

티탄과 알루미늄의 마찰용접에서 발생하는 잔류응력·소성변형

김 유철* · 박 정 응**

* 일본 大阪대학 접합과학연구소

** 삼성중공업 거제조선소 용접연구파트

Features of Residual Stress and Plastic Strain in Titanium/Aluminium Friction Welds

You-Chul Kim* and Jeong-Ung Park**

* Joining and Welding Research Institute, Osaka University Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

** Dept. of welding research, 530, Jangpyung-Ri, Sinhyun-Up, Koje-City, Kyungnam 656-710, Korea

Abstract

Friction welding of titanium and aluminium is numerically modeled by the axisymmetric thermal elastic-plastic analysis. In titanium/aluminium friction welding, heat transfers into the titanium substrate to a distance of $z=10(\text{mm})$ on the side of the bondline and into the whole region of the aluminium substrate having the large thermal conductivity. Adjacent to the bondline, σ_r and σ_θ are tensile in the substrate whose thermal shrinkage is large, and are compressive in the substrate whose thermal shrinkage is small. σ_z along the radial direction is large tensile at the periphery of the component. Plastic strain occurs only close to the bondline in the aluminium substrate. In the components of plastic strain, ϵ_r^p and ϵ_θ^p have positive values and ϵ_z^p has large negative value. However, ϵ_z^p is produced not because of the severity of the mechanical restraint condition, but on purpose to satisfy the condition of the volume constant. A plastic work is proposed as a measure to evaluate the mechanical severity. The plastic work is larger in the aluminium substrate than that in the titanium substrate. The mechanical condition is severer in the aluminium substrate.

(Received June 2, 2000)

Key Words : Friction welding, Joining of dissimilar materials, Residual stress, Plastic strain, Numerical modeling

1. 서 론

Ti과 Al을 접합하는 경우 용융용접에서는 접합면에 금속간화합물이 생성되어 건전한 접합체를 얻기가 어렵다. 그래서 마찰용접¹⁾이나 고상확산접합²⁾과 같은 방법이 연구되고 있다. 접합시간을 비교해 보면 마찰용접이 고상확산접합에 비해 빠른 시간에 접합할 수 있어 유리하다³⁾. 한편 Ti/Al접합체를 구조물로 사용하는 경우 접합시에 발생하는 잔류응력 소성변형의 특징을 파악하는 것이 중요하나 아직까지 그러한 연구는 거의 이루어지고 있지 않다.

본 연구에서는 Ti과 Al의 마찰용접을 모델링하여 유한요소법에 의해 비정상열전도 및 열탄소성응력해석을 행하여, 그 결과로부터 마찰용접시 발생하는 온도 분포 및 잔류응력·소성변형의 특징과 생성기구를 규명하였다.

2. 해석모델링

2.1 해석모델

Ti과 Al의 물리적정수의 온도의존성을 Fig.1에 기계적 제성질의 온도의존성을 Fig.2에 보여주고 있다⁴⁾.

Al모재의 항복응력은 400℃이상이 되면 절대값이 매우 작아진다. 그래서 그 이상 온도에서는 Al모재에 든 어떠한 열응력이 발생하지 않으며 압축력에 대해서

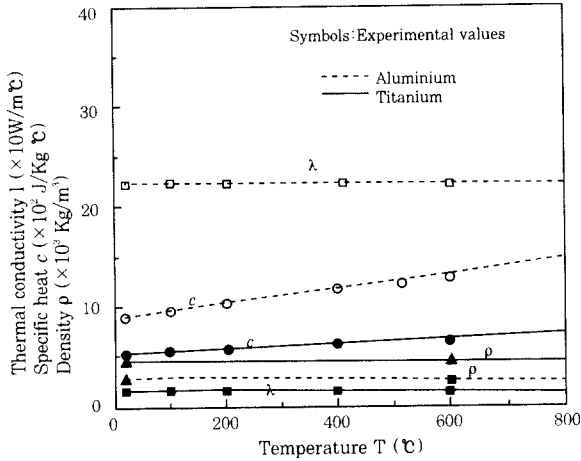


Fig. 1 Thermophysical constants.

