

세라믹/금속접합재의 고온피로에 따른 접합계면의 응력분포

박 영 철* · 허 선 철** · 김 현 수* · 윤 두 표** · 김 광 영***
(96년 2월 12일 접수)

Stress Distribution of Near the Interface on High Temperature Fatigue in Ceramic/Metal Bonded Joints

Young-Chul Park* · Sun-Chul Hue** · Hyun-Su Kim* · Doo-Pyo Yun** · Kwang-Young Kim***

Key Words : Ceramic/Metal Joint(세라믹/금속접합), Residual Stress Distribution(잔류응력분포), Finite Element Method(유한요소법), Elastoplastic Analysis(탄소성 해석)

Abstract

The ceramic has various high mechanical properties such as heat, abrasion, corrosion resistance and high temperature strength compared with metal. It also has low specific weight, low thermal expansibility, low thermal conductivity. However, it could not be used as structural material since it is brittle and difficult for the machining. Therefore, there have been many researches to attempt to join ceramic with metal which is full of ductility in order to compensate the weakness of ceramic.

The problem is that residual stress develops around the joint area while the ceramic/metal joint material is cooled from high joining temperature to room temperature due to remarkable difference of thermal expansion coefficients between ceramic and metal. Especially, the residual stress at both edges of the specimen reduces the strength of joint to a large amount by forming a singular stress field.

In this study, two dimensional finite element method is attempted for the thermal elastic analysis. The joint residual stress of ceramic/metal developed in the cooling process is investigated and the change of joint residual stress resulted from the repetitive heat cycle is also examined.

In addition, it is attempted to clarify the joint stress distribution of the case of tensile load and of the case of superposition of residual stress and actual loading stress.

* 정회원 동아대학교 공과대학 기계공학과

** 동아대학교 대학원 기계공학과

*** 한국기계연구원

1. 서론

최근 산업의 발달로 인하여 우수한 성능의 신소재 개발의 필요성이 절실히 요구되어지고 있으며, 이러한 신소재로서 탄화규소, 질화규소등의 세라믹 재료가 크게 주목받고 있다. 특히, 세라믹은 내열성, 내마모성, 내식성등이 금속재료에 비해 뛰어나고 저비중, 저열팽창성, 저열전도성 및 고온강도등 우수한 특성을 지니고 있어서, 이미 집적회로기판, 압전소자, 센서, 절삭공구, 단열재 등에 실용화되고 있으며, 가스터빈, 터보과급기등 경량, 고강도 및 내열성이 함께 요구되어지는 구조물에 금속재료를 대신해서 세라믹의 적용이 활발히 검토되어 지고 있다^{1)~4)}.

그러나, 세라믹은 이러한 우수한 특성을 지니고 있는 반면에 취성적이고, 가공이 어렵기 때문에 일반 구조용 재료로서 사용하기에는 대단히 어렵다. 따라서 이러한 세라믹 재료를 구조용 재료로서 사용하기 위해서는 세라믹의 단점을 보완할 수 있는 비교적 인성이 풍부한 금속과의 접합이 필요하며 이에 대한 많은 연구가 수행되고 있다^{5)~10)}.

세라믹과 금속을 접합하는 방법으로는 확산접합, 증착접합, 기계적접합 등의 방법이 있으며, 이 중에서 활성 브레이징재를 사용한 확산접합이 일반적으로 많이 이용되고 있다. 그러나, 확산접합은 고온에서 접합되기 때문에 접합 후 고온에서 실온까지 냉각되는 과정에서 양재료의 열팽창계수의 차이로 인하여 접합계면 근방에서 접합 잔류응력이 발생하며 이와같이 발생된 접합 잔류응력은 접합재의 강도에 큰 영향을 미쳐, 접합재의 강도를 크게 저하시킨다^{11)~14)}.

또한, 부하하중에 의하여서도 시험편의 계면근방에는 응력특이성을 나타낼 뿐만 아니라, 부하하중과 접합 잔류응력의 중첩작용에 의하여 응력집중은 더욱 더 상승 작용을 하여 접합강도에 큰 영향을 미칠것으로 생각되어 진다.

따라서, 세라믹/금속접합재의 파단강도를 정확히 파악하기 위해서는 이와같은 접합계면에서의 응력상태를 정확하게 파악하는 것이 무엇보다도 필요하다. 접합계면에서의 응력상태를 평가하는 방법으로는 초음파법, X선 회절법, IF법등의 실험적 평

가방법과^{15),16)} 유한요소법, 경계요소법등의 수치해석에 의한 방법이^{17),18)} 있으나 유한요소법을 이용한 수치해석 방법이 보다 간편하게 응력분포를 예측할 수 있기 때문에 많이 이용되어지고 있다.

본 연구에서는 2차원 열탄소성 유한요소 해석을 통하여 세라믹/금속접합재의 접합 후 냉각과정에서 발생하는 접합 잔류응력을 해석하고, 이와같이 발생한 잔류응력이 반복 열사이클 부가에 의하여 어떻게 변화하는가에 대하여 검토하였다. 뿐만 아니라, 시험편에 인장력이 부하되었을때, 이와같은 잔류응력과 인장력이 중첩되었을 경우의 세라믹/금속접합재의 계면근방의 응력상태에 대하여 보다 명확히 규명하였다.

2. 해석모델 및 해석방법

본 연구에서는 동(Cu)을 중간재로 사용한 상업소결 질화규소(Si_3N_4)와 오스테나이트계 스테인레스(STS304)의 접합재(Si_3N_4 /STS304)를 시험편으로 하여 범용구조용 해석프로그램 ANSYS를 이용하여 탄소성 유한요소해석을 하였다. 해석에 이용한 시험편의 형상 및 치수는 Fig.1과 같고 기계적 특성은 Table 1에 나타낸 바와 같다.

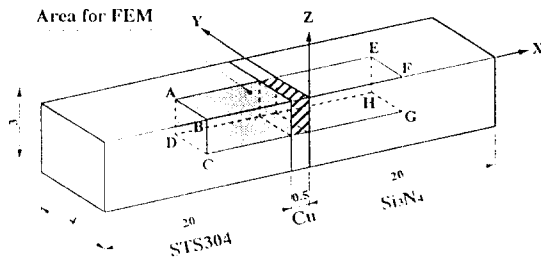


Fig. 1 Configuration of specimen(dimensions in mm)

Table 1 Material properties of specimen

	Si_3N_4	Cu	STS304
E(GPa)	304	108	193
ν	0.27	0.33	0.3
α (/K)	3.06×10^{-6}	17.7×10^{-6}	16.5×10^{-6}

2-1. 접합 잔류응력 및 열사이클 해석

세라믹과 금속의 접합은 고온(1100℃)에서 수행하며, 이때 브레이징재는 액체상태이므로 금속과 세라믹 모두 자유로이 열변형하여 응력이 발생하지 않는다. 그러나, 냉각이 진행되어 브레이징재가 강도를 갖기 시작하면 열팽창계수의 차이로 인하여 세라믹과 금속이 접합면에서 열변형을 서로 구속하기 때문에 응력이 발생한다. 따라서 본 연구에서는 브레이징재가 강도를 갖기 시작하는 온도를 800K로 하고, 이 온도로 부터 점차적으로 10K씩 냉각하면서 실온(300K)까지 냉각하였을 경우 발생하는 잔류응력에 대하여 해석하였다. 그 후 473K, 573K, 673K, 773K까지 가열한 후 300K까지 냉각하는 열사이클을 각각 1회 ~ 10회 부가한 경우의 잔류응력 변화에 대하여 해석하였다.

