

Si₃N₄/SM45C 접합부의 응력해석 및 파괴특성

김기성*
(동서울대학 기계과)

정남용
(승실대학교 기계공학과)

Fracture Characteristics and Stress Analysis of Si₃N₄/SM45C Joint

K. S. Kim (Dongseoul College) N. Y. Chung (Soongsil Univ.)

Abstract

Recently, the uses of ceramic/metal bonded joints, resin/metal joints, adhesive joints, composite materials which are composed of dissimilar materials have increased in various industry fields. Since the ceramic/metal bonded joints material is made at a high temperature, residual stress distributions due to differences in material properties were investigated by varying material parameters. The two dimensional finite element analysis was performed to study residual stress distribution in Si₃N₄/SM45C bonded joint with a copper interlayer between the silicon nitride(Si₃N₄) and the structural carbon steel(SM45C) and 4-point bending tests were carried out under room temperature. Fracture surface and crack propagation path were observed using scanning electron microscope and characteristics of its fracture was discussed.

Keywords : Ceramic/Metal Bonded Joints(세라믹/금속접합), Finite Element Method(유한요소법), Fracture Surface(파단면), 4-Point Bending Test(4점굽힘시험), Crack Propagation Path(균열진전경로) Fracture Characteristics(파괴특성)

1. 서 론

최근 파인 세라믹과 같은 신소재 개발과 함께 이들에 대한 이용 분야를 확대시키는 방안으로 세라믹과 금속간의 이종재 접합에 큰 관심이 집중되고 있다. 기계구조용 파인 세라믹은 내열성, 내마모성, 내식성에 탁월한 특성을 가지는 반면 충격강도가 낮고, 가공성에 치명적인 결점을 지니고 있기 때문에 각종 열기관용 부품이나 산업용 기기의 부품⁽¹⁾으로 활용하기 위해서는 충격강도가 높고 인성이 풍부한 금속재료와의 접합이 중요시되고 있다. 일반적으로 세라믹과 금속의 접합은 연성금속인 구리를 중간재로 사용하며, Cusil ABA 활성금속 브레이징 합금을 이용한 접합을 실시하고 있다. 그러나 이러한 접합은 재료의 성질이 서로 다른 이종재료간의 접합이므로

접합후 냉각하는 과정에서 선팅장계수 차이로 인한 접합계면에 잔류응력^(2~3)이 집중적으로 발생이 될 뿐 아니라 불균일한 변형 형태^(4~5)가 발생하게 되어 접합강도에 영향을 미치게 된다. 따라서 접합강도를 높이기 위해서는 접합체의 잔류응력의 크기와 분포에 대한 정확한 파악이 선행되어야 접합강도의 향상과 신뢰성⁽⁶⁾을 확보할 수 있다. 본 연구에서는 유한요소법을 사용하여 중간재의 두께변화 및 온도차에 의한 잔류응분포와 작용하중에 의한 응력분포를 계산하고 또한 활성금속 브레이징 방법으로 질화구소와 구조용 탄소강을 접합한 접합체에 4점굽힘시험을 실시하여 Si₃N₄/Cu/SM45C 접합체의 정량적인 강도평가와 파단경로 및 파면해석을 통하여 파괴특성을 검토하고자 한다.

2. 접합재의 해석모델 및 해석방법

접합재의 시험편은 가압소결하여 만든 질화규소 (Si_3N_4)와 구조용탄소강(SM45C)을 사용하고, 중간재는 구리(Cu)를 이용하였다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같고, 각 재료의 물성치는 Table 1에 나타내었다. Si_3N_4 와 SM45C 접합체에 대한 응력분포를 예측하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 요소분할은 8절점 등매개요소를 사용하여 총 요소수 569개, 총 절점수 1789개로 하고, 그 형상은 Fig. 2에 나타내었다.

특히 접합계면과 모재의 자유표면 부근에서는 잔류응력에 대한 변화가 클 것으로 예측되므로 미세하게 분할하였다. 접합 후에 온도는 일정하게 냉각되므로 접합체를 구성하는 각 재료의 온도변화에 따른 열, 기계적 특성의 변화가 없는 가정하에서 계산을 하였다. 또한 접합시 형성되는 계면 반응층과 필러 메탈(filier metal)은 중간재 두께에 비하여 매우 얇을 뿐 만 아니라, 접합온도에서 필러 메탈은 강도를 갖지 않기 때문에 그 부분에 대한 해석을 고려하지 않았다. 본 연구에서는 냉각과정에서 필러메탈이 응고하여 강도를 갖기 시작하는 800°C 와 500°C , 300°C 로 해석을 실시하였으며, 질화규소와 탄소강 사이에 중간층이 있는 경우와 중간층이 없는 경우에 대해 각각 접합체의 열응력을 해석하고, 이를 비교 검토하였다. 또한 중간재의 변화에 따른 응력분포를 확인하기 위하여 중간재인 구리를 0.2mm, 0.5mm, 1.0mm 간격으로 변화 시켜가면서 해석을 실시하였다.

