic/Glass powder for LTCC.

계 두 가지 결정화 Glass를 사용하여 복합 결정상을 생성시켜 기계적 특성을 향상시키는 연구가 진행되고 있다 [8].

그림 5는 제조된 LTCC 소재로부터 LTCC 부품을 제조하는 공정도를 나타낸 것이다. 공정은 ① Ceramic과 Glass의 혼합 (LTCC 소재), ② LTCC 소재와 바인더 혼합 (슬러리), ③ Tape casting, ④ Green Sheet 제조, ⑤ Via hole, ⑥ 전극인쇄, ⑦ 적층, ⑧ 압착, ⑨ 소결 공정을 통해서 부품이 제조된다. 또한, 이와 같은 공정을 통해서 제조된 LTCC 부품의 모식도를 그림 6에 나타내었다.

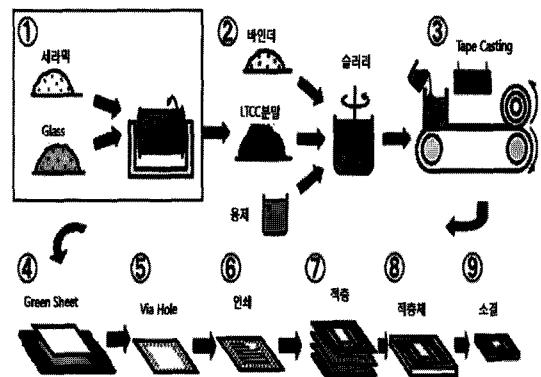
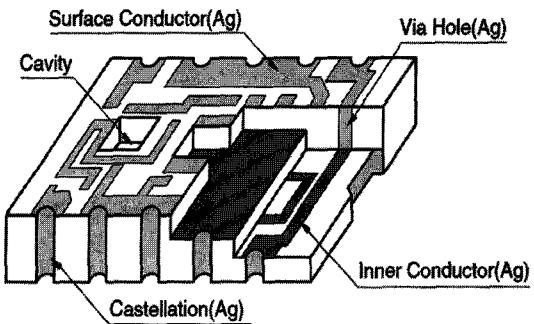


그림 5. LTCC의 제조공정.

4. LTCC 조성 설계에 따른 유전 특성

4.1 저유전율계 LTCC 소재

기판 재료로서 이전까지 유기 (Organic) 또는 폴리머 (Polymer) 물질이 제작 및 비용 요건을 충족시키기 때문에 마이크로파 디바이스의 패키징 물질로 이용되어왔지만, 고주파화에 따라 손실의 증가에 따른 성능 저하나 낮은 열전도도에 의한 내구성의 문제가 대두되면서, LTCC 소재가 개발되어 왔다. 그러나 신호라인의 고속화의 문제, 즉 유전율이 높을수록 신호 전달을 지연시키므로 저유전율을 갖는 LTCC 소재가 요구되고 있으며, LTCC 기판 재료는 유전율



* Ni/Au plate surface finish is available.

그림 6. Mimetic diagram of LTCC product (Kyocera, Japan).

표 1. 상용 및 최근 연구원 저유전율 LTCC 조성물 특성.

Materials	K	Qu	ϵ_r (ppm/ $^{\circ}$ C)	Flex. Strength (dP, MPa)	Chemical resistance (wt loss %)	After CR Test Flex. Strength	Plating properties	Ag paste matching (Warpage)	
KIST K7	6.9	170	-40	280	0.00	280	Excellent	<150 μ m	Pb-free
Dupont 951	7.8	124	-60	206	0.06	178	Excellent	210 μ m	Pb
Ferro L5	5.5	150	-52	206	0.12	120	Good	250 μ m	Pb-free
NEC MLS-1000	7.9	155	-35	270	0.01	245	Good	230 μ m	Pb
NEC MLS-22	7.6	155		220	0.05	200	Poor	350 μ m	Pb-free
Heraeus CT2000	9.1	165	5	180	0.10	130	Poor	220 μ m	
Heraeus 51549BK	8.0	150		145	0.12	120	Good	230 μ m	



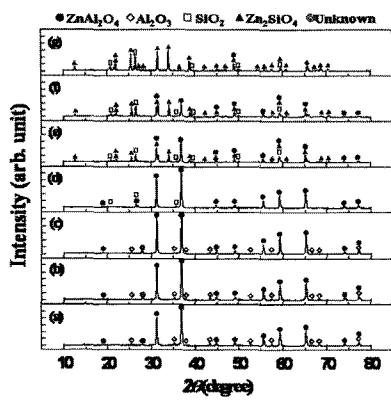
5~8 정도를 갖는 Ceramics/Glass 복합체 조성물이 연구되고 있다.

