

접합재의 고온강도 특성 평가

허선철*· 박영철**· 윤한기***· 박원조****

Evaluation of High Temperature Strength Characteric in Joint Metal

Sun-Chul Huh, Young-Chul Park, Han-Ki Yun and Won-Jo Park

Key Words: Residual Stress(잔류응력), Repeat Thermal Cycle(반복열사이클), Theraml Expansion Coefficient(열팽창계수), X-Ray Stress Measurement(X선 응력측정)

Abstract

Since the ceramic/metal joint material is made at a high temperature, the residual stress development when it is cooled from bonding temperature to room temperature due to remarkable difference of thermal expansion coefficient between ceramic and metal. As residual stress at ceramic/metal joints influences the strength of joints, it is important to estimate residual stress quantitatively. In this study, it is attempted to estimate joint residual stress of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{STS}304$ joints quantitatively and to compare the strength of joints. The difference of residual stress is measured when repeated thermal cycle is loaded, under the conditions of the practical use of the ceramic/metal joint. And 4-point bending test is performed to examine the influence of residual atress on fracture strength. As a residual, it is known that the stress of joint decreases as the number of thermal cycle increases.

1. 서 론

세라믹은 내열성, 내마모성, 내식성등이 금속재료에 비해 뛰어나고 저비중, 저열팽창성 및 고온강도등 우수한 특성을 지니고 있기 때문에 이미 집적회로기판, 압전소자, 센서, 절삭공구, 단열재 등에 실용화되고 있으며, 가스터빈, 터보과급기등 경량, 고강도 및 내열성이 함께 요구되는 구조물에 금속재료를 대신해서 세라믹의 적용이 활발히 검토되고 있다.¹⁻³⁾ 그러나, 세라믹은 가볍고, 내마모성, 내열성등이 우수한 반면에 가공이 어렵고, 내충격, 인장력등이 대단히 취약하기 때문에 일반 구조용재료로서 사용하기에는 대단히 어렵다. 따라서, 이러한 세라믹을 보완할 수 있는 비

교적 인성이 풍부한 금속과의 접합재로서 세라믹/금속접합재를 구조물에 사용한다면 세라믹의 우수한 특징과 단점을 보완하는 재료로서 실구조물에 사용될 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 많이 행해지고 있다.⁴⁻⁵⁾ 또한, 세라믹 가스터빈과 같이 세라믹/금속접합재는 실제로 고온하에서 사용되므로 사용중 상온-고온-상온형태의 반복열사이클을 받게된다. 그리고 이러한 반복열사이클은 접합강도에 큰 영양을 미치게 되므로 세라믹/금속접합재의 실용화를 위하여서는 이와같은 반복열사이클에 관한 연구가 무엇보다도 기본적으로 필요하다고 할 수 있으나, 현재 이에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 본 연구에서는 접합전후의 강도평가 및 온도의 변화와 반복열사이클 횟수의 증가에 따른 강도열화를 살펴보기 위하여 접합후에 200°C, 300°C, 400°C, 500°C에서 열사이클은 1사이클, 3사이클, 10사이클로 가하였을 때 잔류응력분포의 변화를 PSPC형 X선 측정장치를 이용하여 접합계면의 잔류응력분포를 검토하였

* 경상대학교 수송기계공학부

** 동아대학교 기계공학과

*** 동의대학교 기계공학과

* 경상대학교 수송기계공학부

다. 또한, 4점 굽힘시험을 통하여 각 온도에서의 열사이를 부하로 인한 접합재의 열하 정도를 정량적으로 평가함과 동시에 파면해석을 통하여 파괴기구를 명확히 밝혀냄으로서, 열사이를 온도와 열사이를 반복회수에 따른 잔류응력분포의 변화와 이러한 잔류응력이 접합재의 강도에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

2. 실험방법 및 해석방법

2.1 시험편과 접합방법

시험편은 동을 중간층으로 한 질화규소(Si_3N_4)와 오스테나이트계 스테인레스강(STS304)을 접합하여 제작하였으며, 시험편의 재료특성은 실온에서 Table 1과 같다. 접합조건은 Table 2와 같고, 이러한 접합조건으로 접합한 시험편의 형상은 Fig.1과 같다.

