

## Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu 중공관의 접합이음부의 열응력 해석

Analysis of Thermal Stress of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu Tube-Joint

생산기술연구원 \*신승용, 변 준, 고명완

### 1. 서론

세라믹스와 금속과의 접합기술은 원자결합양식이 다른 양 재료의 접합 결합력을 향상시키는 기술과, 열팽창계수등의 물성의 차이에 의해 발생하는 열응력의 화기술로 집약할 수 있다. 일반적으로, 세라믹은 금속보다도 선팽창계수가 작아 고온에서 접합한 세라믹과 금속을 실온까지 냉각하는 과정에서 양 재료의 선팽창계수의 차에 의해 잔류응력이 생기고, 이 잔류응력은 접합강도 및 모재강도를 저하시키며 세라믹 모재의 균열 발생의 원인이 된다.

본 연구에서는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Cu 중공관 및 Cap 형태의 접합부에 발생하는 열응력을 FEM을 이용하여 해석한 후, 접합실험 및 강도실험을 행하여 동관 및 동Cap형상이 접합강도 및 Crack발생에 미치는 영향을 조사했다.

### 2. 접합부의 열응력 해석방법

접합실험용으로 사용한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>관(외경  $\phi$ 16, 내경  $\phi$ 14 및 외경  $\phi$ 41.3, 내경  $\phi$ 34.9)의 형상을 기준으로 하여 상대 접합대상금속의 Cu관의 두께를 0.3t, 0.5t, 1t, 2t 및 4t와 Cu Cap 외경  $\phi$ 41.3)로 하고 접합부의 높이를 1mm 및 2.5mm로 변화시켜 각각의 경우에 있어서 접합이음부의 열응력분포를 FEM을 이용하여 조사했다. 여기에서 사용한 software는 "ANSYS"이다. 해석 모델의 요소분할은 4각분할로 접합부의 부근은 조밀하게 하였다. 더우기 Insert층은 고려하지 않고 확산접합체를 기준으로 하여 열사이클은 1000℃의 접합온도까지 가열한 후 60분간 상온까지 냉각한 경우로 했다. 또한 접합실험에 사용한 분위기로의 냉각조건을 고려하여 전도, 방사열은 무시하고, 주로 대류에 의한 냉각만을 상정했다.

먼저 양 접합모재의 상온에서 1000℃까지의 비열, 밀도 및 열전도도등의 물성을 입력하여 열해석을 한 후, 각 온도의 Poisson비, 및 Young율을 입력하여 해석을 행했다. 이 때 고온 열소성의 Data로서는 Cu의 항복강도 및 열변형 경화계수를 사용했다. 열응력해석 후 동일 치수의 접합체를 각각 제작하고, Cu의 접합부 형상에 따른 접합강도 및 Crack발생의 유무를 조사했다.

### 3. 결과 및 고찰

동관의 접합부의 형상이 이음부의 열응력분포에 미치는 영향을 조사하기 위하여 FEM에 의한 열응력해석을 행했다. 먼저 동관의 접합면의 두께를 변화시켜 이음부에 있어서 각 방향의 열응력분포를 조사했다. 그 결과가 Fig.1이다. 이때 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>관의 형상은 외경  $\phi$ 16, 내경  $\phi$ 14의 것을 기준으로 했다. 4t의 동관을 사용한 경우 접합계면의 수평방향(a) 및 수직방향(b)의  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_{xy}$ ,  $\sigma_\theta$  각각의 최대응력은 접합이음부의 표면에 집중되어 있다. 또한  $\sigma_y$ 와 주응력  $\sigma_\theta$ 가 가장 큰 인장

응력을 나타내고 있다. 한편, 동관의 두께(2t)가  $Al_2O_3$ 관과 같은 경우(c,d), 각 방향성분의 응력은 작게 저하하지만 동관의 두께가 0.3t가 되면  $\sigma_x$ 는 인장응력을 나타내고 모든 응력은 급격히 저하하고 있다. 또한 (f)의 y축의 응력의 최대치는 계면부근의 Cu측에 집중되고 있다.

다음에 응력구속조건으로 최대 주응력에 작용하는 영향을 조사했다. 그 결과가 Fig. 2이다. 접합체의 Cu측만을 구속한 경우가 양측을 구속한 경우보다 현저하게 저하하고 있고, 최대응력치와  $Al_2O_3$ 내부의 최대치의 차이도 보이지 않았다.

Fig. 3에 FEM에 의한 열응력을 해석한 후, 실제 접합실험 및 강도시험을 행한 Cu접합면의 두께와 접합강도 및 균열발생과의 관계를 나타낸다. Cu관의 두께가 클수록 접합인장강도는 저하하고, 1t이상의 Cu관의 경우 모든  $Al_2O_3$ 관에 균열이 발생했다. 열사이클에 의한 균열이 발생하게 된 것은 0.5t이하의 Cu관의 경우로서 0.5t에 비해 0.3t의 경우가 높은 이음강도를 나타내고, 35MPa정도에서 접합모재의 강도에 필적하고 있다. 또한 강도시험에 의한 파단도 접합부근의  $Al_2O_3$ 측에 생기고 있다. 이들 결과는 FEM해석결과 거의 일치하고 있다.

