한국정밀공학회지 제 17 권 제 10 호 (2000 년 10 월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 17, No. 10, October 2000.

유한요소법을 이용한 버 형성 예측 모듈의 개발

고대철*, 고성림**

Development of a Module to Predict Burr Formation Using the Finite Element Method

Dae-Cheol Ko * and Sung-Lim Ko**

ABSTRACT

The objective of this study is to develop an analytical module for the prediction of burr formation during cutting process using the finite element method. This module is based on the rigid-plastic finite element method, ductile fracture criterion, fracture propagation technique and node separation criterion. The sequence of burr formation from burr initiation through end of burr formation is simulated and investigated by this module. The effect of material properties, such as AL6061-T6, AL2024-T4 and Copper, and cutting condition, such as rake angle and cutting depth, on burr formation is also discussed in this study. To validate this module the analysis results are compared with experimental ones.

Key Words : Burr formation(버 형성), Finite element method(유한요소법), Ductile fracture criterion(연성파단기준), Fracture propagation technique(파단전파기법), Node separation(절점분리기준)

1. 서론

모든 절삭가공에서 두면이 만나는 모서리부에서는 공구의 모서리부 이탈시에 피삭재의 절삭저항으로 밀림현상이 발달하여 소성변형을 일으키게 된다. 이와같은 소성변형의 결과로 발생하는 모서리부의 바람직스럽지 못한 돌출부를 버(burr)라고 정의한다. 절삭가공에서 발생하는 버는 가공 후 치수정밀도와 생산공정의 자동화에 있어서 많은 문제를 야기시키므로 효율적인 버 제거 및 버 발생 최소화를 위한 기술은 상당히 중요하다고 생각된다.

단속절삭에서 있어서 공구인선의 파괴를 연구한 Pekelharing[1]은 탄소성 유한요소법을 이용하여 공구이탈시 피삭재 모서리부의 변형을 해석하였다. Gillespie 등[2]은 절삭가공에서 형성되는 버 형상의 유형을 분류하였으며, Iwata 등[3]은 SEM 과 유한요소법을 이용하여 버 형성에 관한 메카니즘을 조사하였다. Ko[4, 5]는 소성이론과 실험적인 관찰을 이용한 해석적인 방법으로 버 형성 메카니즘을 가정하여 버의 크기 및 파단부의 형상을 예측하고 이를 실험과 비교하였다. 그러나 앞서 언급된 연구들은 버 형성의 초기단계에서 최종단계까지 연속적인 버 형성과정을 완전하게 설명하지 못하였으며, 버 형성에 대한 피삭재 재질과 절삭조건의 영향을 고려하지 못하였다.

* 양산대학 메카트로닉스과
** 건국대학교 기계설계학과

Usui 등[6]이 정상상태의 절삭가공에 유한요소법을 적용한 이후로 유한요소법을 활용한 연구가 많이 수행되어 왔으나[7,8], 대부분 정상상태나 비정상상태의 절삭가공에서 연속형 칩이나 절단형 칩의 형성을 모델링하는 문제에 집중되어 있다. 따라서 버 형성을 모델링하기 위한 해석기법이 필요하다.

본 연구의 목적은 유한요소법을 이용하여 버 형성을 예측하기 위한 해석모듈을 개발하는데 있다. 이를 위해 절삭가공의 수치해석을 위한 전용 유한요소 프로그램을 개발하여 절삭가공에서 공구 이탈 시에 발생하는 버 형성을 초기단계부터 최종단계까지 연속적으로 시뮬레이션하고자 하다. 또한 버 형성에 관한 피삭재 재질 및 절삭조건의 영향을 파악하여 향후 효율적인 버 제거를 위한 전문가시스템이나 버 제거장비의 개발에 있어 유용한 도구로서의 활용가능성을 검토하고자 한다. 본 연구에서 제시된 해석모듈의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션 결과와 주사형 전자현미경(scanning electron microscope)내에서의 2 차원 절삭실험 결과와 정량적으로 비교하였다.

