

AlN 세라믹스와 금속간 계면접합에 관한 연구 : I. AlN/Cu 및 AlN/W 활성금속브레이징 접합체의 잔류응력 해석

박성계 · 이승해 · 김지순* · 유 회** · 염영진*

울산대학교 재료금속공학부

*울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가연구소(ReMM, KOSEF-RRC)

**울산대학교 기계자동차공학부

A Study on the Interfacial Bonding in AlN Ceramics/Metals Joints :

I. Residual Stress Analysis of AlN /Cu and AlN/W Joints Produced by Active-Metal Brazing

Sung-Gye Park, Seung-Hae Lee, Ji-Soon Kim*, Hee You**, and Young-Jin Yum*

School of Materials and Metallurgical Engineering,

*Research Center for Machine Parts and Materials Processing(ReMM, KOSEF- RRC)

**School of Mechanical and Automotive Engineering, University of Ulsan, P. O. Box 18, Ulsan 680-749

(1999년 6월 4일 받음, 1999년 8월 20일 최종수정본 받음)

초 록 Ag-Cu-Ti 삽입금속을 이용하여 제조된 AlN/Cu와 AlN/W 활성금속브레이징 접합체의 잔류응력을 유한요소법으로 탄성 및 탄소성 해석을 행하여 그 결과를 접합강도 측정 결과와 파단 거동 관찰 결과와 비교, 분석하였다.

최대 잔류 주응력의 크기는 AlN/W 접합체보다 모재간 열팽창계수 차이가 큰 AlN/Cu 접합체에서 더 크게 나타났으며, 접합체면에 인접한 AlN 세라믹스 자유표면에 인장 성분의 응력집중이 확인되었다. 모재와 삽입금속의 탄소성 변형을 모두 고려할 경우, AlN/Cu 접합체의 경우 연질의 삽입금속에 의해 최대 잔류 주응력이 감소하여 소성변형에 의한 응력완화 효과가 있음을 확인하였으나, 100 μ m 이상으로 삽입금속 두께를 증가시키더라도 잔류 주응력의 크기는 더 이상 크게 감소하지 않았다. 측정된 최대 접합강도는 AlN/Cu와 AlN/W 접합체에서 각각 52 MPa과 108 MPa이었으며, 파단 형태는 AlN/Cu 접합체는 AlN 자유표면으로부터 AlN 내부로 큰 각도를 이루며 진행되는 돔형의 파단이, AlN/W 접합체에서는 접합체면의 삽입금속층을 따라 AlN 측에서 파단이 일어나는 형태를 보였다.

Abstract Elastic and elasto-plastic stress analyses of AlN/Cu and AlN/W joints produced by active-metal brazing method using Ag-Cu-Ti insert-metal were performed with use of Finite-Element-Method(FEM). The results of stress analyses were compared with those from the joint strength tests and the observations of fracture behaviors.

It was shown that a remarkably larger maximum principal stress is built in the AlN/Cu joint compared to the AlN/W joint. Especially, the stress concentration with tensile component was confirmed at the free surface close to the bonded interface of AlN/Cu. The elasto-plastic analysis under consideration of stress relaxation effect of Ag-Cu-Ti insert possessing a so-called 'soft-metal effect' showed that the insert leads to a lowering of maximum principal stress in AlN/Cu joint, even though an increase of the insert thickness above 100 μ m could not bring its further decrease. The maximum joint strengths measured by shear test were 52 and 108 MPa for AlN/Cu and AlN/W joints, respectively. Typical fractures of AlN/Cu joints occurred in a form of 'dome' which initiated from the free surface of AlN close to the bonded interface and proceeded towards the AlN inside forming a large angle. AlN/W joints were usually fractured at AlN side along the interface of AlN/insert-metal.

1. 서 론

AlN 세라믹스는 일반적으로 알려져 있는 여타 세라믹스와는 달리 열전도도가 매우 높고, 화학적 안정성과 강도특성이 우수할 뿐 아니라, 전기적 절연특성과 열충격 저항성이 매우 우수하여 차세대 기판재료로서의 응용이 크게 기대되고 있는 재료이다. AlN에 기대되고 있는 실제 활용분야로는 고열전도성 기판을 필요로 하는 반도체 디바이스 분야, 열전도성과 강도, 절연성이 동시에 충족되어야 하는 차량 탑재용 사이리스터, 접화 모듈 등 중전력 분야와 로보트

나 각종 동작기기 등의 대전력 스위치 모듈을 필요로 하는 메카트로닉스 분야, 고온 gas 터빈용 부재와 소결치구 등을 필요로 하는 구조요업분야 등을 들 수 있다. 그러나, 현재 이러한 분야에 대해 AlN을 효과적으로 응용하기 위해서는 금속과의 복합화, 즉 접합의 필요성이 대두되고 있다.^{1~3)}

AlN은 wurtzite 구조를 갖는 공유결합성이 큰 물질로서, 금속 삽입재를 이용하여 금속과 접합시킬 때 이온결합성의 산화물계 세라믹스와는 다른 접합양상을 보일 것으로 예상된다. 특히, 세라믹스-금속간 접합에서 공통적으로 문

Table 1. Mechanical property data for materials used in stress analysis.^{9, 10)}

Material	AlN	Cu(OFC)	W	Ag-Cu-Ti
Elastic modulus(GPa)	280	115	412	138
Poisson's ratio	0.24	0.35	0.29	0.36
Coefficient of thermal expansion($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	25-200 $^{\circ}\text{C}$: 4.03 25-400 $^{\circ}\text{C}$: 4.40 25-600 $^{\circ}\text{C}$: 4.84 20-1000 $^{\circ}\text{C}$: 5.64 20-1350 $^{\circ}\text{C}$: 6.09	100 $^{\circ}\text{C}$: 17.1 200 $^{\circ}\text{C}$: 17.2 500 $^{\circ}\text{C}$: 18.3 1000 $^{\circ}\text{C}$: 20.3	100 $^{\circ}\text{C}$: 4.5 500 $^{\circ}\text{C}$: 4.60 1000 $^{\circ}\text{C}$: 4.60	500 $^{\circ}\text{C}$: 17.5
Yield Stress(MPa)	-	78	550	343
Strain hardening Coefficient H	-	2.45	5.4	2.74

