

2차원 저속절삭에 대한 유한요소 해석

김국원[#], 안태길*, 이우영**

Finite Element Analysis of an Orthogonal Cutting Process with Low Speed

Kug-Weon Kim[#], Tae-Kil Ahn*, Woo-Young Lee**

ABSTRACT

An introduction to orthogonal cutting model by FEM is given, followed by a review of similar work. The cutting process is treated as quasi-static and strain rate insensitive, so the model is applicable only to low speed cutting operation. Chip separation is accomplished along a predefined cutting path by means of an element death procedure. Contact elements with friction capability are used to model the interaction between the tool and the workpiece. FEM results are compared with cutting experiments with low speed for brass, and good correlations are found.

Key Words : Orthogonal Cutting Process(2차원 절삭가공), Finite Element Method(유한요소법), Chip Separation Criterion(칩분리조건), Cutting Force(절삭력)

1. 서 론

절삭가공에 대한 이론적 연구는 두 가지 부류 - 최소에너지원리와 미끄럼선장이론 - 로 나눌 수 있다. 최소에너지원리에 따르면 소성변형이 전단면에서만 균일하게 발생한다고 가정하며 따라서 절삭에너지는 전단면의 전단응력과 전단변형률만으로 계산할 수 있다. 이 에너지를 최소화시키는 전단각과 절삭력, 절삭속도 등의 관계를 수립함으로써 복잡한 절삭현상을 단순하고 이해하기 쉽게 만들었으며 현재까지

도 이용되고 있는 방법이다^[1]. 미끄럼선장이론은 전단영역에서의 연속적인 칩형성을 고려하는 이론이다. 평면변형률 상태에서의 소성이론을 적용하였으며 전단면은 제1전단영역에서의 최대전단응력방향임을 밝혀내었다. 변형률, 변형률속도, 온도의 영향을 고려한 해석을 수행할 수 있었으며, 해석된 절삭력, 전단각, 칩-공구 접촉면에서의 평균온도 등은 실험결과와 비교했을 때 잘 일치된 결과를 얻을 수 있었다^[2]. 많은 성공적인 결과를 보임에도 불구하고 미끄럼선장법에서는 절삭실험을 통한 실험상수를 필요로 하는 문제점이 있다.

최근 컴퓨터의 발전에 힘입어 절삭가공을 해석하는데 유한요소법을 적용하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. 유한요소법을 적용할 경우 다음과 같은 장점들을 생각할 수 있다.

[#] 교신저자 : 순천향대학교 기계공학과
E-mail : kimkug1@sch.ac.kr

* 호서대학교 자동차공학과

** 한국기술교육대학교 기계공학부

(1) 변형률, 변형률속도, 온도의 함수인 재료물성치를 쉽게 적용할 수 있다.

(2) 칩과 공구사이의 접촉마찰을 sticking 과 sliding 으로 모델링할 수 있다.

(3) 칩의 비선형 기하학적 경계를 나타낼 수 있다.

(4) 절삭력, 칩형상 뿐만 아니라 응력분포, 온도분포 등 칩, 피삭재, 공구에 대한 모든 정보를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 절삭가공 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 기존의 연구내용을 고찰함으로써 유한요소법을 이용한 절삭모델의 개발과 관련된 연구현황 및 문제점 등을 파악하고, ANSYS 에서 제공하는 여러 가지 해석기법을 이용하여 칩형성과정을 구현하였다. 해석결과는 기존의 실험적 연구내용과 비교하여 그 타당성을 검토하였다.

2. 유한요소법을 이용한 연구동향

유한요소법을 이용하여 절삭가공을 해석하는 연구는 다음 두 부류로 나눌 수 있다. 정상상태에서의 온도 및 응력을 해석하는 정상상태 모델과 칩 형성 과정을 포함하는 칩형성 모델. 전자의 경우 정상상태에서의 칩과 피삭재를 검사체적(control volume)으로 설정하여야 하므로 칩의 형상을 미리 알아야 하며, 정상상태에서의 정보만 알 수 있는 단점이 있으나 비교적 적은 요소 수로 해석이 가능하며, 칩형성 모델의 가장 큰 단점인 칩분리 조건이 필요 없는 장점이 있다. 칩형성 모델의 경우 절삭가공 초기부터 정상상태까지 모든 가공정보를 얻을 수 있는 장점이 있으나 계산시간이 오래 걸리며 칩이 피삭재로부터 분리되는 칩분리 조건을 적절히 설정해야만 하는 문제가 있다.