2. 버 형성 예측을 위한 해석모듈 개발

2.1 강소성 유한요소법

강소성 유한요소법은 대소성 변형의 해석을 위한 가장 유용한 방법이므로, 본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용하여 2 차원 절삭가공의 해석을 수행하였다. 이의 수식화과정은 많은 문헌에 잘 알려져 있으므로 간략하게 언급한다.[9,10] 강소성 재료에 대한 범함수(functional), π 는 다음과 같다.

$$\pi = \int_V \bar{\sigma}\,\dot{\bar{\varepsilon}}\,dV - \int_{S_F} \bar{t}_i v_i dS \tag{1}$$

여기서, $\bar{\sigma}$ 는 유효응력, $\dot{\bar{\varepsilon}}$ 는 유효변형률 속도이다. 비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function), K 를 도입하면, 위의 식(1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같다.

$$\delta\pi = \int_V \bar{\sigma}\,\delta\dot{\bar{\varepsilon}}\,dV + K\int_V \dot{\varepsilon}_v \delta\dot{\varepsilon}_v dV - \int_{S_F} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \tag{2}$$

여기서, $\dot{\varepsilon}_v$ 는 체적변형률 속도이다.

위의 식(2)는 일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴우톤 랩슨법(Newton Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

2.2 버 형성 예측 기법

절삭가공에서 형성되는 버는 피삭재 재질 및 절삭조건의 영향을 받는다. 특히, 버 형성과정에 있어서 파단의 발생 및 전파가 이루어지기 전의 피삭재 변형과 파단의 전파가 최종적인 버의 형상에 대단히 중요한 인자가 된다.[11] 따라서 버 형성에 관한 피삭재 재질 및 절삭조건의 영향을 수치해석적으로 접근하기 위해서는 피삭재의 변형해석과 더불어 버 형성에 수반되는 파단의 발생과 전파를 효과적으로 처리하여야 한다.

버 형성 중에 일어나는 파단의 시작을 예측하기 위해 본 연구에서는 연성파단기준을 도입하였다. 변형공정 중에 일어나는 재료의 연성파단을 예측하기 위한 기준은 실제 산업현장에서 적용되는 공정과 유사한 실험을 근거로 제시되었다.[12-14] 연성파단의 시작은 응력과 변형률 경로에 좌우되므로 대부분의 연성파단 기준식은 응력과 변형률의 적분형태로 제시되어 있다. 또한 이와 같이 적분된 값이 임의의 값에 도달하였을 때 연성파단이 시작되는 것으로 고려한다. 본 연구에서는 버 형성 중에 일어나는 파단의 예측을 위해 수정된 Cockcroft-Latham 의 연성파단 기준식[12]을 이용하였다. 즉,

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} \frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}}\, d\bar{\varepsilon} = C \tag{3}$$

여기서, $\bar{\varepsilon}_f$ 는 파단시 유효변형률, $\bar{\varepsilon}$ 는 유효변형률, σ^* 는 주인장 응력의 최대치, C 는 재료상수이다. 절삭가공 동안 주인장 응력의 최대치와 유효응력의 비가 일정하게 유지된다고 가정하면, 위의 식 (3)은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\int_0^{\bar{\varepsilon}_f} d\bar{\varepsilon} = C_1 \tag{4}$$

또한 유한요소 해석을 위해 위의 식(4)는 증분 개념으로 다음과 같이 근사화하여 이용하였다.

$$\sum_{i=1}^{n} \left(\Delta\bar{\varepsilon}_e\right)_i = C_1 \tag{5}$$

여기서, n 은 스텝수, $\Delta\bar{\varepsilon}_e$ 는 각 요소의 유효변형

률 증분을 나타낸다. 위의 식(5)는 유한요소 해석의 매 스텝에서 각 요소에 대해 계산하였으며, 변형경로를 따라 그 값을 누적하여 변형률이 피삭재의 파단변형률 즉, 식(5)의 C_1 에 도달하였을때 파단이 발생한다고 가정하였다.

