

# 세라믹/금속 접합공정기술의 연구동향



이 형 근 (KIMM 용접기술연구부)

- '77 - '81 영남대학교 금속과 (학사)
- '81 - '83 한국과학기술원 재료공학과 (석사)
- '87 - '92 한국과학기술원 재료공학과 (박사)
- '83 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

## 1. 배경

최근 들어서 여러 탁월한 기능을 가지는 새로운 세라믹들이 개발되어 왔으며, 계속해서 새로운 세라믹 소재들이 개발되고 있다. 또한 산업 기술 역시 급격하게 발전함에 따라, 산업부품의 고기능화가 요구되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위해서는 세라믹 소재의 활용이 증가할 수 밖에 없으며, 이들을 잘 활용하기 위해서는 사용에 적합한 형태의 가공기술이 확립되어야 한다. 이러한 가공기술들은 부가가치 면에서 원 소재의 제조기술을 능가하는 경우가 많다. 여러 가공기술들 중에서 세라믹/금속의 접합기술도 중요한 가공기술로서 고려되고 있다. 이러한 세라믹/금속 접합의 응용은 주로 전자산업 등의 기밀접합부품들에 많이 적용되어 왔으며, 표1에서는 대표적인 응용 예를 보여 준다. 기술의 발전과 함께 세라믹/금속 접합공정기술도 매우 다양한 방향으로 진전되어 왔다. 그림 1에서는 대표적인 세라믹/금속 접합법의 분류를 보여 준다. 세라믹과 금속의 종류, 접합부의 요구성능 및 사용환경 등에 따라서 각기 다른 접합법이 사용되고 있다. 세라믹/금속 접합에서는 세라믹과 금속의 근본적인 원자결합구조가 다르기 때문에 접합계면에서 일어나는 현상의 이해가 가장 중요한 연구과제로 수행되어 왔다. 특히 접합계면에서 일어나는 미세 화학반응의 분석 및 제어능력, 열팽창계수의 큰 차이로 인한 열응력 및 잔류응력의 발생과 예측 및 제어능력 등이 중요한 요소가 되고 있다. 세라믹/금속 접합에서는 세라믹과 금속소재의 종류, 중간층의 유무, 형태 및 종류, 접합방법 등에 따라 너무나

표1 세라믹/금속 seal의 대표적인 응용분야

<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 전기절연                     <ul style="list-style-type: none"> <li>Feedthrough, Bushing, Terminal</li> <li>고압용</li> <li>진공계</li> <li>고압용기</li> </ul> </li> <li>◇ 전자관                     <ul style="list-style-type: none"> <li>진공관</li> <li>Spacer</li> <li>지지체</li> <li>창</li> <li>고체 device</li> <li>Package</li> <li>Header</li> <li>후막 : Hybrid</li> <li>적층판</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◇ 광학과 전자광학                     <ul style="list-style-type: none"> <li>Lamp</li> <li>알칼리 증기</li> <li>조명</li> <li>아크</li> <li>창</li> <li>수준 지시기</li> <li>Laser 구멍</li> <li>에너지 변환</li> <li>열이온 device</li> <li>Battery : 재래용과 원자핵용</li> <li>열교환기 덮개</li> <li>점화기</li> </ul> </li> <li>◇ 원자핵공학                     <ul style="list-style-type: none"> <li>원자로 부재와 관리</li> </ul> </li> <li>◇ 저온용</li> </ul>
--	--

