

<論 文>

銅合金의 壓延時 壓延率과 熱流動 方向에 따른 熱擴散 係數의 變化

朴 喜 鎔* · 裴 信 徹**

(1984年 5月 16日 接受)

Variation of the Thermal Diffusivity of Copper Alloy with Reduction in Thickness and Heat Flow Direction in Rolling Process

Hi Yong Pak and Sin Chul Bae

Abstract

The variation of thermal diffusivity with respect to rolling reduction is experimentally determined by flash technique. Copper alloy is used as an experimental and specimens are cut from the slab produced by rolling process with different percent reduction in thickness along the rolling direction and with 30°, 60° and 90° angle to the rolling direction. It is found that thermal diffusivity is slightly decreased as rolling reduction increased, and it has tendency that thermal diffusivity is increased slightly as its angle approached to 90° at same rolling reduction.

기 호 설 명

- α : 열확산 계수(m²/sec)
- C : 비열(J/kg°C)
- k : 열전도 계수(W/m°C)
- L : 시편의 두께(m)
- q : 열량(W/m³)
- t : 시간(sec)
- $t_{1/2}$: u/u_m 가 0.5가 되는 시간(sec)
- w : $\pi^2 \alpha t / L^2$
- $w_{1/2}$: $\pi^2 \alpha t_{1/2} / L^2$
- u : 온도(°C)
- u_i : 초기온도(°C)
- u_m : 시편의 후면최대온도(°C)
- u_0 : 변형전 시편의 온도(°C)
- V : 무차원 온도

- V_0 : 유효 무차원 온도
- x : 두께방향 좌표(m)
- ρ : 밀도(kg/m³)
- τ : 시간(sec)
- λ : 고유치

1. 序 論

재료의 熱擴散 係數를 측정하는 方法은 대단히 많다. 이러한 方法중의 하나는 Parker⁽¹⁾의 섬광법 (flash method)이다. 이 방법은 시편의 전면에 순간적으로 열을 방사시켜 시편의 후면 온도상승의 이력을 기록함으로써 熱擴散 係數를 찾아낼 수 있는 방법이다. 이 방법은 열원이 방사되는 시간이나 후면 온도상승의 시간이 매우 짧은 관계로 대류 및 복사에 의한 열손실을 무시할 수 있다⁽¹⁾. 대류 및 복사에 의한 열손실을 고려하는 경우 그 해를 구하기란 대단히 어려운 문제이다.

* 正會員, 漢陽大學校 機械工學科

** 正會員, 檀國大學校 機械工學科

이를 위한 연구는 현재까지 계속되고 있다.

Cowan⁽²⁾은 설팅법을 이용하여 고온에서의 열확산 계수를 측정하였고, Cape와 Lehman⁽³⁾은 설팅법의 방사 시간(pulse time)과 온도 영향에 대해 보고하였다.

Watt⁽⁴⁾는 원추형 시편에 축 대칭의 순간열원을 준 경우 이 순간 열원을 위치와 시간의 함수로 분리하여 일반해를 찾았다. 그 후 Beedham과 Dalrymple⁽⁵⁾은 설팅법을 이용할 경우 경계조건으로부터 발생하는 오차에 대한 연구를 하였다. Heckman⁽⁶⁾은 시편의 전후면에 복사열 손실을 고려하는 경우와 열손실이 없음을 고려한 경우를 비교하여 오차를 찾아 내었으며, 아울러 방사시간의 영향에 대해서도 연구하였다.

실제로 많은 금속제품은 소성가공의 방법으로 생산되고 있다. 소성가공을 받은 금속은 이방성 물질(anisotropic material)의 한 종류라 볼 수 있다. 이들은 방향에 따라 매우 다른 특성들을 가지고 있다. 따라서 소성가공을 받은 금속의 방향 의존성 열확산 계수는 매우 큰 관심의 대상이 되고 있다.

이방성 물질의 열전도 문제를 해석하는 것은 매우 복잡하고 어려운 문제이다^(7,8). 왜냐하면 한 좌표계에 대해 균질한(homogeneous) 이방성 물질이라 하더라도 좌표계가 바뀌면 이질성(heterogeneous) 물질로 되어버리기 때문이다.

