

〈論 文〉

알루미나 세라믹과 구리의 브레이징 접합물에 대한 열응력의 유한요소법 해석에 관한 연구

전창훈* · 양영수** · 나석주**

(1989년 6월 5일 접수)

A Study on Thermal Stress Analysis of Alumina Ceramics to Copper Brazement by Finite Element Method

Chang-Hoon Jhon, Young-Soo Yang and Suck-Joo Na

Key Words : Alumina Ceramics(알루미나 세라믹), Copper(구리), Brazement(브레이징 접합물), Thermal Stress(열 응력), Residual Stress(잔류 응력), Finite Element Method(유한요소법), Axisymmetric Solution Domain(축대칭 해석영역)

Abstract

With alumina ceramics to copper brazement of cylindrical shape, the thermal stress analysis was carried out by finite element method. Elastic and plastic behaviour was considered to copper, but only elastic behaviour was considered to alumina. Also material properties of alumina and copper were considered in not constant values but variable functions dependent on temperature. The result of analysis is shown that maximum tensile longitudinal stress is occurred at perimeter of alumina side interface and maximum compressive radial and tangential stresses are occurred at center of alumina side interface. Because of bending effect, tensile radial and tangential stresses are occurred at near bottom of alumina, far from interface.

1. 서 론

세라믹 재료들은 내열성, 내마멸성, 내화학성 등의 성질이 우수하여 금속의 대체 재료로 관심과 연구가 급증하고 있는 추세이다⁽¹⁾. 그러나, 세라믹 재료는 충격에 약한 단점을 가지고 있어 동하중을 받는 기계요소나 구조물을 만들기에 부적합하기 때문에 충격강도와 파괴인성을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 연구중의 하나가 세라믹을 금속과 접합하여 사용하는 것이다^(2,3). 세라믹과 금속의 브레이징 접합물의 용도로 연구되고

있는 부품은, 마멸이 심하게 일어나는 엔진의 캠(cam)구동용 로커암(rocker arm)이나 높은 온도의 혼합 기체가 출입하는 밸브가이드(valve guide), 반복되는 열응력을 받는 터빈블레이드(turbine blade)등을 생각할 수 있다.

세라믹과 금속을 접합하는 방법중에는 기계적 방법(나사식등), 초음파용접, 브레이징(brazing) 등이 있으며, 이 중에서도 브레이징이 가장 능률적이고 기계적 성질이 우수한 접합법으로 추천되고 있다. 브레이징의 방법에는, 세라믹의 표면에 금속을 코팅(coating)한 후에 다시 용가재(filler metal)를 접합 물질로 사용하여 금속과 접합하는 간접 브레이징 방법과, 세라믹에 코팅층을 입히지 않고 용가재만으로 금속과 접합하는 직접브레이징 방법이 있

*삼성항공(주)

**정회원, 한국과학기술원 생산공학과

다⁽⁴⁾. 세라믹과 금속의 브레이징 접합의 가장 큰 문제점은 세라믹의 열팽창계수가 금속의 열팽창 계수보다 작아서 고온에서 접합하여 냉각한 후에 큰 잔류응력이 접합물내에 남게 되어 기계적특성을 해치게 되며 접합물 내의 온도변화율이 클 경우 파손되기 쉽다는 것이다^(5,6). 그러므로 본 연구에서는 알루미나 세라믹(Al_2O_3)재료와 순수구리를 티타늄 용가재로써 접합한 브레이징 접합물내의 냉각후 잔류응력을 유한요소법으로 사용하여 해석하였다.

