

< 논 문 >

세라믹-금속 브레이징 접합조인트의 고온 접합강도에 관한 연구

이수정* · 정명영* · 이대길* · 구형회**

(1995년 5월 20일 접수)

High Temperature Flexural Strengths of the Ceramic-Metal Brazed Joints

Su-Jeong Lee, Myung-Yung Jeong, Dai-Gil Lee and Hyung-Hoi Koo

Key Words : Ceramic-Metal Brazed Joint (세라믹-금속 브레이징 조인트), High Temperature Flexural Test (고온 굽힘실험), 3 Dim. Finite Element Analysis (3차원 유한요소해석)

Abstract

Four point bending tests of the brazed joints composed of sintered silicon nitride and 0.2% carbon steel with Cusil ABA filler which were fabricated at 860 °C were performed at temperatures, 25, 100, 200, 300, 400, 500 °C. From the experiments, the maximum bending strength was measured at 300°C. From the 3D FE analysis of the residual stress of the brazed joint, it was revealed that the thermally induced residual stresses were minimized when the environmental temperature was 350 °C. Considering the degradation of the filler material at high temperatures, it was calculated that the maximum bending strength of the brazed joint occurred just below the temperature of the minimum thermal residual stress and the thermal residual stress was the dominative parameter of the brazed joint.

1. 서 론

대량 생산과 첨단 공학 기술을 이용한 생산방법은 전통적인 금속과 금속합금 등의 재료에 적용되어 왔다. 그러나, 최근 20년 동안 독특한 재료 특성 때문에 고분자와 복합재료, 세라믹 등의 사용이 증가되어 왔다. 이러한 재료들이 사용되면서, 이들 재료의 우수한 특성을 이용하기 위한 가공기술과 설계기술 그리고 결합기술 등이 발전되어 왔다.⁽¹⁾

한 개로 제작이 불가능한 구조나 여러 개의 구조를 결합하여 만듦으로써 더 저렴하게 또는 더 만족

스럽게 만들 수 있는 구조를 제작하기 위해 구조의 결합은 필수적이다. 예로서 열교환기에서와 같이 냉각 흐름을 위한 복잡한 내부 통로는 여러 개의 부품을 결합시킴으로써 쉽게 만들어 질 수 있다.⁽²⁾ 이 중에서 세라믹은 더 강한 재료와 결합시키거나 강한 섬유나 복합재료 또는 인장상태의 금속 등을 이용하여 압축력을 유도함으로써 다른 재료보다 더 강하게 만들어질 수 있다. 이 외에도 설계와 생산 또는 경제적인 이유때문에 세라믹과 금속을 결합시켜야만 하는 경우가 있다. 즉, 엔진의 스파크 플러그와 같이 전도체와 부도체 같은 서로 다른 특성을 동시에 만족시키고자 할 때, 이러한 결합이 필요하게 된다. 그렇지만, 이와 같이 결합된 부품들은 정확한 형상과 요구되는 허용 오차를 만족하기가 어

*회원, 한국과학기술원 기계공학과

**국방과학연구소

롭게 되는 단점이 있다.

성공적인 세라믹-금속 결합체를 형성하려면 기계적결합법, 확산접합을 이용한 직접결합법 또는 매개 물질을 이용한 간접결합법 중 한가지 이상을 활용해야 한다. 그러나, 이러한 결합은 가공물 간의 밀착된 접촉과 이러한 접촉면의 자동적인 접합면으로의 변환, 또는 성형후 냉각과정에서 발생하거나 정상적인 작동조건에서 발생하는 재료간의 서로 다른 열팽창계수에 의한 잔류 응력에 적응하는 경계면의 기능이 존재해야만 한다. 또한, 서로 다른 열팽창계수에 의한 잔류응력에 적응하는 경계면의 기능이 존재해야만 한다. 금속과 세라믹의 성공적인 경계면의 성형은 쉽지 않으며, 이러한 어려움은 공학적 설계나 경제적인 측면에 원인이 있는 것이 아니라 대개는 재료 그 자체에 원인이 있다. 즉, 용융 용접에 의해 금속과 세라믹을 접합시키는 것은 세라믹재료의 높은 용융점 때문에 많은 경우 실용적이지 못하다. 또한, 일반적인 금속과 금속 합금에 대한 세라믹의 비합침성은 간접결합법으로 브레이징법을 사용할 경우 반드시 극복해야 할 문제로 나타난다.^(1,3,5)

