

# 매우 빠르게 움직이는 열원 주위의 온도분포에 관한 연구

조창주\*, 정우남\*\*, 이용호\*\*\*

## A Study on the Temperature Distributions at the Vicinity of a Very Fast Moving Heat Source

Chang-Joo Cho\*, Woo-Nam Juhng\*\*, Yong-Ho Lee\*\*\*

### ABSTRACT

Fourier heat conduction law becomes invalid for the situations involving extremely short time heating, very low temperatures and fast moving heat source(or crack), since the wave nature of heat propagation becomes dominant. For these conditions, the modified heat conduction equation with the finite propagation speed of heat in the medium could be applied to predict heat flux and temperature distributions.

In this study, temperature distributions at the vicinity of a very fast moving heat source are investigated numerically. Thermal fields are characterized by thermal Mach numbers(M) defined as the ratio of moving heat source speed to heat propagation speed in the solid. In the transonic and supersonic ranges( $M \geq 1$ ), thermal shocks are shown, which separate the heat affected zone from the thermally undisturbed zone.

**Key Words** : wave nature(파동특성), modified Fourier's heat conduction law(수정된 열전도방정식), thermal Mach numbers(열 마하수), propagation speed of thermal wave(열전파속도)

### 기호설명

C = propagation speed of thermal wave  
 $C_p$  = specific heat  
 g = heat source  
 k = thermal conductivity  
 M = thermal Mach number  
 $\vec{r}$  = space vector  
 u = velocity of moving heat source  
 x, y = fixed coordinates  
 $x_1, y_1$  = moving coordinates  
 $\alpha$  = thermal diffusivity

$\rho$  = density  
 $\delta$  = Kronecker delta  
 $\tau$  = thermal relaxation time  
 $\xi, \eta, \zeta$  = dimensionless variables

### 1. 서론

고체내의 열전도 현상은 무한한 열전파속도(propagation speed of thermal wave)를 가정한 Fourier 열전도방정식에 의하여 해석되어 왔으며, 대부분 상온 금속의 경우 열전파속도가  $10^2 \sim 10^3$  m/s 이상의 큰 값을 갖기 때문에 Fourier 열전도 방정식에 의한 해석결과는 실제의 현상과 거의

\* 전남대학교 공과대학

\*\* 전남대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 여수공업대학 기계설계과

일치하고 있다. 그러나 열원(heat source)이 아주 빠른 속도로 움직이고 있거나, 아주 짧은 시간(picosecond or femtosecond) 동안의 가열, 극저온(super cryogenic temperature) 또는 높은 열유속을 갖는 경우와 같이 유한한 속도의 열전파 현상이 나타나는 경우에는 Fourier 열전도방정식에 의한 열적 해석이 적합하지 않다. 실제로 열에너지는 유한한 전파속도로 이송(transmission)되므로, 무한한 열전파 속도를 가정한 Fourier 열전도방정식은 매우 빠르게 이동하는 열원이 있는 경우에는 적절한 구성방정식이 아니라고 볼 수 있다. 이러한 경우 고체내의 정확한 열전도 현상을 규명하기 위하여, 물체 내에서 온도 기울기가 형성되었을 때 열전도가 시작되는데 걸리는 열이완시간(thermal relaxation time)을 고려한 수정된 열전도법칙(modified heat conduction law)이 제시되었다<sup>12)13)</sup>. Weichert and Schönert<sup>4)5)</sup>는 아주 빠르게 진전되는 균열에 의하여 발생하는 열발생모델을 선정하여, 열원(또는 균열) 주위의 온도분포에 관하여 Fourier 열전도법칙에 의하여 해석하였으며, Tzou<sup>6)7)</sup>는 Zehnder and Rosakis<sup>8)</sup>에 의하여 측정된 균열부근의 온도분포를 수정된 열전도법칙에 의하여 해석하였다.