2. 세라믹과 금속간의 브레이징

2.1 접합원리

금속과 금속간의 브레이징은 두 모재사이에 용가재가 녹아서 흘러 들어가 응고한 후 모재와 용가재간에 금속원자들의 확산에 의해 접합이 이루어지는데, 이와는 달리 세라믹과 금속의 브레이징에서는 경계면에서 금속과 세라믹이 직접 접촉하고 있어도 세라믹내의 강한 공유결합에 의해 세라믹 분자들이 구속되어 있어서 양재료간의 확산현상이 잘 일어나지 않으며, 또한 분자구조상의 전자적 적합도가 잘 맞지 않아서 원자결합이 형성되지 않고 van der Waals결합의 약한결합이 형성되어 결합력이 충분히 크지 못하게 된다. 따라서 금속과 세라믹의 브레이징에서 충분한 결합강도를 얻기 위해서는 “활성적 용가재(active filler metal)”를 사용해야 하는데 활성적 용가재란 산화물 세라믹인 알루미늄과 용가재와의 접합에서는 산소와의 친화력이 알루미늄보다 더 큰 용가재가 알루미늄에서 빼어낸 일부의 산소와 결합하여 금속산화물을 형성하므로써 전자적 적합도가 잘맞는 접합구조를 형성하게 되고, 금속축과 용가재와의 접합은 용가재와 금속모재간의 확산작용에 의해 접합될 수 있는 재료를 말한다. 이 활성적 용가재의 예로는 티타늄, 지르코늄(zirconium)등의 금속이 알려져 있으며, 실제 용가재로 사용할 경우 모재에서의 습착특성(wettability)의 향상을 위하여 구리, 은(Ag)과 합금하기도 한다^(7,8).

2.2 브레이징 실험

활성적 용가재를 사용한 금속과 세라믹의 접합원리를 확인하기 위해서 원통형상의 알루미늄 세라믹과 고순도 구리를 티타늄박판(두께 0.02mm)을 용가재로 하여 접합하였다. 구리와 티타늄의 상태도

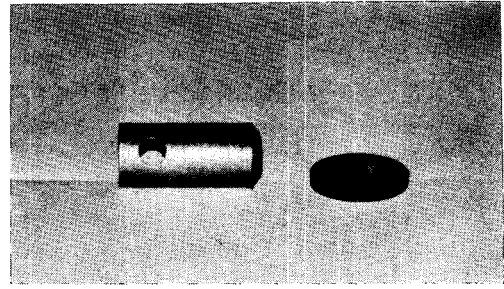


Fig. 1 Broken specimen by tensile test

에 의하여 두 금속간의 공정반응(eutectic reaction)에 의한 접합을 얻기 위해서는 900°C 이상의 온도이어야 하며, 상한 온도는 구리의 용융점인 1083°C로 제한되지만, 1000°C 이상의 온도에서 30분 이상 유지하면 과도한 공정 반응에 의하여 접합면이 녹아서 흘러내릴 위험이 크므로 주의를 요한다. 본 실험에서는 최대 온도를 960°C로 하여 30분간 유지하였다. 냉각과정은 진공상태에서 노냉하였으며 실험장치 및 방법은 참고문헌 (9)를 참조하였다.

본 연구에서는 세라믹과 구리의 접합시 발생하는 잔류응력을 수치해석적인 방법으로만 구하였고 잔류응력을 측정하지는 못하였다. 이론해석 대상물의 접합상태를 알아보기 위해서 브레이징 접합후 인장시험을 실시하였다. Fig. 1은 시험이 끝난 인장시편을 촬영한 것이며, 파단은 접합면이 아닌 알루미늄 부위에서 발생하여 접합이 양호함을 알 수 있고, 파단강도는 130~230kg/cm²의 값을 나타내었다(시험시편 갯수: 10개).

3. 유한요소법 수식화

3.1 해석영역의 결정

접합물의 형상은 원통형(cylinder type)으로 알루미늄 원판위에 구리 원판이 올려져 접합된 것으로 해석영역(solution domain)은 대칭의 특성을 이용하여 R-Z절단면의 1/2만 생각하였다(Fig. 2). 용가재는 두께가 0.02mm로 아주 얇고 금속과 확산반응을 하며, 해석영역을 연속체로 가정하였기 때문에 열응력 분포에는 영향이 미소하므로 해석영역에서 제외하였다. 요소 및 절점분할은 세계의 절점을 가지는 삼각형 선형요소를 사용하였고 응력이 크게 걸릴 것으로 예상되었던 접합면 부위와 원통면(R=15mm) 부위는 세밀히 분할하였다(Fig. 3).

