

## ZrO<sub>2</sub>-Ti합금의 활성금속 브레이징

기세호\* · 박상윤\* · 정재필\* · 김원중\*<sup>†</sup>

\*서울시립대학교 공과대학 신소재공학과

### Active Metal Brazing Applied to Joining of ZrO<sub>2</sub>-Ti Alloy

Se-Ho Kee\*, Sang-Yoon Park\*, Jae-Pil Jung\* and Won-Joong Kim\*<sup>†</sup>

\*Department of Materials Science and Engineering of University of Seoul, Seoul 130-743, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : wjkim@uos.ac.kr

#### Abstract

In this study, active metal brazing methods for ZrO<sub>2</sub> and Ti alloy were discussed. To get a successful metal-ceramic bonding, various factors (melting temperature, corrosion, sag resistance, thermal expansion coefficient etc. of base materials and filler metal) should be considered. Moreover, in order to clarify bonding between the metal and ceramic, the mechanism of the interfacial structure of the joints should be identified. The driving force for the formation of metal and ceramic interfaces is the reduction of the free energy which occurs when their contact becomes complete. Interfacial bonding depends on the material combinations and the bonding processes. This study describes the bonding between ceramic and metal in an active metal brazing.

Key Words : Vibration, Fatigue, Fracture, Intermetallic compound, Pb-free solder

#### 1.

금속과 세라믹의 접합기술은 전자전기 산업 관련하여 초소형 전자부품회로, 센서, MEMS, 고효율 열교환기, CERP package, 전자 패키징 등의 분야에 다양하게 응용되고 있다<sup>1-2)</sup>. 이것은 여러 가지 세라믹의 전기적·자기적인 특성을 가지고 있기 때문인데, 대부분의 경우에 금속에 의한 배선이나 전극의 형성이 이루어진다. 하지만 세라믹의 취성 파괴특성에 따른 낮은 신뢰성 및 높은 제조단가로 인하여 산업체 부품으로의 응용은 극히 제한되어져 왔다. 이를 보완하기 위하여 금속에 세라믹을 접합하기 위하여 오랫동안 많은 연구들이 행해져왔다. 질화규소 등 구조재료에 대해서도 금속과 세라믹의 접합기술이 실용화되고 있다. 또한 금속과 세라믹의 접합기술은 최근 치과용 임플란트 등의 생체용 재료로도 응용되고 있다.

임플란트는 1952년 티타늄(titanium)이 생체 뼈에 고정되어 떨어지지 않은 것을 우연히 발견하여 이를 골

유착현상(osseointegration phenomenon)이라 명명하고 1965년 이가 없는 환자에게 티타늄으로 된 인공 치아를 최초로 응용한 것이 시초가 되었다. 그 후 치과 임플란트의 응용은 Albrektsson(1981), Branemark (1983), Zarb(1983), Carlson(1986) 등에 의해 개발되었다.

그 후 현재까지 많은 연구기관에 의해 개발, 발전된

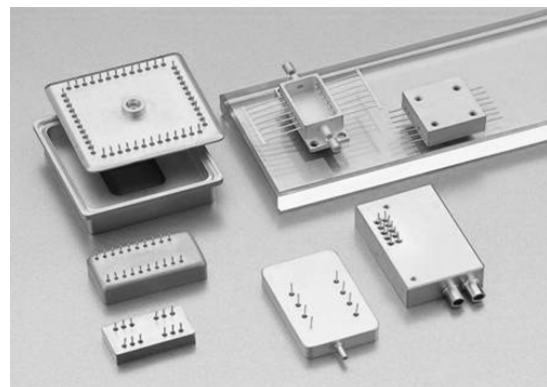


Fig. 1 Ceramic to metal seals products<sup>3)</sup>

수많은 시스템의 임플란트가 많은 임상의를 통해 전 세계적으로 사용되고 있고 지금도 끊임없는 노력으로 발전되고 있다. 초기에는 플라스틱, 크롬코발트, stainless steel, tantalum 등의 다양한 재료들을 사용해서 다양한 형태의 임플란트들이 개발되었지만 생체친화성 (biocompatibility)이 좋은 티타늄을 사용한 것은 1961년에 Chercheve가 개발한 나선형 임플란트가 최초라고 할 수 있다. 현재 주로 사용되고 있는 나선형(screw type) 임플란트는 스웨덴의 Branemark이 티타늄이 골과 직접 유착되는 것을 확인하고, 그것을 골유착 (osseointegration)이라고 명명하면서 1965년에 개발, 임상에 적용하기 시작하였다. 최초의 세라믹 임플란트 지대주는 1993년 Cer Adapt(Nobel Biocare)로서, 알루미늄 지대주였다.