브레이징 조인트의 강도실험과 유한요소해석 등과 관련하여 세라믹-금속의 접합체에 대한 잔류 응력의 측정과 2차원 유한요소해석에 관한 연구 등이 수행되었으며,⁽⁷⁾ 압축 하중에 의한 브레이징 조인트에 작용하는 잔류 응력의 감소에 관한 연구 등도 수행되었다.⁽⁸⁾ 이 외에도 브레이징 조인트에 작용하는 잔류응력의 3차원과 2차원 유한요소해석에 관한 연구 등이 수행되었으며,⁽⁷⁾ 압축 하중에 의한 브레이징 조인트에 작용하는 잔류응력의 감소에 관한 연구 등도 수행되었다.⁽⁸⁾ 이 외에도 브레이징 조인트에 작용하는 잔류응력의 3차원 2차원 유한요소해석의 결과를 비교한 연구 등도 있다.⁽⁹⁾

일반적으로 브레이징 접합조인트는 상온보다는 고온에서의 사용을 목적으로 제작되는 것으로서 상온에서의 접합강도 특성과 잔류응력 해석보다는 고온에서의 접합강도의 변화 특성이 더 중요하다.

본 연구에서는 Cusil ABA (63wt%Ag-35wt%Cu-2wt%Ti) 활성 브레이징 금속을 사용하여 접합온도 860 °C, 접합시간 20 min, 활성 브레이징 금속의 두께 0.15 mm, 진공(10^{-5} Torr)의 조건으로 질화규소와 탄소강을 접합한 4점 굽힘실험용 시험편을 제작하였으며, 상온에서 500 °C까지 온도를 변화시켜가면서 접합조인트의 굽힘강도를 측정하였

다. 그리고, 3차원 유한요소법을 활용하여 접합이후 온도변화에 따른 접합조인트 내부에 작용하고 있는 잔류 열응력의 변화를 계산하였고, 고온 접합강도에 대한 잔류 열응력의 영향을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 세라믹-금속 브레이징 조인트의 제작

4점 굽힘시험편의 제작을 위해 $3 \times 4 \times 20$ mm의 크기로 절단한 질화규소와 탄소강을 400, 800, 1200, 2000번의 SiC paper로 연마한 후, 탄소강은 $1 \mu\text{m}$ 알루미늄(Al_2O_3) 분말로 최종 연마하였고, 질화규소는 $1 \mu\text{m}$ 페라이트(Fe_2O_3) 분말로 최종 연마하였다. 그리고, 표면 연마후 재료에 남아있는 잔류응력을 제거하기 위해 10^{-5} Torr의 진공 중에서 탄소강은 500 °C에서 5시간, 질화규소는 1200 °C에서 5시간 동안 균질화 처리를 하였다. 그리고, 이와 같이 균질화 처리된 시편은 아세톤으로 초음파 세척한 후 건조시켜 접합하였다.

브레이징 합금은 일반적으로 저융점의 합금을 만드는 Cu, Ag, Ni 등의 공정합금(eutectic alloy)을 모재로 하여, Ti, Zr, Cr 등과 같은 활성원소를 첨가하여 세라믹과의 반응을 촉진시키도록 조성된 합금이다. 본 실험에서 사용한 합금도 이러한 종류의 하나로서 Ag-Cu 공정 조성에 Ti가 소량(2wt%) 첨가된 것으로 Cusil ABA라는 상품명으로 잘 알려져 있는 제품이다. 이 제품의 특성들은 Table 1에 나타나 있다.

브레이징에 의한 접합공정은 Table 2에 나타난 것과 같이 텅스텐을 발열체로 하는 진공로에서 약 10^{-5} Torr의 진공조건에서 860 °C의 접합온도와 20분 동안의 접합시간으로 진행되었다. 승온속도는 600 °C까지는 10 °C/min으로, 600 °C에서 접합온도까지는 3 °C/min로 하였으며, 냉각속도도 각각의 승온속도와 같게 하였다.

2.2 고온굽힘실험

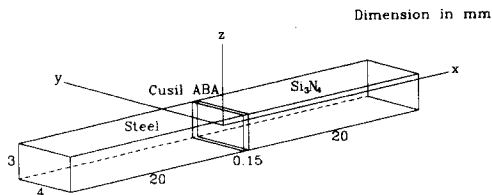
위와 같은 조건의 접합공정에 의해 제작된 질화규소/탄소강의 브레이징 접합조인트의 형상은 Fig. 1과 같다. 위와같이 제작된 4점 굽힘용 시험편은 고온 실험용 로가 장착된 정적 만능시험기인 Instron 4206 모델을 사용하여 4점 굽힘시험을 수행하였으며, Table 3에는 고온 굽힘강도실험에 사용된 지그의 규격과 고온 설정온도가 나타나 있다.