LTCC 기판 재료는 앞서 설명한 3가지 Ceramic/Glass 복합체 제조 방법 모두 연구되고 있으며, 최근에는 우수한 유전 특성, 화학적 안정성 및 높은 기계적 강도의 요구에 따라 붕규산염계 ($B_2O_3-SiO_2-R$) Glass에서 modifier(R)의 변화, Al_2O_3 보다 낮은 유전율을 갖는 $ZnSiO_4$ 및 $ZnAl_2O_4$ 등의 세라믹을 충전제로 사용, Glass와 Ceramic이 열처리 과정에서 결정화 및 제2의 결정상이 생성에 의해 물성이 향상되는 연구가 진행되고 있다.

표 1은 2007년 KIST가 수행한 'LTCC 소재시스템

및 복합모듈 기술 개발'이다. 유전율 7을 갖는 Al_2O_3 /Glass 복합체 (KIST K7)를 개발하였으며, 내화학성 및 기계적 강도에서 상용 소재보다 월등히 우수하고, Pb-free와 양호한 유전 특성 등 현재 상용화되어 있는 조성과 견주어 보아도 손색이 없는 결과를 나타내었다고 보고하였다 [9].

본 실험실에서는 Al_2O_3 의 함량에 따른 $(1-x)SiO_2-(x)Al_2O_3/ZBS$ Glass 복합체에 대해 연구하였다 [10]. 충전제는 SiO_2 와 Al_2O_3 가 혼합된 조성물이며, ZBS Glass는 아연붕규산염 ($65ZnO-25B_2O_3-10SiO_2$, wt%) Glass이다. 그림 7은 XRD 분석 결과로 충전제와 ZBS Glass가 서로 반응을 일으켜 $ZnAl_2O_4$ 와

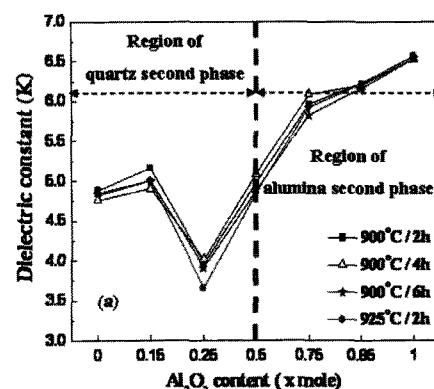


(a)

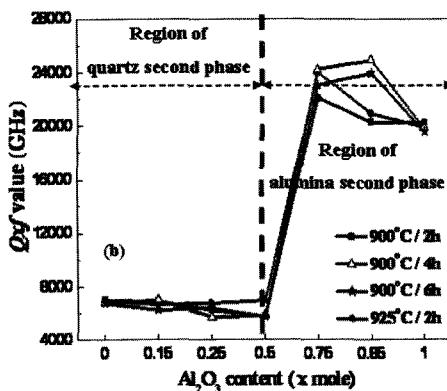
x (mole)	Molar phase	Second phase
(g)	0	Zn_2SiO_4
(f)	0.15	$ZnAl_2O_4$
(e)	0.25	$ZnAl_2O_4$
(d)	0.5	$ZnAl_2O_4$
(c)	0.75	$ZnAl_2O_4$
(b)	0.85	$ZnAl_2O_4$
(a)	1	$ZnAl_2O_4$

(b)

그림 7. $(1-x)SiO_2-(x)Al_2O_3/ZBS$ Glass 복합체의 XRD 분석 결과.



(a)



(b)

그림 8. $(1-x)SiO_2-(x)Al_2O_3/ZBS$ Glass 복합체의 유전 특성 변화.

