

## CHIP生成 및 切削熱 發生機構 解析을 위한 有限要素法 適用에 관한 研究

황 준,\* 남궁 석\*\*

### A Study on the Applications of Finite Element Techniques to Chip Formation and Cutting Heat Generation Mechanism of Cutting Process

Joon Hwang,\* Suk Namgung\*\*

#### ABSTRACT

The object of this study is to achieve a greater understanding of material removal process and its mechanism. In this study, some applications of finite element techniques are applied to analyze the chip formation and cutting heat generation mechanism of metal cutting. To know the effect of cutting parameters, simulations employed some independent cutting variables change, such as constitutive deformation laws of workpiece and tool material, frictional coefficients and tool-chip contact interfaces, cutting speed, tool rake angles, depth of cut and this simulations also include large elastic-plastic deformation, adiabatic thermal analysis.

Under a usual plane strain assumption, quasi-static, thermal-mechanical coupling analysis generate detailed informations about chip formation process and cutting heat generation mechanism. Some cutting parameters are affected to cutting force, plastic deformation of chip, shear plane angle, chip thickness and tool-chip contact length and reaction force on tool, cutting temperature and thermal behavior.

Several aspects of the metal cutting process predicted by the finite element analysis provide information about tool shape design and optimal cutting conditions.

**Key words** : Finite Element Method(유한요소법), Mechanism of Metal Cutting(절삭기구), Chip Formation(칩 생성), Tool-Chip Contact Interface(공구-칩 접촉기구), Cutting Temperature(절삭온도)

\* 한국타이어 중앙연구소

\*\* 충남대학교 기계공학과

## 1. 序 論

최근, 각종 첨단산업의 발전과 함께 초정밀 부품 제작이 필수선결조건으로 부상하고 있으며, 이에 대한 해결방안중의 하나로 超精密加工(ultra precision metal cutting)이 주요 超精密 加工技術로 크게 대두되고 있다. 또한, 공작기계 주축의 고속회전이 가능해지면서 수천 m/min에서 수만 m/min의 초고속가공을 통한 가공정도 향상 및 가공시간 단축등의 초고속절삭등이 점점 보편화 되고 있다. 이와같이 절삭가공이라는 동일 개념의 가공패턴이지만, 세부적인 가공방법론의 출현에 따라 새로운 切削機構(cutting mechanism)의 확립이 중요한 시기라 판단된다.

그런데, 절삭가공은 이와같이 폭넓은 응용 및 그 가능성에도 불구하고 절삭공정은 높은 소성변형률과 공구 및 공작물 물성에 따른 비가역 소성변형에 의한 열발생, 공구와 Chip간의 접촉 및 마찰현상등, 복잡한 제반현상들과 제어인자들과의 비상관성 때문에 기본 메카니즘이 정확하게 알려지지 않은 것이 현 실정이다.

切削機構를 밝히기 위한 노력들은 기하학적 해석론과 실험적인 연구들을 통해 과거 1940년대부터 본격적으로 시작되었다. 2차원 절삭모형을 이용한 절삭가공 해석에는 Merchant(1945), Oxley(1962)<sup>(1)</sup>등이 최대전단응력설을 이용해서 剪斷角을 예측하였으며, Lee, Shaffer(1951)<sup>(2)</sup> 등은 미끄럼선장 해석을 통해 강소성 모델로부터 剪斷面과 剪斷域을 계산하였다. 그런데, 이러한 이론들은 절삭현상 해석에 있어서 효율적인 방법론을 제공하였지만, Chip과 공구절삭면간의 마찰거동, 공작물 및 공구의 물성이 절삭기구에 미치는 영향등, 실제 절삭기구 해석에 필요한 각종 절삭인자들을 충분히 고려하지 못하였다.

최근, 컴퓨터 기술의 발달과 함께 구조해석분야의 해석방법론의 개발 및 보완에 힘입어 Klamecki(1973)<sup>(3)</sup>에 의해 유한요소법을 이용한 칩(chip)生成機構 해석에 관한 연구가 수행되었으며, Stevenson(1983)<sup>(4)</sup>등에 의해 단열조건하에서의 변형률과 온도분포를 해석하였으며, Strenkoski, Carroll(1985)<sup>(5)</sup>등에 의해 2차원 절삭의 정상상태에서의 Chip형상, 잔류응력-변형률에 대한 연구가 이루어졌다. 그런데, 그간의 연구들에서는 절삭기구를 단지 구조해석의 차원에서만 취급해 왔으며, 특히 切削加工에 관련된 인자 규명에는 조금 미흡한 점들도 없지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 有限要素法을 이용하여 切削機構를 모델링하고, 切削因子 변경에 따른 응력-변형률 해석을 수행함으로써, 절삭시의 칩生成機構 및 剪斷面生成 원리, 공구-칩간의 摩擦機構, 切削熱 發生機構등의 고찰을 통해 最適의 切削機構 有限 要素모델(cutting mechanism finite element model) 제시의 기초자료로 삼고자 한다.