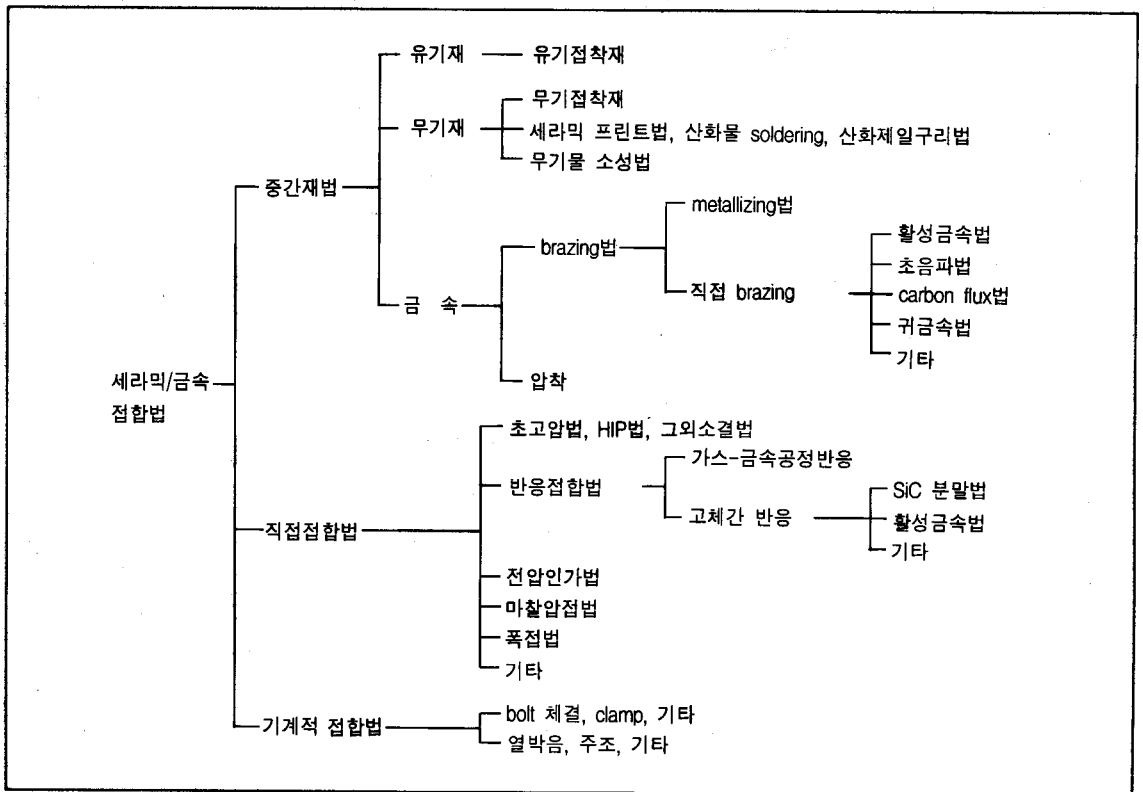


그림 1 세라믹/금속 접합법의 분류

많은 다양한 연구가 보고되고 있기 때문에 연구 경향을 하나의 줄기로 정리하는 것은 매우 어렵다. 최근 들어서 새로운 다양한 열원이 등장함에 따라 세라믹/금속 접합 연구에서 가장 발전하고 있는 분야는 접합 공정분야이다. 여기서는 몇가지 관심있는 세라믹/금속 접합공정을 중심으로 최근의 연구경향을 살펴 보기로 한다.

## 2. Mo-Mn Metallizing 법

metallizing법은 1950년대 개발되어 현재까지도 가장 많이 사용되고 있는 고전적인 alumina 세라믹과 금속의 접합방법이다. 그림 2의 왼쪽에서 Mo-Mn metallizing 접합공정의 흐름도를 보여 준다. 우선 접합하고자 하는 alumina 세라믹의 표면에 Mo-Mn paste를 도포하고, 흡습 수소 분위기하에서 1500°C 근처의 온도로 가열한다. 이때 Mo-Mn 분말들은 세라믹과 반응하여 저융점의 spinel 상을 생성하고 이들을 매개

로 하여 세라믹과 강고한 접합이 일어난다. Mo-Mn 층은 일반적으로 브레이징 합금과의 wetting성이 좋지 않기 때문에 금속과의 직접 브레이징이 용이하지 않다. 따라서 일반적으로 금속과 브레이징을 하기 전에 Mo-Mn 층 위에 Ni층을 피복한다. Ni층의 형성방법으로는 무전해 도금방법이나 Ni 분말의 도포 및 소결방법에 의한다. 이렇게 여러단계 표면처리된 alumina 세라믹은 금속과의 브레이징에 들어간다. 이 metallizing 방법은 오래동안 잘 확립된 방법이며, 대량 생산에 적합하기 때문에 아직까지 alumina 세라믹의 접합에 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 Mo-Mn metallizing 방법은 세라믹/금속 접합체를 얻기 위하여 위에서 언급했듯이 여러 시공단계를 거쳐야 하며, alumina 세라믹의 접합에만 제한되어 있기 때문에 비산화물계 세라믹의 접합에는 사용되기 어려움 등 단점들을 가지고 있다[1].