Table 1 Material properties of specimen

| | Si_3N_4 | Cu | STS304 |
|--------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| E(GPa) | 304 | 108 | 193 |
| ν | 0.27 | 0.33 | 0.3 |
| $\alpha(1K)$ | 3.06×10^{-6} | 17.7×10^{-6} | 16.5×10^{-6} |

Table 2 Conditions of joining

| | |
|----------------|---------------------------------|
| Brazing filler | Ti-Ag-Cu |
| Temperature | 1073K~1123K |
| Atmosphere | Vaccum, 1×10^{-5} torr |
| Interlayer | Cu(0.5 mm) |

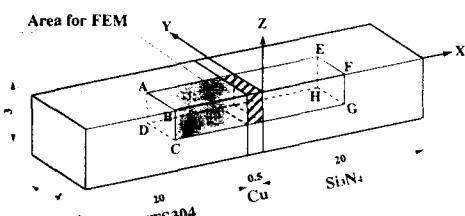


Fig.1 Configuration of specimen(unit : mm)

2.2 열부하 및 반복열사이를 부하 조건

접합재의 열사이를 부하는 PIB실리콘나트관상 전기로를 사용하여 접합 후 완성된 시험편에 대하여 분위기 온도를 200°C, 300°C, 400°C, 500°C

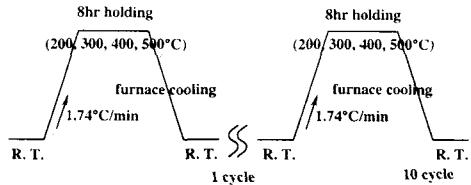


Fig.2 Diagram of heat cycle

에서 각각 열사이를 가하였으며 모식도는 Fig.2와 같다.

2.3 X선 응력 측정법

접합재의 잔류응력을 측정은 Rigaku PSPC형을 이용하여 잔류응력을 측정하였다. Fig.3은 접합재의 잔류응력을 측정하기 위한 측정위치를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와같이 잔류응력은 3 가지 방향에서 측정하였다. 즉, 시험편 표면 세마직의 단부선상에서는 ①과 같이 $y=0.5$ mm에서 x방향을 따라 $x=0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7$ mm인 점에 대하여 계면수직방향 잔류응력(σ_x)을 측정하였고, 중앙선상은 ②와 같이 $y=2$ mm에서 x방향을 따라 $x=0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7$ mm인 점에 대하여 계면수직방향 잔류응력(σ_x)을 측정하였다.

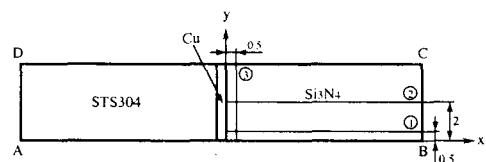


Fig.3 Measurement positions of residual stress

2.4 유한요소해석

유한요소해석은 범용구조 해석프로그램 ANSYS를 이용하여 열 탄소성 해석에 의하여 접합과정에 있어서 발생되는 접합잔류응력을 해석하였으며, 그 후 열사이를 과정에서의 접합잔류응력의 변화를 해석하였다. Fig.4는 요소분할을 나타내는 것으로서, 응력이 집중되는 접합계면과 단부근방의 요소는 보다 작게 분할하였다. 사용한 요소는 8절점 등방계수요소(Isoparametric element)를 이용하였으며, 총요소수 540개, 총절점수 1749개, 최소요소 x, y방향의크기는 0.01858 mm, 0.02865

mm이다. 경계조건은 대칭조건을 고려하여 강체 운동만 방지하도록 하고, 이외의 변형은 자유로이 하였다.



Fig.4 Finite element model

2.4 4점 굽힘시험

접합 후, 그리고 각 사이클, 각 온도 조건에서 JIS R1601⁶⁾에 준하여 상온 대기중에서 접합부가 중앙에 위치하도록 하여 4점 굽힘시험을 시행하였다. Fig.5는 4점 굽힘시험을 한 모식도를 나타내며, 최대하중 P_{max} 로부터 아래와 같은 식에 의해서 굽힘강도 σ_b 를 측정하였다.

$$\sigma_b = 3P_{max} \frac{(L - l)}{2WT^2}$$

여기서, W와 T는 시험편의 폭과 두께이고, L, l은 각각 하부, 상부의 지점간 거리이다.