특히, 본 연구에서는 切削機構의 적절한 구성방정식(constitutive deformation law), 공구-칩간의 마찰계수, 절삭속도, 공구경사각등을 주요 독립절삭인자로서 채택 하였으며, 이러한 절삭인자의 변경에 따른 Chip生成機構와 切削熱 發生機構의 해석 및 예측을 위해 thermal-mechanical coupling 문제로 切削機構를 해석코자 하였다.

## 2. 有限要素 모델링 및 物性모델의 선정

### 2.1 切削機構 모델링

공구가 칩을 생성시키며 공작물을 절삭해 나갈때 공구와 공작물사이에는 건식 혹은 습식마찰에 의한 摩擦機構가 존재하게 되는데, 전단면을 중심으로한 1차 변형역과 칩과 공구사이의 마찰부분을 중심으로한 2차 변형역이 발생하게 된다. 또한 공구의 이동에 의한 절삭진행시 절삭에 주어지는 일량중 대부분이 열로써 변환되어지며, 切削熱發生 機構는 다음의 3가지로 대별할 수 있다.<sup>(6)</sup>

- 1) 전단면에 있어서의 전단의 소성변형으로 인해 발생하는 열
- 2) 칩과 공구경사면의 마찰로 인해 발생하는 열
- 3) 공구에 의해서 공작물 모체에서 칩이 분리될 때 발생하는 열

이와같이 발생한 열의 일부는 공기중으로 방사되거나 혹은 공작액에 의해서 제거되는데 대부분은 칩, 공작물, 공구에 축적되어 그 온도를 상승시키며, 이러한 절삭온도는 초정밀가공 및 초고속가공시에 특히 제품의 품질에 직접적인 영향을 미치므로 신중히 고려되어야 할 인자중의 하나라 할 수 있다.

본 연구에서 채택한 절삭가공시 발생하는 칩생성 및 절삭온도 예측을 위해 절삭기구의 유한요소모델링을 실시하였으며, Fig. 1에 나타난 바와 같은 형상 및 경계조건을 채택하였다. 유한요소모델은 크게 공작물과 공구로 나누어 모델링하였으며, 주요 기하학적 인자들은

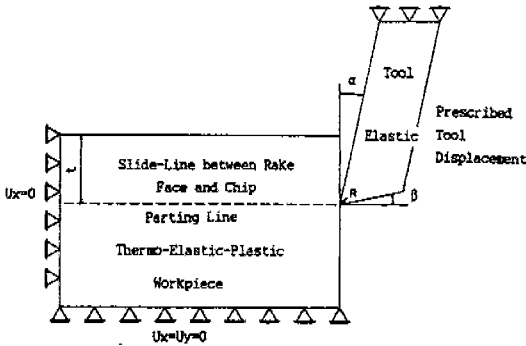


Fig. 1 Geometry and boundary conditions for metal cutting process simulation

절삭깊이, 공구상면경사각, 여유각, 공구날끝 반경과 공작물중 칩으로 생성될 부분사이에는 분리선(parting line)을, 공구 경사면과 칩 하단부사이에는 미끄럼 접촉(sliding contact) 조건을 부여하였다.

공구와 공작물의 유한요소는 대변형 탄소성 문제해석에 자주 사용되는 thermo-elastic-plastic 4절점요소를 선정하였으며, 통상적으로 절삭가공방법이 슬랩밀링이나 미소절삭등에서는 절삭깊이(t)에 대한 절삭폭(w)의 비율이 크기 때문에(w>5t), 平面變形率(plane-strain)문제로 가정하여 모델링하였다. 공작물 재질은 철과 알루미늄 합금을, 공구재질은 다이아몬드에 해당하는 물성을 대입하였으며, 공구경사각은 0°, 3°, 6°, 10°로 설정하였다. Table 1에 공작물 및 공구의 물성을 각각 나타내었다.

