

## 공구끝단에서의 정체점에 관한 유한요소해석

김국원\*(순천향대 기계공학과)

### A Finite Element Analysis of the Stagnation Point on the Tool Edge

K. W. Kim(Mech. Eng. Dept. SCHU)

#### 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), Stagnation point(정체점), Thermo-viscoplastic cutting model(열-점소성 절삭모델), Finite element analysis(유한요소해석)

#### 1. 서론

최근 초정밀 절삭에 관해서 실험장치, 공구, 척, 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  $\mu\text{m}$  혹은  $\text{nm}$  수준의 절삭깊이를 가지므로 공구의 끝단이 절삭가공에 미치는 영향이 매우 중요하다. 미소절삭 시에는 두가지 주요한 특성이 있는데, 크기효과와 임계절삭깊이이다. 크기효과란 절삭깊이가 감소함에 따라 비절삭에너지가 상승하는 것을 말하는데, 이에 대해서는 다음과 같은 연구들이 있다. Nakayama 와 Tamura<sup>(1)</sup>에 의하면 절삭중 피삭재는 공구끝단반경의 어떤 점(정체점) 아래로 흐르게 되는데, 이 부분에서의 에너지 소산은 절삭깊이와 상관없이 일정하고, 크기효과의 주요한 원인이 된다고 보았다. Moriwaki 와 Okuda<sup>(2)</sup>, Lucca 등<sup>(3)</sup>은 수  $\mu\text{m}$  이하의 미소절삭시 비절삭 에너지가 급격히 증가함을 관찰하고 이는 플랭크면과의 마찰, 공구끝단반경에 의한 유효상면경사각의 감소 등이 주 원인이라 생각하였다. 임계절삭깊이

란 칩을 생성할 수 있는 최소 절삭깊이를 말한다. Basuray 등<sup>(4)</sup>은 근사적인 수식 전개에 의해 임계절삭깊이에 대응하는 정체각을 계산하였다. Yuan 등<sup>(5)</sup>은 최소 절삭깊이와 공구의 끝단반경 사이에 간단한 관계식을 수립하고, 이전의 연구결과와 비교하여 타당함을 주장하였다.

초정밀가공에서 이루어지는 미소절삭 시 공구끝단에서의 정체점의 위치(임계절삭깊이)는 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>(6)</sup>을 바탕으로 정체점의 위치에 대한 연구를 수행하였다. 절삭조건과 피삭재 재질 및 공구형상의 정보로부터 절삭가공을 해석하고 이로부터 정체점의 위치를 정량적으로 계산하였다.

#### 2. 임계절삭깊이의 계산

공구끝단을 고려하는 경우 공구에 작용하는 절삭저항은, Fig. 1 에 나타난 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 가공면을 형성하기도 한다. 일반적으로 공구의 맨 아래에서 정체점까지의 높이를 임계절삭깊이라 부른다.

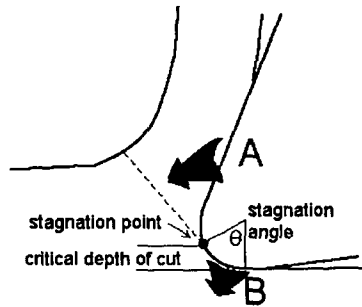


Fig. 1 Stagnation point on the tool edge

열-점소성 절삭모델의 경우 해석의 결과 절점속도가 구해지므로 공구끝단에서의 정체점 즉 속도가 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 살펴보겠다. 각각의 절삭에 대한 자세한 내용을 Table 1 에 나타내었다. Fig. 2(a)는 Case 1 해석을 위한 초기 칩의 형상과 유한요소메쉬이다. Fig. 2(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>(4,5)</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 사이에 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. 2(c)는 Case 1 해석결과 구해진 피삭재 내의 유동선을 보여준다. 공구끝단부분에서 정체점을 중심

