

유한요소법을 이용한 금속절삭의 모델링

김경우*(원광대 대학원 기계공학과), 김동현(원광대 기계시스템 디자인공학부)

Modeling of Metal Cutting Using Finite Element Method

K. W. Kim(Mecha. Eng. Dept. WKU), D. H. Kim(Mechanical System Design Eng. Div., WKU)

ABSTRACT

The commercial success of a new product is influenced by the time to market. Shorter product leadtimes are of importance in a competitive market. This can be achieved only if the product development process can be realized in a relatively small time period. New cutting inserts are developed by a time consuming trial and error process guided by empirical knowledge of the mechanical cutting process. The effect of previous cutting on chip formation and the surface residual stresses has been studied. The chip formation is not affected much. There is only a minor influence from the residual stress on the surface from the first cutting on the second pass chip formation. Thus, it is deemed to be sufficient to simulate only the first pass. The influence of the cutting speed and feed on the residual stresses has been computed and verified by the experiments. It is shown that the state of residual stresses in the workpiece increases with the cutting speed.

This paper presents experimental results which can be used for evaluating computational models to assure robust solutions. The general finite element code ABAQUS/Standard has been used in the simulations. A quasi-static simulation with adiabatic heating was performed. The path for separating the chip from the workpiece is predetermined. The agreement between measurements and calculation is good considering the simplifications introduced.

Key Words : Finite element method (유한요소법), Large deformation (거대 변형), Residual stresses (잔류응력), cutting temperature (절삭온도), cutting region (절삭영역), Friction force (마찰력)

1. 서론

금속절삭 연구는 절삭공정의 효율과 품질에 영향을 미치는 공구와 피삭재 사이의 거동 특성에 주안점을 둔다. 절삭공구 재료의 개발은 매우 중요한 요소를 차지한다. 금속절삭 기술은 기계가공과 관련된 산업의 파생산업으로 기여하며 발전하여 왔다. 새로운 피삭재의 출현에 따른 절삭속도 증가의 요구에 따라 탄소 공구강은 고속도강과 초경합금 공구로 대체 됨으로써 생산성 향상을 가져올 수 있었으며, 고속가공으로 향하는 추세는 공구재료의 진보를 유도하였다. 이에 따라 다층코팅 기술이 적용된 세라믹 공구 등의 꾸준한 공구의 개발이 이루어지게 되었다. 공구의 설계는 고속절삭속도에서 공구의 수명을 최대화하는 형상 최적화에 주력하게 되었으며, 수 많은 절삭유가 개발되어 절삭면의 표면 거칠기를 향상시킨다거나 금속제거율을 높일 수

있었다.

오늘날 금속절삭은 산업 전반에 걸쳐서 매우 커다란 부분을 차지하고 있다. 예를 들면, 자동차 산업, 철도, 전기전자, 선박, 항공기 제조 산업, 공작 기계산업 등 많은 부분에서 역할을 하고 있다. 그러므로, 생산성 향상과 효율을 높이기 위하여 금속절삭과정의 충분한 이해와 연구가 필요로 하게 된다.

금속절삭용 초경합금 인서트의 형상설계는 강건 설계 단계에 이르기까지 시작품 제작과 테스트에 많은 시간과 사원이 소비된다. 금속절삭공정을 연구하는 데에는 많은 어려움이 따른다. 절삭영역은 고온 고압 환경이기 때문에 직접적인 관찰을 통한 연구는 많은 어려움이 수반된다. 따라서, 간접적인 방법으로 칩 형상과 공구 수명과 같은 간접적인 변수에 대해서 조사 연구하게 된다. 그러나 이와 같은 간접적인 방법을 통하여서는 절삭공정의 실제

메커니즘을 규명하기에는 부족한 점이 많다. 그러므로, 금속절삭 산업에서 공구의 개발에 많은 제약이 따르게 된다. 또한, 가공물의 수명과 성능에 많은 영향을 미칠 수 있는 잔류응력을 측정하기에는 쉽지 않다[1~5].

컴퓨터 시뮬레이션은 새로운 인서트의 설계와 개발에 필요한 시간과 비용을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 금속절삭공정을 이해하기에 많은 유용한 정보를 제공한다.

절삭 시뮬레이션은 거대 변형, thermo-mechanical coupling, 절삭 모델링 등 많은 어려움을 내재하고 있다. 절삭의 일부 현상은 유한요소법을 이용한 다른 프로세스와 유사하다. 재료 모델링은 강소성(rigid-plastic) 또는 강점소성(rigid-viscoplastic) 재료 모델을 사용하여 단순화 한다. 적응 메쉬(mesh adaptivity)는 이동하는 거대 변형 영역에 적용된다[6].

본 연구는 초경공구를 사용하여 탄소강을 직교절삭하여 실험 데이터와 유한요소 시뮬레이션 데이터를 비교하였다.

