

# 드릴링 공정의 열거동 해석과 관측기를 이용한 온도 추정법

김 태 훈\* · 정 성 중†

(2003년 1월 7일 접수, 2003년 7월 4일 심사완료)

## Analysis of Thermal Behavior and Temperature Estimation by using an Observer in Drilling Processes

Tae-Hoon Kim and Sung-Chong Chung

**Key Words :** Cutting Temperature (절삭온도), Drill (드릴), IHP (Inverse Heat Problem), Modal Analysis (모드해석), Nonminimum Phase (비최소위상), Observer (관측기), State Space Equation (상태공간방정식)

### Abstract

Physical importance of cutting temperatures has long been recognized. Cutting temperatures have strongly influenced both the tool life and the metallurgical state of machined surfaces. Temperatures in drilling processes are particularly important, because chips remain in contact with the tool for a relatively long time in a hole. Tool temperatures tend to be higher in drilling processes than in other machining processes. This paper concerns with modeling of thermal behaviors in drilling processes as well as estimation of the cutting temperature distribution based on remote temperature measurements. One- and two-dimensional estimation problems are proposed to analyze drilling temperatures. The proposed thermal models are compared with solutions of finite element methods. Observer algorithms are developed to solve inverse heat conduction problems. In order to apply the estimation of cutting temperatures, approximation methods are proposed by using the solution of the finite element method. In two-dimensional analysis, a moving heat source according to feedrate of the drilling process is regarded as a fixed heat source with respect to the drilling location. Simulation results confirm the application of the proposed methods.

### 기호설명

$A$  : 부재의 단면적,  $m^2$   
 $B$  : 선형 제차 미분연산자  
 $G_H$  : 열전도전달함수  
 $G_x$  : 잡음전달함수  
 $G_D$  : 신호전달함수  
 $G_n, G_m$  : 시간에 따라 변하는 일반화된 좌표  
 $H$  : 2 차원 문제에서의 공작물 두께,  $m$   
 $L$  : 미분 연산자

$M$  :  $1/\alpha$   
 $N$  : 주파수 영역에서 표현된 측정잡음  
 $Q$  : 일반화된 열입력  
 $R$  : 공작물의 반지름,  $m$   
 $T$  : 부재의 온도와 주위 온도와의 차,  $^{\circ}C$   
 $T_w$  : 주위 온도,  $^{\circ}C$   
 $U$  : 주파수 영역에서의 열입력  
 $W_n$  : 1 차원 문제에서의 고유함수  
 $Y$  : 주파수 영역에서의 출력  
 $h$  : 대류 열전달계수,  $W/m^2^{\circ}C$   
 $k$  : 열전도 계수,  $W/m^{\circ}C$   
 $q$  : 단위 체적당 발생 열량,  $W/m^3$   
 $t$  : 시간,  $s$   
 $w$  : 1 차원 문제에서의 공작물 두께,  $m$   
 $\Lambda_n$  :  $\alpha \lambda_n^2$

\* 신도리코 주식회사

† 책임저자, 회원, 한양대학교 공과대학 기계공학부  
 E-mail : chung@hanyang.ac.kr  
 TEL : (02)2290-0444 FAX : (02)2298-4634

- $\Omega_{mn}$  : 2 차원 문제에서의 고유함수
- $\alpha$  : 열확산 계수,  $m^2/\text{C}$
- $\delta_{mn}$  : Kroenecker delta
- $\eta$  :  $h/kw$

1. 서 론

드릴은 금속 및 비금속 재료에 빠르고 편리하게 구멍을 뚫는 절삭공구로서 드릴링 공정은 전체 기계가공의 20~25%를 차지하는 중요한 공정이다. 특히 전자, 컴퓨터, 통신 등 첨단산업과 자동차, 금형 산업의 발전과 함께 드릴링 공정에서도 고도의 가공 정도와 고생산성이 요구되고 있다.

드릴가공은 선삭, 밀링과 같은 일반적인 기계가공과는 달리 절삭이 진행됨에 따라 온도가 정상상태에 이르지 않고, 구멍의 깊이가 깊어질 수록 절삭온도가 증가하는 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 이 때문에 드릴 공정에서 발생된 열은 전파되어 드릴과 피삭재에 여러가지 열적 손상을 유발한다. 즉, 드릴 마멸을 촉진하고, 절삭저항을 증대 시켜 드릴 파손과 칩배출에 악영향을 미친다. 이러한 드릴의 열적 현상에 대한 연구는 1949 년 Schmidt 와 Roubik 이 증류수 속에서 드릴가공 시 발생하는 온도 변화를 측정하기 시작 이래, 많은 실험 및 이론적 모델들이 제시되었다.<sup>(2-6)</sup> 하지만 DeVries 에 의한 열모델<sup>(2)</sup>이나 Stephenson 이 제시한 절삭날에서의 열모델<sup>(3)</sup> 등에서 알 수 있듯이, 대부분의 이론적 모델은 실험데이터에 의존된 많은 입력조건들을 필요로 한다. 그리고, 드릴링 공정에서 실제 절삭온도를 측정하기 위해 특별히 고안된 실험장치를 사용할 수 밖에 없으며 이로 인해 많은 제한조건들이 유발된다.<sup>(3)</sup>

