

공구형상이 칩유동에 미치는 영향에 관한 연구

김경우*, 김우순*, 윤주식*, 채왕석**, 김동현***

A Study on the Effects of Tool Geometry on Chip Flow

Kyong-Woo Kim*, Woo-Soon Kim*, Ju-Sik Yun*, Wang-Suk Chae**, Dong-Hyun Kim***

ABSTRACT

A new methodology is presented to evaluate material properties at high strain rates and high temperatures based on orthogonal metal cutting experiments and FEM simulations. Average strain rate and average temperature found in the deformation zone are computed and flow stress data at these conditions are modified until cutting forces calculated in simulations match those determined in experiments. Material properties obtained from this method were verified by additional metal cutting simulations. Derivation from cutting forces measured in experiments was less than 10%. The feasibility of tool design using FEM simulations is also demonstrated.

1. 서 론

절삭은 원하는 치수와 정밀도를 갖는 부품을 생산하기 위한 대표적인 가공공정중 하나이다. 금속절삭이 다른 가공공정과 다른 특징은 매우 작은 변형영역에서 높은 변형율을 부과하고 가공과정이 구속받지 않는 특징이 있다. 공정의 복잡성은 변형영역에서 커다란 응력의 변화와 열원에 의해서 더욱 증가한다.

지난 20년 동안, 금속절삭에 대한 유한요소법과 같은 수치해석기법을 적용하는 등의 괄목할만한 발전이 있었다. 응력, 변형율과 온도의 함수로서 재료의 특성을 나타냈다. 칩과 공구 사이의 상호작용을 어느 정도 모델링 할 수 있었다. 효과적인 절삭과정 모델을 개선하도록 대개는 광범위한 실험을 통하여 절삭변수를 최적화한다. 유한요소 시뮬레이션은 새로운 공구를 설계할 때 공정의 최적화와 절삭실험 비용을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그러나, 금속절삭에 대한 유한요소법의 적용은 고변형율과 고온일 때

재료 데이터가 부족하기 때문에 매우 제한적이다. 따라서, 예측절삭력, 예측응력, 예측온도는 실험값과 일치하지 않는다. 금속절삭과정의 실제적이고 독립적인 시뮬레이션은 각각의 가공조건에 대해서 재료 거동이 고려되어야 한다. 고변형율과 고온의 재료특성은 물리적인 실험법으로 쉽게 얻을 수 없다. Thomsen⁽¹⁾과 Oxley⁽²⁾는 재료특성실험으로써 직교금속절삭을 사용했다. 이 실험에서 금속절삭의 일반적인 조건에서 유동응력은 변형율과 온도에 크게 의존하고, 변형영역에서 변형율과 온도의 평균값은 유동응력의 평균값을 얻기 위하여 필요하다. 또한 변형영역에서 변형율과 온도의 평균값은 평균유동응력을 계산하기 위하여 산출되어야 한다.

변형이 순수하게 전단에 의해서 일어난다는 가정과 전단응력이 전단영역에서 일정하다는 가정은 부정확하다. Thomsen과 Oxley에 의해서 제안된 방법은 각각의 절삭조건에 대해서 피삭재의 유동응력 또는 전단응력을 결정하는데 매우 유용하다. 본 연구는 이들의 연구에 의해서 제안된 기본 개념을 사용하였다. FEM은 금속절삭에서 칩유동을 포함한 금속 변형과정에서 금속유동을 예측하는데 사용할 수 있다.

* 원광대학교 대학원

** 군장대학 자동차기계학부

*** 원광대학교 기계공학부

무인화를 이루기 위한 기계가공자동화의 진보는 더 효과적인 칩제어를 필연적으로 요구한다. 칩절단과 칩배출은 칩제어의 대표적인 두 가지 기능적인 요소이다. 만일, 칩이 작고 규칙적이며 다루기 쉬운 크기와 모양으로 절단된다면, 칩을 더욱 효과적으로 배출할 수 있다. 칩형상과 칩절단은 공구의 기하학적 형상, 절삭조건, 피삭재와 공구의 재료특성과 같은 많은 변수들에 의해서 변한다. 본 연구에서는 공구의 기하학적 형상과 절삭조건이 칩유동에 미치는 영향에 대해서 유한요소법을 사용하여 연구하였다.

