

## 초정밀 절삭에 있어서 임계절삭깊이에 대한 연구

김국원\*

### A Study on the Critical Depth of Cut in Ultra-precision Machining

Kug Weon Kim\*

#### ABSTRACT

The cutting thickness of ultra-precision machining is generally very small, only a few micrometer or even down to the order of a few nanometer. In such case, a basic understanding of the mechanism on the micro-machining process is necessary to produce a high quality surface. When machining at very small depths of cut, metal flow near a rounded tool edge become important. In this paper a finite element analysis is presented to calculate the stagnation point on the tool edge or critical depth of cut below which no cutting occurs. From the simulation, the effects of the cutting speed on the critical depths of cut were calculated and discussed. Also the transition of the stagnation point according to the increase of the depths of cut was observed.

**Key Words** : Ultra-precision machining(초정밀 절삭), Critical depth of cut(임계절삭깊이), Thermo-viscoplastic cutting model(열-점소성 절삭모델), Finite element analysis(유한요소해석)

#### 기호설명

$C_K$	=	penalty constant
$C_p$	=	specific heat
$k$	=	shear stress of the chip material
$k_c$	=	thermal conductivity
$S_f$	=	where prescribed surface traction $f^*$
$S_v$	=	where prescribed velocities $v^*$
$\dot{Q}$	=	rate of heat generation per unit volume
$\bar{\epsilon}$	=	effective (flow) strain rate
$\rho$	=	density
$\bar{\sigma}$	=	effective (flow) stress
$\mu$	=	coefficient of friction
$\sigma_n$	=	normal stress
$\tau_f$	=	frictional stress

#### 1. 서론

최근 초정밀 절삭에 관해서 실험장치, 공구, 계측, 회전축 등에 관한 수많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 초정밀 절삭에서 행해지는, 미소절삭에서의 절삭메카니즘에 관한 연구는 그렇게 많지가 않다. 일반적인 절삭깊이를 가지는 가공과는 달리 미소절삭에서는 보통 수  $\mu m$  혹은  $nm$  수준의 절삭깊이를 가지므로 공구의 끝단이 절삭가공에 미치는 영향이 매우 중요하다. 미소절삭 시에는 두가지 주요한 특성이 있는데, 치수효과와 임계절삭깊이이다. 치수효과란 절삭깊이가 감소함에 따라 비절삭에너지가 상승하는 것을 말하는데, 이에 대해서는 다음과 같은 연구들이 있다. Nakayama 와 Tamura<sup>(1)</sup>에 의하면 절삭중 피삭재는 공구끝단반경

↙ 2002년 2월 23일 접수  
\* 순천향대학교 기계공학과

의 어떤 점(정체점) 아래로 흐르게 되는데, 이 부분에서의 에너지 소산은 절삭깊이와 상관없이 일정하고, 치수효과의 주요한 원인이 된다고 보았다. Moriwaki 와 Okuda<sup>(2)</sup>, Furukawa 와 Moronuki<sup>(3)</sup> 및 Lucca 등<sup>(4)</sup>은 수  $\mu\text{m}$  이하의 미소절삭시 비절삭 에너지가 급격히 증가함을 관찰하고 이는 플랭크면과의 마찰, 공구끝단반경에 의한 유효상면경사각의 감소 등이 주 원인이라 생각하였다. Lucca 와 Seo<sup>(5)</sup>는 단결정 다이아몬드공구를 사용한 실험에서 절삭깊이가 공구끝단반경에 비해 상대적으로 큰 경우 절삭력은 상면경사각에 좌우되지만, 상대적으로 작은 경우 공구끝단반경의 영향이 더 커짐을 확인하였다. 임계절삭깊이란 칩을 생성할 수 있는 최소 절삭깊이를 말한다. Basuray 등<sup>(6)</sup>은 근사적인 수식 전개에 의해 임계절삭깊이에 대응하는 정체각을 계산하였다. Yuan 등<sup>(7)</sup>은 최소 절삭깊이와 공구의 끝단반경 사이에 간단한 관계식을 수립하고, 이전의 실험적 연구결과와 비교하여 타당함을 주장하였다.