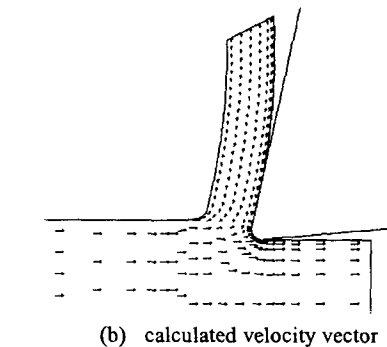
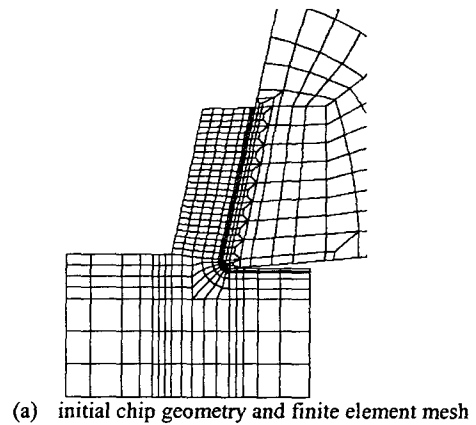
으로 칩이 형성되는 부분과 가공면으로 흘러가는 부분이 존재함을 알 수 있다.

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 $\mu\text{m}$



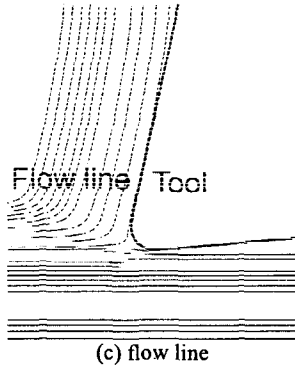
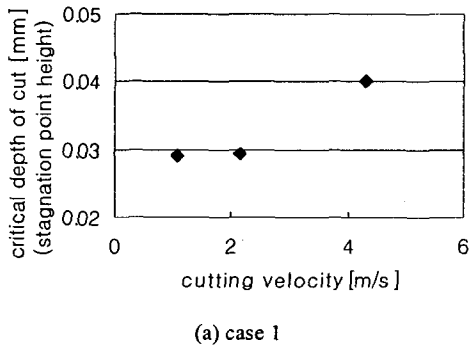


Fig. 2 Simulation example for case 1

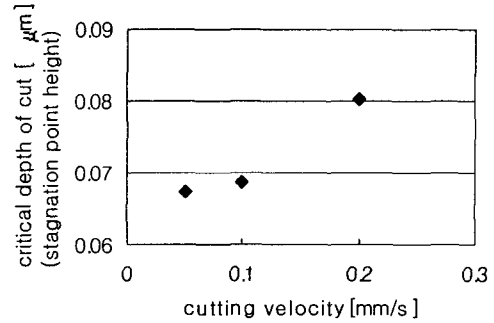
### 3. 절삭속도의 영향

절삭속도의 변화에 따른 임계절삭깊이의 변화를 살펴보겠다. 이전의 연구들<sup>(4,5)</sup>에서는 단순히 임계절삭깊이를 공구끝단반경만의 함수라 가정하였으나, 열-점소성 절삭모델에서는 절삭속도의 변화를 고려한 해석이 가능하므로 이에 대한 고찰을 수행하였다.

해석은 Table 1의 Case 1, Case 2에 대해 각각 절삭속도를 1/2 배, 2 배로 하여 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 3의 (a), (b)는 각각 Case 1, Case 2의 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. 4의 (a), (b)는 각각 Case 1의 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.

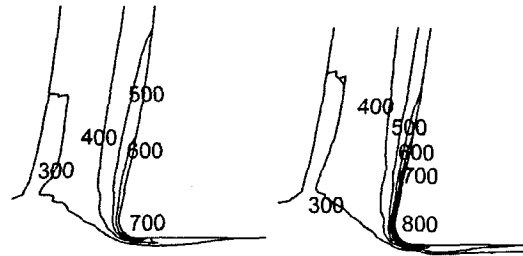


(a) case 1



(b) case 2

Fig. 3 Depths of cut for cutting speed variation



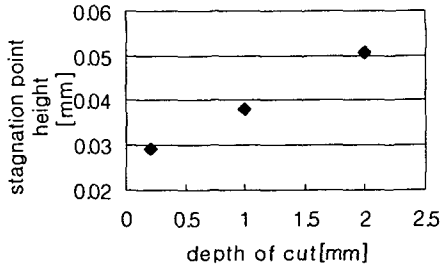
(a) 2.16 m/s cutting speed (b) 4.32 m/s cutting speed  
Fig. 4 Temperature distributions for case1 [unit: °C]