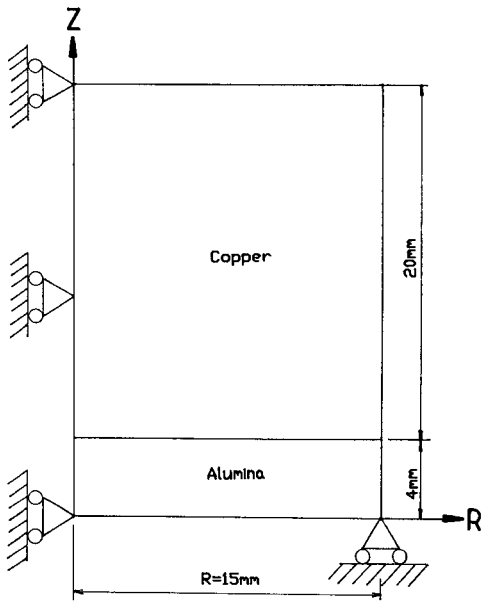


Fig. 2 Solution domain and boundary condition

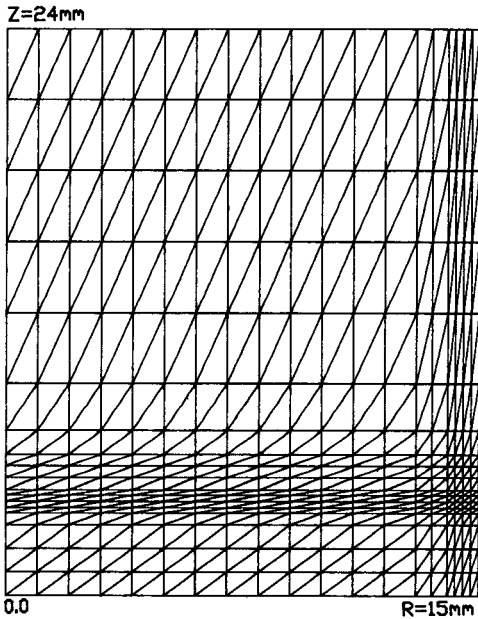


Fig. 3 Mesh generation (node No.=380, element No.=684)

축대칭해석영역 내의 한개의 삼각형 요소는 실제형상에서의 삼각형 단면을 가진 고리가 된다. 경계조건은 $R=0\text{mm}$ 의 위치에서 대칭이므로 반경방향 변위를 구속하고 $R=15\text{mm}$, $Z=0\text{mm}$ 의 위치에서

높이방향 변위를 구속하여 강제운동을 구속하였다. 원통의 중심부위($R=0$)에서는 실제 공정시 휘어지기 때문에 Z 방향으로 구속하지 않았다.

3.2 열응력의 해석

세라믹과 금속간의 브레이징은 고온에서 접합시킨 후 상온까지 냉각하는 공정이며 냉각과정중과 냉각이 끝난 후 세라믹과 금속의 열팽창계수의 차이때문에 접합되어 있는 두재료는 수축량이 달라지게 되어 내부에서 응력이 발생한다. 해석을 위한 중요한 가정은 구리는 탄성(elastic)과 소성(plastic)거동을 하는 것으로 고려하였고 알루미늄은 탄성 거동만 하는 것으로 고려하였다. 열응력 해석을 위해서는 온도분포 해석이 선행되어야 하기 때문에 유한요소법을 사용하여 온도분포 해석을 하였다. 그러나 실제 공정에서 접합물은 노내에서 서냉하므로, 해석결과 시편내의 온도가 거의 일정하여 온도의 불균일한 분포 때문에 발생하는 열응력은 무시할 수 있었다. 그러므로 해석영역내의 온도를 균일하게 가정하였다.

해석영역내에서 재료를 연속체, 등방성이라고 가정하면 재료내부에 응력에 의해 발생한 변형률(total strain)은 탄성변형률(elastic strain), 소성 변형률(plastic strain), 열변형률(thermal strain)로 나누어 생각할 수 있다⁽¹⁰⁾.

