

研究論文

大韓熔接學會誌
第10卷 第1號 1992年 3月
Journal of the Korean
Welding Society
Vol. 10. No. 1, Mar., 1992

이종재 접합부에서의 응력집중현상에 관한 연구⁺

조 상 명* · 김 영 식*

A Study on the Stress Concentration Phenomenon of a Dissimilar Joints

S. M. Cho , Y. S. Kim

Key Words : Dissimilar Joints(이종재 접합부), Insert Metal(삽입금속), Constraint Stress(구속응력), Nominal Stress(공칭응력), Stress Concentration(응력집중)

Abstract

In this study, the stress concentration phenomenon for the dissimilar joints(ceramic-metal) bonded by thermal treating using a soft-insert metal (copper) was investigated with the aid of FEM(finite element method) under the load condition of uniform tension. The analysis was carried out by the supposing that stress states are plane stress or plane strain and elastic or elastic-plastic. And the Von Mises yield criterion and the incremental theory as plastic flow were adopted in this analysis.

As the summarized results obtained, the stress concentration phenomenon was severer as the soft insert metal was thicker, in plane strain than in plane stress and in elastic-plastic state than in elastic state. Furthermore, the inducing mechanism of stress concentration was well expressed by the constraint forces(F_c) generated between the soft and the hard material.

1. 서 언

세라믹의 내마모성, 내열성 및 내식성등의 특성과 금속의 풍부한 인성을 각각 효과적으로 살리기 위하여, 최근의 기계부품에는 이들을 각종접합법에 의

해 복합화하는 기술이 활용되기 시작하였다.

세라믹과 금속의 접합과 같은 이종재의 접합부에 있어서, 각 재료의 열팽창계수 및 탄성계수의 차이로 인한 잔류응력의 발생특성에 관해서는 비교적 다양하게 연구가 진행되고 있다^{1,2)}. 이것은 이종재 접합부의 강도에 미치는 잔류응력의 영향이 그만큼 중

⁺ 1991.4.12 춘계학술대회 발표

* 정희원, 한국해양대학교

요한 인자로 되어 있기 때문이라고 할 수 있다.

한편, 이종재 접합부에는 재료의 각종 기계적성질이 상이하므로 균일한 단면형상의 부재에서도 세라믹층에서는 응력집중현상이 나타나게 되며, 이로 인하여 이종재 접합부의 강도특성은 이 응력집중에 의해서도 영향을 받는 것으로 알려져 있다¹⁻⁶⁾. 이러한 응력집중현상은 부재의 응력상태에 따라서 달라지게 될 것이 예상된다. 더욱이 최근에 접합시에 발생하는 열응력의 완화를 목적으로 널리 연구, 검토되고 있는 삽입금속(insert metal)을 이용한 접합방법에 있어서, 적용하는 삽입금속의 형상과 기계적성질에 의해서도 응력집중현상은 달라질 것으로 예상된다.

본 연구에서는 이종재접합부의 단순인장시에 나타나는 응력집중현상에 대하여 탄-소성유한요소법을 써서 검토한다. 또한 이 응력집중현상이 삽입금속의 변형에 대한 구속효과와는 어떠한 관계가 있는지에 대하여 고찰함으로써 응력집중현상의 발생 기구를 도출해 내고자 한다.

2. 수치해석조건

수치해석을 위하여, 사용재료로서 Al_2O_3 , Cu, SNCM21을 선정하였으며, 이들 각각의 재료상수로는 Table 1에 나타낸 것을 사용하였다.

수치해석에 사용한 탄-소성FEM프로그램은 白鳥⁸⁾등에 의한 것을 기본으로 하여 유니트(unit)법에 의한 요소분할을 행하여 해석하도록 자체개발한 것을 사용하였으며, 프로그램의 정밀도에 대한 검토는 저자중의 일부에 의한 다른 연구결과⁹⁾에서 행해졌다.

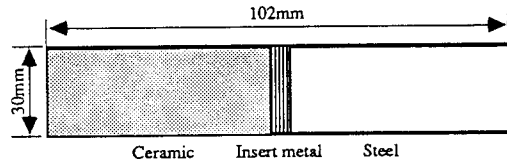


Fig. 1 Configuration of specimen used in elasto-plastic FEM.