이때 가열·냉각 온도스텝은 10K씩으로 하였고, 온도변화는 충분히 완만하게 일어나기 때문에 비정상 온도분포의 영향은 없는 것으로 가정하였다. 이때, 접합재의 잔류응력은 실제로 3차원 분포를 나타내지만 3차원해석은 많은 시간을 필요로 하고, 해석에 많은 어려움이 따른다. 따라서, 본 연구에서는 동의 경우 열사이클 부하에 의해 소성변형을 하지만, 파괴강도에 직접 영향을 미치는 세라믹의 경우 탄성변형을 하기 때문에 해석에는 2차원 평면응력과 평면변형률 모델의 중첩모델인 2차원 중첩모델⁽⁹⁾을 이용하여 2차원 해석을 하였다.

해석영역은 중심선을 기준으로해서 대칭이므로 시험편 절반에 대하여 해석을 하였으며 탄소성 해

석에 있어서 소성변형률과 응력의 관계는 변형률 증분이론을, 항복조건으로는 Von Mises 항복조건을 이용하였다. 또한, 잔류응력은 계면으로 부터 멀어질수록 감소하여 약 10mm 이상 떨어진 영역에서는 거의 0이 되므로 해석범위는 계면에서 가까운 Fig.1의 빗금친 부분인 계면근방의 표면 ABFE, 측면 BCGF, 그리고 중앙중단면 ADHE를 해석영역으로 하였다. 표면 ABFE와 측면 BCGF는 면의 수직방향 응력이 0이므로 평면응력해석을 하였고, 중단면 ADHE는 면의 수직방향 변형률이 0이기 때문에 평면변형률 해석을 하였다.

Fig.2는 해석에 이용한 요소분할을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 응력이 집중되는 양재료의 접합계면 근방의 요소는 세밀하게 분할하였다. 또한, 요소는 8절점 등방계수요소(8-node isoparametric element)를 이용하였으며, 총 요소수 258개, 총 절점수 839개로 하였고, 최소요소의 x, y 방향 크기는 각각 0.167 mm, 경계조건은 대칭조건을 고려해서 강제운동만 방지하도록 하고, 그 외의 변형은 자유로이 하였다.

Fig.3은 본 연구에 사용한 각 재료의 종탄성계수와 열팽창계수의 온도 의존성 및 동의 항복강도를 나타내고 있다.

2-2. 인장하중 부하

실제로 세라믹/금속접합재의 파괴해석에 있어서 가장 중요하다고 할 수 있는 실사용 상태에서의 접합계면 부근의 응력상태를 정확히 파악하기 위

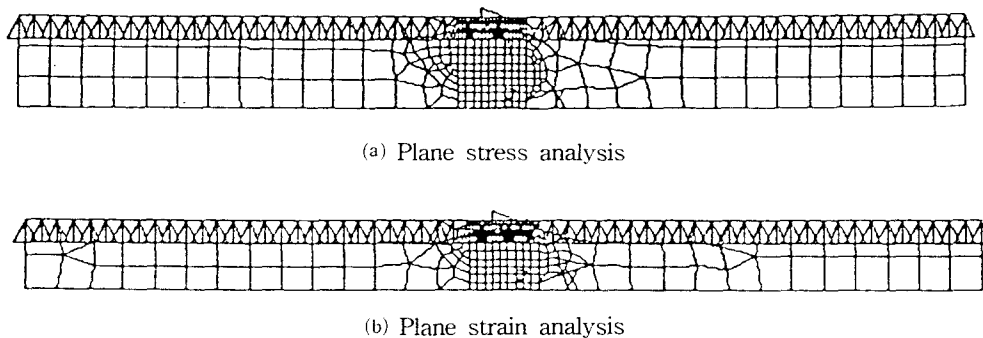
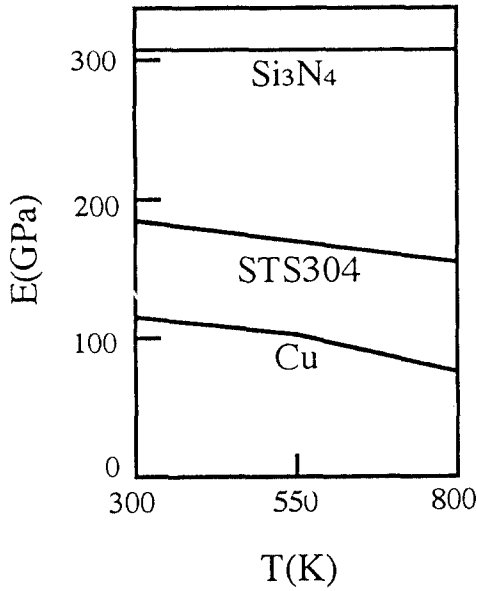
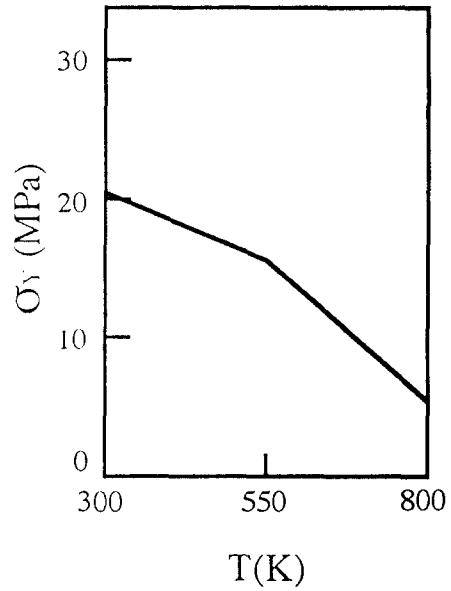


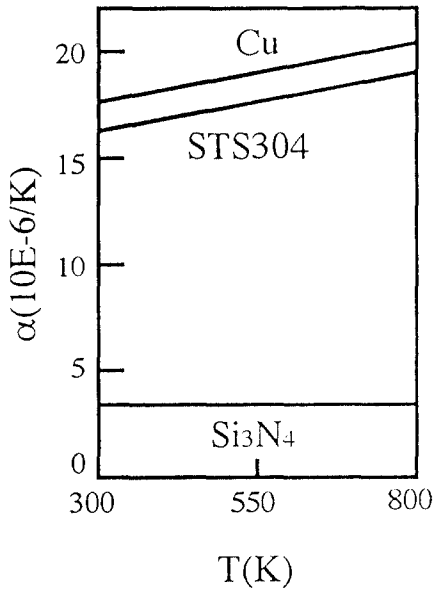
Fig. 2 Mesh model used in FEM analysis



(a) Young's modulus



(c) Yield strength of Cu



(b) Thermal expansion coefficient

Fig. 3 Temperature dependency of material properties

하여 본 연구에서는 인장부하에 의한 접합계면에서의 응력분포 상태에 대하여 검토하였다. 이때, 접합잔류 응력의 영향을 보다 세밀히 분석하기 위하여 접합 잔류응력이 있는 경우와 없는 경우의 두 가지로 나누어서 해석하였다.