최근에 발표되는 대부분의 연구들은 칩형성 모델에 관한 것이며 다양한 칩분리 조건들을 사용하고 있다. 현재까지 여러 가지 칩 분리 조건이 제시되었지만 어느 것이 절삭가공에 적합한가에 대해서는 많은 논란이 있었다. 현재까지 제시된 칩 분리 판별조건은 두 가지 유형 - 기하학적, 물리적 - 으로 나눌 수 있다.

Fig. 1은 칩형성을 묘사하기 위해 종종 사용하는 이중절점 방법을 보이고 있다. 피삭재의 두 부분 - 가공

후 각각 칩과 가공품이 될 윗부분과 아래부분 - 은 미리 정해져 있으며 이 부분을 분리선(parting line)이라 부른다. 이 분리선을 따라 같은 위치에 두개의 절점이 존재하며 윗부분과 아래부분을 묶고 있다. 기하학적 칩분리 조건은 공구 끝단의 o점과 바로 그 앞에 위치한 절점 a 사이의 거리 D를 기준으로 한다. 이 거리 D가 판별조건의 값보다 작을 때 두 절점은 묶여져 있다가 분리된다. 물리적 판별조건은 공구 끝단 바로 앞의 요소 A의 물리적 변수 - 응력, 변형률, 변형률에너지 등 - 의 값을 이용하여 요소의 물리적 변수 값이 재료의 선택된 값을 초과하는 순간 분리된다고 가정한다.

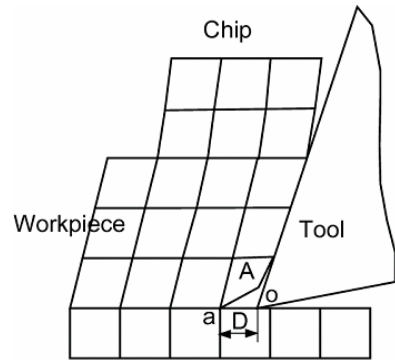


Fig. 1 Twin nodes method for chip separation

1982년 Usui와 Shirakashi^[3]는 요소의 크기가 충분히 작다면 공구 끝단에서의 피삭재의 파괴는 큰 의미를 가지지 않는다는 점에 주목하여 처음으로 기하학적 판별조건을 사용하였다. Komvopoulos와 Erenbeck^[4] 또한 칩 분리를 위하여 기하학적 판별조건을 사용하였는데, 해의 수렴문제를 해결하기 위해서는 공구끝단과 검토될 절점사이에 충분한 거리가 확보되어야 한다고 주장하였다. Zang과 Bagchi^[5]는 기하학적 판별조건이 요소 길이의 10 - 30% 됨을 보였다. 기하학적 분리조건은 단점은 물리적 의미가 모호하다는 점이다. 즉, 공학적인 측면에서 피삭재에서 칩으로의 분리에는 재료의 변형 및 파괴를 수반해야 할 것이며 이러한 물리적 특성을 고려한 설명이 필요함에도 불구하고 현재까지의 기하학적 분리조건에는 이에 대한 설명이 부족하다.

이러한 문제점 때문에 일단의 연구자들은 물리적 판별 조건을 찾으려 하였다. Iwata 등^[6]은 응력이력이

고려된 연성재질의 파괴조건을 사용하였다. Strenkowski와 Carroll^[7]는 유효 소성 변형률에 근거한 판별조건을 검토하였는데, 0.25 - 1.00 의 판별조건 값을 사용할 경우 칩의 형상은 거의 영향을 받지 않지만, 잔류응력의 값은 판별조건 값과 비례하는 문제점을 나타내었다. Strenkowski와 Mitchum^[8]도 유효소성변형률에 근거한 칩 분리조건을 사용하였으며, Lin과 Lin^[9]은 변형률에너지 밀도함수를 칩 분리 조건으로 사용하였다.