안 등<sup>(7-9)</sup>은 모드해석을 이용하여 1 차원 부재의 열원과 온도분포를 구하기 위한 IHP (inverse heat problem) 법을 연구하고, 실시간으로 온도분포를 추정할 수 있는 관측기를 개발하여 볼스크류의 온도분포 해석을 수행하였다. 그리고, Stephenson<sup>(10)</sup>은 절삭가공에서 온도분포를 구하기 위해 역해석법 (inverse method)을 도입하였고, Blum 등<sup>(11)</sup>은 IHP 문제에서 최적 해를 구하기 위한 관측기를 연구한 바 있다. 본 논문에서는 피삭재인 공작물의 두께가 얇은 경우, IHP 법을 이용하여 1 차원으로 모델링하고 드릴 공정 중에 공작물 상의 몇 점에서 편리하게 측정할 수 있는 온도 측정치를 이용하여 가공 중인 드릴의 절삭온도를 실시간으로 추정하는 방법을 제안한다. 또한 두께를 무시할 수 없는 공작물의 경우에 대해서도 2 차원으로 확장된 열모델을 통해 간접적으로 드릴링 시의 절삭온도를

추정하는 방법을 제시한다. 각각의 결과는 제시된 열모델을 유한요소해석 결과와 비교를 통해 그 내용의 타당성과 유용성을 검증하였다.

2. 드릴링 공정의 1 차원 열전달

2.1 모드해석

시편의 두께(w)가 반경(R)에 비해 작은 경우, 피삭재 내부의 열전달은 두께 방향의 온도구배가 무시되며 반경방향에 대한 1 차원 문제로 정의된다. 또한 드릴링 시 단위체적당  $q(r,t)$  의 열이 발생하고 시편의 바깥면에 대류 열전달이 존재할 때, 극좌표계에서 열전달방정식은 식 (1)이 된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \right] + \eta T(r,t) + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} = \frac{q(r,t)}{k} \tag{1}$$

본 논문에서는 1 차원 열전달 문제에서 반경방향에 대해 다음과 같은 대류 경계조건을 적용한다.

$$-kA \frac{\partial T(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = hAT(R,t) \tag{2}$$

또한  $T = \Theta e^{-\eta r}$  로 치환하면 식 (1)과 식 (2)로부터 식 (3)을 얻게 된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial \Theta(r,t)}{\partial r} \right] + \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \Theta(r,t)}{\partial t} = \frac{q(r,t)}{k} e^{\eta r} \tag{3a}$$

$$-k \frac{\partial \Theta(r,t)}{\partial r} \Big|_{r=R} = h\Theta(R,t) \tag{3b}$$

본 논문에서 고려하는 대류 경계조건의 경우 그 자체가 제차 경계조건 이므로 식 (3)을 미분연산자를 이용하여 일반화시키면 다음과 같이 된다.

$$L[\Theta(r,t)] + M \frac{\partial \Theta(r,t)}{\partial t} = Q(r,t) \tag{4a}$$

$$B[\Theta(r,t)]_{r=R} = 0 \tag{4b}$$

모드해석의 적용을 위해서 식 (4a)의 우변을 0 으로 하는 제차방정식의 해를  $\Theta(r,t) = W(r)G(t)$  로 가정하면, 식 (4b)를 만족하는 식 (5)가 얻어진다.

$$\frac{\nabla^2 W(r)}{W(r)} = \frac{1}{\alpha} \frac{\dot{G}(t)}{G(t)} = -\lambda^2 \tag{5}$$

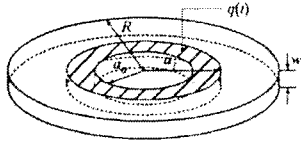


Fig. 1 Distributed heat source

또한 식 (5)로부터 구한  $G(t)$  를 식 (4a)의 우변을 0 으로 하는 제차방정식과 식 (4b)에 대입하면 다음의 고유치문제가 얻어진다.

$$L[W(r)] - \Lambda MW(r) = 0 \quad (6a)$$

$$B[W(r)]_{r=R} = 0 \quad (6b)$$

변수분리와 확장정리(expansion theorem)를 이용하여 식 (4)의 해를 식 (7)로 가정하면, 식 (8)과 같은 무한개의 비연성 상미분방정식이 얻어진다.

