

研 究 論 文

大韓熔接學會誌
第9卷第4號 1991年12月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol.9, No.4, Dec., 1991

활성 용가재를 이용한 세라믹 및 스테인레스강의 접합*

김원배** · 김숙환** · 권영각** · 장래웅** · 배석천***

Ceramic and Stainless Steel Brazing by Active Filler Metal*

W.B. Kim**, S.H. Kim**, Y.G. Kweon**, R.W.Chang**, S.C. Bae***

Key Words : Dissimilar Material Bonding(이종재료 접합), Active Filler Metal(활성용가재), 4-point Bending Strength(4점 굽힘강도), Brazing Condition(브레이징 조건), Ceramics Bonding(세라믹 접합)

Abstract

The direct brazing technology which could be used for the simplification of brazing process and the improvement of brazed joint quality was studied with Al_2O_3 and stainless steels. The brazing of Al_2O_3 to STS304 or STS430 was performed under different brazing conditions such as brazing filler metal, temperature, heating rate and brazing time. Microstrutural observation and chemical analysis by SEM/EPAM were carried out to verify the quality of brazed joints. 4-point bending strength of brazed joints was also measured to find the optimal brazing conditions. The results showed that, in brazing of Al_2O_3 , the mixed oxide layer resulted from the reaction between Ti in filler metal and oxide layer on the material surface to be brazed was found to be very important for the joint quality. The width of oxide layer varied with the brazing conditions such as brazing time, heating rate and chemical composition of filler metals. The strength of brazed joints was more affected by the type of materials and their thermal properties than by brazing heat cycle.

* 90년 대한용접학회 춘계학술대회 발표
** 정회원, 산업과학기술연구소 용접연구센터
*** 정회원, 계명대학교 재료공학과

1. 서 론

산업의 발달에 따라 많은 종류의 새로운 소재들이 개발되어 왔으나, 이들 개발된 신소재들의 응용기술 개발 및 특성 평가는 상대적으로 미흡한 상태이다. 첨단산업과 관련되는 각종 제품의 정밀화 및 고급화가 점점 더 절실히 요구되고 있는 상황에 따라 기계류 및 산업설비 부품 등에 이러한 신소재들을 복합적으로 적용하는 경우가 많아지고 있으며 이에 따라 정밀 가공기술의 개발이 필수적으로 요구되고 있는 실정이다.

이러한 추세에 맞추어 최근 플라즈마, 레이저, 전자빔 등 고밀도 열원을 이용한 가공기술들이 개발 응용되고 있으나 이러한 가공기술은 적용할 수 있는 소재의 종류 및 형상에 제한을 받고 비용이 많이 들기 때문에 좀더 값싸고 널리 이용할 수 있는 기술을 필요로 하게 되었다.

특히 최근 전 산업분야에서 각광받고 있는 각종 세라믹 소재의 응용 및 각 소재 부품에의 적용은 기존의 용융 용접법으로는 거의 응용이 불가능하거나 제한된 범위내에서만 가능한데 비하여 브레이징(brazing)의 경우 거의 모든 소재, 모든 형상에의 적용이 가능하기 때문에 선진 각국에서 관련 기술 개발에 많은 연구를 진행중이다.

또한 내식성이 우수한 스테인레스(stainless)강의 경우도 산업이 발달함에 따라 많은 종류의 강이 개발되어 사용되고 있으나 종류에 따라 각기 다른 고유의 특성을 가지고 있으며 따라서 접합을 행할때는 모재의 고유 성질에 변화를 주지 않는 접합법을 선정하여야 한다¹⁾. 이러한 관점에서 볼 때, 용접에 의한 스테인레스강의 접합시에는 용접부가 높은 온도로 가열, 용융되기 때문에 원래 소재가 가지고 있는 성질이 변화하기 쉬운뿐 아니라 용접부에 생성되는 높은 잔류응력에 의해 용접부의 성질이 저하하는 경우가 많은데 비하여, 브레이징에 의한 접합은 소재의 가열온도가 낮고 모재를 용융시키지 않기 때문에 접합부에 생성되는 열영향부의 폭이 매우 적으며, 따라서 접합부의 소재 특성 변화가 적고 발생하는 잔류응력도 그 크거나 분포 형태가 용접에 비하여 완만한 경향을 나타내고 있다(Fig. 1).

본 연구에서는 세라믹과 세라믹 및 세라믹과 스테인

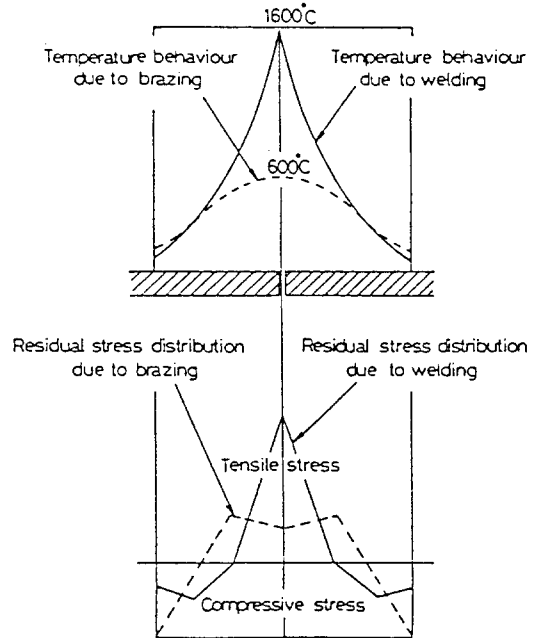


Fig. 1 Comparison of heat affected zones produced by welding and brazing

레스재의 이종재료간의 브레이징 접합 기술 개발을 목표로 각종 브레이징 변수에 따른 접합부를 제작하고, 광학현미경 및 전자현미경(SEM/EPMA)을 통한 접합부 미소조직 관찰 및 성분분석 그리고 4점 굽힘시험(4-point bending test)에 의한 접합부 강도 측정을 실시함으로써 소재별 접합부 특성에 미치는 접합변수의 영향을 조사하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1. 실험 소재

본 실험에서 사용한 소재는 스테인레스 강재로서 오스테나이트계인 STS304와 페라이트계인 STS430을 선정하였으며, 이들 소재의 화학성분을 Table 1에, 열적 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 그리고 산화물계 세라믹 소재인 순도 99.8% Al_2O_3 를 선정하여 실험을 진행하였으며, Al_2O_3 의 각종 성질을 Table 3에 나타내었다.

