Journal of the Korean Ceramic Society
Vol. 33, No. 2 pp. 127~134, 1996.

다층중간재를 사용한 질화규소/스테인레스 강 접합체의 잔류응력 해석 및 기계적 특성

박상환 · 김태우* · 최영화
한국과학기술연구원 세라믹스연구부
*국민대학교 기계공학과
(1995년 1월 21일 접수)

FEM Residual Stress Analysis and Mechanical Properties of Silicon Nitride/Stainless Steel Joint with Multi-Interlayer

Sang-Whan Park, Tae-Woo Kim* and Young-Wha Choi
Div. of Ceramics, Korea Institute of Sci. and Tech.
*Dept. of Mechanical Eng., Kook-min Univ.
(Received January 21, 1995)

요 약

활성금속 브레이징 접합된 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 Cu 및 Mo를 적층한 다층중간재의 두께 및 구조에 따라 접합체에 발생되는 잔류응력의 변화를 유한요소법을 사용하여 계산하였으며, Cu 및 Mo로 구성된 다층중간재의 구조변화에 따른 Si_3N_4/S.S.316 접합체의 상온 굽힘강도의 변화를 조사하였다. Cu 및 Mo로 구성된 다층중간재의 사용은 Si_3N_4/S.S.316 접합체의 질화규소에 발생되는 최대잔류응력의 크기를 현저히 감소시켰으며, 접합체내 최적 Cu/Mo 중간재 두께비를 갖는 다층 중간재를 사용한 접합체에서는 잔류응력의 재분포가 일어나 중간재로 사용된 Mo에 큰 크기의 인장방향의 잔류응력이 발생되었다. Cu 및 Mo로 구성된 다층 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 접합체의 질화규소에서 발생되는 잔류응력의 크기 뿐만 아니라 접합체내의 잔류응력의 분포가 접합체의 굽힘강도 및 Weibull 계수를 결정하는 주요 요인으로 나타났다.

ABSTRACT

The thermal residual stresses were estimated for brazed Si_3N_4/S.S.316 joints with Cu/Mo multi-interlayers using FEM, and their bending strengths at room temperature were measured for various interlayer configurations. The Cu, Mo multi-interlayer decreased the maximum residual stress in Si_3N_4, and caused the residual stress redistribution resulting in the high residual stress at Mo interlayer. The stress distribution in the joints as well as the maximum residual stress in silicon nitride were found to be main factors for determining bending strengths and Weibull modulous of the joints. The bending strength of the brazed Si_3N_4/S.S.316 joints with specific Cu, Mo multi-interlayer system were found to be above 400 MPa.

***Key words**: Ceramic-metal joining, Brazing, Residual stress, Joint strength, Multi-interlayer*

1. 서 론

세라믹스/금속 접합기술은 내열성, 경량성, 내부식성 등 우수한 고유 특성을 갖는 세라믹스의 응용을 확대시킬 수 있는 핵심기술로 알려져 있으며, 접합강도 및 신뢰도가 높은 접합기술을 개발하기 위하여 많은 연구 개발이 이루어져 왔다[1]. Si_3N_4 및 SiC 등 비 산화물계 세라믹스와 금속간의 접합에 있어서는 활성금속 브레이징 방법이 신뢰도 및 경제성이 높고 양산공정에 적합한 접합기술로 알려져 있다[2].

활성금속 브레이징 방법에 의한 금속과 세라믹스간의 접합은 고온에서 계면반응에 의하여 이루어지기 때문에, 금속과 세라믹스의 열적, 기계적 특성의 차이가 접합체의 기계적 강도를 감소시키는 것으로 알려져 있다[3]. 세라

믹스/금속 접합체의 접합강도를 결정하는 요인은 브레이징시 형성되는 접합계면 층의 기계적 특성 및 접합체에 발생되는 잔류응력의 크기로 알려지고 있다[3,4]. 이제까지는 세라믹스/금속 접합기술에 관한 연구가 형성되는 접합계면의 분석 및 그에 따른 접합체의 기계적 특성 조사에 관하여 많이 이루어져 왔으나, 세라믹스/금속 접합체의 실제 응용에 있어서 가장 절실히 요구되는 것은 접합체에 발생된 잔류응력의 감소를 위한 접합기술의 개발이다.

세라믹스/금속 접합체에서는 접합후 냉각시 금속과 세라믹스의 열팽창계수의 차이로 인하여 접합부위에 불균일한 변형이 발생될 뿐 아니라, 탄성계수의 차이로부터 세라믹스에 국부적인 인장방향의 잔류응력 집중이 발생되어 접합체의 접합강도 및 신뢰도를 감소시키게 된다[4]. 따라서, 신뢰도 및 접합강도가 높은 접합체를 개발하기 위해서는 접합체내에 발생되는 잔류응력의 크기를 최소화하여야 하며, 이를 위하여 중간재 및 접합부위의 설계기술 개발이 요구된다.