파단발생 이후의 버 형성과정을 시뮬레이션하기 위해서는 파단의 전파를 효과적으로 고려하여야 한다. 본 연구에서는 버 형성 중에 파단의 전파현상을 고려하기 위해 특정 요소의 유효변형률 값이 파단 유효변형률에 도달하면 그 요소의 강성값에 감속계수(reduction factor)를 곱하여 강성값을 매우 작게 함으로써 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하게 하였다.[15] 즉,

$$r_f \tilde{\mathbf{K}}_e \Delta \hat{\mathbf{v}} = \tilde{\mathbf{L}}_e \qquad (6)$$

여기서, r_f 는 감속계수, $\tilde{\mathbf{K}}_e$ 와 $\tilde{\mathbf{L}}_e$ 는 요소수준의 강성행렬 및 로드벡터, $\hat{\mathbf{v}}$ 는 절점속도벡터이다.

버 형성의 초기단계부터 최종단계까지 연속적인 버 형성과정을 시뮬레이션하기 위해서는 비정상 상태의 절삭가공 해석이 요구되며, 이를 위해서는 칩 형성과 버 형성을 동시에 고려해야 한다. 따라서 공구 인선부에서 칩 형성부와 가공면의 처리를 위해 Fig. 1 과 같이 공구와 피삭재 사이의 기하학적 조건[16]을 이용하였다. 절삭이 진행됨에 따라 공구인선부로부터 적정거리에 위치한 절점(Fig. 1 의 I)은 칩으로 형성되는 절점과 가공면으로 형성되어 공구와 접촉하는 2 개의 절점(Fig. 1 의 J, K)으로 분리된다. 또한 공구 및 피삭재 접촉면에서의 마찰은 Iwata 등[7]이 제시한 아래의 조건식을 적용하였다. 즉,

$$\tau_f = (H_v / 0.07)\tanh(0.07\mu p / H_v)\,[\mathrm{Mpa}] \qquad (7)$$

여기서, H_v 는 공작물의 비커스 경도이고, μ 는 마찰계수이며 본 논문에서는 0.15 로 가정하였다.

이상에서 언급된 연성파단기준, 파단전파기법, 절점분리법 등을 이용하여 버 형성을 예측하기 위한 유한요소 해석모듈의 흐름도는 Fig. 2 와 같다. 피삭재 치수, 공구 경사각 또는 여유각과 같은 정보로부터 초기격자 시스템이 구성된다. 변형경로의 각 스텝에서 계산된 절점속도와 시간증분으로 절점속도가 변화되고 유효변형률은 변형경로를 따라 적분된다. 변형경로의 각 스텝에서 공구와 피삭재 사이의 기하학적 조건에 의해 공구인선부에서의 절점분리가 행해지고, 변형률장은 연성파단의 발생여부를 판단하기 위해 식(5)의 연성파단기준식을 계산하는데 이용된다. 또한 파단이 일어난 요소에 대해 파단전파기법을 이용하여 파단의 전파현상을 고려하였다.

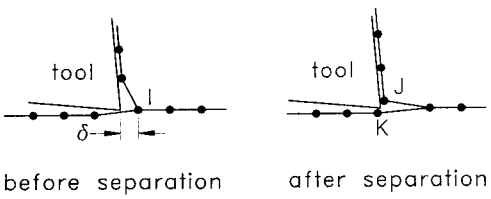


Fig. 1 Treatment of the nodal points near the tool edge.

3. 유한요소 모델링

절삭가공의 해석에 이용된 피삭재의 형상과

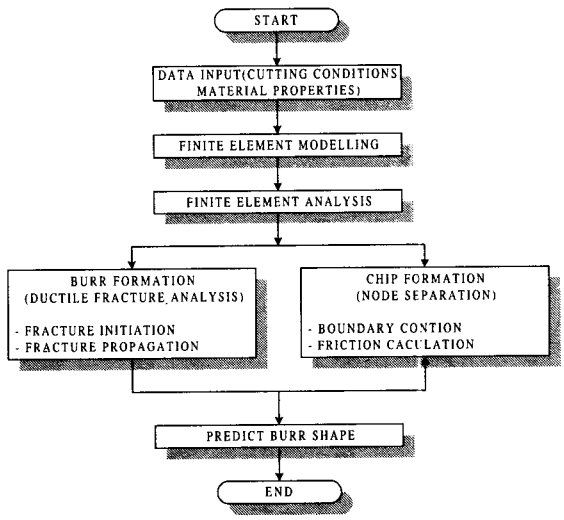


Fig. 2 Flow-chart for prediction of burr formation.