Chang, Kang과 Chen⁽⁹⁾은 이방성 물질의 열전도 문제를 등방성(isotropic) 물질의 해와 관련시켜 Green 함수를 이용하여 해석하였다. 그러나 경계조건의 변화에 따르는 고유함수의 결정 여부에 대한 언급이 없었다. 그 후 Chang⁽¹⁰⁾은 무한과 반무한 물체 및 두개의 면으로 경계되어 있는 물체에 대한 해를 구하였다. 원통형 물체에 대한 해석은 Chang과 Tsou⁽¹¹⁾가 하였으며, Poon, Tsou, Chang⁽¹²⁾은 좌표축에 수직인 면이 두개 이하인 제 1종 이방성 문제를 좌표변환의 방법으로 해를 구하였다. 실험적으로 이방성의 영향에 대한 연구는 실험의 어려움 때문에 거의 보고된 것이 없다. 그러나 금속의 냉간 가공으로 인하여 발생하는 물성치들의 변화는 지금까지도 큰 관심의 대상이되고 있다. 이에 대한 연구는 단지 Crampton⁽¹³⁾ 등에 의하여 이루어진 구리합금의 냉간가공이 전기 저항도에 미치는 영향 뿐이다. Klokhom과 Hyatt⁽¹⁴⁾는 구리-팔라듐(palladium)의 소성변형이 전기 저항도에 미치는 효과에 대한 연구를 하였다. 그리고 Wang과 Kubilins⁽¹⁵⁾에 의해 인장시 전기 저항도의 변화에 대한 실험결과를 발표하였다.

그러나 소성변형도가 열확산 계수에 미치는 영향에

대한 연구는 아직 보고된 바가 없다.

본 연구에서는 구리합금을 냉간 압연하여 이방성 재료를 만들었을 경우 재료의 압연율과 열유동 방향의 변화에 따른 열확산 계수의 변화를 설팅법으로 측정하여 분석 하였다.

2. 이론해석

Green 함수를 이용하여 열전도 방정식의 해를 구하면 다음과 같다.

지배방정식 :

$$\frac{\partial^2 u(x,t)}{\partial x^2} + \frac{1}{K}q(x,t) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial u(x,t)}{\partial t}, \quad 0 < x < L, \quad t > 0 \quad (1)$$

경계조건 :

$$-k_1 \frac{\partial u}{\partial x} + h_1 u = f_1(x,t), \quad x=0, \quad t > 0 \quad (2)$$

$$k_2 \frac{\partial u}{\partial x} + h_2 u = f_2(x,t), \quad x=L, \quad t > 0 \quad (3)$$

초기조건 :

$$u(x,0) = F(x), \quad 0 < x < L, \quad t=0 \quad (4)$$

여기서 k_1, k_2, h_1, h_2 는 상수이고, f_1, f_2, F 는 임의의 함수이다.

온도분포 $u(x,t)$ 를 Green 함수를 이용하여 표시하면

$$u(x,t) = \int_R G(x,t|x',\tau) \Big|_{\tau=0} F(x') dx' + \frac{\alpha}{K} \int_{\tau=0}^t d\tau \int_0^L G(x,t|x',\tau) q(x',\tau) dx' + \alpha \int_{\tau=0}^t d\tau \sum_{i=1}^2 G(x,t|x',\tau) \Big|_{x=x_i} \left(\frac{f_i}{k_i} \right) \quad (5)$$

와 같이 된다. 여기에서 문제는 적절한 Green 함수를 결정하는 것이다. Green 함수의 결정 방법은 먼저 동차미분 방정식의 해를 구하고, 이 동차미분 방정식에 해당하는 Green 함수를 찾아서 Green 함수에 나타난 t 를 $(t-\tau)$ 로 바꾸어 놓으면 비동차 미분 방정식의 Green 함수가 된다.

식 (5)의 Green 함수는

$$G(x,t|x',\tau) = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\alpha \lambda_n^2 (t-\tau)} \frac{1}{N(\lambda_n)} X(\lambda_n, x) X(\lambda_n, x') \quad (6)$$

이 된다. 여기서 λ_n 은 고유치이고 $X(\lambda_n, x)$ 는 고유함수이며, $N(\lambda_n)$ 은 Norm이다.

본 연구에서는 다음과 같은 가정을 하였다.

가정 : (1) 1 차원 열전도이다.

(2) 순간적인 열원이 시편 전면에 균일하게 흡

수된다.

(3) 복사 및 대류에 의한 열손실이 없다.