Zn_2SiO_4 의 결정상을 생성시키며, 더욱이 Al_2O_3 함량에 따라 2차상으로 존재하는 Al_2O_3 과 SiO_2 상변화가 관찰되었다. 이에 따라 그림 8과 같이 유전 특성에 영향을 주었으며, 저유전율 (5~6.5) 및 고품질계수 (7,000~24,000 GHz)를 갖는 LTCC 기판 소재를 개발할 수 있었다.

4.2 중유전율계 LTCC 소재

저유저울 LTCC 소재는 L/C/R 수동소자를 내장하지 않는 단순한 3차원 배선기판의 형태로 활용되어 왔으므로 신호전달 지연이 작도록 하기 위해 유전율이 낮은 기판에 응용되어 왔다. 그러나 현재까지의 LTCC는 거의 대부분이 전기적 길이를 고려치 않은 단순한 3차원 고밀도 배선기판의 개념에 불과했지만, 향후에는 마이크로스트립 라인의 전기적 길이를 이용한 분산회로 개념이 도입될 것으로 보인다. 이 경우는 기판의 유전율을 적절하게 제어하는 것이 필요하게 된다. 예컨대 위성방송의 주파수 대역인 12 GHz에서는 $\lambda/4$ 가 대략 5 mm 정도가 되는데 이것은 LTCC 모듈의 크기에 비해 큼 수도 있고 작을 수도 있다. 이러한 경우에는 전기적 길이를 용도에 맞게 조절하기 위해서는 기판 유전율을 제어하는 것이 필요하다 [11]. 더욱이 최근 그림 9와 같이 공진기 (Resonator) 개념을 이용하는 수동/능동소자를 LTCC 구조 안에 구현하여 전자부품의 소형화와 고기능화를 위해 20~40 정도의 중유전율 LTCC 소

재 개발이 요구된다.

중유전율 LTCC 소재로 $MgTiO_3-CaTiO_3$ 계 ($\epsilon_r=21$, $Q \times f_0=56,000$ GHz and $\tau_f=0$ ppm/°C)와 Orthorhombic 구조를 갖는 MNb_2O_6 (M=Ba, Ca, Mg, Mn, Cu, Zn)를 사용한 연구가 진행되어 왔다. 특히 $ZnNb_2O_6$ 는 우수한 유전 특성 ($\epsilon_r=25$, $Q \times f_0=83,700$ GHz and $\tau_f=56$ ppm/°C)과 비교적 낮은 소결 온도 (1150°C) 때문에 많은 연구가 진행되어 왔으며, 최근에는 유전율 40 조성물로 $BaO-Nb_2O_5$ 계가 연구되고 있다.

최근 보고된 중유전율 소재는 세라믹 충전제에 Glass 또는 Glass와 소결조제를 함께 첨가하는 연구가 진행되고 있으며, 유전율 20에서는 0.9MgTiO₃-0.1CaTiO₃에 10 wt% LBS Glass가 첨가하였을 때 유전율 19.1, 품질계수 13,000 GHz 및 공진주파수 온도 계수 (τ_f) -1.3 ppm/°C [13], 유전율 40은 $Ba_2Ti_3Nb_4O_{18}$ 에 1.5 wt% $MnCO_3-CuO$ 와 0.5 wt% LBS Glass를 첨가할 경우 유전율 41, 품질계수 15,000 GHz 및 공진주파수 온도계수 4 ppm/°C이 보고되고 있다 [14].

4.3 고유전율계 LTCC 소재

중유전율 소재에서 설명한 것과 같이 저유전율 소재의 경우 신호라인의 간섭을 일으키는 부유용량이 적어 처리속도 면에서 유리하지만 기능을 갖는 소자를 구현하고자 할 때는 어려움이 있다. 즉 정전용량 값이 큰 커패시터를 구현하고자 할 때에는 유전율이 낮으므로 전극의 면적을 크게 하거나 충간 간격을 작게 하는 방법을 주로 사용하였다. 하지만 이러한 방법으로는 소형화와 다기능화의 추세에 역행할 수밖에 없다. 특히 전자산업의 발전에 따른 정보의 양적인 증가는 이를 수용할 통신기기 및 기록매체에 대한 수요를 급증시키고 있다. 이러한 경향은 고밀도 기록소자의 개발을 촉진시킬 뿐만 아니라, 동시에 많은 정보를 전달할 수 있는 초고주파나 밀리미터파 등과 같은 고주파를 이용하는 소자에 대한 연구를 활성화시켰다. 이러한 시스템에서 사용되는 기기에 유전체 소재를 이용한 공진기의 응용이 증가 되고 있다. 유전체 공진기는 소형이면서 높은 신뢰도로 마이크로파 집적회로에 적용하기 쉽다는 장점을 지니고 있다.