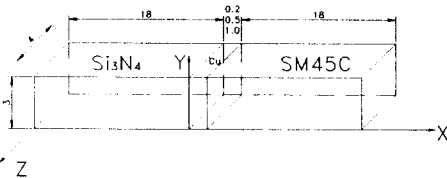


Fig. 1 Configuration of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint specimen

Table 1 Mechanical and physical properties of materials

Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio ν	Thermal expan.coef. ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)
Si_3N_4	304	0.27	3.0
SM45C	206	0.30	12.0
Cu	108	0.33	17.7



Fig. 2 Mesh patterns for model of FEM analysis

3. 접합잔류응력의 해석결과 및 고찰

3.1 접합층이 없는 경우

온도변화에 따른 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ 접합체에 X축 방향(계면수직방향)에 대한 잔류응력분포를 Fig. 3에 나타내었다. 이때 접합온도차가 300°C , 500°C , 800°C 로 증가함에 따라 질화규소측의 X축 방향의 자유면에서는 인장잔류응력이 발생되나 금속측 자유면에서는 압축잔류응력이 나타나고 있다. 또한 접합체의 접합온도차가 증가함에 따라 X축 방향의 자유면에서는 잔류응력은 증가하는 경향을 보이고 있고, 접합계면 근방에서 불연속으로 변화하고 있음을 알 수 있다. 그리고 세라믹측에서의 최대 인장잔류응력은 계면에서 세라믹쪽으로 0.375mm 떨어진 위치에서 최대값을 나타내고 있다.

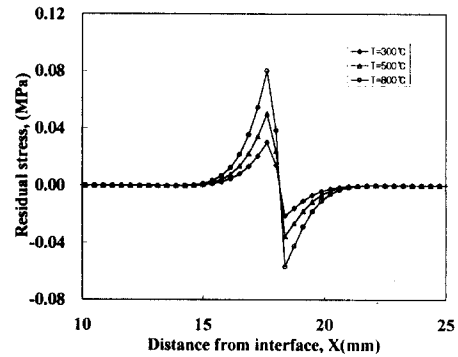


Fig. 3 Distribution of residual stress along to the x-axis direction in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ bonded joint

Fig. 4와 Fig. 5는 접합계면(Y축 방향)에 대한 잔류응력분포를 나타낸 것으로 접합온도차의 변화에 따른 세라믹측 계면의 수직응력과 전단응력 분포를 나타내고 있다. 이때 접합온도차가 증가함에 따라 수직응력과 전단응력은 증가하는 경향을 보이고 있고, 특히 접합계면단에서 잔류응력이 가장 크게 나타나고 있으며, 계면중앙부근에서의 수직응력은 압축잔류응력이 발생되지만 전단응력은 거의 존재하지 않음을 알 수 있다.

$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ 를 800°C 로 접합한 시험편에 4점압입하중이 20N, 50N, 100N 작용할 때 X축

방향에 대한 응력분포를 Fig. 6에 나타내고 있다. 이때 작용하중이 증가함에 따라 X축 방향에 대한 응력은 큰 폭으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히 작용하중이 증가할수록 접합계면에서의 응력 변화가 크게 일어나고 있음을 확인할 수 있었다.

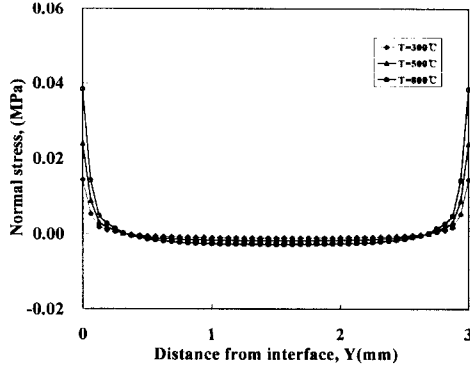


Fig. 4 Distribution of normal stress along to the Y-axis direction in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ bonded joint