$$\Theta(r, t) = \sum_{n=1}^{\infty} W_n(r) G_n(t) \quad (7)$$

$$\dot{G}_n(t) + \Lambda_n G_n(t) = Q_n(t), \quad n=1, 2, \dots \quad (8)$$

여기서  $Q_n(t)$  는  $e^{\Lambda_n t} \int_0^R W_n(r) Q(r, t) r dr$  의 값을 가지고,  $Q(r, t)$  는 열발생 형태에 따라 달라지는데, 본 논문에서는 Fig. 1 과 같은 형태의 열원에 대하여 고려하며 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$Q(r, t) = q(t) \left\{ \langle r - a_0 \rangle_0 - \langle r - a_1 \rangle_0 \right\} \quad (9)$$

여기서  $q(t)$  는 단위체적당 발생열(W/m<sup>3</sup>)이고,  $\langle r - a_0 \rangle_0$  는  $r > a_0$  에서 1 인 계단함수이다.

### 2.2 상태공간방정식 모델

정상상태에서 시스템 전체의 열용적을 식 (10)으로 정의하면, 식 (8)에 모드축소기법을 활용하여 모델링에 참여할  $N$  개의 모드가 선택된다.<sup>(7-10)</sup>

$$\int_0^R \Theta(r, t) M \Theta(r, t) r dr = \left( \frac{W_1^2(a_1)}{\Lambda_1^2} + \frac{W_2^2(a_1)}{\Lambda_2^2} + \frac{W_3^2(a_1)}{\Lambda_3^2} + \dots \right) \frac{q_{const}^2}{k^2} \quad (10)$$

따라서 열원이 Fig. 1 과 같이 존재할 때 식 (8)은 상태공간방정식 식 (11)로 표현된다.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) \quad (11)$$

여기서,

$$\mathbf{x}(t) = \{G_1(t) \ G_2(t) \ \dots \ G_N(t)\}^T, \quad u(t) = \frac{q(t)}{k} e^{\Lambda t}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \swarrow & & & \\ & -\Lambda_1 & & \\ & & \searrow & \\ & & & -\Lambda_2 & \\ & & & & \ddots \\ & & & & & -\Lambda_N \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \int_0^R W_1 \{ \langle r - a_1 \rangle_0 - \langle r - a_0 \rangle_0 \} r dr \\ \int_0^R W_2 \{ \langle r - a_1 \rangle_0 - \langle r - a_0 \rangle_0 \} r dr \\ \vdots \\ \int_0^R W_N \{ \langle r - a_1 \rangle_0 - \langle r - a_0 \rangle_0 \} r dr \end{bmatrix}$$

그리고,  $b_r$  ( $0 \leq b_r \leq R$ ) 지점에서의 온도 상승치에 대한  $\Theta(b_r, t)$  는  $y(t)$  로서 식 (12)와 같이 된다.

$$y(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t) \quad (12)$$

여기서,  $\mathbf{C} = [W_1(b_r) \ W_2(b_r) \ \dots \ W_N(b_r)]$  이다.

### 2.3 관측기 설계

드릴링 공정에서 측정된 몇 점의 온도로부터 열원의 크기와 드릴의 절삭온도를 포함한 공작물의 전체 온도분포를 구하는 과정은 IHP 로 귀결된다.<sup>(11)</sup> 일반적으로 IHP 는 그 특성상 측정데이터의 작은 편차가 추정 결과에 큰 오차를 유발할 수 있는 ill-posed 문제이다.<sup>(7-9,12)</sup> 따라서 측정잡음이 존재하는 경우에도 정확한 열원의 크기를 추정할 수 있는 알고리즘이 필요하다.

식 (11), (12)를 전달함수로 표현하면 다음과 같다.

$$Y(s) = G_H(s)U(s) \quad (13)$$

IHP 를 통해 추정된 열입력을  $\hat{U}(s)$  라고 할 때, 열입력  $U(s)$  와 측정잡음  $N(s)$  에 대하여 식 (14)와 같이 가정한다.

$$\begin{aligned} \hat{U}(s) &= G_U(s)U(s) + G_N(s)N(s) \quad \text{or} \\ \hat{U}(j\omega) &= G_U(j\omega)U(j\omega) + G_N(j\omega)N(j\omega) \end{aligned} \quad (14)$$

식 (14)로부터 IHP 알고리즘의 설계목표를 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$|G_U| = 1, \quad |G_N| = 0 \quad \forall \omega \quad (15)$$