### 4. 절삭깊이 변화에 따른 정체점의 이동

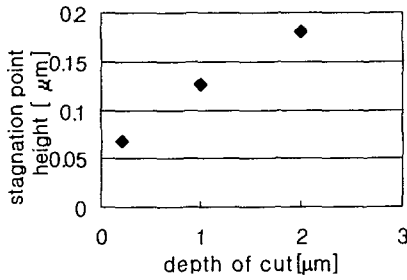
일반적으로 임계절삭깊이는 공구끝단의 정체점의 높이로 정한다. 그러나 정체점의 위치는 절삭조건에 따라 달라질 수 있으며, 앞절에서 고찰한 절삭속도와 더불어 여기서는 절삭깊이의 변화에 따른 정체점의 이동을 살펴보겠다.

해석은 Table 1의 Case 1, Case 2에 대해 각각 절삭깊이를 5 배, 10 배 증가시켰다. Fig. 5(a), (b)는 각각 Case 1, Case 2의 절삭깊이 변화에 따른 정체점의 높이의 변화이다. 두 경우 모두 절삭깊이가 증가하면 정체점의 높이가 증가하여 절삭깊이가 공구끝단반경의 10 배인 경우 정체점의 높이는 공구끝단반경의 1/2 ~ 1 배의 값을 보이고 있다. 따라서 절삭깊이가 공구끝단반경에 비해 상대적으로 큰 경우 정체점의 위치는 임계절삭깊이와 큰 차이를 보이고 있다. 이와 관련하여 Oxley<sup>(7)</sup>의 연구내용을 살펴보자. 그는 일반적인 절삭가공에 대해 Cine film 방법을 이용하여 Fig. 6과 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 앞절

에서의 속도증가와 같은 결과를 초래하여 정체점이 이동하게 되는 것이다. Fig. 7의 (a), (b)는 각각 Case 2의 절삭깊이  $1\ \mu\text{m}$ ,  $2\ \mu\text{m}$ 인 경우에 대한 온도분포를 나타내는데 절삭깊이의 증가에 따라 온도가 상승함을 알 수 있다.



(a) case 1



(b) case 2

Fig. 5 Stagnation points for depths of cut variation

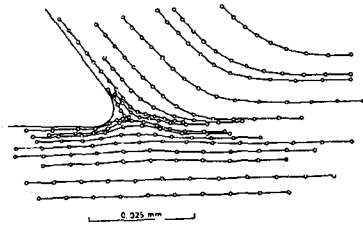
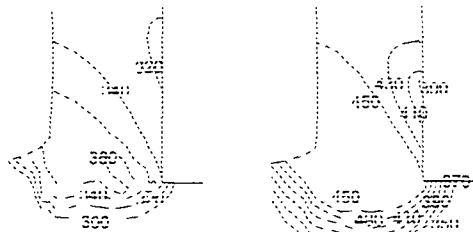


Fig. 6 Experimental flow field around cutting edge by Oxley<sup>(7)</sup>



(a)  $0.2\ \mu\text{m}$  depth of cut (b)  $2\ \mu\text{m}$  depth of cut

Fig. 7 Temperature distributions for case2 [unit:  $^{\circ}\text{C}$ ]

#### 4. 결론

본 연구를 통하여 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. 열-점소성 절삭모델을 사용하여 공구끝단에서의 정체점의 위치를 정량적으로 구할 수 있었다. 일반적인 절삭과 미소절삭 두가지 경우에 대해 얻어진 정체점의 위치 즉 임계절삭깊이는 이전의 연구들과 잘 일치하는 결과를 보였다.

2. 절삭속도가 증가함에 따라 정체점의 위치(임계절삭깊이)는 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.

#### 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. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Oxley, P.L.B., *Mechanics of machining: an analytical approach to assessing machinability*, Ellis Horwood, Chichester, 1989.