제가 되고 있는 세라믹스에 대한 액상금속의 젖음성 불량과 모재간 열팽창계수 차이에 따른 접합계면에서의 열응력 발생은 AlN/금속간 접합의 경우에 있어서도 선결되어야 할 과제라 하겠다. 젖음성 문제는, 활성금속브레이징법을 사용할 경우 브레이징재에 포함된 Ti 등의 활성금속이 접합시 용융 과정에서 세라믹스의 비금속원소와 결합하여 세라믹스 표면을 금속화 (metallizing) 시키므로 젖음성을 크게 개선시킬 수 있어 비교적 용이하게 해결될 것으로 예상된다.^{4, 5)} 그러나, 열팽창계수 차이에 따른 내부 열응력 발생과 접합체 강도의 신뢰성 문제는 공유결합성이 강한 AlN의 경우 산화물계 세라믹스에서 보다 심각할 것으로 예상되어 열응력 완화를 위한 적절한 해결책이 모색되어야 할 것으로 판단된다.^{6~8)}

본 연구에서는 AlN 세라믹스/금속 접합의 강도 신뢰성과 재현성에 크게 영향을 미칠 것으로 예상되는 AlN/금속 접합과정의 잔류응력의 크기와 분포를 유한요소해석법을 이용, 예측하여 접합 공정 최적화를 위한 기초 자료를 얻고자 하였다. 유한요소해석에 적용된 재료시스템은, AlN 세라믹스와 열팽창계수 차이가 매우 작은 W과 그 차이가 상대적으로 매우 큰 Cu를 대상으로 하였다. 해석은 열응력 형성에 미치는 삽입금속의 영향을 고려하지 않은 기초적인 탄성해석과 활성금속브레이징재로 사용된 공정조성의 Ag-Cu 합금에 Ti이 2 wt% 첨가된 삽입금속을 포함한 전체계의 탄소성 해석까지를 행하였다. 해석된 결과는 실제로 제조, 측정된 접합체의 접합강도와 파단 형태 등과 비교, 분석하였다.

2. 실험 방법

2-1. 유한요소 해석

유한요소 해석에 사용한 프로그램은 NISA II 이었다. 시험편의 형태는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 모재인 AlN과 Cu, 또는 W 금속으로 구성된 직경 10mm의 봉상으로써 길이는 삽입금속의 두께 변화에 따라 10~10.8mm이었다. 시험편에 대한 요소분할은 시험편이 길이 방향의 중심축에 대하여 대칭이기 때문에 RZ 절단면의 1/2인 5mm에 대하여 그림에 나타난 바와 같이 직사각형 형태로 요소분할을 실시하였다. 잔류응력의 변화가 클 것으로 예상되는 접합계면 부위와 모재의 자유표면 부근에서는 해석의 정확도를 더

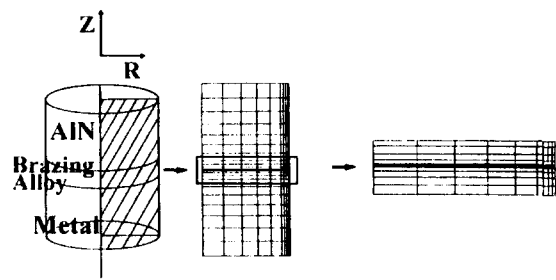


Fig. 1. Finite element mesh for AlN/metal joint investigated in this study.

하기 위해 요소를 세분하였다. 해석 영역과 함께 나타나 있는 경계 조건은 R=0mm의 위치에서 반경 방향 변위를 구속하고, R=5mm, Z=0mm의 위치에서 높이 방향 변위를 구속하였다. 총 절점수는 260, 총 요소수는 225개 이었다. Table 1^{9, 10)}은 해석에 사용된 각 재료의 물성치를 나타낸 것이다.

응력 해석시 AlN/금속간 접합체는 결합이 없는 완전한 계면을 이루며, AlN 세라믹스는 탄성 거동만 하는 것으로 가정하였다. 또, 금속 모재 및 삽입금속은 접합계면의 응력 크기에 따라 탄성(Elastic) 또는 탄소성(Elasto-plastic) 변형이 모두 가능하므로, 해석의 편이상 탄성거동을 전제로 한 해석을 우선 시행하고 탄소성 해석을 행하였다. 본 연구에서 해석에 사용한 시스템 소프트웨어상의 제한성 때문에 접합체의 열전도는 고려하지 못하였으며, 접합온도에서 접합체 내부는 무응력 상태이고, 접합온도로부터 상온까지의 냉각과정에서 전 시험편에 걸쳐 균일하게 냉각되는 것으로 가정하였다. 크립(Creep) 효과도 고려하지 않았다.

2-2. 접합실험

실험에 사용한 모재는 Yttria를 소결조제로 한 일본 Tokuyama사의 밀도 3.26g/cm³인 상압소결 AlN (표면조도 0.3 μm Ra)과 각각의 순도가 99.99%인 무산소동 및 W 이었으며, 직경 10mm×두께 5mm의 디스크 형태였다. 접합에 사용된 삽입금속은 공정조성의 Ag-Cu 합금에 Ti이 2 wt% 첨가된 합금을 Ar 분위기 중에서 아아크 용해한 후 고주파 진공유도로에서 재 용해하였으며, 10mm 직경의 봉상으로 주조한 후 원하는 두께로 절단, 연마하여 사용하였다. 모재와 삽입금속은 접합시 Aceton 내에서 초음파 세