Fig. 4에  $Al_2O_3$  Tube/Cu Cap 형상부품의 6가지 모델에 대한 최대 주응력치를 도표로 작성하여 비교한 결과, C)와 F)조건의 최대 주응력치는 다른 조건에 비해 현저히 낮은데다가 그 값이 나타난 위치도 세라믹내부가 아닌 메탈쪽이며, 세라믹 내부의 응력값은 180MPa과 77MPa로 접합계면을 제외하고는 거의 응력으로부터 자유로운 상태임을 알 수 있다. 그러나 Type B)형상의 Cu-cap 두께를 2t에서 0.5t로 변화시킨 G)의 최대 잔류응력을 보면 172MPa로 감소하여 메탈부의 형상디자인 변화에 의해 절대적인 응력완화가 가능한 것을 알 수 있다.

한편 Type F)에서 반경방향의 접촉면적이 1t였던 Cu-cap의 세로 축을 0.5t로 감소시킨 H)조건의 경우에는 Cu-cap의 큰 소성변형으로 인하여 응력완화보다는 bending에 의한 응력상승효과가 더 커져 오히려 1t였던 F)조건보다 더 큰 응력이 잔류된 것으로 분석되어 진다. 이상의 응력해석결과로부터 접합부에 발생하는 열응력을 가장 효율적으로 완화시킬 수 있는 Joint의 형상은 Type F)의 Cap Joint이며, 접합부 금속의 두께를 얇게하면, Type C)의 Outside-Butt Joint형상도 유효 가능성이 높다.

Fig. 5는 형상에 따른 인장시험 결과 및 Crack 유무관계를 나타낸다. 그림에서 Type A→G→C→E→H형상대로 열응력 완화효과가 큰 것으로 추정된다. 또한 Type A)의 경우 접합가열 Cycle후 냉각도중에 이미 Crack이 발생하여 접합후 완전히 자연 박리되었고, G, C, E형상의 경우도 열응력에 의한 1차 Crack이 발생되어 거의 접합체 강도를 얻을 수 없었다. 이것에 비하여 Type H)의 Butt Joint의 경우는 Crack은 발생하지 않아서 양질의 Joint를 얻을 수 있었다. 인장실험후 파단 위치를 확인한 바  $Al_2O_3$ 쪽으로 얇게 파단하였고, 또한 인장파단 하중이 170Kgr, 인장강도가 28MPa정도로 양호한 접합강도가 얻어졌다. 따라서, 응력해석 결과 및 실험 결과 모든 경우에서 Type F)와 같이  $Al_2O_3$ 관의 단면 중심부에  $Al_2O_3$ 관의 두께보다 얇은 Cu pipe를 Butt-Joint형상으로 접합시키는 것이 Crack 발생을 방지할뿐만 아니라 접합부 잔류응력을 극소화시킬 수 있다고 판단된다.