(4) 시편의 초기온도는 주위의 온도와 동일하다.

가정 (1)은 시편의 두께에 비해 폭이 매우 크므로 두께 방향으로만 열이 전도되어 나간다는 가정이다. 가정 (3)은 시편 후면의 온도상승 이력을 기록하는 시간이 매우 짧고, 열원 방사로 인한 온도 상승은 1~2°C에 불과하므로 타당한 가정이다.

이 경우의 고유함수와 Norm 은

$$X(\lambda_n, x) = \cos \lambda_n x \tag{7}$$

$$\lambda = 0 \text{ 인 경우 Norm}(\lambda_n) = L \tag{8}$$

$$\lambda_n \neq 0 \text{ 인 경우 Norm}(\lambda_n) = \frac{L}{2} \tag{9}$$

$$\lambda_n = \frac{m\pi}{L} \tag{10}$$

이 된다. 이 경우의 Green 함수는

$$G(x, t | x', \tau) = \frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{\alpha n^2 \tau^2}{L^2} (t-\tau)} \cos \frac{m\pi}{L} x \cos \frac{m\pi}{L} x' \tag{11}$$

이 된다.

지금 시편의 전면에서 $\tau=0$ 일 때 $q(x', t)$ 인 열원이 $x'=h$ 인 깊이로 순간적으로 방사된다고 할 때

$$q(x', \tau) = q\delta(x')\delta(\tau) \tag{12}$$

로 놓을 수 있으므로 온도분포는 다음과 같다. 여기서 δ 는 Dirac 델타 함수이다.

$$u(x, t) = \frac{\alpha}{k} \int_{\tau=0}^t d\tau \int_0^h \left[\frac{1}{L} + \frac{2}{L} \sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{\alpha n^2 \tau^2}{L^2} (t-\tau)} \cos \frac{m\pi}{L} x \cos \frac{m\pi}{L} x' q\delta(x')\delta(\tau) dx' \right] \tag{13}$$

적분하면

$$u(x, t) = \frac{q}{\rho CL} [1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(m\pi x/L) e^{-n^2 \alpha t/L^2}] \tag{14}$$

시편의 후면 $x=L$ 에 대한 온도 분포식은

$$u(L, t) = \frac{q}{\rho CL} [1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m e^{-n^2 \alpha t/L^2}] \tag{15}$$

후면의 최대온도를 u_n 으로 하고 새로운 무차원 변수를 다음과 같이 표시한다.

$$V(L, t) = \frac{u(L, t)}{u_n} \tag{16}$$

$$w = \frac{\pi^2 \alpha t}{L^2} \tag{17}$$

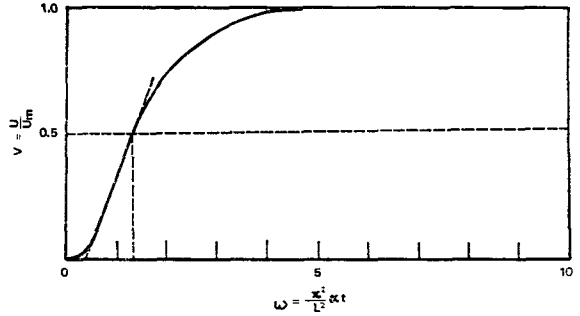


Fig. 1 Dimensionless plot of rear surface temperature history

여기서 $u_n = q/\rho CL$ 이다. 식 (16)과 (17)을 이용하여 식 (15)를 다시 정리하면

$$V(L, t) = 1 + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m e^{-n^2 w} \tag{18}$$

이 되며, 이 관계를 그림으로 표시하면 Fig. 1과 같다.

Parker⁽¹⁾는 이 그림에서 열확산 계수를 구할 수 있는 식을 찾아 내었다. 그림에서 V 가 0.5일 때 W 는 1.38이며, Fig. 1에서 직선 부분이 W 축과 만나는 점의 값이 0.48이므로

$$\alpha = 1.38L^2/\pi^2 t_{1,2} \tag{19}$$

또는

$$\alpha = 0.48L^2/\pi^2 t_x \tag{20}$$

인 식으로 열확산 계수를 계산할 수 있다. 이 때의 α 값은 Parker⁽¹⁾가 추천한 유효온도에서의 값이다.

$$u_s = 1.6u_n \tag{21}$$

3. 실험방법

시편은 동일한 로에서 만들어진 동합금을 사용하였으며 동합금의 성분은 Emission Spectrometer를 이용한 분석과 습식분석(금성전선 연구소)한 결과가 Table 1과 같다.