최근 유한요소법을 이용하여 절삭가공을 해석하는 연구들이 활발한데, 그 중 공구끝단 형상이 고려된 연구들은 다음과 같다. Iwata 등<sup>(8)</sup>은 2 차원 정상상태의 강소성 유한요소모델을 개발하고 절삭깊이에 대한 공구끝단반경의 비를 변화시켜 해석을 수행하였다. Moriwaki 등<sup>(9)</sup>은 오일러 좌표계에서 절삭모델을 개발하여 절삭깊이에 대한 공구끝단반경의 영향을 고찰하고 실험치와 비교하였다. Kim 과 Sim 은 열-점소성절삭모델을 개발하여<sup>(10)</sup> 공구끝단반경이 절삭가공에 미치는 영향을 절삭력, 절삭온도 및 응력상태에 대해 살펴보았고<sup>(11)</sup>, 초정밀 미소절삭 시의 절삭특성에 대한 유한요소해석을 수행하였다<sup>(12)</sup>.

초정밀가공에서 이루어지는 미소절삭 시 칩이 형성될 수 있는 임계절삭깊이는 우수한 품질의 가공면을 얻기 위해서는 기본적으로 필요한 정보이나 공구끝단부근에서 피삭재의 소성변형, 마찰, 고온 등이 복합적으로 발생하므로 해석적으로 연구하기가 매우 어렵고, 또한 실험적으로도 고난도의 측정기술이 필요하기 때문에 현재까지 이에 대한 연구는 매우 미진한 실정이다.

본 연구에서는 Kim 과 Sim 의 열-점소성 절삭모델<sup>(10)</sup>을 바탕으로 임계절삭깊이에 대한 연구를 수행하였다. 절삭조건과 피삭재 재질 및 공구형상의 정보로부터 절삭가공을 해석하고 이로부터 임

계절삭깊이를 정량적으로 계산하였다. 또한 절삭조건들 중 절삭속도의 변화에 따른 임계절삭깊이의 변화를 살펴보았고, 절삭깊이의 변화에 따라 정체점이 이동함을 발견하였다.

## 2. 열-점소성 절삭모델

### 2.1 지배방정식 및 유한요소 이산화

절삭가공시 피삭재는 높은 온도와 큰 소성변형을 동시에 겪게 되므로, 피삭재를 열-점소성체로 가정하는 것이 타당하다. 이 경우 응력과 변형률속도 사이에 구성방정식이 성립하며 속도와 온도에 대한 다음의 지배방정식이 존재한다.

#### 2.1.1 속도방정식

$$\text{평행방정식: } \sigma_{ij,j} = 0 \quad (1)$$

$$\text{구성방정식: } \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3}{2} \frac{\dot{\epsilon}}{\sigma} s_{ij} \quad (2)$$

$$\text{경계조건 : } v_i = v_i^* \quad \text{on } S_v \quad (3)$$

$$f_i = f_i^* \quad \text{on } S_f$$

$$\text{적합조건: } \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (4)$$

약형식과 체적불변성,  $\dot{\epsilon}_{ii} = 0$  을 이용하면 유한요소 이산화를 위한 기본방정식은 다음과 같다.

$$\int_V s_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + C_K \int_V \dot{\epsilon}_{ii} \delta \dot{\epsilon}_{ii} dV - \int_{S_f} f_i^* \delta v_i dS = 0 \quad (5)$$

물체의 속도분포는 다음과 같이 절점속도와 형상함수로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{v} = \sum_n \mathbf{v}^n N_n(\mathbf{x}) \quad (6)$$

변형률속도 행렬  $\mathbf{B}$ , 상당변형률속도계수 행렬  $\mathbf{D}$  그리고 체적변형률속도 벡터  $\mathbf{C}$  를 이용하여 다음과 같은 일련의 비선형 연립방정식이 만들어진 다.

$$\mathbf{Kv} = \mathbf{R} \quad (7)$$

$$\text{여기서 } \mathbf{K} = \int_V \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\epsilon}} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV + C_k \int_V \mathbf{C} \mathbf{C}^T dV \quad (8)$$

$$\mathbf{R} = \int_{S_f} \mathbf{N}^T \mathbf{F} dS \quad (9)$$

### 2.1.2 온도방정식

$$\text{에너지방정식: } k_c T_{,ii} - \rho C_p \frac{dT}{dt} + \dot{Q} = 0 \quad (10)$$

$$\text{경계조건: } T = T_b \quad (11)$$

$$-k_c \frac{\partial T}{\partial n} = q$$

$$-k_c \frac{\partial T}{\partial n} = h(T - T_o)$$

물체내의 온도분포는 다음과 같이 절점온도와 형상함수로 나타낼 수 있다.

$$T = \mathbf{N} \mathbf{T} \quad (12)$$

가중함수,  $W_i$  를 이용하는 Galerkin 법에 의해 에너지방정식은 다음과 같게 된다.