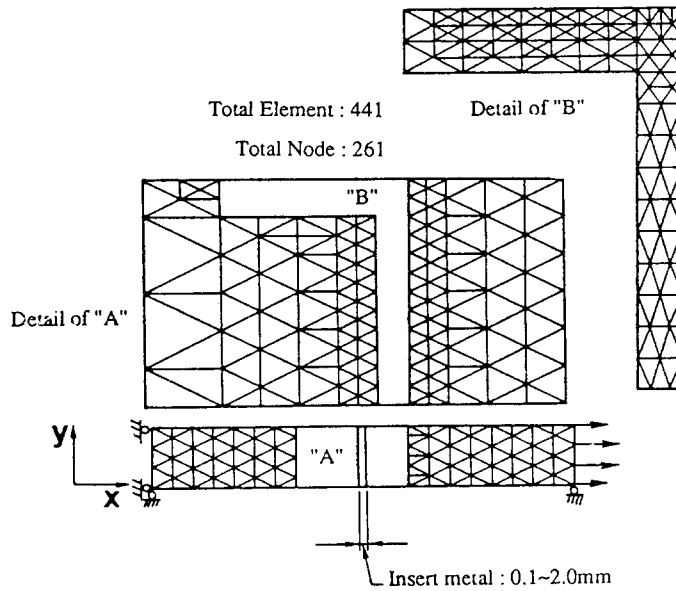


Fig. 2 Mesh models used in FEM(plate)

Table 1 Mechanical properties of materials used in elasto-plastic FEM.

Materials	E(kg/mm ²)	Poisson's ratio	Yield Strength	Strain hardening exponent
Al_2O_3	38,000	0.26	Elastic state	—
Cu	11,400	0.364	25kg/mm ²	0.33
SNCM21	21,000	0.28	80kg/mm ²	0.16

탄-소성FEM의 모델시험편은 Fig.1에 나타난 바와 같이 폭 30mm, 길이는 삽입금속의 두께에 따라 100.1mm~102mm인 단위두께의 판재로 하였다. 이 시험편은 길이방향의 중심선, 즉 x축에 대하여 대칭이기 때문에 실제해석은 그 반쪽만에 대하여 Fig.2에서 보이는 바와 같이 요소분할을 하여 실시하였다. 이때 총절점수는 261, 총요소수는 371이었다. 해석에 있어서 요소수가 증가할수록 더욱 정밀한 값을 얻을 수 있는 것이 일반적인 경향이나 본 연구에서 사용한 계산기가 PC인 관계로 계산수행이 가능한 총요소수와 계산시간등을 고려하여 모델의 요소분할을 행하였다.

Fig.1에서 왼쪽끝의 절점에 대해서는 x방향으로만 구속하였고, 아래쪽 절점들에 대해서는 y방향으로만 구속하였으며, 평면응력 및 평면변형률상태를 각각 가정하여 검토하였다. 항복조건은 Von Mises의 식을 이용하였으며, 증분이론을 적용한 탄-소성해석을 실시하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1. 해석조건에 따른 응력집중양상의 변화

Fig.3은 이종재접합부에 대한 탄성해석의 결과로서 공칭응력(nominal stress), σ_n 에 대한 시험편의 측면에서의 하중방향응력, σ_x 의 비 즉 응력집중계수를 삽입금속의 중심으로부터의 거리에 대하여 나타낸 것이다. 이 응력집중계수는 삽입금속에서는 상당히 낮지만, 세라믹과 삽입금속의 경계를 전후하여 심한 불연속현상을 보인 후 경계에서 약간 떨어진 부분