원소재로부터 압연율(원소재에 대해 줄어든 두께의 백분율, R.T.; Reduction in Thickness)을 각각 10%, 17%, 20%, 33%, 50%, 66%로 만든 판재로부터 압연 방향과 같은 방향으로 20×20×3(mm)의 시편을 채취하여 사용하였다.

Fig. 2는 압연된 판재로부터 시편을 채취한 형태를

Table 1 Chemical composition

Cu	Pb	Fe	As	Sn	Ni	Sb	Ag	Te	Zn
99.289	0.018	0.0256	0.0008	0.169	0.032	0.0027	0.0032	0.0002	0.0097

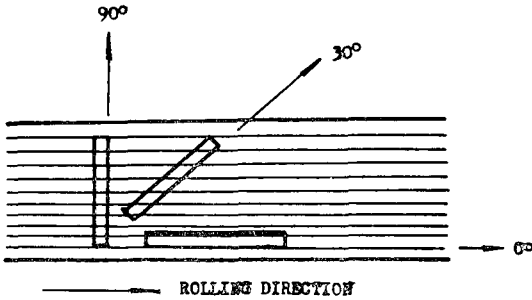


Fig. 2 Direction of specimen selection

나타내고 있다. 압연율이 각기 10%, 20%, 30%인 판재로부터 두께 방향으로 압연 방향에서부터 30°씩 각도를 주어 시편을 채취하여 동일한 압연율의 판재에 대해 fiber의 방향에 따른 영향을 고려하였다.

실험장치의 구성도는 Fig. 3에 표시하였다. Fig. 3에서 섬광램프(flash lamp)로는 1200W Xenon 램프를 사용하였다. 섬광램프로 부터 방사되는 열원은 시편의 표면에 균등하게 흡수될 수 있도록 램프와 시편을 가까이 놓았으며 시편의 전면은 유연(camphor black)을 발라 흑체로 만들었다. 시편 후면의 온도 증가를 측정하기 위하여 T형(Cu-Constantan) 0.12mmφ 열전대를

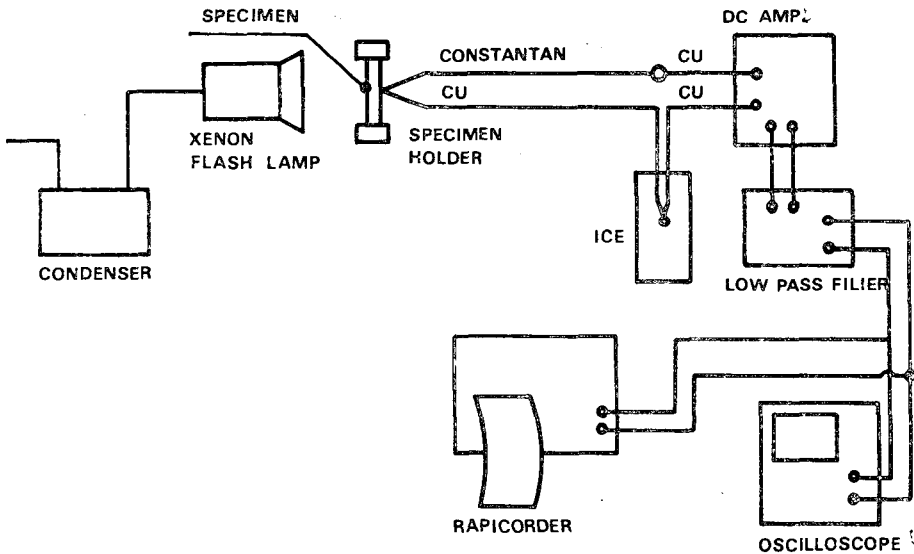


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

사용하였으며^(15,16) Reference Junction은 얼음을 사용하였다.