Table 1. Experimental Conditions in Turning

Cutting Conditions	
Cutting Speed [m/min]	10, 40, 80, 120, 160, 200
Feedrate [mm/rev]	0.125, 0.195, 0.395
Depth of Cut [mm]	2
Tool Parameters	
Rake Angle [°]	15
Clearance Angle [°]	7
Nose Radius [mm]	0.2
Workpiece	
Tensile Stress at Ultimate [MPa]	1027
Yield Stress [MPa]	612
Hardness [HRC]	33

2. 절삭실험과 유한요소해석

유한요소 시뮬레이션 결과와 비교하기 위하여 Table 1과 같은 실험조건으로 선삭실험을 행하였다. 유한요소 시뮬레이션은 lagrangian explicit code를 사용하고 adaptive remeshing 기능을 가지고 있는 Third Wave Systems의 *AdvantEdge*를 사용하였다⁽⁵⁾. 공구는 강체모델을 사용하고, 피삭재는 소성모델

을 사용하여 모델링하였다. AutoCAD를 이용하여 공구의 기하학적 형상을 모델링한 후 CAD 데이터를 이용하여 유한요소 패키지에 적용하였으며, 각 절삭조건에 따라 시뮬레이션을 행하였다. 시간스텝은 다음에 주어지는 수렴 및 안정조건식으로부터 Δt 를 정하였다.

$$\Delta t \leq \frac{2}{\omega_{\max}^e} \quad (1)$$

여기서 ω_{\max}^e 은 $\omega^2 = \lambda$ 로 주어지는 고유치(eigen value)에 관계한다.

Fig.1은 절삭실험에서 얻어진 절삭력을 절삭속도와 이송의 변화에 대해서 나타낸 것이다.

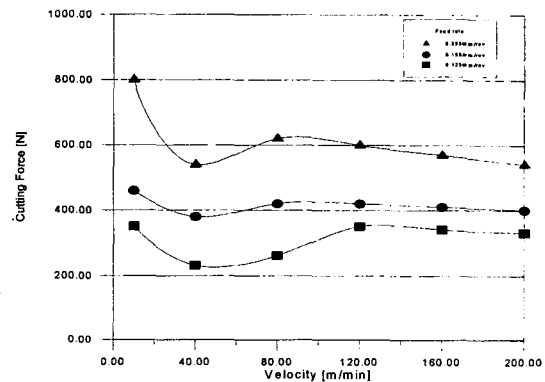


Fig. 1 Experimental Values of Cutting Forces

마찰계수 m 은 다음과 같이 정의한다.

$$\tau_f = m \cdot \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

τ_f 는 전단유동응력이고, $\bar{\sigma}$ 는 유동응력이다.

절삭력에 대한 마찰력의 영향을 평가하기 위하여 공구-칩 사이의 경계면에 존재하는 마찰조건을 알아야 한다. Strenkowski 등^(3,4)에 의해 얻은 실험데이터는 금속절삭에서 마찰계수가 $m=0.5 \sim 0.7$ 에 있다고 제안했다. Fig. 2는 마찰계수에 따른 절삭력의 변동을 나타낸 것이다. 금속절삭조건 범위 내에서의 마찰계수에 따른 절삭력의 변화는 10~12%정도이다. 이 정도의 변화를 무시할 정도로 여기면, 시뮬레이션에 사용하는 마찰계수를 일정하다고 가정하여 사용할 수 있다.

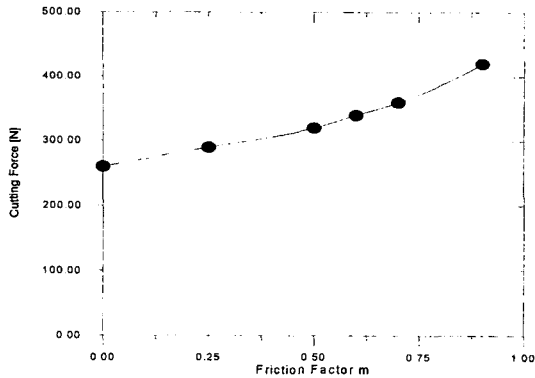


Fig. 2 Variation of Cutting Force with Friction Factor

3. 결과 및 고찰

공구의 기하학적 형상과 공구응력과 공구온도 사이의 관계를 설정하는 것이 공구설계에 도움이 된다. 본 연구의 목적 중 하나는 절삭공구설계에 있어서 FEM 시뮬레이션을 이용하는 방법을 정성적으로 설명하는 것이다. 따라서, 공구의 기하학적 형상이 칩유동에 미치는 영향을 연구하였다.

Fig. 3은 이송을 0.125mm/rev로 하였을 경우에 절삭속도의 변화에 대한 절삭력을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 값이 실험값과 약 5~10% 범위 내에 있음을 알 수 있다.