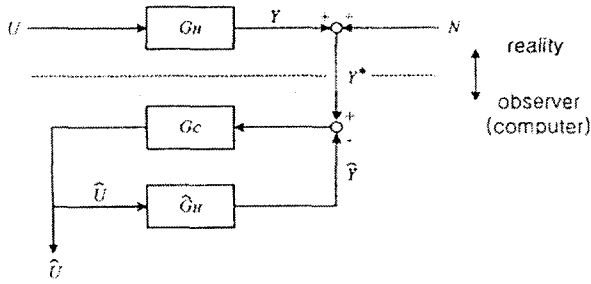


Fig. 2 Block diagram of the observer algorithm

Table 1 Simulation conditions: test case 1

Material	Pure aluminum	
Drill diameter	$a_i$	10 mm
Workpiece radius	$R$	80 mm
Workpiece width	$w$	5 mm
Heat conductivity	$k$	204 W/m $^{\circ}$ C
Thermal diffusivity	$\alpha$	$8.4 \times 10^{-5}$ m $^2$ /s

신호전달함수  $G_U$  와 잡음전달함수  $G_N$  의 관계를 도출하기 위해 Fig. 2 의 블록선도로 표현되는 관측기 시스템을 고려하면, 측정잡음을 포함한 측정값  $Y^*$ 는 식 (16)과 같이 쓸 수 있다.

$$Y^* = Y + N = G_U U + N \tag{16}$$

시스템을 정확하게 모델링 하였다고 가정할 경우 ( $G_H = \hat{G}_H$ ), 추정된 열입력은 Fig. 2 로부터 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{U} = \frac{G_C}{1 + G_C G_H} Y^* \tag{17}$$

식 (14), (16), (17)로부터 잡음전달함수  $G_N$  은 식 (18)로 정리할 수 있으며, 이때 추정된 열입력은 식 (19)로 나타난다.

$$G_N(s) = G_U(s)G_N^{-1}(s) \tag{18}$$

$$\hat{U}(s) = G_N(s)Y^*(s) \tag{19}$$

일반적으로 Fig. 2 와 같은 관측기 설계에는 적절한 관측기의 제어게인  $G_C$  를 결정하는 것이 문제가 되지만, ill-posed 문제의 해결을 위해 여기서는 저역통과필터의 특성을 갖는 신호전달함수  $G_U$  를 설계함으로써 그 과정을 대신한다. 또한 관측기의 설계 시 온도센서의 위치에 따라서 식 (13), (18)에 주어진  $G_H$  의 영점이 달라진다. 일반적으로 열원

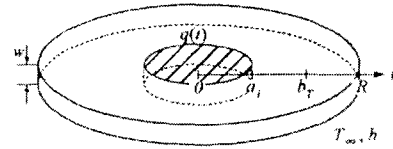


Fig. 3 1-D drill workpiece : test case 1

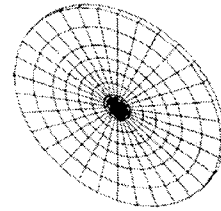


Fig. 4 Finite element model of test case 1

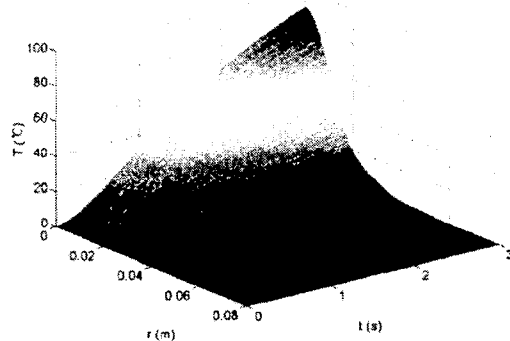


Fig. 5 Simulation result of test case 1 by the state-space equation model

으로부터 센서의 위치가 멀어짐에 따라  $G_H$  의 영점 가운데 실수부가 양수인 값이 존재하게 되며, 이는 관측기 설계에서  $G_N$  의 극점으로 반영되어 추정 결과가 발산하는 현상을 보이게 된다. (2.4 절 참조) 따라서, 관측기의 추정 성능을 보장하기 위해서 먼저  $G_H$  의 영점을 조사하여 온도센서의 위치를 결정하여야 한다.

2.4 모델의 검증

제안된 모델과 방법론의 검증을 위해 Fig. 3 과 같이 1 차원 열전달로 가정한 드릴링의 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한다. 사용된 물성치는 Table 1 과 같으며, 대류계수( $h$ )는 10 W/m $^2$ C로 가정한다. 또한 열원은 시간이 경과함에 따라 지수함수의 형태를 띤다고 가정한다.