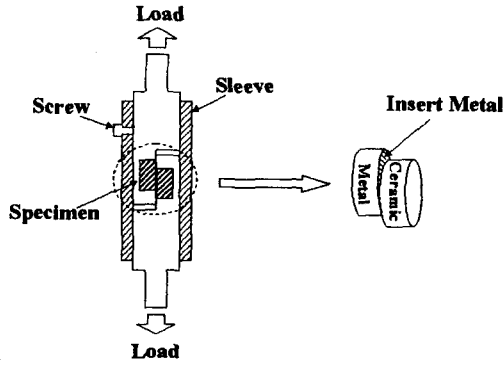
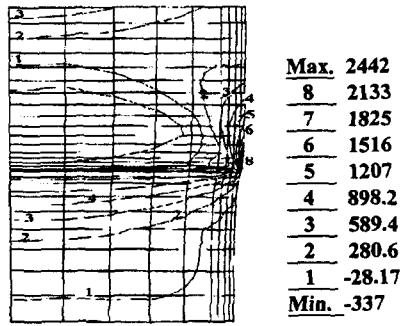


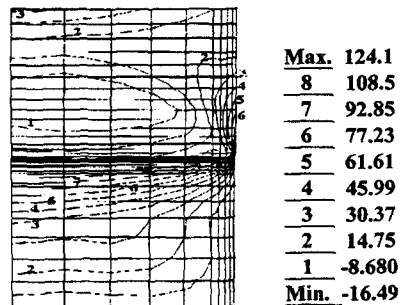
Fig. 2. Schematic diagram of shear test jig.

척 후 건조하여 양 모재 사이에 삽입금속을 배치한 형태로 6×10^{-5} torr의 진공로에서 승온 및 냉각속도 $10^\circ\text{C}/\text{min.}$, 온도 $850 \sim 950^\circ\text{C}$, 유지시간 1~5분으로 하여 접합을 행하였다.

접합체의 강도를 측정하기 위하여 ASTM D2293-69의 Double-Shear-Test를 보정하여 Fig. 2의 Single Shear Test 형태로 설계, 제작하여 인장시험기 (Shimadzu AG-250KNE)에 1mm/min.의 cross-head speed로 전단강도 시험을 행하였으며, 파단된 접합체들의 파면을 Scanning Electron Microscope (SEM)와 Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)를 이용하여 관찰·분석하였다.



(a)



(b)

Fig. 3. Principal stress contour of (a) AIN/Cu and (b) AIN/W joints produced at 900°C . (Elastic analysis)

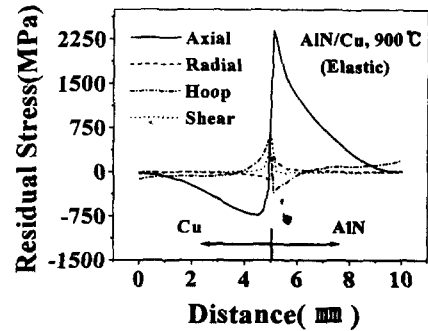
3. 실험 결과

3-1. 유한요소 해석법에 의한 잔류응력 해석

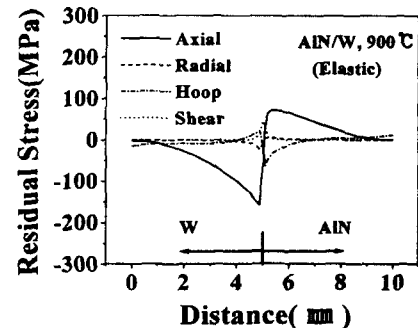
- 삽입금속을 고려하지 않은 탄성 해석

Fig. 3 (a), (b)는 삽입금속의 소성변화에 따른 응력완화 효과를 고려하지 않고, 900°C 의 접합온도에서 상온까지 냉각시킬 경우 양 모재 모두 탄성거동만을 보인다고 가정하여 시행한 AIN/Cu, AIN/W 접합체의 주응력 분포 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, AIN/Cu의 경우, '1'로 표시한 contour에 해당하는 접합체 중앙부의 AIN측 계면에는 (-)부호의 압축 잔류응력이 형성되었으며, Cu측 계면에는 (+)의 인장 잔류응력이 형성되었다. 또한, AIN측 접합계면을 따라 자유표면으로 접근할수록 주응력의 크기가 증가하여, '8'로 표시된 부분 근처에서 2400 MPa 이상이 됨을 알 수 있다. AIN/W 접합체의 경우에도 잔류응력 분포는 비슷한 양상을 보였으나, 주응력의 크기가 124 MPa로 AIN/Cu의 경우에 비해 현저히 낮은 것을 알 수 있다.

Fig. 4 (a), (b)는 위의 시편에 대해 자유표면에 걸리는 응력 변화를 나타낸 그래프이다. AIN/Cu 접합체의 경우, 앞에서도 언급한 바와 같이 AIN측 접합계면에 인접한 자유표면에서 약 2500 MPa의 축 방향 잔류응력이 형성되었으며, 접합계면으로부터 멀어짐에 따라 감소하여, 접합계면



(a)



(b)

Fig. 4. Residual stress at the free surface of (a) AIN/Cu and (b) AIN/W joint. (Elastic analysis)

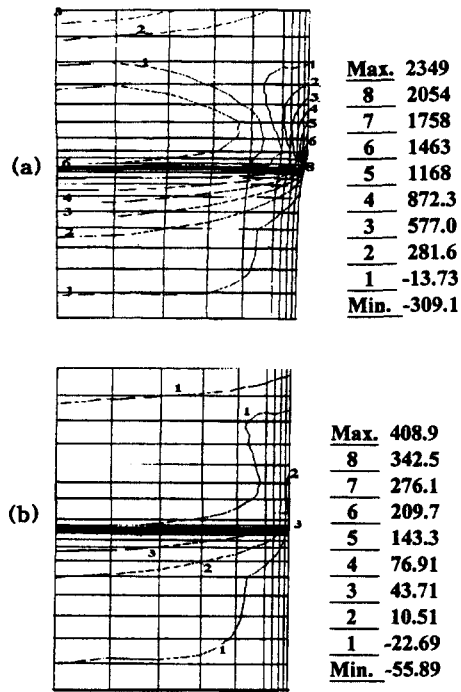


Fig. 5. Principal stress contour of (a) AlN/IM/Cu and (b) AlN/IM/W joints. (IM=Insert Metal with thickness of 200 μ m) (Elasto-plastic analysis)

으로부터 2.5mm 떨어진 AlN 내부에 500 MPa의 인장응력이 형성되었다. 그러나, AlN/W 접합체의 경우에는 접합

계면의 AlN측 자유표면에 형성된 최대 잔류응력의 크기가 72 MPa미만으로 상대적으로 매우 낮은 값을 보임을 알 수 있다.