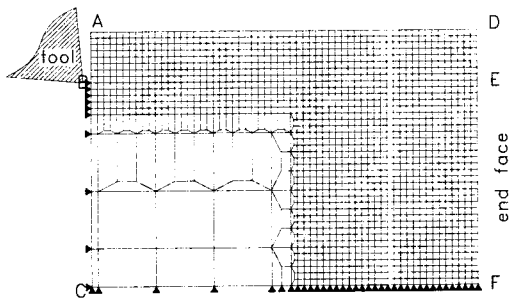


Fig. 3 Finite element modeling for orthogonal cutting.

경계조건은 Fig. 3 과 같다. 평면변형률 상태로 좌측에서 우측으로 행해지는 수평절삭을 모델링하였다. 피삭재의 길이는 1.5mm, 높이는 1.0mm 이며, 절삭폭은 단위깊이로 정하였다. Fig. 3 의 AD 면은 피삭재의 상면이고 DE 면은 이탈단의 모서리이며, BE 면은 가공예정면이다. 피삭재의 강체회전에 대한 영향을 줄이고 비정상 상태의 절삭가공을 빠른 계산시간 내에 정상상태에 도달시키기 위해 BC 면과 CF 면상에 위치한 절점의 변위는 고정하였다. 공구진행에 따른 버 형성의 단계를 관찰하기 위하여 D 점의 변위를 시뮬레이션으로 측정하였다.

피삭재 재질에 따른 버 형성의 영향을 파악하기 위하여 시뮬레이션에 사용된 소재는 AL6061-T6, AL2024-T4, Copper 이며, 이러한 재료의 응력-변형률 관계 및 연성파단 판정 기준값은 Table 1 과 같다. 세가지 재료에 대한 시뮬레이션에서 공구 경사각 및 여유각은 각각 10^{o}, 5^{o} 이고 절삭깊이는 0.2mm 로 동일하게 유지하였다.

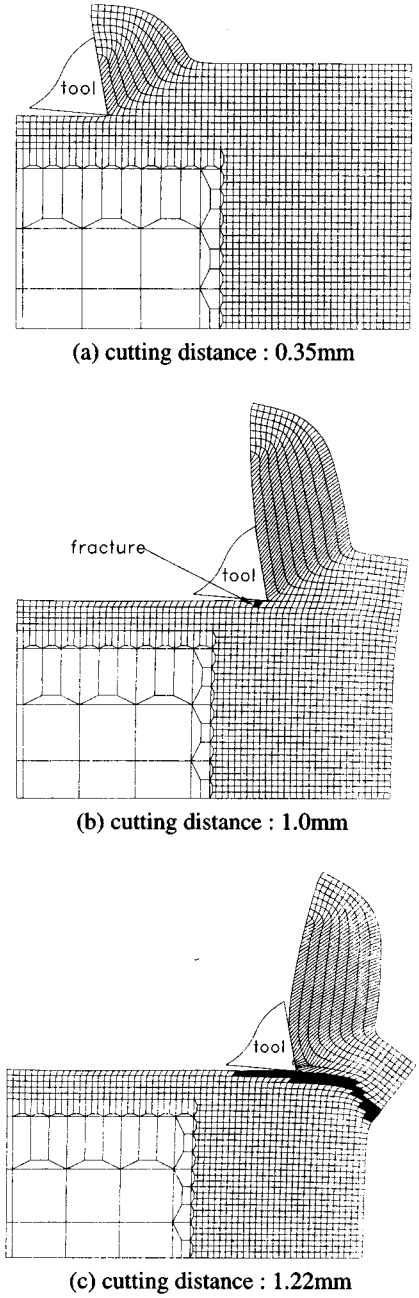
절삭가공 조건의 변화에 따른 버 형성의 영향을 관찰하기 위하여 AL6061-T6 재료에 대하여 공구 경사각을 20^{o}, 30^{o} 로, 절삭깊이를 0.1mm, 0.15mm 로 각각 변화하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 조건들을 Table 2 에 요약해 놓았다.