Poisson's ratio Aluminium $\nu = 0.33$
Titanium $\nu = 0.34$

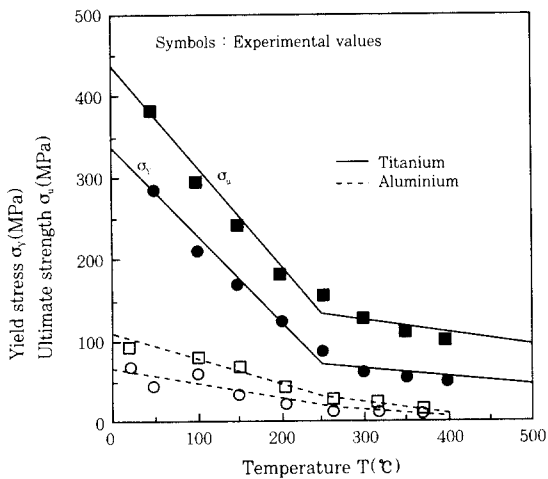
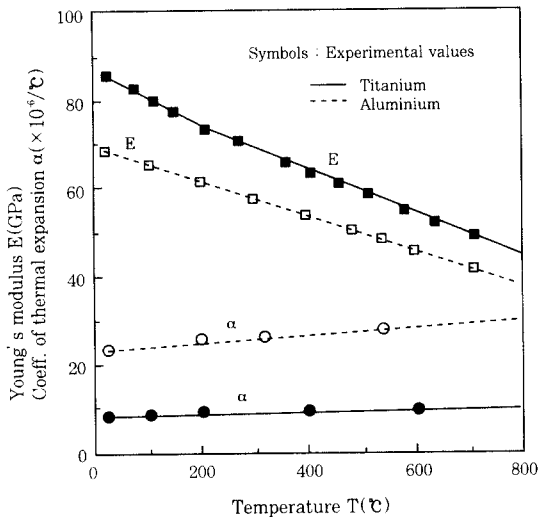


Fig. 2 Mechanical properties.

도 소성 변형(접합체 외부에 플래시로 나타남)만 발생한다. 따라서 본 해석에서는 압축에 의한 압축력은 무시했다. 또한 400℃이상에서는 Al의 항복응력 및 인장강도를 영으로 모델링하였다.

마찰용접체 접합경계면의 외부에 다량의 플래시가 형성된다. 단, 플래시는 접합체에 발생하는 응력 · 소성변형에는 크게 영향을 주지 않는 것으로 생각된다. 따라서 해석 모델링시 접합체는 플래시가 발생하지 않는 것으로 가정했다.

해석모델 및 좌표계를 Fig.3에 보여주고 있다. 여기서 계면이란 $z=0$ mm의 면이고, 내부는 z 축방향을 의미한다. 해석은 축대칭열탄소성문제로서 행하였다.

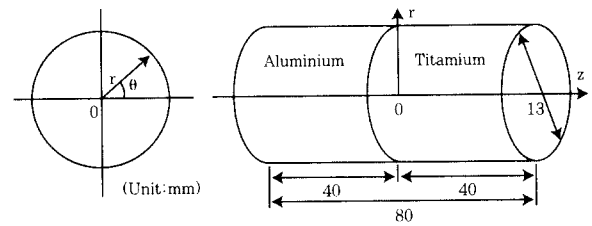


Fig. 3 Component geometry

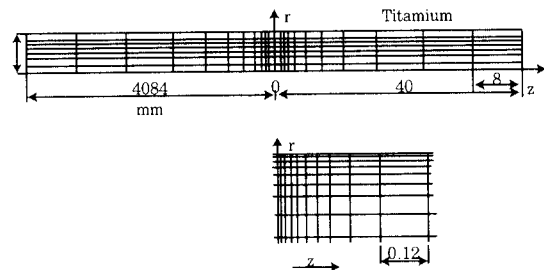


Fig. 4 Finite element grid.

2.2 요소분할

이종재료의 접합문제에 있어서 접합계면 근방단부에 있어서 응력특이성의 유 · 무가 논의되어 유한요소해석을 이용한 계면근방 단부의 요소분할시 유의할 필요가 있다^{5,6)}. 이와 관련하여 요소크기를 결정하는데 있어서 제안된 방법⁵⁾이 있어 해석에 사용한 요소분할 크기를 결정하였다.