또한, 절삭이 진행됨에 따라 공작물의 소성변형에 의한 mechanical dissipation에 기인한 절삭열 발생현

상<sup>(3)</sup>이 있으며, 이는 절삭에 소요된 에너지의 대부분이 열로써 변환됨을 의미한다. 특히, 변형시에 온도의 영향을 받는 물성 또는 변형경화물성인 경우는 thermo-mechanical coupling 문제로 해석할 수 있다. 따라서, 공작물, 칩, 공구의 열경계면은 단열상태로 모델링하고, 공작물 및 칩의 소성변형에 의해 발행한 열은 전도 및 대류열전달에 의해 주변으로 확산되지 않는다는 가정하에서 해석을 수행하였다. 이와같이, inelastic straining에 의한 열발생 문제는 소성 변형이 단위체적당 heat flux를 증가시킨다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립된다.<sup>(5)</sup>

$$r^{pl} = \eta \sigma : \sigma \dot{\epsilon}^{pl} \quad (2.1)$$

여기서,

$r^{pl}$  : 열평형상태에 추가되는 flux that 량

$\eta$  : mechanical dissipation에 의해 발생하는 열발생에 의해 정의되는 인자

$\sigma$  : 응력

$\dot{\epsilon}^{pl}$  : 변형률 속도

## 2.2. 도구 - Chip 간의 摩擦接觸機構 모델링

두 개의 변형체 사이 (즉, 공구경사면과 칩)의 접촉면은 미끄럼선(slide line)으로 정의한 공구경사면의 표면을 칩이 침투하지 않는다는 기본 가정을 두고 있으며, 특히 절삭이 진행됨에 따라 공구인선의 위치와 공작물의 위치, 재료의 항복상태등을 칩생성 기준<sup>(6)(7)</sup>으로 하여 공작물과 칩사이의 multi-constraint를 조절함으로써 칩생성을 묘사하였다. 이와같이 공구-공작물을 각각 변형체로 모델링하여 절삭과정중 양자의 접촉영역에서의 마찰거동을 살피고자 공구의 경사면에는 master surface를, 공작물에는 slave surface를 설정하여 칩-공구경사면의 미끄럼접촉을 유도하였으며, 칩과 공구사이의 접촉을 검색하기 위한 인자로써 음의 압력  $P_0$ 와 간극한계  $C$ 를 선정하였다.<sup>(5)</sup>

절삭과정중의 마찰의 영향을 고찰하기 위해 공구와 칩사이의 접촉면상에 있어서 쿨롱 마찰법칙을 만족한다는 가정하에, 실험적으로 얻어진 마찰계수 $\mu^{(8)}$ 를 0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.2로 변경시켜 해석하였으며, 또한 각 절점에서의 수직 및 전단력 사이의 상관관계는 다음의 조건에 의하여 주어진다.

$$|S| < \mu |P| \quad (\text{고착조건}) \quad (2.2a)$$

Table 1 Material properties of workpiece used in analysis

Properties \ Item	Al16061-T6 (Workpiece)	DIAMOND (Tool)
Modulus of Elasticity (Gpa)	72.4	1141
Poisson Ratio ( $\nu$ )	0.334	0.07
Rupture Strength (MPa)	295	1350
Density (Kg/m <sup>3</sup> )	2672	3500
Specific Heat (J/Kg K)	896	950
Thermal Conductivity (W/m K)	204	500
Thermal Expansion (X 10 <sup>-6</sup> /°C)	84.2	3.0
Inelastic Heat Fraction	0.9	0.9

$$|S| = \mu|P| \text{ (미끄럼 조건)} \quad (2.2b)$$

여기서,  $\mu$ 는 쿨롱마찰계수, P는 절점에 걸리는 수직력, S는 절점에 걸리는 접선력이다. 또한, 수직력과 마찰계수의 곱에 의한 마찰한계(friction limit)보다 작은 nodal shear force의 전달을 위한 탄성계수(elastic parameter)로 "stiffness in stick parameter" K 를 채택하였다.

두 물체간의 접촉경계조건은 다음과 같은 식들로 나타낼 수 있다.

$$U_n - d \leq 0 \quad (2.3a)$$

$$S_n \leq 0 \quad \text{on } A_c \quad (2.3b)$$

$$S_n(U_n - d) = 0 \quad (2.3c)$$

여기서,

$U_n$  은 접촉표면에 대한 법선변위, d는 접촉간극,  $S_n$  은 법선방향의 접촉압력,  $A_c$ 는 접촉이 일어날 가능성이 있는 경계를 나타낸다.

