

# A2024와 SM45C 마찰용접의 열전달 해석

이상윤\*, 윤병수\*\*

## Heat Transfer Analysis of Friction Welding of A2024 to SM45C

Sang Yun Lee\*, Byeong Soo Yun\*\*

### Abstract

The heat transfer mechanism initiating the friction welding is examined and a transient three dimensional heat conduction model for the welding of two dissimilar cylindrical metal bars is investigated. The cylindrical metal bars are made of materials made of A2024 and SM45C. Numerical simulations of heat flow are performed using the finite volume method. Respectively, Commercial FLUENT code is used in the heat flow simulation and maximum temperature and distribution of temperature are calculated. Temperature of friction welded joining face is compared with the temperature distribution measured by experiment and numerical simulation. The maximum temperature of friction welded joining face is lower than melting point of A2024-T6 aluminum alloy using insert metal. The temperature distribution of friction welded joining face with insert metal is more uniform than that of without insert metal.

**Key Words :** Friction Welding (마찰용접), Heat Transfer(열전달), Heat Flow(열유동), Insert metal(삽입재)

### 1. 서 론

마찰용접은 극히 짧은 시간동안에 이루어지고 회전 마찰열을 이용하기 때문에 마찰면 용접면의 온도를 정확하게 측정하기가 매우 어렵다. 따라서 마찰 용접면의 온도는 정성적으로 추정하는 방법을 일반적으로 사용한다. 마찰면의 온도는 마찰용접의 조건 및 재료의 물리적 화학적 조성에 의하여 영향을 받으며, 또한 마찰토크, 마찰계수,

주축 회전수, 압셋압력 등 마찰용접현상과 밀접한 관계를 가지며, 마찰 용접부의 기계적인 강도에 영향을 미친다.

마찰면의 온도를 추정하는 방법은 모체를 열전대로 사용하는 직접 열전대법과 간접 열전대법 그리고 이론적으로 해석하는 방법이 있다. 직접 열전대법은 재료 자체를 열전대로 이용하여 기전력을 측정하고 기준 열전대와 기전력과 비교하여 온도를 추정하는 방법이며, 간접 열전대법은 마찰면에 근접한 곳에 구멍을 가공하고 열전대를 삽

\* 대덕대학교 컴퓨터응용설계과(leesyl@mail.ddc.ac.kr)

\*\* 우송공업대학교 기계공학계열

입 고정하여 온도를 측정하는 방법이다. 전산해석에 의한 온도해석은 Cheng<sup>(1)</sup>이 유한요소법(FEM)으로 동종 판재의 마찰 용접부의 온도를 해석하였으며, Sahin<sup>(2)</sup>은 Al-Al, Al-Steel, Steel-Steel의 마찰용접부의 온도를 유한체적법(FVM)으로 해석하였다.

본 연구는 A2024와 SM45C의 마찰용접 시 삽입재를 사용하지 않은 경우와 삽입재를 사용한 경우에 대하여 접합면의 온도를 추정하기 위하여 간접 열전대법으로 측정한 실험결과와 전산해석 결과를 비교 분석하였다.

## 2. 지배방정식과 전산해석기법

마찰용접 시 마찰면의 발열부를 포함한 용접시험편의 열전달을 해석하기 위한 에너지방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial x_i} \right] \right) + \frac{\dot{q}'''}{\rho C_p} \quad (1)$$

에너지방정식(1)에서 h는엔탈피,  $u_i$ 는 x,y,z, 속도,  $x_i$ 는 x,y,z 좌표,  $C_p$ 는 정압비열,  $\dot{q}'''$ 마찰면의 열용량을 나타낸다. 에너지방정식(1)을 일반형으로 나타내면 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \phi) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \phi) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma_\phi \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \right) + S_\phi \quad (2)$$