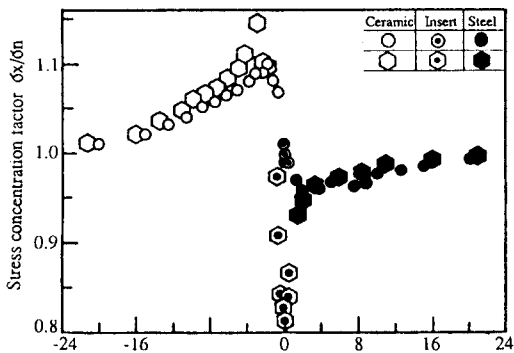


Fig. 3 Stress distribution at the edge of dissimilar joint in elastic state

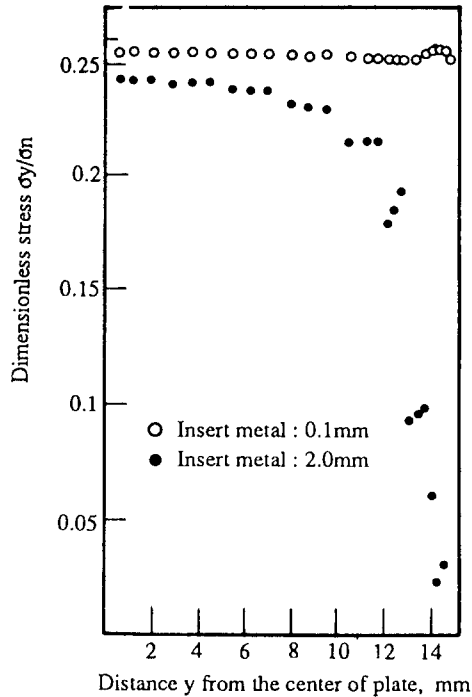


Fig. 4 Constraint stress distribution at the center of dissimilar joint in elastic state

에서 최대치를 나타낸다. 이 최대응력이 작용하는 위치에 대해서는 이종재접합부에 있어서 잔류응력의 분포시에 나타나는 현상과 매우 유사한 경향을 보이고 있다.¹²⁾ 또한 응력집중계수는 삽입금속의 두께에 따라서 달라지며, 여기서는 삽입금속의 두께가 0.1mm인 경우보다 2mm인 쪽이 더큰 응력집중이 생기는 것을 알 수 있다.

Fig.4는 Fig.3과 같은 조건의 결과로서 삽입금속의 중심에서 y방향의 응력(σ_y), 즉 삽입금속 중앙에서의 구속응력(constraint stress)을 σ_n 으로 무차원화한 값(σ_y/σ_n)의 y방향에 따른 분포양상을 나타내고 있다. 삽입금속의 두께가 0.1mm인 경우가 2mm에 비해 높은 구속응력이 발생하므로 삽입금속의 변형에 대한 세라믹의 구속은 삽입금속의 두께가 얇을 수록 심하다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig.3의 결과와 함께 고찰하면 삽입금속의 변형에 대한 구속이 심한 0.1mm쪽이 2.0mm보다 세라믹측에서 응력집중이 덜 된다고 하는 것은 흥미로운 현상이다. 이 현상은 세라믹쪽에 응력집중을 유발하는 직접적인 원인은 삽입금속에서의 구속응력 자체가 아니고, 그 응력을

삽입금속의 두께에 대해 적분한 구속력(constraint force)이라고 생각하는 것에 의해 해석될 수 있을 것으로 판단된다. 즉 두께 2.0mm인 쪽은 구속응력은 비록 낮지만 두께가 크기 때문에 구속력은 훨씬 크며, 이 큰 구속력이 세라믹에 대해서도 반력으로서 작용하기 때문에 더 큰 응력집중이 유발되는 것으로 판단된다. 여기에 대한 더욱 상세한 고찰은 3.2절에서 다루고자 한다.

Fig.5는 삽입금속의 두께를 1.0mm로 일정하게 유지하면서 탄성 및 탄-소성해석을 실시한 결과로서 전체적인 경향은 그 두께가 0.1mm 및 2.0mm인 경우와 유사하다. 그러나 응력집중계수의 값은 탄성상태보다 삽입금속이 전부 소성변형하여 전체로서는 탄-소성상태에 있을 때가 약간 더 높아지는 것을 알 수 있다. 더욱이 탄-소성상태에서는 삽입금속과 세라믹사이에서의 응력불연속현상이 더욱 심하게 된다.

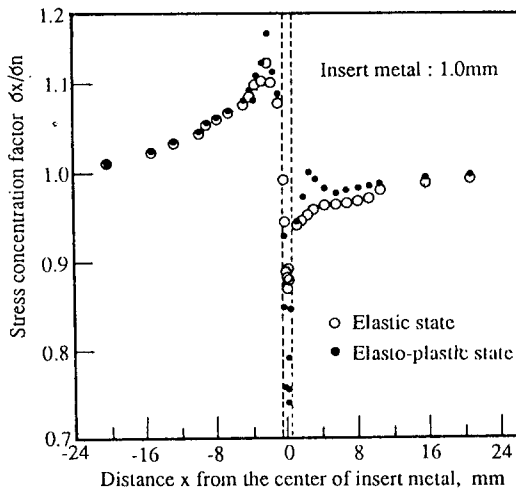


Fig. 5 Stress distribution at the edge of dissimilar joint in elasto-plastic state