### 2.3 工作物の 구성방정식

절삭공정중 공작물의 탄소성변형을 통한 칩生成機構를 효과적으로 시뮬레이션 해보기 위해서는 적절한 물성모델의 선정이 필요하다.<sup>(8)</sup> 본 연구에서는 물성모델의 효과를 고찰하기 위해서 Table 2와 같이 구성방정식과 물성인자를 설정, 적용하였다.<sup>(9)</sup>

점탄성 모델( elastic-viscoplastic model )의 경우, 응력이 정적항복응력  $\sigma_0$ 를 넘는 경우, 소성변형률 속도  $\dot{\epsilon}^{pl}$  는

$$\dot{\epsilon}^{pl} = D \left( \frac{\bar{\sigma}}{\sigma_0} - 1 \right)^p \quad (2.4)$$

여기서, D와 P는 변형률속도 민감도를 나타내는 재료상수이며,  $\bar{\sigma}$ 는 Von Mises 상당응력이며, 또한, D

Table 2 Constitutive deformation laws and material parameters

Material Model	Elastic Parameter		Plastic Parameter	
	E(Ga)	$\nu$	(Mpa)	n
1) Elastic-Perfectly Plastic	72.4	0.334	295.1	0.0
2) Elastic-Viscoplastic	72.4	0.334	295.1	0.0
			837.8	0.9925

와 P는 온도의 영향을 받는 상수이며, 본 연구에서는 Lipmann<sup>(10)</sup>등의 연구에서 얻은  $D = 6500 \text{ s}^{-1}$ ,  $p = 4$ 를 채택하였다.

### 3. 解析結果 및 考察

#### 3.1 CHIP 生成機構 및 切削熱 發生機構

본 연구에서는 Quasi-static 해석방법을 이용하여 공구-공작물간의 마찰특성 변화에 따른 切削機構의 응력-변형을 추이, 칩生成機構, 절삭에너지와의 상관성과 공작물 재질 및 절삭속도에 따른 切削熱 發生機構 및 切削溫度 分布를 중심으로 그 상관성을 고찰코자 하였다.

공작물-공구-칩으로 구성되는 切削機構의 유한요소해석에 가장 적절한 물성모델의 선정과 실험치와의 상관성을 검토하기 위해 먼저, 강소성모델( elastic-perfectly plastic)과 점탄소성 모델( elastic-viscoplastic)을 각각 예비해석<sup>(7)</sup>하고, Stevenson<sup>(8)</sup>등에 의해 실험적으로 얻어진 유효변형률값과 비교한 결과<sup>(7)</sup>, Fig. 2와 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 점탄소성 모델이 실제 칩생성 형상을 잘 묘사하는 것으로 판단되었으며, 공구경사면과 칩사이의 마찰계수가  $\mu = 0.0$ 인 경우의 유효변형률 및 Von Mises 상당응력의 분포를 각각 도시하였다.

전단면(shear plane)을 따라 형성되는 1차변형역(primary deformation zone)과 공구날끝 및 경사면

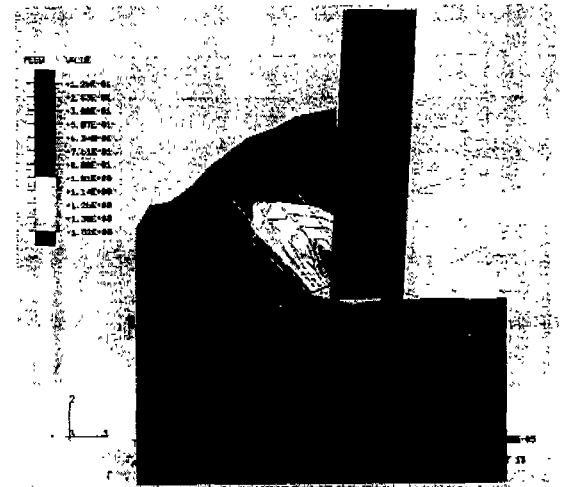


Fig. 2 Total effective plastic strain contours of orthogonal metal cutting which is obtained by finite element analysis (AL6061-T6,  $\mu=0.1$ ,  $V=8\text{m/s}$ ,  $t=0.2\text{mm}$ ,  $\alpha=3^\circ$ )

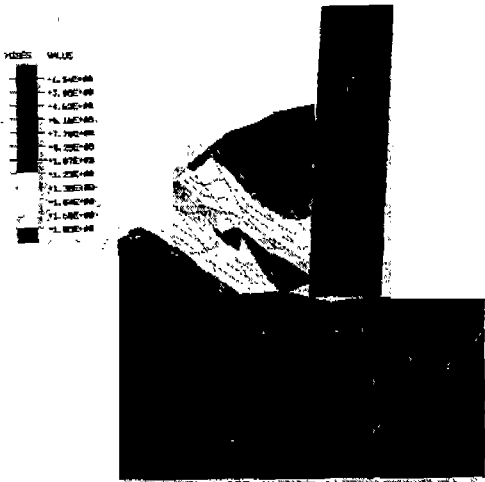


Fig. 3 Von Mises equivalent contours of orthogonal metal cutting which is obtained by finite element analysis (AL6061-T6,  $\mu=0.1$ ,  $V=8\text{m/s}$ ,  $t=0.2\text{mm}$ ,  $\alpha=3^\circ$ )