3. 잔류응력 · 소성변형

3.1 온도분포와 그특징

마찰용접시 온도이력을 유한요소에 의한 축대칭 비정상열전도해석을 행하여 구했다. 발열량(q)은 정상토크와 회전수의 곱으로부터 $q=1.23$ (kJ/s)을 구했고,

이것을 접합면에 2(s)(마찰시간)간 투여했다.

축중심($r=0(\text{mm})$)위치에 있어서 z 축에 따라 온도 이력을 Fig.5에 보여주고 있다. 한편, 결과에 의하면 반경방향의 온도차는 없었다. 또한 축상의 대표점 $z = \pm 3.25(\text{mm})$ 에 있어서 온도이력을 Fig.6에 보여주고 있다.

열전도율의 다름 (Fig.1)에 의해 두모재에서 z 축에 따른 온도이력이 크게 다르게 나타났다(Fig.5). Ti에 주목하면 열은 계면으로부터 $z=10(\text{mm})$ 의 영역내에 확산되었으나 열전도율이 큰 Al은 모재전체에 걸쳐서 확산되고 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 추후 논하고자하는 응력의 발생에 큰 영향을 준다. 또 $r=0, z = \pm 3.25(\text{mm})$ 에서의 최고온도는 Al이 Ti보다 약 150°C 정도 높게 나타났다(Fig.6).

온도분포로부터 마찰용접시 발생하는 잔류응력·소성변형의 생성요인은 축방향의 온도구배에 기인한 반

경방향의 열팽창·수축량의 차에 의한 것으로 예측 할 수 있다.

3.2 잔류응력·소성변형의 특징과 생성기구

여기서는 3.1절의 온도를 이용하여 축대칭 열탄소성 응력해석을 행하였다. 해석결과를 토대로 잔류응력·소성변형의 특징과 이들의 생성기구를 규명하였다.

3.2.1 잔류응력

계면에 인접한 위치($z = \pm 0.005(\text{mm})$)에 있어서 Ti과 Al에 발생하는 잔류응력성분 : σ_r (반경방향), σ_θ (원주방향), σ_z (계면에 직각방향)의 r 축(반경방향)에 따른 분포를 Fig.7(a)에 보여주고 있다.

Ti과 Al의 마찰용접에서 선팽창계수(α)가 크고 (Fig.1), 또한 임의의 시간(t)에 있어서 온도(T)가 높은 Al에서 인장, Ti은 압축응력을 받는다. 이와같이 이재의 마찰용접 계면근방에서는 $\alpha \cdot T$ 가 큰 모재의 σ_r, σ_θ 가 인장, 작은 모재가 압축이 된다.

여기서 주목해야 할 것은 Al의 수축량이 Ti에 비해 큼에도 불구하고 σ_r, σ_θ 의 절대치는 Al이 Ti에 비해 작다는 것이다. 이것은 Al의 항복응력이 Ti의 항복응력에 비해 작기 때문이다. 이결과는 재료의 항복응력의 크기를 고려하지 않고는 발생하는 잔류응력의 크기나 분포를 예측할 수 없음을 의미한다.

r 축에 연한 σ_z 의 분포는 단부를 제외하고 절대치는 작다. 그것은 잔류응력생성의 주 요인은 z 축방향의 온도구배에 기인한 반경방향의 수축량의 차에 의한 것이다. 또한, r 축에 연한 σ_z 의 분포는 힘의 균형을 만족하고 있다.

이하 이음부의 역학적특성에 크게 영향을 미치는 σ_z 의 z 축방향의 특징에 대해 알아보기로 하자.

(1) 중심부

중심부($r=0.6(\text{mm})$)에 발생하는 σ_z 의 z 축에 연한 분포를 Fig. 8(a)에 보여주고 있다.