Table 1 Properties of cusil ABA filler metal

Nominal composition	63wt%Ag–35wt%Cu–2wt%Ti
Liquidus temperature	815 °C
Solidus temperature	780 °C
Density	9.8 g/cm ³
Thermal conductivity	180 W/mK
Coefficient of thermal expansion	18.5 × 10 ⁻⁶ /K
Electrical resistivity	44 × 10 ⁻⁹ /Ω m
Electrical conductivity	23 × 10 ⁻⁶ /Ω m
Young's modulus	83 GPa
Poisson's ratio	0.36
Yield strength	271 MPa
Ultimate tensile strength	346 MPa
Elongation(2 in. gate section)	20%
Hardness	1100 MPa

Table 2 Configuration of brazing joint and fabrication

Ceramic	Silicon nitride
Metal	0.2% Carbon steel
Filler metal	Cusil ABA (63wt%Ag–35wt%Cu–2wt%Ti)
Thickness of filler metal	0.15 mm
Bonding temperature	860 °C
Bonding time	20 min
Environment	Vacuum (10 ⁻⁵ Torr)

**Fig. 1** Silicon nitride/steel brazed joint for four point bending test

고온 굽힘실험 결과로써 온도에 대한 굽힘하중의 그래프가 Fig. 2에 나타나 있다. 300 °C까지 온도가 증가할수록 굽힘하중이 증가하다가 그 이상의 온도

Table 3 Test temperature and configuration for four point bending test

Test temperature (°C)	25, 100, 200, 300, 400, 500
Wide jig span	30 mm
Narrow jig span	10 mm

에서는 다시 감소하는 현상을 볼 수 있다.

Fig. 2의 굽힘하중에 대한 값을 선형 탄성변형을 가정한 식 (1)을 이용하여 굽힘강도로 환산하면

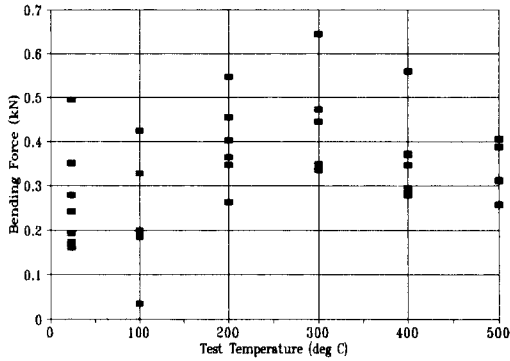


Fig. 2 Flexural load distribution at the high temperature

Fig. 3과 같이 표시된다.

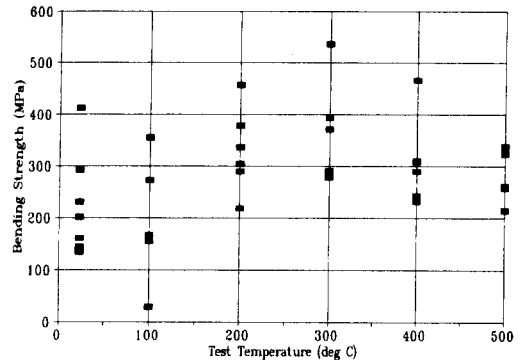
$$\sigma_b = \frac{3F_{max}(L-l)}{2wt^2} = 833.3 \times 10^3 \cdot F_{max} \quad (1)$$

여기서, F_{max} 은 최대 굽힘하중, L 은 넓은 하중 지지부의 길이, l 은 좁은 하중 지지부의 길이, w 은 굽힘시험편의 폭 그리고 t 는 굽힘시험편의 두께를 나타낸다.

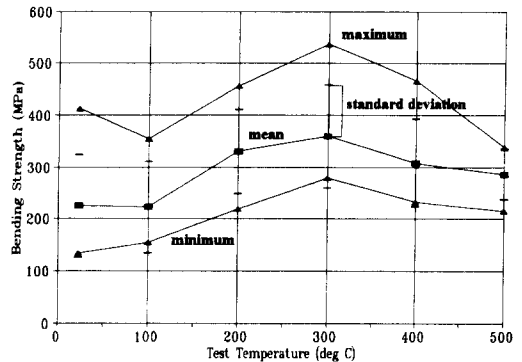
Fig. 3(a)의 결과를 정규 분포를 가정한 확률적인 값으로 환산하여 표시한 Fig. 3(b)를 살펴보면 평균값의 변화를 통해 300 °C 까지는 굽힘강도가 점차 증가하다가 그 이상의 온도에서 다시 감소하는 현상을 쉽게 살펴볼 수 있다.