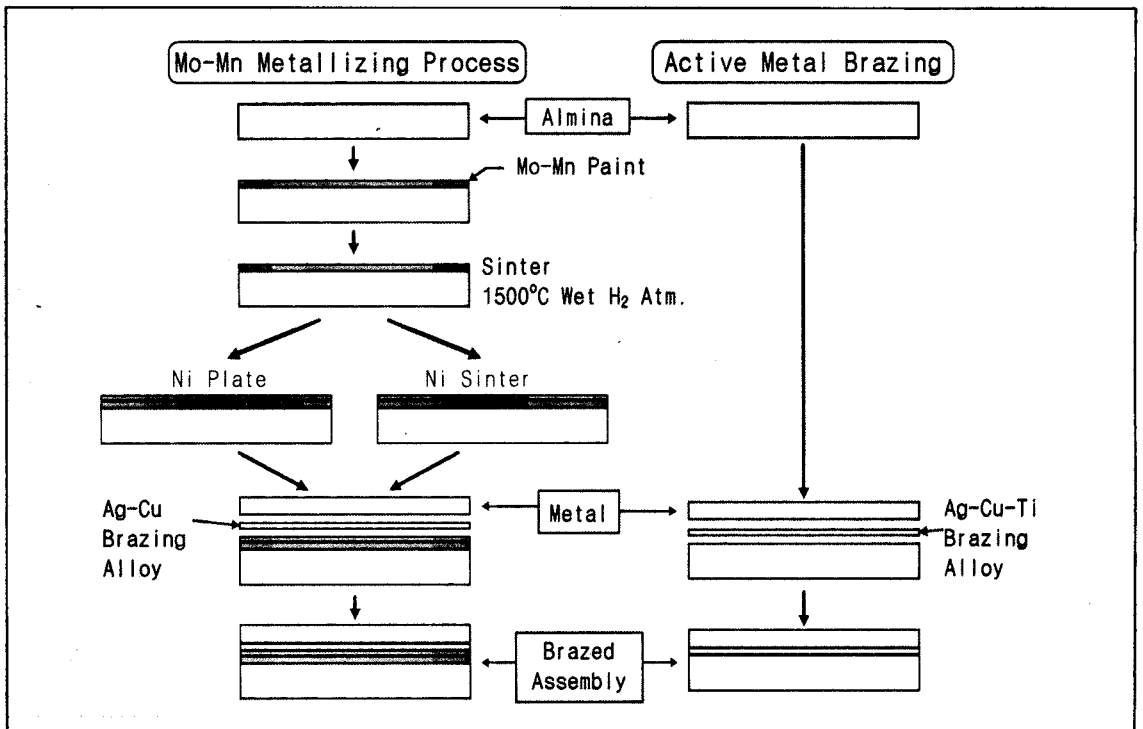


그림 2 metallizing 방법과 활성금속 브레이징법의 비교

### 3. 활성금속 브레이징(Active Metal Brazing)

활성금속 브레이징법은 그림2의 오른쪽에서 보듯이 metallizing법에 비하여 접합공정이 매우 단순하며 세라믹과 금속을 직접 브레이징할 수 있다. 특히 우수한 기능을 가진 새로운 비산화물계 세라믹 소재들의 브레이징에 매우 유용하여, 근년 들어 가장 활발히 연구되어 온 방법이다[2]. 활성금속 브레이징법은 Cu, Ag, Ni 등의 귀금속(noble metal)내에 반응성이 강한 천이금속(주로 IV A족 천이금속, 특히 Ti)을 약 2-6% 첨가한 합금을 사용한 브레이징 방법이다. Ti을 소량 첨가한 합금이 세라믹을 잘 wetting시킬 수 있다는 것은 이미 오래전부터 실험적으로 알려져 왔으며, 특히 Ag-Cu-Ti계 브레이징 합금은 가장 잘 알려져 있다[3]. 그림 3에서는 탄화규소 세라믹의 Ag-Cu-Ti 합금에 의해 브레이징한 접합부의 사진을 보여 준다. 그러나 상업적으로 이러한 합금이 제조되고 응용되기 시작한 것은 비교적 최근의 일이며, 현재에도 상온 및 고온 접합강도의 향상을 위한 다양한 합금계가 연구되고 있다. 세라믹/금속의 활성금속 브레이징법에서 수행되어 온 중요 연구분야를

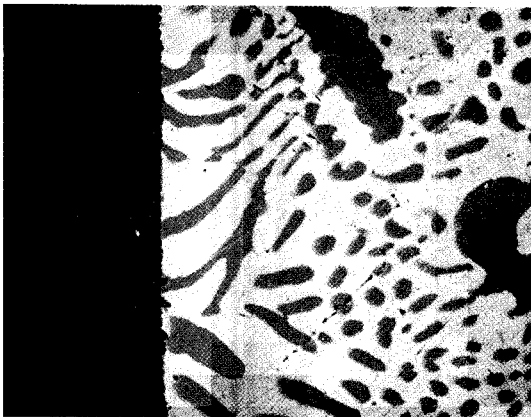


그림 3 SiC 세라믹의 Ag-Cu-Ti 합금에 의한 활성금속 브레이징 접합부의 미세조직

보면 젖음성(wetting)[4], 접합계면구조 및 계면반응[5], 접합강도와 인성[6], 열 및 잔류응력[7] 등으로 크게 나눌 수 있다. 최근 들어서는 이들 접합부의 응력부식균열[8], 피로[9]등 사용상의 성능에 대해서도 연구를 시작하고 있다. 응용분야로는 초기에는 metallizing법에 의해 주로 제작되어 온 전자산업의 세라믹 튜브 등의 기밀접합부품들이 활성금속 브레이징으로 대체되어 가는 경향이다. 그림 4에서는 대표적인 이들 부품들을 보여 준다. 그러나 활성금속 브레이징은 고온에서의 사용에 제한되고(Ag-Cu-Ti합금의 경우 최대 사용온도 550°C), 접합강도의 재현성 문제, 진공에서 brazing해야 하는 단점, 열팽창계수 차이에 따른 열응력의 발생 등 아직 해결해야 할 문제들이 많이 잔존하고 있다.

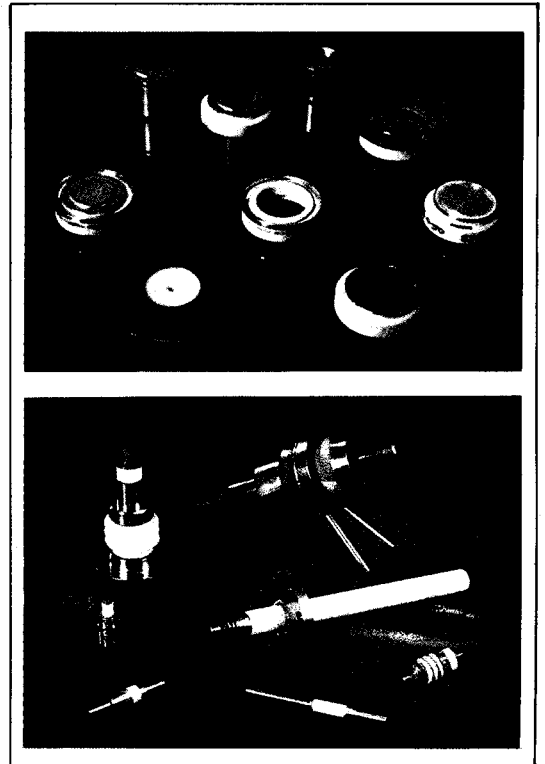


그림 4 전자산업에서의 세라믹/금속 기밀접합부품

#### 4. 고상 확산용접 (Diffusion Welding)

세라믹/금속·접합부의 고온에서의 사용성능을 개선하기 위한 한가지 방법으로서 세라믹과 고용점 금속과의 직접 확산용접하는 방법이 있다. 확산용접에서는 접합과정에서 금속과 세라믹이 용융이 일어나지 않고 고온에서 원자들의 상호 확산에 의해 서로간의 결합력을 얻는다. 따라서 접합이 되기 위해서는 첫째로 접합면은 매우 청결하여야 하며 평편하고 매끈하게 연마되어야 한다. 두 번째로 용융은 일어나지 않으나, 원자들의 확산이 용이하게 일어날 수 있는 충분한 온도까지 가열하여야 한다. 세 번째로 원자간의 확산을 쉽게 하기 위하여 접촉면을 충분히 가깝게 밀착시키기 위하여 압력을 가해야 한다. 이러한 확산접합은 고상에서 일어나기 때문에 부