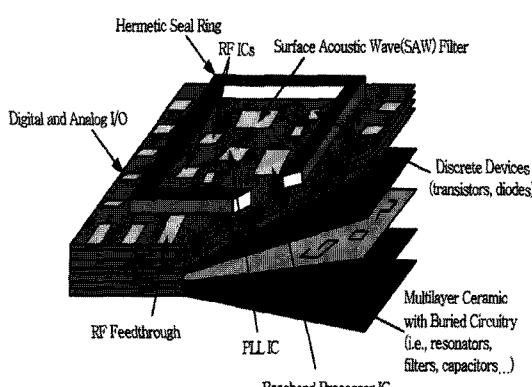


그림 9. LTCC에 의한 수동/능동소자 패키지 [12].



현재 연구되고 있는 고유전율 LTCC 소재는 고유전율 유전체 조성물에 소결조제 및 Glass 첨가한 조성물로 BaO-TiO₂ 계열, 복합 페로브스카이트 계열, Pyrochlore 계열 등의 소재가 연구되어 있으며, 표 2와 같이 보고되어 있다 [15].

BaO-TiO₂계에 희토류 금속이 첨가된 BaO-Nd₂O₃-TiO₂ [16]는 온도에 대한 공진주파수 안정성 ($\tau_f=6.2$)과 높은 유전율 ($\epsilon_r=90$)을 가지므로 LTCC 모

표 2. 고유전율 LTCC 조성물 특성.

Material	Sintering temperature (°C)	ϵ_r	$Q \times f_0$ (GHz)	Reference
Ba(Nd _{0.8} Bi _{0.2}) ₂ Ti ₄ O ₁₂ + 10 wt% Li ₂ O-B ₂ O ₃ -SiO ₂ -Al ₂ O ₃ -CaO	900	68	2,200	16
Bi ₂ (Zn _{1/3} Nb _{2/3}) ₂ O ₇	950	76.2	2,980	17
Bi ₂ (Zn _{1/3} Nb _{2/3}) ₂ O ₇ (x=0.003)	850	78	3,480	
Bi _{1.5} Zn _{0.92} Nb _{1.5} O _{6.92}	1050	126.2	520	
Bi _{1.5} Zn _{0.92} Nb _{1.5} O _{6.92} + 0.6 wt% V ₂ O ₅	850	148	120	18
Ag(Nb _{1/4} Ta _{3/4})O ₃	925	295	600	
Ag(Nb _{2/4} Ta _{2/4})O ₃	1200	285	300	
Ag(Nb _{3/4} Ta _{1/4})O ₃	925	487	200	
Ag(Nb _{2/4} Ta _{2/4})O ₃ + 1 wt% CuO	900	398	400	19

표 3. Bi₂(Zn_{1/3}Nb_{2/3})₂O₇의 저온 소결 및 유전 특성.

Material	ZBS Glass addition (wt%)	Sintering temperature (°C)	Shrinkage (%)	Relative density (%)	ϵ_r	$Q \times f_0$ (GHz)
Bi ₂ (Zn _{1/3} Nb _{2/3}) ₂ O ₇	0	850	16.33	92.9	72.7	1,300
		900	17.33	94.9	75.4	1,500
		950	18.00	94.5	75.1	1,600
		1000	17.67	93.9	74.4	1,500
	3	850	17.00	95.6	63.6	2,800
		900	17.67	96.8	64.7	2,700
		950	16.67	92.1	58.7	2,500
	5	850	16.47	96.9	57.7	2,500
		900	16.53	96.1	57.5	2,300
		950	15.07	91.2	52.6	2,000
	7	850	16.87	99.7	53.9	1,700
		900	16.33	97.1	53.8	1,200
		950	14.47	92.2	49.6	1,300