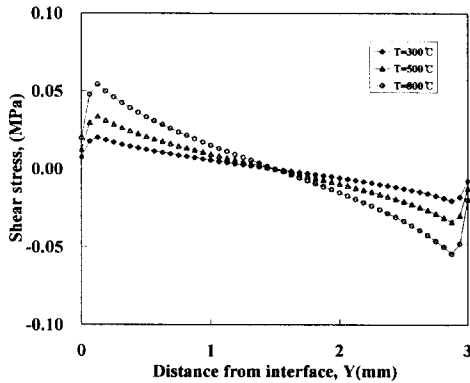


Fig. 5 Distribution of shear stress along to the Y-axis direction in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ bonded joint

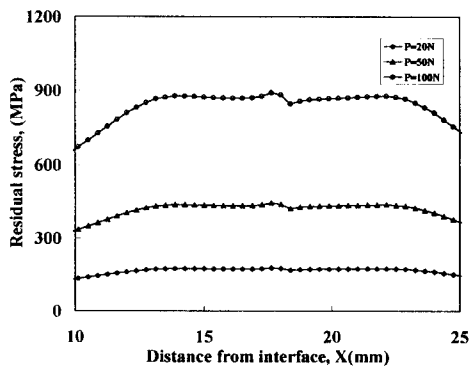


Fig. 6 Distribution of residual stress along to the x-axis direction in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ bonded joint ($\Delta T=800^\circ\text{C}$)

3.2 접합층이 있는 경우

중간재의 두께(h)를 0.2mm 접합온도차를 300°C, 500°C, 800°C 변화시킨 시험편에 X축 방향(계면 수직방향)에 대한 잔류응력분포를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 질화규소축 X축 방향의 잔류응력과 탄소강축 X축 방향의 잔류응력은 시험편의 중심에 대하여 거의 점대칭으로 분포되어 있고, 계면 부근에서는 불연속적으로 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한 중간재인 구리의 경우에는 압축응력을 보이고 있으며, 그 값은 탄소강의 경우 보다 크게 나타나고 있다. 특히 접합계면으로부터 질화규소축으로 조금 떨어진 자유면에서 축방향 응력이 최대로 되고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향은 4점 굽힘시험 결과를 나타낸 Fig. 11(a),(b),(c)의 균열 발생 양상과 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. X축 방향의 응력분포에 나타난 바와같이 중간재가 있는 경우와 중간재가 없는 경우와 비교하면 오히려 중간재가 없는 경우 응력값이 작게 나타나고 있다. 이는 중간재를 사용하면 자유면보다 접합계면의 응력이 완화되어 접합강도를 증가시키는 것을 알 수 있다. Fig. 8은 접합온도차를 800°C로 일정하게 하고 중간재의 두께를 0.2mm, 0.5mm, 1.0mm로 변화시킬 때 X축 방향의 자유면에 대한 응력분포를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 중간재의 두께가 0.2mm인 경우 응력값이 가장 작게 나타났으며 중간재의 두께가 증가함에 따라 자유면에 대한 응력값은 증가하고 있다.

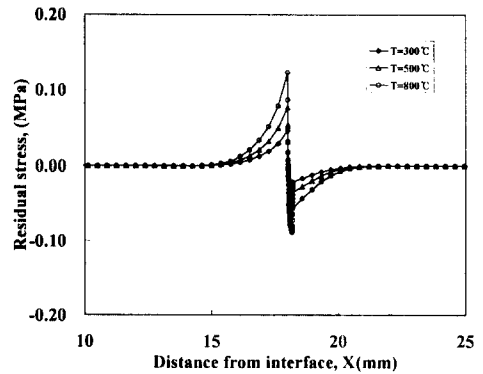


Fig. 7 Distribution of residual stress along to the x-axis direction in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint ($h=0.2\text{mm}$)

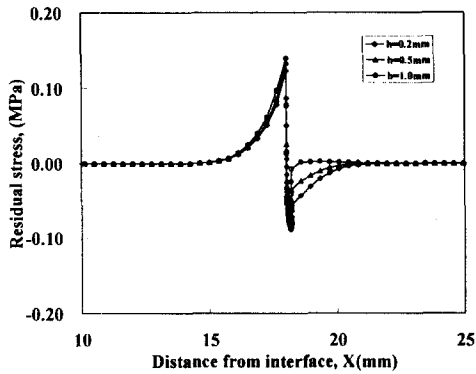


Fig. 8 Distribution of residual stress along to the x-axis direction in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint($\Delta T=800^\circ\text{C}$)

따라서 세라믹/금속의 접합에 있어서 응력을 완화시키고 접합강도를 향상 시키기 위해서는 중간재의 두께를 0.2mm로 사용하는 것이 바람직하다.