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^e + \epsilon_{ij}^p + \epsilon_{ij}^t \quad (1)$$

- ϵ_{ij} : 전 변형률
- ϵ_{ij}^e : 탄성 변형률
- ϵ_{ij}^p : 소성 변형률
- ϵ_{ij}^t : 열 변형률

탄성 변형률은 Hooke's의 법칙에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\epsilon_{ij}^e = \frac{1+V}{E} \sigma_{ij} - \frac{V}{E} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (2)$$

- δ_{ij} : Kronecker symbol
- V : 프와송 비
- E : 영 계수

소성 변형률은 중분형태의 합으로 표시된다.

$$\epsilon_{ij}^p(t) = \epsilon_{ij}^p(t - \Delta t) + \Delta t \dot{\epsilon}_{ij}^p \quad (3)$$

t : 시간

항복점이 온도의 함수이고 von Mises criterion에 의해 지배되면 다음과 같이 나타난다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^p = \frac{3\sigma_{ij}'}{2\sigma H} \left(\dot{\sigma} + \frac{\partial f}{\partial T} \dot{T} \right) \quad (4)$$

- f : 항복 함수
- $\bar{\sigma}$: 등가응력
- T : 온도
- H : 소성계수

식 (4)는 Prandtl-Reuss equation에 온도변화를 고려한 식이다. 열변형률은 다음과 같이 표시된다.

$$\epsilon_{ij}^{th} = \alpha(T - T_r) \quad (5)$$

- α : 선형 열 팽창 계수
- T_r : 기준 온도

적합방정식(Constitutive equation)을 행렬형태로 표시하면 다음과 같다.

$$[\sigma] = [c]([\epsilon] - [\epsilon^p] - [\epsilon^{th}]) \quad (6)$$

$$[\epsilon] = [B][U] = [\epsilon^e] + [\epsilon^p] + [\epsilon^{th}] \quad (7)$$

- $[c]$: 응력-변형률 변형행렬
- $[B]$: 전 변형률-변위 변형행렬
- $[U]$: 변위행렬

유한요소 방정식을 유도하기 위하여 가상일의 원리(Virtual work theorem)를 이용하였다.

$$\int_V \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} dV = \int_V P_i \delta u_i dV + \int_S F_i \delta u_i dS \quad (8)$$

- P_i : 체적력
- F_i : 표면력
- u_i : 변위
- V : 해석영역 부피

식 (8)에서 body force와 surface force를 하나로 묶어 load term으로 생각하고 식 (7)을 이용하고 행렬형태로 변환하면 다음과 같다.

$$\int_V [B]^T [\sigma] dV = [R] \quad (9)$$

식 (9)를 식 (6)을 이용하여 변환하면 최종형태의 유한요소 방정식을 얻을 수 있다.

$$[K][U] = [R] + \int_V [B]^T [C]([\epsilon^p] + [\epsilon^{th}]) dV \quad (10)$$

$$[K] = \int_V [B]^T [C][B] dV \quad (11)$$

- $[K]$: 강성행렬

식 (10)은 우변의 $[\epsilon^p]$ 가 $[U]$ 의 함수이므로 비선형 방정식(nonlinear equation)이므로 해를 구하기 위해 Direct Iteration Method를 사용하였다.

3.3 컴퓨터 프로그램

구리와 알루미늄의 브레이징은 노내에서 천천히 가열후, 서냉하는 공정이므로 일반적인 용접공정에

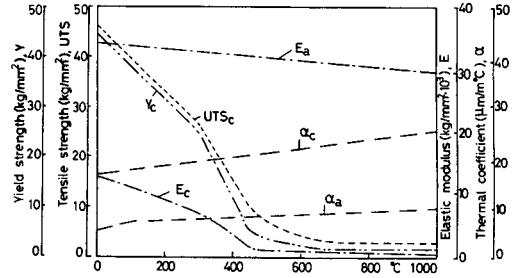


Fig. 4 Temperature dependent mechanical properties (subscript ; C-copper, A-alumina cermics)