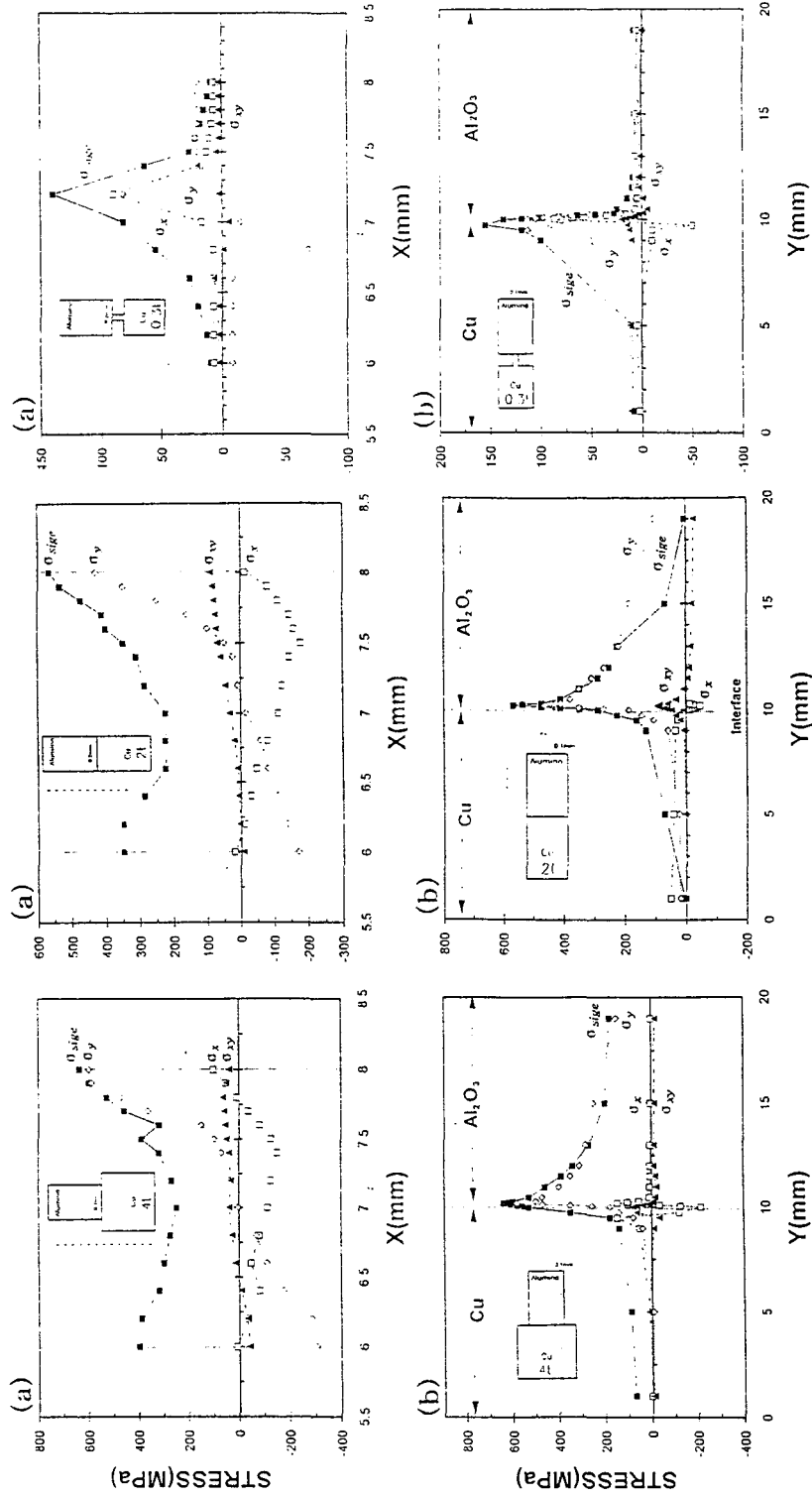


Fig.1 Stress distribution of  $Al_2O_3/Cu$  tube joints

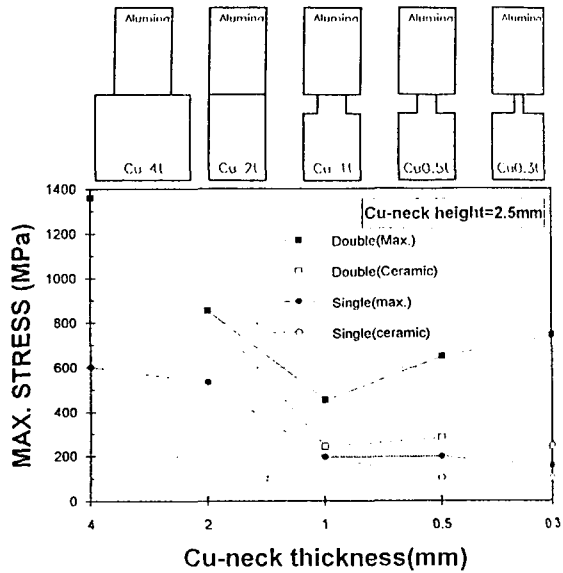


Fig. 2 Relation between maximum principle stress of joints and boundary conditions

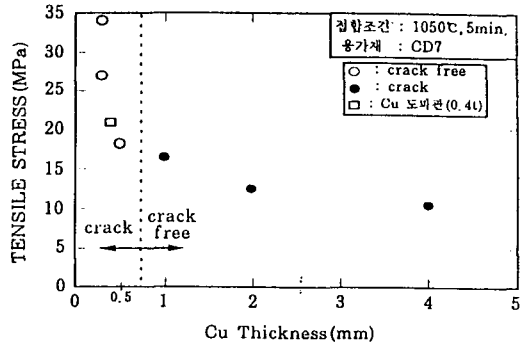


Fig. 3 Relation between joining strength of  $Al_2O_3/Cu$  joints and thickness of Cu tube

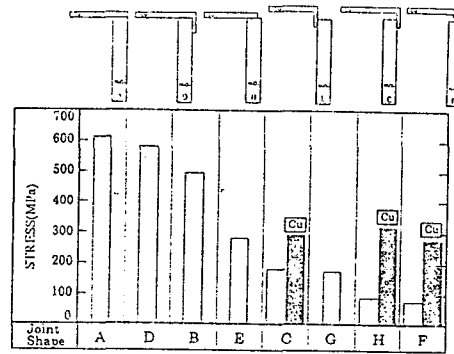


Fig. 4 Relation between maximum principle stress of  $Al_2O_3/Cu$  joints and dimension of metal caps

Joint Type	Joint Shape	Joining Area (mm <sup>2</sup> )	Insert Metal	Tensile Strength (MPa)	Crack
Type C		583	T5000 Foil	4.2	Crack
Type E		493	T5000 Foil	4.3	Crack
Type A		380	CD8 powder	Fracture by crack of thermal residual stress	Crack
Type G		231	CD8 powder	1.7	Crack
Type H		60	CD8 powder	28 (load 170kgf)	Crack Free

Fig. 5 Relation between tensile stress of joints and dimension metal caps