본 연구에서는 매우 빠른 속도로 이루어지는 레이저 가공이나 압력탱크 및 가스관에서 발생하는 빠른 균열전파의 경우, 열 발생을 수반하는 열원 주위의 온도분포를 구하고 고찰한다. 매우 빠르게 움직이는 열원(heat source)에 의하여 발생된 열원부근의 온도분포를 구하기 위하여 수정된 열전도법칙을 적용하여 열전도방정식을 구하였으며, 수정된 열전도방정식을 이동좌표계로 변환한 후 수치해석을 통하여 풀이하였다. 수치해석법으로는 비제차쌍곡선형방정식(nonhomogeneous hyperbolic equation)에서 비교적 안정된 해를 얻을 수 있는 MacCormack방법<sup>9)</sup>을 사용하였으며, 수치해석으로 얻은 수정된 열전도 방정식에 의한 해의 결과를 Fourier 열전도방정식에 의한 해의 결과와 비교·검토하였다.

## 2. 이론

### 2.1 수정된 열전도방정식

고체내의 열전도 문제에서 온도기울기와 열유

속 사이의 열 이완시간(relaxation time, time lag)을 고려한 열전도방정식은 다음과 같다.<sup>2)3)</sup>

$$\vec{q}(\vec{r}, t + \tau) = -k \nabla T(\vec{r}, t) \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 열전도율(thermal conductivity)이고,  $\tau$ 는 온도기울기와 열 유속 사이의 이완시간을 나타내며,  $\tau = \alpha / C^2$ 로 나타낼 수 있다<sup>10)~13)</sup>. 또한  $\alpha$ 는 열확산계수(thermal diffusion coefficient)이고  $C$ 는 열전파속도(propagation speed of thermal wave)를 나타낸다.

식(1)의 열유속항을 Taylor Series로 전개하여 2차항 이상을 무시하면( $\tau$ 가 매우 적으므로) 다음과 같은 수정된 열전도법칙으로 쓸 수 있다.

$$\vec{q}(\vec{r}, t) + \tau \frac{\partial \vec{q}(\vec{r}, t)}{\partial t} = -k \nabla T(\vec{r}, t) \quad (2)$$

식(2)의 수정된 열전도방정식에서 만약 열전파속도( $C$ )가 무한( $\infty$ )하여  $\tau$ 가 0이 된다면, 방정식(2)는 Fourier's law에 의한 열전도법칙을 나타낸다. 그러나 열원의 이동속도가 매우 빠른 경우에는  $\tau$ 를 무시할 수 없다.

### 2.2 에너지방정식

열원(heat source)을 갖는 미소체적에서의 에너지 방정식은

$$-\nabla \cdot \vec{q} + g = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

이고, 여기서  $\rho$ ,  $C_p$ 와  $g$ 는 각각 밀도(density), 비열(heat capacity)과 열원(heat source)이다.

### 2.3 좌표변환(coordinate transformation)

Fig.1과 같이 열원(heat source)이 고정좌표계(fixed coordinates)의  $x$ -축을 따라 속도  $u$ 로 움직이

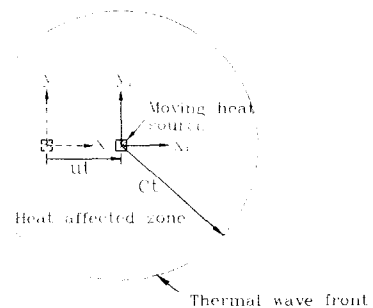


Fig. 1 The fixed coordinates( $x, y$ ) and moving coordinates ( $x_1, y_1$ ).

고 있고, 움직이는 열원의 중심에 원점을 갖는 이동좌표계(moving coordinates)를  $x_1, y_1$ 이라 하면, 고정좌표계와 이동좌표계의 관계식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x &= x_1 + ut \\ y &= y_1 \end{aligned} \quad (4)$$

수정된 열전도방정식(2)와 에너지 방정식(3)을 이동좌표계( $x_1, y_1$ )로 좌표변환 하면 다음과 같다. 단, 여기서  $\rho, u, C_p, k$ 는 시간과 공간에 대하여 일정하다고 가정한다.

- 수정된 열전도방정식 -

$$\tau \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial(kT - \tau uq)}{\partial x_1} + k \frac{\partial T}{\partial y_1} = -q \quad (5)$$

- 에너지방정식 -

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(q - u\rho C_p T)}{\partial x_1} + \frac{\partial q}{\partial y_1} = g\delta(x_1)\delta(y_1) \quad (6)$$

여기서  $\delta$ 는 Kronecker delta 함수이다.