이상의 해석에서 실제로는 형성되기 어려운 2500 MPa라는 높은 잔류응력이 형성된 것은 금속 소재의 소성에 의한 응력완화 효과를 고려하지 않았을 뿐 아니라, Ag-Cu-Ti 삽입금속의 영향을 배제하였기 때문으로 판단되어 이들 영향을 고려한 아래의 해석을 행하였다.

— 삽입금속과 소재의 탄소성 변형을 고려한 응력 해석

Fig. 5 (a), (b)는 Fig. 3 (a), (b)에서 기술한 시편에 대해 다른 조건은 모두 동일하고, 삽입금속과 금속 소재의 탄성변형 및 소성변형을 모두 고려하여 구한 최대 주응력 분포곡선을 나타낸 것이다. 여기서 삽입금속의 두께는 200 μ m로 가정하였다. 그림에서 보는 바와 같이, AlN/Cu와 AlN/W 접합체의 경우 모두, 금속 소재에 형성되는 최대 주응력 분포의 경향은 탄성해석의 경우와 큰 차이가 없으나, 세라믹스 소재 측에는 약간의 변화가 있음을 알 수 있다. 즉, AlN/Cu 접합체에서는 최대 주응력 값이 낮아졌으며, AlN/W의 경우에는 AlN측에 압축 응력이 넓은 범위에 걸쳐 형성되었다.

Fig. 6 (a), (b)는 앞의 Fig. 5 (a), (b)의 두 접합체의 자유표면에 걸리는 응력 분포를 해석하여 나타낸 결과이다. AlN/Cu 접합체의 경우, 탄성 해석에서와 유사하게 접합면에 인접한 AlN 세라믹스 자유표면에 최대 잔류응력이 형성되었다. 그러나, 그 크기가 약 2500 MPa에서 1900

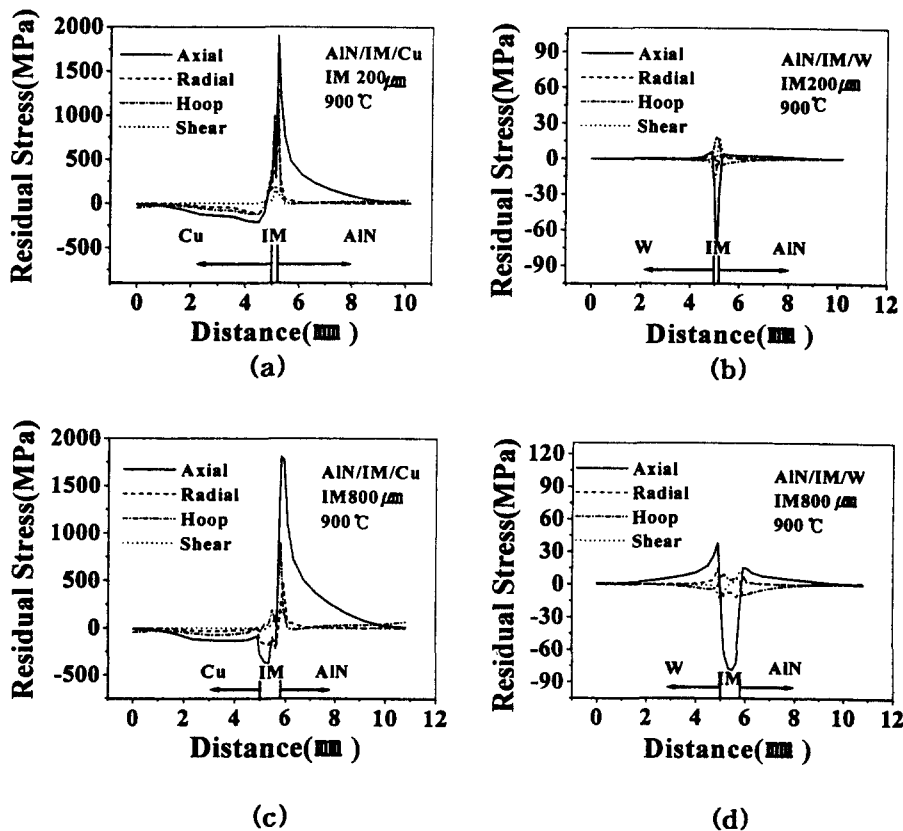
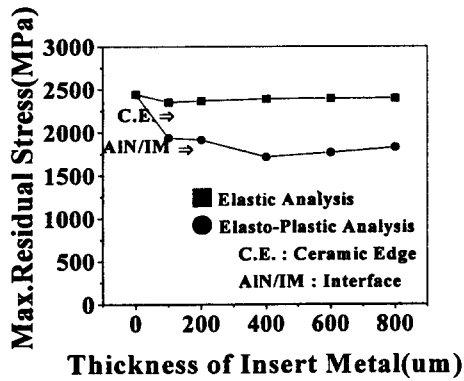
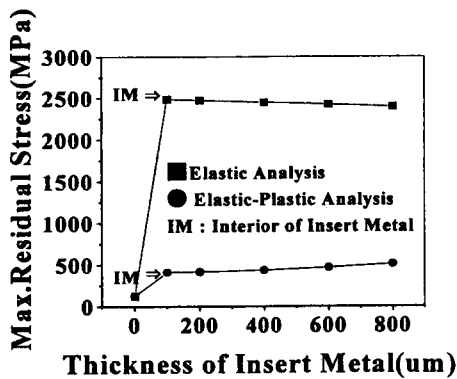


Fig. 6. Residual stress at the free surface of (a) AlN/200 μ m IM/Cu, (b) AlN/200 μ m IM/W, (c) AlN/800 μ m IM/Cu, and (d) AlN/800 μ m IM/W joints. (Elasto-plastic analysis)



(a)



(b)

Fig. 7. Change in maximum residual stress of (a) AIN/IM/Cu and (b) AIN/IM/W joints as a function of insert-metal thickness. (900°C ⇒ Room temp.)