제거 기법을 이용하였다. 이 기법은 요소를 활성화시키거나 혹은 유명무실하게 만드는 기법인데, 요소의 강성행렬에 아주 작은(보통 $1. \times 10^{-8}$) 값을 곱함으로써 요소를 제거하는(killed) 효과를 나타낸다. 본 연구에서는 분리선을 따라서 아주 얇은 요소를 생성시키고 요소제거기법을 적용하였다. 공구가 진행함에 따라 이 요소들은 순차적으로 제거된다. 즉 절삭가공이 진행되면서 매 계산 단계마다 공구의 끝단이 모니터링

3. 유한요소 모델링

본 연구에서는 모델링의 편의를 위해 저속의 절삭가공을 대상으로 하였고 따라서 관성의 영향은 무시하고 준정적(quasi-static)이라 가정하였다. 대변형 해석을 위해 updated Lagrangian formulation 기법이 사용되었다. 지배방정식은 다음과 같다.

$$[K]_i \{\Delta U\}_{i+1} = \{F^{load}\} - \{F^{nr}\} \quad (1)$$

여기서 $\{\Delta U\}_{i+1}$ 는 절점변위벡터이고, $\{F^{load}\}$ 는 하중벡터, $\{F^{nr}\}$ 는 Newton-Raphson 하중보정벡터이다.

피삭재를 탄-소성체로 가정하였으며 가공경화를 고려하기 위하여 ANSYS에서 제공하는 Multi-linear isotropically strain hardening 모델을 사용하였다. 온도 및 재료의 변형률 속도 의존성은 고려되지 않았다. Von Mises 항복조건을 따르는 경우 재료의 등가응력은 다음과 같이 편차응력으로 정의된다.

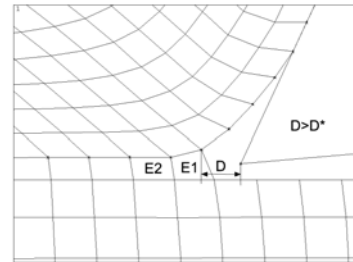
$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \{s\}^T \{s\}} \quad (2)$$

여기서 $\{s\}$ 는 편차응력벡터이다. 등가응력이 유효 소성응력, $\bar{\sigma}^{pl}$ 을 초과하면 소성변형이 발생하게 된다. 유효소성응력은 유효소성변형률 $\bar{\epsilon}^{pl}$ 의 함수이다.

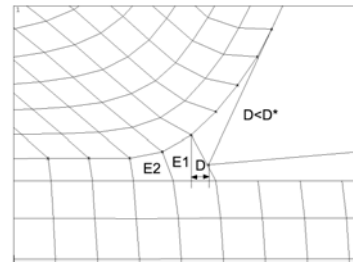
$$\bar{\sigma}^{pl} = \sigma_Y + \left[\frac{EE_T}{E - E_T} \right] \bar{\epsilon}^{pl} \quad (3)$$

여기서 E 는 elastic modulus이고 E_T 는 tangent modulus이다.

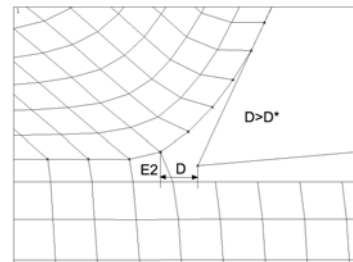
칩분리를 위하여 ANSYS에서 제공하는 요소 생성/



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Chip separation process: (a) $D > D^*$ so displacement of tool is increased toward element E1; (b) $D < D^*$ so element E1 is killed; (c) $D > D^*$ so tool is advanced toward element E2

되며, 공구 끝단 및 그 앞의 절점 사이의 거리가 미리 지정된 판별조건 D^* 에 도달하게 되면 요소제거기법이 적용된 얇은 요소들은 제거된다. Fig. 2에 이러한 과정을 보여주고 있다.

공구 끝단 모니터링, 요소제거, 공구 진행 등을 자동적으로 수행하기 위하여 ANSYS Parametric Design Language (APDL)을 사용하였다. 해석과정의 흐름도를 Fig. 3에 나타내었다.