Fig. 4 는 Fig. 3 과 동일한 경계조건을 갖는 유한 요소모델로서 해석에는 I-DEAS TMG 모듈을 사용하였다. Fig. 5 는 5 개의 모드를 사용하여 상태공간 방정식으로 모델링한 시뮬레이션 결과이며, Fig. 6

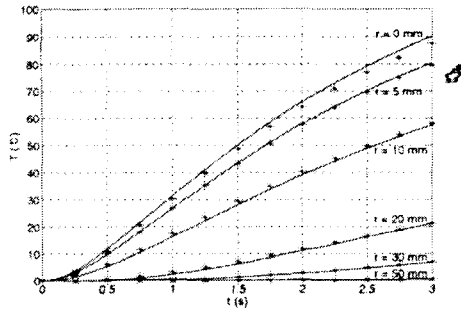


Fig. 6 Comparisons at several points  
( — : State-space model, \* : FEM )

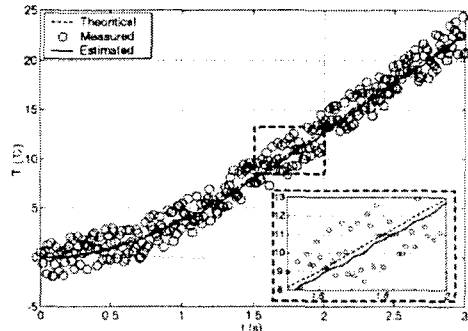


Fig. 10 Temperature data at sensor location

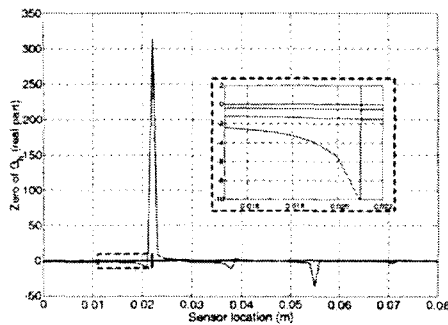


Fig. 7 Determination of sensor location

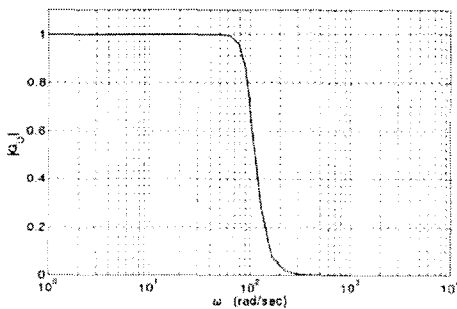


Fig. 8 Design of signal transfer function

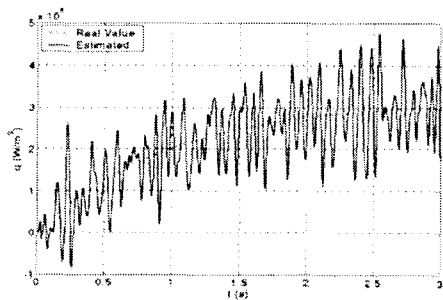


Fig. 9 Estimated heat source

에 유한요소해석 결과와 비교하여 나타낸다.

관측기 설계에 필요한 센서 위치 선정을 위해 상태공간방정식을 전달함수 형태인  $G_H$ 로 표현하여 그 영점을 조사한 결과, 온도센서의 위치에 따라 그 값은 Fig. 7 과 같이 된다. 따라서 온도센서

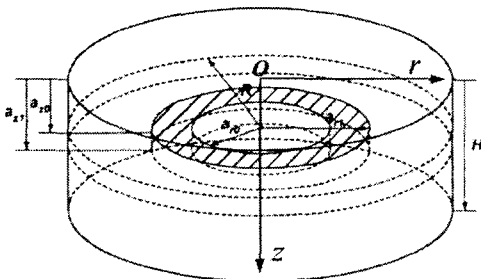


Fig. 11 2-dimensional heat conduction model

의 위치  $b$ 는 2.3 절에 언급한 바와 같이 비최소위상 (nonminimum phase) 특성을 극복하기 위해 중심으로 부터 20mm 떨어진 곳으로 결정하였으며, 신호전달함수  $G_v$ 는 Fig. 8 과 같이 100 rad/sec 의 차단주파수 (cutoff frequency)를 갖는 Butterworth 저역통과필터로 설계하였다.

설계된 관측기를 검증하기 위해 온도센서로부터 측정된 온도는 실제 온도값을 반영하기 위해  $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 랜덤오차를 측정잡음으로 삽입하였다. 온도센서로부터 측정된 온도를 입력으로 하여 관측기를 통해 추정된 열원을 Fig. 9 에 나타낸다. 측정잡음의 영향으로 인해 추정된 열원의 크기는 다소의 증폭이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 측정잡음의 영향은 관측기 설계 시에 신호전달함수의 차단주파수를 낮춤으로써 감소시킬 수 있다. 하지만, 신호전달함수의 차단주파수를 낮춤에 따라 관측기로부터 추정된 열원의 크기는 실제 열원에 비해 시간지연이 커지게 된다. 따라서, 추정된 열원에서 나타나는 잡음의 증폭비와 시간 지연 사이에서 적절한 trade-off 를 고려한 차단주파수의 설정이 필요하다. 또한, 대부분의 열전달 시스템에서 나타나는 것과 마찬가지로 본 논문에서 고려하고 있는 열모델도 매우 낮은 차단주파수를 갖는 저역통과필터의 형태를 가진다. 그러므로 추정된 열원에 어느 정도 측정잡음의 영향이 포함되더라도 온도 추정값에서는 그 영향이 배제된다. Fig. 10



