

유한요소법을 이용한 미소절삭기구의 절삭인자 규명에 관한 연구

황 준*, 남궁 석**

A Study on the Effect of Cutting Parameters of Micro Metal Cutting Mechanism Using Finite Element Method

Joon Hwang*, Suk Namgung**

ABSTRACT

The finite element method is applied to analyze the mechanism of metal cutting, especially micro metal cutting. This paper introduces some effects, such as constitutive deformation laws of workpiece material, friction of tool-chip contact interfaces, tool rake angle and also simulate the cutting process, chip formation and geometry, tool-chip contact, reaction force of tool. Under the usual plane strain assumption, quasi-static analysis were performed with variation of tool-chip interface friction coefficients and tool rake angles. In this analysis, cutting speed, cutting depth set to 8m/sec, 0.02mm, respectively. Some cutting parameters are affected to cutting force, plastic deformation of chip, shear plane angle, chip thickness and tool-chip contact length and reaction forces on tool. 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 Micro Metal Cutting(미소절삭기구), Chip Formation(침 생성기구), Tool Rake Angle(공구경사각), Cutting Speed(절삭속도), Shear Plane(전단면)

1. 서 론

최근들어 전자, 항공, 자동차등 각종 첨단산업의 발전과 함께 신소재 및 난삭재의 개발 및 등장은 새로운 제품가공 방법론의 모색을 필요로하고 있으며, 마이크로미터(μm) 또는 나노미터(nm)의 제품정밀도를 요구하는 초정밀부품의 제작 및 개발, 초고속 가공기술의 개발과

그 응용등이 그 중요성을 더해가고 있다. 이러한 산업기술 요구에 따라 초정밀가공 기술의 확립은 그 무엇보다도 시급히 해결해야 할 과제로서 부상하고 있다.

가공기술확립을 목적으로 다양한 기간기술들이 개발되고 있으며, 초정밀절삭(Ultra Precision Metal Cutting) 또한 주요 초정밀가공 기술의 하나로서 관심을 모으고 있다. 그런데, 절삭공구에 의한 절삭가공은 오

* (주)한국타이어제조 중앙연구소(정희원)

** 충남대학교 기계공학과

늘날 가장 보편화된 기공기술중의 하나이지만, 신소재 및 새로운 가공영역의 출현은 절삭가공공정 및 그 Mechanism에 대한 재조명을 필요로 하고 있으며, 이는 절삭가공이 폭넓은 응용 및 그 가능성에도 불구하고 복잡한 제반현상과 제어인자들과의 비상관성 때문에 기본 Mechanism이 정확하게 알려지지 않기 때문에 풀이할 수 있다.

간단한 절삭모델을 이용한 절삭기구(Mechanism)에 대한 연구는 1940년대부터 시작되었는데, 2차원절삭모델을 이용한 절삭기구 해석에는 Merchant(1945), Oxley(1962)⁽¹⁾ 등이 최대전단응력설을 이용해서 전단각을 예측하였으며, Lee, Shaffer(1951)⁽¹⁾ 등은 미끄럼선장 해석을 통해 강소성 모델로 전단면과 전단역을 구하였다. 그러나 이러한 이론들은 절삭현상 해석에 효율적인 방법론을 제공하였지만, Chip과 공구사이의 마찰거동, 물성모델등 보다 세부적인 절삭기구 해석에 대한 충분한 설명이 되지 못하였다.

최근, 컴퓨터 기술의 발달에 따라 구조해석분야의 해석방법론의 개발 및 보완에 힘입어 Klamecki(1973)⁽²⁾에 의해 유한요소법을 이용한 Chip생성기구 해석에 관한 연구가 수행되었으며, Stevenson(1983)⁽³⁾ 등에 의해 2차원 절삭의 정상 상태에서의 Chip형상, 잔류응력-변형률에 대한 연구가 이루어졌다. 그런데, 그간의 연구들에서는 절삭기구를 단지 구조해석의 차원에서만 취급해 왔으며, 특히 절삭가공에 관련된 인자 규명에는 조금 미흡한 점들도 없지 않았다.

따라서, 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 미속절삭기구를 모델링하고, 절삭인자 규명을 중심으로 응력-변형률 해석을 실시함으로써 미소절삭시의 Chip생성기구 및 전단면 생성 원리, 공구와 Chip간의 마찰기구의 고찰을 통해 기본 Mechanism 이해와 적절한 절삭유한요소모델 제시의 기초자료로 삼고자 한다.

특히, 본 논문에서는 미소절삭기구의 적정한 Constitutive Deformation Law, 마찰계수, 공구경사각등 주요 절삭인자변경에 따른 미소절삭기구해석에 주안점을 두어 연구한 결과를 기술하였다.

2. 유한요소모델링

2.1 미소절삭기구 모델링

미소절삭기구해석에 사용된 형상과 경계조건은 Fig. 2.1에 나타낸 바와 같다. 유한요소모델은 크게 공

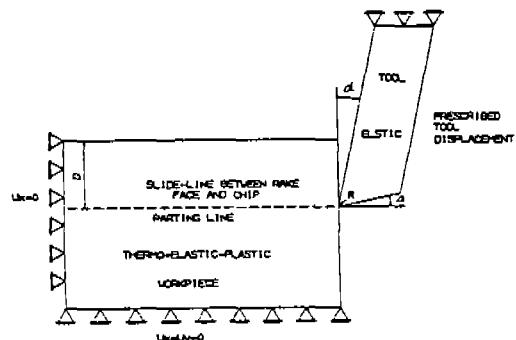


Fig. 2.1 Geometry and boundary conditions for micro metal cutting simulation

작물과 공구로 나누어 모델링하였으며, 주요 기하학적 인자로서는 절삭깊이, 경사각, 여유면각, 공구인선반경 등이 있으며, 공작물중 Chip으로 생성될 부분사이에는 Parting Line을, 공구 경사면과 Chip 하단부사이에는 미끄럼 마찰접촉(Sliding Contact) 조건을 부여하였다.