실험에 사용한 용가재는 활성금속 Ti를 약 3% 함유한 두께 100 μ m의 박막(foil)상의 비정질 재료로서 박막상의 용가재는 기존의 페이스트(paste) 상이나 분말상의 용가재에 비해 기공(pore)이나 취약한 相(brittle phase)의 형성이 적은 잇점이 있다. 이외에 용가재에 첨가한 활성금속 Ti의 접합부에서의 역할을

규명하기 위해 AWS BA8-8의 Ti 무첨가 용가재(type D)를 선정하여 접합을 행하였다. Table 4에 본 실험에서 사용한 용가재의 성분 및 용융온도를 나타내었다.

2.2. 실험장치 및 접합 조건

시험편은 직경 1/4in, 길이 30mm의 환봉상으로 절단하여 선반등을 통해 접합면을 1차 가공한 뒤 시편의 표면을 소재별로 #220-#600 sand paper로 연마한 뒤 접합 직전에 아세톤과 초음파 세척기를 이용하여 세정 후 완전 탈지, 건조후 용가재를 접합소재 사이에 놓고 접합을 행하였다²⁾. 이때 접합표면의 조도는 약 R_{max} 3 μ m 정도이었다.

Table 1 Chemical compositions of stainless steels studied (wt%)

| | C | Mn | Si | Cr | Ni | P | S | Fe |
|--------|------|-----|-----|-----------|----------|-------|------|------|
| STS304 | 0.08 | 2.0 | 1.0 | 18.0-20.0 | 8.0-10.5 | 0.045 | 0.03 | bal. |
| STS430 | 0.08 | 2.0 | 1.0 | 16.0-18.0 | - | 0.04 | 0.03 | bal. |

Table 2 Physical and mechanical properties of studied stainless steels (annealed condition)

| Properties | Density | | | Elastic modulus ($\times 10^6$ kg/cm ²) | | | Tensile strength (kg/mm ²) | | | Specific heat (cal/g $^{\circ}$ C) | | |
|------------|---|------------------|------------------|--|------------------|------------------|--|--|--|------------------------------------|--|--|
| | Mean coefficient of thermal expansion (20 $^{\circ}$ C to, $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}$ C) | | | Thermal conductivity (cal/sec \cdot cm \cdot $^{\circ}$ C) | | | | | | | | |
| | 100 $^{\circ}$ C | 315 $^{\circ}$ C | 538 $^{\circ}$ C | 20 $^{\circ}$ C | 100 $^{\circ}$ C | 500 $^{\circ}$ C | | | | | | |
| STS 304 | 8.0 | | | 1.97 | | | 63 | | | 0.12 | | |
| STS 430 | 7.8 | | | 2.03 | | | 49 | | | 0.11 | | |
| STS 304 | 17.2 | 17.8 | 18.4 | 0.03 | 0.0387 | 0.0514 | | | | | | |
| STS 430 | 10.4 | 11.0 | 11.4 | 0.0568 | 0.0624 | 0.0628 | | | | | | |

Table 3 Physical, mechanical and thermal properties of Al₂O₃

| Density | Hardness (Rockwell) (45N) | Bending strength (kg/mm ²) | Compression strength (kg/mm ²) | Elastic modulus ($\times 10^6$ kg/cm ²) |
|-------------------------------------|------------------------------------|--|--|--|
| 3.98 | 80 | 30-40 | 280-350 | 3.5-4 |
| Melting temperature ($^{\circ}$ C) | Specific heat (cal/g $^{\circ}$ C) | Thermal conductivity (cal/sec cm $^{\circ}$ C) | Mean coefficient of thermal expansion 20 $^{\circ}$ C to 100 $^{\circ}$ C, $\times 10^{-6}$ / $^{\circ}$ C | |
| 2050 | 0.25 | 0.095 | 6-9 | |

Table 4 chemical compositions and working temperature of brazing filler metals used

| Filler metal | Chemical composition (wt%) | | | | Melting temp. ($^{\circ}$ C) | Working temp. ($^{\circ}$ C) |
|--------------|----------------------------|------|----|----|-------------------------------|-------------------------------|
| | Ag | Cu | Ti | In | | |
| Type A | 72.5 | 19.5 | 3 | 5 | 732-811 | 850-950 |
| Type B | 91 | 6 | 3 | - | 715-917 | 920-1000 |
| Type C | 70.5 | 26.5 | 3 | - | 803-857 | 860-950 |
| Type D | 72 | 285 | - | - | 779 | 779-899 |

접합에 사용한 실험장치는 15kW 용량의 고주파 유도 가열장치로서 Fig. 2에 개략도를 나타내었으며, 접합 열 사이클은 미리 주어진 프로그램(program)에 의해 R-type의 열전대(thermocouple)을 이용하여 접합 시편의 현재온도를 측정하여 기기에 부착되어 있는 자동온도조절장치에 의해 조정되어 진다. 세라믹과 스테인레스강 접합의 경우는 스테인레스재에 직접 열전대를 저항용접기를 이용하여 부착하여 온도 측정 및 열사이클을 가하였으나, 세라믹 소재의 경우는 시험편에 직접 열전대를 부착 할 수 없는 관계로 Fig. 3과 같은 시편 고정 및 가열을 위한 지그를 제작하여 접합을 행하였다.

접합시 노내 분위기는 진공 및 순도 99.999%의 아르곤가스(Argon gas)를 사용하였으며, 냉각속도는 15°C/min, 노냉 및 급냉 등으로 변화 시켜가며 접합부의 기계적 강도 및 미소조직 관찰을 행하였다.