Fig.6은 삽입금속의 두께를 2.0mm로 하였을때의 평면응력 및 평면변형률상태에 대한 탄성해석의 결과를 나타내고 있다. 응력집중계수의 최대치는 평면변형률상태에서 약1.2정도로 평면응력상태에 대한 값보다도 약간 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 삽입금속 두께의 영향을 전체적으로 검토하기 위하여 삽입금속의 두께가 0인 경우, 즉 세라믹과 강을 직접접합한 것과 삽입금속의 두께가 무

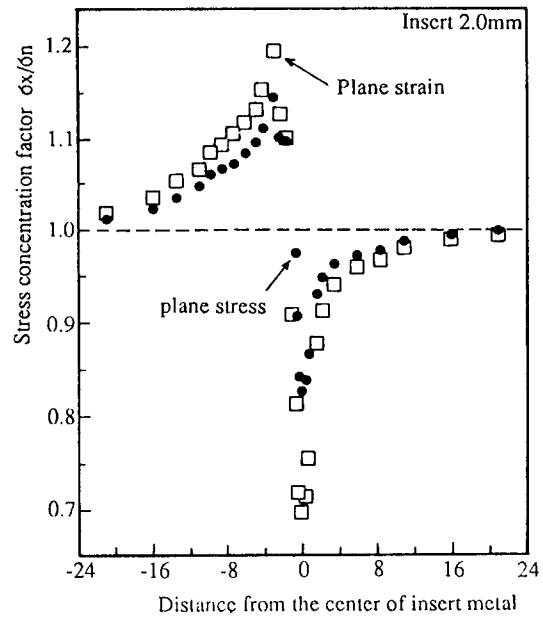


Fig. 6 Stress distribution at the edge of dissimilar joint in plane strain state

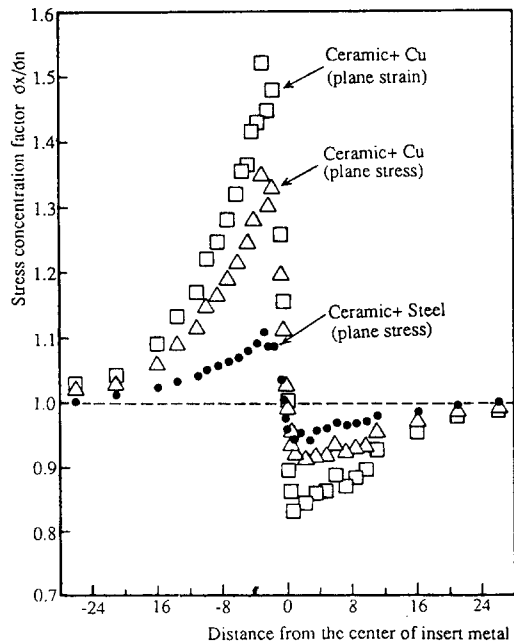


Fig. 7 Stress distribution at the edge of dissimilar joint (Ceramic+Cu & Ceramic+Steel)

한대인 경우, 즉 세라믹과 Cu만을 접합한 것에 대한 탄성해석 결과이다. 세라믹과 Cu만을 접합한 경우가 강을 직접접합한 경우보다 더 큰 응력집중이 생기고, 같은 Cu와의 접합이더라도 평면변형률상태에서 더 큰 응력집중이 생기는 것을 알 수 있다. 따라서 세라믹과 강을 접합하는 경우에 잔류응력을 감소시키고 접합면의 강도를 향상시키기 위해서는 Cu를 삽입하는 것이 유리한 것으로 되어 있지만, 세라믹에서 생기는 응력집중의 관점에서는 Cu를 배제하는 쪽이 유리하다고 할 수 있다.