2.3 3차원 유한요소해석

유한요소법을 이용하여 브레이징 접합조인트를 해석하는 많은 경우에 문제를 단순화시켜 2차원 모델을 구성하여 해석을 수행하게 된다. 이러한 2차원 모델링의 경우에는 평면응력 또는 평면변형률의 가정이 포함됨으로써, 접합조인트에 대한 실제적인 해석이 되지 못하고 평면응력 또는 평면변형률의 가정이 허용되는 국부적인 부분에 한정하여 해석의



(a) Test data



(b) Mean and standard deviation of the test data(a)

Fig. 3 Bending strength distributions with respect to the test temperatures

결과를 적용할 수 있게 된다.

특히 4점 굽힘시험용 시편과 같은 경우 2차원 유한요소해석의 결과로는 모서리 부분의 응력을 확인할 수가 없으며, 3차원 유한요소해석에 따르면 잔류열응력이 매우 크게 나타난다. 이러한 결과는 X-선 촬영에 의한 잔류열응력의 측정결과와도 일치한다.⁽⁹⁾

3차원 유한요소해석을 수행하기 위한 브레이징

Table 4 Typical mechanical properties of the constituents of the brazing joint

	Silicon nitride	0.2% Carbon steel	Cusil ABA Brazing alloy
Elastic modulus(GPa)	304	210	83
Poisson' ratio	0.27	0.3	0.36
Coefficient of thermal expansion	$3.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	$18.5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

Table 5 Strength ratio of materials to that of room temperature

0.2% Carbon steel		Cusil ABA brazing alloy	
25 °C	100 %	25 °C	100 %
500 °C	80 %	220 °C	75 %
700 °C	30 %	280 °C	50 %

접합조인트의 구성 재료의 기본적인 재료 물성은 Table 4와 같다.

그리고, 온도에 따른 재료의 기계적 성질의 변화 정도는 문헌 자료에 근거하여 다음과 같이 모델링 되었다.⁽⁶⁾ Table 5은 탄소강과 브레이징재의 고온 강도의 변화 정도를 나타낸 것이다.

Fig. 4는 4점 굽힘용 브레이징 접합조인트의 3차원 유한요소해석을 위한 모델을 나타내고 있다. 실제적인 접합조인트에서 잔류열응력은 접합계면 부분에서만 크게 발생하게 되고 나머지 부분에서는 상대적으로 매우 작게 나타난다. 따라서, 해석의 범위는 세라믹과 금속의 접합계면으로부터 각각 5 mm이내의 구간과 브레이징재를 포함하는 것으로 하였으며, y축에 대해서는 시편의 중심에 대해서 대칭적인 응력상태를 나타내기 때문에 1/2만을 해석의 범위에 포함시켰다. 반면, 굽힘하중에 대해 접합조인트에 작용하는 응력분포를 계산하고, 해석적인 방법으로 Fig. 3과 같은 온도에 따른 굽힘강도의 변화를 예측하는 것이 가능한지 알아보기 위

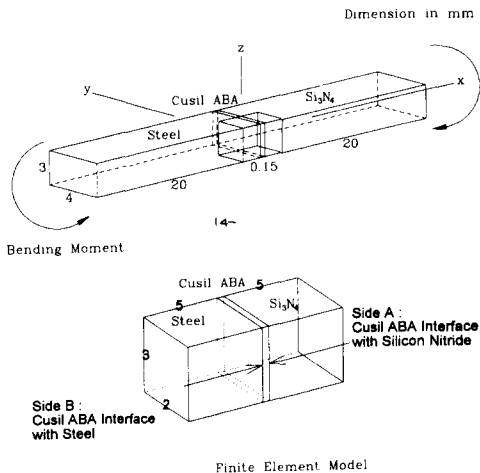


Fig. 4 Construction of finite element model of the brazed joint

해 z축에 대해서는 전 구간을 해석의 영역에 포함시켰다. 그러나, 온도에 따른 접합재의 계면 강도에 대한 자료가 부족하여 해석적인 방법으로 굽힘 강도를 계산할 수는 없었다.