$$\int_V \mathbf{W}^T \left[ k_c \frac{\partial^2 \mathbf{N}}{\partial x_i^2} \mathbf{T} - \rho C_p v_i \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} \mathbf{T} + \dot{Q} \right] dV = 0 \quad (13)$$

Green 정리와 경계조건을 적용으로 최종적으로 다음과 같은 방정식을 얻게 된다.

$$\mathbf{H} \mathbf{T} = \mathbf{F} \quad (14)$$

여기서

$$\mathbf{H} = \int_V \left[ k_c \frac{\partial \mathbf{W}^T}{\partial x_i} \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} + \rho C_p v_i \mathbf{W}^T \frac{\partial \mathbf{N}}{\partial x_i} \right] dV + \int_{S_h} h \mathbf{W}^T \mathbf{N} dS \quad (15)$$

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{W}^T \dot{Q} dV + \int_{S_q} \mathbf{W}^T q dS - \int_{S_h} \mathbf{W}^T h T_o dS \quad (16)$$

## 2.2 경계조건 고찰

### 2.2.1 칩의 형상 및 속도경계조건

Fig. 1 은 절삭모델에 사용된 칩형상, 속도, 온도경계조건을 나타낸다. 절삭속도  $v$  는 절삭되는 부위에서 멀리 떨어진 곳에서 속도경계조건으로 작용하며, 공구와 접촉되는 D-E 에서는 공구면의

수직방향으로 속도성분이 구속된다.

A-B, C-D, E-F 는 자유표면이며 이중 A-B 와 C-D 는 칩의 형상, E-F 는 가공면을 나타낸다. 정상상태에서의 칩의 형상을 미리 알 수 없으므로 그림에서와 같이 공구상면을 따라 놓여있다고 가정한 후, 각 절점에서의 속도값을 계산하고, 자유표면의 수직방향으로는 속도성분이 0 이 되어야 한다는 조건을 적용하여 칩의 형상을 구할 수 있다. 칩-공구 접촉면인 D-E 역시 미리 알 수 없으나, 계산도중 접촉면에서 모든 절점은 압축력을 가져야 된다는 조건으로 정상상태에서의 D-E 지점을 계산할 수 있으며, 자유표면계산과 동시에 이루어진다.

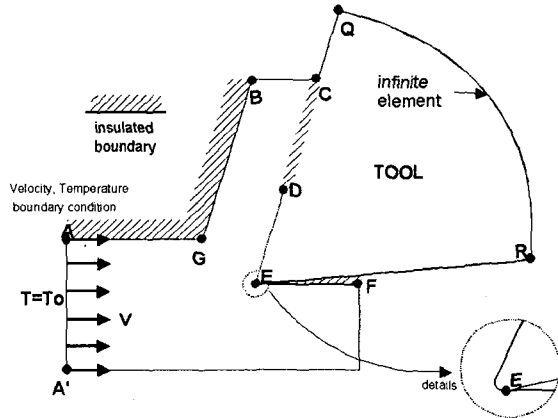


Fig. 1 Geometry and boundary conditions

### 2.2.2 온도경계조건

절삭유를 사용하지 않는 경우 대기로의 열이동은 무시할 만큼 적기 때문에 대기에 노출되어 있는 칩, 피삭재 및 공구의 표면은 절연되었다고 가정한다. 절삭가공중에 발생하는 열은 피삭재의 소성변형에너지 및 칩-공구 접촉면에서의 마찰열 두가지이므로 공구끝단에서 멀리 떨어져 있는 칩의 끝부분에서는 온도구배가 매우 작을 것이라 예상되므로 표면의 수직방향으로 단열조건이 적용된다. 피삭재의 오른쪽 끝부분과 아래 부분도 같은 조건이 적용될 수 있다. 피삭재의 왼쪽 끝부분(절삭속도  $v$  가 적용된 부분)은 소성변형 영역에서 비교적 멀리 떨어져 있으므로 피삭재의 초기온도를 유지한다고 가정한다. 공구의 경계면(Q-R)에는 무한요소를 사용하여 효율적으로 공구내의 온도분포를 계산할 수 있다.

### 2.2.3 마찰력 계산

공구상면에서의 전형적인 응력분포는 Fig. 2 와 같다. 수직응력은 공구끝단으로 가면서 지속적으로 증가하고, 전단응력은 증가하다가 일정한 값을 보인다. 따라서 공구상면을 미끄럼영역과 고착영역으로 나눌 수 있다. 미끄럼 영역에서는 수직응력이 비교적 작아 건마찰이 발생하며, 고착영역에서는 수직응력이 매우 높으므로 걸보기 접촉면과 실제 접촉면이 같아져 마찰력은 일정한 값을 나타낸다.