2. 금속절삭 실험과 유한요소 해석

2.1 금속절삭 실험

유한요소 시뮬레이션에 의한 예측결과와 절삭실험 결과를 비교하기 위하여 SM45C 의 2 차원 선삭 실험을 Table 1 과 같은 실험조건으로 선삭실험을 행하였다. 2 차원 선삭실험을 행하기 위하여 피삭재는 120mm 의 길이에 지름 40mm, 두께 5mm 의 관을 이용하여 단면절삭을 행하였다.

Table 1 Tool and cutting data used for experiments and calculations

Feed	0.25 mm
Cutting speed	198 m/min
Cutting depth	3 mm
Edge radius	50 μ m
Clearance angle	6°
Rake angle	6°

2.2 유한요소해석

유한요소 시뮬레이션은 ABAQUS/Standard 를 사용하였다. 단열조건을 이용하기 때문에 준정적, 거대변형 해석을 수행하였다. 단열은 탄성과 소성 변형에 의하여 발생한다. 변형은 열전도가 일어나지 않고 국부적인 온도 증가가 일어난다. 따라서, 해석

모델에서 마찰에 의해 발생하는 열을 계상할 수 없다. 그러나, 온도변화는 재료의 특성변화와 열적 변형에 대해서 중속적인 재료 모델에서는 온도가 쓰여진다. 요소는 네 개의 절점을 갖는 CPE4 요소를 사용하였다.

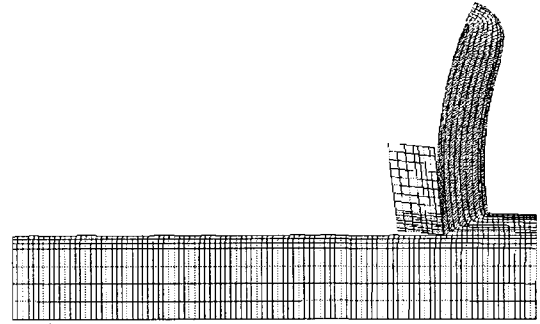


Fig. 1 Finite Element model.

Fig. 1 은 유한요소 모델을 나타낸 것이다. 유한요소 모델은 평면변형 모델과 1711 개의 요소수, 1954 개의 절점으로 구성되었다. 피삭재의 길이는 6.25 mm 이고 두께는 1.25mm 이다. 비절삭 칩두께는 0.25mm 이다. 해석은 ABAQUS 자동시간증분 선택사양을 사용하여 1.894 msec, 시간스텝 1225 가 요구된다. 마찰계수는 0.3 으로 가정하였으며, 피삭재로부터 칩으로 분리되는 경로는 미리 결정해 두었다. 시뮬레이션을 수행하기 위하여 초기 크랙을 만들어야 한다.

소성소산에 기인하여 발생하는 열은 주로 칩을 가로 지르는 전단영역을 따라 발생하며 제 1 변형 영역이라 한다. 기계적 에너지의 소성소산의 90%는 열로 변환된다. 마찰에 기인한 열은 모델에 포함되지 않는다. 단열모델은 열전도가 없는 것으로 가정한다. 이와 같은 단순화는 칩이 생성될 때 일어나는 열전도는 매우 짧은 시간이기 때문에 마찰에 의해서 발생하는 열은 무시할만하다. 피삭재는 열에 중속적인 특성을 갖는 thermo-elastoplastic 모델을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

주절삭력 F_c 와 이송분력 F_f 는 공구동력계(KISTLER 9257B)를 불홀더에 장착하여 측정하였다. 실험을 통한 측정값과 시뮬레이션을 통한 계산값은 Table 2 와 같다. 측정값과 계산값은 이송분력을 제외하고는 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 계산된 절삭력이 측정된 절

삭력보다 그 값이 작음을 알 수 있다. 이는 마찰계수에 의한 영향이라 생각된다. 그러나, 시뮬레이션 모델에서 마찰계수를 마찰계수 만큼 증가하거나 하는 것 만으로는 시뮬레이션의 정확도를 보장하기에는 충분하지 않다.

Fig. 2 ~ 6 은 ABAQUS/Standard 를 이용하여 유한요소 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. 계산 결과를 종합하여 Table 에 요약정리하였다.

Table 2 Measured and computed quantities

	Measured	Computed
Cutting force F_c	1450N	1050 N
Feed force F_f	755 N	200 N
Chip thickness ratio Λ	1.98	2.0
Shear plane angle Φ	30°	30°
Contact length l_c	0.58 mm	0.6 mm

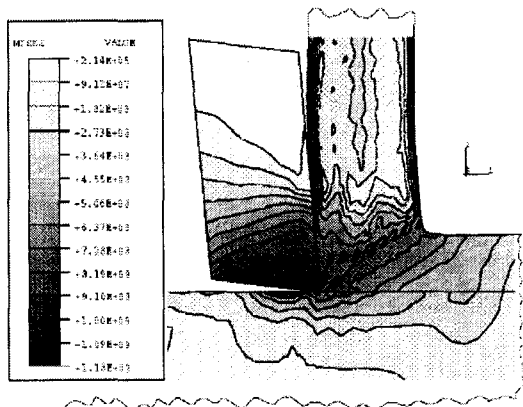


Fig.2 Von Mises effective stress.