해석에 사용된 유한요소 프로그램은 Swanson Analysis System사의 ANSYS 5.0a를 사용하였으며, 모델링을 위해 사용한 요소는 요소 내부에 추가적인 자유도를 가지는 solid45를 사용하였다.⁽¹⁰⁾

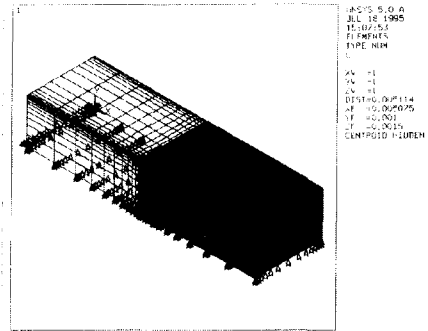


Fig. 5 Finite element mesh and applied boundary conditions

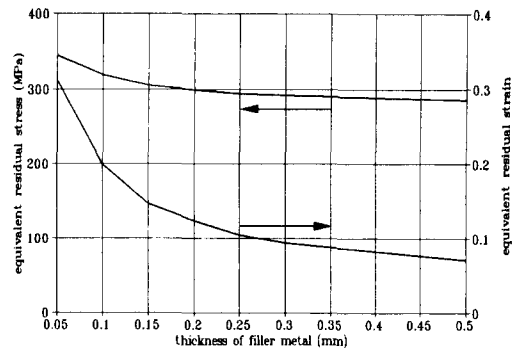


Fig. 6 Maximum equivalent residual stress and strain w.r.t. the thickness of the filler metal

Fig. 5는 ANSYS 5.0a를 사용하여 모델링한 요소의 분포와 해석을 위해 적용된 경계조건을 보여주며, 4675개의 절점과 3840개의 요소와 3개의 재료 특성으로 구성되어 있다.

Fig. 6은 4점 굽힘용 브레이징 접합조인트와 동

일한 크기의 시편에 대해 브레이징재의 두께를 변화시켰을 경우에 대해 접합온도와 상온과의 온도차에 의한 브레이징재에 작용하는 최대값으로서 잔류 열응력 및 변형률의 크기를 상당 응력($\bar{\sigma}$, equivalent stress) 및 상당 변형률($\bar{\epsilon}$, total equivalent