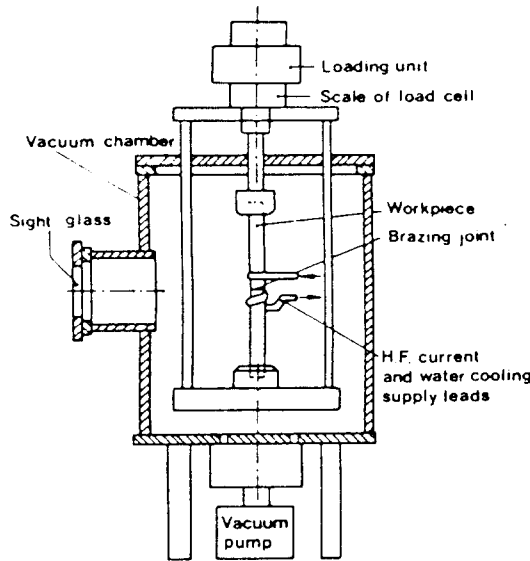


Fig. 2 Schematic diagram of high frequency induction furnace

2. 3. 기계적 성질 시험 및 미소조직 관찰

접합부의 기계적 성질은 세라믹 및 브레이징 접합부의 성능 평가에 가장 적절하다고 추천되는 4점 굽힘시험을 적용하여 평가하였다. 이때 시험편에 작용하는 전단력과 굽힘 모우멘트를 Fig. 4에 나타내었는데 이 그림에서 보는 바와 같이 4점 굽힘 지그의 내부 폭(inner span)내에 걸리는 전단력은 0이고 굽힘 모우

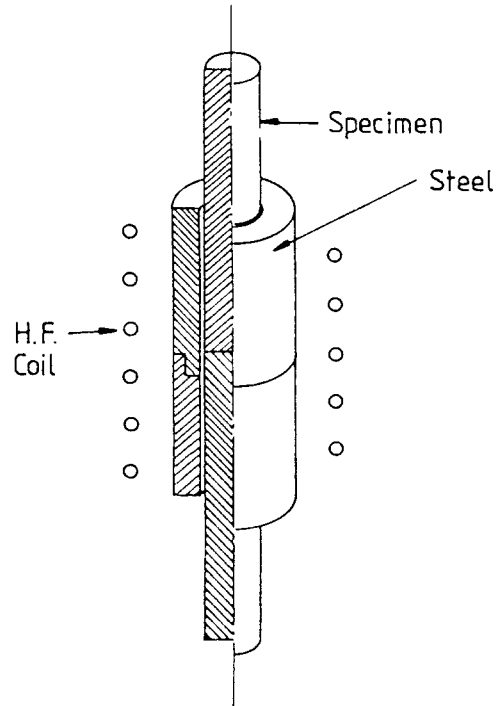


Fig. 3 Assembly of braze specimen

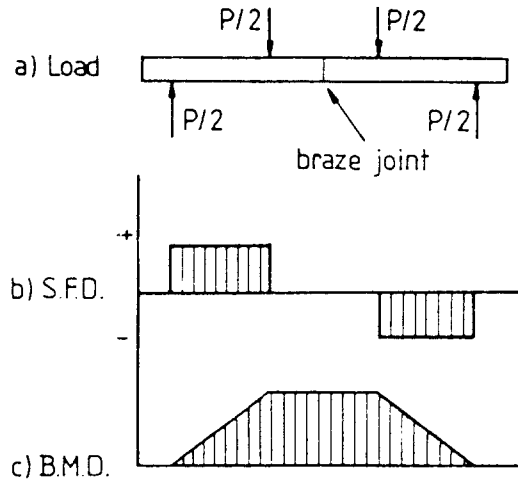


Fig. 4 S.F.D and B.M.D. in 4-point bending test

멘트는 일정한 값을 유지하므로 접합부가 미소한 브레이징 시험편의 강도 시험에 적합한 방법임을 알 수 있다. 시험에 사용한 기기는 10ton 용량의 Instron model 6025로 0.1mm/min의 시험속도(cross head speed)로서 시험하였다.

또한 광학 현미경과 전자 현미경(SEM/EPMA)을 통해 접합부의 미소 조직과 석출물의 성분 분석, 확산층의 생성 여부 및 폭의 변화등을 관찰하였으며, 또한 미소경도 시험을 통해 접합부의 각 부분의 경도 분포 및 석출물들의 거동을 관찰하여 보았다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 접합부 미소조직 및 성분분석

Photo. 1은 용가재 C type을 사용하여 각 소재 조

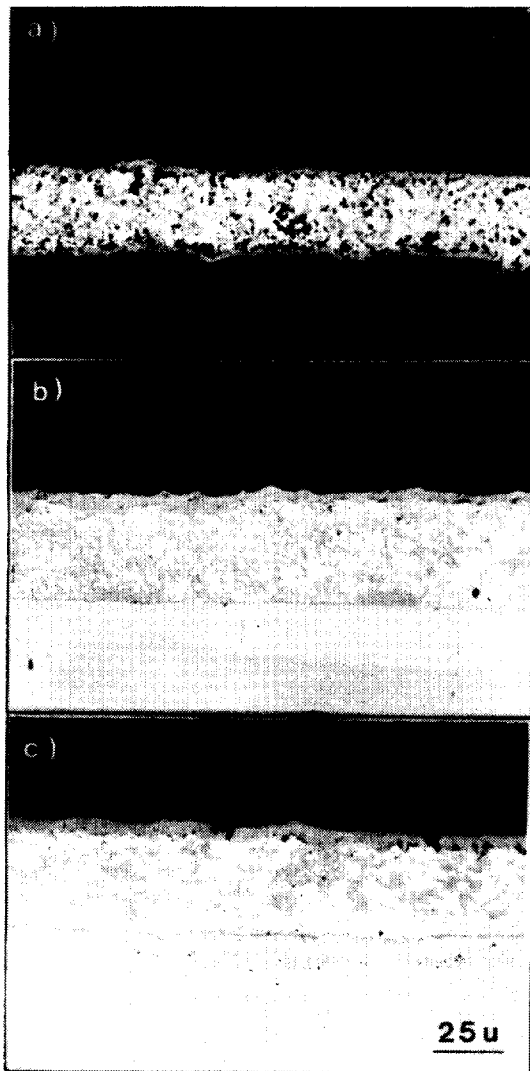


Photo. 1 Microstructures of brazed joints
 a) Al_2O_3/Al_2O_3 b) $Al_2O_3/STS\ 304$
 c) $Al_2O_3/STS\ 430$