연성금속 중간재를 완충층으로 사용하여 연성금속의 소성변형으로 접합체에 발생되는 잔류응력을 완화시키는 방법이 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다[5,6]. 그러나, 아직까지는 연성 중간재 또는 저열팽창 중간재에 의한 잔류응력 완화 기구는 알려져 있지 않으며, 접합체에 발생되는 잔류응력을 효과적으로 완화시킬 수 있는 최적 중간재 구조 설계 기술은 개발되어 있지 않다.

본 연구에서는 활성금속 브레이징 방법으로 접합된 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 Cu 및 Mo를 적층한 다층중간재의 구조변화에 따른 Si_3N_4/S.S.316 접합체내에서의 잔류응력의 크기 및 분포 변화를 유한요소법을 사용하여 조사하였다. 또한 Cu 및 Mo 중간재의 두께 및 다층중간재 구조변화에 따른 Si_3N_4/S.S.316 접합체의 굽힘강도 및 Weibull 계수를 조사하여 접합체에서 발생되는 잔류응력의 크기 및 분포가가 접합체의 기계적 특성에 미치는 영향에 관하여 조사하였다. 또한, 이들 결과로 부터 굽힘강도 및 신뢰도가 높은 Si_3N_4/S.S.316 접합체를 제조하기 위해 요구되는 중간재의 최적 구조에 관하여 알아보았다

2. 실험방법

2.1. 유한요소법에 의한 접합체내 잔류응력분석

본 연구에서 사용한 접합 모재는 Si_3N_4(GTE사, PY6)와 스테인레스 스틸 316(삼미 종합특수강)이었으며, 중간재는 Cu 및 Mo를 적층한 다층중간재를 사용하였다. 또한,

Table 1. Mechanical Properties for Materials used in the Joint

Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Thermal expansion coefficient (10^{-6}/℃)	Yield strength (MPa)
Si_3N_4	300	0.22	3.2	---
Cu	120	0.37	17.7	70
Stainless Steel 316	150	0.25	14.0	240
Mo	320	0.25	5.7	565
Cusil ABA (Ag-35wt.% Cu-2wt.%Ti)	83	0.36	18.5	271

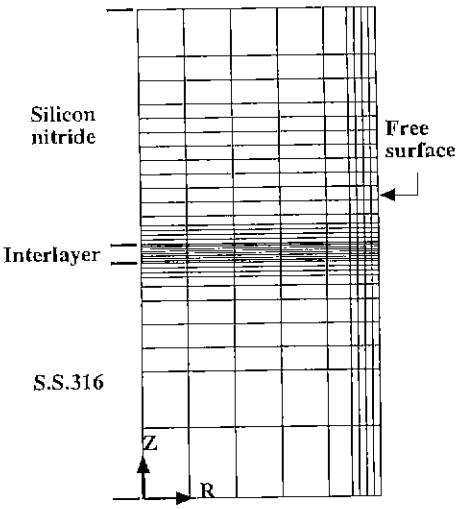

Fig. 1. Typical finite element mesh used for the ceramic/metal joint.

활성금속 브레이징 합금은 GTE Wesgo사의 50 μm 두께인 Cusil ABA(Ag-35wt.%Cu-2wt.%Ti)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 소재의 특성은 Table 1에 요약되었다.

질화규소/스테인레스 스틸 접합체에서 접합후 냉각시 발생되는 잔류응력을 예측하기 위하여, 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS[7]를 사용하여 계산하였다. 접합체내에 발생되는 최대 잔류응력의 크기는 접합부위의 크기 및 형상에 따라 다르게 나타나지만, 잔류응력의 크기 변화와

발생 위치는 유사하게 나타나는 것으로 알려져 있다[8]. 본 연구에서는 접합조건에 따라 접합체에 발생되는 잔류응력의 상대적 크기 변화 및 분포에 관하여 비교 분석하는 것이 목적이기 때문에 모재의 지름이 10 mm, 높이가 각각 5 mm인 원통형 접합체에서 축단면에 대한 2차원적인 계산을 하였다. Fig. 1은 접합체의 유한요소 분할도를 보여주며, 잔류응력의 변화가 클 것으로 예상되는 접합계면 부위와 모재의 자유표면 부근에서는 작은 크기의 요소를 사용하였다. 유한요소법에 의한 잔류응력은 접합후 냉각시 각 부분이 균일하게 냉각되며 접합체를 구성하는 각 소재의 온도 변화에 따른 열, 기계적 특성의 변화가 없다는 가정하에서 계산되었다. 또한, 접합시 형성되는 계면 반응층 또는 브레이징 합금은 두께가 얇기 때문에 유한요소 계산에서는 다루어지지 않았다. 중간재로 사용된 연성금속인 구리의 소성변형에 의한 접합체에 발생되는 잔류응력의 완화효과를 고려하기 위하여, 탄소성해석으로 잔류응력을 계산하였다. 유한요소법에서 다룬 중간재의 구조는 Cu(0.2 mm) 또는 다층 중간재형태인 Cu(0.2 mm)/Mo(0.4 mm) 및 Cu(0.2 mm)/Mo(0.4 mm)/Cu(0.2 mm)이었으며 괄호안의 수치는 사용한 중간재의 두께이었다.