열전대의 Junction부분을 정확히 시편 후면에 밀착시키기 위하여 Bakelite로 제작한 뾰족한 봉을 스프링 힘으로 밀어 붙여 사용하였다. 열전대에 연결된 모든 선은 절연선을 사용하여 60Hz Noise의 영향을 받지 않도록 하였다. 실제로 시편 후면의 온도 증가량은 1~2°C 밖에 되지 않기 때문에⁽¹⁾ 증폭기(Toyo Baldwin DC Strain Amplifier MD-103)를 이용하여 2000 배로 증폭하였다. 실험과정에서 온도 1°C 증가에 따른 열전대의 기전력 증가량은 60μV^(15,16)이기 때문에 증폭시 많은 Noise가 실리게 되므로 10Hz의 Low Pass Filter를 사용하여 Noise를 제거 시켰고 이렇게 하여 얻어진 후면온도 증가량은 Oscilloscope(Kikusui Elec. Corp.

MD-5630)와 Rapicorder(Sanei Visigraph-5L)를 이용하여 동시에 기록하였다. Rapicorder의 feed는 초당 10m로 하였다.

4. 결과 및 검토

Fig. 4는 Rapicorder를 사용하여 기록한 시편 후면의 온도 증가 곡선을 보여 주고 있다. 이 그림의 세로 눈금 하나는 1/1,000 초의 시간을 나타내고 있어서 Oscilloscope에서 얻은 사진보다 정확하게 후면온도가 최대온도의 반에 도달하는 시간을 측정할 수 있었다.

Table 2와 Table 3은 판재의 두께 방향에 대하여 섬광을 쬐어준 후 시간이 0.015초와 0.05초가 지난후의 압연율 정도에 따른 무차원 시편두께에 대한 무차

원온도를 실험에서 구한 열확산계수를 대입하여 얻은 온도분포를 보여 주고 있다. Table에서 알 수 있듯이 압연율이 증가함에 따라 열확산 계수가 감소하므로 동일한 시편 깊이에서 온도가 점차 작아짐을 볼 수 있다.

Table 4는 동일한 압연율을 가진 시편을 압연방향에 대해 각기 각도를 달리해 취한 시편의 무차원 온도 분포를 나타내고 있다. 30°인 경우가 60°인 경우보다 더 큰 온도차를 보이는 것은 Fiber의 방향과 열전도의 방향이 시편의 절취각도와 서로 바뀌기 때문이다. Table에서 보듯이 Fiber의 방향과 열전도의 방향이 같아 질수록 열의 전도가 완만히 일어남을 알 수 있다. 또한 동일한 각도에서 압연율이 클수록 더 작은 값을 가짐을 볼 수 있다.

Fig. 5는 압연율이 각각 0%, 33%, 66%인 경우 측정된 열확산계수를 식 (14)에 대입하여 얻어진 온도분포를 압연전의(즉, 0%의 압연율)시편의 온도 분포에 대한 차를 나타내고 있다. 시간 t 는 설팅을 준 후에 경과된 시간을 나타내고 있다. $t=0.015$ 초인 경우 열의 전도가 시편의 어느 정도의 깊이까지는 아직 일어나고 있지 않으며 압연율이 클수록 가공전의 원 소재보다 큰 온도차를 보여 주고 있다. Fig. 5에서 보듯이 최대 온도차는 시간이 지남에 따라 점차 크기가 줄어들며 위치는 점점 후면 쪽으로 옮겨감을 알 수 있다. $t=0.03$

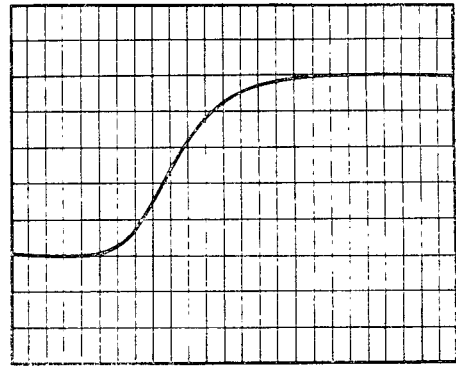


Fig. 4 Temperature history curve of specimen rear surface
(X axis : 1msec/Div, Y axis : 40mV/Div)

Table 2 Dimensionless temperature difference for dimensionless thickness ($t=0.015$ sec)

Dimensionless thickness	R. T. = 0%	33%	66%
0.2	2.2929	2.2223	2.1243
0.4	.2281	.1730	.1220
0.6	.0049	.0025	.0010
0.8	.0000	.0000	.0000
1.0	.0000	.0000	.0000