Table 1 Material properties of workpieces.[4]

Property / Material	Work-hardening property		Fracture strain
	K	N	
AL6061-T6	414[Mpa]	0.05	0.50
AL2024-T4	689[Mpa]	0.15	0.13
Copper	496[Mpa]	0.54	2.30

Table 2 Computational condition to investigate effect of cutting condition on burr formation for AL6061-T6.

Case	Rake angle, α	Cutting depth, *d*
I	10°	0.2mm
II	10°	0.15mm
III	10°	0.1mm
IV	20°	0.2mm
V	30°	0.2mm



(a) cutting distance : 0.35mm

(b) cutting distance : 1.0mm

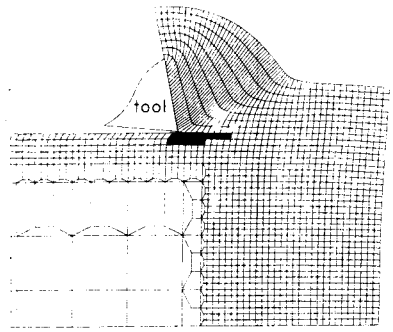
(c) cutting distance : 1.22mm

Fig. 4 Finite element simulation of burr formation for AL6061-T6.

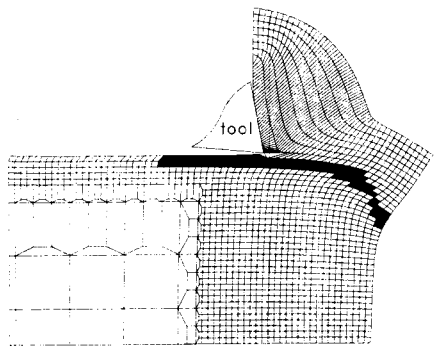
4. 적용결과 및 고찰

4.1 피삭재 재질의 영향

Fig. 3 의 경계조건 하에서 저속절삭에 따른 AL6061-T6 의 칩 형성 및 버 형성과정을 Fig. 4 에 공구이송에 따라 단계별로 나타내었다. Fig. 4(a)에서 공구의 진행에 따라 칩이 형성되고 있으며, 공구가 약간 더 진행하게 되면 정상상태에 도달함을 관찰할 수 있었다. Fig. 4(b)에서 공구이송거리가 약 0.97mm 에 이르렀을때 최초의 파단이 발생함을 볼 수 있다. Fig. 4(b)와 (c)에서 검게 표시된 요소는 식(5)의 연성파단기준에 의해 재료의 파단변형률을 초과한 요소를 나타내고 있으며, Fig. 4(c)에서 파단전파기법에 의해 파단의 전파를 시뮬레이션할 수 있음을 알 수 있다. 공구가 피삭재의 끝면에 접근할수록 버가 형성되고 있음을 볼 수 있으며, 공구가 진행함에 따라 파단발생의 초기에는 공구 진행방향으로 파단이 전파되고 공구가 더욱 진행함에 따라 피삭재 끝면의 버 회전중심점을 향해 파단의 전파가 이루어짐을 관찰할 수 있다