알루미늄 지대주는 심미성은 좋으나 세라믹이 가지는 한계로 경도가 너무 높아 형태수정이 어렵고 파괴 인성이 낮아 조작 중에 종종 파절이 일어나기 쉬워서 단일 치 수복에 국한되어 사용되었다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 심미성은 유지하면서, 파절 인성이 높아 잘 깨지지 않으며 생체 적합성이 우수한 지르코니아를 이용한 지대주가 개발되었다. 최초의 지르코니아 지대주는 1995년 외측 육각 연결구조 임플란트에 적용되었으며, 내부육각의 정밀도를 높이기 위하여 티타늄 위에 지르코니아를 시멘트로 붙인 3사의 ZiReal이 소개되었다. 전체가 지르코니아로 이루어진 지대주는 Nobel Biocare 및 미국, 한국에서 소개되어 임상에 응용되고 있다.

티타늄 임플란트에서 골 유착의 속도와 성질은 표면 특성과 관련이 있다. 표면 조성, 친수성과 거칠기는 임플란트와 조직 간의 상호 작용과 골 유착의 역할을 하는 변수들이다. 지르코니아는 생체 적합성은 기존의 티타늄과 비슷하거나 우수한 것으로 알려져 있고<sup>5-9)</sup>, 장기간의 안정성은 현존하는 세라믹 중에서 가장 우수하며

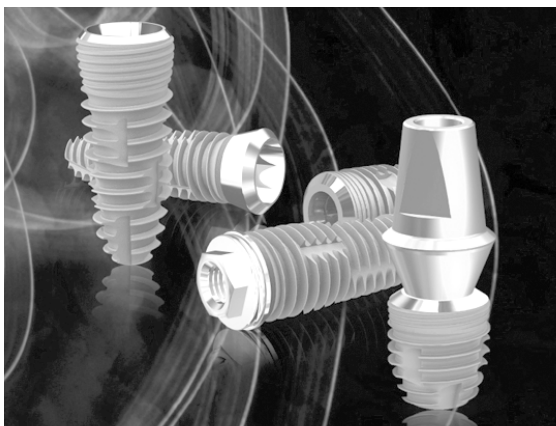


Fig. 2 Titanium implant<sup>4)</sup>

파절에 대한 저항도는 상전이 강화기전(transforming toughening)을 통해 증진된다. 본 논문에서는 치과용 임플란트나 ZrO<sub>2</sub>-Ti합금 등 금속과 세라믹 간의 접합에 이용되는 활성금속 브레이징에 관해서 기술하고자 한다.

## 2

### 2.1

#### 2.1.1 접합계면의 구조

금속과 세라믹 간의 접합기구를 설명하기 위해서는 접합부의 계면구조를 정확히 파악하여야 한다. 접합계면은 재료의 조합 및 접합공정에 의해서 구조형태가 달라진다. 접합계면은 일반적으로 반응상의 형성 유무에 따라 반응상을 갖는 접합계면과 반응 생성물이 없는 접합계면으로 분류할 수 있다.

##### ① 반응상을 갖는 접합계면

접합계면의 반응상은 금속 및 세라믹을 구성하는 원소에 의해 생성되는 각종 화합물과 모재 세라믹 및 금속과의 생성 자유에너지 차이에 의한 구동력으로 생성된다. 예를 들면 탄화규소 혹은 질화규소 세라믹과 Ti 혹은 Zr 등 Si보다 활성인 원소를 함유한 합금이 반응한 경우는 그 계면에서 각각 TiO 혹은 Zr 탄화물, 질화물이 반응생성물로 형성된다.

##### ② 반응 생성물이 없는 접합계면

금속/세라믹 계면에서의 반응이 일어나더라도 분해한 세라믹 성분이 금속 내에 고용(固溶)되는 경우에는 접합계면을 매개로 금속과 세라믹은 직접 결합한다. 또한 반응상을 형성하지 않지만 세라믹의 입계 등을 국부적으로 침식하여 지그재그 형상의 계면을 형성하여 접합이 이루어지는 경우도 있다. 이 경우도 접합체의 강도 증가에 크게 기여한다.