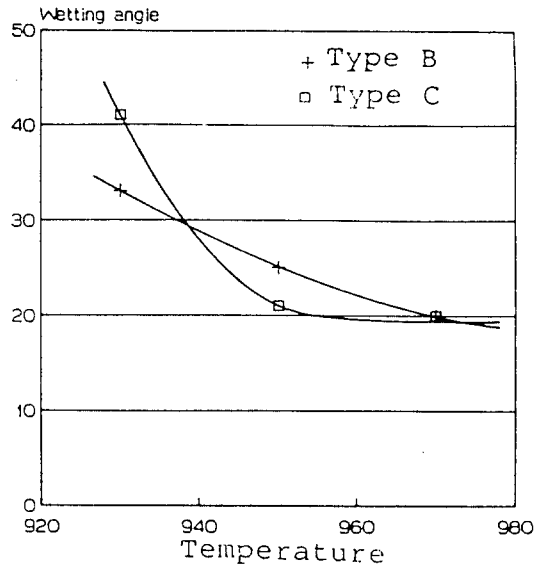


Fig. 5 Results of wettability test on Al_2O_3

합별로 얻은 접합부 조직을 광학현미경을 이용하여 조사한 결과이다. 사진에서 보는바와 같이 스테인레스강재와 용가재 사이에는 약 $5\mu m$ 내외의 확산층이 형성되어 있음을 알 수 있었으며 이러한 확산층은 브레이징 시간 및 온도등의 조건에 따라 그 폭이 변화함을 보정실험에서 확인 할 수 있었다. 또 세라믹과 용가재 간의 경계부에서는 $3-5\mu m$ 정도의 확산 반응층이 형성되어 있음을 볼 수 있었는데 이 확산 반응층은 SEM/EPMA를 통한 분석에서 Ti와 O_2 의 화합물임을 추정할 수 있었다.

Photo. 2은 C type의 용가재를 사용하여 STS 430과 Al_2O_3 를 가열속도와 냉각속도를 $15^\circ C/min$ 으로 하고 중간유지시간(penetration time)을 $500^\circ C$ 와 $750^\circ C$ 에서 각각 30분씩 주었을 경우의 접합부를 전자현미경(SEM/EPMA)을 통하여 관찰한 것이다. 사진에선 보는바와 같이 용가재 중의 Ti가 Al_2O_3 쪽으로 밀집되고 있는 현상을 관찰할 수 있으며(Photo. 2.d, e) 이는 Al_2O_3 의 표면에 존재하는 산화층중의 O_2 와 친화력이 높은 Ti가 서로 반응을 일으킨 결과로 생각된다. 또, 접합부 중간에 조직이 중간을 경계로 양쪽이 서로 다름을 알 수 있는데(Photo. 2.a), 이는 EPMA를 이용한 성분분석 결과 스테인레스강 모재의 성분이 용가재내로 유입되어 들어와서 상호 합금화가 일어난 결과로 판단되며 이러한 사실은 EPMA를 이용한 성분분석 결과(Photo. 2.h,i,j,k)로 확인 할 수 있었다. 이러한 합금화는 용가재와 모재의 계면 확산