식(2)에서  $\phi$ 는 독립변수,  $\Gamma_\phi$ 는 확산계수,  $S_\phi$ 는 생성항을 나타내며, 식(2)에서 좌변 첫 번째 항은 검사체적 내의 시간에 따른 물리량의 변화를 나타내며, 두 번째 항은 대류항(convection term), 우변 첫 번째 항은 확산항(diffusion term), 두 번째 항은 생성항(source term)을 나타낸다.  $x_i$ 는 i 값의 변화에 따라서 좌표가 달라지며 i=1일 때 x, i=2일 때 y, i=3일 때 Z를 나타낸다. 변수에 따라 지배방정식이 달라지며  $\phi=1$ 인 경우 연속방정식,  $\phi$ 가 속도 성분인 경우는 운동량방정식,  $\phi$ 가 엔탈피인 경우는 에너지방정식을 나타낸다. 각각의 지배방정식에 대한 확산계수와 생성항은 다른 형태로 표현된다. 생성항은 일반적으로  $S_\phi = ax+b$ 와 같이 일차함수 형태로 표현될 수 있으며,  $S_p$ 는 일차함수의 ax에 해당하며, 상수값 b는  $S_c$ 에 해당된다. 유한체적법(FVM : Finite Volume Method)을 사용하여 검사체적에 대한 지배방정식(2)의 차분방정식을 구하

면 다음과 같다.

$$\phi_p \sum_i (A_i - S_p) = \sum_i (A_i \phi_p) + S_c \quad (3)$$

식(3)에서  $\phi_p$ 는 계산 격자점 중앙에서의 독립변수,  $\phi_p$ 는 계산 격자점 x,y,z에서의 독립변수,  $A_i$ 는 이산화방정식의 계수를 나타낸다. 본 연구에서는 열유체 해석 프로그램인 FLUENT를 사용하여 차분방정식 (3)의 해를 구하였으며, 수렴판정은 식(4)의 전 영역 잔류항의 총합이  $10^{-6}$ 이하가 되는 점이다. 식(4)에서 첨자 P는 기준 격자점을 나타내며, E와 W는 기준 격자점을 중심으로 좌·우 격자점을 나타내며, N과 S는 상·하 격자점을 나타낸다.

$$\bar{R} = \frac{\sum_{nodes P} [A_E \phi_E + A_W \phi_W + A_N \phi_N + A_S \phi_S + S_C - A_P \phi_P]}{\sum_{nodes P} (A_P \phi_P)} \leq 10^{-6} \quad (4)$$

### 2.1 전산해석 모델

삽입재가 있는 경우와 없는 경우에 대하여 마찰용접 면의 온도를 간접 열전대법으로 측정하기 위한 그림이 Fig. 1에 나타나있다. 직경이 매우 가는 열전대를 용접과정에서 소성변형이 적은 SM45C시험편에 구멍을 가공하여 삽입하였다. 또한 마찰표면의 온도를 계산하기 위하여 Fig. 2와 같은 유한 체적법에 의한 모델을 만들었다. 마찰용접부의 기계적 성질에 영향을 미치는 용접조건 인자는 주축의 회전수, 마찰압력, 마찰시간이며 브레이크 타임도 미소한 영향을 준다. 이들 각 용접조건 인자는 어느 것이나 기계적으로 설정되며 용접 품질의 불량을 적게 하는 요인이 되므로 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 이러한 인자를 고려하여 용접부에 대한 열유동과 온도분포 특성을 전산해석 하였다.

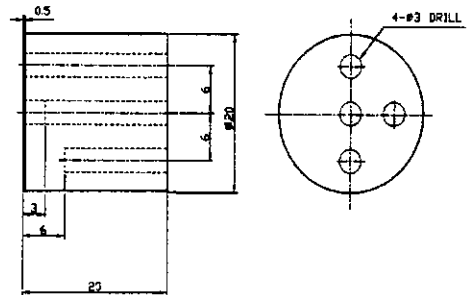
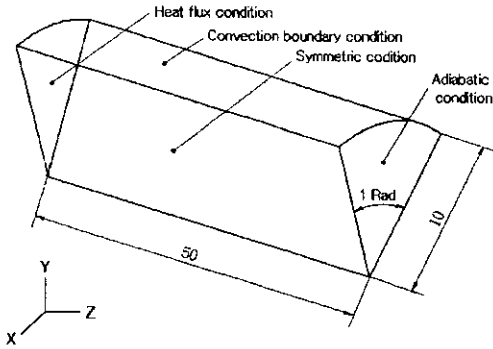
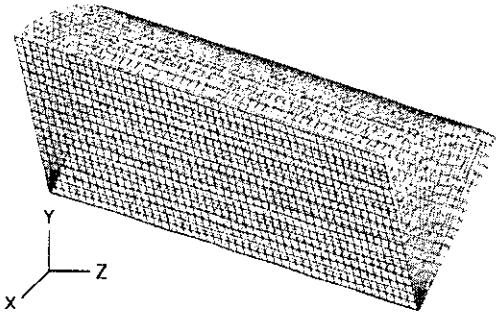