#### 2.1.2 반응생성물의 생성거동

금속/세라믹의 접합은 계면에서 반응상이 형성되는 경우가 압도적으로 많다. 반응생성물은 세라믹을 구성하는 원소의 친화력이 금속의 경우보다 작을 때, 또는 금속/세라믹 반응에 의하여 안정한 복합화합물이 형성되는 경우에 생성된다. 일반적으로 세라믹과 금속을 직접 접합하는 경우, 계면에 형성되는 반응생성물의 두께는 접합시간의 제곱근  $\sqrt{t}$ 에 비례하여 성장한다. 그러나 활성금속법과 같이 반응에 관계하는 금속원소의 함유량이 적은 경우에는 반응생성물의 성장은 단순히

$\sqrt{t}$ 에 비례하지 않는다.

2.2

금속/세라믹 계면 형성의 구동력은 금속과 세라믹의 표면이 완전한 접촉이 이루어질 때 발생하는 자유에너지의 감소이다. Fig. 3은 일반적인 세라믹 고체기판위의 평형상태에 있는 액상이나 고상의 접촉각  $\theta$ 를 나타낸 그림이다.

형성된 계면의 단위면적당 이 에너지 변화( $\Delta G$ )는 Dupre식에 의해 주어진다<sup>10-11)</sup>.

$$\Delta G = \gamma_m + \gamma_c - \gamma_{mc} \tag{1}$$

여기서  $\gamma_m$ 과  $\gamma_c$ 는 각각 금속과 세라믹의 표면에너지이고  $\gamma_{mc}$ 는 금속/세라믹의 계면에너지이다. 가장 단순한 경우로서 화학적으로만 접합된 상태의 계면이 금속이나 세라믹의 소성변형 없이 계면 분리가 일어날 때의 에너지 변화  $\Delta G$ 는 고착일(work of adhesion,  $W_{ad}$ )과 일치한다. 여기서 고착일이란 단위면적의 계면을 원래의 두 개의 표면으로 분리하는데 소요되는 일을 말하며  $W_{ad}$ 로  $\Delta G$ 를 대응한다면, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\gamma_{mc} = \gamma_m + \gamma_c - W_{ad} \tag{2}$$

이 식으로부터 고착일  $W_{ad}$ 가 증가함에 따라 금속/세라믹 계면에너지  $\gamma_{mc}$ 가 감소함을 알 수 있다. 그러므로 금속과 세라믹간의 결합력을 증가시키는 것은 계면에너지의 감소를 의미하며, 이러한 역수적인 관계가 많은 금속/세라믹 계에서 나타난다. Fig. 6에 나타난 바와 같이  $\gamma_{mc}$ 나  $W_{ad}$ 는 일반적으로 세라믹 고체기판 위의 평형상태에 있는 액상이나 고상의 접촉각  $\theta$ 를 측정하여 유도된다. 평형상태에서 계면 에너지들간의 불균형은 Young-Dupre 식에 의해 주어진다<sup>12-13)</sup>.

$$\gamma_c - \gamma_{mc} - \gamma_m \cos\theta = 0 \tag{3}$$

이것을 식(2)와 결합하면

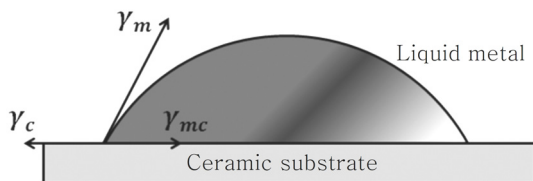


Fig. 3 Contact angle  $\theta$  of liquid wetting solid substrate

$$W_{ad} = \gamma_m (1 + \cos\theta) \tag{4}$$

이 식들은 세라믹 기판에서  $\theta < 90^\circ$ 일 때 액상금속의 퍼짐이 일어나고  $\theta$ 가 0에 접근할 때 완전한 퍼짐이 일어난다는 것을 보여준다.

일반적으로 안정한 금속/세라믹 시스템에서 접촉각은 온도가 올라감에 따라 서서히 감소하는데 갑작스러운 접촉각의 변화는 계면구조의 변화가 있음을 나타내는 것이다. 여러 Al합금의 알루미늄과 탄화규소 세라믹에 대한 접촉각 실험결과 어떤 특정온도 이상에서  $\theta$ 의 급격한 감소를 보이는데 이것은 금속/세라믹의 표면에 부동태 산화막의 파괴에 기인한 것으로 보인다.