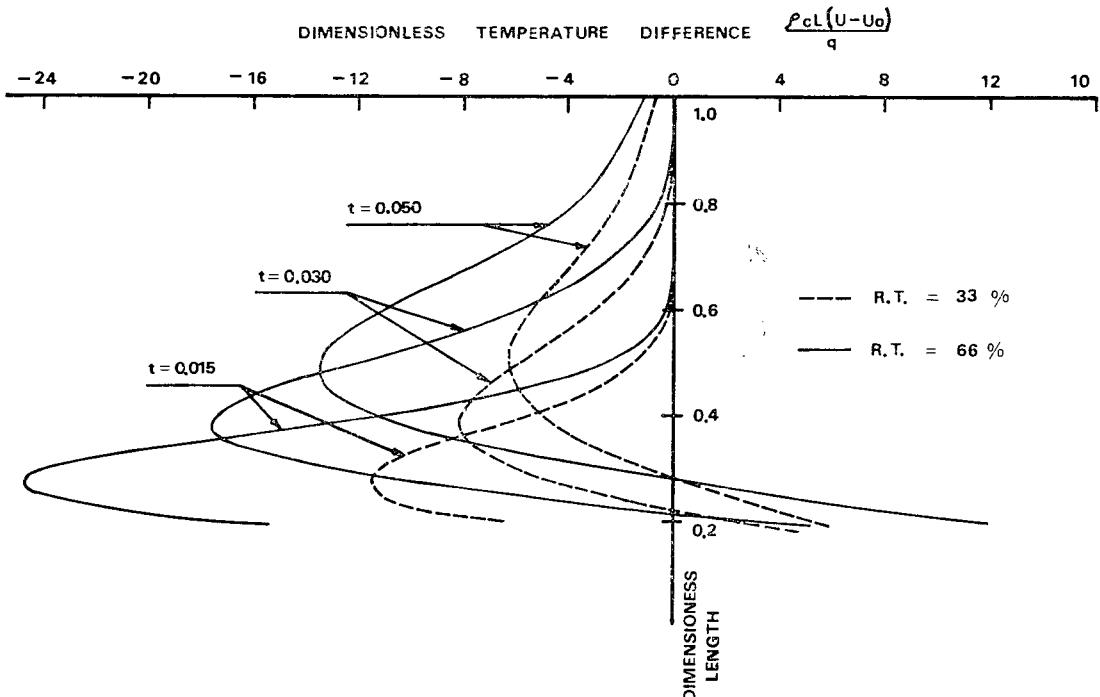


Fig. 5 Dimension temperature difference distribution with various time and reduction in thickness

Table 3 Dimensionless temperature difference for dimensionless thickness ($t=0.050\text{sec}$)

Dimensionless thickness	R. T.=0%	33%	66%
0.2	2.1518	2.2084	2.2662
0.4	1.0768	1.0267	2.2084
0.6	.3397	.2864	.9617
0.8	.0682	.0482	.0313
1.0	.0169	.0096	.0048

Table 4 Dimensionless temperature difference of dimensionless thickness for rotation angle ($t=0.040\text{sec}$, R. T.=30%)

Dimensionless thickness	R. A.=0°	30°	60°	90°
0.2	2.2984	2.2911	2.2966	2.2893
0.4	.9175	.9281	.9202	.9307
0.6	.1985	.2059	.2004	.2077
0.8	.0233	.0251	.0238	.0255
1.0	.0030	.0033	.0031	.0034

초와 $t=0.05$ 초인 경우 시편의 무차원화된 깊이가 작은 부분에서 압연율이 0%인 경우 보다 오히려 더 큰 온도분포를 보여준다. 이 경향은 압연율이 클수록 더 크며 더 깊은 위치까지 더 높은 온도분포를 나타낸다. 이와같은 현상은 가공후 발생하는 이방성의 성향이 시편의 두께 방향으로의 열전도에 방해할 뿐 아니라 압연방향으로도 어느 정도의 열전도가 발생되기 때문인 것으로 추정된다.