### 2.4 초기 및 경계조건

초기온도는 해석영역의 모든 부분에서 20°C (293K)로 일정하다고 가정하였으며, 외부경계에서 접촉된 공기와의 열교환은 없고 고체내의 열전달은 복사(radiation) 및 대류(convection)에 의한 열전달량은 전도(conduction)에 의한 량에 비하여 매우 적으므로 열은 전도(conduction)에 의해서만 전달된다는 가정에 의하여 해석하였다. 열원의 크기는 단위두께를 갖는 강판(steel)이 빠른 속도( $u$ )로 진전될 때, 진전하는 균열에 의하여 발생된 단위길이 당 발열량( $20J/m^2$ )이<sup>4)</sup> 크기가  $10^{-8} \times 10^{-8} m^2$ 인 면적에 균일하게 분포되었다는 가정에 의하여 계산하였다.

### 2.5 무차원화(dimensionless)

수치해석을 위하여 다음과 같은 무차원 변수를 도입한다.

- 무차원 변수 -

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{Cx_1}{2\alpha}, & \xi_l &= \frac{Cl}{2\alpha}, \\ \eta &= \frac{Cy_1}{2\alpha}, & \eta_h &= \frac{Ch}{2\alpha}, \end{aligned}$$

$$\zeta = \frac{C^2 t}{2\alpha}, \quad \theta = \frac{T(x, y, t) - T_o}{T_{ref}}$$

$$Q = \frac{q}{T_{ref}(Ck/\alpha)}, \quad M = \frac{u}{C}$$

$$S = \frac{g(x, y, t)}{T_{ref}k(C^2/4\alpha^2)}$$

여기서  $l, h, T_o, M$ 은 각각 해석영역의  $x$ 축,  $y$ 축의 크기와 초기온도 및 열 마하수(thermal Mach numbers)이며,  $T_{ref}$ 는 온도 무차원화를 위한 기준온도이다.

위의 무차원 변수를 수정된 열전도법칙과 에너지방정식(6)에 적용하여 다시 쓰면

$$\frac{\partial Q}{\partial \xi} + \frac{\partial \theta}{\partial \xi} - M \frac{\partial Q}{\partial \xi} + \frac{\partial \theta}{\partial \eta} = -2Q \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \frac{\partial Q}{\partial \xi} - M \frac{\partial \theta}{\partial \xi} + \frac{\partial Q}{\partial \eta} = \frac{S}{2} \quad (8)$$

이며, 위 두방정식을 vector form으로 나타내면

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial \xi} + \frac{\partial \vec{F}}{\partial \xi} + \frac{\partial \vec{G}}{\partial \eta} = \vec{H} \quad (9)$$

이다. 여기서

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \begin{bmatrix} Q \\ \theta \end{bmatrix}, \quad \vec{F} = \begin{bmatrix} \theta - MQ \\ Q - M\theta \end{bmatrix}, \\ \vec{G} &= \begin{bmatrix} \theta \\ Q \end{bmatrix}, \quad \vec{H} = \begin{bmatrix} -2Q \\ S/2 \end{bmatrix} \text{ 이다.} \end{aligned}$$

### 3. 수치해석

고체내에서 빠르게 움직이는 열원에 의한 열원주위의 온도분포를 수치해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 가 정 -

- 1) 물체 내에서의 열전도율( $k$  : thermal conductivity)과 열확산계수( $\alpha$  : thermal diffusion coefficient)는 온도와 무관하게 항상 일정하다.
- 2) 열원이 아주 빠른 속도로 이동하여 열원 주위의 열해석은 매우 짧은 시간 ( $10^{-7}sec$ )에 적용 되어야 하므로 물체와 주변과의 열교환은 무시한다. 즉, 복사 및 대류에 의한 열손실을 무시한다.
- 3) 고체내의 열전파 속도( $C$ )는 900m/sec로 일정하다.