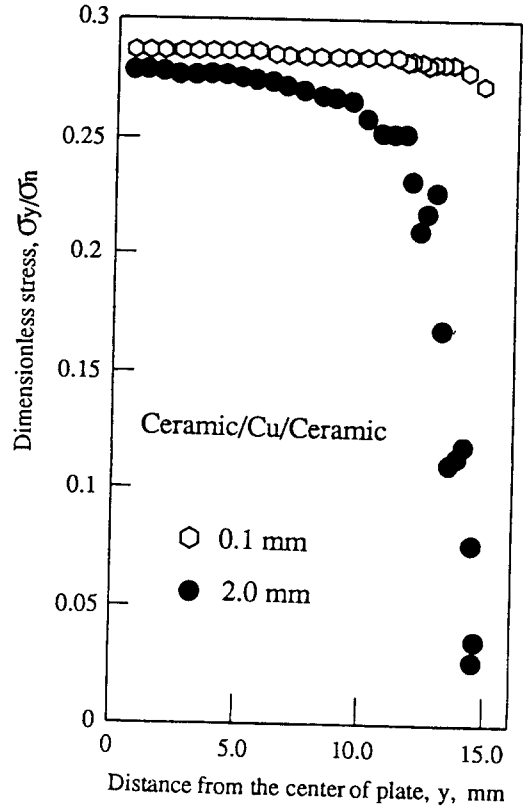
한편, 세라믹/금속접합부의 굽힘시험⁴⁵⁾과 인장시험⁶⁾시에 파단은 주로 세라믹측에서 발생하고 세라믹측의 강도가 접합부의 강도로 되는 경향이 높기 때문에, 본 연구에서와 같은 세라믹에서의 응력집중현상은 잔류응력과 더불어 세라믹/금속접합부의 강도를 지배하는 인자가 된다고 할 수 있다³⁾.

이상의 결과와 금속재료용접부의 연화역에서 생기는 소성변형에 대한 구속현상⁷⁾을 비교하여 보면, 양단의 경질의 재료가中间的의 연질재료의 변형을 구속함에 의해 구속응력이 발생함과 동시에 경질재료와 연질재료 접합면 근방의 경질재료측면에서 응력집중이 발생하게 된다는 유사한 경향을 보인다. 그러나 금속재료 용접부에서는 탄성계수와 프와손비는 모두 같은 것이 일반적이기 때문에 연화역이 소성변형을 개시한 후부터 구속현상이 나타나지만, 이종재의 접합부에서는 탄성상태에서부터 구속현상이 발생하고 이로 인하여 세라믹측에서는 탄성상태에서부터 응력집중현상이 나타나게 된다.

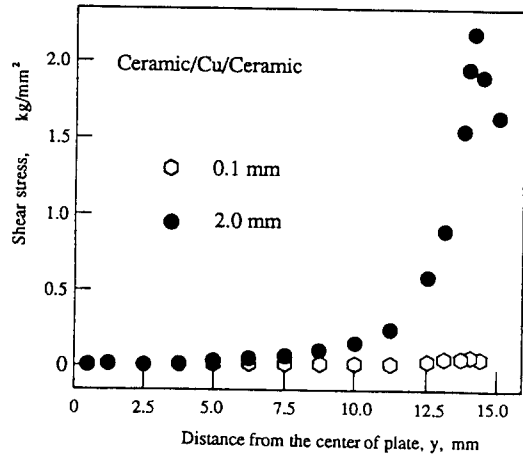
3.2. 구속응력과 응력집중 발생기구의 모델화

지금까지의 이종재료접합부(연화부를 가진 금속재료 용접부와 같이 동일한 탄성계수 및 프와손비를 나타내는 이음부도 포함)에서의 변형구속효과는 접합부 폭방향에 따른 전단응력(τ_{xy})이나 구속응력(σ_y)의 변화 또는 이들과 각 방향의 변형률분포와의 관계를 나타내는 것에 의해 고찰되어 왔다⁷⁾.

Fig.8 (a), (b)는 $Al_2O_3/Cu/Al_2O_3$ 접합부에 대해 평면응력상태에서 탄성해석하여 얻은 삽입금속 중앙에서의 σ_y 를 σ_n 으로 무차원화한 σ_y/σ_n 및 삽입금속과 Al_2O_3 접합면에서의 τ_{xy} 의 y방향에 따른 분포를 각각 나타내고 있다. 여기에서 접합체로서 $Al_2O_3/Cu/Al_2O_3$ 를 선택한 것은 응력분포를 좌우대칭화함



(a) Constraint stress distribution



(b) Shear stress distribution.