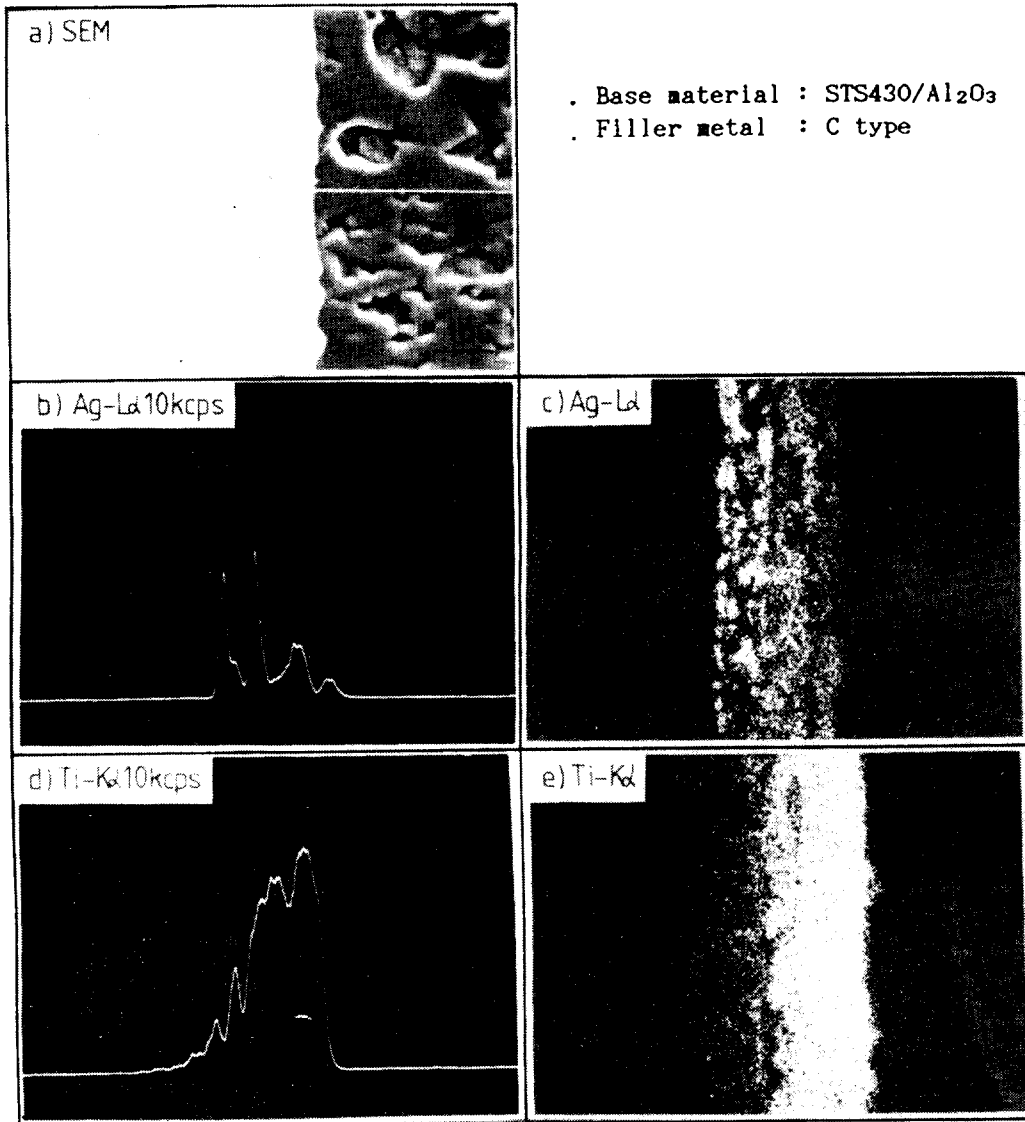


Photo. 2 SEM photography of STS 430/Al₂O₃ brazed joint, and line analysis and EPMA images of each element contained in filler metal or base metal

과 접합부에서의 모재의 용융에 따른 결과로 생각된다⁴⁾. 이러한 사실은 접합부 각 부분의 미소경도 측정 결과 Al₂O₃의 확산 반응층의 경도 Hv500-700(5g), 용가재의 Al₂O₃쪽 경도 Hv100-130(5g), 용가재의 SUS430재쪽 Hv270-300(5g)로 나타난 접합부 경도 분포와도 잘 일치하고 있다. 용가재 모재의 경도는 Hv50-60(5g)을 나타내고 있다.

3.2. 접합부 기계적 성질 조사

3.2.1. 브레이징 온도의 영향

Fig. 6은 각 소재 조합별로 용가재 C type을 사용했을 경우 브레이징 온도의 변화에 대한 접합부 4점 굽힘 강도시험 결과를 나타낸 것으로 소재 조합별로 약 간섭의 강도 차이는 있으나 대체적으로 용가재의 용융

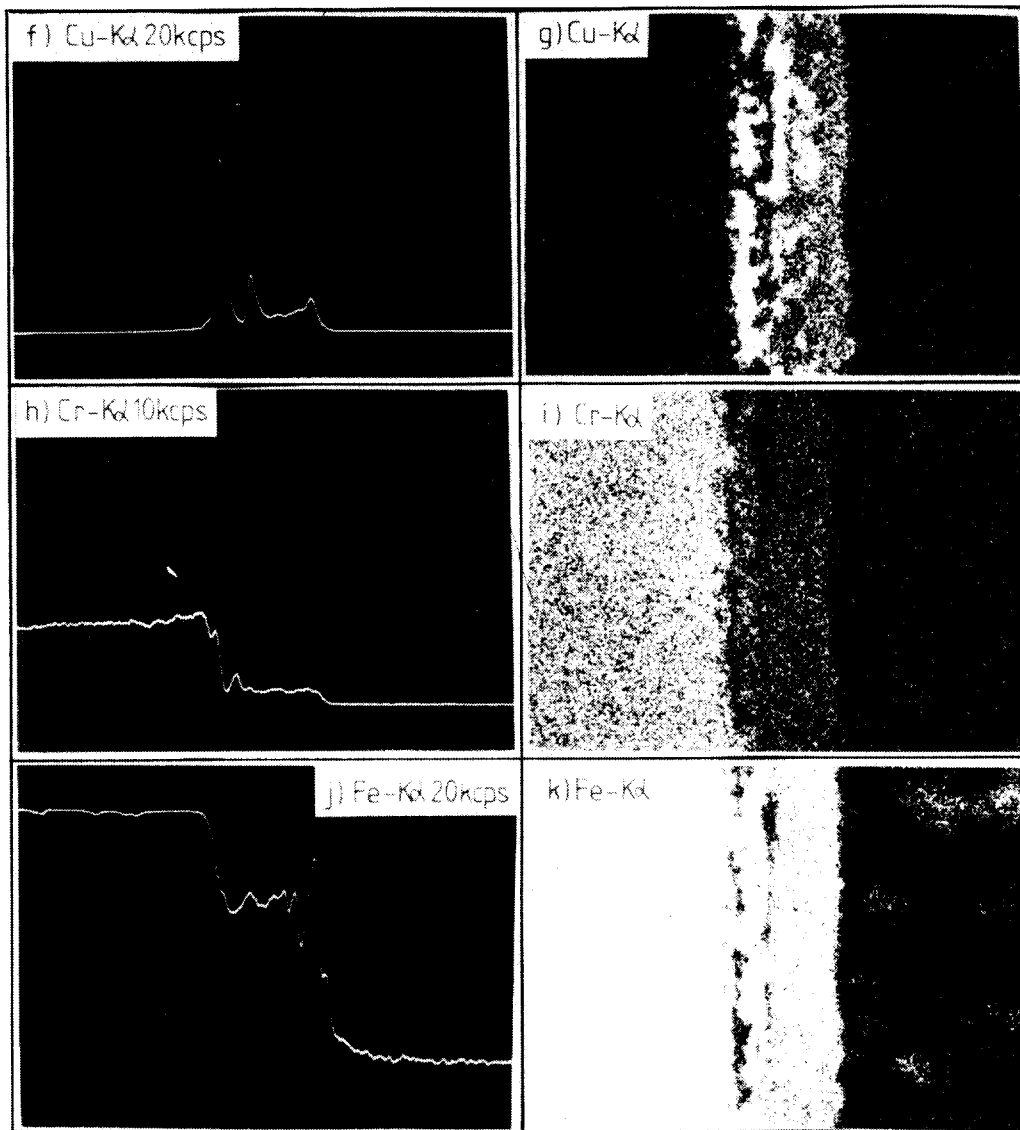


Photo. 2 (Continued)

접부터 브레이징 작업 온도의 상승에 따라 굽힘강도는 증가하다가 점차 최고강도에 도달하는 것을 알 수 있으며, 그 온도는 대략 용가재의 용융점보다 약 80-100°C 정도 높은 온도임을 확인 할 수 있다. 이는 용가재와 접합 소재간의 반응도 및 용가재의 접합부에서의 유동성 등이 온도가 높을수록 활발히 일어나기 때문으로 생각되며, 따라서 브레이징에 의한 각종 소재

의 접합시 작업온도는 용가재의 용융온도보다 약 100°C 정도 높게 설정하여야 함을 알 수 있었다.