서 나타나는 불균일한 온도분포에 의해 생성되는 열응력은 나타나지 않으나 냉각시 알루미늄과 구리의 열팽창 계수의 차이때문에 열응력이 발생한다. 그러므로 수치해석은 가열된 상태를 초기조건으로 하고 냉각과정을 해석하였다. 응력해석시 재료의 기계적 물성치는 온도의 함수로 수치화하여 고려하였다(Fig. 4)^(11~14). 이때, 가공경화를 (H)는 항복강도와 인장강도 사이를 선형으로 가정하여 구하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 5는 전해석 영역에서 위치에 따른 온도차이가 없이 균일하게 냉각할 경우 알루미늄 두께 4mm, 구리 두께 20mm의 접합물에 대한 반경방향 잔류응력(σ_{rr})의 분포를 보여 준다. 알루미늄의 경우 접합경계면 근처($Z=3.8mm$)에서는 상대적으로 작은 수축량 때문에 최대의 압축응력이 걸리게 되며, 바닥부위($Z=0.3mm$)에서의 응력은, 접합 경계면에서의 압축력 때문에 발생하는 굽힘현상(bending effect)에 의하여 인장응력이 걸리는 것을 볼 수 있다. 구리의 경우는, 알루미늄의 경우와 반대로 상대적으로 큰 수축량에 의해 접합 경계면 근처($Z=4.2mm$)에서 최대의 인장응력을 나타내고 있으며 경계부에서 멀어질수록 응력은 줄어들고 있다. 또한, 반경에 비해 두께가 두껍기 때문에 알루미늄에서 발생한 굽힘현상은 구리에서는 발생하지 않고 있다. 접합경계의 원통면 근방에서는 연성물질의 특성상 국소적으로 큰 변형률이 생겨 비교적 높은 응력값을 보이고 있다.

Fig. 6은 원주방향 잔류응력($\sigma_{\theta\theta}$)을 위치에 따른 분포를 나타낸 것으로 반경방향응력(σ_{rr})과 유사한 분포를 보이지만 원통면 근처에서는, 말단부 효과

(end effect)가 없으므로 보다 큰 값을 나타낸다.

Fig. 7은 전단 잔류응력(τ_{rz})의 분포를 나타낸 것으로 접합경계 부위에서 최대의 응력값을 보이며, 반경좌표로는 대체로 $R=10\text{mm}$ 근처에서 가장 높게 나타난다.

Fig. 8의 길이방향 잔류응력(σ_{zz})는 알루미늄의 원통면 부위에서는 인장응력을, 구리의 원통면 부위에서는 압축응력을 나타내며, 특히 알루미늄의 접합경계 원통면 부위에서 급격한 최대 인장응력을 나타낸다.

알루미늄과 구리의 두께의 비율에 따른 영향을 조사하기 위하여 알루미늄의 두께(4mm)는 일정한 상태에서 구리의 두께를 20mm에서 8mm, 4mm, 1mm로 변화시켜 해석하여 보았으며 알루미늄에서의 인장응력이 결리는 경우가 가장 파괴되기 쉬우므로 인장응력이 결리는 바닥면의 응력상태를 나타내었다. 이때 계산에 사용한 요소분할 형태는 Fig. 3과 동일하게 사용하고 두께의 크기만 변화시켰다. Fig. 9는 구리 두께 8mm의 경우, Fig. 10은 구리 두께 4mm의 경우, Fig. 11는 구리 두께 1mm경우의 바닥면 부위의 응력상태이다. 구리의 두께가 줄

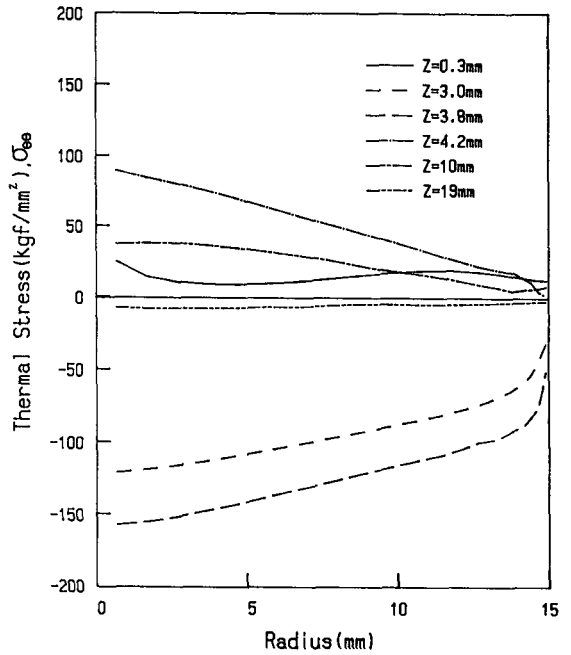


Fig. 6 Residual stress distributions of tangential direction along radial position for various heights