Fig. 8 Constraint stress and shear stress distributions at the center of Ceramic/Cu/Ceramic joint in elastic state (Plane stress, $\sigma_n = 27.14 \text{ kg/mm}^2$)

으로서 이하의 고찰을 용이하게 하기 위해서였다. $Al_2O_3/Cu/Al_2O_3$ 접합부에서 응력집중계수의 최대값은 삽입금속이 0.1mm인 경우 1.002, 2.0mm인 경우 1.10으로서 동일조건인 $Al_2O_3/Cu/steel$ 접합부에 비해 낮은 값이었다.

(a)의 σ_y 분포에서 그 경향은 $Al_2O_3/Cu/steel$ 의 결과인 Fig.4와 매우 유사한 것을 알 수 있다. 다만 σ_y/σ_n 값이 $Al_2O_3/Cu/Al_2O_3$ 접합부에서 더 높게 나타나고 있는데 이것은 Al_2O_3 의 탄성계수가 강에 비해 훨씬 높은 영향을 반영하고 있기 때문이다.

(b)에서 삽입금속과 Al_2O_3 접합면에서의 전단응력 분포는 삽입금속의 두께가 0.1mm인 경우 전 위치에서 거의 0으로서 Al_2O_3 가 삽입금속의 변형을 거의 완벽하게 구속하고 있다는 것을 알 수 있다. 반면 2.0mm인 경우 전단응력은 시험편중앙에서는 거의 0이나 시험편의 측면으로 올수록 급격히 증가하고 있다.

그러나 이러한 σ_y 및 τ_{xy} 는 연질인 삽입금속의 변형을 경질의 양단재료가 구속함에 의해 결과적으로 나타나는 현상이기 때문에 이것으로부터 변형구속의 발생기구를 유출해 내기는 어렵고, 더욱이 세라믹에서 발생하는 응력집중 및 삽입금속의 두께변화에 따른 응력집중현상의 변화를 설명할 수 없을 것으로 판단된다. 변형구속 및 응력집중은 외력에 의한 각 재료의 변형거동의 차이에 의해 발생하는 것이기 때문에, 그 기구는 접합체를 구성하고 있는 각 재료의 변형거동과 이에 동반한 구속력을 고찰해 봄으로써 타당하게 얻어질 수 있을 것으로 판단된다.

삽입금속의 두께가 얇은 것과 두꺼운 것으로 된 $Al_2O_3/Cu/Al_2O_3$ 접합체에 x 방향으로 각각 동일한 하중 P를 부하하는 경우, 연질금속인 Cu가 자유변형하면 Fig.9(a), (b)에 나타내어진 일점쇄선과 같이 될 것이다. 그림에 나타내어진 바와 같이 연질금속인