### 3.1 격자(grid)

본 수치해석에 사용된 해석영역은 다음과 같이 두 가지를 사용하여 계산하였다. 하나는 열원 부근의 온도분포를 포괄적으로 파악하기 위하여, 가로  $2.4 \times 10^{-6}(m)$ , 세로  $4.0 \times 10^{-7}(m)$ 로 해석영역을 선택했으며, 격자는  $241 \times 41$ 로 균일하게 생성하였다. 또 다른 해석영역은 열원 부근의 온도분포를 상세하게 파악하기 위하여 전체 해석범위를 가로  $6.3 \times 10^{-8}(m)$ , 세로  $4.2 \times 10^{-8}(m)$ 로 아주 좁게 선정하였으며, 전체 격자수는  $121 \times 81$ 로 균등하게 분할하였다. 또한 열원내의 온도분포를 정확하게 나타내기 위하여 열원내에서의 격자가  $11 \times 11$ 로 분할되도록 하였다.

### 3.2 수치해석법

수정된 열전도방정식과 같이 파동특성을 갖는 쌍곡선형 방정식의 해는 Fourier 열전도방정식의 해와는 달리 전파된 파의 선단에서 해가 급속하게 변하거나 불연속성(discontinuity)을 갖는다. 특히 본 연구에서와 같이 움직이는 열원에 대한 해석에 있어서 열원의 움직이는 속도가 열전파속도와 같거나 보다 빠르면 열원의 선단에서 열전파에 의한 불연속점이 발생하게 된다. 이러한 불연속점에 있어서 수치해가 심하게 진동하는 현상이 발생되어 정확한 해를 구하기가 매우 어려운 경우가 대부분이다. 따라서 불연속점을 갖는 쌍곡선형 방정식에 있어서 정확한 해를 얻기 위한 수치해석방법에 대한 연구가 필수적이다. 본 연구에서는 쌍곡선형 방정식의 수치해에서 비교적 안정된 결과를 나타내며, 시간에 대하여 다 단계(multi step)방법으로 전개되는 MacCormack 방법을 사용하였다<sup>9)</sup>. 무차원화된 식(9)를 시간에 대해서 2단계(predictor step, corrector step)로 나누고, 공간에 대해서는 predictor step에 전진차분(forward difference), corrector step에는 후진차분(backward difference)을 적용하여 전개하면 다음과 같다.

i) predictor step

$$\begin{aligned} \bar{E}_{i,j}^* = & \bar{E}_{i,j}^n - \frac{\Delta \xi}{\Delta \xi} (\bar{F}_{i+1,j}^n - \bar{F}_{i,j}^n) \\ & - \frac{\Delta \xi}{\Delta \eta} (\bar{G}_{i,j+1}^n - \bar{G}_{i,j}^n) + \Delta \xi \bar{H}^n \end{aligned} \quad (10)$$

ii) corrector step

$$\begin{aligned} \bar{E}_{i,j}^{n+1} = & \frac{1}{2} [\bar{E}_{i,j}^n + \bar{E}_{i,j}^*] \\ & - \frac{\Delta \xi}{\Delta \xi} (\bar{F}_{i,j}^* - \bar{F}_{i-1,j}^*) \quad (11) \\ & - \frac{\Delta \xi}{\Delta \eta} (\bar{G}_{i,j}^* - \bar{G}_{i,j-1}^*) + \Delta \xi \bar{H}^* \end{aligned}$$

## 4. 결과 및 고찰

빠르게 움직이는 열원에 의한 열원주위의 온도분포에 대하여 수정된 열전도방정식과 Fourier 열전도방정식에 의한 수치해석 결과는 다음과 같다.

### 4.1 열원에 의한 온도분포

Fig.2 ~ 4는 해석영역을 가로  $6.3 \times 10^{-8}(m)$ , 세로  $4.2 \times 10^{-8}(m)$ 로 아주 좁게 선정하여 열원의 속도를 450, 900, 1350m/sec로 변화시켰을 때, 열원에 의한 상승온도의 등온선들(isothermal lines)을  $\xi - \eta$  좌표에 나타낸 것이다. 그림에서 (a)는 Fourier 열전도방정식에 의한 해의 결과이고 그림 (b)는 수정된 열전도방정식에 의한 결과이다. 결과에 의하면 수정된 열전도방정식에 의한 최고 온도