칩-공구의 접촉해석을 위해서 피삭재의 앞부분과 칩의 아래부분에는 접촉요소(CONTACT48)를 사용하였다. 접촉부에는 쿨롱 마찰법칙을 사용하였다.

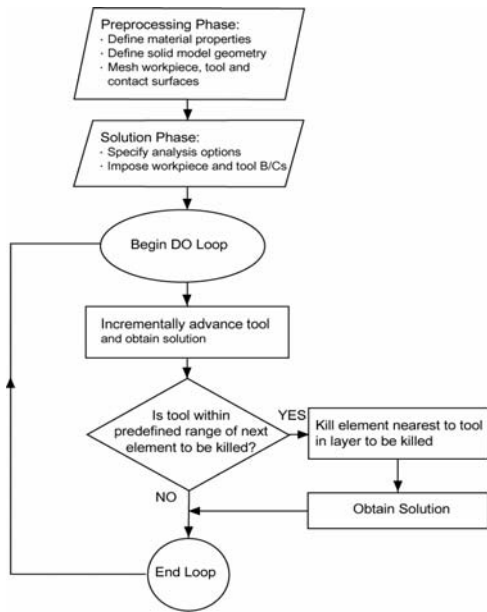


Fig. 3 Flowchart of program logic

피삭재는 4절점 2차원 등매개요소(PLANE42)가 사용되었으며, 평면변형률 문제로 가정되었다. 해석을 위한 유한요소모델을 Fig. 4에 나타내었다. 특히 칩의 아래 부분에 보다 조밀한 메쉬가 사용되어 이 부분에서의 극심한 변형해석을 원활히 수행하도록 하였다. 또한 칩을 형성할 부분의 메쉬를 45° 기울어지게 하여 요소를 형성하였는데, 이는 이 부분에 발생할 극심한 전단변형을 고려한 결과이며 과도한 요소변형을 줄여 수 치계산상의 편의를 도모하기 위함이다. 피삭재의 왼쪽과 아래쪽 부위는 각각 변위구속을 하였으며 공

구의 이동은 변위경계조건의 값을 변화시킴으로써 구현하였다.

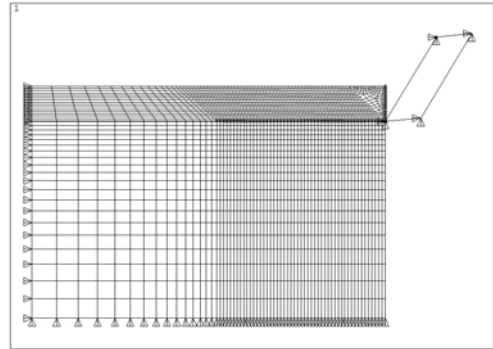


Fig. 4 Finite element modeling

4. 해석결과 및 분석

유한요소모델의 타당성을 검토하기 위하여 Weinmann과 Von Turkovich의 연구^[10]와 비교하였다. 피삭재는 70/30 황동이며 절삭속도 0.238 mm/s, 절삭 깊이 1.27 mm, 절삭너비 4.72 mm, 상면경사각 30° , 여유각 5° 의 가공조건을 가진다. 해석에 사용된 70/30 황동의 응력-변형률 데이터는 Weinmann과 Von Turkovich의 논문자료를 사용하였다.

Fig. 5는 유한요소해석과 Weinmann과 Von Turkovich의 실험에서 얻어진 절삭력을 비교한 그림이다. 계산에 의해 얻어진 절삭력 곡선이 톱니 모양인 것은 칩의 형성이 연속적이지 않고 칩분리 조건에 따른 이산적인 요소제거 때문이다. 각 톱니 모양에서 최대값은 요소가 없어지기 직전을 나타내고 최소값은 요소가 제거된 직후를 나타낸다. 절삭방향의 주분력은 마찰계수 0.47을 사용한 계산값과 마찰을 고려하지 않은 계산값 사이에 실험값이 존재함에 비해, 절삭방향에 수직인 배분력의 경우 마찰계수 0.47의 경우가 실험값과 매우 잘 일치한다. 이는 마찰계수 0.47을 사용하는 것이 배분력을 잘 예측한다고 보기보다는 배분력 계산에 문제점을 갖는 본 모델의 특성에 기인한다고 생각된다. 일반적으로 배분력은 공구끝단과 여유면에서의 접촉에 의해 영향을 받는데, 본 모델의 경우 이를 전혀 고려하지 못하고 있으며 이에 따라 과도