Al은 계면근방에서 인장, 계면보다 내부에서 작은 압축응력이 생성된다. 내부에서 압축응력이 작은 것은 축방향의 온도구배가 작기 때문이다⁵⁾. Ti은 계면의 극 근방을 제외한 전영역에서 압축응력이 발생하였다. Ti은 축방향으로 온도구배가 있고 Al을 포함하여 계면근방의 수축을 구속하기 때문에 큰 압축응력이 발생했다고 판단된다. 이러한 경향은 축방향으로만 온도구배가 발생하는 마찰용접의 특징이다⁵⁾.

또한, 동종재의 경우, $(\sigma_z)_{\text{max}}$ 은 계면에서 발생하지만 이재용접의 경우 계면으로부터 약간 Al의 내측에서 발생한다. 그것은 $z = \pm 3.25(\text{mm})$ 에 있어서 Al의 최

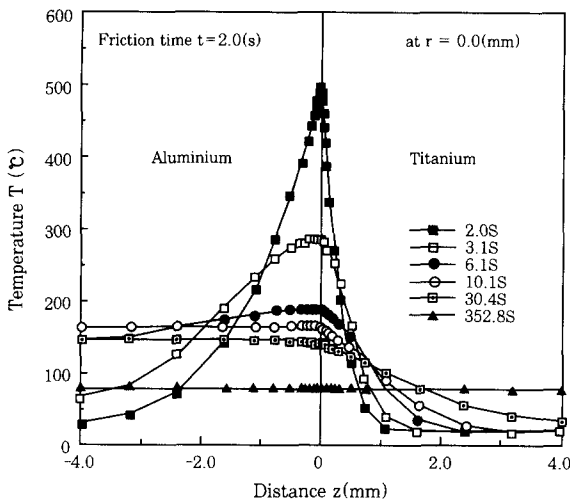


Fig. 5 Temperature history during cooling

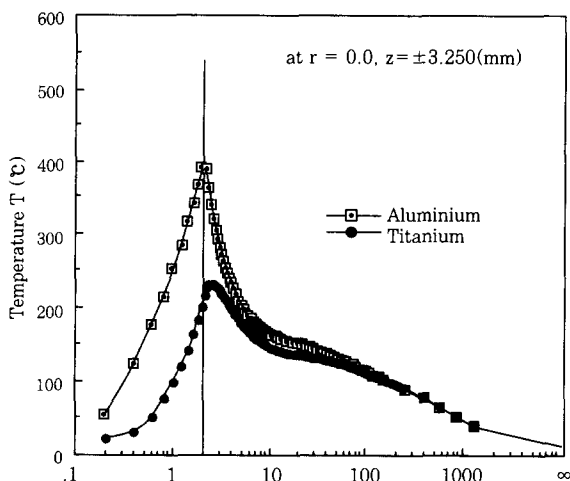


Fig. 6 Heating and cooling cycles during dissimilar friction welding

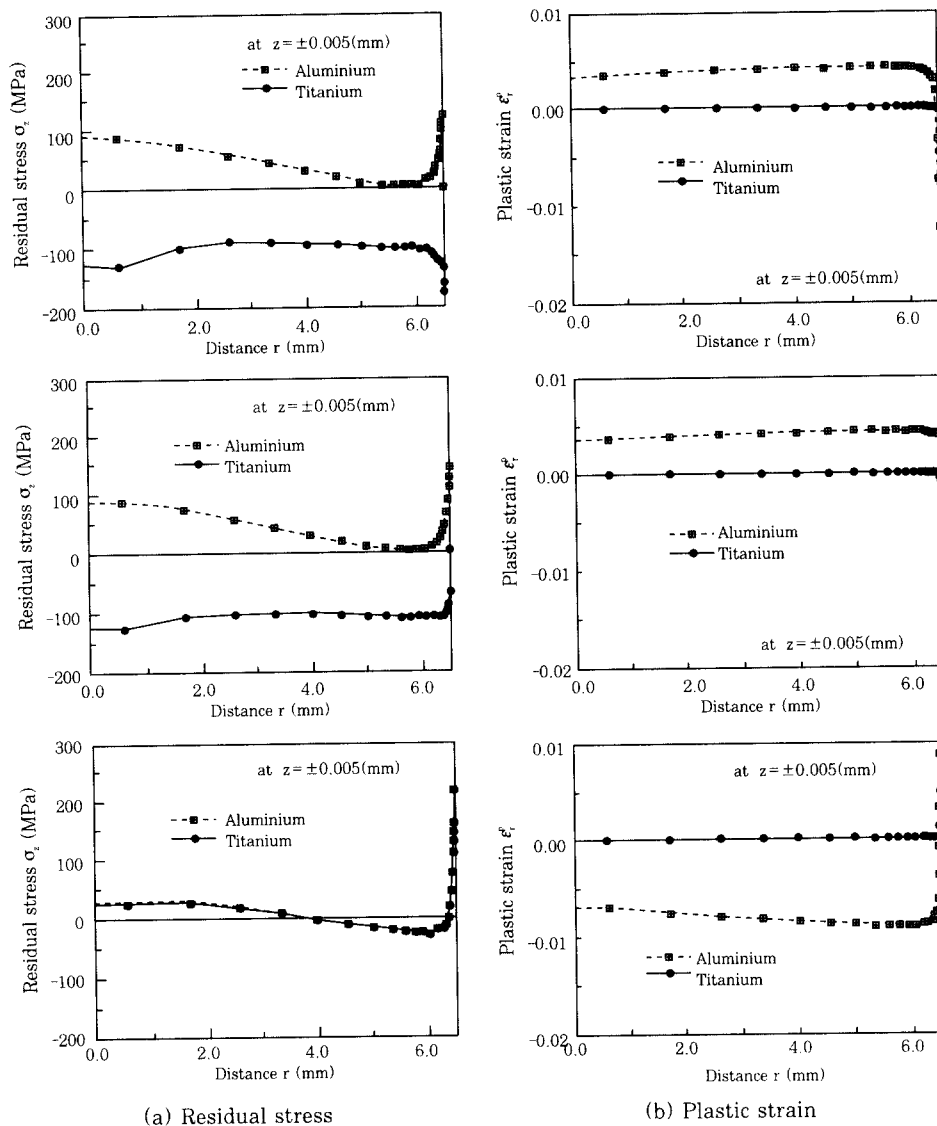


Fig. 7 Residual stress and plastic strain distributions in radial direction at immediately adjacent to bondline.