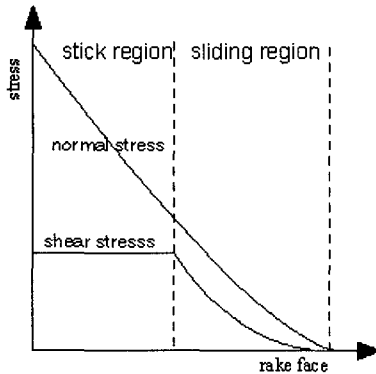


Fig. 2 A typical stress distribution on the rake face

이러한 관찰을 바탕으로 공구상면의 미끄럼영역에서는 쿨롱의 마찰법칙을 적용하고, 고착영역에서는 재료의 전단응력을 마찰응력으로 사용하였다.

$$\tau_f = \mu\sigma_n \quad \text{when } \tau_f < k \quad (17)$$

$$\tau_f = k \quad \text{when } \tau_f \geq k \quad (18)$$

### 2.3 해석과정 소개

본 모델에서는 피삭재의 변형률, 변형률속도 및 온도에 따른 유동응력의 변화를 모두 고려해야 하므로 심한 비선형 문제가 되며, 반복해법에 의해 해를 구하게 된다. 따라서 초기에 여러가지 값들을 먼저 가정하고 계산 값과 가정된 값을 비교함으로써 해를 구하게 된다.

먼저 칩과 피삭재 내 각 절점에서의 속도 및 각 요소의 변형률속도를 계산하는데, 칩의 형상을 미리 알지 못하므로 형상을 가정한다. 속도계산에 있어서 온도와 변형률의 값을 필요로 하므로 칩,

피삭재 및 공구의 초기 온도와 칩, 피삭재 내 각 요소에서의 변형률을 가정한다. 이렇게 가정된 칩형상, 온도, 변형률에 의해 각 절점속도와 각 요소의 변형률속도 및 응력이 계산되면, 이를 바탕으로 칩, 피삭재 및 공구의 온도분포를 계산한다. 각 요소에서의 상당응력과 상당변형률속도의 곱이 열원으로 작용하며, 칩-공구 접촉면에서는 마찰열이 발생하고 또한 이 접촉면은 공구로의 열전달 경로가 된다. 계산된 절점온도는 이전에 가정 혹은 계산된 온도와 비교되고 온도 Norm 이 허용치를 만족하면 다음 계산 단계인 칩형상 결정단계로 넘어간다. 만약 허용치를 초과하면 계산된 온도를 바탕으로 다시 절점속도를 계산하는 과정으로 되돌아간다. 자유표면에서 속도의 수직성분이 없어야 한다는 조건과 칩-공구 접촉면에서는 모두 압축력을 가져야 한다는 조건으로 칩의 형상이 계산된다. 마찬가지로 이전에 가정 또는 계산된 값들과 비교하여 허용치를 초과하면 새로운 칩형상에 대해 속도계산을 다시하게 된다. 속도, 온도 및 칩형상 결정과정을 모두 동시에 만족하면 최종적으로 각 요소의 상당변형률을 계산한다. 피삭재와 칩의 유동선과 상당변형률은 선형보간법에 의해 구한다. 변형률 역시 계산값과 이전에 가정된 값과의 비교를 통해 반복계산하는데, 허용치를 벗어나는 경우 처음의 속도 계산과정으로 돌아가게 된다. 온도 및 변형률의 변화는 미미하므로 보통 3~4 회의 반복계산으로 해는 수렴하게 된다. Fig. 3 은 이상의 내용을 나타내는 해석 프로그램의 흐름도이다.

## 3. 임계절삭깊이 고찰

### 3.1 임계절삭깊이의 계산

공구끝단을 고려하는 경우 공구에 작용하는 절삭저항은, Fig. 4 에 나타낸 바와 같이 공구 상면에 작용하는 힘 A 와 공구끝단에 작용하는 힘 B 의 합력으로 볼 수 있다. 힘 B 를 일반적으로 경작력(Ploughing force)이라 부르며, 칩의 형성에는 관여하지 않고 가공면의 생성에 중요한 역할을 한다.

경작력의 발생은 공구끝단의 정체점에 의해 설명될 수 있다. 절삭속도에 의해 피삭재가 고정된 공구를 향해 흘러간다고 가정할 때, 공구끝단의 정체점을 기준으로 정체점 위로 흘러가서 칩을 형성하기도 하고, 정체점 아래로 흘러가서 가공면

을 형성하기도 한다. 일반적으로 공구의 맨 아래에서 정체점까지의 높이를 임계절삭깊이라 부른다.