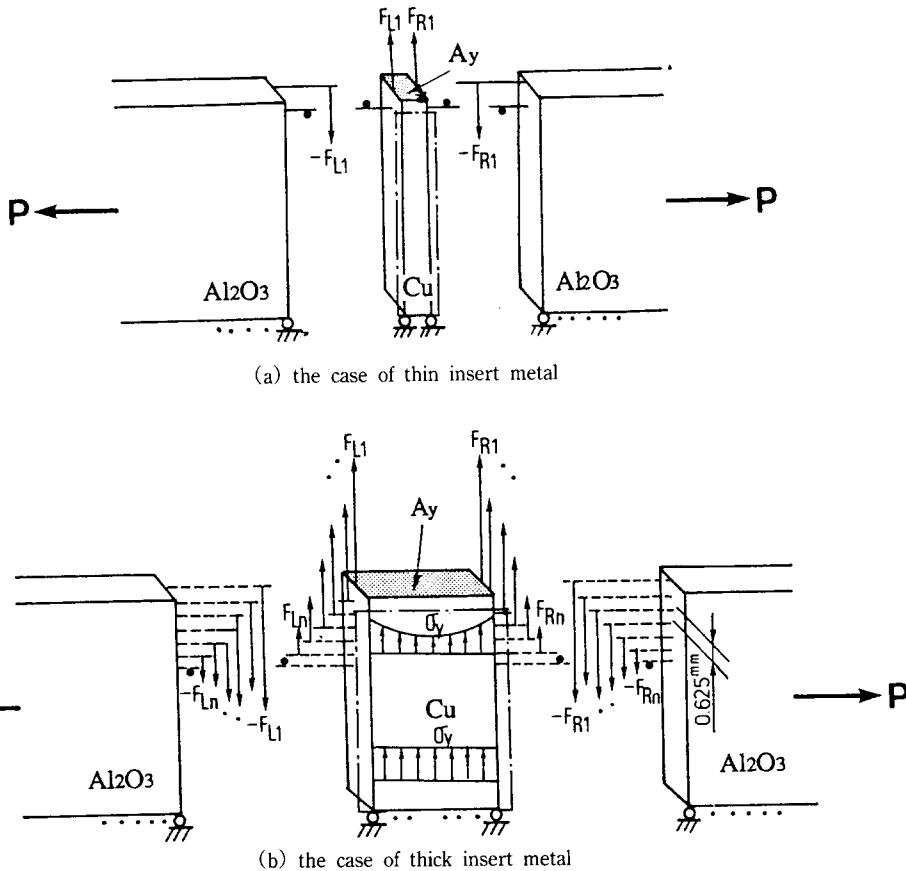


Fig. 9 The mechanism of stress concentration in ceramics

Cu는 Al_2O_3 에 비해 낮은 탄성계수와 높은 프와손비를 가지고 있으므로 폭방향(y방향)으로 더욱 더 많이 수축하려고 하고, 그 수축량은 하중이 동일하다면 Cu의 두께에 관계없이 같게 된다. 그러나 집합체의 경우 Al_2O_3 와 Cu접합면에서의 변형은 연속적이어야 하고 접합면에서의 Cu와 Al_2O_3 의 수축량은 같아야 하기 때문에 Cu에는 자유변형상태에 비해 Cu와 Al_2O_3 의 수축량의 차이에 상당하는 바깥방향으로의 구속력이 유발될 것이다. 이때 구속력은 Cu의 두께에 비례하므로 Cu의 두께가 얇은 접합부보다 두꺼운 접합부에서의 구속력이 더 클 것이다. 이와같은 구속력은 Cu측에서는 인장력이 되고 Al_2O_3 측에서는 그 반력으로 생기는 압축력이 될 것이다. Fig.9(a), (b)에는 이와같은 구속력의 발생기구를 나타내고 있다. 구속력은 그림에 나타내어진 바와같이 표면에서 가장 크고 내부로 들어가면서 작아질 것으로 판단된다. 또한 삽입금속 Cu에서 구속응력 σ_x 는 내부로 들어갈수록 구속력에 상당하는 크기만큼 증가하지만 구속력이 근사적으로 0이 되는 위치에서 부터는 일정한 값을 가지게 될 것이다. 바꾸어 말하면 인접요소간의 σ_y 의 차를 y방향의 단면적에 대하여 적분하게 되면 그 요소들간에 작용하고 있는 구속력이 된다고 판단된다.

Fig.10은 이와같은 방법에 의해 얻어진 구속력(F_c)을 그 때에 작용하고 있는 하중(P)으로 무차원화한

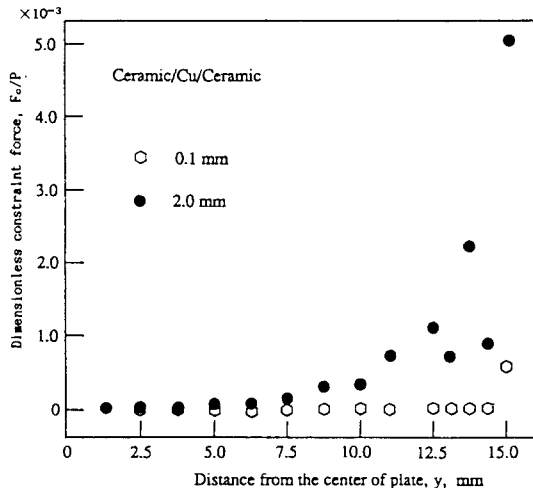


Fig. 10 Constraint force distribution of Ceramic/Cu/Ceramic joint in elastic state (Plane stress, $\sigma_n = 27.14 \text{ kg/mm}^2$)