공구와 공작물의 유한요소는 대변형 탄소성 문제 해석에 자주 사용되는 Thermo-elastic-plastic, 4절점요소를 채택하였으며, 통상적으로 절삭가공방법이 slab밀링이나 초정밀선식등에서는 절삭깊이(D)에 대한 절삭폭(W)의 비율이 크기때문에 ($W \geq 5D$), 평면변형률(Plane-strain) 문제로 가정하여 모델링한 본 수치해석값이 실험 결과와 유사한 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 공작물 재질은 알루미늄합금을, 공구재질은 다이아몬드에 해당하는 물성을 대입하였으며, 기본 경사각(Rake Angle)은 0° 로 설정하였다.

절삭과정중의 마찰의 영향을 고찰하기 위해 마찰계수 μ 를 0.0, 0.05, 0.1, 0.15, 0.20로 변경시켰다. 또한 공구경사각이 미소절삭기구에 미치는 영향도도 함께 고찰코자 마찰계수 $\mu=0.0$, 절삭깊이 0.02mm, 절삭속도 $V=8\text{m/s}$, 공구경사각 α 를 $0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, 10^\circ$ 로 변경하여 해석을 수행하였다.

범용 유한요소 프로그램인 ABAQUS(Hibbit, Karlson and Sorensen, 1987)⁽⁵⁾과 Updated Lagrangian Formulation을 이용하여 미소절삭문제에 유한요소법을 적용하였으며, IBM RISC /6000 560 Series 상에서 해석을 수행하였다.

절삭현상은 공구와 공작물간의 마찰접촉현상과 함께 Chip 형성이라는 대변형 탄소성 변형거동 과정을 동반하므로, 강성행렬(Stiffness matrix)은 각 시간증분

(Time increment)에 따른 형상(Geometry)과 응력이력(Stress history)를 고려해야 한다. 유한요소 행렬식을 소개하면 다음과 같다.

$$K_i \Delta U_{i+1} = R + R_i^c \quad (2.1)$$

$$U_{i+1} = U_i + \Delta U_{i+1} \quad (2.2)$$

여기서,

K_i : Tangent stiffness matrix evaluated using the geometry at the i^{th} iteration

ΔU_{i+1} : Vector of unknown incremental displacement corrections

R : Vector of applied loads

R_i^c : Vector of load corrections

U_i, U_{i+1} : Displacement increment vectors at the $i+1$ and i iteration of a loading step

식 (2.1), (2.2)은 K_i , U_{i+1} , R_i^c 가 평형상태를 만족할 때까지 반복적으로 계산을 수행하며, 증분과정은 수렴에 근거한 증분치를 자동으로 적용한다.

본 해석에서는 해의 수렴을 만족하기 위해서 각 증분에서의 평형상태 해의 공차값(Tolerance)인 PTOL을 채택하였으며, 단위절삭폭당 작용힘의 10% 정도를 선정하였다. ⁽⁵⁾

2. 2 공구 - Chip간의 마찰접촉

두개의 변형체 사이(즉, 공구경사면과 chip)의 접촉면은 Slide Line으로 정의한 공구경사면의 표면을 Chip이 침투하지 않는다는 기본 가정을 두고 있다. 특히, 절삭이 진행됨에 따라 공구경사면을 흐르는 Chip유동을 시뮬레이션 하기 위해서는 공작물과 Chip으로 생성될 부분을 각각 초기에 Multi Constraint로써 경계접점과 요소를 루는 후, 공구의 진행 위치에 따라 Multi Constraint를 풀어줌으로써 Chip생성기구를 유도한다.

즉, 공구-공작물을 각각 변형체로 모델링하여 절삭과 정중 양자의 접촉영역에서의 마찰거동을 살피고자 본 연구에서는 공구-Chip간의 접촉면상에 특수요소를 사용하여 공구의 경사면에는 Master Surface를, 공작물에는 Slave Surface를 설정함으로써, Chip-공구경사면의 Sliding Contact을 유도하였으며, Chip과 공구사이의 접촉을 검색하기 위한 인자는 음의 압력 P_0 와 간극한계 C 를 정하였다. ⁽⁶⁾

이때, 공구/Chip간의 접촉영역에 Coulomb 마찰조건

이 성립할 경우, 각 절점에서의 수직 및 법선력 사이의 상관관계는 다음의 조건에 의하여 주어진다.

$$|S| < \mu |P| \text{ 고착조건, (2.3a)}$$

$$|S| = \mu |P| \text{ 미끄럼 조건(2.3b)}$$

여기서, μ 는 Coulomb 마찰계수, P 는 절점에 걸리는 수직력, S 는 절점에 걸리는 접선력이다.

또한 수직력과 마찰계수의 곱에 의한 마찰한계(Friction limit) 보다 작은 Nodal shear force의 전달을 위한 Elastic Parameter로 "stiffness in stick parameter" K 를 채택하였다.