Fig. 1 Schematics of SM45C specimen for temperature measurement



(a) Boundary condition



(b) Grid

Fig. 2 Computational model for friction welding

## 2.2 초기조건 및 경계조건

마찰용접이 시작되기 직전( $t=0$ sec)의 시험편 초기 온도는 외기 온도인 293K로 가정하였으며, 시험편 표면에서는 자연대류 조건을 고려하여 다음식으로 부터 대류 열전달계수 값을 산정하였다.

$$N_u = \frac{hx}{k} = 0.85(G, P_r)^{0.188} = 4.056 \quad (5)$$

이때 Grashoff 수는 6000이고, 평균온도가 600K 일 때 대류열전달계수  $h=18 \text{ W/m}^2\text{C}$ 이다. 또한 일괄적인 고찰을 위하여 각 단계 모두 관성 좌표계를 사용하여 x방향은 용접시험편의  $\theta$ 방향으로서 좌측방향에서 우측방향을 양(+)으로 하였으며, y방향은 시험편의 반경방향을 양(+)으로 하였다. z방향은 xy평면에 수직이며 시험편의 축 방향으로 열부하와 수평인 방향이다. Fig. 2는 반경 10mm이고

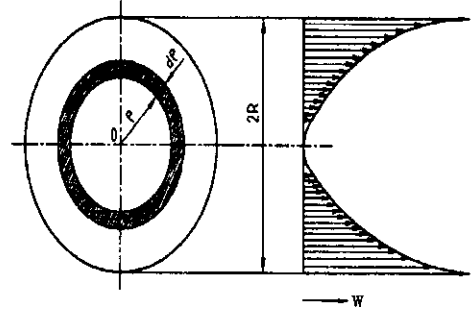


Fig. 3 Schematics for heat liberation at friction face

축 방향 길이가 50mm인 시험편의 경계조건과 계산격자를 나타내었다. 시험편의 대칭성을 고려하여 1 radian( $180/\pi$ )만 진산해석 하였으며, 열부하 조건은 0~1.8초 동안 가열되며 1.8~10초 사이는  $0 \text{ Mw/m}^2$ 의 열부하 조건으로 냉각된다고 가정하였다. 계산격자는 X방향으로 30선, Y방향으로 30선, Z방향으로 50선을 부여하였으며, 이 때 자연대류가 일어나는 표면과 열부하가 주어지는 마찰면에서 온도변화가 매우 급격하므로 이에 대응하기 위하여 이들 영역에는 조밀한 격자구조로 배치하였다.

## 2.3 마찰면의 열부하계산

마찰용접 동안에 발생하는 열은 마찰면에서 일어나는 제 현상을 지배할 뿐만 아니라 용접과정의 효율성, 용접강도의 특성 및 용접조건의 변수를 결정한다. Fig. 3에 마찰면에서의 회전수 N에 대한 마찰일량을 도식화한 그림이 나타나 있다. 실험재료의 반경을 R, 마찰계수  $\mu$ 를 마찰반경의  $\rho$ 에 관계없이 일정하다고 하면 모우먼트 M은 다음과 같다.

$$M = \int_0^R 2\pi\mu P_1 \rho^2 d\rho = \frac{2}{3} \pi\mu P_1 R^3 \quad (6)$$

여기서  $P_1$ 은 마찰압력(접촉압력)이며, 모우먼트를 마찰과정에서의 필요한 마찰 일량 W로 표현하면 다음과 같다.

$$W = 1.03 \times \frac{2}{3} \pi\mu P_1 N R^3 \times 10^{-6} \quad (7)$$

## 2.4 시간증분의 결정

천이상태의 해석에서 고려되어지는 시간 증분,  $\Delta t$ 는 계산의 정확도와 관련이 되는 항으로 최소 시간 증분보다

작을 경우 결과가 진동을 하거나 혹은 발산하게 되므로 이의 결정이 중요하며 결정사항은 주로 요소의 특성길이(characteristic length)로서 시간증분과는 다음의 상관관계가 있다.<sup>6)</sup>

$$\delta\tau_{\min} \geq \frac{\rho C_p}{6k} (\Delta l)^2 \quad (8)$$

여기서  $\Delta\tau$ 는 최소 시간증분,  $\rho$ 는 밀도,  $k$ 는 열전도계수,  $\Delta l$ 은 특성길이 즉 온도구배가 가장 큰 요소에서의 절점간의 거리이다.