둘용 세라믹 재료로 기대되지만, 희토류 금속의 사용에 따른 비용 부담이라는 제약이 있다. 최근 강유전성 소재로 복합 페로브스카이트 계열인 Ag(Nb, Ta)O₃ [19]이 연구되고 있다. 강유전체란 외부의 전기장이 없이도 스스로 자발 분극을 가지는 재료로서 외부 전기장에 의하여 분극의 방향이 바뀔 수 있는 물질이다. 이러한 강유전체 물질은 넓은 범위에서 매우 매력적인 물질이다. 필터의 응용 측면에서 강유전체 물질은 인가 전계에 따라 유전율이 변화하므로, 낮은 솔루션 커페시터를 제어 할 수 있으므로 고주파 대역의 능동소자로도 그 활용이 매우 기대되는 물질이다. Pyrochlore 계열((Bi₂O₃, PbO)-ZnO-Nb₂O₅)은 Bi계와 Pb계로 나눌 수 있으며, Pb계는 암전체 조성물로 많이 알려져 있다. 특히 그림 10과 같이 Bi계 Pyrochlore는 BiNbO₄와 달리 Ag 반응성이 없으며 [17, 18], 낮은 소결 온도 (950~980°C)를 나타내기 때문에 60~80 유전율 조성물로 기대된다. 표 3은 본 실험실에서 연구한 Bi₂(Zn_{1/3}Nb_{2/3})₂O₇에 ZBS Glass를 첨가한 복합체의 저온 소결 및 유전 특성을 나타낸 것이다. Bi₂(Zn_{1/3}Nb_{2/3})₂O₇의 소결 온도를 950°C에서 900°C 이하로 낮출 수 있으며, 50~60 정도의 유전율을 갖는 LTCC 소재를 개발할 수 있었다.

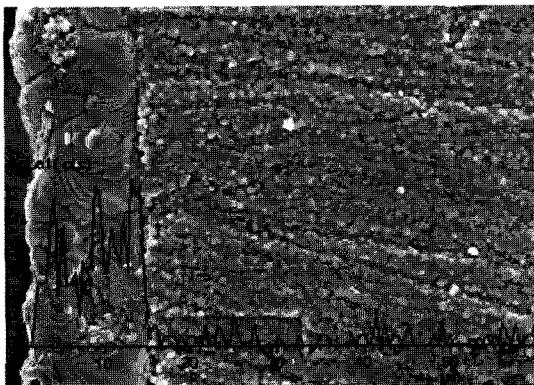


그림 10. Ag 전극과 Bi₂(Zn_{1/3}Nb_{2/3-x}V_x)₂O₇ (x=0.005)를 850°C에서 소결한 내부의 SEM과 EDS.

5. LTCC 조성 설계에 따른 기계적 특성

국내 영상 의료기기용 (Digital X-Ray, CT 등) 대면적 이미지센서 모듈 및 12인치 반도체 웨이퍼의 핵심 검사 장비인 Probe card용 대면적 MST (Multi-layer Spacetransformer)의 국산화 비율은 날로 증가하고 있는 추세이지만, 핵심부품인 센서모듈 수납용 멀티레이어 세라믹 회로기판용 소재는 수입에 의존하고 있는 실정이다. 대면적 멀티레이어 세라믹 회로기판을 제조하기 위해서는 우선 고강도 LTCC (Ceramic/Glass 복합체) 소재가 필요하다. 고강도 LTCC 소재에 대해서는 DuPont (미국), Ferro (미국), Heraeus (독일) 및 NEG (일본)의 선진소재사가 독점공급을 하고 있다. 표 4는 상용 LTCC 기판 소재의 결정상과 기계적 특성을 나타낸 것으로 [20], DuPont 951($\text{Ca}(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$), Heraeus CT800($(\text{Mg}, \text{Ca})\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Motorola T2000($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) 등이 Anorthite 결정상으로 이루어진 것을 알 수 있다. Anorthite는 $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ 로 이루어진 결정상이며, Glass가 쉽게 결정화되며 결정이 침상 또는 주상으로 성장하여 고강도 및 우수한 유전특성을 나타내기 때문에 많은 선진 기업들이 적용하고 있는 것으로 파악된다.