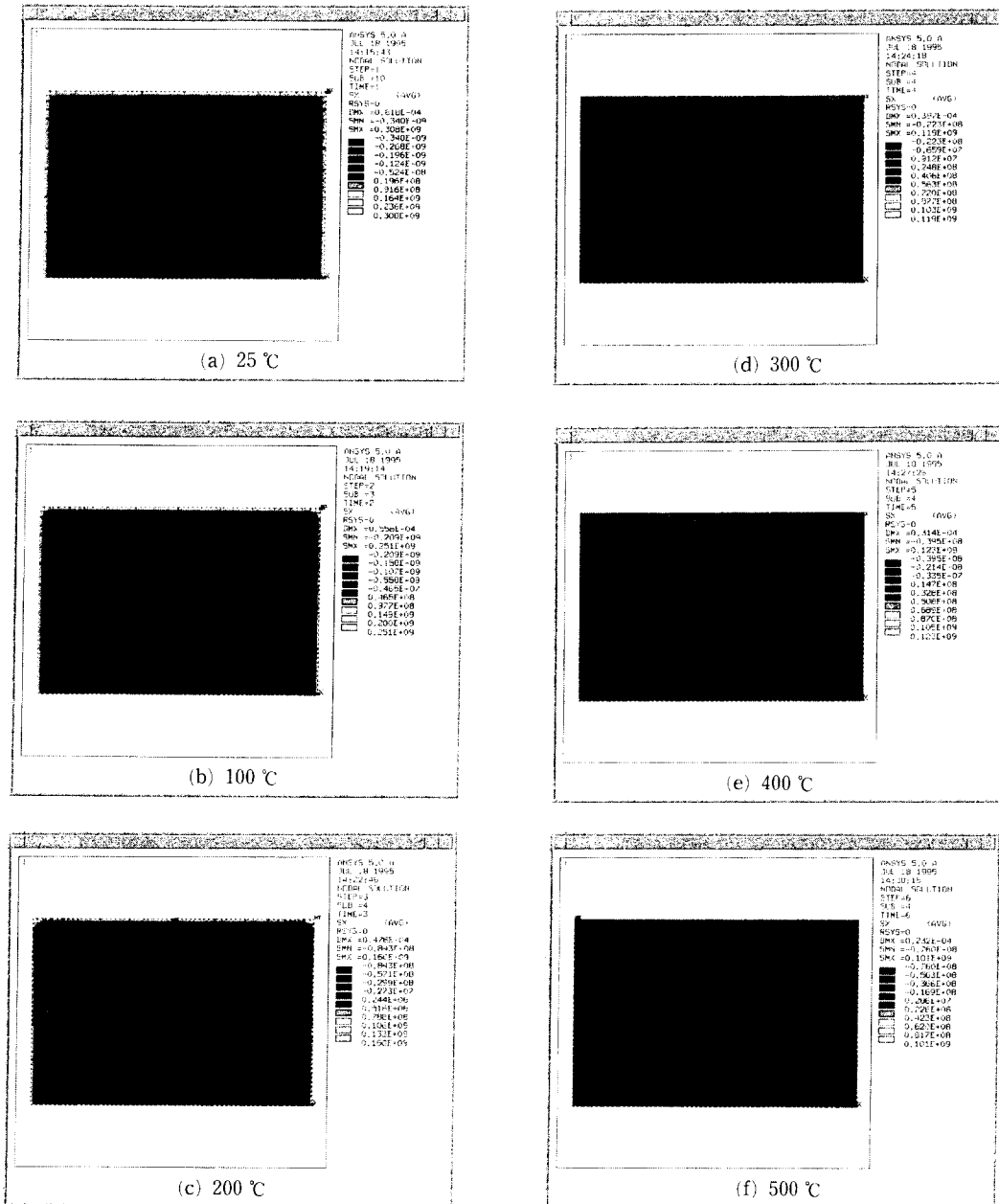


Fig. 7 Residual normal stress distributions in the interfaces of cusil ABA with Si₃N₄ at the different temperatures

strain)로 환산하여 나타낸 것이며, 식 (2)와 같이 최대값은 온도에 따라 세라믹과의 접합계면 또는 표면된다. 결과적으로 상당 응력과 상당 변형률의 금속과의 접합계면에서 발생하는 것으로 나타났다.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) \right\}}$$

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{9} \cdot \left\{ (d\varepsilon_x - d\varepsilon_y)^2 + (d\varepsilon_y - d\varepsilon_z)^2 + (d\varepsilon_z - d\varepsilon_x)^2 + 6 \cdot (d\gamma_{xy}^2 + d\gamma_{yz}^2 + d\gamma_{zx}^2) \right\}} \quad (2)$$