2. 3 공작물의 CONSTITUTIVE DEFORMATION LAW

미소절삭중에 공작물의 소성변형을 효과적으로 실제현상과 유사하게 해석하기 위해서는 적절한 물성모델의 선정이 필요하다. 가공경화를 갖는 재료의 경우, 지수 n 인 n 승 경화형 소성재료의 수식표현은 다음과 같다.

$$\sigma = C \epsilon^n \quad (0 \leq n < 1) \quad (2.4)$$

여기서, C 는 소성계수, n 은 가공경화지수이며, 일반적으로 연장에서 $n=0.2 \sim 0.25$, 동에서 $n=0.3 \sim 0.35$, 알루미늄에서 $n=0.2 \sim 0.22$ 를 채택한다.

그런데, 응력-변형율 곡선은 온도와 변형을 속도의 영향을 받으며, 일반적으로 온도가 높아지면 변형응력은 저하되나 변형율속도의 영향이 뚜렷해져 속도가 증가할수록 변형저항은 높아지게 된다. 따라서 금속절삭과 같이 공구의 고속이동에 의해 공작물 및 Chip의 변형속도가 빠른 소성변형해석에서는 속도효과를 고려한 물성모델의 채택이 중요한 변수중의 하나가 될 수 있다.

속도효과를 고려한 변형저항의 간단한 수식표현은 다음과 같이 나낼 수 있다.

$$\sigma = K \epsilon^n \epsilon^{p1} \quad (0 \leq n < 1) \quad (2.5)$$

여기서, ϵ 은 변형율 속도(Plastic strain rate)이며, 지수 $p1$ 은 변형율속도 민감성지수(Strain sensitivity exponent)이다.

본 연구에서는 공작물의 물성모델을 크게 강소성(Elastic-Perfectly Plastic)과 점탄소성(Elastic-Viscoplastic)으로 나누어 적절한 물성모델에 대한 검토를 실시하였으며, 물성모델의 효과를 고찰하기 위해서 Table. 1과 같은 Constitutive Deformation Law와 물

Table 1. Constitutive Laws and Material Parameters

Meretial Model	Elastic Parameter E(Ga)	ν	Plastic Parameter σ (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

성인자를 설정하였다. (6)

Elastic-Viscoplastic mode의 경우, 응력이 Static yield stress σ^0 를 넘는 경우, ABAQUS에서는 변형율 속도 $\dot{\epsilon}^{pl}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\dot{\epsilon}^{pl} = D \left(\frac{\sigma}{\sigma^0} - 1 \right)^P \quad (2.6)$$

여기서, D와 P는 Strain rate sensitivity를 나타내는 재료상수이며, σ 는 Von Mises equivalent stress 이사. 또한 D와 P는 온도의 영향을 받는 상수이며, 본 연구에서는 Lippmann (1975) (5)등의 연구에서 얻은 $D=6500\text{s}^{-1}$, $P=4$ 를 채택하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 공작물의 물성모델에 따른 Chip 생성기구와의 관계

본 연구에서는 Quasi-Static 해석방법을 이용하여 공구 공작물간의 마찰특성 및 공구경사각 변화에 따른 미소절삭기구의 응력-변형률 추이, Chip 생성기구, 절삭 에너지와의 상관성 및 공구마열과의 상관성을 고찰하였다.

절삭기구의 정확한 유사해석을 위해서는 절절한 유한 요소모델의 선정이 필요하며, 특히 Constitutive Deformation Law에 대한 검증이 필요하다. 이때, 절삭과 관련된 해석인자는 공구경사각 $\alpha=0^\circ$, 공구-Chip 간의 마찰계수 $\mu=0.0$ 을 선정하였다.

Fig. 3.1 ~ Fig. 3.4는 공작물을 강소성 모델과 점탄소성 모델로 선정할 경우의 미소절삭기구 해석결과에 미치는 영향을 비교한 예들이다.

Fig. 3.1과 Fig. 3.2는 절삭 진행시 Chip의 소성변형량(Plastic Magnitude)을 나타낸 예로써 점탄소성 모델이 1, 2차 전단역의 형성을 더 확실하게 나타내고 있으며, 알루미늄 절삭시 발생하는 전단형 또는 뜰김형의

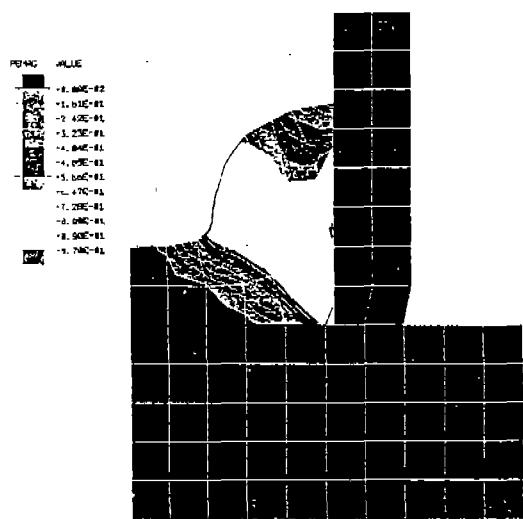


Fig. 3.1 Plastic magnitude of Elastic-Perfectly plastic cutting model

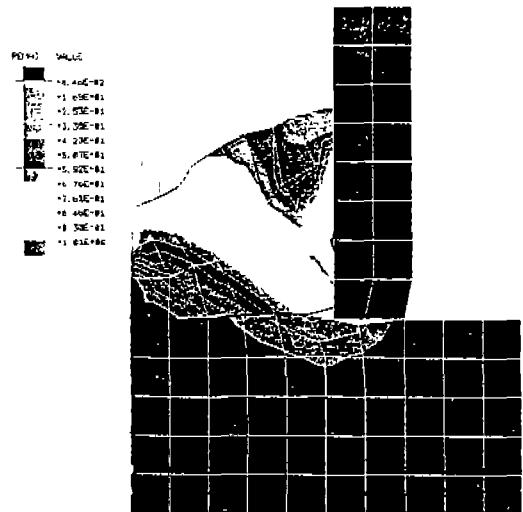


Fig. 3.2 Plastic magnitude of Elastic-Viscoplastic cutting model

Chip형상을 보여주고 있다.