2.2. 시편제작 및 접합체의 기계적 특성측정

접합체에 대한 굽힘강도 측정용 접합체 제조에 사용된 질화규소 및 스테인레스 스틸 시편의 크기는 각각 3×4×15 mm 크기였으며, 사용된 Cu 및 Mo 중간재의 단면의 크기는 4×5 mm이고 두께는 0.1~1.0 mm이었다. 질화규소 접합부위의 표면은 거칠기가 0.5 μm 되게 연마를 하여 사용하였으며, 중간재 및 스테인레스 스틸은 표면의 산화피막을 제거하기 위하여 표면 연마하여 사용하였다. 접합체 시편은 Si_3N_4/브레이징 합금/중간재 A/브레이징 합금/중간재B/브레이징 합금/S.S.316의 순서로 위치시켜 제조하였다. 활성금속 브레이징 접합 공정은 Astro사의 vacuum furnace(Model 1100-2560-W2)을 사용하여 10^{-5} torr 이하의 진공 분위기하 850℃에서 10분간 이루어졌으며, 접합시 접합계면에 수직한 방향으로 250 Pa의 압력을 가하였다. 브레이징된 접합체의 냉각속도는 5℃/min 이하로 일정하게 유지하였다.

접합체의 굽힘강도는 Instron(Model 4200)을 사용하여 최소한 5개의 시편에 대하여 4-점 굽힘강도로 측정하였으며, 측정시 사용된 cross head speed는 0.5 mm/mn., upper span은 10 mm, lower span은 20 mm이었다. 4-점 굽힘강도 시험은 대기중 상온에서 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유한요소법에 의한 잔류응력 해석

브레이징된 Si_3N_4/S.S.316 접합체의 변형 형상과 접합체에 발생되는 최대 주응력(maximum principal stress)의 크기로 나타낸 최대 잔류응력의 분포는 Fig. 2(a)에서 보여주는 것과 같다. 접합계면 부근의 Si_3N_4 중앙부위에서 발생되는 최대 잔류응력은 압축방향이었으며, Si_3N_4의 자유표면으로 접근될수록 발생되는 최대 잔류응력은 인장방향으로 나타났다. Si_3N_4/S.S.316 접합체에서는 접합계면에서 약 0.1 mm 떨어진 Si_3N_4의 자유표면 근처에서 접합체내의 최대 잔류응력이 인장방향으로 발생되었으며, 잔류응력 등고선의 높은 밀도로 부터 이부위에 응력집중이 크게 나타남을 알 수 있다 Fig. 2(b)에서 보여주는 것과 같이 항복강도가 낮은 연성금속인 Cu 중간재를 적용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 잔류응력의 분포와 최대 잔류응력이 발생되는 위치는 중간재를 사용하지 않은 Fig. 2(a)의 접합체에서와 유사하였으나, 접합계면 부위에서 불연속적인 변형형태가 나타나고 있다. 발생된 최대 잔류응력 크기의 감소 및 불연속적인 변형모습은 브레이징후 냉각시 발생된 잔류응력이 Cu의 소성변형에 의하여 인접모재의 접합부위에서의 응력이 완화되어 모재의 변형이 감소되기 때문으로 생각된다.

연성금속인 Cu와 열팽창계수가 작은 Mo를 적층한 중간재를 사용한 Si_3N_4/Cu/Mo/S.S 316 접합체에서 발생되는 잔류응력의 분포는 Fig. 2(c)에 보여준다. Si_3N_4/Cu/Mo/S.S.316 접합체의 접합계면부위에서 나타나는 잔류응력의 분포는 Cu 중간재를 사용한 접합체에서와는 달리 인장방향의 최대 잔류응력이 중간재내 Mo에서 발생되었다. 또한, Si_3N_4에서도 작은 크기의 인장방향의 잔류응력이 발생되는 것으로 나타났으며, Fig. 2(b)의 Cu 중간재를 사용한 접합체와 비교하여 발생된 잔류응력의 크기가 증가되었다. Mo에 비하여 항복강도가 낮은 Cu 중간재는 인접한 Si_3N_4과의 사이에서 발생되는 잔류응력을 자체의 소성변형으로 상당히 흡수할 수 있으나, Mo는 인접한 Cu 및 스테인레스강과의 사이에서 발생되는 잔류응력을 Cu 만큼 효과적으로 흡수하지 못하기 때문에 중간재 Mo에 인장방향의 최대 잔류응력이 발생되는 것으로 생각된다. Fig. 2(d)는 Si_3N_4/Cu/Mo/Cu/S.S.316 접합체에서 발생되는 잔류응력의 분포도를 보여주며, Fig. 2(a), (b), (c)에 비하여 응력분포의 변화가 복잡하여 4개의 응력등고선으로 분포를 나타내었다. 접합체에서 최대 인장방향의 잔류응력은 Si_3N_4와 인접한