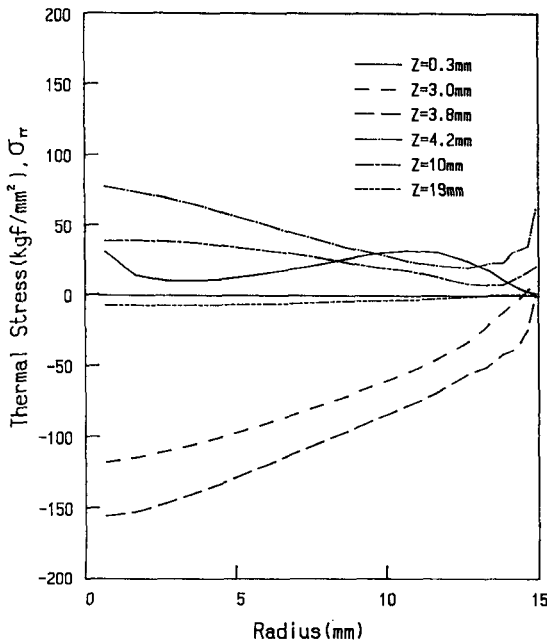


Fig. 5 Residual stress distributions of radial direction along radial position for various heights

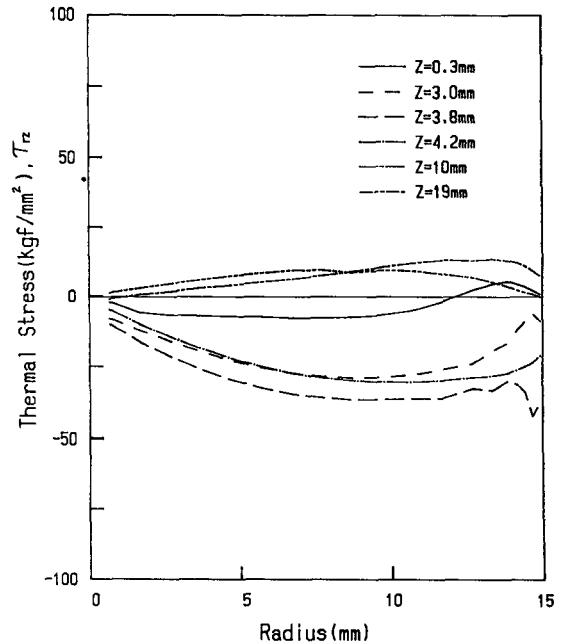


Fig. 7 Residual shear stress distributions along radial position for various heights

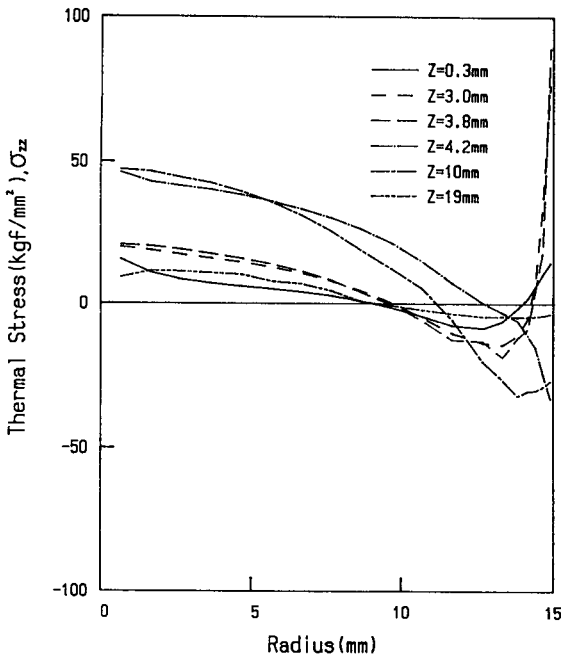


Fig. 8 Residual stress distributions of longitudinal direction along radial position for various heights