### 3. 전산해석 결과 및 고찰

본 연구에 사용된 모재와 삽입재가 포함된 시험편에 대한 물성치가 Table 1에 나타나있다.

Table 1 Physical Property

| Material Property            | A2024-T6 (모재) | A2024-T6 (삽입재) | SM45C |
|------------------------------|---------------|----------------|-------|
| Thermal Conductivity (w/m℃)  | 164           | 164            | 43    |
| Density (kg/m <sup>3</sup> ) | 2787          | 2787           | 7870  |
| Specific Heat (J/kg℃)        | 883           | 883            | 473   |

Fig. 4는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에 대하여 SM45C의 반경방향에 대한 온도분포를 나타내었다. 마찰면 용접면에 열부하가 가해지면 가열 시간동안 온도가 매우 급격하게 상승하며, 용접 접합면의 최고 온도는 가열시간 1.8초일 때 Y=0일 때 536K, Y=R/2일 때 609K, Y=R 일 때 675K로 시험편 중심과 중간지점의 온도차는 73K이고, 중심과 표면의 온도차는 139K로 나타났다. 이와 같이 반경방향으로 멀어질 수록 온도차가 큰 원인은 열부하가 용접시험편의 직경의 세제곱( $Q \propto R^3$ )에 비례하기 때문이다.<sup>4)</sup> 전산해석 결과와 실험결과를 비교하여 보면 전반적인 온도변화의 경향과 온도가 잘 일치하고 있다. Fig. 5는 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에 SM45C의 축방향에 대한 온도분포를 나타내었다. 전반적인 온도변화 및 분포의 경향은 전산해석결과와 실험

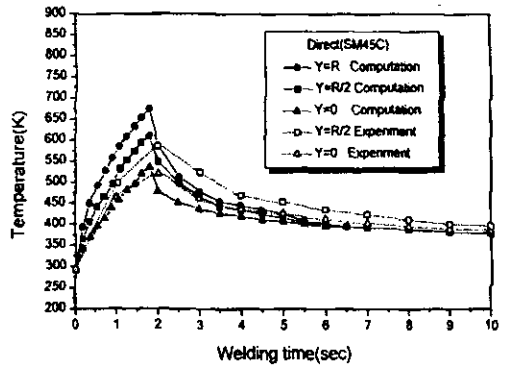


Fig. 4 Distribution of radial direction temperature without insert metal

결과가 매우 유사하게 나타났다. 그러나 Z=3mm, Z=6mm의 시간에 따른 온도분포는 Z=0.5mm와는 다른 형태의 온도분포의 양상을 보인다. 이는 재료의 물성치 특히 열전도계수가 작아 열이 빠르게 확산되지 않고 마찰면 부근에 축적됨으로 인하여 낮은 온도분포를 보이는 것이다. 냉각곡선의 특징을 살펴보면 전산해석결과가 실험결과보다 빠른 냉각속도를 보이는데 이는 전산해석에서는 상대편의 열적상태를 고려하지 못하였기 때문이다. Fig. 6과 Fig. 7은 삽입재를 사용하지 않고 직접 용접한 경우에 대하여 A2024-T6의 반경방향에 대한 온도분포와 축방향 온도분포를 나타내었다. 전반적인 경향은 SM45C와 매우 유사하나 반경방향 각 위치에서의 온도편차는 SM45C 비하여 작은 것으로 나타났다. 이는 A2024-T6의 열전달계수가 SM45C에 비하여 4배정도 매우 크기 때문에 열이 빠