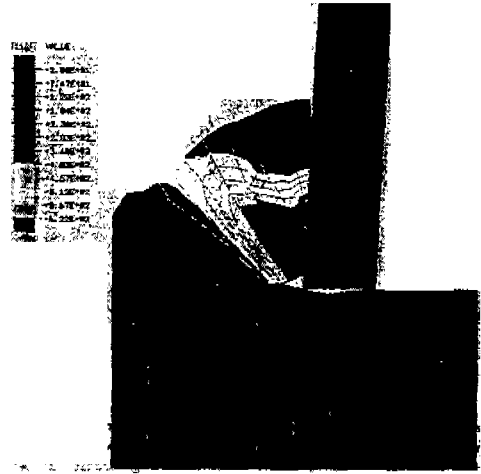


Fig. 4 Temperature contours of workpiece & chip of orthogonal metal cutting which is obtained by finite element analysis (AL6061-T6,  $\mu=0.1$ ,  $V=8\text{m/s}$ ,  $t=0.2\text{mm}$ ,  $\alpha=3^\circ$ )

을 따라 형성되는 2차변형역(secondary deformation zone)으로 대별되며, 특히 두 영역의 중첩영역인 공구 날끝에서 변형에너지가 가장 집중됨을 알 수 있다. 또한, 절삭이 진행됨에 따라 공작물의 절삭깊이에 해당하는 부분이 공구경사면과의 접촉조건을 만족하면서 칩이 생성되며, 칩은 전단면을 통과하면서 심한 변형을 일으키며, 재료의 항복응력을 넘어 칩이 생성되는 칩생성기구를 파악할 수 있다.

Fig. 4에는 이때의 切削溫度 분포를 도시하였다. 칩 생성시 전단면을 중심으로한 1차변형역의 소성변형과 공구경사면과 칩사이의 마찰접촉에 의한 압축응력 및 전단 응력의 증가로 인한 2차변형역의 소성변형 촉진은 切削熱의 발생과 切削機構 온도증가의 원인이 됨을 확인할 수 있다.

Fig. 5에는 절삭이 진행됨에 따라 공구날끝 위치와 공작물의 항복조건을 만족할 경우, 분리선을 따라 칩이 생성되는 과정을 공구진행량에 대하여 나타내었다. 이때, 칩생성 기준은 공구날끝의 절점좌표와 multi-constraint로 설정된 분리선상의 절점좌표간의 상대위치 및 이 절점을 포함한 요소의 Von Mises 상당응력 및 유효변형률값을 선정하였다.

### 3.2 切削因子 변경에 따른 比切削에너지와의 관계

앞의 결과들로 부터 판단할 수 있는바와 같이, 절삭

시에 소요되는 대부분의 에너지는 칩생성을 위해 1, 2차 소성변형에 소모되는 전단에너지와 공구-칩간의 마찰에너지임을 알 수 있다. Fig. 6에는 공구-칩간의 마찰계수에 따른 비절삭에너지의 관계를 도시 하였으며, 마찰계수의 증가로 인한 마찰접촉력의 증가는 공구경사면상의 자연스런 칩의 유동을 억제함으로써 칩에 작용하는 압축응력 및 전단응력의 증가와 함께 공작물 내부의 소성변형을 촉진하여 1, 2차변형역 형성에 필요한 전단에너지 증가를 가져온다. 반면에 Fig. 7에 나타낸 바와같이, 동일한 공구-칩간의 마찰계수하에서도 공구 상면경사각이 증가할수록 칩의 유동이 용이해지면서 칩 및 공작물 내부의 소성변형이 감소하여 1, 2차변형역 형성에 필요한 전단에너지(절삭에너지)를 감소시키는 효과가 있음도 확인할 수 있다.

### 3.3 切削因子에 따른 切削溫度 분포와의 관계

절삭가공중 공구경사면 및 여유면을 흐르는 칩 및 공작물과 유동/접촉현상에 기인하는 절삭열 발생은 불가피한 현상이며, 가공물과 공구로 전도되어 기계가공면의 표면성상(surface integrity)에 영향을 주어 피로강도(fatigue strength)의 저하, 치수불안정(dimensional instability), 미소균열(micro crack), 응력부식(stress corrosion cracking)등 기계부품의 물리적 특성에 여러가지 영향을 줄 수 있는 주요 인자중의 하