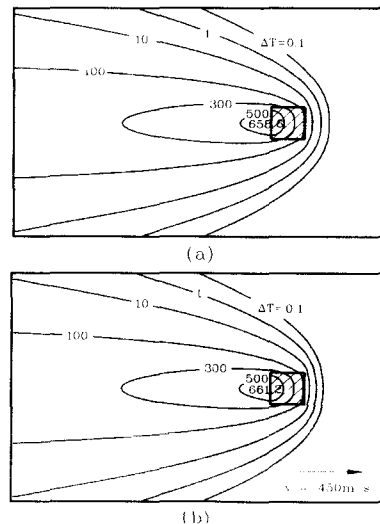


Fig. 2 Isothermal lines of temperature rise at the vicinity of the moving heat source by using MacCormack method at velocity 450 m/sec(M=0.5).

(a) the results calculated by Fourier's law  
(b) the results calculated by modified heat flux law

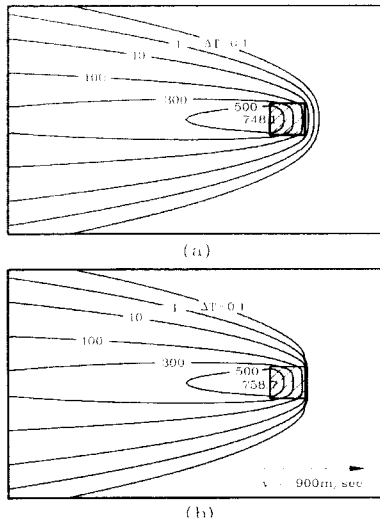


Fig. 3 Isothermal lines of temperature rise at the vicinity of the moving heat source by using MacCormack method at velocity 900 m/sec(M=1.0).

- (a) the results calculated by Fourier's law
- (b) the results calculated by modified heat flux law

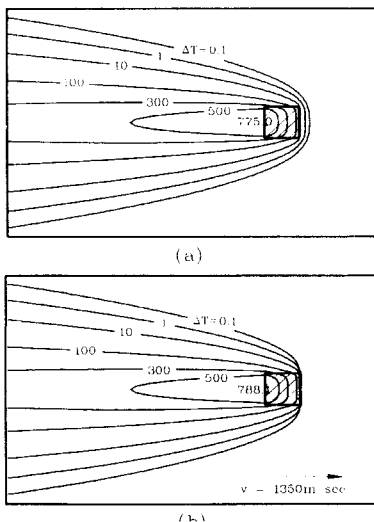


Fig. 4 Isothermal lines of temperature rise at the vicinity of the moving heat source by using MacCormack method at velocity 1350 m/sec(M=1.5).

- (a) the results calculated by Fourier's law
- (b) the results calculated by modified heat flux law

가 Fourier 열전도방정식에 의한 최고 온도보다 더 높게 나타났으며, 같은 온도를 나타내는 등온선은 Fourier에 의한 해가 더 넓게 분포됨을 알 수 있다. 이는 Fourier 열전도방정식은 열전파속도를 무한하다고 가정했기 때문에 나타난 현상으로 두 방정식의 차이를 잘 나타내주고 있다. 또한 속도가  $M > 1$  인 경우에 두 방정식으로부터 얻어지는 최고 온도 값의 차이가 점점 더 커지는 현상도 Fourier 열전도방정식은 열전파속도를 무한하게 가정했기 때문이다. 즉 최고 온도는 열원이 빠르게 진행되는 동안에 주위로 전도된 열량이 수정된 열전도방정식보다 더 많은 Fourier 열전도방정식에 의한 최고온도가 더 낮게 나타나며, 분포영역은 더 넓게 확산됨을 알 수 있다. 이러한 점에서 Fourier 열전도방정식과 수정된 열전도방정식의 차이점이 잘 나타나고 있다.