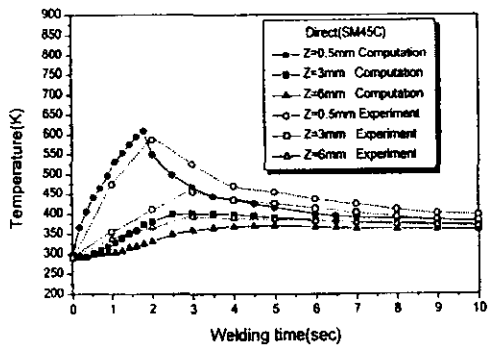


Fig. 5 Distribution of axial direction temperature without insert metal

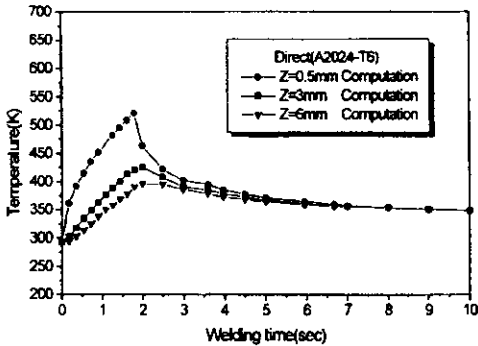


Fig. 6 Distribution of radial direction temperature without insert metal

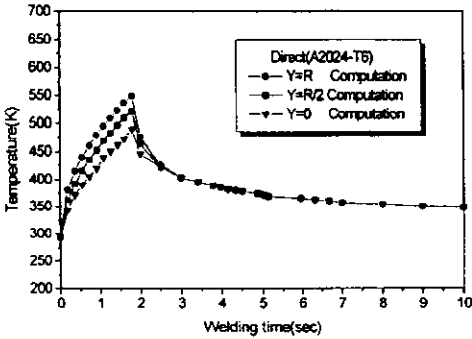


Fig. 7 Distribution of axial direction temperature without insert metal

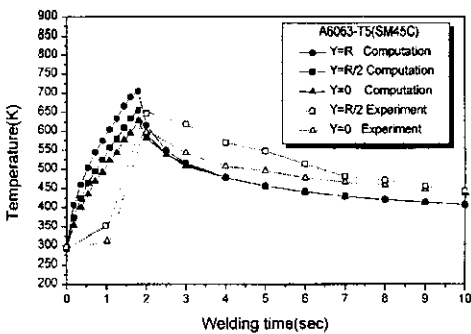


Fig. 8 Distribution of radial direction temperature with insert metal

르게 확산되어 온도가 덜 올라간 것이다. 냉각곡선을 살펴 보면 냉각 초기에 급격하게 냉각이 이루어지며, 어느 정도

시간이 지나면서 서서히 냉각이 진행되는 것을 볼 수 있다. 또한 SM45C의 냉각 곡선에 비하여 A2024-T6의 냉각곡선의 기울기가 급격한 것을 볼 수 있는데 이 원인 또한 열전도계수가 A2024-T6가 크기 때문이다.

Fig. 8은 삽입재를 사용한 경우에 대하여 SM45C의 반경방향에 대한 온도분포를 나타내었다. 마찰면 용접면에 열부하가 가해지면 가열 시간동안 온도가 매우 급격하게 상승하며, 용접 접합면의 최고 온도는 가열시간 1.8초일 때 마찰면의 최고온도는 중심(Y=0)일 때 536K, Y=R/2일 때 557K, Y=R 일 때 599K로 시험편 중심과 중간지점의 온도차는 21K이고, 중심과 표면의 온도차는 42K로 나타났다. 따라서 반경방향의 온도차는 삽입재를 사용한 경우가 사용하지 않은 경우보다 온도편차가 작다. 이는 삽입재를 사용함으로써 모재로 열이 전달되기 전에 삽입재에서 열을 균일하게 확산시키는 역할을 하기 때문이다.

Fig. 9는 삽입재를 사용한 경우 SM45C의 축방향에 대한 온도분포를 나타내었다. 전반적인 온도변화 및 분포의 경향은 전산해석결과와 실험결과가 매우 유사하게 나타났다. 그러나 Z=0.5mm 일 때는 매우 다른 형태의 온도 분포의 양상을 보인다. 이는 삽입재를 사용할 경우에는 삽입재가 가지는 열관성에 의하여 열이 지연되어 전달되기 때문이다. Figs. 10, 11은 삽입재를 사용한 경우에 대하여 A2024-T6의 반경방향에 대한 온도분포를 나타내었다. 전반적인 경향은 삽입재를 사용하지 않은 경우와 매우 유사하나 반경방향 각 위치에서의 온도편차는 삽입재를 사용하지 않은 경우에 비하여 작은 것으로 나타났다. 이는 삽입재가 열을 균일하게 확산시키는 원인에 기인한다