Table 2 Simulation conditions: test case 2

Material		Pure aluminum
Workpiece radius	$R$	80 mm
Workpiece height	$H$	100 mm
Heat source	$a_{r0}$	0 mm
	$a_{r1}$	10 mm
	$a_{z0}$	20 mm
	$a_{z1}$	25 mm
Heat conductivity	$k$	204 W/m°C
Thermal diffusivity	$\alpha$	$8.4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

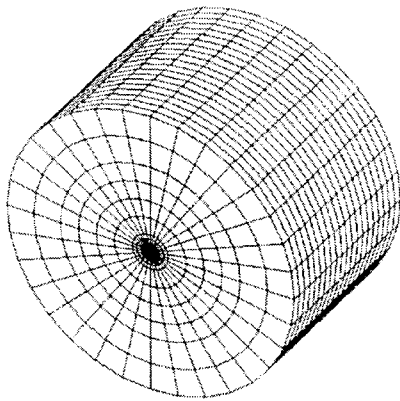


Fig. 12 Finite element model of test case 2

$$C = \begin{bmatrix} \Omega_{11}(b_r, b_z) \\ \vdots \\ \Omega_{1N}(b_r, b_z) \\ \vdots \\ \Omega_{N1}(b_r, b_z) \\ \vdots \\ \Omega_{NN}(b_r, b_z) \end{bmatrix}^T$$

3.2 모델의 검증

제안된 모델의 검증을 위해 Fig. 11 에 대해 Table 2 의 규격과 물성치를 갖는 2 차원 열전달 문제를 고려한다. 대류계수( $h$ )는  $10 \text{ W/m}^2\text{°C}$ 이고, 열원의 크기는 일정으로 가정한다. Fig. 12 는 동일한 조건을 갖는 유한요소모델로서 요소 수는 7680 개, 노드 수는 6741 개이고, 해석에는 I-DEAS 의 TMG module 을 이용한다.

Fig. 13 과 Fig. 14 는 각각 상태공간방정식 모델과 유한요소해석된 결과에 대해서 시간의 경과에 따른 2 차원 부재 단면의 온도분포를 나타낸다. 두 가지 방법에 대하여 매우 유사한 결과를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

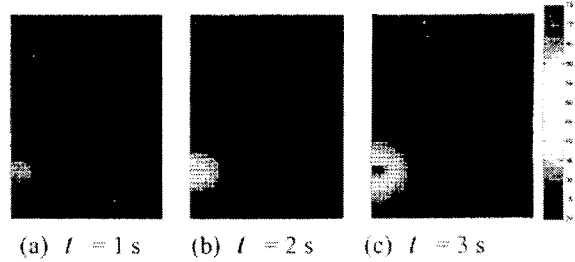


Fig. 13 Simulation results by the state-space equation model

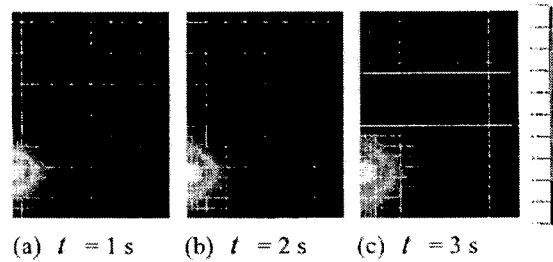


Fig. 14 Simulation results by the finite element method

4. 이동열원의 해석

실제 절삭은 공구와 공작물 사이의 상대운동으로 이루어진다. 식 (28)의 2 차원 상태공간방정식 모델의 경우, 열원의 위치가 고정되어 있을 경우로 가정하였으므로 이를 직접 드릴링 공정에 적용하기는 어려우며, 이동열원에 대한 고려를 필요로 한다. 절삭공정에서의 이동열원에 대한 모델로는 Jaeger 의 고전 이론을 발전시켜 Stephenson 이 제안한 전삭 모델과 Jen 이 제안한 연삭 모델 등이 있으나,<sup>(13)</sup> 이 역시 드릴링 공정에 대한 직접 적용은 불가능하다. 따라서, 본 장에서는 이동열원에 대한 유한요소해석 결과를 보이고 이를 앞서 제시한 모드해석과 상태공간방정식 모델을 활용하여 드릴링 공정에서의 절삭온도를 추정하는 방안에 대해서 논의한다.