#### 4.2 thermal shock 현상

Fig.5~8는 계산 영역을 가로  $2.4 \times 10^{-6}$ (m), 세로  $4.0 \times 10^{-7}$ (m)(격자:241×41)로 확대하여 계산된 상승 온도를  $100^\circ\text{C} \sim 10^{10}^\circ\text{C}$ 까지 임의의 값으로 분할하여 나타난 등온선들이다. 결과에 의하면, 열원의 속도가 열 전파속도보다 낮은 경우에는( $M < 1$ ) Fourier 열전도방정식에 의한 결과와 수정된 열전도방정식에 의한 결과가 거의 일치한다. 그러나 열원의 속도가 열전파속도와 같은 경우( $M = 1$ )에는 Fig.7에서 볼 수 있듯이 수정된 열전도방정식에 의한 온도분포에서는 Fourier 열전도방정식에 의한 온도분포에서는 나타나지 않는 열원선단에 열원의 진행방향에 수직한 normal shock이 발생함을 볼 수 있다. 이것은 열전파속도를 무한하게 가정한 Fourier 열전도방정식에 의한 열유속(heat flux)은 열원의 속

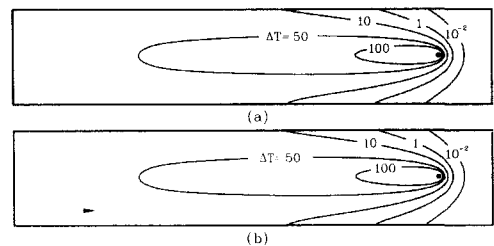


Fig. 5 Isothermal lines of temperature rise at the thermal Mach number,  $M = 0.1$ .

- (a) by using the Fourier's law
- (b) by using the modified heat flux law

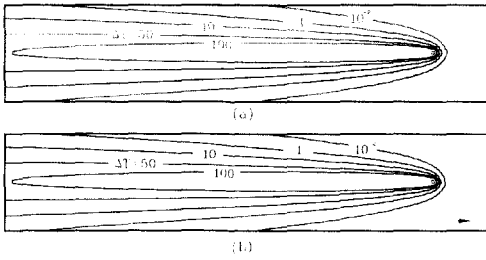


Fig. 6 Isothermal lines of temperature rise at the thermal Mach number,  $M = 0.5$ .  
 (a) by using the Fourier's law  
 (b) by using the modified heat flux law

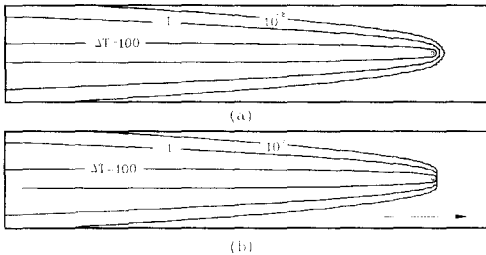


Fig. 7 Isothermal lines of temperature rise at the thermal Mach number,  $M = 1.0$ .  
 (a) by using the Fourier's law  
 (b) by using the modified heat flux law

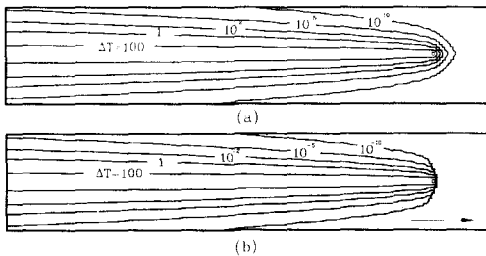


Fig. 8 Isothermal lines of temperature rise at the thermal Mach number,  $M = 3.0$ .  
 (a) by using the Fourier's law  
 (b) by using the modified heat flux law

도가 아무리 빨라도 모든 영역에 영향을 주지만, 열전과속도를 유한하게 가정한 수정된 열전도방정식에 의한 열유속은 열원의 속도가 열전과속도 보다 빠르거나 같게 되면 열원선단 앞부분에는 열이 전파되지 않기 때문에 일어난 현상이다. 즉 열원의 속도가 열전과속도 보다 빠르거나 같을 경우, 수정된 열전도방정식에 의한 온도분포에서는 열원의 선

단부인 앞에 열이 전파되는 부분(heat affected zone)과 열이 전파되지 않는 부분(heat undisturbed zone)으로 구분됨을 알 수 있다. 또한 열원의 속도가 열전과속도 보다 더 크게 나타날 경우( $M > 1$ )에는 normal shock과는 다른 형태의 oblique shock이 발생됨을 볼 수 있으며, 속도가 더 증가함에 따라 oblique shock의 각도(열원의 후면으로부터 shock까지의 각도)가 적어지며 열적인 영향을 받지 않는 부분이 증가된다. 속도가 증가하여 oblique shock의 각도가 감소함에 따라 shock의 선단에 강력한 열에너지집중(thermal energy intensification)현상이 발생하게 된다. 이것 또한 수정된 방정식에 의해서만 설명될 수 있는 유한한 열유속과의 특징 중에 하나이다.