고온도가 Ti에 비해 높은 것(Fig.6)으로부터 알 수 있는 것과 같이 Al의 수축이 Ti보다 늦게 일어나고 수축량도 크기 때문이다.

(2) 단부

단부($r=6.495(\text{mm})$)에 있어서 σ_z 의 z축에 연한 분포를 Fig.8(a)에 보여주고 있다. Al은 계면근방에서 큰 압축, 내부에서 작은 인장응력이 발생하고, Ti모재는 전영역에서 인장응력이 발생하였다. α 가 큰 Al이 계면근방에서 큰 압축응력이 발생하는 것은 단부의 강성이 중심부와는 달리 작고 Al의 수축을 Ti이 구속할 수 없기 때문이다.

Al모재는 항복응력이 회복되는 온도 200°C 까지 냉각되면 축방향의 온도구배가 거의 없어진다. 그래서 잔류응력분포는 일정온도로 부터 균일하게 냉각되는

경우와 매우 유사한 형태를 이룬다. 한편, Ti모재는 100°C 정도 냉각될 때까지 축방향의 온도구배에 크게 의존한다(Fig.5). 그렇기 때문에 잔류응력은 축방향의 온도구배에 의해 발생한다.

3.2.2 소성변형

계면에 인접한 위치($z=\pm 0.005(\text{mm})$)에 생성된 소성변형성분 : 반경방향 ϵ_r^p , 원주방향 ϵ_θ^p 그리고 계면 직각방향 ϵ_z^p 의 r축에 연한 분포를 Fig.7(b)에 보여주고 있다.