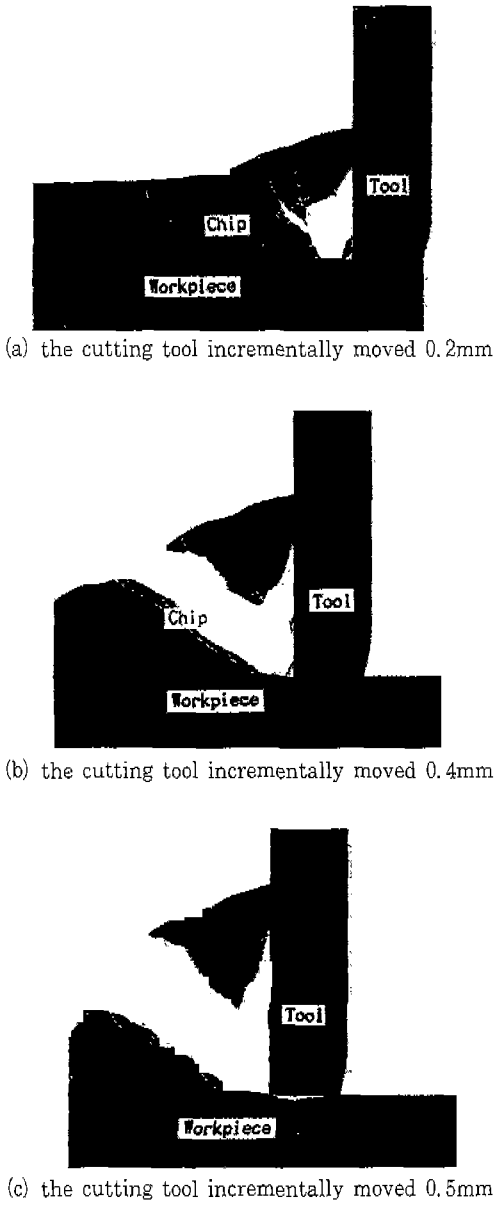


Fig. 5 Predicted chip formation shapes in the process of cutting

나이다. 절삭온도와 관련된 독립절삭인자는 공구 및 공작물 재질, 절삭속도, 경사각, 절삭유제등이 주요 관심 대상이 되고있다.<sup>(1)</sup>

본 연구에서는 공작물 및 칩의 열적경계는 모두 단열 상태이고, 공구로의 열전달은 없다고 가정하였으며, 일

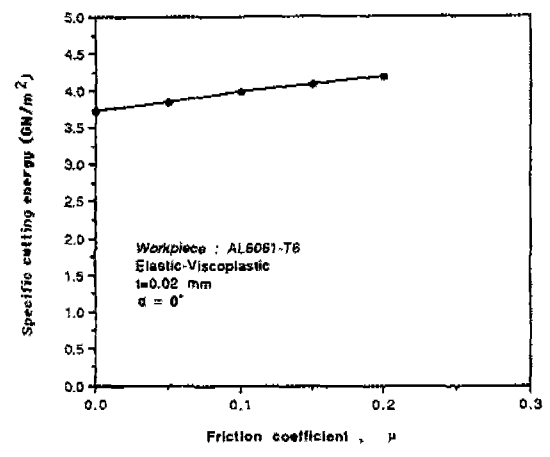


Fig. 6 Variation of specific cutting energy versus tool-chip interfacial friction coefficients (AL6061-T6,  $t=0.02\text{mm}$ ,  $\alpha=0^\circ$ )

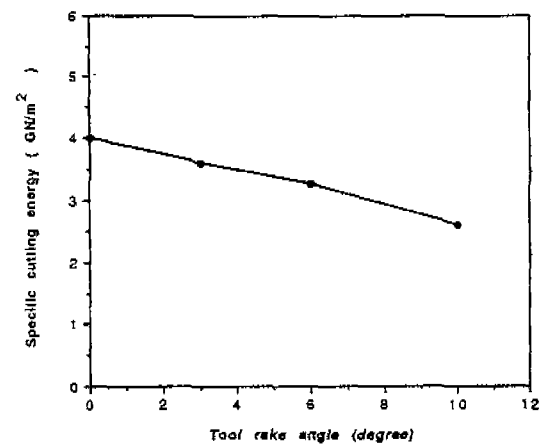


Fig. 7 Variation of specific cutting energy versus tool rake angles (AL6061-T6,  $\mu=0.0$ ,  $t=0.02\text{mm}$ )

반적으로 약 25%정도의 절삭열이 공구에 의해 전도, 방출되는것을 감안할 때,<sup>(1)</sup> 본 연구결과와 칩온도분포는 이에 해당하는 만큼 높게 나타날 것으로 판단된다.