Fig. 3.3과 Fig. 3.4의 결과를 비교해 보면, 변형경화(Strain Hardening) 및 변형률 민감도(Strain Rate Sensitivity)를 고려한 점탄소성 모델(Fig. 3.4)의 전단면(Shear Plane 또는 Shear Zone)에 Von Miss 상당응력이 집중되는 현상을 볼 수 있으며, 이는 절삭이

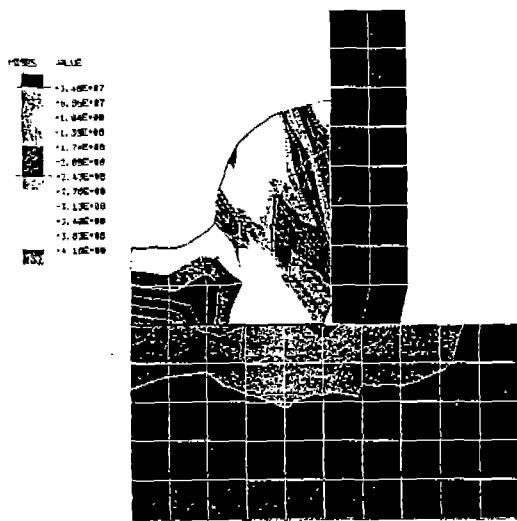


Fig. 3.3 Von Mises equivalent stress of Elastic-Perfectly plastic cutting model

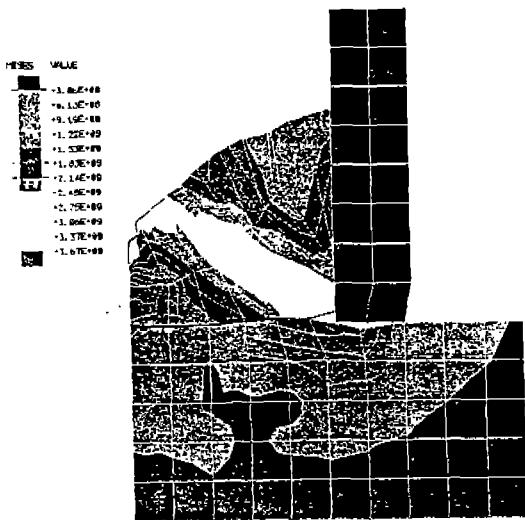


Fig. 3.4 Von Mises equivalent stress of Elastic-Viscoplastic cutting model

진행됨에 따라 전단면을 중심으로한 재료(공작물)의 핵복에 의해 Chip이 생성됨을 정확히 설명해 준다. 이상의 결과들로 부터 미소절삭기구 문제의 유한요소해석을 위한 절삭모델로써 점탄소성 모델을 추천한다.

또한, 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 절삭이 진행됨에 따라 공작물의 절삭 깊이에 해당하는 부분이 공구경

사면과의 접촉조건을 만족하면서 Chip으로 생성된다. 특히, Chip은 전단면을 통과하면서 심한 Distortion을 일으키며, 재료의 핵복응력을 넘어 소성변형이 이루어져 Chip이 생성됨을 파악할 수 있다.

또한 2.2절에서 기술한 바와 같이, 본 연구에서는 절삭깊이에 대한 절삭폭의 비율이 큰 절삭가공이라는 점에 확인하여 평면변형을 조건으로 절삭기구를 해석하였으며, 수치해석결과와 문현상의 실험결과를 Fig. 3.5와 Fig. 3.6를 통해 비교하였다.

Fig. 3.5은 $\mu = 0.0$, Elastic-Viscoplastic model의 유효변형률(effective plastic strain)을 나타내었다. 전

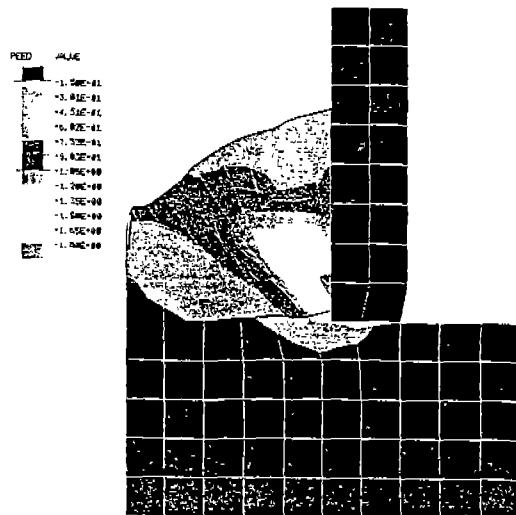


Fig. 3.5 Total effective plastic strain contours obtained simulation

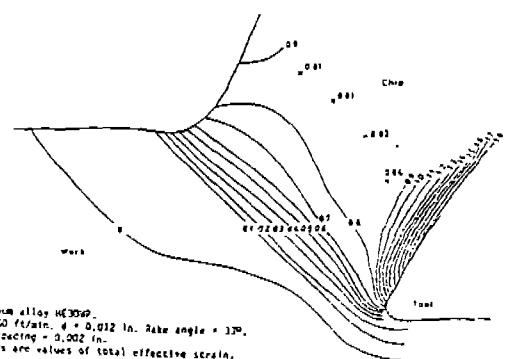


Fig. 3.6 Total effective strain contours obtained experimentally

단면(Shear plane)을 따라 1차변형역(Primary deformation zone)과 공구의 경사면을 따른 2차변형역(Secondary deformation zone)이 형성되며, 공구 선단에서 변형에너지가 가장 집중됨을 알 수 있다.