MPa로 크게 감소하였으며, 접합계면으로부터의 거리에 따른 축방향 잔류응력의 감소도 매우 급격하여, AIN측 접합계면으로부터 0.5mm 떨어진 지점에서 500 MPa의 잔류응력값을 보이고 있다. AIN/W 접합체의 경우에도, AIN측 자유표면에 걸리는 최대 잔류응력의 크기가 72 MPa에서 20 MPa로 감소하였다. 거리에 따른 축방향 잔류응력의 감소도 매우 급격히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6 (c), (d)는 삽입금속(IM : Insert Metal)의 두께를 200μm에서 800μm로 증가시켰을 경우의 해석 결과이다. AIN/Cu의 경우 AIN측 자유표면에 걸리는 최대 축방향 응력의 크기에는 큰 변화가 없으나, 접합계면으로부터의 거리에 따른 응력 감소가 완만하고, 잔류 삽입금속층의 응력 분포가 불안정해졌음을 알 수 있다. AIN/W 접합체의 경우에도, AIN측 자유표면의 응력 분포에는 큰 변화가 없으나, 접합계면에 인접한 W측 자유표면의 인장응력이 증가하였으며, 삽입금속층에서의 응력 분포가 불안정함을 알 수 있다.

Fig. 7은 앞의 접합체들에 대하여, 삽입금속의 두께를 0~800μm까지 변화시켰을 때의 최대 잔류 주응력 값의 변화와 응력이 걸리는 위치를 탄성 및 탄소성 해석하여 그 결과를 정리한 그래프이다. AIN/Cu의 경우, 탄성해석 결과에서는 삽입금속의 두께가 최대 잔류응력에 영향을 미치지 않

고 있다. 반면, 탄소성 해석에서는 삽입재가 삽입됨으로써 최대 잔류응력의 크기가 감소되고, 응력의 위치도 AIN 세라믹 측으로부터 AIN/삽입금속간 계면으로 이동함을 확인할 수 있다. 그러나, 삽입금속의 두께가 100μm 이상으로 증가하더라도 잔류응력 감소 효과는 크게 증가하지 않았다. AIN/W 접합체의 경우에는 AIN/Cu 접합체와는 달리, 100μm의 삽입금속 두께에서 잔류응력의 크기가 급격히 증가하였다. 특히, 탄성해석의 경우에 이와 같은 증가가 더욱 심하였으나, 삽입금속의 두께가 100μm 이상으로 증가하더라도 두께에 따른 잔류응력 크기는 변화하지 않음을 알 수 있다.

3-2. 접합체 강도와 파괴양상

Fig. 8은 Ag-Cu-Ti 삽입재를 사용하여, 접합 유지시간 5분, 접합온도 850, 900, 950°C의 조건으로 제조된 AIN/Cu 및 W 접합체의 접합강도를 측정된 결과이다. 양 모재 상호간의 열팽창계수 차이가 큰 AIN/Cu 접합체의 경우 900°C의 접합온도에서 52 MPa의 최대 접합강도를 얻었다. 양 모재 상호간의 열팽창계수 차이가 작은 AIN/W 접합체의 경우에는 동일한 접합온도에서 108 MPa의 최대 접합강도를 나타내었다. 접합온도와 접합체 강도간의 관계에 대해서는, 접합에 사용된 삽입금속 내 Ti 활성금속이 AIN 세라믹스 표면과 반응하여 반응층을 형성하고, 접합온도에 따라 반응층의 두께가 달라짐에 따라 반응층 내부의

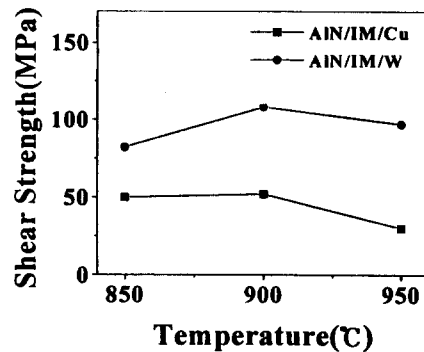


Fig. 8. Change in shear strength of AIN/IM/Cu and AIN/IM/W joints produced at various temperatures for 5 min. by active-metal brazing.

결합 형성, 반응층 표면 요철에 의한 anchor 효과, 반응층 접합계면에서의 연속성 등에 영향을 미치는 것과 연관이 있는 것으로 본 저자들의 앞선 연구논문에서 보고한 바 있다.¹¹⁾

Fig. 9는 이들 접합체 시편에 대한 파괴양상을 일반화하여 도식적으로 나타낸 것이다. (a)는 접합계면과 모서리 균열선의 각도가 깊은 돔형의 파단 형태를 나타내는 AIN/Cu 접합체의 경우이며, (b)는 균열이 접합계면을 따라 일어나는 AIN/W 접합체의 파단 형태이다.

Fig. 10은 Fig. 9 (a)와 같은 형태로 파단된 AIN/Cu 접합체 시편의 파면을 SEM 및 EDS로 관찰·분석한 결과이다. Fig. 10의 왼쪽 SEM 파면 사진 중, a₁과 a₂ 부분, b₁과 b₂ 부분, 그리고 c₁과 c₂ 부분은 각각 파단된 접합체의

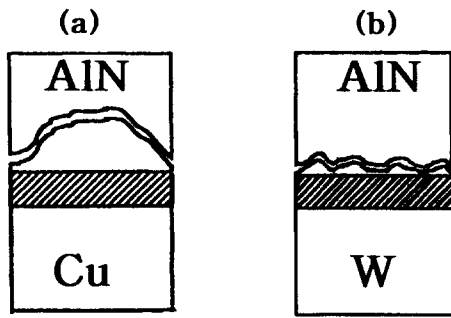


Fig. 9. Schematic diagrams showing typical failure types of (a) AlN/IM/Cu and (b) AlN/IM/W joints.