Fig. 8과 Fig. 9에는 공구경사각의 변화에 따른 유효변형률과 Von Mises 상당응력의 분포를 공구날끝을 기점으로 한 상대적인 위치와의 관계로 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 공구-칩간의 마찰접촉에 의해 응력집중이 발생하는 2차변형역의 유효 변형률 및 Von Mises 상당응력이 각각 다른 부분에 비해 크게 나타나고 있으며, 또한, 공구상면경사각의 증가는

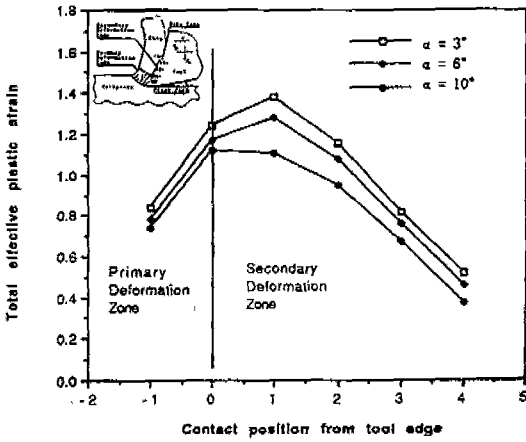


Fig. 8 Comparison of effective plastic strain of chip with respect to various tool rake angles (AL6061-T6,  $\mu=0.0$ ,  $V=8\text{m/s}$ ,  $t=0.2\text{mm}$ )

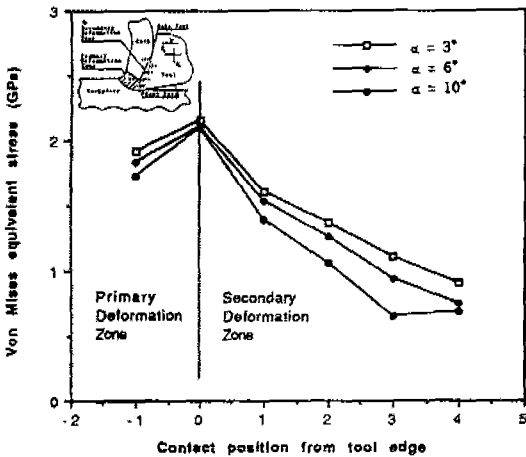


Fig. 9 Comparison of Von Mises equivalent stress with respect to various tool rake angles (AL6061-T6,  $\mu=0.0$ ,  $V=8\text{m/s}$ ,  $t=0.2\text{mm}$ )

칩의 유동을 원활하게 하므로 칩생성시에 필요한 탄소성 변형을 감소시킴으로써 응력집중이 감소함을 알 수 있다.

Fig. 10에는 공구경사각 변화에 따른 절삭온도 분포를 1, 2차변형역을 나누어 나타내었다. 앞의 Fig. 8와 비교해볼때, 절삭이 진행됨에 따라 칩생성시 전단면을 중심으로 1, 2차 소성변형에 사용된 절삭에너지는 切削熱로써 변화됨을 확인할 수 있으며, 특히 2차변형역의 절삭온도 분포는 절삭열의 대부분이 칩에 의해 방출됨

을 시사하고 있다.

Fig. 11는 절삭속도가 절삭온도 분포에 미치는 영향을 나타낸 예이다. 최근들어 가공물의 정밀도 및 가공능률 향상을 목적으로 절삭속도의 고속화를 꾀하고 있으나, 이에 수반되는 절삭온도 제어가 극복해야할 과제로서 부상하고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, 절삭속도의 상승은 공작물의 단위체적당 소성변형률의 증가로 인한 소성소산 에너지(plastic dissipation energy)를 증가시키며, 이는 곧바로 공작물-공구-칩등

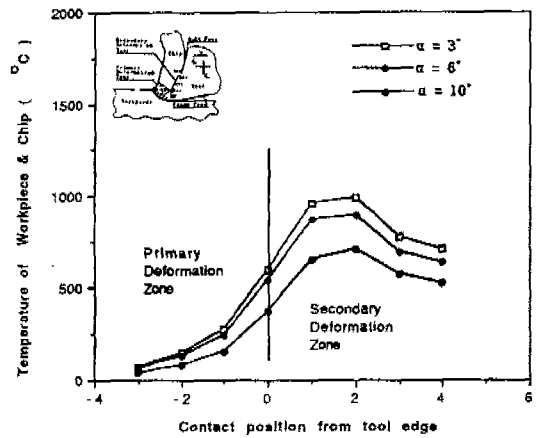


Fig. 10 Temperature distribution of workpiece & chip with respect to various tool rake angles (AL6061-T6,  $\mu=0.0$ ,  $V=8\text{m/s}$ ,  $t=0.2\text{mm}$ )