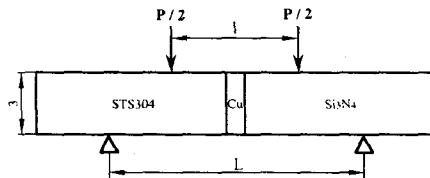


Fig.5 Geometry of 4-point bending test

3. 결과 및 고찰

3.1 접합 후 잔류응력

Fig.6은 단부근방($y=0.5\text{mm}$)의 x 방향에 있어서 계면수직방향 잔류응력(σ_x)분포를 측정한 결과를 나타낸다. 단부근방에서의 σ_x 분포는 그림에서 보는 바와 같이 접합계면근방에서 최대인장응력값을 나타내나, 계면근방에서는 응력구배가 대단히 크기 때문에 계면에서 멀어짐에 따라 급격히 감소하여, 계면으로부터 약 4mm떨어진 영역에서 최대압축잔류응력을 나타낸다. 그후 잔류응력은 거의 변화없이 0에 가까운 값을 나타낸다.

Fig.7은 중앙선상($y=2\text{mm}$)에 있어서 σ_x 의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 중앙선상의 σ_x 분포는 단부에서의 잔류응력분포와 거의 같은 경향을 나타내고 있다. 그러나, 잔류응력구배는 단부가

중앙부 보다 다소 완만하며 σ_x 의 최대값을 비교하여 보면, 단부가 중앙부보다도 훨씬 크다는 것을 알수 있다.

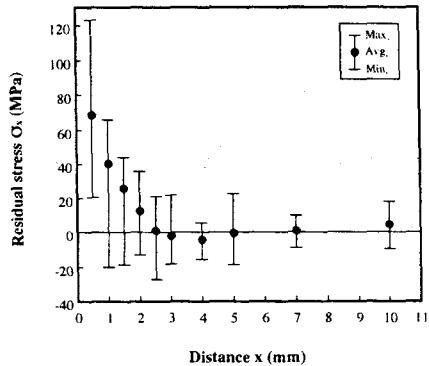


Fig.6 Variation of residual stress along the edge line

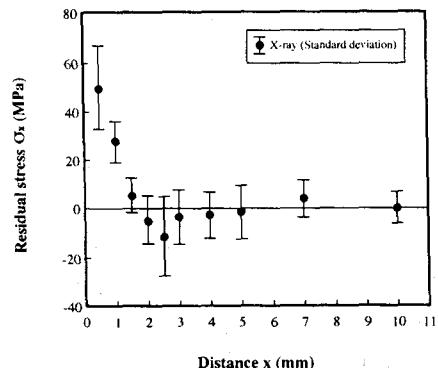


Fig.7 Variation of residual stress along the center line

3.2 유한요소해석

Fig.8은 X선응력측정법에 의하여 측정된 영역인 시험편 표면 ABFE와 중앙종단면 ADHE면에 대해서 단부근방($y=0.014\text{mm}$)과 중앙선상($y=2\text{mm}$)에 대하여 2차원 유한요소법에 의하여 계산한 계면 수직방향 잔류응력(σ_x)분포를 나타낸다. 그럼에서 세라믹부의 잔류응력과 스테인레스부의 잔류응력은 시험편의 중심에 대하여 거의 절대칭으로 분포되어 있다.

한편, 잔류응력분포는 중앙선상에서 세라믹부가 압축잔류응력을 나타내나, 스테인레스부는 인장잔류응력이 발생되어 시험편 전체는 인장잔류응력과 압축잔류응력이 연속적으로 완만하게 분포하고 있다. 이에 반하여, 단부근방의 잔류응력분포는 스테인레스부에서는 압축잔류응력이, 세라

면부에서는 인장잔류응력이 발생되며, 계면을 경계로 불연속적으로 분포되어 점을 알 수 있다.