뿐만아니라, 실제 세라믹/금속접합재의 사용환경에 보다 가까운 상황을 가정하여 해석하기 위하여 세라믹/금속접합재가 고온환경하에서 응력을 받으면서 반복적으로 사용되는 점을 감안하여 상온에서 고온으로 가열한 후 고온에서 인장력을 받고 난 후 사용이 끝나면 냉각시키는 과정의 고온피로 부하를 가정하여 300K에서 673K까지 가열한 후 인장력을 부하한 다음, 다시 인장력을 제거한 후 냉각하는 과정을 1사이클로 하여 인장력부하와 열 사이클이 병행되는 고온피로 과정을 1~10회까지 반복부하하는 경우에 대하여 해석하였다.

Fig. 4의 (a)는 인장력 부하의 모식도를 나타내고 (b)는 요소분할을 나타낸다. Fig. 4(a)에서 보는 바와 같이 하중은 시험편 전체 형상에서 양 끝단부

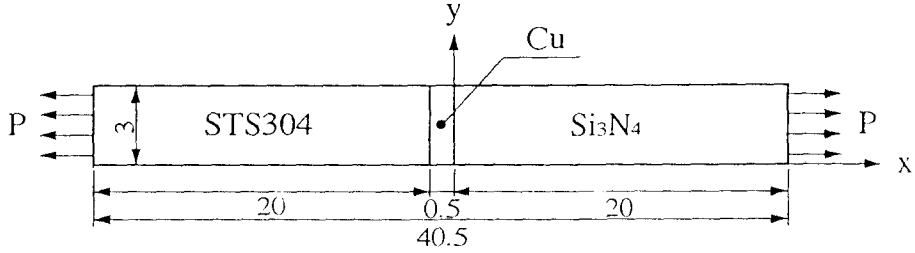


Fig. 4 (a) Geometry of tensile test specimen



Fig. 4 (b) Finite element mesh for tensile test specimen

의 경계면에 표면력(surface force)으로 인장력을 가하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3-1. 접합 잔류응력

Fig. 5는 Fig. 1의 단부선상인 BF선상과 중앙부

인 AE선상에 대한 접합후의 계면 수직방향 잔류응력(σ_x)의 분포를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 세라믹부와 스테인리스부의 잔류응력은 시험편 중심에 대하여 거의 점대칭으로 분포되어 있다.

중앙부(AE선상)와 단부(BF선상)의 잔류응력을 비교하여 보면 중앙부는 세라믹부가 압축 잔류응력을 나타내고, 스테인리스부가 인장 잔류응력을

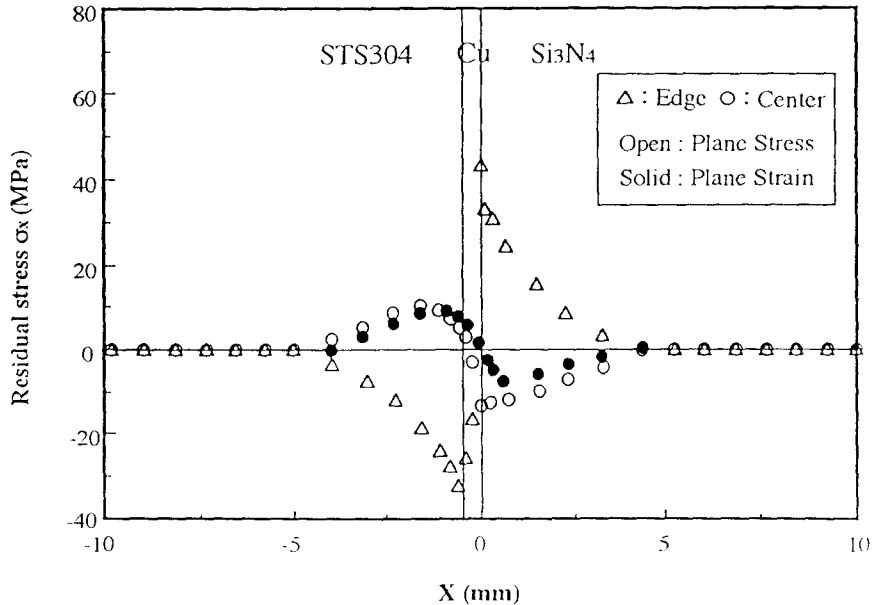


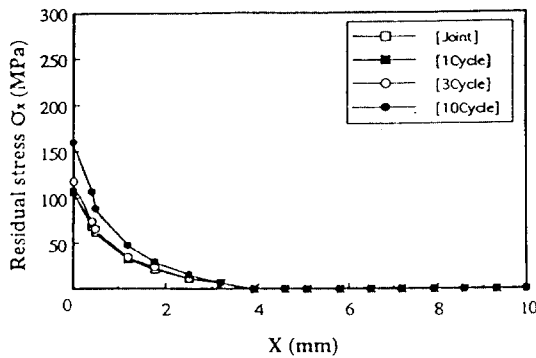
Fig. 5 Distribution of residual stress σ_x in x direction

나타내며, 연속적으로 완만한 분포를 하고 있다. 반면, 단부는 스테인리스부가 압축 잔류응력을 나타내고, 세라믹부가 인장 잔류응력을 나타내며 계면을 경계로 불연속적인 분포를 하고 있으며 이는 瀬尾建二 등이³⁰⁾ 발표한 결과와 일치한다. 그리고, 세라믹부와 스테인리스부 모두 파괴에 직접 관련이 있는 단부선상의 잔류응력 값이 접합계면 근방에서 발생하며, 특히 접합재의 과단강도를 크게 저하시키는 인장잔류응력값의 최대값은 세라믹부의 계면근방에서 발생하는 것으로 보아 접합재의 파괴기점은 접합계면으로 판단되어지며 이는 과단실험 후 파면해석에 의해서 충분히 확인되었다²¹⁾. 따라서, 본 연구에서는 접합재의 과단강도에 직접 영향을 미치는 세라믹부 단부선상의 σ_x 를 중심으로 잔류응력의 해석을 하였다.

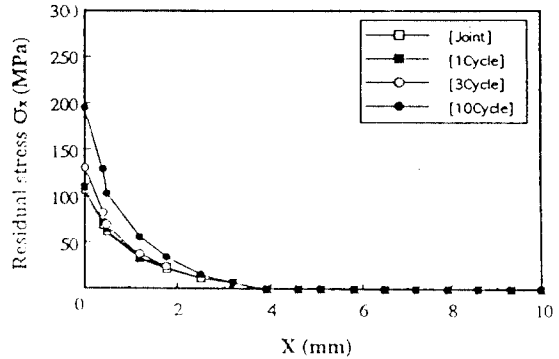
3-2. 열사이클 부가에 따른 접합계면에서의 잔류응력 분포변화

Fig. 6은 접합 후, 각 473K, 573K, 673K, 773K에서 1회, 3회, 10회의 열사이클을 가하였을 때의 접합 잔류응력의 분포를 검토한 결과이다.