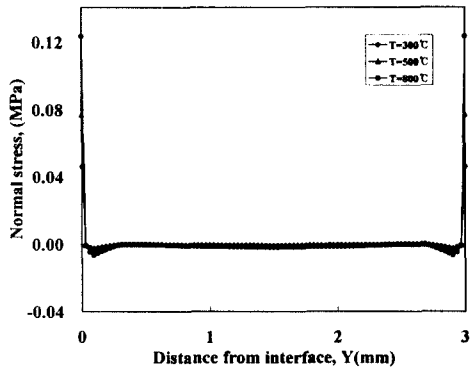


Fig. 9 Distribution of normal stress along to the Y-axis direction in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint($h=0.2\text{mm}$)

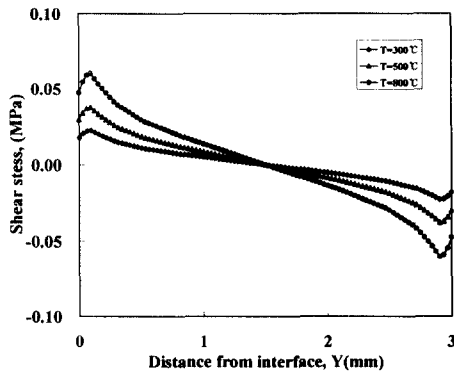


Fig. 10 Distribution of shear stress along to the Y-axis direction in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint($h=0.2\text{mm}$)

Fig. 9와 Fig. 10은 중간재의 두께가 0.2mm, 접합온도차를 300°C, 500°C, 800°C로 변화시킬 때 접합계면(Y축방향)에 대한 잔류응력분포를 나타낸 것으로 접합온도차의 변화에 따른 세라믹측 계면의 수직응력과 전단응력분포를 나타내고 있다.

접합온도차가 증가함에 따라 수직응력과 전단응력은 증가하는 경향을 보이고 있으며, 중간재가 없는 경우에 비하여 응력값이 많이 완화되고 있음을 알 수 있다.

4. 실험

4.1 시험편의 제작 및 실험 방법

본 실험에 사용된 세라믹 재료는 고온고압 소결로(Astro, HP-3560, U.S.A)와 고온 분위기 소결로를 사용하여 질화붕소(Boron Nitride)분말을 내장한 흑연 몰드에 약 18g의 분말을 넣고 1900°C 온도에서 30MPa의 압력으로 15분간 질소 분위기하에서 열간 가압 소결하여 만든 질화규소(Si_3N_4)이고, 금속재료는 구조용탄소강(SM45C)이며 이를 활성금속법으로 상호 접합하였다. 접합잔류응력을 완화시키기 위한 목적으로 사용된 중간재로는 0.2mm 두께의 순도 99.6% 이상의 전해동(Cu)을 사용하였고, 활성 금속 브레이징 합금은 50 μm 두께의 63.5Ag-34.5Cu-2Ti wt% 합금인 Cusil ABA(GTE Wesgo Co.)를 이용하였다.

이때 질화규소의 접합표면은 거칠기가 1 μm , 탄소강은 0.05 μm 이하가 되도록 다목적 절단연삭기(MX-833, Maruto, Japan)를 사용하여 연마하였다. 중간재인 구리는 표면의 산화막을 제거하기 위하여 1200메시의 SiC를 사용하여 연삭하였다. 질화규소와 탄소강을 접합하기 위하여 고온고압 소결로를 사용하여 접합조건은 10^{-5} torr 이하의 진공상태에서 800°C로 10분간 유지하여 접합이 이루어 지도록 하였다. 이때 승온속도 5.3°C/min, 냉각속도는 5°C/min이 되도록 하였다. 접합된 시험편의 크기는 각각 3mm×4mm×18mm로 하였고, 초기 계면균열 길이를 0.5mm, 1.0mm로 균열폭은 0.15mm가 되도록 다이아몬드 블레이드를 사용하여 가공하였다.

$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체에 대한 강도실험은 각각 3개의 시험편에 대하여 4점 굽힘시험법⁽⁷⁾으로 상온에서 실시하였다. 시험기는 만능재료시험기(Instron 4206)를 사용하였으며, 이때 정적하중 속도는 0.2mm/min 로 하였다.