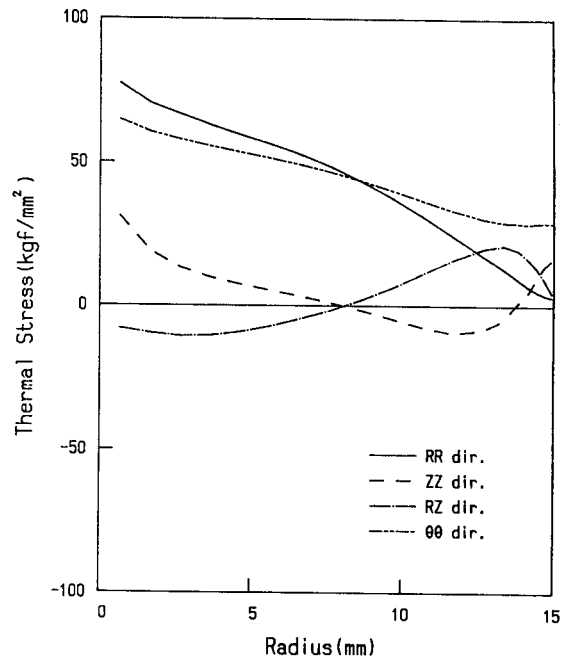


Fig. 10 Residual stress distributions in alumina surface for copper thickness of 4mm ($z=0.3$)

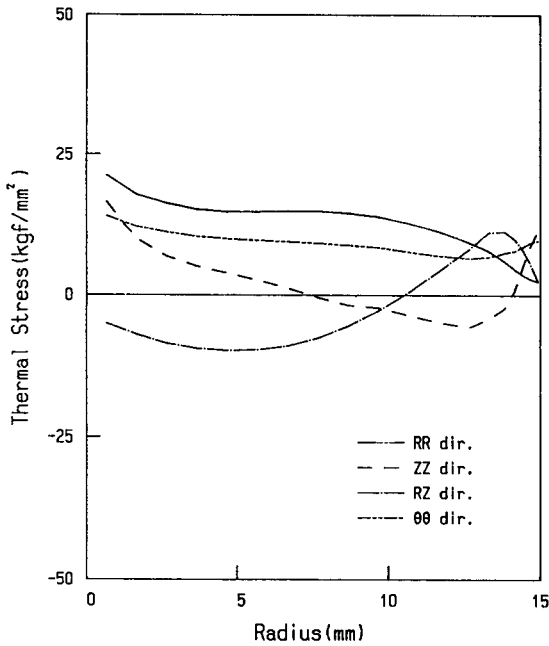


Fig. 9 Residual stress distributions in alumina surface for copper thickness of 8mm ($z=0.3$)

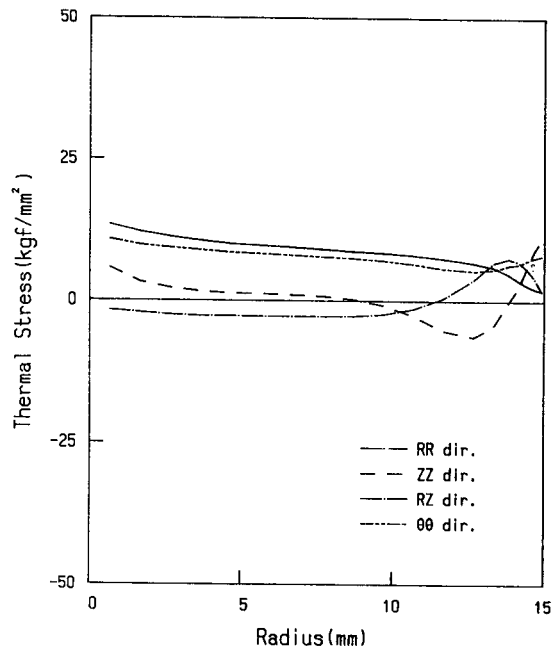


Fig. 11 Residual stress distributions in alumina surface for copper thickness of 1mm ($z=0.3$)

어 들면 저항력이 줄어들어 알루미늄 내부의 응력은 감소하여야 하지만, 굽힘의 효과가 훨씬 더 증가하여 구리두께 4mm의 경우에 모든 응력이 전반적으로 가장 크게 나타나고 있다. 구리두께 1mm의 경우는 알루미늄에 비해 구리의 두께가 얇아서 저항력도 현저히 줄어들고 굽힘의 효과도 크지 않아서 낮은 응력분포를 나타냄을 알 수 있다.