Anorthite와 같은 결정화 Glass의 특성으로는 유

전특성을 조절할 수 있고 기계적 강도를 증진시키고, 저온에서도 공정이 가능한 장점을 가지고 있다. 그러나 결정화 Glass는 충격에 취약한 재료이기 때문에 취급 시나 불균일한 Stress로 인하여 쉽게 손상 및 파괴 문제가 발생되며, 더욱이 결정화 Glass는 열적 또는 기계적인 원인 때문에 기판의 불량을 야기 시킨다. 이러한 문제점을 제거하기 위하여 제2의 상을 첨가 시키는 방법이 대두 되고 있으며, 제2상은 주결정상의 물성을 향상 시킬 수 있다. 최근 저열팽창성, 저유전율 및 화학적 안정성이 우수한 $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (Anorthite)계와 고강도 및 저손실의

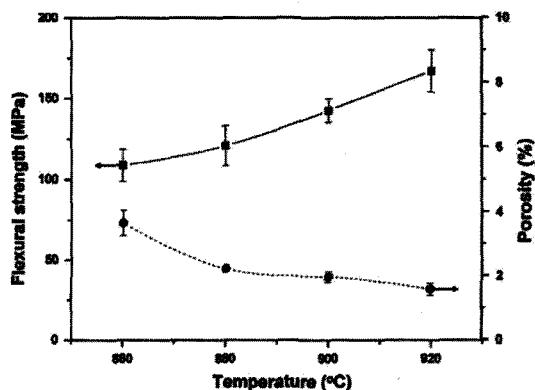


그림 11. Anorthite와 Diopside계 Glass 및 Al_2O_3 가 혼합된 Glass/Ceramic 복합체의 굽힘 강도 특성.

표 4. 상용 LTCC 기판 소재의 결정상과 기계적 특성.

	DuPont 951	DuPont 951	Ferro A6	Heraeus CT800	Heraeus CT700	Motorola T2000
Phase structure	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\text{Ca}(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $(\text{Ca})\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ CaSiO_3	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	$\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
3-point bend (kpsi)	45.7	45.6	35.8	42.1	30.6	45.7
4-point bend (kpsi)	34.2	32.8	28.5	28.8	22.9	38.2

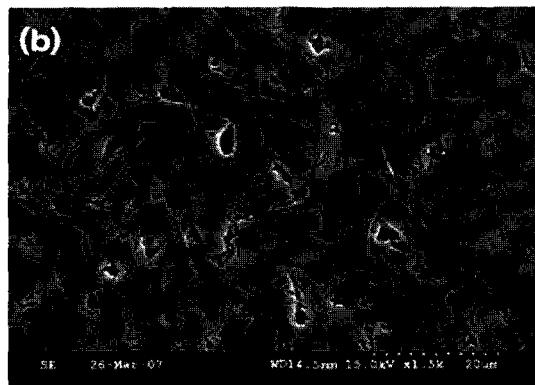


그림 12. Anorthite와 Diopside계 Glass가 혼합된 Glass/Ceramic 복합체를 5% HNO_3 으로 에칭한 미세 구조.

CaO-MgO-SiO_2 (Diopside)계 열이 포함된 결정화 Glass에 대한 연구가 진행되고 있다. 그림 11은 Anorthite와 Diopside계 Glass 및 Al_2O_3 가 혼합된 Glass/Ceramic 복합체가 소결 온도가 증가와 함께 기공이 감소하면서 굽힘 강도가 증가되는 것을 나타낸 것이다 [8]. 그림 12는 Anorthite와 Diopside계 Glass가 혼합된 Glass/Ceramic 복합체로써 결정이 침상 모양으로 성장한 것을 잘 나타내고 있다 [21].