3.2.2. 용가재의 역할

Fig. 7은 소재별, 용가재별 굽힘강도 시험결과를 나타낸 것으로 Al₂O₃/Al₂O₃ 접합부의 경우 용가재의 용융온도가 낮고 3% 정도의 Ti를 함유한 C type의 경우가 가장 높은 강도를 나타내었다. 그러나 Ti를 함

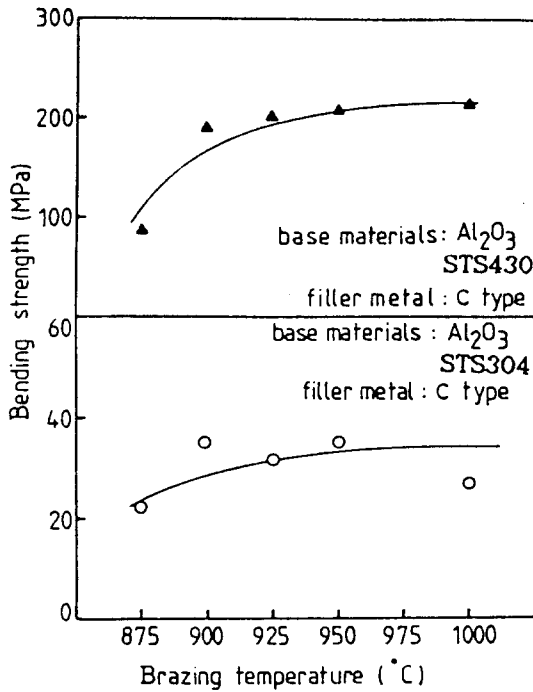


Fig. 6 Variation of fractured bending strength of brazed joints as a function of brazing temperature

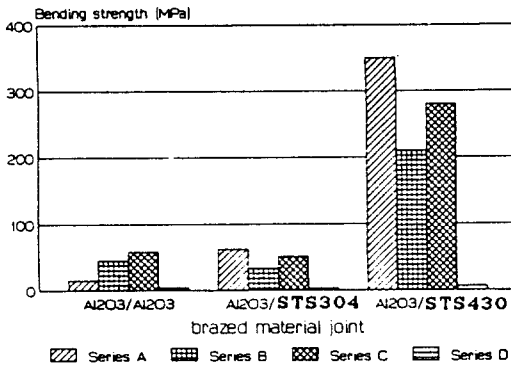


Fig. 7 Fractured bending strength of brazed joints made with different filler metals

유하지 않은 용가재 D type의 경우에는 접합부에 반응층의 형성이 거의 이루어지지 않음으로서 접합이 이루어 지지 않거나 매우 약한 강도를 나타냄으로서 세라믹 소재의 접합시 활성금속 Ti의 역할을 확인 할 수 있었다.

또한 Fig. 7에서 알 수 있는 바와 같이 Al₂O₃와 스

테인레스강 접합에 있어서 Al₂O₃와 STS430재 접합의 경우가 Al₂O₃와 STS304재 접합의 경우보다 접합 강도가 약 5-6배 높게 나타나고 있는데 이는 접합 소재간의 열적 특성의 차이가 STS430/Al₂O₃ 접합부에 비해서 STS304/Al₂O₃ 접합부가 더 크기 때문으로 생각되어진다.

일반적으로 세라믹과 금속간의 접합시 적용 가능한 적절한 열팽창계수의 차이는, 용가재의 용고 온도 및 재료의 탄성계수등에 따라 차이가 있으나 보통 다음과 같은 범위내에서 선정하는 것이 적절하다고 보고되고 있다⁵⁾.

$$-5 \leq \alpha_M - \alpha_C \leq 10$$

여기에서

α_M : 금속의 열팽창 계수 ($10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)

α_C : 세라믹의 열팽창 계수 ($10^{-7}/^{\circ}\text{C}$)

그런데 Table 2 와 Table 3에서 보는 바와 같이 STS 430과 Al₂O₃ 사이의 상온에서의 열팽창 계수의 차이는 $1.4 \sim 4.4 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 정도인데 비하여 STS 304와 Al₂O₃ 사이의 열팽창 계수의 차이는 $8.2 \sim 11.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로서 위와 같은 기준에 비해 크게 차이가 나는 것을 알 수 있다. 따라서 접합부 굽힘강도는 Al₂O₃/STS 430 접합부가 Al₂O₃/STS 304 접합부보다 높게 나타나는 것으로 생각되며, 부수적으로 소재에 대한 용가재의 젖음성과 계면에서의 확산 정도등이 STS 430의 경우가 STS 304보다 우수하기 때문으로 생각 된다. 용가재에 따른 굽힘 강도의 변화는 A type과 C type의 용가재가 타 용가재에 비하여 우수한 강도를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

3.2.3. 가열속도 및 브레이징 시간의 영향

Fig. 8,9,10은 Al₂O₃/Al₂O₃, Al₂O₃/STS 304 및 Al₂O₃/STS430 간의 접합부 굽힘 강도를 나타낸 것으로 브레이징 조건중 가열속도와 브레이징 시간을 변화시켰을 때의 결과이다. 일반적으로 가열속도에 대해서는 세라믹소재를 어느 정도 균일하게 가열할 수 있는 범위인 $10 \sim 20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 내에서는 별다른 경향을 보이지 않았으나, 브레이징 시간의 증가시 굽힘 강도가 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 이종재료 접합시 소재의 열팽창 계수의 차이에 따라 혹은 실험 방법 및 접합시 분위기에 따라 굽힘 강도 값이 약간의 범위를 두고 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