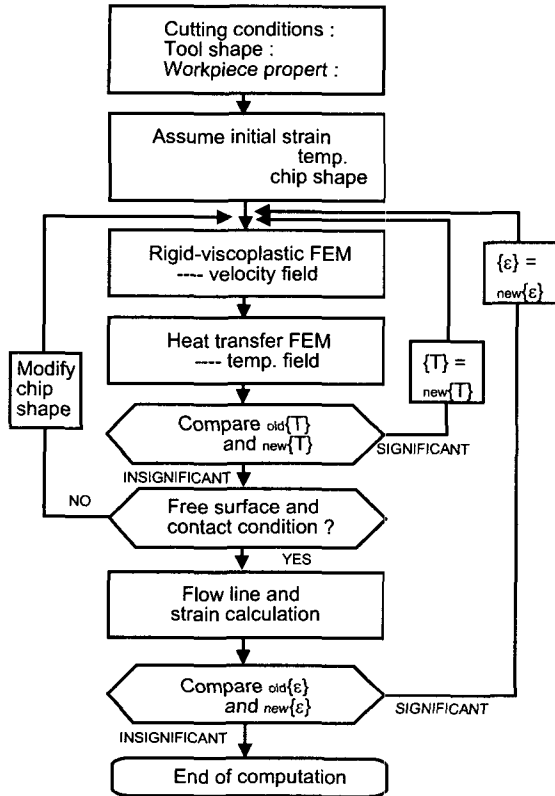


Fig. 3 Flow chart of FE analysis program for machining

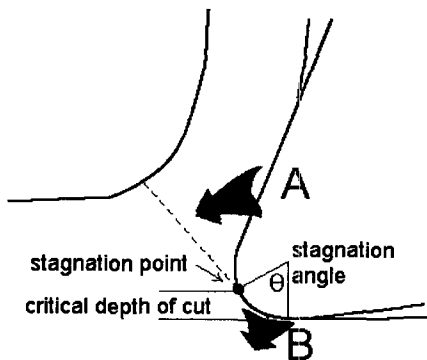


Fig. 4 Critical depth of cut

열-점소성 절삭모델의 경우 해석의 결과 절점 속도가 구해지므로 공구끝단에서의 정체점 즉 속

도가 0 이 되는 점을 구할 수 있다. 또한 절점속도와 상당변형률속도 값으로부터 피삭재와 칩 영역 내에서의 유동선을 구할 수 있다. 해석의 예로써 일반적인 절삭가공과 초정밀 가공에 대해 살펴볼 것이다. 각각의 절삭에 대한 자세한 내용을 Table 1에 나타내었다. Fig. 5(a)는 Case 1 해석을 위한 초기 칩의 형상과 유한요소메쉬이다. Fig. 5 (b)는 해석결과 얻어지는 피삭재와 칩 내의 속도벡터를 나타낸다. 계산결과 공구끝단에서 정체점의 높이는 0.293 mm 이다. 즉, 임계절삭깊이는 0.293 mm 이다. Table 2 는 임계절삭깊이에 대한 이전의 연구들<sup>(6,7)</sup>과 본 절삭모델에서 구한 값을 비교한 것이다. Basuray 등의 연구에서는 정체각이 37.6° 이며, Yuan 등은 배분력이 주분력의 0.9 배, 마찰계수가 0.12~0.26 의 값을 가진다고 가정하여 임계절삭깊이는 공구끝단반경의 0.322~0.249 배 사이 있다고 하였다. 본 모델에 의해 계산되는 정체점의 높이, 즉 임계절삭깊이는 Yuan 등이 제시한 값의 범위와 매우 유사하며 Basuray 등의 연구와도 큰 차이를 보이지 않는다. Fig. 5(c)는 Case 1 해석결과 구해진 피삭재 내의 유동선을 보여준다. 공구끝단 부분에서 정체점을 중심으로 칩이 형성되는 부분과 가공면으로 흘러가는 부분이 존재함을 알 수 있다.