한편 이종재료간의 접합 특히 활성 브레이징에 의한 금속/세라믹의 접합에 있어서는 비평형 반응유도 젖음(wetting)의 근원인 편석현상이 매우 중요하다. 표면에 대한 불순물의 편석은 Gibbs 흡착 등온선과 관계된 표면에너지 변화를 유발하는데 이것은 일정 온도의 물은 2성분계에 대해 다음과 같이 표현된다<sup>14)</sup>.

$$\frac{d\gamma}{d\ln C_i} = -RT\Gamma \tag{5}$$

여기서  $\Gamma$ 는 단위면적당 과잉 표면농도이고  $d\gamma$ 는 표면에너지 변화,  $R$ 은 기체상수,  $T$ 는 온도,  $C_i$ 는 불순물의 농도이다. 이 식의 중요성은 편석이 고상의 표면에 에너지를 감소시킬 수 있을 때 일어난다는 것이다. 이러한 관계는 불순물의 편석이 계면에너지의 감소를 유발하는 금속/세라믹 계면에 대해서도 적용될 수 있으며 이것이 브레이징 합금중의 활성 금속원소가 표면에너지가 큰 세라믹 표면으로 우선적으로 편석하는 현상의 원인이다.

금속/세라믹 계면과 다른 시스템과의 중요한 차이점은 불순물과 계면과의 상호작용이 계면에서의 결합상태에 의존한다는 것이다. 이것이 단일 금속계나 세라믹 표면만을 고려하여 얻어진 편석거동과 오차가 발생하는 원인이다.

2.3

성공적인 금속-세라믹간의 접합체를 얻기 위해서는 세라믹의 소결온도에서 견딜 수 있는 금속의 사용과 가능한 낮은 온도에서 소결이 가능한 도재의 사용, 그리고 사용하는 금속과 세라믹의 열팽창계수의 조화가 있다. 그에 따라 요구되는 성질은 다음과 같다.

1) 세라믹과의 결합력

금속-세라믹 간의 접합에서 실패하는 대표적인 요인으로 금속과 세라믹의 분리현상을 들 수 있는데, 이를 줄이기 위해서는 상호간의 결합력이 우수해야만 한다.

2) 세라믹과의 열팽창계수 차이

금속-세라믹 간의 접합은 제작과정에서 많은 온도의 변화를 일으키는데, 금속 및 세라믹 재료 사이의 열팽창계수가 적절히 조화를 이루어야 세라믹의 파절, 분리를 방지하고 강화현상도 얻을 수 있다.

3) 우수한 기계적 성질

반복되는 저작력을 지지할 수 있을 정도의 기계적 성질을 지녀야 한다. 특히 긴 유니트의 브리지의 경우에는 이 요건이 매우 중요하다. 세라믹은 취성이 큰 재료이므로 압축력에는 강하나 인장력이나 굽힘력에는 매우 취약하다. 따라서 굽힘력에 의해 파절될 수 있는데, 브리지의 경우 금속 구조물의 강성계수(stiffness)가 충분해서 세라믹에 굽힘 변형력이 가해지지 않도록 지지할 수 있어야 한다.

4) 우수한 마무리 및 연마성

마무리 과정이 용이해야 하고, 구강 내에 이식한 상태에서 다듬질 과정을 통해 정확한 변연 형태를 가질 수 있도록 연성 및 전성이 우수해야 한다.

5) 우수한 sag resistance

고온에서도 탄성계수를 유지하여 변형이 일어나지 않는 성질을 sag resistance라고 한다. 세라믹을 소결하는 온도에서도 탄성계수가 현저히 감소해서는 안 된다. 만약 탄성계수가 감소하여 자체의 무게에 의해 휘어지게 되면 그 상태에서 세라믹이 소결되어 부정확한 결과를 얻을 수밖에 없다.

6) 부식저항성

다른 치과용 금속과 마찬가지로 부식에 대한 저항성이 커서 구강 내에서 안정하게 유지될 수 있어야 한다.

7) 우수한 주조성

금속-세라믹 간 활성금속 브레이징용 합금도 일반적인 치과 주조용 합금과 같이 주조과정을 통해 성형하기 때문에 주조성이 좋고, 주조과정도 간편해야 한다.

8) 색조

자연치와 유사한 색을 지닌 것이 심미성에 좋다. 특히 앞니는 치아의 기능뿐만 아니라 인상을 좌우하는 심미적인 측면까지 고려해야 한다.