### 4.3 속도에 따른 열원내의 온도분포

Fig.9는 임의의 크기를 갖는 열원내의 온도변화를 알아보기 위하여 Fig.9의 상단좌측에 나타낸 것과 같이 열원내의 (a), (b), (c), (d)점에서의 온도변화를 열원의 움직이는 속도( $M$ )에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 점선으로 나타낸 것은 Fourier 열전도방정식에 의한 결과이고 실선으로 나타낸 결과는 수정된 열전도방정식에 의한 결과이다. 결과에 의하면 열원의 속도가 낮을 때( $M < 10^{-2}$ )는 속도가 증가함에 따라 전 영역에서 온도가 증가하는 현상을 나타내고 있다. 그러나 속도( $M$ )가  $10^{-2} \sim 10^1$ 인 구간에서는 이전에 발생된 열 영향을 적게 받는 부분(c)에서부터 감소하기 시작하는 천이상태(transition state)를 나타내고 있으며, 속도가  $M < 1$ 일 때는 열원의 모든 부분에서 두 방정

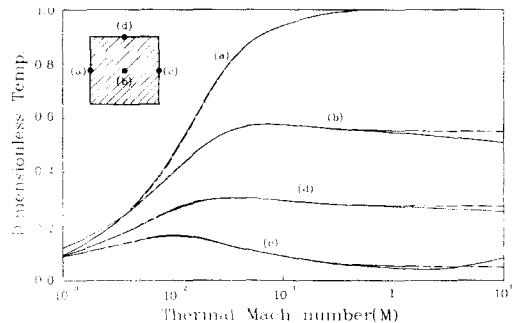


Fig. 9 Dimensionless temperature dependent on the various velocities at 4 points in the heat source.

Dashed line : Fourier's law  
 Solid line : thermal wave equation

식에 의한 해가 거의 일치함을 알 수 있다. 그러나 속도가  $M > 1$ 인 경우에 (a) 위치의 온도는 두 방정식에 의한 결과가 거의 일치하나 (b), (c), (d) 위치의 온도는 상당한 차이를 나타내고 있다. 즉 (b)와 (d) 위치의 수정된 열전도방정식에 의한 온도는 속도  $M$ 이 1보다 높을 때 Fourier 열전도방정식에 의한 결과보다 낮게 나타났다. 이는 Fourier 열전도방정식은 열전파 속도를 무한하다고 가정했기 때문에 열원의 속도가 아무리 증가하여도 현재의 열원 모든 영역에서 이전에 발생한 열유속의 영향을 받으나, 유한한 열전파속도를 가정한 수정된 열전도방정식에 의한 온도는 열전파 속도보다 열원의 속도가 빠른 경우에 현재의 열원 이전에 발생한 열유속의 영향을 받지 못하기 때문이다. 그러나 (c) 위치에서는 이전에 발생한 열유속의 영향은 (b)와 (d)에서와 같이 받으나, 속도  $M > 5$ 인 경우에는 열원선단에 앞부분에 형성된 shock의 영향을 받아 주위의 열에너지가 축적되어 속도가 증가함에 따라 온도가 상승한다. 이 결과에서도 Fourier 열전도방정식과 수정된 열전도방정식의 차이점을 잘 나타내고 있다.