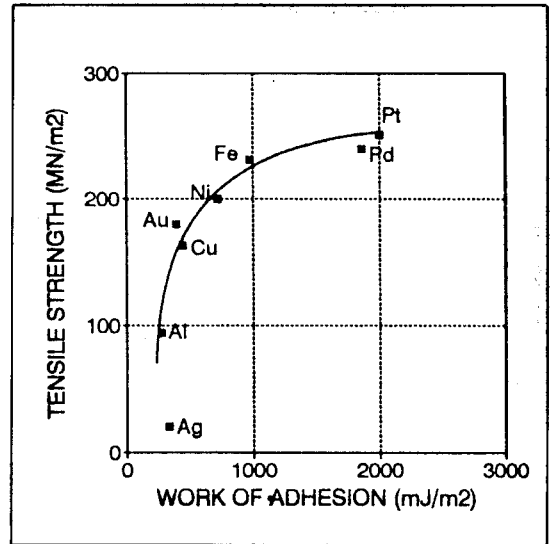


그림 5 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 단결정(0001)과 여러 금속의 고상접합(0.9Tm)에서 부착일과 인장강도의 관계

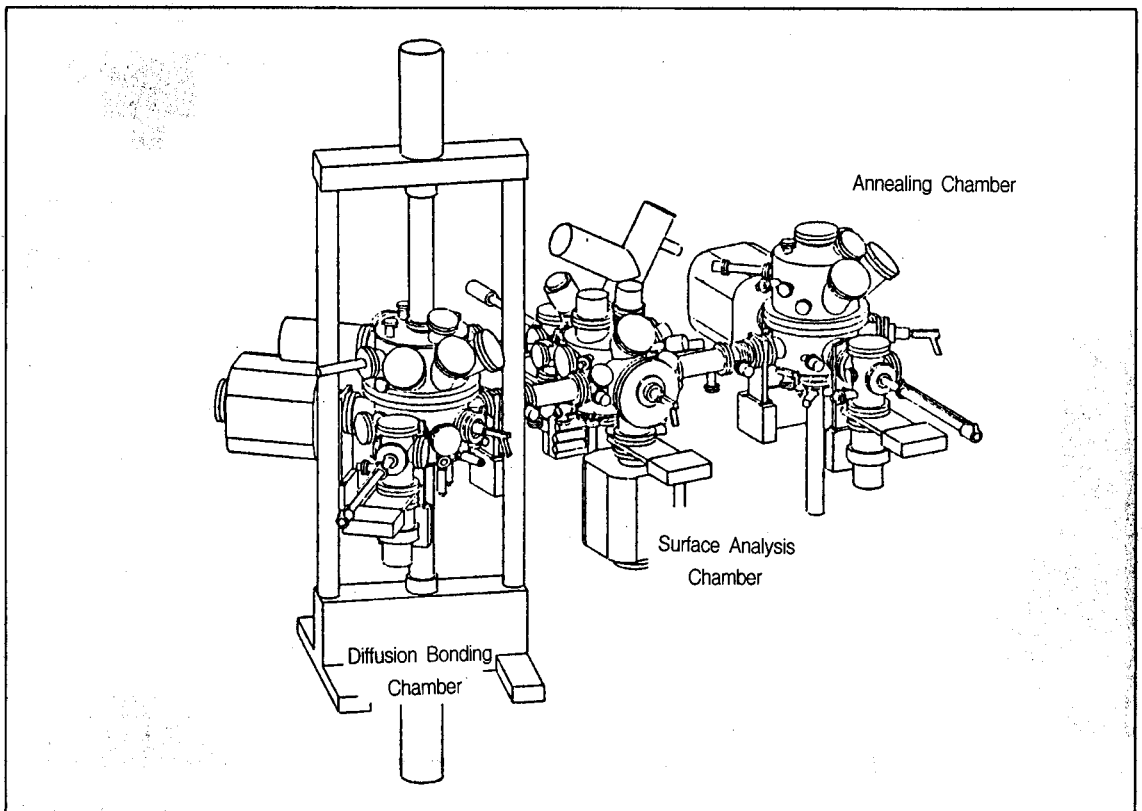


그림 6 초고진공 확산용접장치의 예

착일(work of adhesion)의 크기가 매우 중요하며, 그림 5에서 보는 것처럼 부착일이 증가하면 접합강도가 증가하는 것을 보여 준다. 특히 부착일이 큰 일부 세라믹/금속 접합체( $Al_2O_3/Nb$  or Pt)에서는 상당히 높은 접합강도를 얻었으며, high resolution TEM 에 의한 접합계면에서의 lattice matching을 확인하는 등의 높은 수준의 연구성과를 얻었다.[10,11] 최근들어서는 초고진공하에서 세라믹/금속 확산용접도 연구하고 있다. 그림 6에서는 복잡한 초고진공 확산 용접장비의 도식도를 보여 준다. 그러나 확산접합은 lattice matching이 잘되고 열팽창계수 차이가 작은 일부 세라믹/금속 접합부에 한정되고, 접합면의 준비가 매우 어렵고, 고온 및 고진공에서의 접합, 높은 압력의 요구 등 많은 단점들을 가지고 있어 광범위한 실용화를 기대하기는 곤란하다.