9) 경제성

임플란트는 거의 반영구적으로 사용이 가능하지만 그에 비해 가격이 비싸다, 따라서 가격이 저렴하고 재활용이 쉬워야 한다.

3

Liu 등은 Ag-Cu 필러 금속과 TiH<sub>2</sub> 분말을 사용하여 가압 없는 활성금속 브레이징 방법으로 PSZ 지르코니아와 스테인리스 스틸을 접합하는 방법에 대해 보고하였다<sup>15)</sup>. 브레이징 층의 미세구조, 미세화학 및 반응물을 분석하여 접합부의 전단응력에 영향을 미치는 브레이징 온도와 유지시간에 대해 조사하였다.

Fig. 4는 브레이징 온도와 유지시간에 따른 접합부의 전단응력을 나타낸 것이다<sup>15)</sup>. 브레이징 온도나 유지시간이 증가할수록 전단강도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 너무 높은 온도와 너무 긴 유지시간은 브레이징 부에 더 brittle한 중간상을 형성하기 때문에 전단강도는 오히려 감소하였다. 접합부의 강도는 브레이징 온도 850°C와 유지시간 30분 등 최적의 브레이징 조건에서 약 90 MPa의 최대 강도와 75 MPa 이상의 평균 강도를 얻었다. 브레이징 온도가 유지 시간보다 접합부의 강도에 더 큰 영향을 준 것으로 나타났다.

Ning 등은 Ag-Cu-Ti 브레이징 합금을 사용하여 사파이어와 열처리 된 알루미늄의 접합에 관하여 보고하였다<sup>16)</sup>. 사파이어는 진공에서 Ag-Cu-Ti 브레이징 합금을 사용하여 접합하였다. 접합 강도는 알루미늄의 표

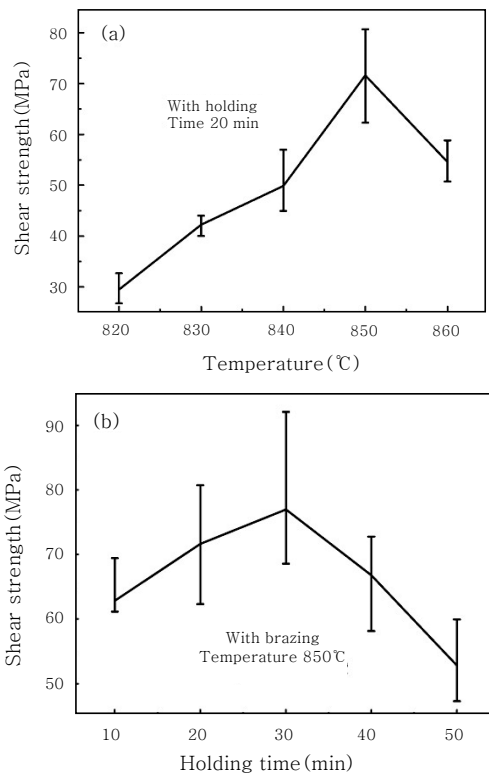


Fig. 4 Joint shear strength at different conditions: (a) brazing temperatures and (b) holding times<sup>15)</sup>

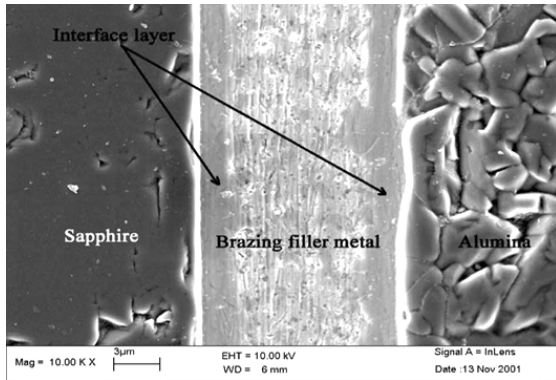


Fig. 5 SEM photograph of sapphire / Ag-Cu-Ti / alumina ceramic<sup>16)</sup>

면조건과 활성금속 브레이징 조건에 영향을 받는다. 최대 접합강도는 855°C의 온도에서 6분간 브레이징 하였을 때 약 72.5 MPa를 얻었다.