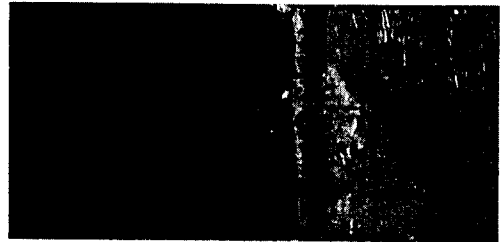
또한 4점 굽힘시험 후 파괴특성을 관찰하기 위하여 육안 또는 확대경으로 파단된 시험편 전체를 파악한 다음 광학현미경(Measure Scope 20, Nikon Co.)으로 파괴발생 원인과 균열의 진전경로를 조사하였다. 그리고 반응접합계면에서 접합계면에 형성되는 반응층을 관찰하기 위하여 경계면을 $3 \times 4 \times 4\text{mm}$ 의 크기로 절단한 시험편을 30, 10, 6, $1\mu\text{m}$ 의 다이아몬드 현탁액을 사용하여 경면연마기(Buehler Co., Automat 2, U.S.A)로 연마한 후 용융 NaOH 용액에서 30~120초간 화학에칭 처리를 하여 주사현미경(Topcon, Japan)으로 관찰하였다.

4.2 실험결과 및 고찰

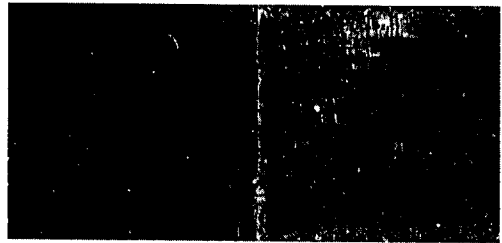
4점 굽힘실험 결과 Si_3N_4 자체에 대한 접합강도는 679MPa이고, $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체의 접합강도는 242MPa로 나타났다. 이와같이 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체의 접합강도가 Si_3N_4 자체 접합강도 보다 적게 나타나는 이유는 브레이징 후 냉각시 온도에 의한 열팽창계수의 차이로 인하여 접합계면에 잔류응력이 발생되기 때문이다.

Fig. 11(a),(b),(c)와 (d)는 무균열체에 대한 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체와 Si_3N_4 자체의 균열진전경로를 나타낸 것이다. 그림(a)는 질화규소와 구리의 접합계면 근방에서 균열이 발생하여 질화규소측으로 진행하다 계면으로 천이한 후 최종 파단은 질화규소측에서 파괴되는 형태를 보이고 있다. 그림(b)는 질화규소에서 균열이 시작되어 질화규소측으로 어느 정도 균열이 진전한 후 계면을 따라 파괴되는 양상을 보여주고 있다. 이러한 파괴경로의 변화는 4점 굽힘강도 실험시 접합체에 작용하는 하중에 의한 응력집중의 영향과 접합체내에 발생하는 잔류응력의 중첩효과로 금속측의 수축변형과 질화규소의 취성에 의한 영향으로 생각되며, 접합강도는 그림(a)의 형태가 그림(b)의 경우 보다 크

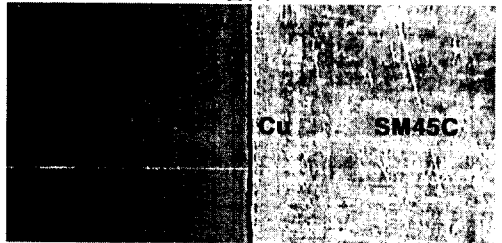
게 나타났다. 또한 그림(c)는 계면을 따라 파괴가 진행되는 양상을 보이고 있는데, 이는 질화규소와 구리의 접합강도가 약할 때 계면파괴 일어나는 것을 알 수 있다. 그림에서와 같이 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체의 파괴는 질화규소에서 시작되어 질화규소측으로 진전하다가 결국 파괴가 일어나므로 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체에 대한 파괴는 중간재의 접합조건에 따른 영향도 중요하나, 세라믹재에 인성을 부여할 수 있는 제조방법에 대한 고려와 함께 세라믹 자체에 대한 정량적 강도평가가 요구되고 있다.