### 5. 천이 액상금속 브레이징(TLP, Transient Liquid Phase)

최근에는 초합금(superalloy)의 접합에 주로 적용되어 온 TLP 접합을 세라믹/금속의 접합에 적용하여 높은 고온 접합강도를 얻기 위한 연구를 시도하고 있다. TLP 접합은 세라믹과 고용점 금속 사이에 매우 얇은(약 3~4 $\mu m$  두께) 저

용점 금속층을 삽입하여, 브레이징 시에 이 저용점 금속만 용융되어 접합부를 형성하고, 브레이징 온도에서 유지하는 동안 저용점 소재는 고용점 금속으로 모두 확산하게 함으로서, 최종 접합부는 고온에서 사용될 수 있게 하는 방법을 말한다. 그림 7에서는 TLP 접합의 기본원리를 도식적으로 보여 준다. 이러한 방법은 확산접합에서 얻을 수 있는 높은 고온 접합강도와 활성금속 브레이징에서의 시공의 용이함의 장점을 동시에 활용할 수 있는 방법이다. 예로서는  $Al_2O_3$  세라믹 사이의 접합을 위하여 Cu를  $Al_2O_3$  세라믹의 접합될 표면에 3~4 $\mu m$  두께로 coating한 다음 125 $\mu m$  두께의 Pt 중간층을 사이에 두고 1150°C에서 브레이징 하였다.[12] 이때 상온에서는 160MPa의 접합강도를 얻었으며, 1000°C의 고온에서 215MPa의 높은 접합강도를 얻은 바 있다.  $Si_3N_4$  세라믹의 TLP접합을 위하여  $Si_3N_4$  세라믹에 Cu-Au합금을 coating하고 중간층으로서 Ni을 사용하여 950°C/8.8MPa/2hr의 조건에서 TLP 접합을 한 경우에는 770MPa라는 매우 높은 접합강도를 얻은 바 있다.[13] 이 방법은 현재로서는 가장 높은 접합강도를 얻을 수 브레이징 접합기술로서 매우 유망한 기술로 기대되고 있다. 그러나 얇은 코팅층으로 인한 시료 준비의 어려움과 아직은 진공 가압을 해야 하는 문제점들이 남아 있다.

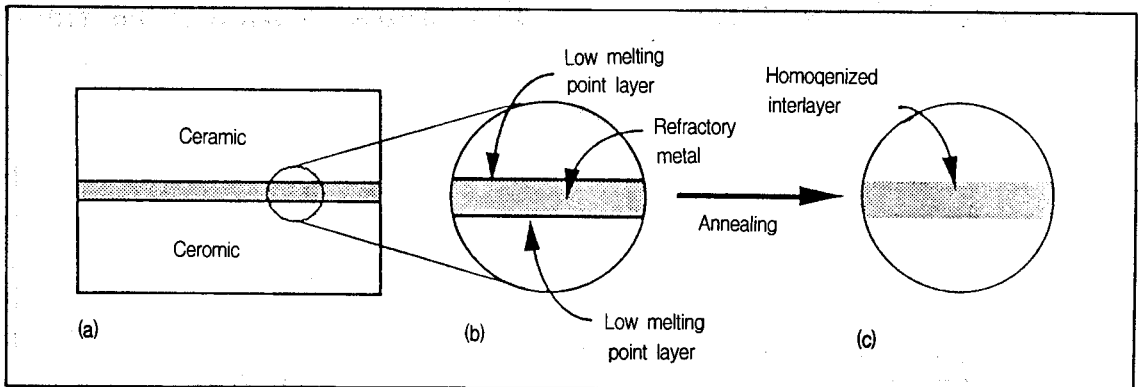


그림 7 천이액상금속 브레이징의 원리

(a) 세라믹/금속 접합구조, (b) 접합부의 상세 설계, (c) 브레이징 후의 균질한 접합부

## 6. 액상침투 브레이징(LIP, Liquid Infiltration Powder)

역시 최근의 또 다른 가능성이 있는 연구분야는 LIP 접합이다.[14] 이것은 접합될 세라믹 사이에 얇은 고융점 분말층을 형성한 다음, 이들 사이로 저융점 소재를 용융침투시키고 고융점 분말의 소결과 접합이 동시에 일어나게 하는 방법이다. 이러한 방법은 액상 침투와 화학반응을 동시에 일으켜서 세라믹 복합체 net-shape의 제작과 접합을 가능케 하고 있다. SiC 복합체의 net-shape의 제작을 위하여 첫째로 적당한 기공을 가진 다공질의 유리질 carbon preform을 형성한 다음, 이 preform을 원하는 형상으로 가공을 한다. 그 다음 기공들 사이로 Si(혹은 Si-Al, Si-Cu합금)을 침투시킨다. 이때 preform의 C과 Si이 반응하여 SiC network를 형성하고, 이들 사이에 연속적으로 Si 합금이 존재하는 net-shape 복합체를 제작할 수 있다. 이러한 액상침투와 화학반응을 접합될 세라믹 부품들 사이에서 일으키는 경우 세라믹 사이에 접합이

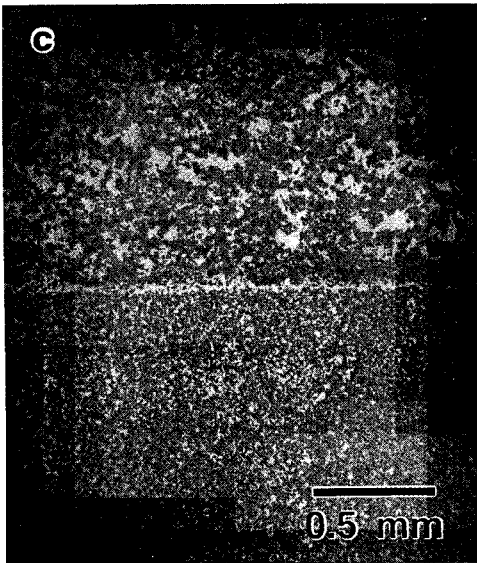


그림 8 SiC 세라믹의 액상침투 브레이징 접합부의 미세조직

일어난다. 세라믹/금속 사이에 고융점의 다공질 중간층을 삽입하고, 여기에 저융점의 반응성이 강한 소재의 액상침투와 반응에 의해 고융점의 반응상으로 변화시키면, 고온에서 견딜 수 있는 접합부를 형성할 수 있다. 그림 8에서는 액상 침투와 화학반응에 의해 성공적으로 접합된 탄화규소 부품의 접합부의 조직사진을 보여 준다. 이때 적당한 기공율을 가진 중간층의 형성, 액상침투시키는 합금의 선택 등이 중요하다. 이때 세라믹과 금속 사이에 물성의 연속성을 부여하기 위하여 중간층으로서로서 FGM (Functionally Gradient Material)을 사용할 수도 있다.