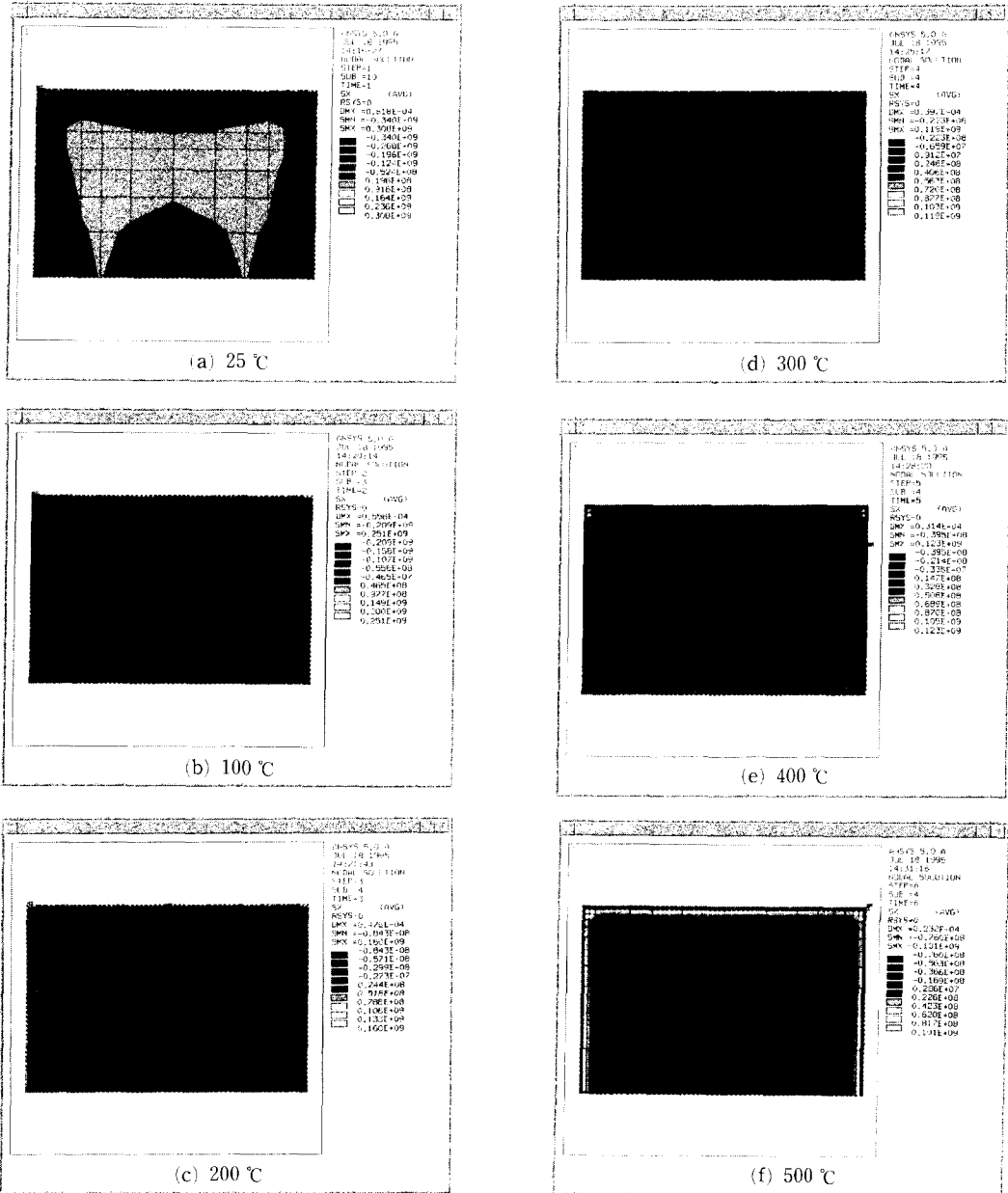


Fig. 8 Residual normal stress distributions in the interfaces of cusil ABA with steel at the different temperatures

해석에 의한 결과로서는 브레이징재의 두께가 증가함에 따라 상당 응력의 크기는 감소하는 경향으로 나타났으며 점차 완만한 기울기를 보였다. 해석적으로는 브레이징재의 두께가 두꺼울수록 낮은 응상태를 나타내지만, 실험적으로는 브레이징재의 두께가 두꺼워지면 브레이징재가 용융상태에서 흘러 내리는 현상이 발생하기 때문에, 제조상의 제한으로 인하여 브레이징재의 두께의 한계가 결정되어 질 수 있다.

실험에서 사용한 조건인 두께가 0.15 mm 브레이징재의 경우에 대해 접합공정에 따른 냉각 과정과 고온에서의 잔류응력의 변화과정을 3차원 유한요소 해석에 의해 살펴보았다. 온도에 따른 상대적인 비교를 위해 잔류응력의 크기는 브레이징재의 양쪽 접합면에서의 응력상태로서 판단하였으며, 이는 실험결과 거의 모든 접합조인트의 파괴가 접합경계면에서 발생하였기 때문이다.

Fig. 4에서와 같이 A면은 질화규소와의 접합면을, B면은 탄소강과의 접합면을 나타낸다. Fig. 7과 8은 브레이징재의 양쪽 접합면에서의 수직방향으로의 응력성분을 나타내며, 각각 A면에서와 B면에서의 응력분포를 나타내고 있다. 3차원 해석에 따른 접합면에서의 응력분포의 형태는 접합면의 가장자리 부분에서 매우 큰 응력 집중현상이 나타난다는 것이다. 특히, 저온에서 질화규소와의 경계면에서는 모서리 부분의 응력이 매우 큰 인장 응력으로 나타나기 때문에 접합조인트의 취약부로서 작용하게 된다. 반면, 탄소강과의 경계면에서는 모서리 부분의 응력이 큰 압축 응력으로 나타나기 때문에 경계면에서의 파괴가능성이 감소하게 된다. 경계면에 작용하는 잔류응력의 분포 특성은 넓은 면적에 해당하는 내부에 작용하는 수직 방향의 응력성분과 가장자리와 모서리 부분에 작용하는 수직방향의 응력성분이 서로 반대의 값을 가지고 경계면에서의 힘의 평형을 이루고 있기 때문에 상대적으로 면적이 좁은 가장자리와 모서리 부분에서 매우 큰 응력 값을 나타내게 되고, 특히 이 값이 인장 응력으로 나타나는 경우에는 경계면에서의 파괴 가능성이 매우 커진다고 볼 수 있게 된다.