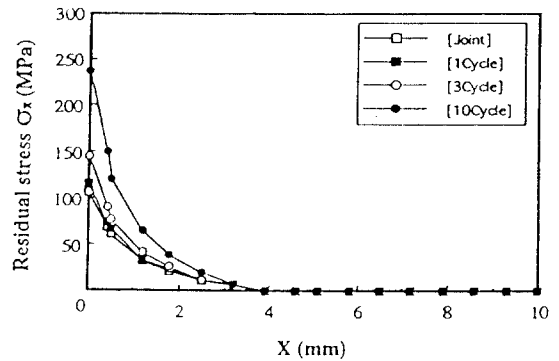
그림에서 보는 바와 같이 부가 열사이클 횟수의 증가에 따라 접합 잔류응력의 분포형태는 거의 변화가 없이 동일한 형상을 가지나 접합 잔류응력의 크기는 부가 사이클의 횟수가 많아짐에 따라 증가하고 있으며, 그 증가량은 열사이클 온도가 높아질수록 커진다는 것을 알 수 있으며, 이는 열사이클 온도가 높을수록 유지시간이 길수록 발생하는



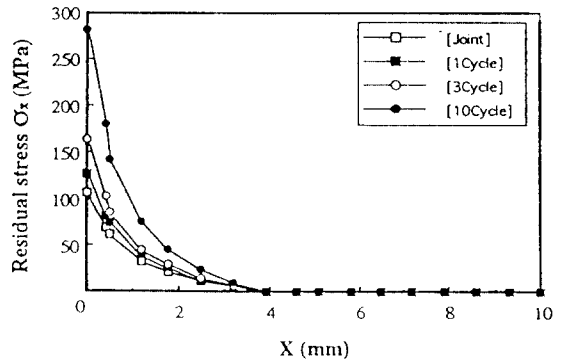
(a)



(b)



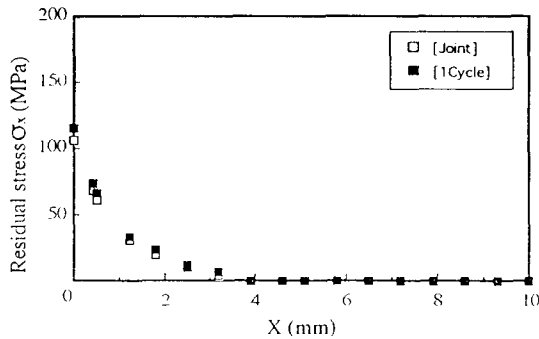
(c)



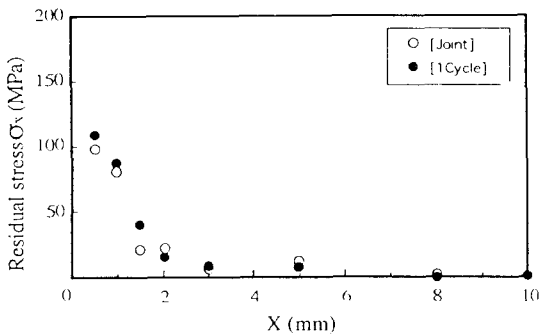
(d)

Fig. 6 Distribution of σ_x along the edge line of ceramics for thermal fatigue cycles
(a) 473K (b) 573K (c) 673K (d) 773K

잔류응력이 높아진다는 일본용접협회의 보고서와 유사한 결과가 얻어진다는 것을 알 수 있었다.²²⁾ 이러한 이론값과 실험값과의 비교를 위하여 Fig.7에 접합 후의 잔류응력값과 1사이클 후의 잔류응력값에 대하여 유한요소해석과 X선측정결과를 비교 검토하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 유한요소해석 결과인 (a)와 X선측정 결과인 (b) 모두 접합 후의 잔류응력값 보다 1사이클 후의 잔류응력값이 각각 증가하고 있다는 것을 알 수 있으며 응력분포형태도 정성적으로 거의 일치한다는 것을 알 수 있다. 따라서 열사이클 해석은 정확하게 해석되었으며 3사이클 이상의 열사이클 실험은 계속적인 연구가 필요하다고 생각된다.



(a) FEM analysis



(b) X-ray measurement

Fig. 7 Distribution of residual stress along the edge line by FEM analysis and X-ray measurement(after joint and 1 cycle)

또한, 열사이클에 따른 잔류응력의 증가 정도를 보다 명확히 검토하기 위하여 파괴의 주요 변수인 세라믹부 계면근방의 최대인장 잔류응력 값을 대표값으로 하여 열사이클에 따른 최대인장 잔류응력 값의 변화를 Fig. 8에 나타내었다.

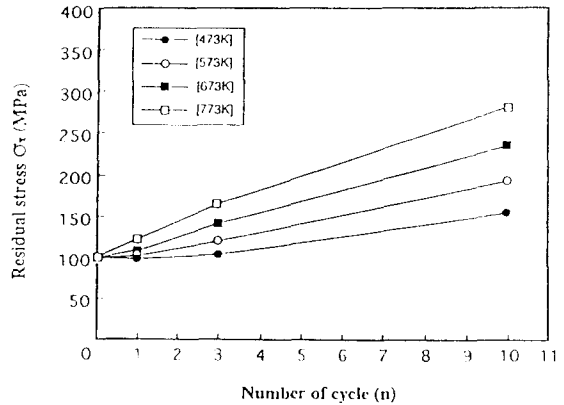
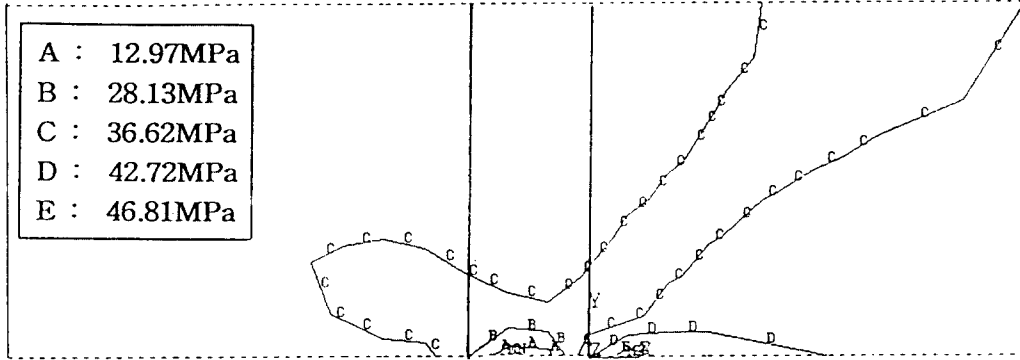