Table 1 Cutting simulation conditions

		Case 1	Case 2
Cutting conditions	Depth of cut	0.2 mm	0.2 $\mu\text{m}$
	Cutting speed	2.16 m/s	0.1 mm/s
Tool shape	Rake angle	12°	0°
	Edge radius	0.1 mm	0.2 $\mu\text{m}$
Materials	Tool	Cemented carbide	Diamond
	Workpiece	0.2% Carbon steel	OHFC copper

Table 2 Critical depths of cut

	FEM	Basuray et.	Yuan et.
Case 1	0.0293 mm	0.0198 mm	0.0249 ~ 0.0322 mm
Case 2	0.0688 $\mu\text{m}$	0.0415 $\mu\text{m}$	0.0438 ~ 0.0644 $\mu\text{m}$

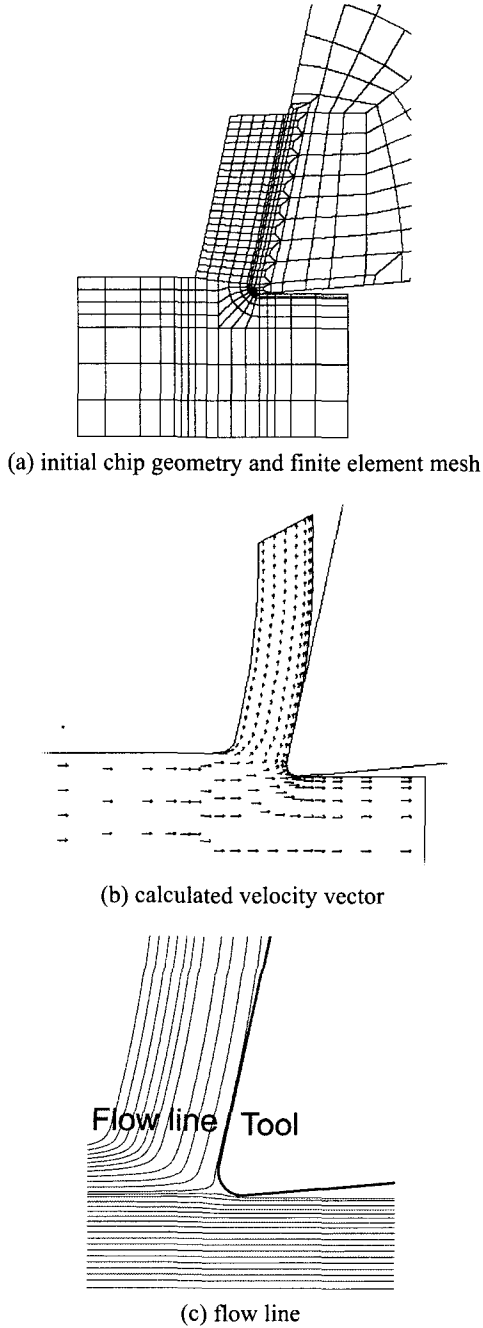


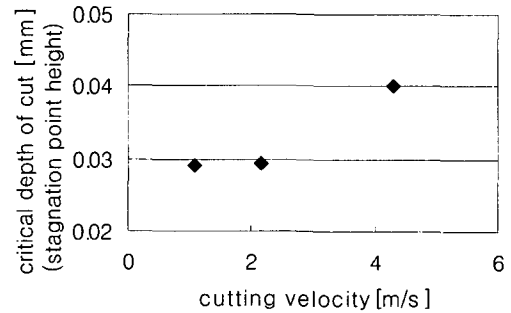
Fig. 5 Simulation example for case 1

### 3.2 절삭속도의 영향

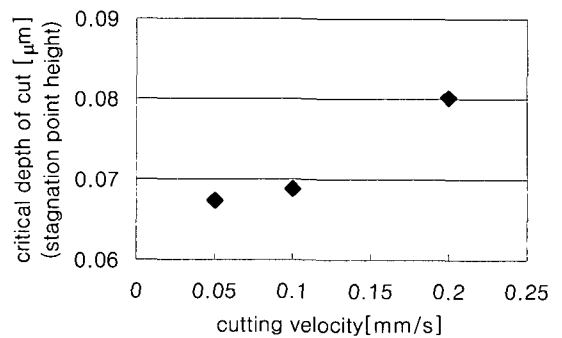
절삭속도의 변화에 따른 임계절삭깊이의 변화를 살펴보겠다. 이전의 연구들<sup>(6,7)</sup>에서는 단순히 임

계절삭깊이를 공구끝단반경만의 함수라 가정하였으나, 열-점소성 절삭모델에서는 절삭속도의 변화를 고려한 해석이 가능하므로 이에 대한 고찰을 수행하였다.