Fig. 3. 6는 Stevenson⁽³⁾ 등에 의해 실험적으로 얻어진 유효변형률값을 보여주고 있다. 비록 Fig. 3. 5와 공구의 경사각에는 차이가 있으나, 실험치와 본 연구의 해석치가 유사한 결과경향을 나타내고 있어, 본 연구에서 채택한 물성모델(Constitutive deformation law)이 미소절삭기구 해석에 유효함을 보여주고 있다.

3.2 공구-Chip간의 마찰접촉에 의한 Chip응력 분포

Fig. 3. 7, 3. 8에는 공구선단을 기준으로 Chip에 발생된 유효변형률과 Von Mises상당응력을 각각 도시하였다. 개략도에 표기된 번호와 같이, 도표의 가로축에서 “0”을 기점으로 양(+)의 번호는 공구경사면과 접촉하는 Chip의 2차변형역 유한요소(Element)의 상대적 위치를 나타내었으며, 음(-)의 번호는 전단면 Chip의 1차변형역역의 유한요소의 위치를 공구선단을 기점으로 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이, 공구-Chip사이의 마찰계수의 증가에 따라 1차변형역(전단면)과 2차변형역의 유효변형률과 Von Mises 상당응력이 증가되는 경향을 나타낸다. 특히, 공구경사면과의 마찰계수 영향을 더욱 직접적으로 받는 2차변형역의 유효변형률의 증가폭

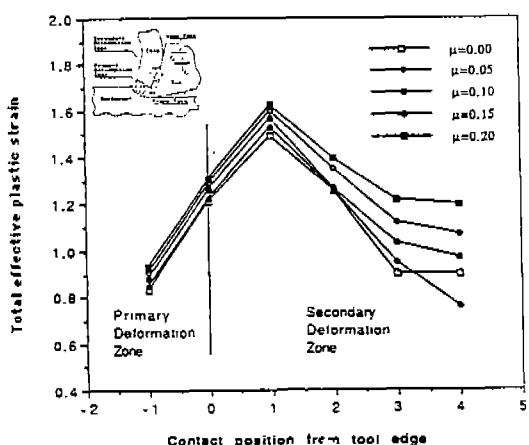


Fig. 3. 7 Comparison of effective plastic strain of chip with different tool-chip interfacial contact friction coefficient

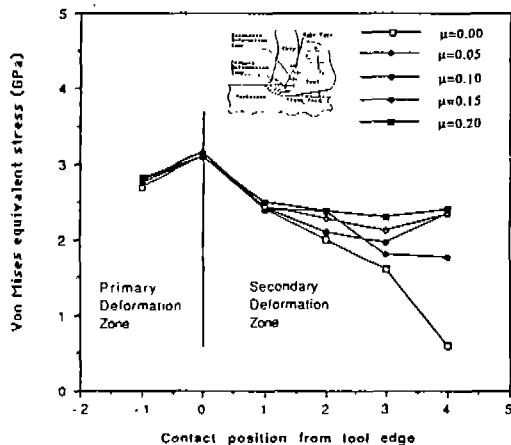


Fig. 3. 8 Comparison of von Mises equivalent stress of chip with different tool-chip interfacial contact friction coefficient

이 큰것은 공구/Chip의 접촉면에 발생하는 접선방향 접촉압력의 증가를 의미하며, 이는 공구경사면을 따른 자연스런 Chip유동의 억제에 기인함을 쉽게 유추할 수 있다.

또한 Ernst-Merchant⁽¹⁾, Lee-Shaffer⁽¹⁾등의 절삭이론에서는 전단면만이 소성상태인것으로 가정하였으나, 본 해석결과에서는 절삭이 진행됨에 따라 전단면은 공구 경사면과 Chip의 마찰에 의하여 Chip의 두께가 증가하는 2차변형역의 전면을 기점으로 중첩되어 전단영역을 이루고 있음을 보여주고 있다.

따라서, 공구-공작물간의 마찰계수의 증가는 전단영역의 확대로 인한 절삭에너지(소성변형에너지) 증가와 2차변형역의 증가를 야기시킨다.

3.3 마찰계수와 절삭에너지와의 관계

절삭가공에 소요되는 전형적인 에너지 구성비는 Chip 생성에 필요한 전단에너지가 75% 내외, 공구-Chip간의 마찰에너지가 20%내외이며, 그 밖의 새로운 표면 생성 에너지 및 전단면을 횡단하는 금속의 운동량에너지 등이 있으나 다른 성분에 비해 극히 작다.⁽¹⁾

앞의 결과들로 부터 판단할 수 있는 바와 같이 절삭 시에 소요되는 대부분의 에너지는 Chip 생성을 위해 1, 2차 소성변형에 소모되는 전단에너지와 공구-chip간의 마찰에너지임을 알 수 있다.