Fig. 8 Relation between the number of cycles and residual stress σ_x at various temperatures

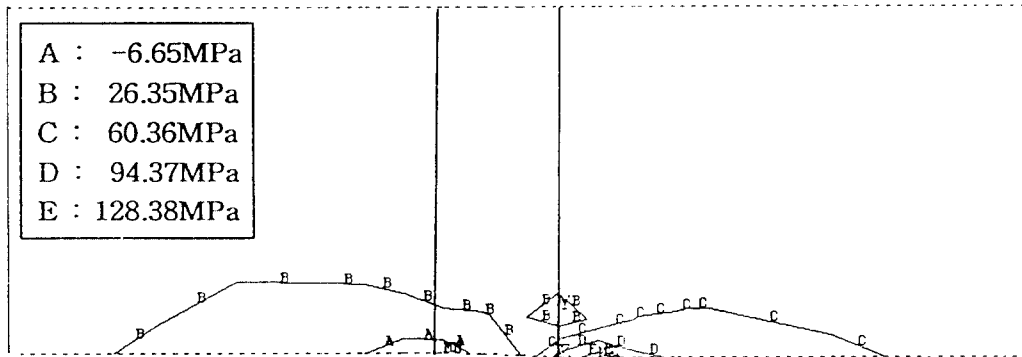
그림에서 보는 바와 같이 모든 온도에서 열사이클 횟수가 증가함에 따라 최대인장 잔류응력 값은 거의 선형적으로 증가하고 있으며, 증가폭은 열사이클온도가 높을수록 커진다는 것을 알 수 있다. 이와같이 열사이클 횟수가 증가함에 따라서 잔류응력이 증가하는 것은, 중간층인 동의 탄소성 특성, 특히 변형을 경화의 영향이라고 생각되어지며 이는 박영철등²³⁾이 연구한 결과와 잘 일치한다. 그리고 증가된 잔류응력은 세라믹/금속접합재의 파단강도를 크게 저하시킬 것으로 사료되며, 따라서 이에 대한 정확한 평가가 실제로 파괴강도해석에 대단히 중요한 자료가 될 수 있을 것으로 생각되어진다.

3-3. 인장부하에 따른 접합계면에서의 응력분포

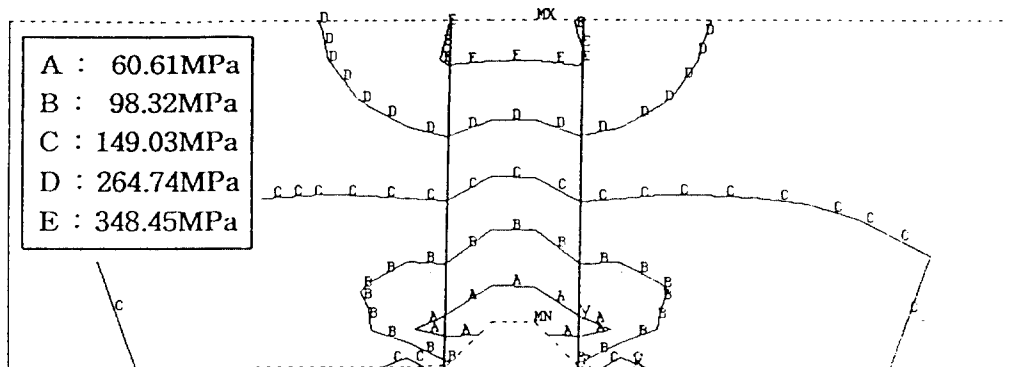
Fig. 9는 인장력부하에 따른 접합재의 접합계면 근방의 등응력 분포선도를 나타내고 있다. 이때 인장력 부하에 미치는 접합 잔류응력의 영향을 보다 명확히 하기 위하여 접합 잔류응력이 없이



(a)



(b)



(c)

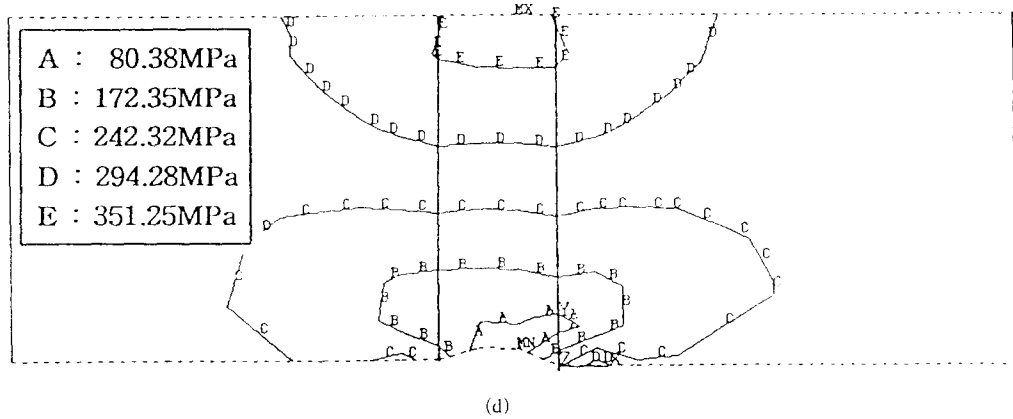


Fig. 9 Distribution of stress σ_x by tensile load((a) without residual stress($p=20N$), (b) with residual stress($p=20N$), (c) without residual stress($p=100N$), (d) with residual stress($p=100N$))

단순 인장력만 부하한 상태의 (a, c)와 미리 접합 잔류응력이 존재하고 있는 상태에서 인장력을 부하한 상태의 (b, d) 두가지로 나누어서 해석하였다. 또한, 인장력부하는 세라믹/금속접합재의 경우 인장강도가 300~400MPa 정도이기 때문에 인장력을 20N에서 100N까지 변화시켜 가하였다. 그림에서 보는 바와 같이 부하하중에 따라 응력 분포형태가 달라져, 하중이 비교적 작은 20N인 경우는 등응력분포선도가 비교적 전체 계면근방에 넓게 분포되어 있고, 최소 인장응력값은 중간재인 동의 단부에서 발생하며 최대 인장응력값은 세라믹부의 계면단부에서 발생하며 栗田政則²⁴⁾의 연구결과와 잘 일치한다. 그러나, 부하하중이 커지면, 그 분포 형태가 다소 달라져 인장력 100N이 부하된 (c), (d)의 경우는 최소인장응력값은 동의 단부선상에서 발생하나, 최대인장응력값은 저하중인 20N의 경우와는 달리 동의 중앙부에서 발생한다는 것을 알 수 있다.