이제까지 접합기술들은 모두 기존의 저항발열 같은 외부발열에 의해 수행되었다. 그러나 최근들어 열의 공급방법을 자체발열 혹은 내부발열을 이용하려는 시도가 있다. 이러한 시도로서 SHS 합성 및 접합, Microwave 접합등이 있다.

## 7. 자기발열접합(SHS, Self-propagating High temperature Synthesis)

SHS기술은 자기발열반응을 이용하는 것으로서, 처음에는 세라믹, 금속간 화합물(inter-metallics) 등의 합성을 목적으로 주로 연구되어 왔으나, 최근에는 net shape의 복합체, FGM의 제작이나, 접합을 위한 연구가 진행되고 있다.[15] SHS기술의 대표적인 고전적인 방법은 철도 레일의 용접에 도입된 Thermit 용접을 들 수 있다.  $Fe_3O_4$  분말과 Al 분말을 혼합하여, 접합할 부위에 충전한 후 점화시키면  $3Fe_3O_4(s) + 8Al(s) = 9Fe(l) + 4Al_2O_3(s)$  반응이 일어나며, 이 반응은 발열반응으로 반응이 진행됨에 따라 더 많은 열이 방출되어 자체 열에 의해 용융되고 용접된다. 최근에는 이러한 발열반응을 세라믹이나 신소재의 합성이나 접합에 시도하고 있다.[16,17] 그림 9에서는 FGM을 중간층으로

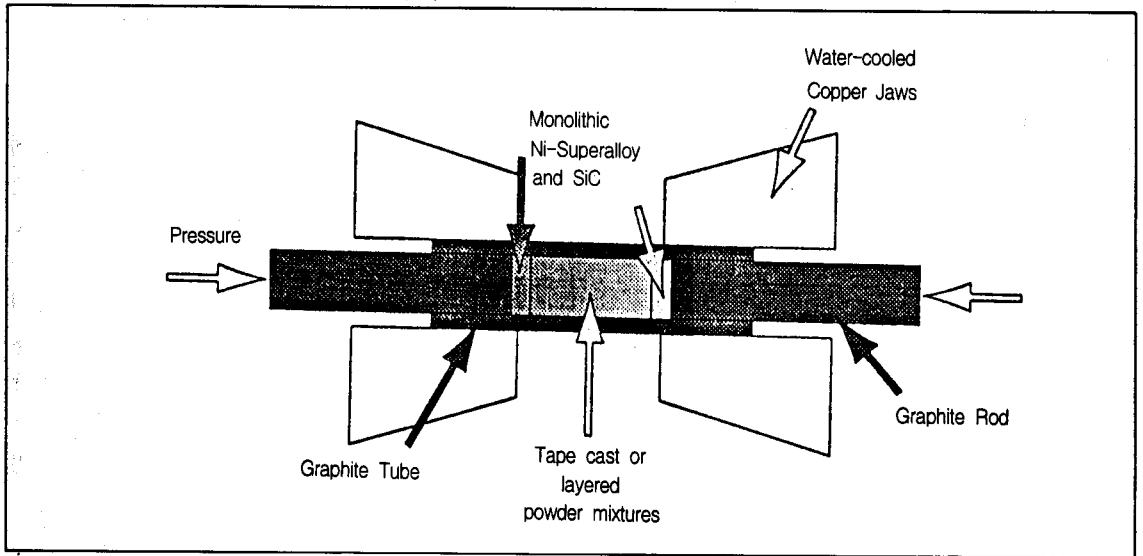


그림9 FGM을 사용한 자기발열반응 접합을 위한 치구설계

표2 자기발열반응을 일으키는 세라믹 소재들

Reaction components	Product(s)	Adiabatic temperature, °C
Ti + C	TiC	2930
4B + C	B <sub>4</sub> C	730
Ta + C	TaC	2430
Ti + 2B	TiB <sub>2</sub>	2920
Zr + 2B	ZrB <sub>2</sub>	3040
Al + 1/2N <sub>2</sub>	AlN	2630
3Si + 2N <sub>2</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	<4030
B + 1/2N <sub>2</sub>	BN	3430
Mo + 2Si	MoSi <sub>2</sub>	1630
SiO <sub>2</sub> + 2Mg + C	SiC + 2MgO	2340
WO <sub>3</sub> + 2Al + C	WC + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3800
Zn + H <sub>2</sub>	ZnH <sub>2</sub>	950
0.5Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 2BaO <sub>2</sub> + 3Cu + xO <sub>2</sub>	YBa <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>5.5-x</sub>	....

사용하여 SHS 접합을 위한 치구의 예를 보여 준다. 중간층으로서 Ni과 Al 분말을 정량 혼합 후 임계온도 이상으로 가열하면  $3Ni + Al = Ni_3Al$ 의 화학반응이 일어나고 여기서 발생하는 자체발열에 의해 성공적인 접합을 얻고 있다.

기타  $3TiO_2 + 3C + (4+x)Al = 3TiC + 2Al_2O_3 + xAl$ ,  $Ti + Al = TiAl$  등의 발열반응을 이용하여 세라믹이나 신소재를 SHS 접합하려는 시도도 진행되고 있다. 표 2에서는 자기발열반응을 일으키는 세라믹 합성반응의 예를 수록하였



다. SHS 접합은 처음 점화만 시켜 두면 추가의 가열없이 차체발열에 의해 공정이 완료되는 등 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 SHS 접합 혹은 합성의 단점은 발열반응이 일어나는 경우에만 적용되며, 분말형태로 적용된 중간층은 반응 후 기공이 많이 존재한다. 따라서 압력을 가해야 하고, 좀 더 치밀한 중간층의 형성이 요구된다.