마주보고 있는 부분을 표시한 것으로, AlN 층 표면 중앙부에서 Al의 mapping이 부분적으로 되지 않는 것은 AlN 내부로 깊은 돌형의 파단이 일어났기 때문이다. Fig. 10의 오른쪽에 나타난 파면의 확대사진과 표시된 부분의 EDS 결과를 보면, 파괴시 균열은 전 단면에 일정한 경로로 진행된 것이 아니고 몇 가지 다른 경로가 공존하고 있음을 알 수 있다. 이를 크게 나누면 삼입금속 부분, AlN이 삼입금속에 붙어 있는 부분, AlN 표면이 노출된 부분으로 구분되며, A, B 영역에 대한 EDS 분석 결과에서, a 부분에서는 AlN의 주성분인 Al만 검출되고, b 부분에서 삼입금속의 성분원소인 Ag, Cu가 검출되어 AlN과 삼입금속의 경계에서 파괴가 진행되었음을 알 수 있다. 또, C 영역은 조직사

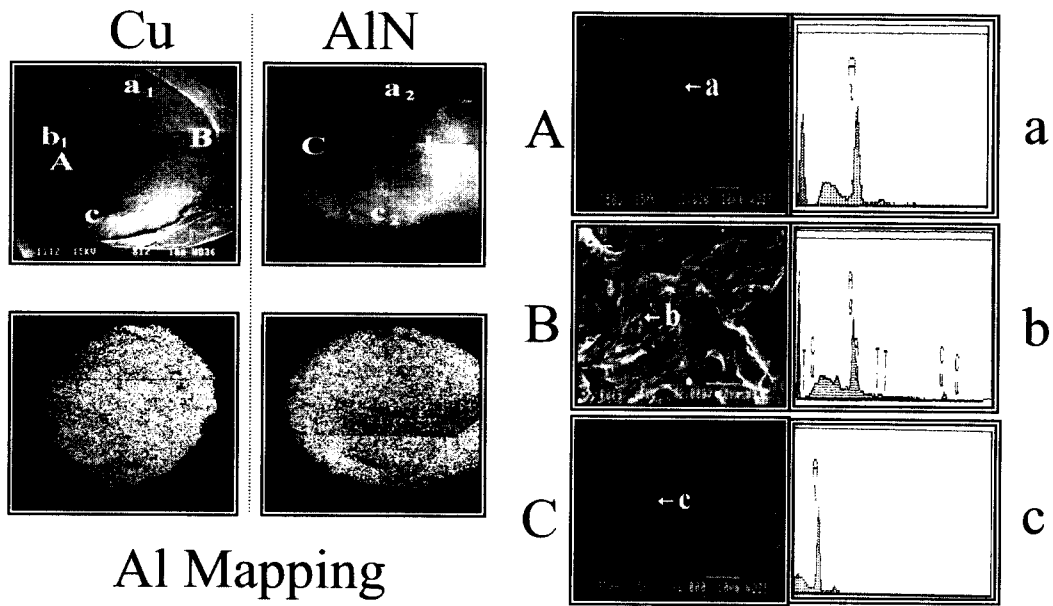


Fig. 10. SEM images of the fracture surfaces of AlN/IM/Cu joint, their Al-mapping and EDS analysis results.

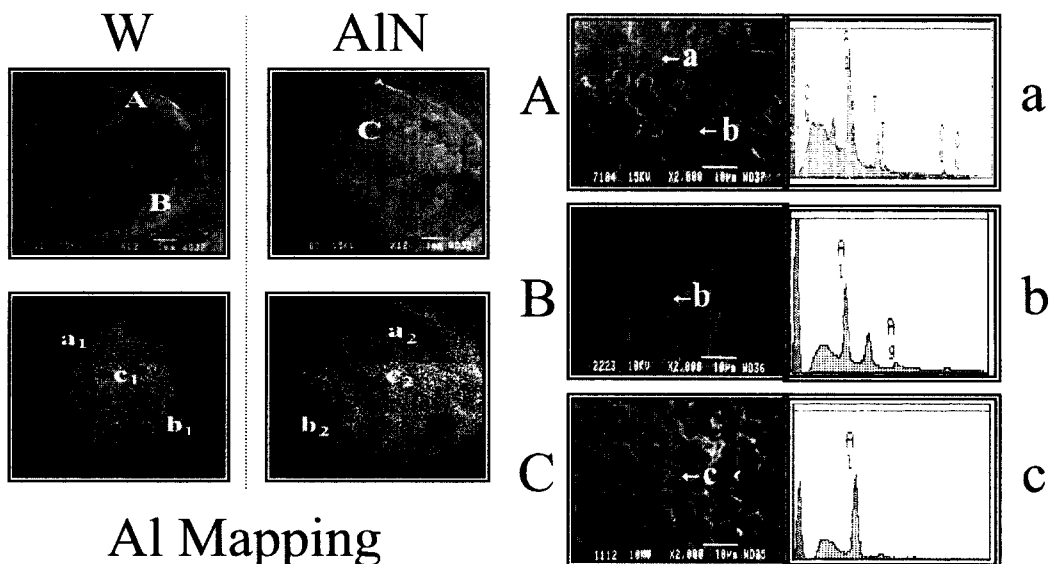


Fig. 11. SEM images of the fracture surfaces of AlN/IM/W joint, their Al-mapping and EDS analysis results.

진 상에서 이미 AlN 파면임을 알 수 있으며, 정성분석 결과 역시 세라믹의 주성분인 Al만 검출되어 AlN 내부로 파괴가 일어났음을 알 수 있다.