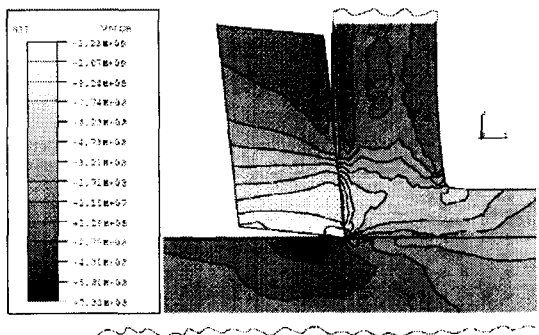


Fig. 3 Normal stress in horizontal direction

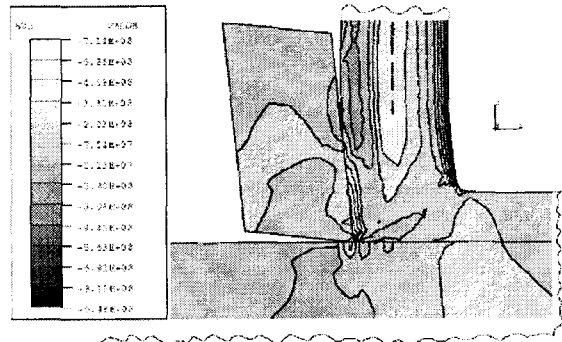


Fig. 4 Normal stress in vertical direction

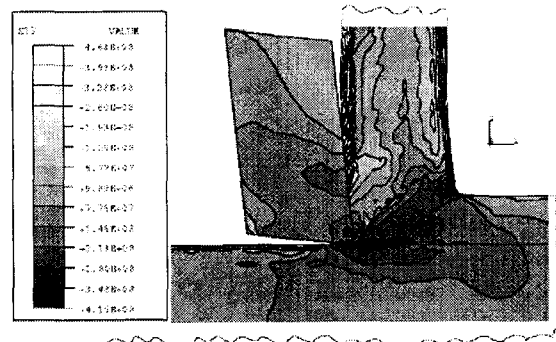


Fig. 5 Maximum shear stress.

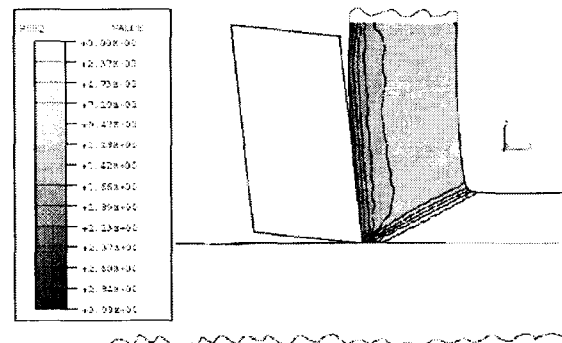


Fig. 6 Effective plastic strains.

4. 결론

본 연구는 SM45C 의 2 차원 선삭실험과 유한요소 시뮬레이션을 통하여 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 절삭실험을 통한 실험값과 유한요소 시뮬레

이선을 통한 계산값이 잘 일치함을 보였다.

2) 제 1 변형영역에서 열소성 전단 국부화에 의해서 생성되는 칩의 적층구조는 시뮬레이션을 통하여 얻을 수 없었다.

3) 향후 칩 형상, 절삭력과 잔류응력과 같은 기계가공 변수를 실제적으로 예측할 수 있도록 손상 메커니즘을 사용하여 초기 크랙, 크랙 진전을 적용하여 유한요소 모델에 대한 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

1. Cretti, E., Fallboehmer, P., Wu, W. T., and Altan, T., "Application of 2D FEM to chip formation in orthogonal cutting," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 59, No. 1-2, pp. 169-180, 1996.
2. Shih, A. J., "Finite element analysis of orthogonal metal cutting," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 117, pp.84-93, 1995.
3. Shih, A. J., "Finite element analysis of the rake angle effects in orthogonal metal cutting," *International Journal of Mech. Sci.*, Vol. 38, No. 1, pp.1-17, 1996.
4. Komvopoulos, K., Erpenbeck, S. A., "Finite Element Modeling of Orthogonal Metal Cutting," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 113, pp.253-267, 1991.
5. Zhang, B., Bagchi, A., "Finite element simulation of chip formation and comparison with machining experiment," *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 116, pp.289-297, 1994.
6. Hibbit, Karlsson, Sorensen, Inc., "ABAQUS/Standard Theory Manual (version 6.2)," 2001.
7. 김경우, 김우순, 김동현, "3-D 칩생성과정의 역학적 해석 모델링," *한국 정밀공학회지*, 제 17 권, 제 12 호, pp. 163-168, 2000.
8. 김경우, 김동현, "유한요소법을 이용한 칩유동에 관한 연구," *한국 정밀공학회지*, 제 18 권, 제 11 호, pp. 101-106, 2001.