6. 결 론

현재 통신부품에 있어서의 큰 경향은 Multiband이며, 전 세계를 하나의 통신 시스템으로 통합하려는 IMT-2000이 사실상 실패한 이후 시스템이 아닌 하드웨어(핸드폰)에 의한 Worldwide use에 대한 수요가 증가하고 있기 때문에 CDMA(1 GHz), PCS(2 GHz)를 커버하는 Dual 또는 Triple band switching 이 구현되고 있다. 또한, Bluetooth 및 WLAN 등의 근거리 통신에서도 정보량의 증대에 따라 2.4 GHz 와 5 GHz 두 영역에서 사용 가능한 부품이 필요하다. 이러한 새로운 부품 설계를 위해서는 2가지 핵심기술이 필요하다. 하나는 기존 재료와 다른 전자기적, 열적 및 기계적 물성을 갖는 재료이고, 다른 하나는 새로운 재료와 구조를 갖는 부품의 개발속도 를 향상시켜 줄 수 있는 RF 시뮬레이션 기술이다. 두 가지 핵심기술에서, LTCC 원료를 대부분 수입에 의존하는 국내 현실을 보면 기존 재료와 다른 전자기적, 열적 및 기계적 물성을 갖는 재료의 개발이 시급하다.

참고 문헌

- [1] Y. J. Choi, J. H. Park, J. H. Park, S. Nahm, and J. G. Park, "Middle- and High-Permittivity Dielectric Compositions for Low-Temperature Co-fired Ceramics," *J. Eur. Ceram. Soc.*, 27 [4], 2017-24 (2007).
- [2] K. Wakino, T. Nishikawa, Y. Ishikawa, and H. Tamura "Dielectric Resonator Materials and their Applications for Mobile Communication Systems", *Br. Ceram. Trans. J.*, 89 [2], p.39-43 (1990).
- [3] B. C. H. Steele, "Electronic Ceramics", Elsevier Applied Science, London and New York, (1991).
- [4] A. V. Hippel, "Dielectrics and Waves", M.I.T press, Cambridge (1996).
- [5] Y. J. Choi, J. H. Park, W. J. Ko, I. S. Hwang, J. H. Park, J. G. Park, and S. Nahm, "Co-Firing and Shrinkage Matching in Low- and Middle-Permittivity Dielectric Compositions for a Low-Temperature Co-Fired Ceramics System", *J. Am. Ceram. Soc.*, 89, 562-7 (2006).
- [6] S. O. Yoon, S. H. Shim, K. S. Kim, J. G. Park, and S. Kim, "Low-Temperature Preparation and Microwave Dielectric Properties of ZBS Glass- Al_2O_3 Composites," *Ceram. Inter.*, 35 [3], 1271-5 (2009).
- [7] H. K. Sarah, H. K. Ananda, and L. W. Herron, "Cordierite Glass-Ceramics for Multilayer Ceramic Packaging", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 72, 90-5 (1993).
- [8] J. H. Kim, S. j. Hwang, W. K. Sung, and H. S. Kim, "Effect of Anorthite and Dopside on Dielectric Properties of Al_2O_3 /Glass Composite Based on High Strength of LTCC Substrate", *J. Mater. Sci.*, 43, 4009-15 (2008).
- [9] 박재관, "LTCC 소재시스템 및 복합모듈 기술 개발", 산업자원부, p. 17-9 (2007).
- [10] K. S. Kim, G. O. Um, S. Kim, and S. O. Yoon, "Low Temperature Sintering and Microwave Dielectric Properties of Quartz-Alumina/Zinc Borosilicate Glass System", (The 26th International Japan-Korea Seminar on Ceramics, Tsukuba, Japan, 2009) p. 585-8.
- [11] 김민한, 남산, "저온동시소성 세라믹스의 저온 소결", 세라미스트, 8 [3], 20-4 (2005).
- [12] 한진우, 김동영, 이상석, "저온동시소성 세라믹(LTCC) 기술과 그 응용", 정보통신산업진흥원 주간기술동향, 1005호, p. 16-29 (2001).
- [13] H. K. Shin, H. H. Shin, S. Y. Cho, and K. S. Hong, "Phase Evolution and Dielectric Properties of $\text{MgTiO}_3\text{-CaTiO}_3$ -Based Ceramic Sintered with Lithium Borosilicate Glass for Application to Low Temperature Co-Fired Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, 88 [9] 2461-5 (2005).
- [14] D. Zou, Q. Zhang, H. Yang, and S. Li, "Low Temperature Sintering and Microwave Dielectric Properties of $\text{Ba}_2\text{Ti}_3\text{Nb}_4\text{O}_{18}$ Ceramics for LTCC

Applications", J. Eur. Ceram. Soc., 28, 2777-82 (2008).