4.1 이동열원에 대한 유한요소모델

Fig. 12 와 같은 유한요소모델에 대하여 열원이 일정한 속도로 이동하는 경우, 열원의 크기는 시간이 경과함에 따라 지수함수적으로 증가한다고 가정하면, 이를 유한요소법에 적용하는 방법은 Fig. 15 와 같다. Fig. 16 은 열원이 300mm/min 의 이송속도로 위에서 아래로 내려가고 있는 형태에 대한 유한요소해석 결과로서 시간의 경과에 따른 단면의 온도분포를 나타낸다. 유한요소해석을 위해 사용된 물성치는 Table 2 의 값을 이용하였으며, 열원의 크기는 지수함수적으로 증가시켰다.

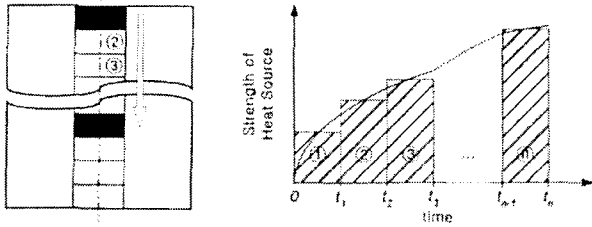


Fig. 15 Application of a moving heat source in the finite element method

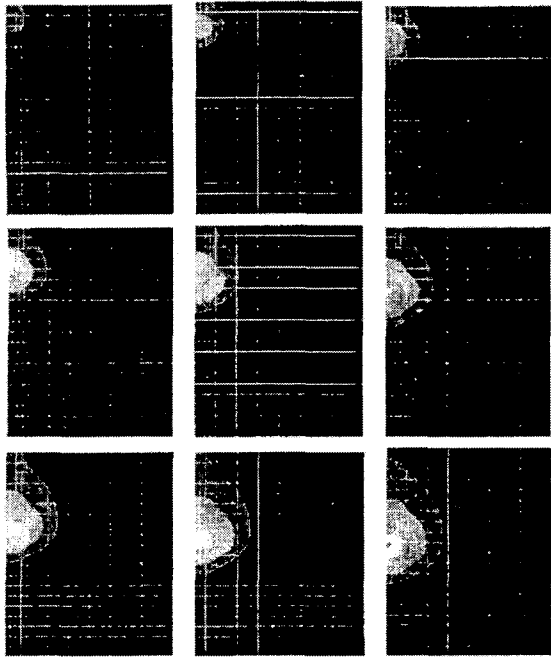


Fig. 16 Simulation results of the moving heat source by the finite element method

4.2 이동열원과 고정열원의 비교

Fig. 16의 시뮬레이션 결과를 토대로 동일한 크기의 열원과 경계조건 하에서 열원의 위치를 고정하고 유한요소해석을 실시하였다. Fig. 17과 Fig. 18은 각각 이동열원과 고정열원의 경우에 동일한 시간에서의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 19는 두 가지 형태의 열원에 대하여 열원이 되는 부분의 온도 상승치를 비교한 그림으로서, 각각의 경우에 대해 매우 유사한 형태의 온도 상승을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 또한 Fig. 17과 Fig. 18의 비교를 통해 확인할 수 있는 것과 같이 이동열원 앞쪽에서의 온도 분포는 고정열원으로 모델링한 것과 거의 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 드릴링 공정의 열거동 해석에 있어 가장 중요한 요소는 드릴링이 이루어지는 곳의 절삭온도의 추정이라고 할 수 있다. 실제 드릴링 공정에서 드릴의 회전수와 이송속도가 정해지면, 임의의 시간에서 열원이 되는 드릴의 위치는 결정