Fig. 11은 주로 Fig. 9 (b) 형태의 파단 거동을 보인 AlN/W 접합체 파단면을 SEM 및 EDS로 관찰·분석한 것이다. A 영역의 a 부분은 삽입금속 층임을 알 수 있으며, B 영역과 C 영역에서는 Al과 함께 부분적으로 삽입금속의 구성성분인 Ag가 검출되어 파괴 경로가 삽입금속과 AlN 계면, 그리고 AlN 내부로 복잡하게 진행됨을 알 수 있다.

4. 고 찰

접합 후 AlN/Cu 접합체에 형성되는 주응력이 접합계면을 중심으로 AlN 측에는 인장응력이, Cu 측에는 압축응력이 걸리는 것은 모재간 열팽창계수의 차이로 설명할 수 있다. 즉, 고온의 접합온도로부터 상온으로 접합체를 냉각할 때, 열팽창계수가 높은 Cu는 AlN에 비해 더 많은 양의 수축을 하려고 하나, AlN에 의해 구속을 받게 되므로 인장응력이 접합계면에 인접한 부분에 형성된다. 그러나 이와 같은 구속은 자유표면으로 접근할수록 약해지게 되며, 접합계면을 중심으로 형성되는 각 응력 성분의 조화에 따라 접합계면에 인접한 AlN 측 자유표면에는 인장응력이 형성, 집중되게 된다. 특히, AlN 측 자유표면에 형성되는 인장응력의 집중은, 인장응력에 취약한 세라믹스의 특성상 그 크기가 파괴강도를 초과할 경우 냉각 중에 자발적 파괴를 일으킬 수 있다.

본 연구에서는 AlN/Cu에 대한 탄성해석 결과에서, 약 2500 MPa의 최대 잔류 주응력이 접합계면에 인접한 AlN 측 자유표면에 형성되는 결과를 얻었는데, 이 정도의 응력 크기는 제조회사가 제공한 AlN 세라믹스의 파괴강도치 300~400 MPa를 훨씬 초과하는 것으로 지나치게 높다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 응력 해석시, 접합계면의 결합 효과와 삽입금속과 금속 모재의 소성변형에 의한 응력 완화 효과, 열전도의 영향 등을 고려하지 않았던 데에 기인하는 것으로 판단된다. 삽입금속과 금속 모재간 계면에는 실제로 결합이 존재할 수 있으며, 이들 결합이 응력집중 인자 역할을 할 수 있다. 또한, 접합체 내에 형성되는 잔류응력은 금속 또는 삽입금속의 소성변형에 의해 흡수될 수 있다. 이는 탄성해석과 탄소성 해석 결과에서 접합체의 자유표면에 형성되는 축 방향의 잔류응력 크기가 2500 MPa에서 1900 MPa로 감소되는 것에서도 확인할 수 있다. 그러나, 이 값은 아직도 상당히 큰 것을 알 수 있는데, 열전도의 영향을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 즉, AlN은 일반 금속재료와 거의 대등한 열전도도를 가지므로, 해석에서 가정한 900°C의 접합온도에서 상온으로의 냉각시 잔류응력 크기에 크게 영향을 미치는 ΔT 의 값이 실제로는 900°C보다 현저히 작았을 것으로 사료되며 잔류응력 값 역시 해석에서 얻어진 값보다 작을 것으로 예상된다.

삽입금속과 모재의 탄소성변형을 모두 고려하여 응력 해석을 행한 경우, 접합계면으로부터의 거리에 따른 최대 잔

류응력 크기의 감소가, 단순한 탄성해석으로부터 얻어진 결과에서 보다 매우 급격한 것도 소성변형에 의해 잔류응력이 용이하게 흡수될 수 있기 때문으로 판단된다. 삽입금속의 두께 증가에 따라 최대잔류응력의 크기가 감소하거나 (AlN/Cu), 증가한 것 (AlN/W)은 전자의 경우는 삽입금속의 열팽창계수와 탄성율이 모재인 Cu와 크게 차이가 나지 않으며, 후자의 경우는 AlN과 W 모재가 삽입금속보다 낮은 열팽창계수와 높은 탄성율을 갖는 데에 연유하는 것으로 판단된다. 즉, AlN/Cu의 경우, 탄소성 해석에서 잔류응력이 감소하는 것은 열팽창계수와 탄성율이 서로 비슷한 Cu 모재와 삽입금속이 소성변형됨으로써 잔류응력을 흡수하기 때문이며, AlN/W의 경우에는 W과 AlN 모재보다 삽입금속의 열팽창계수가 높고 냉각과정에서 삽입금속의 수축이 탄성계수가 매우 높은 양 모재에 의해 강하게 구속되기 때문에 인장응력이 형성될 것으로 사료된다.

접합 모재에 따라 접합체 내에 존재하는 잔류응력과 접합강도가 다르게 나타나는 이유는 잔류응력과 접합강도간에 상관성이 있음을 시사하는 것이다. AlN/Cu 접합체가 AlN/W 접합체와 비교하여 낮은 접합강도 값을 보이는 이유는, AlN과 Cu간의 열팽창계수 차이가 ($|5.64 - 20.3| \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) AlN/W ($|5.64 - 4.6| \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)에 비해 약 15배 가량이 되어 접합 후 냉각하는 과정에서 큰 잔류응력이 접합체에 형성되고 균열 등의 결함이 발생되기 용이하므로 접합강도의 저하를 야기하였기 때문으로 판단된다.

접합대상 금속에 따라 나타나는 파괴양상을 보면 양 모재의 열팽창계수의 차이가 큰 AlN/Cu의 경우 AlN 측으로 깊은 돛형의 파단을 보이고 있는 데 반하여, 양 모재의 열팽창계수의 차이가 적은 AlN/W의 경우 접합계면 부근에서 얇은 평면의 형태로 파단이 일어나는 것을 관찰할 수 있는데, 이는 유한요소 해석 결과에 나타난 잔류응력의 분포와 연관성이 있음을 알 수 있다. 이와 같은 해석은 Si₃N₄/Steel 접합체를 대상으로 한 Okamoto¹²⁾의 보고에서도 관찰된 사항으로, 육안으로 확인할 수 있는 돛형 파단 형태를 FEM 해석을 근거로 하여 접합계면에 가까운 질화규소의 자유계면에서 발생된 최대 주응력이 인장성분을 가지므로 접합체의 강도에 영향을 미친다고 보고하였다.