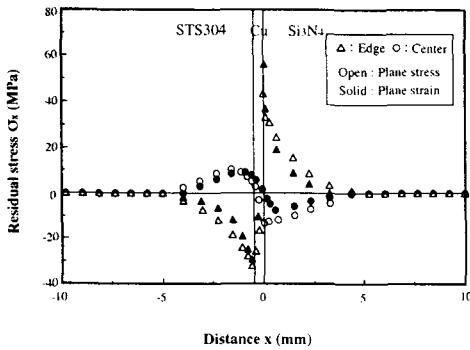


Fig. 8 Distribution of residual stress by FEM

3.3 열부하에 의한 유한요소해석

Fig.9는 각 온도에서 x선 측정에 의한 최대인장 잔류응력값과 유한요소해석결과의 최대인장 잔류응력값을 나타내었다. 그림에서 유한요소해석 결과 (O표)는 열사이클 후의 계면부근의 최대인장 잔류응력이 열사이클 온도에 거의 비례하여 선형적으로 증가하고 있다. 이에 반하여 X선 측정결과(△)는 400°C까지는 일단 증가하다가 500°C에서 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 이상과 같이 X선 실측결과와 유한요소해석 결과는 다소 크기의 차이는 있으나 두 결과 모두 열사이클 부하에 의하여 최대인장잔류응력이 크게 증가된다는 것을 알 수 있다.

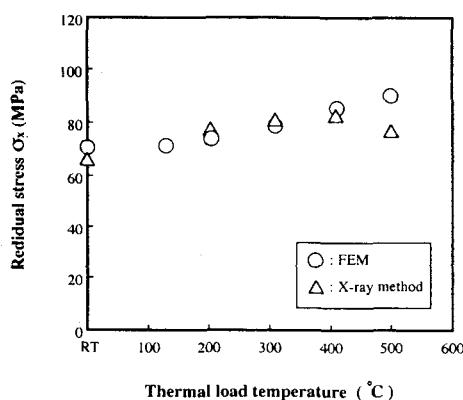


Fig.9 Relationship between thermal cycle and residual stress

3.4 반복열사이클에 의한 잔류응력 측정

Fig.10은 단부의 계면근방($y=0.5\text{mm}$) 최대인장 잔류응력값의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 열사이클 부하 회수에 따른 잔류응력의 변화는 200°C, 300°C, 400°C, 500°C의 모든 온도에서 1사이클에서는 대체적으로 증가하고 있으나, 3사이클, 10사이클로 열사이클 회수가 증가할수록 잔류응력은 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 열사이클 온도에 따른 잔류응력의 변화를 살펴보면 1, 3회의 저사이클 부하의 경우 400°C에서 가장 높은 잔류응력을 나타내나, 사이클 부하 회수가 증가함에 따라 200°C에서 가장 높은 잔류응력값을 나타낸다. 한편, 500°C 열사이클 부하의 경우에는 사이클 회수에 관계없이 가장 낮은 잔류응력값을 나타냄을 알 수 있다. 이와같이 사이클이 증가할수록 잔류응력이 감소하는 원인은 동의 소성변형량의 증가와 더불어 Brazing filler의 열화 때문으로 생각된다.

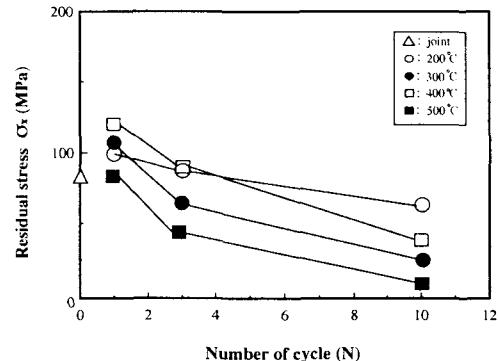


Fig.10 Distribution of residual stress along the edge line

3.4 반복열사이클에 의한 유한요소해석

열사이클에 따른 최대인장잔류응력값의 변화를 Fig.11에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 모든 온도에서 열사이클회수가 증가함에 따라 최대인장잔류응력값은 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 증가폭은 열사이클온도가 높을수록 커진다는 것을 알 수 있다. 이와같이 열사이클회수가 증가함에 따라서 잔류응력이 증가하는 것은 중간 층인 동의 탄소성 특성, 특히 변형율 경화의 영향이라고 생각되며, 이렇게 증가된 잔류응력은 세라믹/금속접합재의 파단강도를 크게 저하시킬