### 8. Microwave 접합

또 다른 최근의 연구 경향을 보면 microwave 에너지를 이용한 각종 신소재의 합성과 접합에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.[18] microwave 에너지의 특징은 빠른 내부 가열로 인하여 가열시간이 매우 짧으며, 온도구배가 기존의 가열방식과 완전히 반대이다. microwave 에너지의 가장 잘 알려진 공업적인 응용분야는 음식 조리용 전자오븐이며, 기타 섬유, 도자기 등의

건조에 사용되고 있다. 최근 들어서는 세라믹의 소결에 성공적으로 활용하고 있으며, 일부 연구자들은 알루미나( $Al_2O_3$ ), mullite( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ), 질화규소( $Si_3N_4$ ), 탄화규소(SiC)등의 접합에 microwave 에너지를 사용하여 상당한 성과를 얻고 있다.[19] microwave frequency는 주로 현재 상용화되어 있는 2.54GHz에 집중되어 있고, 접합에는 주로 그림 10의 도식도에서 보여주는 것과 같은 single mode applicator를 사용하고 있다. 그림 11에서는 SiC 튜브의 접합에 microwave 에너지를 사용하여 성공적인 접합부를 얻은 예를 보여 준다.[20] 세라믹 열교환기에 적용하기 위한 SSiC(sintered SiC)/RBSiC(reaction bonded SiC)의 microwave 접합을 위하여 Si 중간층을 사용하였으며 1450°C에서 5-10분만에 성공적인 접합을 하였다. 이 연구에서는 중간층의 적용방법으로서 분말을 사용하는 것보다 plasma 용사에 의해 SiC 표면에 Si를 코팅하는 경우 중간층의 두께를 10 $\mu$ m 이하

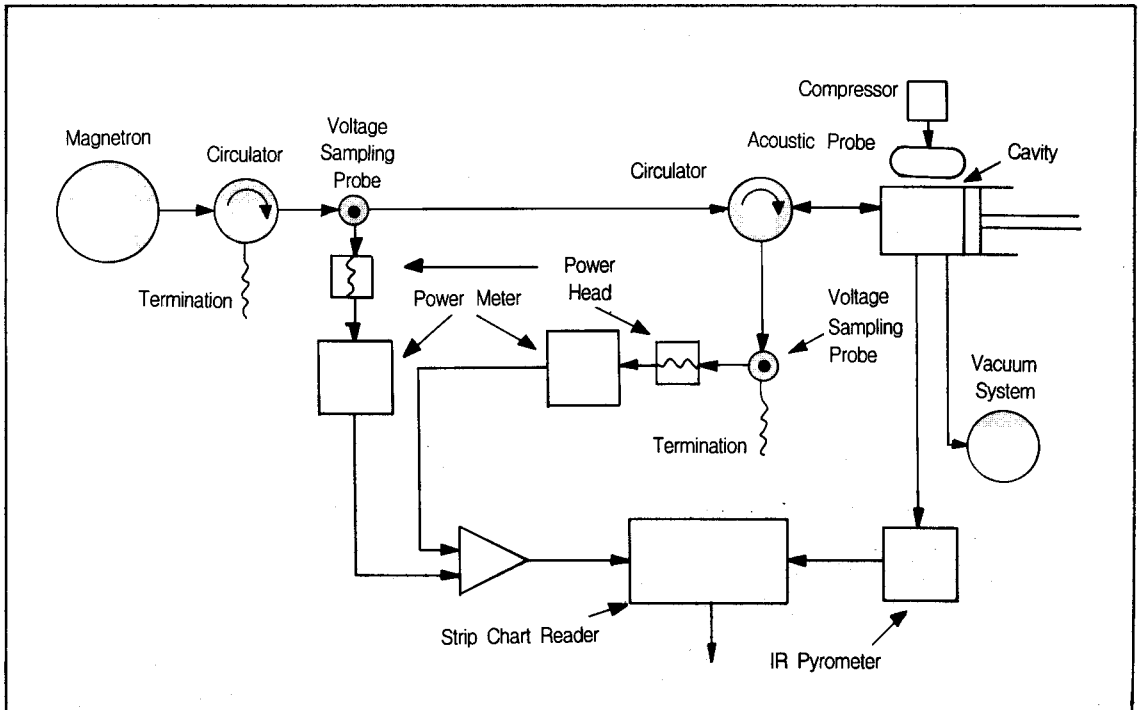
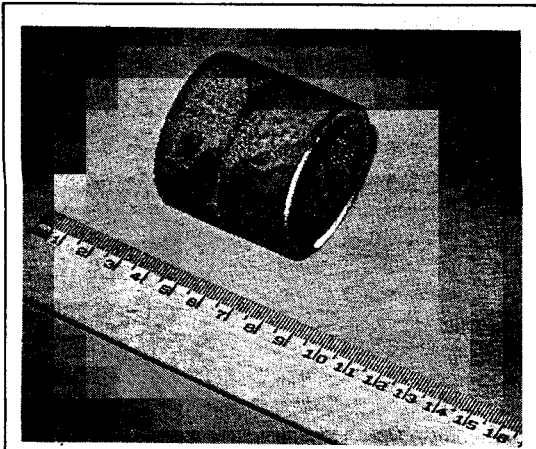
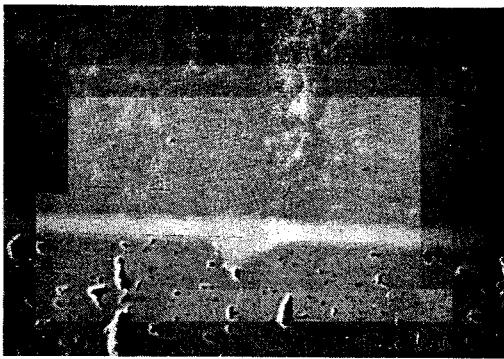