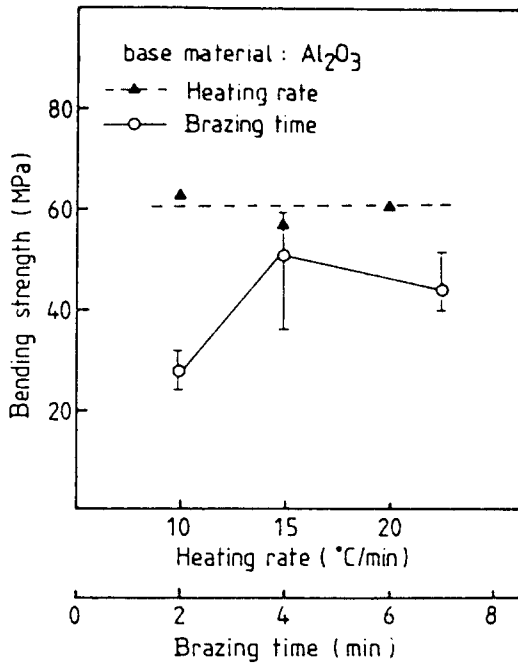


Fig. 8 Bending strength of brazed Al_2O_3/Al_2O_3 joints with different brazing conditions.

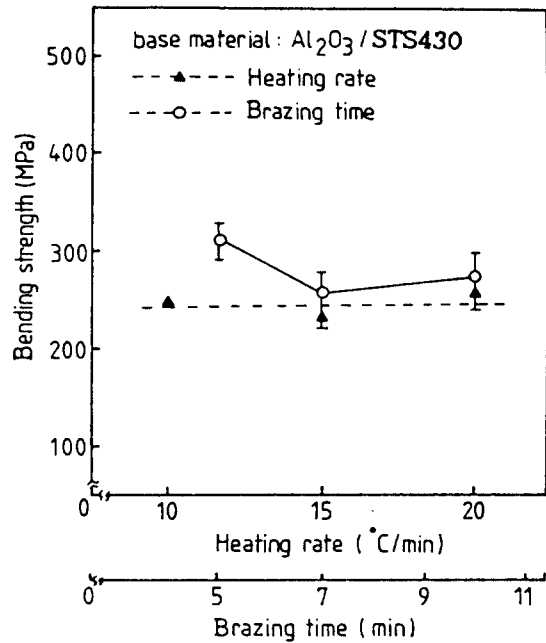


Fig. 10 Bending strength of brazed $Al_2O_3/STS\ 430$ joints with different brazing conditions

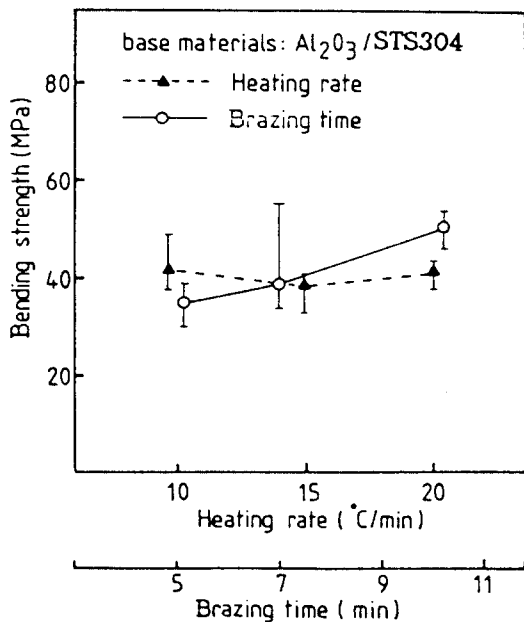


Fig. 9 Bending strength of brazed $Al_2O_3/STS\ 304$ joints with different brazing conditions

3. 3. 접합부 파면관찰

Photo. 3은 용가재 C type을 사용한 각 접합부의 굽힘시험 후 파면을 전자현미경을 이용하여 관찰한 결과이다. Photo. 3.a는 $Al_2O_3/STS\ 304$ 접합부 시험편의 파단면 관찰결과로서 거의 대부분의 시험편이 용가재와 세라믹소재의 경계부에서 시작되어 세라믹 모재중으로 약 45°의 경사를 갖는 균열이 전파하고 있었으며 균열의 시작위치와 진행중의 파면이 조금 다르게 나타나고 있다. Photo. 3. a1과 3.a2는 Photo. 3.a의 1, 2부위를 확대관찰한 것으로 균열이 처음 시작된 위치로 생각되는 Photo. 3.a1에서는 파단형상이 입내 파피의 양상을 띄고 있는 2차균열이 많이 발견되고 있음을 볼 수 있으나, 세라믹 소재중으로 균열이 전파한 부분인 Photo. 3.a2에서는 전형적인 세라믹 소재의 입계 파면을 나타내고 있음을 볼 수 있었다.

$Al_2O_3/STS\ 430$ 접합부의 경우에는 거의 모든 시험편이 용가재 내부에서 파단되는 것을 볼 수 있었으며 (Photo.3.b), Photo. 3.c는 Al_2O_3/Al_2O_3 파단면의 대표적인 것을 나타낸 것으로 Al_2O_3 와 용가재의 경계부