해석은 Table 1 의 Case 1, Case2 에 대해 각각 절삭속도를 1/2 배, 2 배로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 6 의 (a), (b)는 각각 Case 1, Case 2 의 절삭속도 변화에 따른 임계절삭깊이의 변화이다. 두 경우 모두 절삭속도가 증가함에 따라 임계절삭깊이가 증가하였다. 절삭속도의 증가는 절삭온도의 상승을 가져오고 이는 재료의 강성저하를 초래하므로 공구끝단 앞에서의 피삭재 변형이 증가하게 된다. Fig. 7 의 (a), (b)는 각각 Case 1 의 절삭속도 2.16 m/s, 4.32 m/s 인 경우 공구끝단 부근에서의 온도분포를 나타낸다. 공구끝단 앞에서의 온도분포는 절삭속도가 4.32 m/s 인 경우가 2.16 m/s 보다 약 100°C 이상 상승함을 알 수 있다.

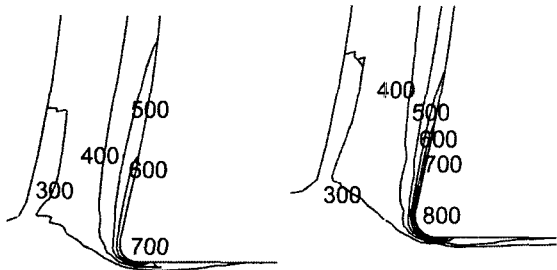


(a) case 1



(b) case 2

Fig. 6 Depths of cut for cutting speed variation



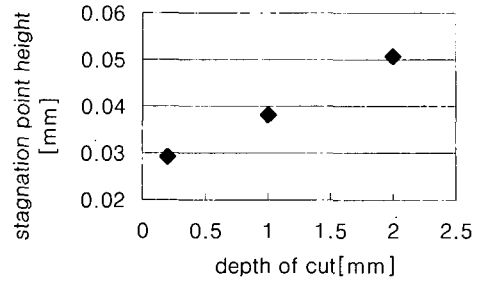
(a) 2.16 m/s cutting speed (b) 4.32 m/s cutting speed

Fig. 7 Temperature distributions for case1 [unit: °C]

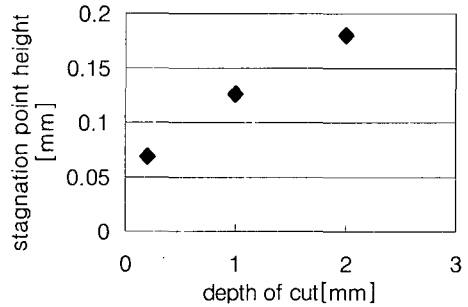
### 3.3 절삭깊이 변화에 따른 정체점의 이동

일반적으로 임계절삭깊이는 공구끝단의 정체점의 높이로 정한다. 그러나 정체점의 위치는 절삭조건에 따라 달라질 수 있으며, 앞절에서 고찰한 절삭속도와 더불어 여기서는 절삭깊이의 변화에 따른 정체점의 이동을 살펴보겠다.

해석은 Table 1의 Case 1, Case 2에 대해 각각 절삭깊이를 5배, 10배 증가시켰다. Fig. 8(a), (b)는 각각 Case 1, Case 2의 절삭깊이 변화에 따른 정체점의 높이의 변화이다. 두 경우 모두 절삭깊이가 증가하면 정체점의 높이가 증가하여 절삭깊이가 공구끝단반경의 10배인 경우 정체점의 높이는 공구끝단반경의 1/2 ~ 1배의 값을 보이고 있다. 따라서 절삭깊이가 공구끝단반경에 비해 상대적으로 큰 경우 정체점의 위치는 임계절삭깊이와 큰 차이를 보이고 있다. 이와 관련하여 Oxley<sup>(13)</sup>의 연구내용을 살펴보자. 그는 일반적인 절삭가공에 대해 Cine film 방법을 이용하여 Fig. 9과 같은 피삭재 내의 유동특성을 구했는데, 정체점의 높이가 거의 공구끝단반경의 크기와 비슷함을 알 수 있다. 이러한 현상은 절삭깊이가 증가함에 따라 절삭저항, 전단면을 중심으로 하는 소성변형 및 칩-공구 접촉면 등의 증가로 인하여 피삭재의 온도가 상승하게 되고 결국 앞절에서의 속도증가와 같은 결과를 초래하여 정체점이 이동하게 되는 것이다. Fig. 10의 (a), (b)는 각각 Case 2의 절삭깊이 1 μm, 2 μm인 경우에 대한 온도분포를 나타내는데 절삭깊이의 증가에 따라 온도가 상승함을 알 수 있다.