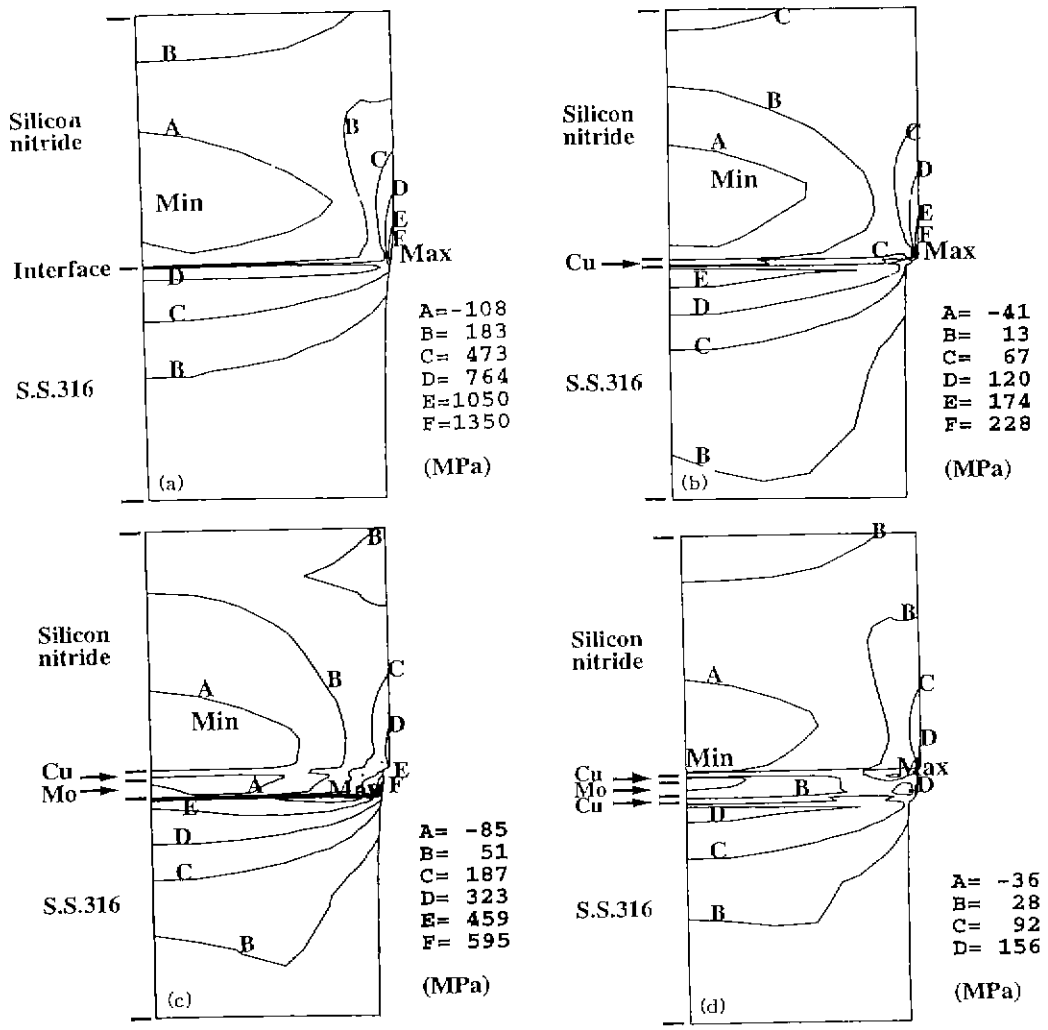

Fig. 2. Maximum principal stress contour for (a) Si_3N_4/S.S.316 joint without interlayer, (b) Si_3N_4/Cu (0.2 mm)/S.S. 316 joint, (c) Si_3N_4/Cu (0.2 mm)/Mo (0.4 mm)/S.S.316 joint and (d) Si_3N_4/Cu (0.2 mm)/Mo (0.4 mm)/Cu (0.2 mm)/S.S.316 joint brazed for 10 min. at 850℃ (+: tension, −: compression).

Cu 중간재와 Mo 중간재의 경계부분에서 발생되었으며, Si_3N_4에서도 유사한 크기의 잔류응력이 발생되는 것으로 나타났다. Cu 또는 Cu/Mo을 중간재로 사용한 접합체와 비교하여 Cu/Mo/Cu 중간재를 사용한 접합체에서는 접합모재인 Si_3N_4와 S.S.316의 양쪽에 위치한 Cu 중간재의 자체의 소성변형이 열팽창계수의 차이로 인하여 발생되는 잔류응력을 완화시켜 Si_3N_4에 발생되는 인장방향의 잔류응력의 크기를 가장 효과적으로 감소시킬 수 있었다고 생각된다.