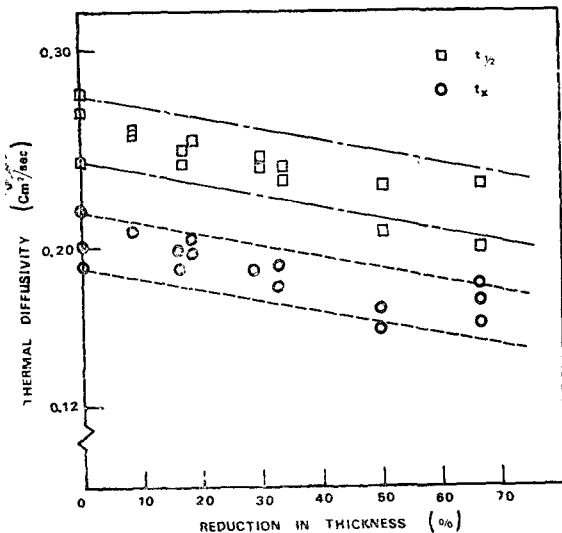


Fig. 6 Variation of thermal diffusivity with reduction in thickness

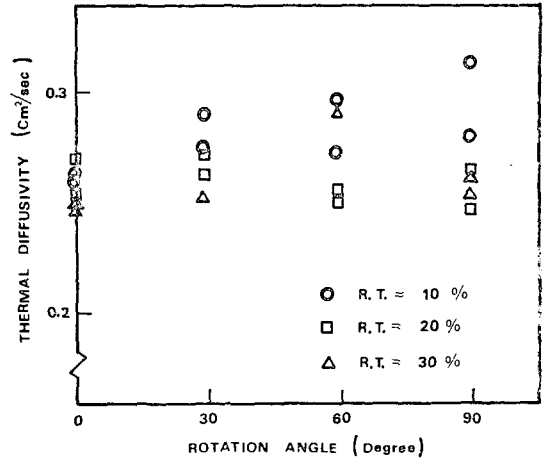


Fig. 7 Variation of thermal diffusivity with reduction in thickness and fiber direction

Fig. 6 과 Fig. 7 은 시편 후면온도 증가를 요하는데 걸리는 시간을 측정하므로써 얻어진 열확산 계수를 보여 준다. 본 실험에서 사용된 구리에는 얼마간의 불순물이 함유된 관계로 순수동의 열확산 계수보다 훨씬 작은 값을 가짐을 알 수 있다. 이러한 결과는 Touloukian⁽¹⁸⁾ 등의 문헌에 나타난 자료로 확인할 수 있다. 순수동의 α 값은 300°K 에서 $1.17\text{cm}^2/\text{s}$ 이며, $\text{Cu}+\text{Zn}\geq 99.50\%$ 인 합금의 α 값은 298°K 에서 $0.337\text{cm}^2/\text{s}$ 이며, $\text{Cu}+\text{Sn}\geq 99.50\%$ 인 합금의 α 값은 273°K 에서 $0.209\text{cm}^2/\text{s}$ 로 나타나 있다. 본 실험에서 사용한 재료의 열확산 계수는 $t_{1/2}$ 을 이용하였을 때 Fig. 6의 분산된 자료의 중간 값을 택하여 $0.26\text{cm}^2/\text{sec}$ 이다. 본 실험에서 사용한 시편의 재료는 $\text{Cu}+\text{Sn}=99.458\%$ 이며 Cu 가 99.289% . 함유된 반면, Touloukian⁽¹⁸⁾ 등의 자료중 $\text{Cu}+\text{Sn}\geq 99.50\%$ 의 합금의 구리 함량은 87.56% 이다. 본 실험에서 사용한 재료의 구리함량이 참고자료의 구리함량보다 크므로 열확산 계수가 더 큰 값으로 나타남을 예측할 수 있다.

Fig. 6에서 $t_{1/2}$ 을 이용하여 구한 값이 t_x 를 이용하여 구한 값보다 더 큰 값을 가짐을 알 수 있다. 그러나 t_x 를 이용할 경우는 시간측의 기준선을 잡는 방법에 따라 상당한 오차가 생길 수 있으므로 추천할 수 있는 방법이 되지 못한다. Fig. 6에서는 $t_{1/2}$ 로 구한 값이 t_x 로 구한 값보다 더 큰 값을 가짐을 비교하여 놓았다. 이와같은 두 값의 차는 Parker⁽¹¹⁾의 실험결과에서도 나타났다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 압연율이 증가함에 따라 열확산 계수는 점점 작아짐을 알 수 있다. 분산된 자료의 중간 값을 택할 경우 자료분산은 약 \pm

8%이다. 이 중간값을 택할 경우 압연율이 66%인 시편이 원소재 보다 약 15% 감소된 열확산 계수를 보여 주고 있다. Fig. 7은 Fiber의 방향과 열유동 방향이 동일할수록 열확산계수도 증가하는 경향을 보여 주고 있다. 이러한 경향은 Fiber가 열유동을 방해하므로 생긴 것으로 예측된다.