Fig. 9는 Fig. 7과 8의 응력분포로부터 가장 수직 응력성분이 크게 작용하는 모서리 부분의 응력값을 온도에 대해 표시한 것이다. 접합부의 가장자리에서 집중된 응력은 접합조인트의 온도가 증가함에 따라 점차 감소하게 된다. 이는 브레이징 공정에

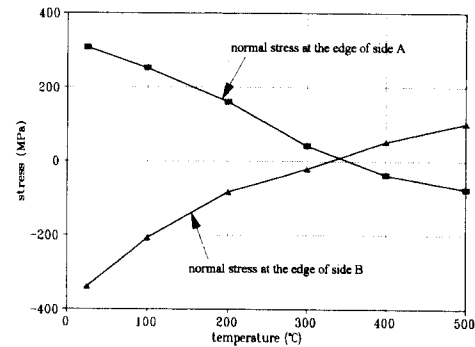


Fig. 9 Residual normal stress at the edges of the two sides A and B with respect to the temperatures

의한 접합조인트의 잔류응력의 크기는 온도가 증가함에 따라 점차 감소하기 때문에 오히려 보다 안정적인 수 있다. 즉, 질화규소와의 경계면의 가장자리에서는 인장 응력이 감소하게 되고 탄소강과의 경계면의 가장자리에서의 압축 응력 또한 감소하게 됨을 의미한다. 해석에 의하면 감소 현상으로 인해 접합조인트의 온도가 350 °C인 지점에서 최소값을 나타내었다. 그 이상의 온도에서는 오히려 상온의 초기 상태와는 반대로 질화규소와의 경계면의 가장자리에서는 압축 응력이 탄소강과의 경계면의 가장자리에서는 인장 응력이 발생하였다. 그러나, 온도 상승으로 인한 브레이징재의 재료 강도의 저하에 의한 영향때문에 또한 고려해야만 하지만 경계면에 대해 수직 방향의 응력 성분이 가장 작게 작용하는 온도인 350 °C보다 약간 낮은 온도인 300 °C에서 접합강도가 가장 우수하게 나타난 것을 알 수 있다.

3. 결 론

(1) CuSi1 ABA 브레이징재를 이용하여 질화규소와 탄소강의 접합조인트를 제작하여 상온에서 500 °C까지 온도를 변화시키면서 4점 굽힘시험을 수행하였으며, 300 °C에서 가장 우수한 굽힘강도를 얻을 수 있었다.

(2) 3차원 잔류응력 해석결과, 상온에서의 잔류 열응력은 접합면의 가장자리 부분에서 내부와는 반대의 성분으로 매우 크게 나타났으며, 수직 응력의 크기는 온도가 증가함에 따라 점차 감소하여 350 °C 부근에서 최소로 되었다.

(3) 실험 및 해석결과들로부터 브레이징 접합조

인트의 접합강도는 접합계면에서의 수직 잔류응력 성분이 작을수록 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소에서 지원한 기초 연구 사업의 연구 결과입니다.

참고문헌

- (1) Peteves, S. D., 1989, *Designing Interfaces for Technological Applications*, Elsevier Applied Science, pp. 49~123.
- (2) Schwartz, Mel M., 1990, *Ceramic Joining*, ASM International, pp. 17~40.
- (3) 岩本信也, 1991, “セラミックス接合工學,” 日刊工業新聞社, pp. 239~279.
- (4) Waxhtman, John B., Jr., 1992, *Structural Ceramics-Tretise on Materials Science and Technology 29*, Academic Press, Inc., pp. 161~194.
- (5) Humpston Giles and Jacobson, David M., 1993, *Princlples of Soldering and Brazing*, ASM International, pp. 181~228.
- (6) ASM International Handbook Committee, 1990 *Properties and Selection : Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials/Metals Handbook Vol. 2* 10th edition, ASM International, pp. 699~719.
- (7) 박영철, 오세욱, 허선철, 조용배, 1994, “Si₃N₄/SUS304 접합재의 잔류응력 및 강도 평가,” 대한기계학회 논문집, 제18권, 제1호, pp. 101~112.
- (8) 김원배, 1995, “금속/세라믹 브레이징 접합부의 잔류응력 해석과 잔류응력 감소에 관한 연구,” 박사학위논문, 정밀공학과, 한국과학기술원 pp. 32~94.
- (9) 허장욱, 小林英男, 1995, “세라믹/금속 접합잔류응력 3차원과 2차원 유한요소해석의 비교,” 대한기계학회 춘계학술대회 논문집(Ⅰ), pp. 656~661.
- (10) Swanson Analysis Systems, Inc., 1992, *ANSYS User's Manual for Revision 5.0*, Vol. 3 Elements, Swanson Analysis Systems, Inc., pp. 4.239~4.243.