Fig. 5는 사파이어/Ag-Cu-Ti/알루미나의 SEM 단면을 보인 것이다<sup>16)</sup>. Fig. 5에서는 알루미나에 어떠한 변화도 확인할 수 없고 브레이징 합금과 세라믹의 중간 층만을 확인할 수 있다. 사파이어와 알루미나 간에 좋은 접합부를 얻기 위해서는 알루미나의 표면거칠기, 브레이징 온도, 어닐링을 통한 잔류응력의 제거 등을 고려해야 한다고 보고하였다.

Singh 등은 샌드위치 구조를 가지는 고전도성 탄소와 티타늄의 활성금속 브레이징에 대해 보고하였다<sup>17)</sup>. C/C 복합재, HTPoco, Ti기판, 튜브로 구성된 샌드위치 구조의 브레이징은 Cusil-ABA paste와 포일을 사용하여 성공적으로 수행하였다. 특히 Cusil-ABA paste가 사용되었을 때 C/C 복합재와 탄소 기포 안으로 더 잘 확산되었다. 또한 브레이징 후 인장테스트와 전단테스트를 수행하였을 때, 파괴는 항상 기포 부분에서 발생한다고 보고하였다.

Fig. 6은 CVI C-C/Cusil-ABA foil/HTPoco 접합

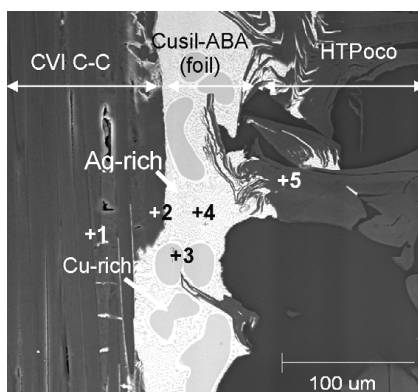


Fig. 6 SEM view of CVI C-C / Cusil-ABA foil / HTPoco joint microstructure<sup>17)</sup>

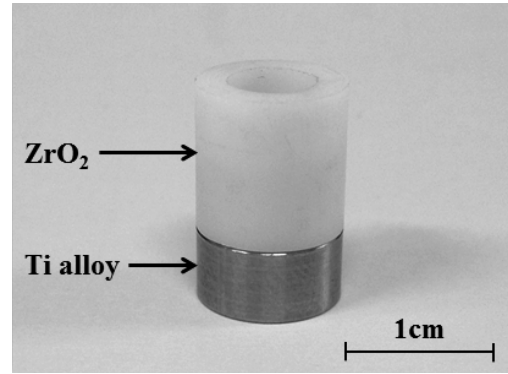


Fig. 7 Active metal brazing joint of ZrO<sub>2</sub>/Ti6Al4V alloy by the authors

부의 SEM 이미지를 보인 것이다<sup>17)</sup>. 경화된 브레이징 모재에서는 약간 어두운 회색을 띠는 Cu-rich상(92% Cu)과 흰색을 띠는 Ag-rich상(43% Ag) 등의 공정구조를 확인할 수 있다.

최근 저자 등은 치과용 임플란트의 어버트먼트에 적용하기 위하여 ZrO<sub>2</sub>와 Ti합금의 접합 연구를 수행하고 있다. ZrO<sub>2</sub>/Ti합금 브레이징 결과, 브레이징 합금은 양측 모재 표면에 wetting 되었으며, Ti 합금 내부로 브레이징 합금 확산으로 인하여 두 모재의 직접 접합이 관찰되었다. 접합 계면 사이에 접합부 결함은 관찰되지 않았다(Fig. 7).

#### 4

본 논문에서는 임플란트와 ZrO<sub>2</sub>-Ti합금 등의 접합에 적용되는 활성금속 브레이징에 대하여 기술하였다. 금속은 세라믹에 비해 열팽창계수가 훨씬 크기 때문에, 금속/세라믹 접합체가 고온에서 접합 후 냉각될 때 금속은 세라믹에 비해 더 큰 수축을 하게 된다. 열팽창계수의 차이와 탄성계수가 클수록 변형률은 커지는데, 세라믹은 금속에 비하여 열팽창계수가 현저하게 낮으므로 자유표면의 불연속적인 변형으로 인하여 계면과 자유표면의 교차점 근방에 응력집중을 발생시킨다. 접합된 세라믹과 금속은 냉각 시 자유롭게 변형되지 못하기 때문에 금속/세라믹 접합체에서는 잔류응력이 발생하게 된다. 발생된 잔류응력의 크기는 접합온도 및 모재간의 열팽창 계수차이, 접합부위의 설계 및 중간재의 조성변형에 의한 잔류응력의 흡수 정도에 따라 변하게 되며, 세라믹의 인장강도를 초과하면 파괴가 일어나게 된다. 따라서 성공적인 금속-세라믹간의 접합체를 얻기 위해서는 사용하는 금속과 세라믹의 열팽창계수의 조화, 적절한 브레이징 합금과 조건 등 여러 조건들을 고려해야 한다.