5. 결 론

본 실험의 결과로 미루어 보아 소성가공으로 얻어지는 소재의 열확산 계수는 원소재 보다 약간 작은 값을 택하여 실제로 이용할 수 있음을 예측할 수 있다. 열확산계수는 압연율이 증가함에 따라 점점 작아지며, 열유동 방향과 Fiber의 방향이 같을수록 열확산 계수는 증가한다.

References

- (1) W.J. Parker, R.J. Jenkins, C.P. Bulter and G.L. Abbott, "Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity", *J. of Applied Physics*, Vol. 32, No. 9, pp.1679~1684, 1961
- (2) R.D. Cowan, "Pulse Method of Measuring Thermal Diffusivity at High Temperatures", *J. of Applied Physics*, Vol. 34, No. 4, pp.926~927, 1963
- (3) J.A. Cape and G.W. Lehman, "Temperature and Finite Pulse Time Effects in the Flash Method for Measuring Thermal Diffusivity", *J. of Appl. Physics*, Vol. 34, No. 7, pp.1909~1913, 1963
- (4) D.A. Watt, "Theory of Thermal Diffusivity by Pulse Technique", *Brit. J. Appl. Phys.*, Vol. 17, pp.231~240, 1966
- (5) K. Beedham and I.P. Dalrymple, "The Measurement of Thermal Diffusivity by the Flash Method, an Investigation into Errors Arising from the Boundary Condition", *Rev. Int. Hautes Tempér. et Réfract.*, Vol. 7, No. 3, pp.278~283, 1970
- (6) R.C. Heckman, "Finite Pulse-Time and Heat-Loss Effects in Pulse Thermal Diffusivity Measurements", *J. of Appl. Phys.*, Vol. 44, No. 4, pp.1455~1460, 1973
- (7) H.S. Carslaw and J.C. Jaeger, "Conduction of Heat in Solids", Oxford Press, 1959
- (8) M. Necati Özisik, *Heat Conduction*, John Wiley & Sons, Inc., 1980
- (9) Y.P. Chang, C.S. Kang and D.J. Chen, "The Use of Fundamental Grren's Functions for the Solution of Problems of Heat Conduction in Anisotropic Media", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 16, pp.1905~1918, 1973
- (10) Y.P. Chang, "Analytical Solution for Heat Conduction in Anisotropic Media in Infinite, Semi-Infinite, and Two-Plane-Bounded Regions", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 20, pp.1019~1028, 1977
- (11) Y.P. Chang and R.C.H. Tsou, "Heat Conduction in an Anisotropic Medium Homogeneous in Cylindrical Regions-Unsteady State", *J. of Heat Transfer*, ASME, pp.41~46, Feb. 1977
- (12) K.C. Poon, R.C.H. Tsou and Y.P. Chang, "Solution of Anisotropic Problems of First Class by Coordinate-Transformation", *J. of Heat Transfer* ASME, Vol. 101, pp.340~345, May 1979
- (13) D.K. Crampton and H.L. Burghoff, "Effect of Cold-Work upon Electrical Conductivity of Copper Alloys", *Metal Technology*, pp.228~245, 1941
- (14) Kloholm and Hyatt, "The Effect of Plastic Deformation on the Resistivity of Copper-Palladium Alloy", *Trans. of the Metallurgical Society of AIME*, Vol. 215, pp.792~794, 1959
- (15) H.D. Baker, E.A. Ryder and N.H. Baker, *Temperature Measurement in Engineering*, Vol. I,II, Omega Press, 1975
- (16) ASTM, *Manual on the Use of Thermocouples in Temperature Measurement*, American Society for Testing and Meterials, 1981
- (17) T.P. Wang and E.T. Kubilins, "The Metallurgical Aspects of Resistance", *Electronic Industries & Tele-Tech.*, pp.52~124, 1957
- (18) Y.S. Touloukian, R.W. Powell, C.Y. Ho and P.G. Klemens, *Thermophysical Properties of Matter*, Vol. 1, 1970