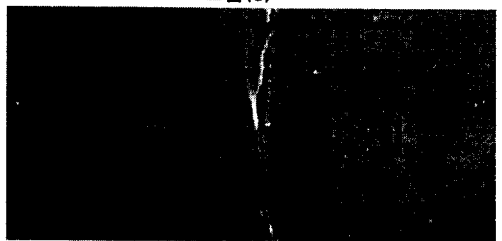
그림(a)



그림(b)



그림(c)



그림(d)

Fig. 11 Crack propagation path by experiment in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint

Fig. 12는 사용하중에 대한 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체의 강도평가를 위하여 4점 굽힘하중에 의한 응력분포를 나타내고 있다.



Fig. 12 Stress distribution of 4-point bending in $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint

Fig. 13은 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체의 계면을 200배 확대하여 촬영한 사진을 나타낸 것이다. 이때 접합온도가 새로 형성되는 반응물의 용융점보다 높은 경우 계면에서 액상이 형성되며 이는 질화규소와의 접촉을 향상시키고 또한 반응을 촉진 시키게 된다. 따라서 중간재 Cu에 Ag의 고용 및 그에 따른 미세구조의 변화는 세라믹과 금속의 접합강도를 증가시킬 것으로 생각된다. 이와 같은 화학반응은 세라믹과 금속의 접합재에서 관찰되는데 일반적인 브레이징의 경우 브레이징 온도에서 필러 메탈(filler metal)은 녹게된다. 따라서 반응층이 형성된 중간재인 구리의 기계적 특성변화에 대해서는 수치해석에서는 다루지 않았으나 일정 두께 이상의 구리를 중간재로 사용한 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체에서는 실제 질화규소에 발생하는 잔류응력이 증가되어 접합강도가 감소된 것으로 생각된다.

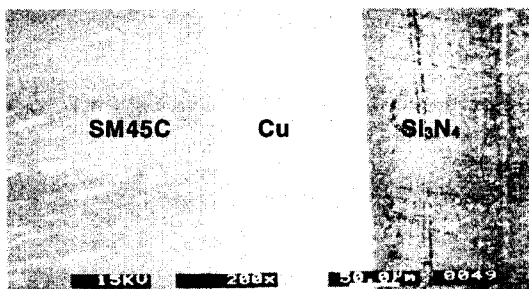


Fig. 13 SEM at the interface of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ bonded joint

5. 결 론

$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{Cu}/\text{SM45C}$ 접합체에 대한 X방향의 자유면과 접합계면에서의 응력해석을 실시하고 활성금속 브레이징 방법으로 접합된 시험편에 4점 굽힘실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연성금속인 구리를 중간재로 사용한 접합체에서는 질화규소에 발생하는 잔류응력이 감소되어 접합체의 접합강도가 증가되었으며 중간재의 두께가 0.2mm일 때 최대접합강도가 나타났다.
- (2) $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ 접합체의 최대인장잔류응력은 질화규소측의 X축 방향으로 0.375mm 떨어진 지점에서 발생되었다.
- (3) $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ 접합체에 대한 4점 굽힘실험 결과 대부분 세라믹재에서 파괴가 일어나므로 세라믹/금속 접합체에 대하여 보다 정확한 평가를 위해서는 세라믹재에 인성을 부여할수 있는 제조방법과 그에 따른 정량적인 평가가 요구되어 진다.
- (4) $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SM45C}$ 접합체의 파면형태와 파면해석을 통하여 질화규소 접합부재의 미세파괴 기구를 규명하였다.

참고문헌

- (1) Rainhart, T. J., "Use of Structural Adhesives by the U.S Air Force", Adhesive Age, Vol 10, No. 5, pp. 20-25, 1981.
- (2) Seo, K., Kusaka, M., "Study on the Thermal Stress at Ceramics-Metal Joint," JSME, Vol. 55, No. 510, pp. 312~317, 1989.
- (3) Luo, F., "FEM Analysis of Thermal Cycle Effect on Residual Stresses of Ceramics/Metal Joints," JSME, Vol. 60, No. 569, pp. 59~64, 1994.
- (4) Yamada, K., "Thermal Stresses and Their ingularities due to Temperature Discontinuity on the Interface of Dissimilar materials," JSME, Vol. 62, No. 597, pp. 1197~1203, 1994.
- (5) Francois, H., "Analysis of the Failure of Ceramics Due to Subcritical Crack Growth Tension," Journal of Applied Mechanics, Vol. 42, pp. 93~98, 1975.
- (6) 김기성, 김희송, 정남용, "세라믹/금속 접합체에 대한 정적강도평가", 한국자동차공학회 춘계학술대회 논문집, 제II권, pp. 489-495, 1996.
- (7) JIS, セラミックスの曲げ強さ試験方法, R1601, pp.275-276, 1981.