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 8 Stagnation points for depths of cut variation

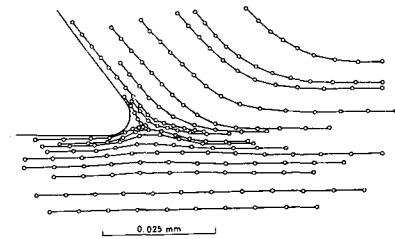
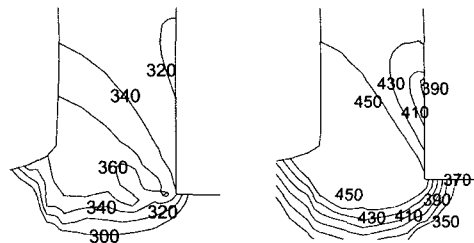


Fig. 9 Experimental flow field around cutting edge by Oxley<sup>(13)</sup>



(a) 0.2 μm depth of cut (b) 2 μm depth of cut

Fig. 10 Temperature distributions for case2 [unit: °C]

#### 4. 결론

초정밀 절삭시의 임계절삭깊이에 대하여 유한 요소해석을 수행하였다. 본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. 열-접소성 절삭모델을 사용하여 공구끝단에서의 정체점 및 임계절삭깊이를 정량적으로 구할 수 있었다. 일반적인 절삭과 미소절삭 두가지 경우에 대해 얻어진 임계절삭깊이는 이전의 연구들과 잘 일치하는 결과를 보였다.

2. 절삭속도가 증가함에 따라 임계절삭깊이는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 절삭속도의 증가에 따라 피삭재의 온도가 상승하게 되고 이에 따른 피삭재의 강성저하 및 변형증가의 결과라 사료된다.

3. 절삭깊이의 변화에 따라 정체점의 위치가 변화하였다. 같은 끝단반경을 가지더라도 절삭깊이가 증가하면 공구끝단 앞의 온도 및 변형영역이 증가하게 되고, 이에 따라 공구끝단의 정체점은 상승하게 된다.

#### 후 기

이 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2000-003-E00091).

#### 참고문헌

1. Nakayama, K., and Tamura, K., "Size Effect in Metal-Cutting Force," J. Eng. Ind., Trans. ASME, pp. 119-126, 1968.
2. Moriwaki, T., and Okuda, K., "Machinability of Copper in Ultra Precision Micro Diamond Cutting," Annals of the CIRP, Vol. 38, pp. 115-118, 1989.
3. Furukawa, Y., and Moronuki, N., "Effect of Material Properties on Ultra Precision Cutting Processes," Annals of the CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 113-116, 1988.
4. Lucca, D.A., Rhorer, R.L. and Komanduri, R., "Energy Dissipation in the Ultraprecision Machining of Copper," Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 69-72, 1991.
5. Lucca, D.A., and Seo, Y.W., "Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining," Annals of the CIRP, Vol. 42, pp. 83-86, 1993.
6. Basuray, P.K., Misra, B. K. and Lal, G. K., "Transition from Ploughing to Cutting During Machining with Blunt Tools," Wear, Vol. 43, pp. 341-349, 1977.
7. Yuan, Z.J., Zhou, M. and Dong, S., "Effect of Diamond Tool Sharpness on Minimum Cutting Thickness and Cutting Surface Integrity in Ultraprecision Machining," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 62, pp. 327-330, 1996.
8. Iwata, K., Osakada, K., and Terasaka, Y., "Process Modeling of Orthogonal Cutting by the Rigid-Plastic Finite Element Method," ASME J. Eng. Matl. and Tech., Vol. 106, pp. 132-138, 1984.
9. Moriwaki, T., Sugimura, N. and Luan, S., "Combined Stress, Material Flow and Heat Analysis of Orthogonal Micromachining of Copper," Annals C.I.R.P., Vol. 42, pp. 75-78, 1993.
10. Kim, K.W., and Sin, H.-C., "Development of a thermo-viscoplastic cutting model using finite element method," Int. J. Mach. Tools Manufact. Vol. 36, pp. 379-397, 1996.
11. Kim, K.W., Lee, W.Y., and Sin, H.-C., "A Finite Element Analysis of Machining with the Tool Edge Considered," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 86, No. 1-3, pp. 45-55, 1999.
12. Kim, K.W., Lee, W.Y., and Sin, H.-C., "A Finite Element Analysis for the Characteristics of Temperature and Stress in Micro-Machining considering the Size Effects," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, No. 9, pp. 1507-1524, 1999.
13. Oxley, P.L.B., Mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability, Ellis Horwood, Chichester, 1989.