Fig. 3은 접합체의 자유표면에서 발생되는 축방향 잔류응력의 변화를 중간재의 구조에 따라 접합체 금속모재로부터 접합계면에 수직방향에 대한 거리의 함수로 보여준다. 중간재를 사용하지 않은 접합체 및 Cu 중간재만을 사용한 접합체에서는 접합계면을 경계로 S.S.316에는 축방향 잔류응력이 압축응력으로 작용하며, 세라믹스에는 축방향 잔류응력이 인장응력으로 작용하여 접합계면을 경계로 응력방향의 변화를 보인다. Cu/Mo 및 Cu/Mo/Cu 다층중간재를 사용한 접합체에서는 S.S.316에는 축방향 잔류응력이 압축응력으로 나타나지만 Cu 및 Mo 중간재와 Si_3N_4에는 인장응력으로 나타났으며, Cu 중간재에서 보다는 Mo 중간재에서 더 큰 인장응력이 발생된다.

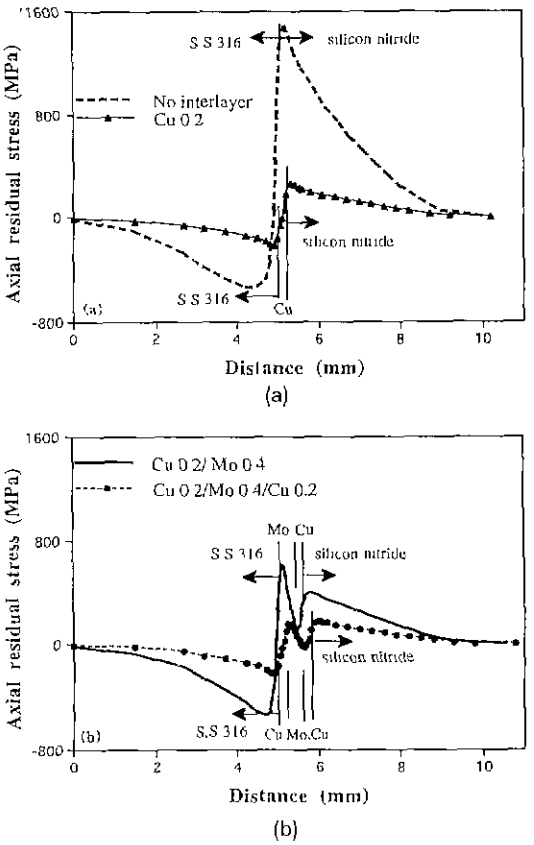

Fig. 3. Axial residual stress calculated by FEM with distance along the free surface in Si_3N_4/S.S.316 joint.
(a) without interlayer and with Cu (0.2 mm) interlayer and (b) with Cu (0.2 mm)/Mo (0.4 mm) and Cu (0.2 mm)/Mo (0.4 mm)/Cu (0.2 mm) interlayer. (+: tension, −: compression).

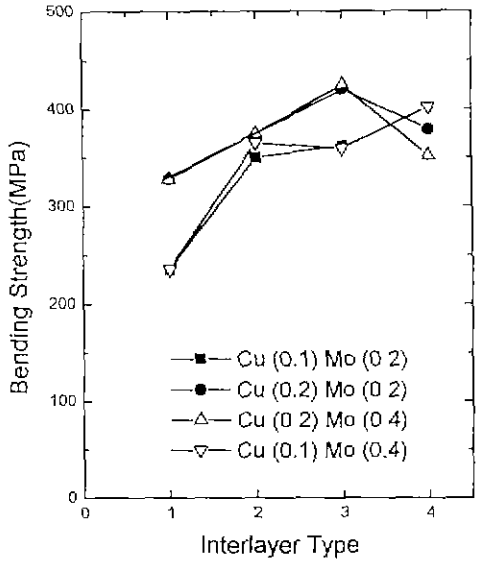

Fig. 4. 4-point bending strength of the Si_3N_4/multi-interlayer/S.S.316 joint as a function of multi-interlayer structure. Numbers in parenthesis indicate the thickness, in mm, of individual interlayer used.
1. Cu interlayer, 2. Cu/Mo interlayer, 3. Cu/Mo/Cu interlayer, 4. Cu/Mo/Cu/Mo/Cu interlayer.

Cu/Mo 중간재를 사용한 접합체에서는 Mo에서 Si_3N_4보다 더 큰 최대 잔류응력이 나타났으나, Cu/Mo/Cu 중간재를 사용한 접합체에서는 Mo 및 Si_3N_4에서 발생되는 최대 잔류응력의 크기는 유사하게 나타났다. 따라서, Cu와 Cu/Mo 중간재를 사용한 접합체에서는 중간재를 사용하지 않은 접합체와 비교하여 세라믹스에 발생되는 최대 인장방향의 응력이 효과적으로 감소되었으며, Cu/Mo/Cu 중간재를 사용한 접합체에서 잔류응력의 감소 효과가 가장 크게 나타났다.

Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 발생되는 잔류응력의 크기 및 분포는 사용한 중간재의 두께 및 적층구조에 따라 다르게 나타났다. 연성 중간재만의 사용보다는 연성 중간재와 저열팽창 재료를 적층시킨 Cu/Mo 또는 Cu/Mo/Cu의 구조의 다층 중간재의 사용으로 질화규소에 발생되는 잔류응력의 크기의 감소 및 접합체내 발생되는 잔류응력을 재분포 시켜 접합체에 발생되는 최대 잔류응력이 중간재로 사용된 Mo에 발생되게 할 수 있었다.