것으로 생각된다

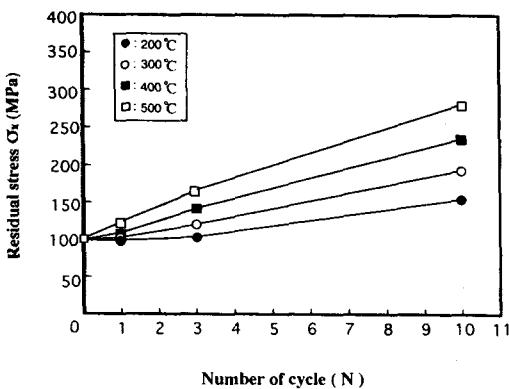


Fig.11 Relation between the cycle number and the thermal cycle temperature

3.5 반복열사이클에 의한 접합강도와 파괴기구

Fig.12는 열사이클 부하에 따른 파단강도의 변화를 검토한 결과이다. 열사이클 부하온도가 높을수록 파단강도의 저하 폭이 크다는 것을 알 수 있으며, 또한 열사이클 부하회수가 증가할수록 파단강도의 저하 폭도 크다는 것을 알 수 있다. 이와같이 열사이클 부하에 의하여 접합재의 파단강도가 저하하는 원인은 1사이클의 경우에는 잔류응력이 열사이클 부하에 따라 증가하므로 이로인하여 파단강도가 저하한다는 것을 알 수 있으며, 3사이클 이상 그리고 고온으로 갈수록 응력완화재로 사용되고 있는 Brazing filler가 산화물, 석출물등을 생성시켜 접합계면에서의 강도열화가 크게 일어나기 때문으로 생각된다..

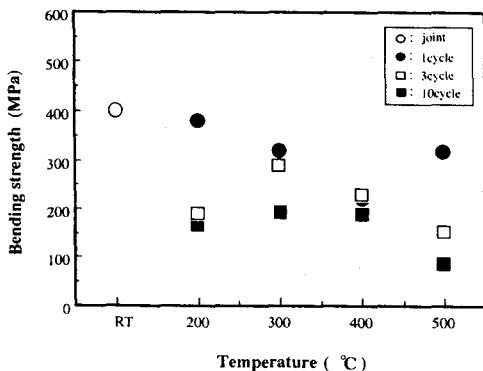


Fig.12 The Relation between bending strength and various thermal cycle temperature

Fig.13은 굽힘시험 후의 파괴형태를 나타내고 있다. (a)는 균열이 구리와 세라믹의 계면에서 시작되어 직선적으로 계면을 따라 진전하는 A type 파괴형태이다. 이에 반하여 (b)는 균열이 계면근방의 최대인장잔류응력이 발생하는 세라믹 부분에서 발생하여 세라믹측을 따라 진전한 후 다시 접합계면으로 천이한 후 최종파단은 동과 세라믹의 경계부분에서 파단하는 B type 파괴형태이다. 그리고, (c)는 균열이 구리와 세라믹의 접합계면에서 발생되어 접합계면을 따라 진전하다가 세라믹측으로 천이하여 균열이 4/5정도 진전한 후 최종파단은 다시 구리와 세라믹의 계면부분으로 이동하여 최종파단에 이르는 C type 파괴형태로 구분할 수 있다. 특히, 저온에서는 A type의 파괴형태, 저온·고사이클의 경우는 B type의 파단면, 고온·고사이클에서는 C type으로 파괴형태가 열사이클온도 및 반복횟수에 따라 천이된 결과를 얻을 수 있었다.

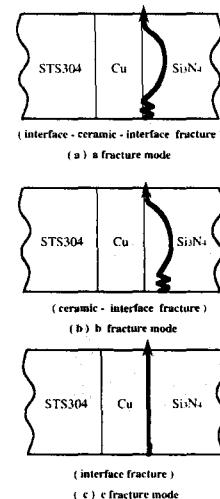


Fig.13 Model of fracture mechanism

Fig.14는 접합계면의 석출물 및 반응생성물 등을 알아보기 위해서 500°C, 3cycle에서의 시험편의 조직 사진을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 (a)는 200배 조직사진을 나타내며, 이를 확대하여 (b)와 (c)에 계면을 확대하여 나타내었다. 그림(b)의 경우 스테인레스와 구리의 경우 열팽창계수가 유사하기 때문에 상호 열응력의 교환이 비교적 용이하게 되어 경계면의 조직은 안정되