그림10 single mode microwave 접합을 위한 장치의 도식도



(a) microwave 접합된 RBSC 세라믹 튜브



(b) RBSC/SiC 접합계면의 미세구조

그림11 microwave 접합에 의해 얻어진 SiC 세라믹 튜브

의 균일한 좋은 접합부를 얻을 수 있었다. 또 다른 연구자들은 SSiC의 접합을 위해 Ti과 C을 정량 혼합한 분말을 중간층으로 사용하였다. microwave에 의해 1500°C까지 가열하면  $Ti + C = TiC$  반응이 일어나고, 이 반응은 발열반응으로 위에서 언급한 SHS 접합이 일어난다. 또한 이러한 microwave 가열과 기존의 외부가열 (radiation heating)을 동시에 사용하면 시료 전체를 거의 균일하게 가열 냉각할 수 있어 온도 구배에 의해 발생하는 문제점을 크게 완화시킬 수 있다. microwave 에너지의 공업적인 이용

은 아직 시작단계이나, 매우 단시간에 접합을 얻을 수 있고, 경제적인 방법이라는 점에서 매우 주목을 끌고 있다. 구 소련의 경우 gyrotron을 이용하여 밀리파장의 microwave를 발생과 beam화 하는 데 성공하여 각종 신소재의 접합과 코팅등의 응용 연구를 수행하고 있다.

위에서 언급한 방법들 외에도 infrared, laser, capacitor, surface activated bonding(SAB) 등 매우 다양한 새로운 접합기술들이 연구되고 있다. 최근의 기술들은 단순기술보다는 여러 기술들의 공유에 의해 새로운 우수한 기술을 개발하는 경향이 두드러지고 있다.

## 9. 결 언

산업부품의 고도화 과정에서 세라믹의 우수한 특성을 활용하기 위하여 세라믹/금속 접합기술은 중요한 가공기술로서 고려되고 있다. 성공적인 세라믹/금속 접합부를 얻기 위해서는 적절한 접합공정의 선택이 선행되어야 할 것이다. 그러나 적절한 접합공정이 선택되더라도 접합시 공상의 문제점이 중요한 과제로 남아 있다. 모든 세라믹/금속 접합에서 세라믹/금속의 경계면이 존재하고, 이들 경계면에서는 세라믹과 금속의 physical, chemical, mechanical 특성의 차이가 존재한다. 따라서 세라믹/금속 접합에서는 이러한 특성차이로 부터 발생하는 문제점들을 잘 분석하고, 이를 잘 해결한다면 우수한 세라믹/금속 접합부를 얻을 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] M. E. Twentyman, high temperature metallization, J. Mater. Sci. vol.10, 765, 1975.
- [2] A. J. Moorhead and H. Keating, direct brazing of ceramics for advanced heavy-duty diesels, Weld. J., vol.65(10), 17, 1986.

- [3] H. Mizuhara, joining ceramics to metal with ductile active filler metal, *Weld. J.*, vol.65(10), 43, 1986.
- [4] M. G. Nicholas, T. M. Valentine and M. J. Waite, the wetting of alumina by copper alloyed with titanium and other elements, *J. Mater. Sci.*, vol.15, 2197, 1980
- [5] M. Ruhle and A. G. Evans, structure and chemistry of metal/ceramic interfaces, *Mater. Sci. Eng.*, vol.A107, 187, 1989.
- [6] B. J. Dalgleish, M. C. Lu and A. G. Evans, the strength of ceramic bonded with metals, *Acta Metall.* vol.36(8), 2029, 1988.
- [7] D. Munz, M. A. Sckuhr and Y. Yang, the thermal stresses in ceramic-metal joints with an interlayer, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol.78(2), 285, 1995.
- [8] T. S. Oh, et al., ceramic/metal interfacial crack growth, *Acta Metall.*, vol.36, 2083, 1988.
- [9] R. M. Cannon, et al., *Acta Metall. Mater.*, vol.39, 2145, 1991.
- [10] H. F. Fischmeister, et al., in *Proc. MRS International Meeting on "Advanced Materials"*, vol.18, 227, 1989, Pittsburgh, PA, Materials Research Society.
- [11] R. V. Allen and W. E. Borbidge, solid state metal-ceramic bonding of platinum to alumina, *J. Mater. Sci.*, vol.18, 2835, 1983.
- [12] M. L. Salz, et al., ceramic joining, *J. Mater. Sci.*, vol.28, 1673, 1993.
- [13] B. J. Dalgleish, et al., lowtemperature routes to joining ceramics for high-temperature applications, *Scripta Metall. Mater.*, vol.31(8), 1043, 1994.
- [14] L. Hozer, J. R. Lee and Y. M. Chiang, reaction-infiltrated net-shape SiC composites, *Mater. Sci. Engr.*, vol.A195, 131, 1995.
- [15] D. Palaith and R. Silbergliitt, microwave joining of ceramics, vol.68(9), 1601, 1989.
- [16] R. W. Messler, Jr., joining of advanced materials, *Advanced Materials & Processes*, vol.148(2), 47, 1995.
- [17] J. A. Wawak, et al., self-propagating, high temperature synthesis as a technique to join metals, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol.314, 183, 1993.
- [18] W. H. Sutton and G. Editor, microwave processing of materials, *MRS Bulletin*, vol.18(11), 22, 1993.
- [19] R. Silbergliitt, et al., recent developments in microwave joining, *ibid*, vol.18(11), 47, 1993.
- [20] I. Ahmad and R. Silbergliitt, joining ceramics using microwave energy, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, vol.314, 119, 1993.