값의 y방향에 따른 분포를 나타낸 것이다. 여기에서는 계산과 고찰의 단순화를 위하여 Cu를 y방향에 대하여 등간격(0.625mm)으로 나누어 그 등간격으로 나눈 한 요소내에서의 σ_y 의 평균치에 요소의 y방향 단면적을 곱한 량과 인접요소의 그것과의 차를 두 인접 요소의 경계에서 작용하는 구속력으로 취하였다. 그림에서 삽입금속 Cu의 두께가 0.1mm인 때의 구속력은 시험편 측면을 제외하고 거의 0이지만 2mm인 경우는 0.1mm인 경우에 비해 그 크기도 상당히 크며 분포양상도 y방향으로 어느정도 깊이까지 분포하여 있다. 즉 Cu의 두께가 0.1mm인 경우 구속력은 거의 표면에서만 작용하고 있고 그 크기도 작지만 2mm인 경우 σ_y 값의 변화가 있는 폭만큼 구속력도 분포하고 있다. 한편 구속력의 분포양상에 반해 Fig.8 (a), (b)에 나타내져 있는 σ_y 의 분포가 0.1mm인 경우가 2mm인 경우에 비해 전체적으로 높게 되어 있는 것은 Cu의 y방향 단면적이 0.1mm인 경우가 2mm인 경우에 비해 훨씬 작기 때문이다.

이와같은 구속력은 세라믹측에서는 앞서 설명한 바와같이 압축력으로 되며, 이 압축력이 Cu와 세라믹의 접합면에서 세라믹쪽으로 작용하므로 접합면 근방의 세라믹측 측면에서는 인장성분의 굽힘응력이 외력으로 인한 응력에 추가하여 발생한다. 따라서 접합면 근방의 세라믹측 측면에서 최대의 응력집중현상이 나타나게 되며, 또한 이러한 응력집중현상은 구속력이 커지게 되는 두꺼운 삽입금속을 가진 접합체에서 더욱 현저하게 될 것이라 판단된다.

4. 결 론

연질의 삽입금속(Cu)을 이용하여 접합하는 판상 이종재접합부에 대하여 평면응력 및 평면변형률 탄성 및 탄-소성FEM에 의한 수치실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 연질의 삽입금속(Cu)을 이용한 세라믹과 금속의 이종재접합부에는 서로 다른 기계적성질로 인하여 탄성상태에서 부터 세라믹측에서 응력집중이 생기고, 이 현상은 삽입금속 두께의 영향을 받는다.
- 2) 이종재접합부 세라믹측에서의 응력집중계수는 삽입금속의 두께가 작을수록 감소하지만 하한치를 가지고 있고, 그 두께가 커지면 응력집중계수는 증가하지만 이 경우도 상한치가 있다.
- 3) 평면응력 탄-소성상태에서는 탄성상태에서보다 세라믹측에서의 응력집중이 증가하는 경향을 나타

내었다.

- 4) 이중재접합부의 세라믹층에서 생기는 응력집중 현상은 평면응력상태보다 평면변형률상태에서 더욱 심해진다.
- 5) 이중재접합부의 경질재료에서 생기는 응력집중 현상의 발생기구는 접합부의 폭방향으로 유발되는 구속력을 이용하여 효과적으로 설명할 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) 中尾, 西本, 外3人: Si_3N_4 と金屬接合継手における残留應力に関する検討, 日本溶接學會論文集, 7-2, pp.109-116, 1989
- 2) 김영식, 조상명, 김석주: 세라믹과 금속접합부의 잔류 응력해석에 관한 연구, 대한용접학회, '91년도 춘계학술발표 개요집, pp.103-105, 1991
- 3) 小林, 荒居, 外2人: セラミクス/金屬 接合強度の力學的評價, 日本機械學會論文集(A編), 55-512, pp.750-754, 1989
- 4) 김영식, 박훈중, 최영국: 세라믹과 금속과의 고상확산 접합에 관한 연구, 대한용접학회, '90년도 추계학술발표 개요집, pp.45-49, 1990
- 5) 김영식, 김광환, 최영국: 산화물계세라믹과 금속과의 Brazing접합에 관한 연구, 대한용접학회, '90년도 추계학술발표 개요집, pp.56-59, 1990
- 6) 小幡: 接合部の試験, 日本溶接協會, 先端材料の接合技術シンポジウム(テキスト), pp.47-101, 1991
- 7) 松本, 外2人: 低強度部を含む丸棒継手の降伏強さの評価手法に関する検討, 日本溶接學會論文集, 6-2, pp.92-99, 1988
- 8) 白鳥 外2人: 數値破壊力學, 實教出版, 1980
- 9) 趙相明 外1人: 切り領域における弾塑性應力分布の推定, 日本溶接學會論文集, Vol.5, No.4, pp.100-105, 1987