한편, 잔류응력의 유무에 따라서도 응력분포 형태는 크게 변하여 부하하중이 작은 경우에는 접합 잔류응력이 미리 존재한 (b)의 경우 접합 잔류응력이 인장하중과 복합적으로 작용하여 접합 잔류응력이 없는 (a)의 경우보다 최대인장응력이 약 3배 정도 크게 발생된다는 것을 알 수 있다. 이에 반하여 부하하중이 크게 됨에 따라 (c), (d)에서

보는 바와 같이 인장하중이 지배적으로 작용하여 접합잔류응력의 유무와는 관계없이 거의 유사한 응력분포형태와 거의 비슷한 최대인장응력값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

이상의 검토 결과로 부터 비교적 인장부하하중이 작은 경우에는 접합 잔류응력이 접합계면의 응력상태에 큰 영향을 미치지만, 인장부하하중이 커지게 되면 부하인장하중이 지배적으로 작용하여 잔류응력의 영향은 훨씬 줄어든다는 것을 알 수 있다. 또한, 저하중일 경우 파괴에 크게 문제가 되는 최대인장응력이 세라믹부의 계면근방에서 발생하는 것으로 보아 인장력부하에 의해서도 파괴기점은 접합계면 근방의 세라믹부가 될것이라는 것을 예상할 수 있다. 그리고, 고하중일 경우 동의 중앙부에서 최대인장응력이 발생되지만 실제 인장시험을 하는 경우 동부분은 고하중에 의한 소성변형으로 인하여 응력의 둔화 현상이 생기는 반면, 세라믹은 취성재료이므로 응력의 둔화 현상이 생기지 않는다고 생각되어지며, 이는 일본용접협회 보고서의 연구결과와 잘 일치한다.

따라서, 세라믹 접합계면 근방의 인장응력에 의해 파괴기점은 접합계면 근방의 세라믹부가 될것으로 생각되며 이에 관한 검증은 차후 실험적 방법에 의해 검토할 예정이다.

Fig. 10은 Fig. 9의 결과로 부터 세라믹/금속접

합재의 파괴평가에 가장 중요하다고 할 수 있는 최대 인장응력 σ_x 를 중심으로 정리한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 ○의 접합잔류응력이 있는 상태와 ●의 접합잔류응력이 없는 상태의 두 경우 모두 부하 인장력이 증가함에 따라 발생되는 최대인장응력값(σ_x)이 선형적으로 증가하고 있으나, 인장력이 낮은 20, 30, 40N 정도에서는 접합 잔류응력이 미리 존재하는 경우가 접합 잔류응력이 없는 경우 보다 훨씬 큰 값을 나타내고 있으나, 부하 인장력이 커짐에 따라 점차 최대 인장응력의 차가 적어져 60N 부터는 거의 일치하고 있음을 알 수 있다. 이는 저하중일 때는 접합 잔류응력이 인장부하시 접합계면 근방의 최대인장응력의 발생에 큰 영향을 미치나 고하중일 때는 접합잔류응력이 거의 영향을 미치지 못하고 인장부하의 영향만이 지배적으로 작용한다는 것을 보다 명확히 알 수 있다.

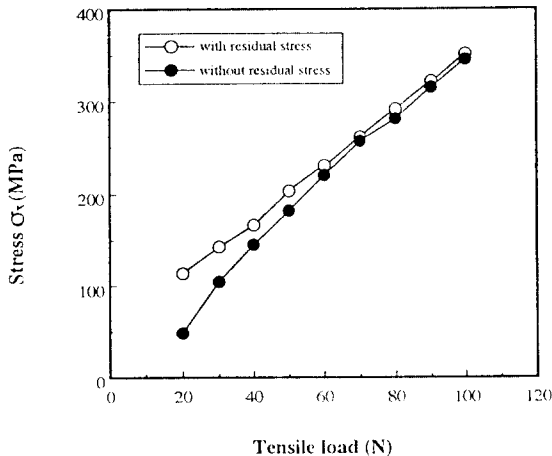


Fig. 10 Relation of maximum tensile stress σ_x and tensile load without residual stress and with residual stress

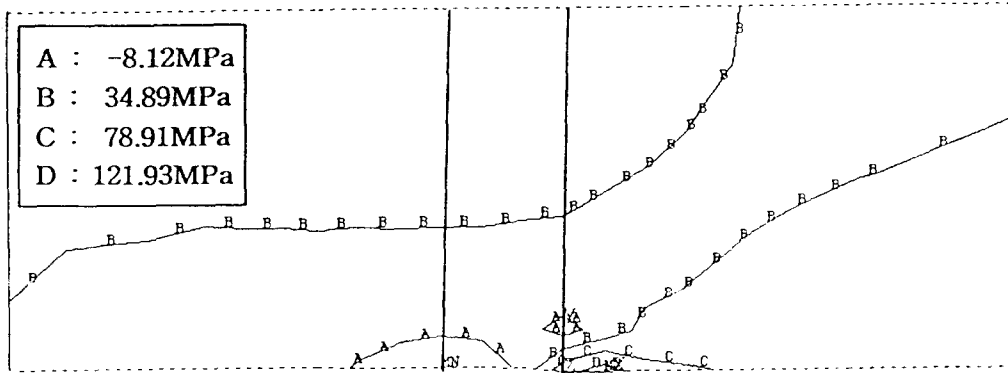
3-4. 고온피로 부가에 따른 접합계면에서의 응력 분포

Fig. 11, 12는 고온피로 부가에 있어서 부하 인장하중에 따른 접합계면 근방의 등응력분포선도의 변화를 검토한 결과이다. 부가하중이 작으면

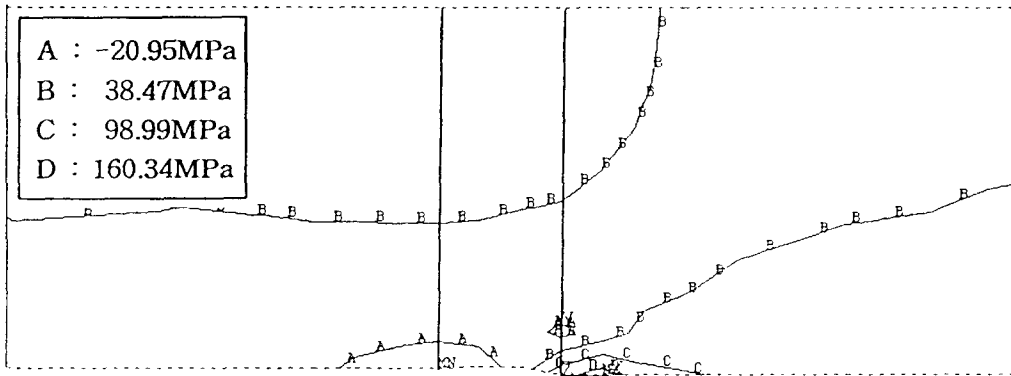
Fig.11에서 보는 바와 같이 최대 인장응력 값의 발생위치가 부하사이클수에 관계없이 세라믹측 계면근방으로 거의 동일한 위치를 나타내며, 최대 압축응력값도 부가 사이클수에 관계없이 스테인리스측 계면근방에서 발생하고 있다는 것을 알 수 있다.

이에 반하여 부하하중이 커짐에 따라 Fig.12에서 보는 바와 같이, 최대인장값의 발생 위치가 비교적 저사이클일 때는 인장부하의 영향으로 세라믹측 계면단부와 동의 중심부근에서 발생되나, 부하사이클이 증가함에 따라 동의 중심부근에서의 최대인장응력은 소멸되고, 세라믹측 계면근방에서만 최대인장응력이 발생된다는 것을 알 수 있다.