### 5. 결론

지금까지 고체내의 열전도 현상은 Fourier 열전도방정식에 의하여 해석되었으나, 빠른 속도로 진전된 열원에서의 열해석은 수정된 열전도방정식에 의한 해석이 고려되고 있다. 본 연구에서는 열원이 빠르게 진전되고 있을 때 열원부근의 열전도 현상에 대하여 Fourier 열전도방정식과 수정된 열전도방정식으로 나타내고 수치해석을 통하여 해를 구하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 열원의 속도가 빠르지 않은 경우( $M < 1$ )에는 Fourier 열전도 방정식과 수정된 열전도방정식에 의한 결과가 거의 일치함을 알 수 있으나, 열원의 속도가 아주 빠를 경우( $M > 1$ )에는 유한한 열유속의 영향이 두드러짐에 따라 수정된 열전도방정식에 의해서만 해석될 수 있는 thermal shock과 같은 현상들이 나타났다.
2. 열원내의 온도변화는 열원의 속도가 빠르지 않은 경우( $M < 1$ )에 속도가 증가함에 따라 열원이 있는 전 영역에서 온도가 증가한다. 속도가 아주 빠를 경우( $M > 1$ )는 Fourier 열

전도방정식에 의한 결과에 의하면 열원이 있는 전 영역에서 열적인 평형상태에 도달하여 속도가 증가하여도 온도 변화가 거의 없으나, 수정된 열전도방정식에 의한 결과에서는 shock의 영향에 의하여 속도가 증가함에 따라 열원 선단의 앞부분에서 온도가 상승한다.

위의 결론에서와 같이 열원이 빠르게 진행되는 경우( $M \geq 1$ ), 열원부근의 열해석은 Fourier 열전도방정식에 의한 해석과 수정된 열전도방정식(thermal wave equation)에 의한 해석이 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 극 저온내의 열전도 해석, 높은 열유속을 갖는 레이저빔 가공에 의한 금속내의 열해석이나 극히 짧은 시간 동안의 가열에 대한 열해석과 같이 열전도에 유한한 열유속의 영향이 큰 분야에서는 수정된 열전도방정식에 의한 열해석이 고려되어야 할 것이다.

### 참고문헌

1. Maxwell, J. C., "ON the Dynamical Theory of Gases," *Phil. Trans R.Soc.*, Vol. 157, pp. 49-88, 1867.
2. Vernotte, P., "Les paradoxes de la Théorie Continue de l'équation de la Chaleur," *C. R. Acad. Sci.* Vol. 246, pp. 3154, 1958.
3. Cattaneo, C., " Sur Une Forme de l'équation de la Chaleur éliminant le paradoxe D'und propagation instantaneous," *C. R. Acad. Sci.* Vol. 247. pp. 431, 1958.
4. Weichert, R. and Schönert, K., "On The Temperature Rise at The Tip of a Fast Running Crack," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 22, pp. 127-133, 1974.
5. Weichert, R. and Schönert, K., "Heat Generation At The Tip of a Moving Crack," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 26, pp. 151-161, 1978.
6. Tzou, D. Y., "Shock Wave Formation Around a Moving Heat Source in a Solid with Finite Speed of Heat Propagation," *Int. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, pp. 1979-1987, 1989.
7. Tzou, D. Y., "Thermal Shock Waves Induced by a Moving Crack," *ASME. J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 21-27, 1990.
8. Zehnder, A. T. and Rosakis, A. J., "On The

- Temperature Distribution At The Vicinity of Dynamically Propagating Cracks in 4030 Steel," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 39, No. 3, pp. 385-415, 1991.
9. 조창주, "파동특성을 갖는 쌍곡선형 열전도방정식에 관한 수치해법," *한국박용기관학회지*, 제 21권, 제5호, pp. 670-679, 1998.
10. Chester, M., "High-Frequency Thermometry," *Physical Review*, Vol. 145, No.1, pp. 76-80, 1966.
11. Chester, M., "Second Sound in Solids," *Physical Review*, Vol.131, No. 5 pp. 2013 - 2015, 1963.
12. Maurer, M. J., "Relaxation Model for Heat Conduction in Metals," *J. Appl. Phys.* Vol. 40, No. 13, pp. 5123-5130, 1969.
13. Kaminski, W., "Hyperbolic Heat Conduction Equation for Materials with a Non-homogeneous Inner Structure," *ASME. J. Heat Transfer*, Vol. 112, pp. 555-560, 1990.