이 논문은 2011년도 서울시립대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었습니다.

1. Se-Ho Kee, Zengfeng Xu, Jae-Pil Jung, Won-Joong Kim, "Joining of Ceramic and Metal using Active Metal Brazing", J. of the Microelectronics & Packaging Society, **18-3** (2011), 1-7 (in Korean)
2. Ik-Keun Park, Chul-Ku Lee, Dong-Su Cho, Yong-Kwon Kim, "Nondestructive Evaluation of Ceramic/Metal Interface Using the V(z) Curve of Scanning Acoustic Microscope", Journal of KWJS, **23-2** (2005), 59-65 (in Korean)
3. SEAL TECH "Ceramic to metal seals products" (also www.sealtech21.com)
4. 네오바이오텍: (also <http://www.neobiotech.co.kr/Publicity/ecatalog2008/VIEW.HTM>)
5. Meyenberg KH, Lüthy H, Schärer P. Zirconia posts: a new all ceramic concept for nonvital abutment teeth. J. Esthet. Dent. (1995), 7:73-80
6. Luthardt R, Weber A, Rudolph H, Schöne C, Quaas S, Walter M. Design and production of dental prosthetic restorations: basic research on dental CAD/CAM technology. Int. J. Comput. Dent. (2002), 5:165-76
7. Wohlwend A, Studer S, Schärer P. The zirconium oxide abutment: An all-ceramic abutment for the esthetic improvement of implants superstructures. Quintessence Dent. Technol. (1997), 1:63-74
8. Keith O, Kusy RP, Whitley JQ. Zirconia brackets: an evaluation of morphology and coefficients of friction. Am. J. Orthod. Dentofacial Orthop. (1994), 106:605-14
9. Sundh A, Sjögren G. Fracture resistance of all-ceramic zirconia bridges with differing phase stabilizers and quality of sintering. Dent. Mater. (2006), 22:778-84
10. Murr LE: 'Interfacial phenomena in metal and alloys', Reading, MA, Addison-Wesley. 1975:34.
11. Adamson AW: 'Physical chemistry of surfaces', New York, Interscience. (1960), 265
12. Murr LE: 'Interfacial phenomena in metal and alloys', Reading, MA, Addison-Wesley. 1975: 34
13. Nicholas MG, "Surface and interfaces of ceramic materials", Norwell, MA, Kluwer Academic. (1989), 393
14. Hondros ED, "Precipitation process in solids", The Metallurgical Society of AIME, 1, (1978)
15. Liu GW, Qiao GJ, Wang HJ, Yang JF, Lu TJ, "Pressureless brazing of zirconia to stainless steel with Ag-Cu filler metal and TiH<sub>2</sub> powder", Journal of the European Ceramic Society (2008), 28, 2701-2708
16. Ning H, Geng Z, Ma J, Huang F, Qian Z, Han Z, "Joining of sapphire and hot pressed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> using Ag<sub>70.5</sub>Cu<sub>27.5</sub>Ti<sub>2</sub> brazing filler metal", Ceramics International (2003), 29:689-694
17. Singh M, Morscher GN, Shpargel TP, Asthana R, "Active metal brazing of titanium to high-conductivity carbon-based sandwich structures", Materials Science and Engineering A, (2008), 498: 31-36



- 기세호
- 1976년생
- 서울시립대학교 대학원생(박사과정)
- 브레이징, LED 리드프레임, 전해도금
- e-mail : shkee@uos.ac.kr



- 정재필
- 1959년생
- 서울시립대학교 교수
- 마이크로접합, 전자패키징, 전해도금
- e-mail : jppjung@uos.ac.kr



- 박상윤
- 1986년생
- 서울시립대학교 대학원생(석사과정)
- 전자패키징, 전해도금, 브레이징
- e-mail : risspu@uos.ac.kr



- 김원중
- 1956년생
- 서울시립대학교 교수
- 금속 가공
- e-mail : wjkim@uos.ac.kr