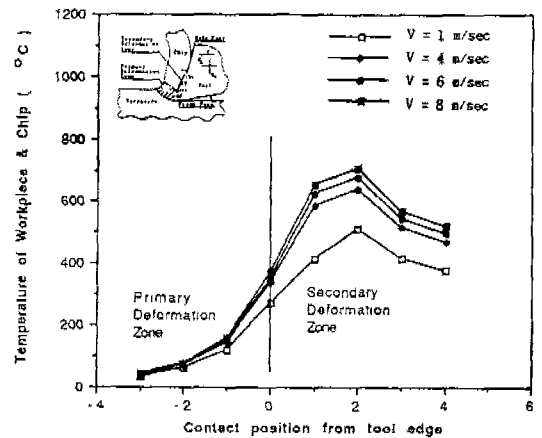


Fig. 11 Temperature distribution of workpiece & chip with respect to various cutting speed (AL6061-T6,  $\mu=0.0$ ,  $\alpha=10^\circ$ ,  $t=0.2\text{mm}$ )

의 切削溫度 상승요인이 된다.

#### 4. 結 論

본 논문은 금속절삭시의 Chip生成 및 切削熱 發生機構 해석을 위한 유한요소법 적용에 관한 연구로서, 적절한 해석을 위한 절삭기구 모델링 기법, 물성모델 및 경계조건 선정과 chip생성기준을 제시하였다. 또한, 가공물의 물성모델에 대한 비교와 공구-chip간의 마찰계수, 공구경사각, 절삭속도등의 절삭가공변수들을 중심으로 chip생성기구 및 절삭온도 분포등의 고찰을 통해 切削 메카니즘을 이해코자 하였다.

본 연구를 통해 얻어진 결론들은 다음과 같다.

1) Chip生成 및 切削熱 發生機構의 유한요소해석을 위해서는 적절한 切削機構 모델링과 chip생성 판단기준이 요구되며, 본 연구결과, 물성모델로서는 점탄소성물성이, 또한 chip생성 판단기준으로는 공구날끝과 가공부위 좌표간의 상대위치와 이 절점을 포함한 요소의 Von Mises 상당응력 및 유효변형률값의 선정이 중요함을 확인하였다.

2) 절삭이 진행됨에 따라 전단면은 chip유동 벡터가 바뀌는 1차변형역을 따라 생성되며, 공구경사면 및 Chip간의 마찰에 의해 chip두께가 증가하는 2차변형역 전면(前面)을 기점으로 중첩되면서 剪斷角을 이룬다.

3) 공구의 경사면을 따라 흐르는 chip유동을 공구-chip간의 미끄럼 접촉조건으로 모델링하였으며, 접촉역의 마찰계수의 증가에 따라 1,2차 변형역의 塑性變形 및 剪斷에너지 증가와 아울러 접촉응력, chip두께, 공구-chip 접촉길이를 증가시킨다.

4) 공구의 진행에 따라 공작물의 1,2차 소성변형을 통해 chip생성이 이루어지며, 이때 소요된 절삭에너지는 切削熱로써 변환되어 공작물과 chip을 통해 방출됨을 확인할 수 있다.

5) 절삭속도의 증가는 공작물의 단위체적당 소성변형률의 증가로 인한 소성소산에너지를 증가시키며, 이는 곧바로 공작물-공구-Chip으로 구성된 切削機構의 切削溫度 상승요인이 된다.

#### 참고문헌

1. Geoffrey Boothroyd, "Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools", McGraw-Hill, 1975.
2. B.E.Klamecki, "Incipient Chip Formation in Metal Cutting-A Three Dimension Finite Element Analysis", Ph.D Thesis, Univ. of Illinois at Urbana Champaign, 1973.
3. M.G.Stevenson, P.K.Wright and J.G. Chow, "Futher Deveolpments in Applying the Finite Element Method to the Calculation of Temperature Distributions in Machining and Comparisons with Experiment", ASME J. of Engr. for Ind., Vol.105, pp.149-154., 1983.
4. J.S.Strenkowsi and J.T. Carroll III, "A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting", J. of Engr. for Ind., Vol.107, pp.346-354, 1985.
5. Hibbit et al., "ABAQUS Theory Manuals", Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., 1989.
6. Erik Oberg, Franklin, D.J., Holbrook, L. Horton, "Machinery's Handbook", Industrial Press Inc., 1975.
7. 황 준, 남궁 석, "유한요소법을 이용한 미소절삭 기구의 절삭인자 규명에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제10권, 제4호, pp.206-215, 1993.
8. 황 준, 남궁 석, "금속절삭시 CHIP생성기구 및 절삭온도 예측을 위한 유한요소해석에 관한 연구", 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp.22-27, 1993.
9. K.J.Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.
10. J.P.Holman, "Heat Transfer", 5th ed., McGraw-Hill, New York, 1982.
11. O.C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method in Engineering Analysis", Prentice Hall, 1982.