3.2. 접합체의 기계적 특성

Fig. 4는 Cu 및 Cu/Mo 다층 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 중간재의 적층구조에 따라 5개 이상의 시편의 평균 굽힘강도의 변화를 보여준다. 중간재를 사용하지 않은 Si_3N_4/S.S.316 접합체의 굽힘강도는 170 ± 30 MPa 정도이었으나, Cu 및 Cu/Mo 다층 중간재의 사용은 접합체의 굽힘강도를 현저하게 증가시켰다. Cu 중간재의 두께가 0.1 mm인 Cu/Mo 다층중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 Mo 중간재의 적층은 접합체의 굽힘강도를 현저하게 향상시켰으나, 중간재 구조가 Cu /Mo/Cu 및 Cu/Mo/Cu/Mo/Cu로 적층 수가 증가됨에 따라 접합체 굽힘강도의 증가효과는 감소하였다. Cu 두께가 0.2 mm인 중간재 구조에서는 Mo 및 Cu의 적층층의 증가에 따라 접합체의 굽힘강도는 증가하였으나 Cu/Mo/Cu/Cu/Mo 중간재 구조를 사용한 접합체의 굽

힘강도는 감소하였다. 따라서, Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 Cu 중간재와 Mo의 적층은 접합체의 굽힘강도를 현저히 증가시켰으나, Cu/Mo 적층구조가 반복될수록 굽힘강도 증가효과는 감소되는 것으로 나타났다.

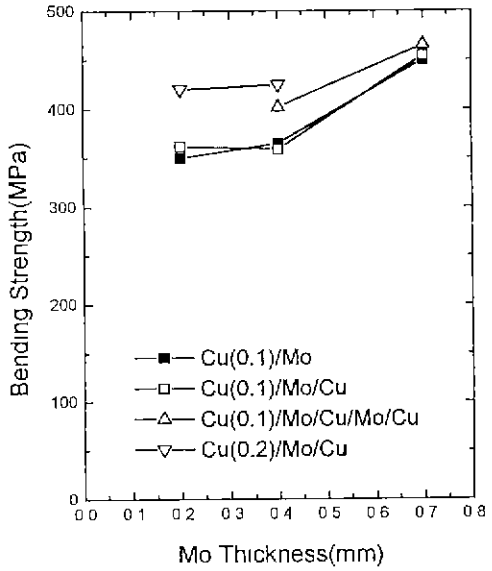

Fig. 5. 4-point bending strength of the Si_3N_4/interlayer/S.S.316 joint as a function of Mo interlayer thickness. Numbers in parenthesis indicate the thickness, in mm, of individual interlayer used.

Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 중간재 구조 변화에 따라 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 Cu/Mo 적층 중간재의 사용은 접합체의 질화규소에서 발생되는 인장방향의 잔류응력을 감소시키며, 발생되는 인장방향의 잔류응력이 중간재로 사용된 Cu 및 Mo 금속재료에 분산되어 나타나게 된다. 따라서, Cu/Mo 다층 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서는 다층 중간재 사용에 따른 질화규소에서 발생되는 인장방향의 잔류응력의 크기 및 접합체에서의 잔류응력의 분포형태의 변화가 접합체의 굽힘강도를 결정하는 주요 요인으로 작용하는 것으로 생각된다. 접합체에 대한 굽힘강도 및 잔류응력 계산 결과로 부터 Cu/Mo 다층 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 질화규소에 발생되는 잔류응력 크기가 감소할수록 접합체의 강도는 증가되었다. 또한, 접합체에 응력이 가하여질 때 중간재의 소성변형으로 접합체 내의 잔류응력을 완화시킬 수 있도록 항복강도가 높은 중간재 Mo에 큰 잔류응력이 발생되게 하는 방법이 접합체의 굽힘강도를 증가시키는데 효과적임을 알 수 있었다. 0.2 mm 두께의 Cu를 사용한 Si_3N_4/Cu/Mo/Cu/Mo/Cu/S.S.316 접합체에서 나타나는 접합체의 굽힘강도의 감소는 본 연구의 결과만으로는 분석하기 어려우며, 적층구조 및 각 중간재의 두께 변화에 따른 접합체의 굽힘강도 및 잔류응력에 대한 체계적인 분석이 요구된다.