소성변형은 Al에 집중적으로 생성되고 ϵ_r^p 는 ϵ_θ^p , ϵ_z^p 에 비해 크게 생성되었다. 그러한 이유는 잔류응력, 소성변형의 생성원인은 반경방향의 수축량의 차에 의해 기인한 것이라고 전술했다. 따라서 계면직각 방향

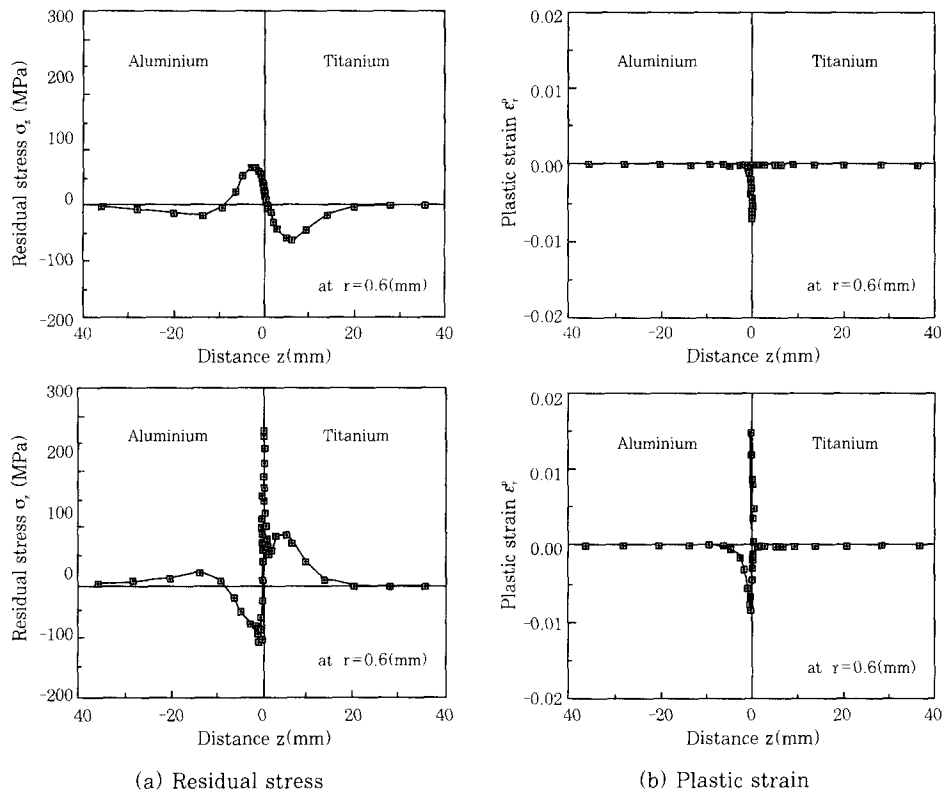


Fig. 8 Residual stress and plastic strain distributions in axial direction at center and periphery of component.

에 발생하는 負의 소성변형 ϵ_p 는 온도나 구속등과 같은 역학적조건에 의해 발생하는 것이 아니라 체적일정의 조건을 만족하기위해 생성되는 것이다.

마찰용접체의 중심부와 단부에 있어서 ϵ_p 의 z 방향에 연한 분포는 Fig.8(b)에 보여주고 있다.

계면근방의 ϵ_p 에 주목하면 중심부에서는 Al모재의 계면 극근방, 단부에서는 Al에 집중적으로 생성되었고 Ti모재에서는 거의 생성되지 않았다.

4. 고찰

여기서는 마찰용접후 잔류응력·소성변형의 발생으로 인한 집합체의 건전성을 평가하는 역학적조건에 대해 고찰해 보자. Ti과 Al의 마찰 용접에서는 Al의 수축력이 크고, 그것을 Ti이 구속하기 때문에 응력·소성 변형이 발생된다. 따라서 Ti보다 Al이 역학 적조건이 현저하게 좋지 않다고 유추 된다. 이것을 기본으로 하여 이하 역학적지표에 대해 고찰해 보자.

먼저 잔류응력을 지표로 하면 잔류응력은 Al에 비해 Ti이 크고, Ti의 역학적조건이 현저하게 좋지 않게되어 전술한 유추와는 모순이 발생된다. 한편, 소성변형을 지표로 하면 소성변형은 Al에 집중적으로 발생되어 역학적조건을 평가하는 지표가 될 수 있다. 그런데 소성변형이 크게 발생한 ϵ_p 는 역학적조건 정도의 의해 발생한 것이 아니고 체적일정의 조건을 만족하기 위해 발생한 것이다. 따라서 역학적지표가 될 수 있으나 다소 주의가 필요하다. 그래서 역학적조건의 평가 지표로서 소성일(Plastic Work)을 이용한 방법을 제안한다.