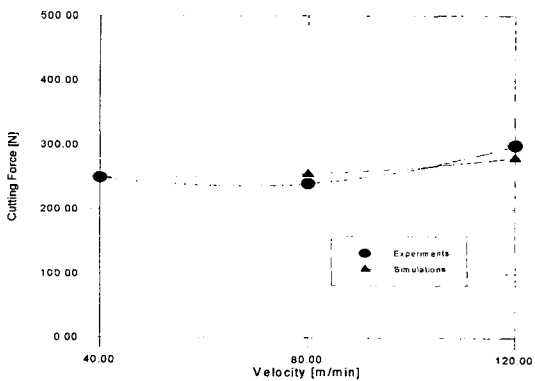


Fig. 3 Results from Simulations conducted to Verify the Validity Material Data, Feedrate = 0.125mm/rev

Table 2. Parameters of Tool Geometry

Backwall Height [mm]	0, 0.2, 0.4
Groove Width [mm]	1.5, 2.0, 2.3
Groove radius [mm]	1.5, 2, 2.5
Land Width [mm]	0.15, 0.3, 0.45

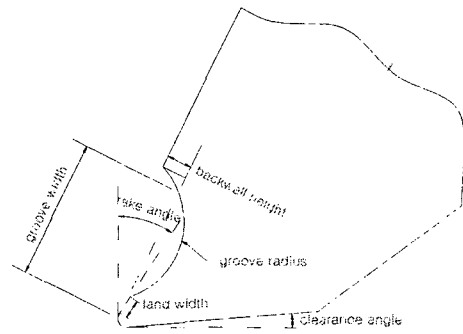
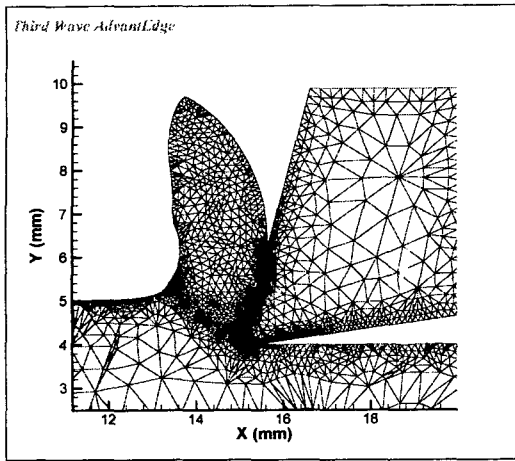


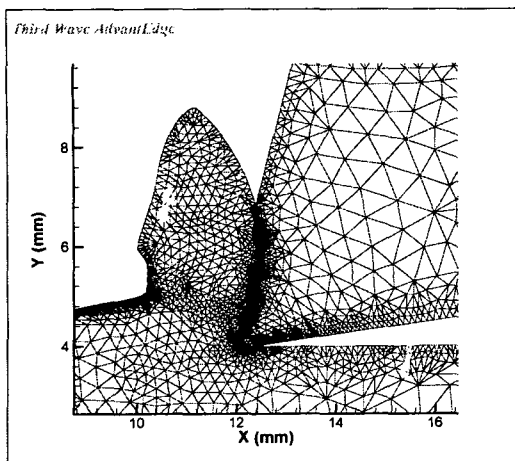
Fig. 4 Nomenclature of Grooved Tool used in FEM Simulations

가공산업에서 일반적으로 사용되는 칩브레이커는 홈형 칩브레이커와 방해물형 칩브레이커로 나뉘어진다. 본 논문에서는 홈형 칩브레이커에 대해서 연구하였으며, Fig. 4에 시뮬레이션에 사용된 공구의 각 부 명칭을 나타내었다. 칩브레이커 설계의 주된 목적은 칩이 공작물면이나 공구 여유면에 부딪혀서 절단되도록 칩만곡을 증가시키는 것이다. 시뮬레이션에서 사용된 공구형상변수들을 Table 2에 나타내었다.

Fig. 5는 홈 반경, 홈 폭, 백월 높이를 일정하게 유지하고 랜드 폭을 변화하였을 때 칩유동 경향을 살펴본 것이다. 랜드 폭이 절삭깊이보다 작을 때 홈 형상을 따라 칩이 유동하고, 칩 말림 반경이 홈 반경과 거의 같음을 알 수 있다. 이는 랜드와 함께 홈의 일부가 칩의 변형에 관여했기 때문이다. 랜드 폭과 절삭깊이가 같을 때 홈 반경은 칩 말림 반경에 영향을 미치지 못한다. 이와 같은 이유는 칩의 변형이 랜드 폭 내에서만 일어났기 때문이다. 절삭깊이는 칩브레이커가 고유의 기능을 수행하도록 칩브레이커 설계시에 고려되어야 할 사항이다. 따라서, 황삭가공과 사상가공 각각에 대해서 인서트 형상을 설계하여야 한다.