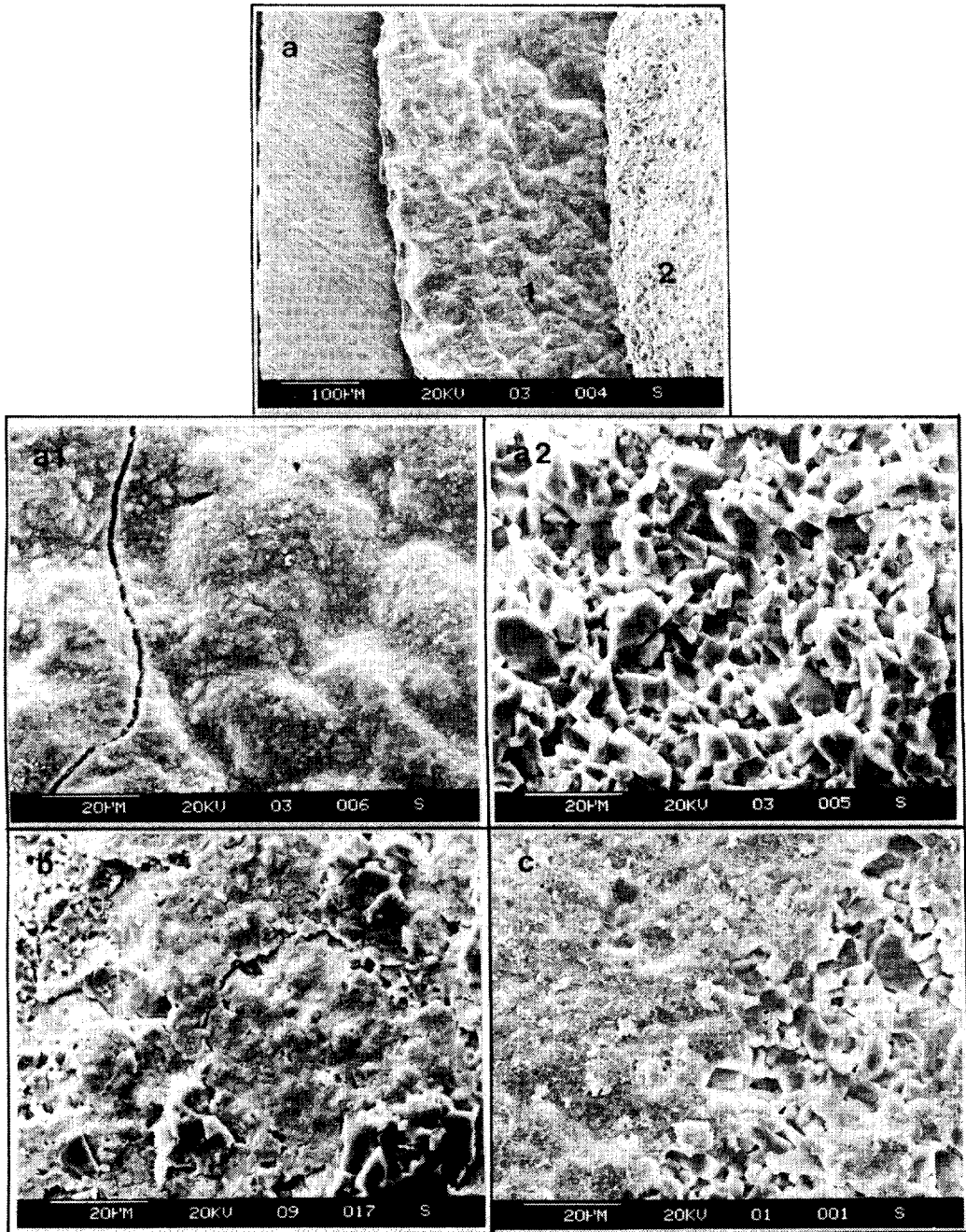


Photo. 3 Fractography of brazed joint with C type filler metal

a) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{STS 304}$ b) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{STS 430}$ c) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$

를 따라 주로 파괴가 일어나고 있었다. 이러한 부위에서 파괴가 일어나는 원인으로는 세라믹 소재와 용가재의 경계부에 발생하는 확산반응층과 용가재와의 물성치의 차이 및 접합후 냉각시에 발생하는 잔류응력의 분포등이 제일 크게 영향을 미치는 것으로 생각되어진다. 이러한 파단 양상으로부터 고찰하여 볼때, 세라믹과 금속간의 접합부 잔류응력을 이론적으로 해석한 Nakao 등의 결과중 최대 주응력의 방향이 본 시험재에서도 매우 중요한 영향을 끼치는 것으로 생각된다. 따라서 잔류응력의 크기 및 방향이 접합부의 파괴 거동을 지배하고 이는 곧 접합부의 강도에 깊이 관여하고 있음을 알 수 있으므로 이에 대한 엄밀한 해석을 위하여 추후 이론적, 실험적 연구가 뒤따라야 할 것으로 생각한다.

4. 결 론

활성 용가재를 사용한 세라믹 및 스테인레스강 간의 브레이징시 접합부의 조직적, 기계적 특성에 미치는 접합변수의 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 세라믹과 스테인레스강 간의 브레이징은 활성 용가재 중의 Ti와 접합 소재 표면의 산화 피막간의 반응에 의한 확산 반응층의 형성을 통해 이루어졌다.
- 2) 브레이징온도는 용가재의 용융 온도보다 약 80-100°C 정도 높은 온도일때 적절한 것으로 나타났다.
- 3) 브레이징 시간이 증가함에 따라 접합부 굽힘 강도는 약간 증가 하였으나, 10-20°C/min의 범위에서의 가열 속도의 증가에 따라서는 접합강도의 변화가 거의 나타나지 않았다.

4) 접합소재간의 열적 성질의 차이는 STS 304의 경우가 STS 430보다 훨씬 크며, 이에 따라 Al_2O_3 /STS 430의 경우가 Al_2O_3 /STS 304보다 약 5-6배 높은 강도를 나타내고 있었다.

5. 후 기

본 연구는 과학기술처에서 시행한 특정 연구 개발사업의 연구비 지원을 받아 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) 鬼東義美 : 스테인레스강의ろう付, 溶接技術, Vol. 31, No. 5, (1983), pp. 31-37
- 2) Brazing Manual, A.W.S (1976), p. 107
- 3) 배석천 외 : 철강 및 신소재 접합기술 개발 I, 산업과학기술연구소 연구보고서 (1988), pp. 24-27
- 4) T. Yoshida et al. : Dissolution and deposit of base metal in dissimilar metal brazing, Welding Journal, Vol. 64, No. 1, (1985), pp. 1s-12s
- 5) ファインセラミックス成形・加工と接合技術編輯委員會 : ファインセラミックス成形・加工と接合技術, 工業調査會 (1988), pp. 170-205
- 6) Consideration of residual stress in Si_3N_4 to metal joints, Y. Nakao, K. Nishimoto, K. Saida, H. Nakamura and K. Katada : Quarterly Journal of the J.W.S., Vol. 7, No. 2, (1989), pp. 109-116