[15] M. T. Sebastian and H. Jantunen, "Low Loss Dielectric Materials for LTCC Applications: a Review", Int. Mater. Rev., 53, p. 57-90 (2008).

[16] I. S. Cho, D. W. Kim, J. R. Kim, and K. S. Hong, "Low-Temperature Sintering and Microwave Dielectric Properties of BaO · (Nd_{1-x}Bi_x)₂O₃ · 4TiO₂ by the Glass Additions", Ceram. Inter., 30, p. 1181-5 (2004).

[17] G. K. Choi, D. W. Kim, S. Y. Cho, and K. S. Hong, "Influence of V₂O₅ Substitutions to Bi₂(Zn_{1/3}Nb_{2/3})₂O₇ Pyrochlore on Sintering Temperature and Dielectric Properties", Ceram. Inter., 30 [7], p. 1187-90 (2004).

[18] M. C. Wu, Y. C. Huang, and W. F. Su, "Silver Cofirable Bi_{1.5}Zn_{0.92}Nb_{1.5}O_{6.92} Microwave Ceramics Containing CuO-Based Dopants", Mater. Chem. Phys., 100 [2-3], 391-4 (2006).

[19] H. T. Kim, T. Shroud, C. Randall, and M. Lanagan, "Low-Temperature Sintering and Dielectric Properties of Ag(Nb, Ta)O₃ Composite Ceramics", J. Am. Ceram. Soc., 85 [11], p. 2738-44 (2002).

[20] W. K. Jones, Y. Liu, B. Larsen, P. Wang, and M. Zampino, "Chemical, Structural, and Mechanical Properties of the LTCC Tapes", Int. J. Microcirc. Electron. Packaging, 23 [4], p. 469-73 (2000).

[21] J. H. Kim, S. J. Hwang, W. K. Sung, and H. S. Kim, "Thermal and Dielectric Properties of Glass-Ceramics Sintered Based on Diopside and Anorthite Composition", J. Electroceram., 23, p. 209-13 (2009).

담|당|위|원|



성명 : 김관수

◆ 학력

- 2004년 강릉대학교 공과대학 재료공학과 공학사
- 2006년 강릉대학교 대학원 재료공학과 공학석사
- 현재 강릉원주대학교 대학원 재료공학과 박사과정



성명 : 윤상옥

◆ 학력

- 1980년 연세대학교 공과대학 요업공학과 공학사
- 1984년 연세대학원 대학원 요업공학과 공학석사
- 1988년 연세대학원 대학원 요업공학과 공학박사

◆ 경력

- 1984년 - 1990년 한국과학기술연구원 세라믹스부 선임연구원
- 1993년 - 1994년 동경공업대학 공업재료연구소 책임연구원
- 1995년 - 1996년 강릉대학교 공학연구소 소장
- 1996년 - 1998년 강릉대학교 공과대학 학장
- 1996년 - 현재 강릉원주대학교 세라믹공학과 교수
- 2005년 - 2007년 강릉대학교 강원신소재 사업단 (NURI) 단장
- 2007년 한국전기전자재료학회 부회장



성명 : 김신

◆ 학력

- 1986년 연세대학교 공과대학 요업공학과 공학사
- 1988년 연세대학교 대학원 요업공학과 공학석사
- 1994년 동경공업대학 총합이공학연구과 공학박사

◆ 경력

- 1994년 - 1995년 삼성중공업(주) 중앙연구소 선임연구원
- 1995년 - 1996년 국립기술품질원 화학부 무기화학과 공업연구사
- 1996년 - 2000년 국립기술품질원 요업기술원 정밀요업과 공업연구사, 공업연구관
- 2006년 - 2008년 국립강릉대학교 세라믹공학과 BK21사업 계약교수
- 2008년 - 현재 (주)씨모텍 연구소장