(A) Land less than Depth of Cut



(B) Land equal to Depth of Cut

Fig. 5 The Effect of Land Dimension upon Chip Flow

칩 만곡 반경은 홈 폭이 증가함에 따라서 증가한다. 홈 폭이 증가함에 따라서 칩이 백월에 부딪히면서 접히는 형상을 지연시킨다. 따라서, 공구와 접촉하는 칩의 표면적이 증가한다. 접촉면적이 증가하면서 공구-칩 경계면에서 발생하는 마찰에너지가 증가하게 되고 절삭온도가 상승하게 된다. 절삭온도가 증가하게 되면서 유동응력은 감소한다. 그 결과 절삭력 또한 감소한다.

백월 높이의 증가는 Fig. 6에서와 같이 칩 말림을 더욱 증가시킨다. 랜드 폭이 절삭깊이보다 작은

경우에 백월부가 홈에서의 칩 말림 작용을 보조한다. 랜드 폭이 절삭깊이와 같을 때 백월부는 칩이 더 심하게 굽혀지도록 작용한다.

비교적 작은 홈 반경은 칩 말림 관점에서 유용할 수 있으나, 공구설계 관점에서는 해로울 수 있다. 비교적 작은 반경을 갖는 홈은 더 큰 반경을 갖는 홈보다 더 큰 응력집중현상을 일으킬 수 있다. 응력집중 요소가 증가함에 따라서 응력집중 점에서 공구상에 작용하는 유효응력 또한 증가하므로 공구는 더욱 파손되기 쉬워진다.

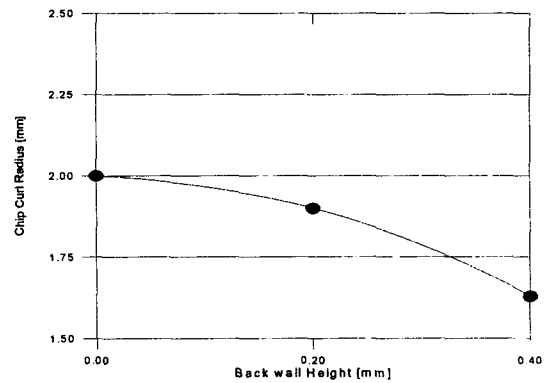


Fig. 6 Effect of Backwall Height on Chip Curl (Groove Width = 2mm)

공구의 기하학적 변수에 더하여 절삭속도는 칩유동거동에 적지 않은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 칩 말림 반경은 절삭속도가 증가함에 따라서 감소한다. 이와 같은 현상은 절삭속도를 증가시키면서 가공했을 때 칩의 온도구배가 증가하는 것으로 설명할 수 있다. 절삭속도가 증가함에 따라서 공구와 칩 경계면 상에서 발생한 온도는 증가한다. 이때 공구와 칩의 상대속도가 증가한다. 공구부분의 칩은 더욱 팽창하게 되고 칩 말림이 더 크게 발생하게 된다. 결과적으로, 칩 말림은 절삭속도에 비례하여 증가한다.

4. 결론

SM45C의 선삭실험과 유한요소 시뮬레이션을 통해서 공구의 기하학적 형상이 칩유동에 미치는 영향에 대해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

공구의 기하학적 최적화는 더 나은 칩제어를 얻는

데 있다. 예를 들면, 백월 높이의 증가와 흠폭과 호
흠반경은 칩이 더 잘 말리게 한다. 칩브레이커의 개
발에 있어서 응력집중과 온도는 최적한 공구설계를
위해서 동시에 고려되어야 한다. 랜드폭이 절입깊이
보다 더 작을 때, 칩은 흠의 형상에 따라서 접촉하
여 유동한다. 랜드폭이 절삭깊이보다 크거나 같을
때, 흠의 치수는 부적절하고 백월부가 유일하게 칩
말림에 영향을 미친다. 절삭속도와 절입깊이와 같은
절삭변수가 칩유동 거동에 영향을 미치는 인자이다.
칩만곡은 일정한 공구형상에 대해서 절삭속도가 증
가함에 따라 증가하고, 절입깊이가 증가함에 따라
흠의 효과도 증가한다.

참고문헌

1. Thomsen E. G., Lira F., "Metal cutting as a property test", *Journal of Engineering for Industry*, pp. 489-494, 1967
2. Oxley P. L. B., "An analytical approach to assessing machinability", *Mechanics of Machining*, pp. 74-95, 1989
3. Strenkowski J. S., Lira F., "A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting", *Journal of Engineering for Industry*, vol. 107, pp. 349-354, 1985
4. Jain V. K., Joshi V. S., Dixit P. M., "Viscoplastic Analysis of Metal Cutting by Finite Element Method", *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, vol. 34, pp. 553-570, 1993
5. Third Wave AdvantEdge Theoretical Manual v3.5