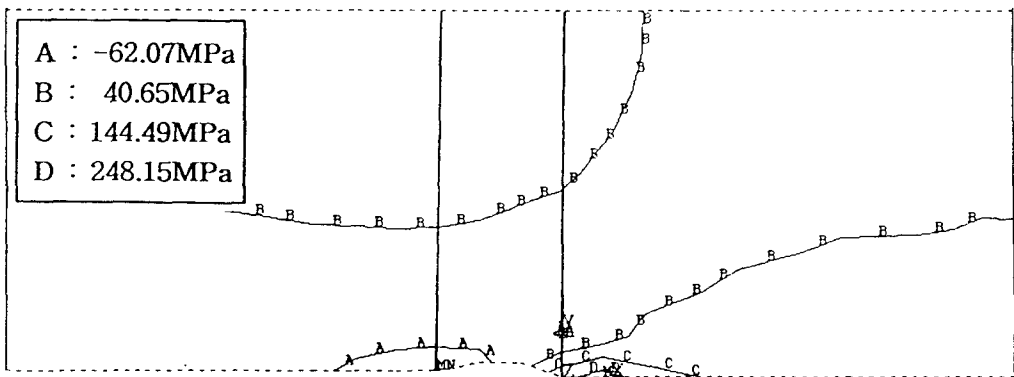
Fig.13은 Fig.11,12의 결과로부터 고온피로에 있어서의 파괴문제를 명확히 검증하기 위하여 파괴의 주요 변수라 할 수 있는 최대 인장응력 값을 대표값으로 하여 피로부하에 따른 최대 인장응력 값의 변화를 검토한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 각 하중에 있어서 사이클이 증가함에 따라 최대 인장응력 값은 선형적으로 증가하나, 점차 그 증가량은 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한, 열사이클만 부하한 경우인 Fig. 8의 결과에 비해, 열사이클 부하와 인장력 부하를 동시에 가할 경우 열사이클과 인장력의 중첩으로 인하여 발생되는 최대 인장응력값은 훨씬 크다는 것을 알 수 있다.



(a)



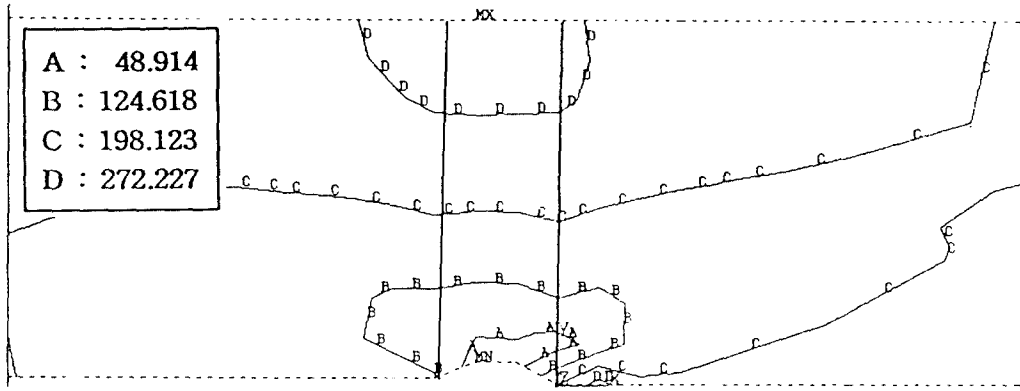
(b)



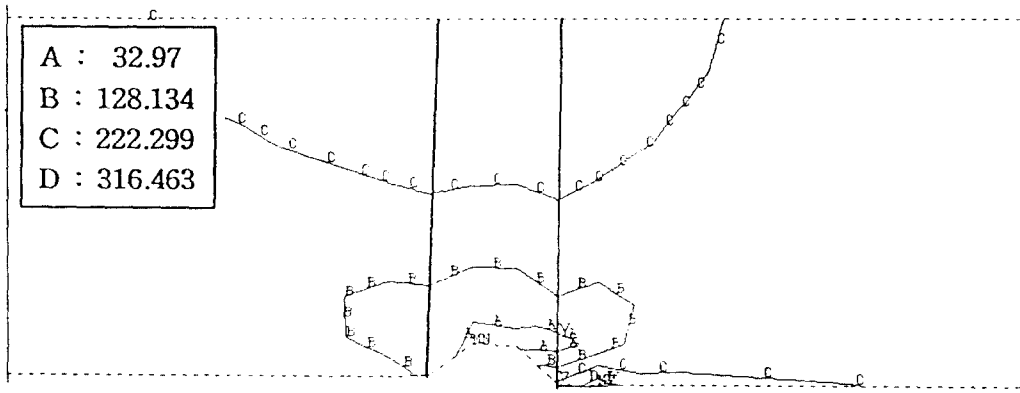
(c)

Fig. 11 Distribution of stress σ_x on number of cycle by tensile load($p=20N$)

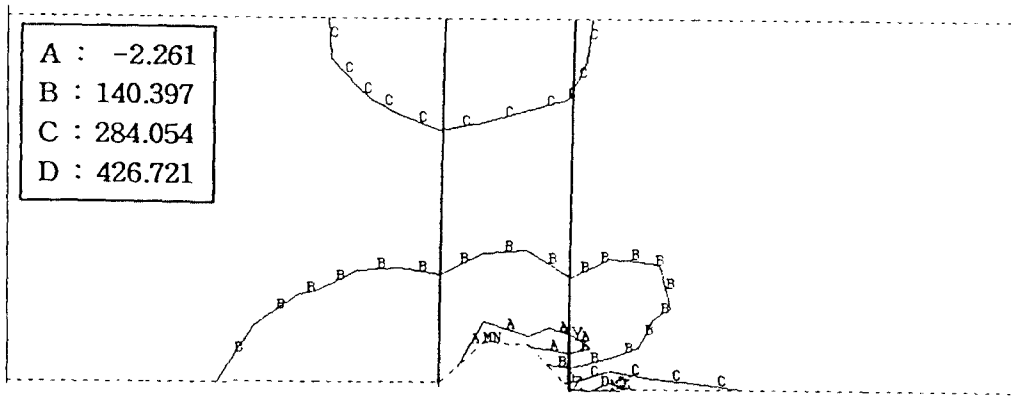
(a) 1 cycle (b) 3 cycles (c) 10 cycles



(a)



(b)



(c)

Fig. 12 Distribution of stress σ_x on number of cycle by tensile load($p=100N$)

(a) 1 cycle (b) 3 cycles (c) 10 cycles

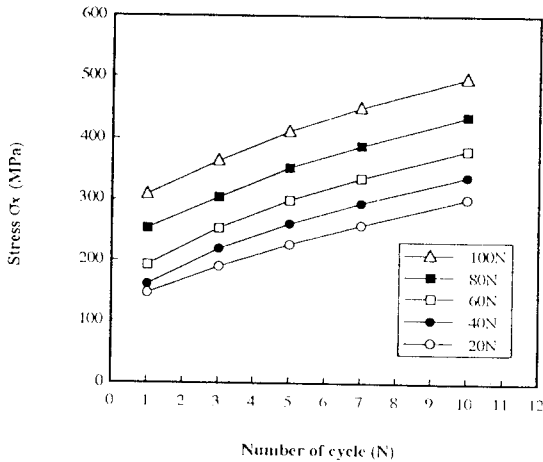


Fig. 13 Relation between number of cycle and stress σ_x by tensile load

4. 결 론

세라믹/금속접합재의 인장력부하, 열사이클부하와 열피로부하에 따른 접합계면의 응력분포상태에 대하여 Si₃N₄/STS304접합재를 대상으로 2차원 탄소성 유한요소해석을 수행하여 검토한 결과는 다음과 같다.