소성일은 각 온도중분간의 소성변형률성분과 응력성분의 積으로 전이력에 대해 적분하여 얻을 수 있다.

계면에 인접한 위치($z = \pm 0.005$ (mm))의 반경방향

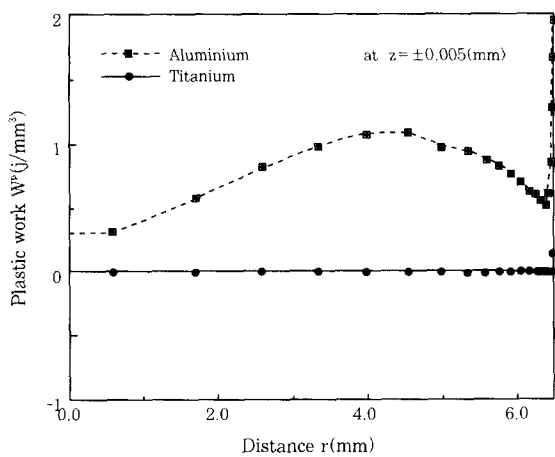


Fig. 9 Plastic work distribution at immediately adjacent to bondline

에 의한 소성일(W_p)을 Fig.9에 보여주고 있다. W_p 는 Al이 크고 Ti은 단부를 제외하고 영(zero)이다. 이것은 Ti/Al의 마찰용접에서 Al의 역학적조건이 Ti에 비해 현저하게 좋지 않다는 것을 의미한다.

5. 결 론

Ti/Al마찰용접을 수치해석에 의해 구한 결과를 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) Ti은 접합계면으로부터 10(mm)정도의 좁은 영역에서 열확산이 일어난다. 한편, Al은 모재의 전영역에 걸쳐 확산되어 이것이 응력생성에 크게 영향을 미친다. 또한, 접합계면을 중심으로 대칭위치에서의 최고온도가 Al이 Ti보다 높게 나타났다.
- (2) 이재접합에 있어서 계면근방에서 반경 방향에 의한 σ_r , σ_θ 는 열수축량이 큰 모재에서 인장, 작은 모재에서 압축응력이 발생 되었다.
- (3) 반경방향에 의한 σ_z 는 단부에서 큰 인장응력이 발생하였다. 한편, z축에 의한 σ_z 는 z축방향의 온도구배에 기인한 r방향의 수축량의 차에 의해 발생된다.
- (4) 소성변형은 Al모재의 계면근방에서만 생성되었

고, ϵ_r , ϵ_θ 은 正, ϵ_z 는 큰 負의 값을 갖는다. 큰 負의 ϵ_z 는 온도나 구속과 같은 역학적구속에 의해 발생하는 것이 아니라 체적일정의 조건을 만족하기 위해서 발생한 것이다.

(5) 소성일을 이용하여 역학적조건인 평가 방법을 제안했다. 소성일은 수축량이 큰 Al의 역학적조건이 Ti에 비해 현저하게 좋지 않은 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 정호신, 條田剛: 마찰용접의 이론과 실제의 적용, 대한용접학회, 제15권, 제6호, pp.1-7, 1997
2. 圓成ら: ケタンとアルミニウムの擴散溶接, 溶接學會誌, 46-2(1977) pp.32.
3. 富士ら: 工業用純Ti/純Alの摩摺壓接継手特性に及ぼす後熱處理の影響, 日本溶接學會論文集, 12-1(1994), pp.101
4. 예: American Society of Metals: Metals hand book.
5. 예: 溶接構造研究委員會 "異材接合界面の力學" 分科會編: 異材接合界面の力學(Part 1), 1991
6. 金ら: ケタン/AISI304Lステンレス鋼の摩摺壓接で生じる殘留應力・塑性ひずみの特徴とそれらの生成機構, 溶接學會論文集, 12-2(1994), pp.243.