한 마찰계수에 의한 배분력 계산값이 실험값과 유사한 결과를 보인다고 판단된다. 칩-공구 접촉면의 마찰을 고려한 경우 절삭방향의 힘은 증가하고 수직방향의 힘은 감소함을 알 수 있다.

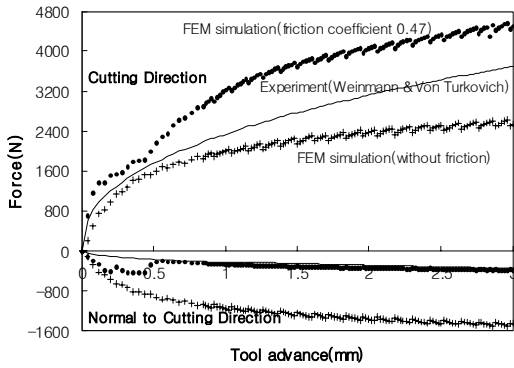
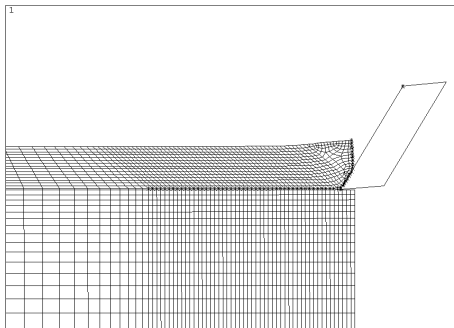
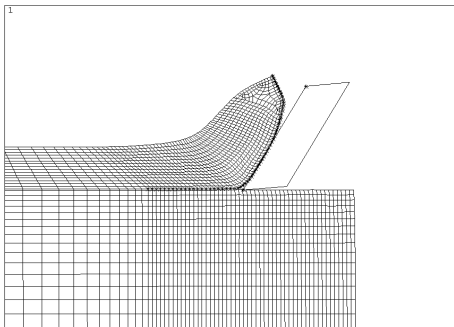


Fig. 5 Cutting and thrust force comparison



(a) at 0.4mm



(b) at 3mm

Fig. 6 Chip formation process

Fig. 6은 칩형성 과정을 시뮬레이션 한 그림이다. 공구가 진행함에 따라 전단면이 형성되며 칩이 두꺼워짐을 알 수 있다.

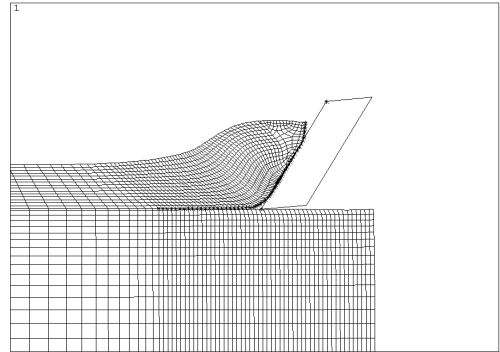
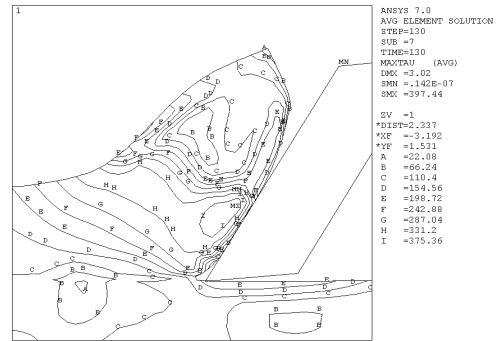
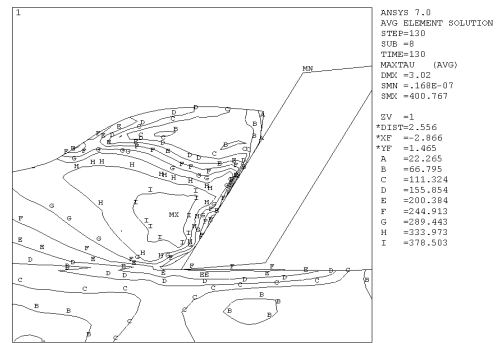