1) 접합 잔류응력의 최대인장 잔류응력 값은 세라믹측의 계면단부에서 발생하며 최대압축 잔류응력은 스테인리스측의 계면단부에서 발생하는 것을 알 수 있었다.

2) 인장부하의 경우 비교적 저하중일 때는 접합 잔류응력과 인장력의 복합적인 영향으로 접합 잔류응력이 있는 경우가 없는 경우에 비하여 최대 인장응력 값이 대단히 높은 값을 나타내나, 부하중이 커짐에 따라 인장부하의 영향이 지배적으로 되어 접합 잔류응력의 유무에 관계없이 최대 인장응력 값은 거의 유사한 값을 보이고 있다.

3) 접합재가 열사이클 부하를 받게 되면, 동의 변형을 경화에 의하여 부하 사이클 횟수의 증가에 따라 최대인장 잔류응력 값은 점점 증가한다는 것을 알 수 있었다.

4) 고온피로 부하를 받게 되면 사이클의 증가에 따라 응력분포형태가 변화하게 되며, 또한 고온피로의 경우에는 열사이클과 인장부하가 중첩되게

되므로 열 사이클에 의해 발생 되는 최대 인장응력값보다 높은 최대 인장응력값을 나타낸다는 것을 알 수 있다.

후 기

본 논문은 1995년도 교육부 기계공학연구비 ME 95-C-05에 의하여 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 김종현, 권용환, 김태영, 정연철, "ZrO₂/스테인레스강 접합재의 잔류응력분포에 관한 연구", 대한금속학회지, Vol. 42, No. 477, pp. 620 ~ 626, 1993
- 2) 전창훈, 양영수, 나석주, "알루미나 세라믹과 구리의 브레이징 접합물에 대한 열응력의 유한요소법 해석에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제14권 제3호, pp. 547~553, 1990
- 3) 강병록, 유연철, "금속/세라믹 접합기술", 대한금속학회지, Vol. 4, No. 1, pp. 49~57, 1991
- 4) 김영식, "機械, 構造物用 세라믹과 금속과의接合加工 技術", 대한용접학회지, 제6권, 제3호, pp. 1~7, 1989
- 5) 岡本平, 菅沼克昭, "セラミックスと金屬の接合", 日本複合材料學會誌, Vol. 12, No. 4, pp. 177~183, 1986
- 6) 古口日出男, 賀屋俊曲, 失田敏, "セラミックスと金屬の接合部の熱應力解析", 日本機械學會論文集, 55卷, 520號, pp. 2527~2532, 1989
- 7) Eager, T.W., "Ceramic-Metal Bonding Research of Japan", Welding Journal, Vol. 66, No. 11, pp. 35~37, 1987
- 8) 坂田君子, "セラミックスと金屬の接合", 日本複合材料學會誌, Vol. 12, No. 6, pp. 266~279, 1989
- 9) 岸本喜久雄, 杉田莊志, 納富充雄, 小泉燒, "有限要素法による異種接合材の弾塑性解析", 日本機械學會論文集, 58卷, 550號, pp. 71~78, 1992

- 10) 김석주, 조상명, 김영식, “세라믹과 鋼 접합부의 열응력해석에 관한 연구”, 대한기계학회 1991년도 춘계학술대회 논문집(I), pp. 419~422, 1991
- 11) 김영식, “異種材接合部の 強度評價”, 대한기계학회 1991년도 춘계학술대회 논문집(I), pp. 375~383, 1991
- 12) Dalgleish, B. J., LU, M.C. and Evans, A.G. “The Strength of Ceramics Bonded with Metals” Acta metal. 36, pp. 2029~2035, 1988
- 13) 小林英男, 荒居善雄, “尖端材料の破壊力學特性評價”, 材料科學, Vol. 25, No. 2, pp. 96~101, 1988
- 14) Tanaka, s, Takahashi, Y, “Effects of X-ray beam colliMation on the Measurement of Residual Stress Distribution in a Si₃N₄/Steel Joint”, ISIJ International, Vol. 30, No. 12, pp. 1086~1091, 1990
- 15) 小林英男, 荒居善雄, 長島伸夫, “セラミックス/金屬接合材のフラクトグラフィと破壊強度の評價”, 材料, 40卷, 453號, pp. 689~694, 1991
- 16) 用崎亭, 渡邊龍三, 島田平八, 鈴木英夫, “レーザーパックス接合界面におけるひずみ分布の測定”, 日本金屬學會誌, 50卷, 12號, pp. 1056~1060, 1986
- 17) 朴榮哲, 羅芳毅, 小林英男, “セラミックス/金屬接合殘留應力に及ぼす單一熱サイクルの影響”, 日本機械學會誌, 60卷, 574號, pp. 1371~1378, 1993
- 18) 朴榮哲, 羅芳毅, 佐勝拓哉, 小林英男, “セラミックス/金屬接合殘留應力分布の有限要素解析”, 日本機械學會誌, 60卷, 571號, pp.742~747, 1994
- 19) 佐勝拓哉, 小林英男, 荒居善雄, “セラミックス/金屬接合殘留應力の有限要素解析の基礎的檢討”, 日本機械學會論文集, 57卷, 540號, pp. 1801~1807, 1991
- 20) 瀬尾建二, 日下正廣, 野方文雄, “セラミックス-金屬接合部の熱應力に關する研究”, 日本機械學會論文集, 55卷, 510號, pp. 312~317, 1989
- 21) 박영철, 오세욱, 허선철, 김광영 “세라믹/금속 접합재의 강도에 미치는 열사이클 영향”, 大韓機械學會論文集, 第18卷, 第7號, pp. 1664~1673, 1993
- 22) “新エネルギー・産業技術總合開發機構委託業務成果報告書”, 財團法人 日本銲接協會, 1992
- 23) 박영철, 오세욱, 허선철, 조용배, “Si₃N₄/SUS304 접합재의 잔류응력 및 강도 평가”, 大韓機械學會論文集, 第8卷, 第1號, pp. 101~112, 1994
- 24) 栗田政則, 井原郎夫, 佐藤誠, “窒化けい素と炭素鋼の接合材の殘留應力分布”, 日本機械學會論文集, 56卷, 524號, pp. 978~983, 1990