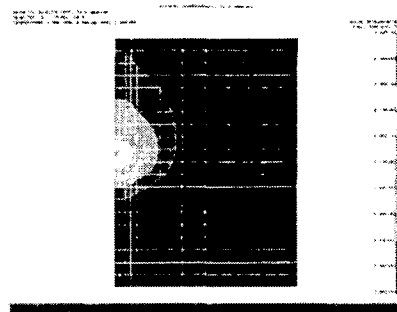


Fig. 17 Temperature distribution for moving heat source at 10s

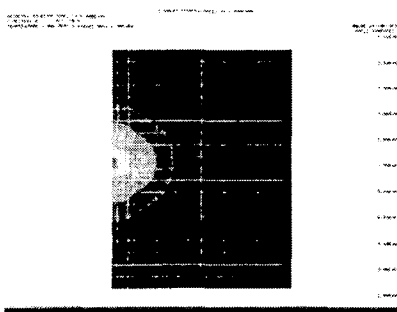


Fig. 18 Temperature distribution for fixed heat source at 10s

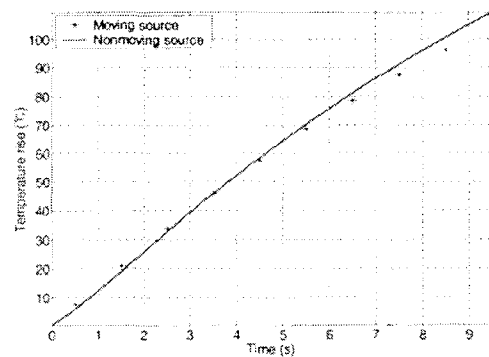


Fig. 19 Temperature rise of heat source

된다. 따라서 이 때 드릴링이 이루어지는 절삭온도는 Fig. 19의 결과에서 알 수 있듯이 이동열원이 아닌 고정열원으로 모델링할 수 있다. 이렇게 고정열원으로 가정할 경우 Fig. 17의 결과에서 나타난 것과 같이 드릴의 이동 방향 앞쪽에 위치한 온도센서로부터 2차원 상태공간방정식 모델의 생성이 가능하다. 상태공간방정식으로 모델링된 드릴링 공정은 1차원에서 적용했던 것과 동일하게 관측기를 적용할 수 있으며, 이로부터 두꺼운 공작물을 가공하는 드릴링 공정에서 열원의 크기와 절삭온도를 추정하는 것이 가능하다.



5. 결론

- (1) 드릴링 공정의 피삭체를 1 차원과 2 차원으로 모델링하고, 모드해석을 통해 상태공간방정식 모델들을 유도하였다.
- (2) IHP 법과 주파수영역에서 설계된 관측기 알고리즘을 이용하면 공작물 표면에서의 온도측정만을 이용하여 구멍 내에서 이루어지는 드릴링 공정의 열입력량과 절삭온도 분포를 추정할 수 있다.
- (3) 이동열원을 갖는 드릴링 공정에서 유한요소 해석 결과 드릴링 공정을 고정열원을 갖는 2 차원 상태공간방정식 모델로 근사화 할 수 있다.
- (4) 1 차원 드릴링 공정에 적합한 관측기를 2 차원 상태공간방정식 모델에 적용하면 두께 방향의 온도구배를 무시할 수 없는 후판의 드릴 가공시의 절삭열원의 크기와 절삭온도를 추정할 수 있다.

참고문헌

- (1) Stephenson, D.A. and Agapiou, J.S. 1997, Metal Cutting Theory and Practice, Marcel Dekker, INC. pp. 491~527.
- (2) DeVries, M.F. and Wu, S.M., 1970, "Evaluation of the Effects of Design Variables on Drill Temperature Responses," *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, pp. 699~705.
- (3) Agapiou, J.S. and Stephenson, D.A., 1994, "Analytical and Experimental Studies of Drill Temperatures," *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 116, pp. 54~60.
- (4) Saxena, U.K., DeVries, M.F. and Wu, S.M., 1971, "Drill Temperature Distribution by Numerical Solutions," *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, pp. 1057~1066.
- (5) Agapiou, J.S. and DeVries, M.F., 1990, "On The Determination of Thermal Phenomena During Drilling," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol. 30, pp. 203~215.

- (6) S.-H., Ryu, D.-W., Cho, 1997, "A Study on the Thermal Behavior during Micro Hole Drilling," *Proc. of the KSPE 1997 Autumn Meeting*, pp. 79~84.
- (7) J.-Y., Ahn, Y.-M., Park, S.-C., Chung, 2001, "Real Time Estimation in 1-Dimensional Temperature Distribution Using Modal Analysis and Observer," *Transaction of the KSME, B*, Vol. 25, No. 2, pp. 195~204.
- (8) J.-Y., Ahn, T.-H., Kim, S.-C., Chung, 2001, "Real Time Estimation of Temperature Distribution of a Ball Screw System Using Modal Analysis and Observer," *Transaction of the KSME, A*, Vol. 25, No. 1, pp. 145~152.
- (9) J.-Y., Ahn, T.-H., Kim, S.-C., Chung, 2000, "Real-time Estimation of Temperature Distribution in a Ball Screw System Using Observer and Adaptive Algorithm," *Proc. of the 15<sup>th</sup> Annual Meeting ASPE*, pp. 304~307.
- (10) Tandy, D.F., Trujillo, D.M. and Busby, H.R, 1986, "Solution of Inverse Heat Conduction Problems Using an Eigenvalue Reduction Technique," *Numerical Heat Transfer*, Vol. 10, pp. 597~617.
- (11) Stephenson, D.A., 1991, "An Inverse Method for Investigating Deformation Zone Temperatures in Metal Cutting," *Trans. ASME, J. Eng. Ind.*, Vol. 113, pp. 129~136.
- (12) Joachim Blum and Wolfgang Marquardt, 1997, "An Optimal Solution to Inverse Heat Conduction Problems Based on Frequency-Domain Interpretation and Observers," *Numerical Heat Transfer*, Part B, 32, pp. 453~478.
- (13) Jen, T.C. and Lavine, A.S., 1995, "A Variable Heat Flux Model of Heat Transfer in Grinding : Model Development," *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, Vol. 117, pp. 473~478.