Fig. 3. 9에 공구-chip간의 마찰계수에 따른 비절삭에너지, 즉 단위체적의 금속을 절삭하는데 필요한 에너지

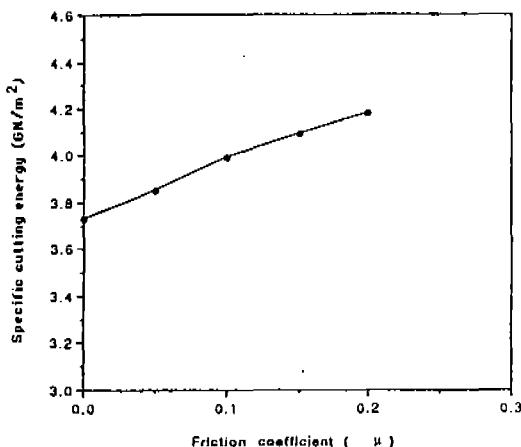


Fig. 3.9 Variation of Specific cutting energy versus friction coefficient

변화의 관계를 도시하였다. 공구-Chip간의 마찰계수증가에 따라 비절삭에너지는 점진적으로 증가하는 경향을 보이고 있는데, 이는 마찰계수의 증가로 인한 접촉마찰력의 증가는 공구경사면을 따른 Chip의 자연스런 유동을 억제함으로써 Chip에 작용하는 압축응력 및 전단응력의 증가와 함께 공작물 내부의 소성변형을 촉진하고 따라서 1, 2차 변형역 형성에 필요한 전단에너지(절삭에너지)의 증가를 초래함을 알 수 있다.

3.4 마찰계수와 공구마모

절삭가공중 공구경사면을 흐르는 Chip과의 유동/마찰

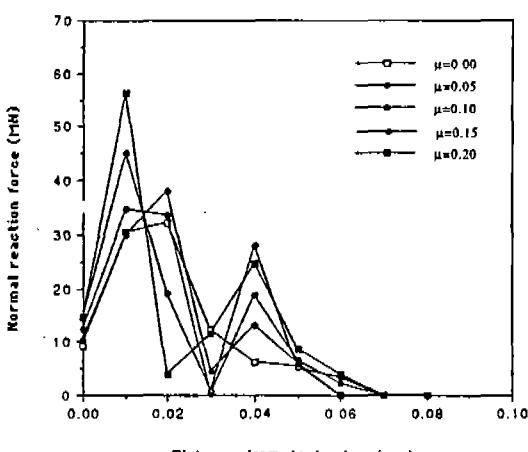


Fig. 3.10 Distribution of normal reaction force on tool surface

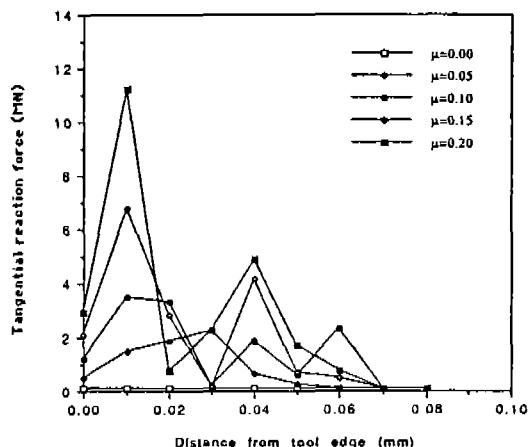


Fig. 3.11 Distribution of tangential reaction force on tool surface

접촉과 공구여유면 및 공작물간의 접촉에 의한 공구마모은 불가피하게 발생하는 절삭현상중의 하나이며, 그간의 실험적 연구를 통해 화학성분, 미세조직, 절삭온도, 공구에 작용하는 응력등이 주요변수로써 확인되고 있다.

본 연구에서는 공구를 공작물과 분리하여 하나의 변형체로 모델링하고 초정밀절삭에 자주 사용되는 다이아몬드 공구의 불성값을 대입하여 해석하였다. 또한, 다이아몬드와 금속간의 마찰계수는 통상 건식마찰인 경우 $\mu = 0.1 \sim 0.15$ 로 알려져 있으나, 본 해석에서는 공구상 면경사각 $\alpha = 0^\circ$, $\mu = 0.0 \sim 0.20$ 로 변경하여 공구와 Chip간의 접촉거동을 살펴보았다.

Fig. 3.10, Fig. 3.11은 공구선단을 기준으로 Chip과의 접촉마찰 영역에서의 각 절점에 걸리는 반력을 나타내었으며, 공구경사면에 수직방향 분력을 Fig. 3.10에, 접선방향의 분력을 Fig. 3.11에 각각 도시하였다.

이미 기술한 바와 같이 미소절삭기구 문제는 일련의 대변형 탄소성접촉문제로 간주할 수 있으며, 위의 그림에서 일부 절점의 값이 국부적으로 적은 이유는 Chip의 소성변형이 진행되면서 공구-Chip간의 접촉영역(Tool/Chip contact length)의 변화로 인하여 제하(Unloading)가 국부적으로 발생함에 따라 얻어진 결과로 사료되며, 이는 공작물 및 Chip의 유한요소(Mesh)의 크기를 더욱 작게 하거나, 변위증분 또는 하중증분량을 작게 조절함으로써 그 편차를 해결할 수 있다.

공구경사면에 분포하는 최대반력은 공구선단이 아닌 일정거리 떨어진 부분에서 발생하며, 이는 Chip의

Curling 현상으로 인한 공구-Chip간의 접촉증대와 이로 인한 공구의 압축응력 증가는 이곳에서 가장 먼저 균열 또는 파단이 일어날 수 있음을 의미한다. 특히, 공구-Chip간의 접촉영역에서의 마찰계수의 증가는 공구의 수직력 및 접선력을 증가시키며, 이는 곧 공구에 미치는 Normal stress 및 Shear stress의 증가와 아울러 공구 경사면의 Crater마모를 촉진시키는 원인으로 판단된다.