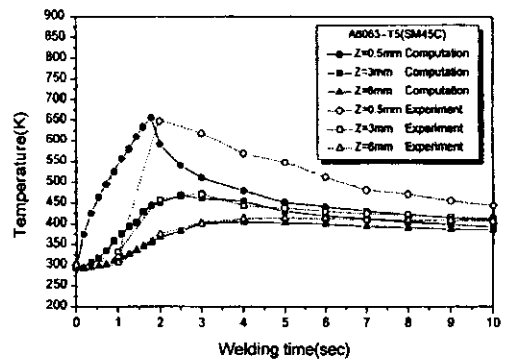


Fig. 10 Distribution of axial direction temperature with insert metal

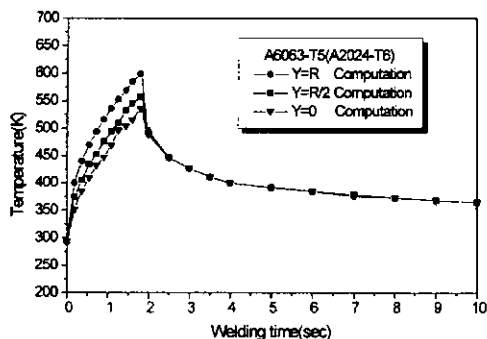


Fig. 11 Distribution of radial direction temperature with insert metal

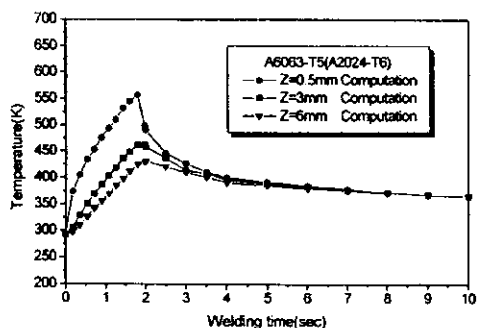


Fig. 12 Distribution of radial direction temperature with insert metal

#### 4. 결론

A2024-T6와 SM45C의 마찰용접에서 삽입재를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대하여 접합면 온도를 추정하기 위하여 간접 열전대법으로 측정된 결과와 전산해석한 결과를 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 반경방향의 온도는 중심부에서 외부쪽으로 갈수록 온도가 급격히 증가하였으며, 또한 삽입재가 있는 경우가 삽입재가 없는 경우보다 반경방향에서의 온도편차가 작았으며 이는 삽입재가 열의 균일하게 확산시키는 효과 때문이다.
- (2) 마찰 용접시 접합면의 최고온도는 삽입재를 사용한 경우에서 705K로 A2024-T6의 용융온도보다 낮았으며, 실험결과와 전산해석 결과가 잘 일치하였다.

- (3) 마찰 접합면의 반경방향의 온도분포는 삽입재를 사용한 경우가 삽입재를 사용하지 않은 경우보다 더욱 균일하였으며 또한 A2024-T6가 SM45C 보다 균일하였다.

#### 참고 문헌

- (1) C. J. Cheng, "Transient Temperature Distribution During Friction Welding of Two Similar Materials in Tubular Form", *Welding Research Supplement*, Vol. 41, No. 12, pp. 542-550, 1962
- (2) A. Z. Sahin, B. S. Yilbas, A. Z. Garni, "Friction Welding of Al-Al, Al-Steel, Steel-Steel Sample", *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 5, No. 1, pp. 89~99, 1996
- (3) 윤병수, 강성보, 민택기, "마찰용접에서 A2024와 SM45C의 삽입재에 관한 연구", *한국공작기계학회지*, Vol. 7, No. 6, pp. 19~27, 1998
- (4) 민택기, "Al-Sn합금 베어링에서 부상부와 플렌지부의 백메탈 간 마찰용접 특성", *동아 대학교박사학위논문*, pp. 4~5, 1992
- (5) K. Okita, M. Aritoshi, W. Kishimoto, "On the Friction Interface Temperature under Steady State with Conventional driving Method", *J. of Japan Welding Soc.*, Vol. 51, No. 3, pp. 62~67, 1982
- (6) K. K. Wang, P. Nagappan, "Transient Temperature Distribution in Inertia Welding of Steels", *Welding Research Supplement*, pp. 419s~426s, 1970
- (7) M. Aritoshi, K. Okita, T. Enjo, K. Ikeuchi, "Deformation of Weld during Friction Welding of Copper-Tungsten Sintered Alloy to Oxygen Free Copper", *J. of Japan Welding Soc.*, Vol. 7, No. 4, pp. 438~444, 1989