Fig. 7 Chip formation with friction coefficient 0.47



(a) without friction



(b) with friction coefficient 0.47

Fig. 8 Max. shear stress(MPa) distributions at 3.1mm

Fig. 7은 마찰을 고려할 때 칩 형상을 나타낸다. 마찰계수 0.47을 사용하여 해석을 수행하였으며 공구진행 3mm 상태에서, Fig. 6 (b)와 비교해 볼 때 마찰계수를 고려할 경우 칩의 두께는 두꺼워지며 길이는 짧아짐을 알 수 있다. 이는 칩-공구 접촉면에서 마찰의 영향으로 변형을 발생시키기 때문이다.

Fig. 8은 최대전단응력분포를 보이고 있다. 전단면을 중심으로 하는 제 1 변형 영역과 칩-공구 접촉면에서의 제 2 변형 영역을 잘 나타내고 있다. 최대값은 397.44 MPa이며 칩-공구 접촉면에서 발생함을 알 수 있다. 마찰을 고려할 경우 최대전단응력의 최대값은 마찰을 고려하지 않은 경우와 큰 차이가 없으나 분포를 살펴보면 더욱 넓은 영역에 걸쳐 큰 값을 보이고 있다. 또한 칩-공구 접촉길어도 증가함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 상용 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 절삭 시뮬레이션을 수행하였으며 다음의 결론을 얻을 수 있다.

1. ANSYS의 요소제거기법과 기하학적 칩분리조건을 사용하여 2차원 저속절삭에 대한 칩형성 시뮬레이션이 가능하였다.
2. Weinmann과 Von Turkovich의 실험결과와 비교하여 해석의 신뢰성을 검증하였다. 유한요소해석을 통하여 절삭력을 비롯하여 응력분포, 전단면의 생성, 칩 두께, 칩-공구 접촉길이 등 여러 가지 정보를 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. Shaw, M. C., Metal Cutting Principles, Clarendon Press, Oxford, 1984.
2. Oxley, P. L. B., The Mechanics of Machining: An Analytical Approach to Assessing Machinability, Ellis Horwood Limited, 1989.
3. Usui, E., and Shirakashi, T., "Mechanics of Machining - From 'Descriptive' to 'Predictive' Theory," On the Art of Cutting Metals-75 Years Later, ASME

- Publication PED-Vol. 7, pp. 13-35, 1982.
4. Komvopoulos, K., and Erenbeck, S. A., "Finite Element Modeling of Orthogonal Metal Cutting," J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 113, pp. 253-267, 1991.
5. Zhang, B., and Bagchi, A., "Finite Element Simulation of Chip Formation and Comparison with Machining Experiment," J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 116, pp. 289-297, 1994.
6. Iwata, K., Osakada, K., and Terasaka, Y., "Process Modeling of Orthogonal Cutting by the Rigid-Plastic Finite Element Method," ASME J. Eng. Matl. and Tech., Vol. 106, pp. 132-138, 1984.
7. Strenkowski, J. S., and Carroll, III, J. T., "A Finite Element Method of Orthogonal Metal Cutting," J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 107, pp. 346-354, 1985.
8. Strenkowski, J. S., and Mitchum, G. L., "An Improved Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting," Proc. North American Manufacturing Res. Conf., Bethlehem, Pa, pp. 506-509, 1987.
9. Lin, Z. C., and Lin, S. Y., "A Coupled Finite Element Model of Thermal-Elastic-Plastic Large Deformation for Orthogonal Cutting," J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 114, pp. 218-226, 1992.
10. Weinmann, K. J., and Von Turkovich, B.F., "Mechanics of Tool Workpiece Engagement and Incipient Deformation in Machining of 70/30 Brass," J. Eng. Ind., Vol. 93, pp. 1079-1089, 1971.