3.5 공구경사각에 따른 응력분포

절삭가공에 있어서 공구경사각은 절삭깊이와 함께 지배적인 절삭인자중의 하나이므로, 공구경사각이 Chip생성기구 및 응력분포에 미치는 영향도 고찰하였다.

Fig. 3.12, Fig. 3.13에는 공구상면경사각 $\alpha = 10^\circ$, $\mu = 0.0$ 일 때의 응력-변형률 분포를 도시하였다. $\alpha = 0^\circ$ 인 Fig. 3.4, Fig. 3.5와 비교해 보면, 유효변형률 및 Von Mises 상당응력이 각각 감소하였음을 알 수 있다. 즉, 공구경사각의 증가는 1, 2차변형역 또는 전단역의 소성변형을 감소시키며, Chip 뿐만 아니라 공작물 내부의 소성변형도에도 영향을 주므로 가공변질층의 감소에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

공구상면경사각(α) 변화에 따라 공구선단("0")을 중심으로 1, 2차변형역의 유효변형률과 Von Mises 상당응력 변화를 Fig. 3.14, Fig. 3.15에 각각 도시하였다.

공구경사각 0° 를 기준으로 양(+)의 경사각 증가 (3° , 6° , 10°)에 따라 유효변형률과 Von Mises상당응력이 감소함을 알 수 있다. 이는 경사각의 증가는 Chip운동 시 Chip에 작용하는 전단응력의 감소를 초래하여 1차 및 2차 변형역의 소성변형이 감소하기 때문인 것으로 판단된다.

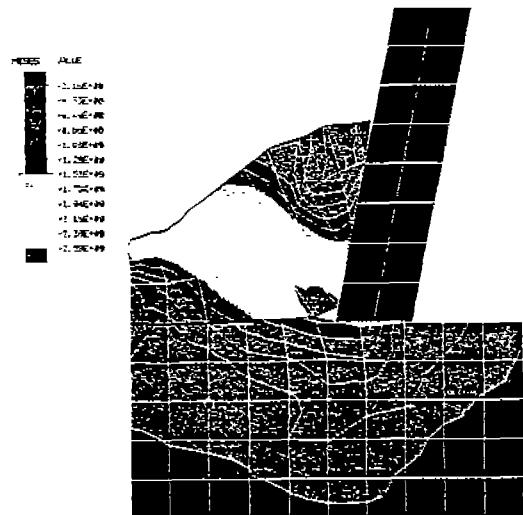


Fig. 3.13 Von Mises equivalent stress contours obtained simulation ($\alpha = 10^\circ$)

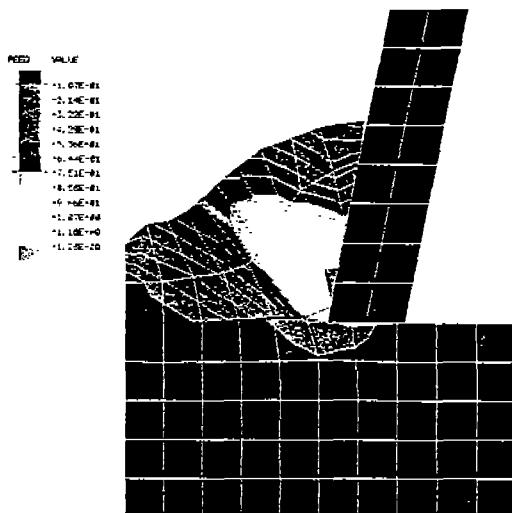


Fig. 3.12 Total effective plastic strain contours obtained simulation ($\alpha = 10^\circ$)

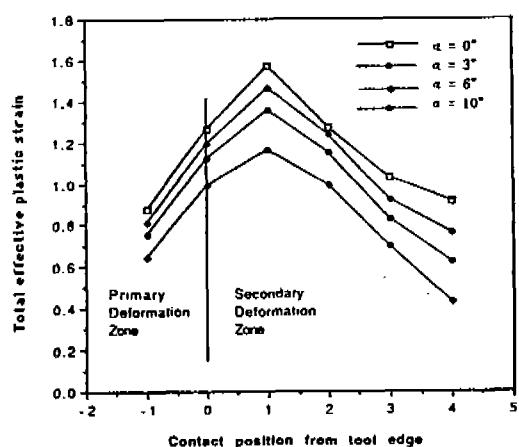


Fig. 3.14 Comparison of effective plastic strain of chip at various tool rake angles

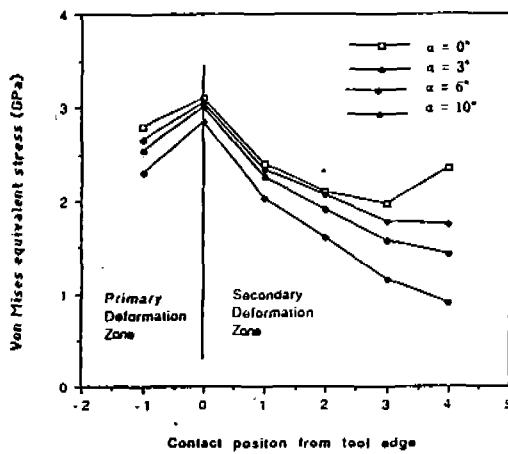


Fig. 3.15 Comparison of Von Mises equivalent stress of chip at various tool rake angles