AlN/Cu 접합체의 경우에 접합부 근방의 AlN 세라믹스 자유표면에 형성된 최대 인장 잔류응력선을 따라 일어난 파괴의 형태로 모서리 균열 (edge crack)에 의한 파괴, 즉 concave/convex failure^{13,14)}로 알려져 있다. Fig. 5 (a)의 주응력 분포도에서 알 수 있듯이, 접합부 근방의 AlN 자유표면에 균열이 생긴다면 균열경로는 압축응력이 작용하는 영역을 피해가거나, 압축응력이 해제될 때까지 응력이 축적되다가 파괴강도 이상이 될 경우 접합계면 부근의 AlN 내부로 빠르게 진행됨으로써 돛형의 파괴양상을 나타내는 것으로 사료된다. 특히, 접합부에 인접한 세라믹스 자유표면 측 내부에 결함이 존재할 경우, 이러한 현상은 형성된 잔류응력에 의한 응력집중 효과와 함께 더욱 뚜렷이 나타날 것으로 예상된다.

AlN/W 접합체의 경우에는, 접합 계면부 AlN 측에 작

용하는 압축성분과는 달리 인장성분이 AlN의 접합계면의 인접부위에서 존재하므로 AlN 자유표면에서 균열이 생긴다면 균열경로는 접합계면과 가까운 AlN 내부로 진행될 것이다. 이와 같은 예는 Lee¹⁵⁾의 Si₃N₄/Inconel 600 접합체를 대상으로 한 보고에서도 관찰할 수 있으며, Lee의 경우 접합강도에 따라, 강도가 높은 시편의 경우 균열이 경계부(perimeter)에서 세라믹 내부로 진행될 때 대체로 접합계면에 평행한 방향을 따라 진행되는데 반하여, 낮은 강도를 보이는 시편들은 접합계면에 수직인 방향으로 진행되는 것을 보이고 있는 것으로 조사되었다. 본 실험의 결과와 이들 보고는 접합강도와 잔류응력 분포에 따른 접합체의 균열 각도가 연관성이 있음을 시사하고 있다.

5. 결 론

AlN/Cu 및 AlN/W 접합체의 모재간 열팽창계수차이에 따른 잔류응력을 유한요소법으로 해석하고 Ag-Cu-Ti 합금에 의한 활성금속브레이징 접합체를 제조하여 전단강도 측정과 파면 관찰을 행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 위 접합체에 대한 단순 탄성해석의 경우, 접합계면의 AlN측 자유표면 부근에서 응력집중이 일어남을 확인하였으며 그 크기는 AlN/W 접합체에 비해 AlN/Cu 접합체에서 매우 크게 나타났다.

2) 모재와 삽입금속의 탄소성변형을 모두 고려하여 해석한 경우, AlN/Cu의 경우 삽입금속에 의해 최대 잔류 주응력이 감소하여 소성변형에 의한 응력완화 효과가 있음을 확인하였으나, AlN/W 접합체의 경우에는 최대 주응력이 삽입금속에 의해 약간 증가하였다. 그러나, 100 μ m 이상으로 삽입금속 두께를 증가시킬 경우에는 최대잔류 주응력의 크기가 두 경우 모두 크게 변화하지 않았다.

3) AlN/Cu 접합체의 경우 최대 50 MPa내외의 접합강도를, AlN/W 접합체에서는 최대 108 MPa의 접합강도를 얻을 수 있었다.

4) AlN/Cu 접합체는 일반적으로 AlN 측 자유표면으로부터 내부 쪽으로 큰 각도를 이루면서 깊은 돔형의 파괴가 일어났으며, AlN/W 접합체에서는 접합계면에 평행한 파면을 형성하며 파괴되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 연구비(KOSEF 941-1000-010-2) 지원과 한국과학재단 지정 울산대학교 기계부품 및 소재 특성평가연구센터의 부분지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 中橋昌子, 白兼誠, 日本複合材料學會誌, **12** (5), 223 (1986).
2. F. Miyashiro, N. Iwase, A. Tsuge, F. Ueno, M. Nakahashi and T. Takahashi, IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, **13** (2), 313-319 (1990).
3. 一瀬昇, 杉本克昌, 關野昌歳, 工業材料, **36** (15), 17-60 (1988).
4. 莊司 孝志, エレクトロニク・セラミクス, Dec., 14-19 (1991).
5. 田中 俊一世郎, 溶接技術, (9), 84-89 (1989).
6. 石田洋一, 日本複合材料學會誌, **12** (3), 127-132 (1986).
7. J. M. Howe : Int. Mater. Rev., **35** (5) 257-271 (1993).
8. K. Suganuma, T. Okamoto and K. Kamachi, J. Mater. Sci., **22**, 2702-2706 (1987).
9. ASM Committee, Metals Handbook (9th Ed.), American Society for Metals, Metals Park, Ohio, **2**, 708-830 (1982).
10. Smithells Metals Reference Book (7th Ed.), E. A. Brandes and G. B. Brook, Hartnolls Ltd., Oxford, 14-1 (1992).
11. 박성계, 김지순, 한국분말야금학회지, **4** (3), 196-204 (1997).
12. T. Okamoto and K. Suganuma, 日本複合材料學會誌, **12** (4), 177-183 (1986).
13. K. Suganuma, T. Okamoto, and M. Koizumi, Comm. Am. Ceram. Soc., Dec., 1587 (1985).
14. K. Suganuma, T. Okamoto, and M. Koizumi, Ame. Rev. Met., **18**, 1587. (1987).
15. 이우천, 대한금속학회지, **33** (8), 1036-1039 (1995).