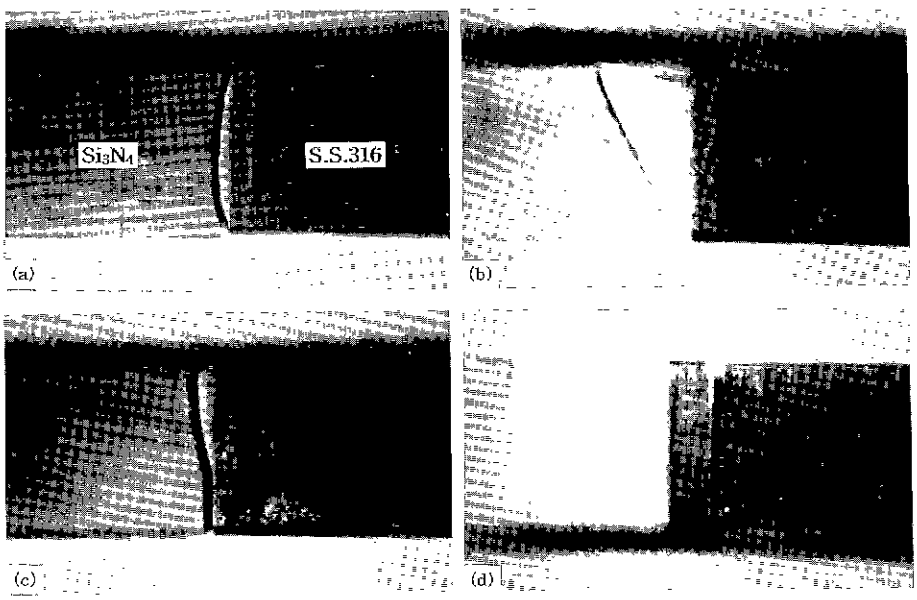

Fig. 6. Fracture paths of Si_3N_4/Cu/Mo/S.S.316 joint; (a) low strength joint, (b) and (c) moderate strength joint, and (d) high strength joint.

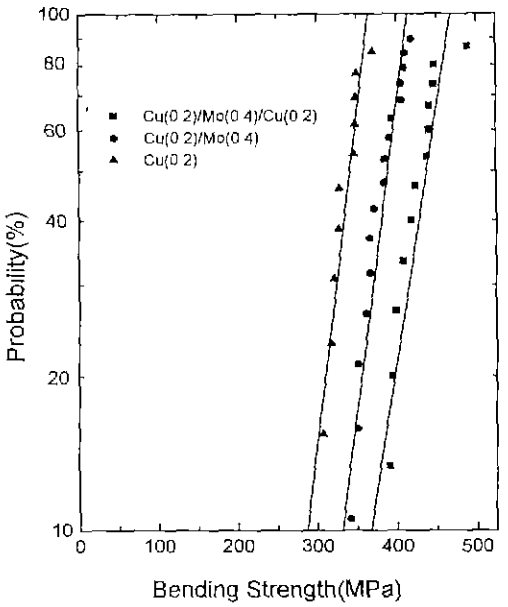

Fig. 7. Weibull plot of 4-point bending strength in Si_3N_4/Interlayer/S.S.316 joint at room temperature. Numbers in parenthesis indicate the thickness, in mm, of individual interlayer used.

Fig. 5는 Cu/Mo 다층 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 Cu 중간재 두께가 일정할 때 각 중간재 구조에서 Mo의 두께에 따른 접합체의 굽힘강도의 변화를 보여준다. Cu/Mo 다층 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체의 굽힘강도는 Mo 중간재의 두께 증가에 따라 증가하였다. 열팽창계수가 Si_3N_4와 S.S.316의 사이의 값을 갖는 Mo의 두께가 증가될수록 접합체에서의 세라믹스와 금속 모재 사이의 열팽창계수 변화를 점진적으로 변화시켜 주는 역할이 증대되어 Mo 중간재에 상대적으로 큰 잔류응력이 발생되어 접합체의 굽힘강도는 증가되는 것으로 생각된다.

Fig. 6은 Cu, Mo 다층중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체의 파괴형태를 접합체 굽힘강도의 크기에 따라 보여준다. 낮은 굽힘강도를 갖는 접합체에서는 세라믹스에 큰 잔류응력이 발생되는 접합체에서 일반적으로 나타나는 파괴형태인 세라믹스의 돔 형태 파괴가 일어났다(Fig. 6(a)). 300~400 MPa 정도 크기의 굽힘강도 값을 갖는 접합체에서 파괴는 Fig. 6(b)에서 보여주는 것과 같이 계면에 근접한 질화규소에서 파괴가 일어났으며, 굽힘강도가 높아질수록 Fig. 6(c)에서 보여주는 것과 같이 계면에 평행한 방향으로 파괴가 진행되었다. 400 MPa 이상의 높은 굽힘강도를 갖는 접합체의 파괴는 Fig. 6(d)에서 보여주는 것과 같이 S.S.316 모재 부근의 중간재 Mo에서 나타났으며, 이러한 중간재 Mo에서 일어나는 파괴는 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 브레이징후 냉각시 중간재 Mo에 큰 크기의 잔류응력의 집중이 발생되기 때문으로 생각된다.