3.6 공구경사각과 절삭에너지와의 관계

이미 3.3절에서 밝힌 바와 같이, 절삭시에 소요되는 1, 2차 소성변형에너지 및 공구-Chip간의 마찰에너지가 대부분의 절삭에너지이며, Fig. 3.16에는 공구상면경사각의 변화에 따른 비절삭에너지의 관계를 도시하였다. 공구경사각의 증가에 따라 전체 절삭기구의 비절삭에너지 는 감소하는 경향을 나타내며, 이는 Chip생성에너지 및 공구-Chip간 마찰에너지의 감소에 비롯되었음을 알 수 있다. 또한 Fig. 3.12, Fig. 3.13을 통해 전단각의 증대

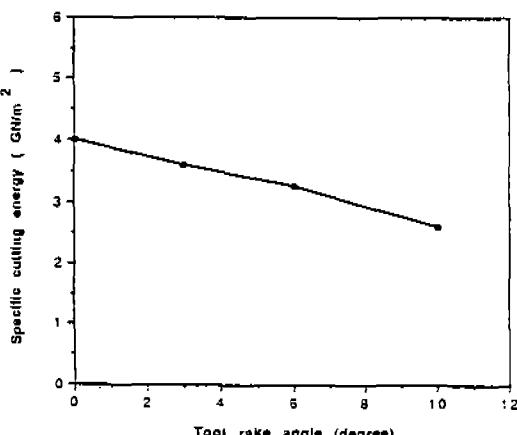


Fig. 3.16 Variation of Specific cutting energy versus tool rake angles

와 전단역의 체적감소, Chip두께의 감소등이 그 주된 인자임을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 공구와 Chip간의 마찰특성이 2차원 미소절삭기구에 미치는 영향을 유한요소법을 이용하여 해석, 고찰하고자 하였다. 특히, 절삭기구에 영향을 미치는 주요인자중 가공물의 변형모델(Strain hardening, strain rate sensitivity), 공구-Chip간의 마찰접촉, 공구경사각 등을 중심으로 절삭 Mechanism을 이해코자 하였다. 향후, 보다 정확한 미소절삭기구 모델링 및 해석, 실험을 통한 검증등이 뒷받침된다면 초정밀 가공 기술에 일조할 수 있으리라 기대한다.

본 연구를 통해 얻어진 결론들은 다음과 같다.

- 1) 미소절삭기구의 유한요소해석에 있어서는 적절한 절삭모델의 선정이 필요하며 이에 대한 검증의 하나로써 Constitutive Deformation Law의 변경을 실시하였으며, Elastic-Viscoplastic 모델이 실제 절삭기구의 Chip 생성기구 및 응력-변형을 분포를 잘 반영한다.
- 2) 절삭이 진행됨에 따라 전단면(Shear Plane)을 중심으로 공작물의 항복에 의해 Chip이 생성되며, 생성된 Chip은 공구경사면을 따라 유동함을 확인할 수 있다.
- 3) 공구의 경사면을 따라 흐르는 Chip의 유동을 공구-Chip Sliding Contact 조건으로 모델링하였으며, 접촉역의 마찰계수의 증가에 따른 공구-Chip간의 마찰접촉력의 증가는 1, 2차 변형역의 소성변형 및 전단에너지 증가와 아울러 접촉응력(Interfacial Stress), 접촉력, Chip 두께, 공구-Chip접촉길이를 증가시키며, 공구경사면의 Crater마모촉진 및 초기 파단의 한 요인이 될 수 있다.
- 4) 공구경사각의 증가는 전단역의 체적감소, Chip 두께 감소 현상과 함께 Chip생성시 전단응력의 감소와 이로 인한 전체 소성변형량 및 절삭에너지자를 각각 감소시켜 절삭능력을 향상시키는 주요인자임을 확인할 수 있다.

참고문헌

1. Geoffrey Boothroyd. "Fundamentals of Metal

- Machining and Machine Tools", McGraw-Hill, 1975.
2. Klamecki, B. E, "Incipient Chip Formation in Metal Cutting-A Three Dimension Finite-Element Analysis", Ph. D Thesis, Univ. of Illinois at Urbana Champaign, 1973.
3. Stevenson, M. G., Wright, P. K., and Chow, J. G., "Further Developments in Applying the Finite Element Method to the Calculation of Temperature Distributions in Machining and Comparisons with Experiment", ASME J. of Eng. for Ind., Vol. 105, pp. 149~154, 1983.
4. Strenkowski, J. S. and J. T. Carroll III, "A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting", J. of Eng. for Ind., Vol. 107, pp. 346~354, 1985.
5. Hibbit, Karlsson & Srensen, ABAQUS Thoery Manual, Hibbit, Karlsson & Srensen Inc., 1987.
6. Erik Oberg, Franklin D. J., Holbrook L. Horton, "Machinery's Handbook", Industrial Press Inc., 1975.
7. N. Ikawa et al., "Ultra Precision Metal Cutting-The Past, the Present and the Future", Annals of CIRP
8. Zienkiewicz, O. C., "The Finite Element Method in Engineering Science", McGraw-Hill, New York, 1971.
9. K. J. Bathe, "Finite Element Procedures in Engineering Analysis", Prentice-Hall, 1982.
10. A. Francavilla and O. C. Zienkiewicz, "A Note on Numerical Computation of Elastic Contact Problems," Int. J. Num. Meth. Eng., 9, pp. 913~924, 1975.
11. Iwata, K., K. Osakada and Y. Terasaka, "Process Modeling of Orthogonal Cutting by the Rigid-Plastic Finite Element Method", ASME J. of Engr. and Technology, Vol. 106, pp. 132~138, 1984.
12. 황준, 남궁석, "미찰특성이 미소절삭기구에 미치는 영향에 관한 연구", pp. 166~171, 한국정밀공학회 춘계학술대회 초록집, 1993.
13. 김동원, "소성학", 청문각, 1986.