5. 결 론

알루미늄과 구리의 브레이징 접합물에 대한 축대칭 유한요소법 해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 원통형 형상을 가진 세라믹과 금속의 브레이징 접합물의 열응력의 분포는 기하학적 형상에 의해 발생하는 굽힘현상의 영향을 크게 받는다.
- (2) 알루미늄의 두께를 4mm로 고정시키고 구리의 두께를 20mm, 8mm, 4mm, 1mm로 변화시켜 열응력을 계산한 결과 알루미늄과 구리의 두께비가 1:1인 구리두께 4mm의 경우에 모든 성분의 잔류응력이 가장 크게 나타났으며 이것은 굽힘현상의 영향이 최대가 되기 때문이다.
- (3) 반경방향 잔류응력(σ_{rr})과 원주방향 잔류응력($\sigma_{\theta\theta}$)은 중심부위($R=0$)에서 가장 크며, 길이방향 잔류응력(σ_{zz})과 전단 잔류응력(τ_{rz})은 원주면부위($R=15mm$)에서 가장 크게 나타난다.
- (4) 모든 잔류응력 성분은 알루미늄의 경계면 부위에서 가장 크게 나타난다.
- (5) 길이방향 잔류응력은 알루미늄 경계면의 원통면($Z=4mm, R=15mm$)근방에서 급격히 증가하는 경향을 나타낸다.

참 고 문 헌

(1) Eager, T.W., 1987, "Ceramic-Metal Bonding Research of Japan", *Welding Journal*, Vol. 66, No.11, pp.35~37.

(2) Moorhead, A.J. and Keating H., 1986, "Direct Brazing of Ceramics for Advanced Heavy-Duty Diesels", *Welding Journal*, Vol. 65, No.10, pp.17~31.

(3) Moorhead, A.J., 1987, "Direct Brazing of Alumina Ceramics", *Advanced Ceramic Materials*, Vol. 2, No. 2, pp.159~165.

(4) Fox, C.W. and Slaughter, G.M., "Brazing of Ceramics", *Welding Journal*, Vol.43, No.7, pp.308~314.

(5) Lyamin, Ya.V., Musin, R.A. and Ivanov, V.N., 1987, "The Stress State in Diffusion Welded Joints Between Dissimilar Materials", *Welding International*, Vol. 1, No.6, pp.514~517.

(6) Hamada, K., Kureishi, M., Yagi, T., Ueda, M., Enjo, T. and Ikeuchi, K., 1986, "Bonding Procedure for Avoiding in Copper Bonded Alumina Ceramics", *Journal of the Japan Welding Society*, Vol.4, No.1, pp.73~78.

(7) Pask, J.A., 1987, "From Technology to the Science of Glass /Metal and Ceramic/Metal Sealing", *Ceramic Bulletin*, Vol.66, No.11, pp.1587~1592.

(8) Naka, M. and Okamoto, I., 1985, "Joining of Plain Carbon Steel to Alumina with Copper Filler Metal", *Journal of the Japan Welding Society*, Vol.3, No.4, pp.28~33.

(9) 이창동, 나석주, "탄소강과 스테인리스강의 진공브레이징에 관한 연구", *대한기계학회논문집*, 1988, 제 12권, 제5호, pp.1083~1901

(10) Snyder, M.D. and Bathe, K.J., 1981, "A Solution Procedure for Thermo-Elastic-Plastic and Creep Problems", *Nuclear Engineering and Design*, pp.49~80.

(11) "Metals Handbook", American Society for metals, Vol.2, 9ed. 1979.

(12) Touloukian, Y.S. and Makita, T., 1970, "Thermophysical Properties of Matter", IFI/Plenum.

(13) Schreiber, E., Anderson, O.L. and Soga, N., 1973, "Elastic Constants and their Measurement", McGraw-Hill Inc.

(14) Ryskewitch, E., 1960, "Oxide Ceramics", Academic Press.