Fig. 7은 Cu, Cu/Mo, Cu/Mo/Cu 구조의 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체 굽힘강도의 상온에서 Weibull plot을 보여주며, 접합체의 Weibull 계수는 차례로 12.3, 14.5, 10.7이었다. 굽힘강도는 Cu/Mo/Cu 다층중간재를 사용한 접합체에서 가장 높게 나타났으나, 접합체의 Weibull 계수는 Cu/Mo 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서 가장 높았다. 브레이징된 세라믹스/금속 접합체의 굽힘강도의 분산 정도, 즉 Weibull 계수는 접합체의 접합계면에서 발생되는 균열, 접합되지 않은 부분 등의 결함 뿐만 아니라 접합체내의 잔류응력의 집중정도에 따라 다르게 나타난다고 알려져 있다[9,10]. 같은 공정을 사용한 접합체의 접합계면에서 나타나는 결함의 차이는 크지 않다. 따라서, Fig. 2 및 Fig. 3에서 보여주는 것과 같이 유한요소법으로 계산된 중간재 구조에 따른 발생되는 잔류응력의 크기 및 분포 변화로 부터 접합체에 발생되는 잔류응력의 크기 보다는 잔류응력 분포의 차이가 Cu, Mo 다층중간재를 사용한 접합체에서 굽힘강도의 분산도를 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 얇은 Cu와 두꺼운 Mo가 조합된 Cu/Mo 중간재를 사용한 접합체에서와 같이 중간재 Mo에 높은 잔류응력이 발생되어 파괴가 중간재 Mo에서 일어남으로써 접합체의 Weibull 계수는 증가하게 된다고 생각된다.

4. 결 론

Cu/Mo 다층중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서는 질화규소에 발생되는 최대 잔류응력의 크기가 감소될 뿐 아니라, 접합체에 발생되는 잔류응력이 재분포되어 Mo 및 Cu 중간재의 두께비가 일정 크기 이상일 때 중간재 Mo에 최대 인장방향의 잔류응력이 발생된다 Cu/Mo/Cu 다층 중간재를 사용한 접합체에서는 질화규소 및 중간재 Cu 및 Mo에 인장방향의 잔류응력이 발생하였으며, Cu 및 Cu/Mo 중간재를 사용한 접합체와 비교하여 질화규소 및 중간재에 발생되는 잔류응력의 크기는 현저하게 감소되었다.

Cu 및 Mo를 적층한 다층 중간재를 사용한 Si_3N_4/S.S.316 접합체에서는 접합체의 질화규소에서 발생되는 잔류응력의 크기 뿐만 아니라 접합체의 잔류응력의 분포가

접합체의 굽힘강도 및 Weibull 계수를 결정하는 주요 요인으로 작용하였다. 중간재 Mo에 큰 크기의 잔류응력이 발생되는 Cu/Mo 또는 Cu/Mo/Cu 중간재를 사용한 접합체의 굽힘강도는 400 MPa 이상이었다. Mo에 인장방향의 최대 잔류응력의 집중이 발생되는 Cu/Mo 다층 중간재를 사용한 접합체에서는 접합체에 굽힘응력이 가하여졌을 때 중간제 Mo에서 파괴가 일어났으며, 접합체의 Weibull 계수는 증가되었다.

REFERENCES

1. H.E. Pattee, "Joining Ceramics to Metals and Other Materials," *WRC Bulletin*, **178**, 1-43 (1972).
2. R.E. Loehman, and A.P. Tompsia, "Joining of Ceramics," *Am. Ceram. Bull.*, **67**(2), 375-380 (1989).
3. S Kang, E M. Dunn, J.H. Selverian, and H.J. Kim. "Issues in Ceramic-to-Metal Joining; An Investigation of Brazing Silicon Nitride based Ceramic to a Low-Expansion Superalloy," *Am. Ceram. Bull*, **68**(9), 1608-1617 (1989).
4. B.J. Dalgleish, M.C. Lu, and A.G. Evans, "The Strength of Ceramics Bonded with Metals," *Acta Metall*, **36**(8), 2029-2035 (1988).
5. K. Suganuma, and T. Okamoto, "Interlayer Bonding Methods for Ceramic/Metal Systems with Thermal Expansion Mismatches," *J. Am. Ceram. Soc.*, **67**(12), C256 (1984).
6. Y. Miyazawa, E. Suzuki, and K. Hayashi, "Effect of Pre-compression on the Strength of Ceramic/Steel Joint," *Proc of the MRS Int. Mtg. on Adv. Mats.*, Vol. 8. "Metal-Ceramic Joints," edited by N. Iwamoto and T. Suga, 131-136, MRS (1988).
7. ANSYS user's manual, Swanson Structural Analysis System, (1994).
8. K. Suganuma, "Influence of Shape and Size on Residual Stress in Ceramic/Metal Joining," *J Mater Sci*, **22**(8), 2702-2706 (1987).
9. S. Tanaka, "The Characterization of Ceramic/Metal Systems Joined by an Active-Metal Brazing Method," *Proc. of the MRS Int. Mtg. on Adv Mats*, Vol 8, "Metal-Ceramic Joints," edited by N. Iwamoto and T. Suga, 91-96, MRS (1988).
10. K. Suganuma, "Reliability Factors in Ceramic/Metal Joining," *Mat. Res. Symp. Proc.*, **314**, 61-80 (1993).