고 미세한 석출물의 분포를 나타내고 있다. 그러나 (c)의 경우 구리와 세라믹의 경계면의 조직이 비교적 활성화되어 석출물들이 방사상으로 확산되고 있으며, 특히 세라믹의 경우 열팽창계수가 작기 때문에 구리와 세라믹의 경계면에 열에너지가 집적되어 파괴에 영향을 주는 것으로 생각된다.

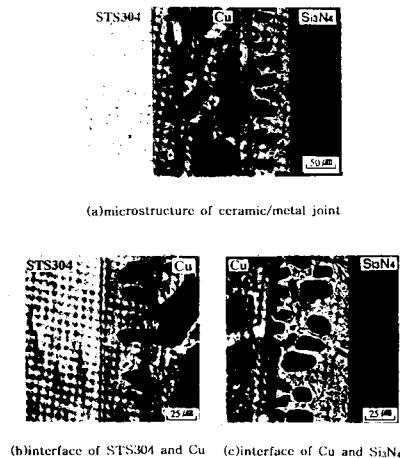


Fig.14 Photographs showing microstructure

Fig.15는 Fig.14의 (c)를 확대하여 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 것처럼 ①은 대부분이 Ag성

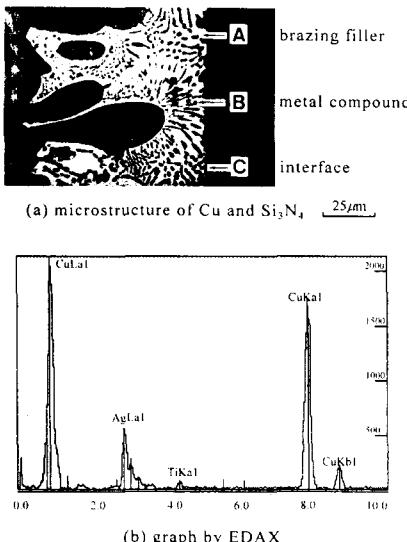


Fig.16 Microstructure around the interface by EDAX

분으로서 Cu와 N을 미량함유하고 있는 상태를 나타내고, ②는 (Cu,Ag)의 화합물 형태의 석출물로서 형성되어 있다는 것을 알 수 있으며 특히 경계면인 ③의 부분은 Partical형태의 TiN의 화합물이 존재하는 것으로 나타났다.

4. 결론

세라믹/금속접합재의 접합 전후의 잔류응력 및 강도평가 그리고, 열사이클로 인한 잔류응력의 변화 및 강도평가를 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 접합재의 접합 전후에 있어서 X선 응력측정 결과와 유한요소법에 의한 잔류응력값은 유사한 결과를 얻었다.
2. 고온으로 갈수록 접합강도는 잔류응력 보다는 접합계면열화가 강도특성에 큰 영향을 미쳤다.
3. 접합재의 파괴형태는 3가지 형태로 나타났으며 고온·고사이클로 갈수록 C type의 파괴형태가 많이 나타났다.

참고문헌

- (1) 김종현, 권용환, 김태영, 정연철, “ZrO₂/스테인레스강 접합재의 잔류응력분포에 관한 연구”, 대한금속학회지, Vol. 42, No. 477, 1993, pp. 620 ~ 626,
- (2) 전창훈, 양영수, 나석주, “알루미나 세라믹과 구리의 브레이징 접합물에 대한 열응력의 유한요소법 해석에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집, 제14권 제3호, 1990, pp. 547~553
- (3) 강병록, 유연철, “금속/세라믹 접합기술”, 대한금속학회지, Vol.4, No.1, 1991, pp.49~57
- (4) 김영식, “機械構造物用 세라믹과 금속과의 접합공구 기술”, 대한용접학회지, 1989, 제6권, 제3호, pp. 1~7
- (5) 岡本平, 管沼克昭, “セラミックスと金屬の接合”, 日本複合材料學會誌, Vol.12, No. 4, 1986, pp. 177~183