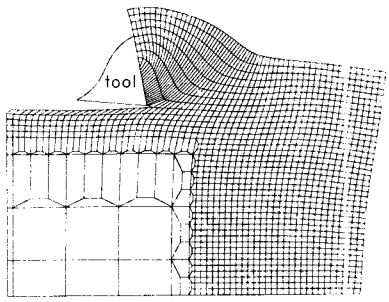


(a) cutting distance: 0.69mm

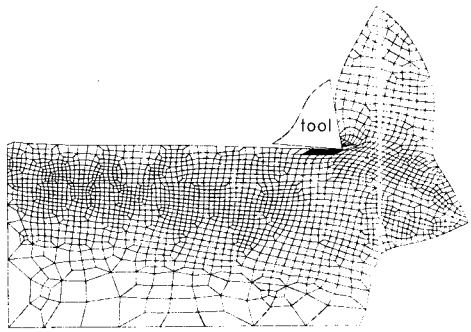


(b) cutting distance: 1.07mm

Fig. 5 Finite element simulation of burr formation for AL2024-T4.



(a) cutting distance:0.60mm

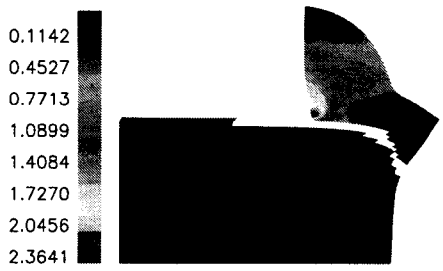


(b) cutting distance: 1.43mm

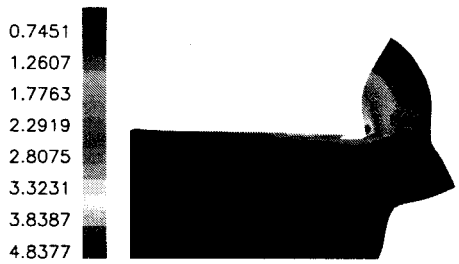
Fig. 6 Finite element simulation of burr formation for Copper.

AL2024-T4 와 Copper 에 대한 시뮬레이션 결과는 Figs. 5, 6 과 같다. Fig. 5 에 나타낸 AL2024-T4 의 경우 파단이 발생되는 공구위치는 다르지만 Fig. 4 의 AL6061-T6 와 거의 유사한 변형거동을 관찰할 수 있다. 그러나 Copper 의 경우 Fig. 6 에서 볼 수 있듯이 절삭가공의 초기단계부터 피삭재 끝면의 변형이 시작됨을 볼 수 있다. 공구의 진행에 따라 파단없이 피삭재 끝면에서 버의 형성이 이루어짐을 관찰할 수 있으며, 버의 형성이 완료되는 시점에서 파단이 발생함을 알 수 있다. 또한 AL6061-T6 와 AL2024-T4 와는 달리 파단의 전파가 공구이송방향으로 이루어짐을 볼 수 있다. 이상의 결과로부터 개발된 유한요소 해석모듈을 활용하여

(a) AL6061-T6



(b) AL2024-T4



(c) Copper

Fig. 7 Distribution of effective strain during burr formation.

버 형성의 초기단계부터 최종단계까지 연속적인 시뮬레이션이 가능하며, 피삭재의 재질변화에 따른 버 형성의 영향에 관한 관찰이 가능함을 알 수 있다.

버 형성의 단계에서 피삭재 내부의 유효변형률의 분포를 Fig. 7 에 나타내었다. AL6061-T6 와 AL2024-T4 의 경우 파단의 진행은 높은 유효변형률이 존재하는 음의 전단영역(negative shear plane)을 따라서 일어나고 있으며, 이에 비해 Copper 의 경우에는 버의 형성이 거의 완료된 이후에 파단이

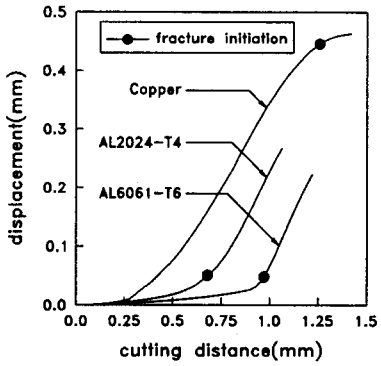


Fig. 8 Variation of displacement of point D in Fig. 3.

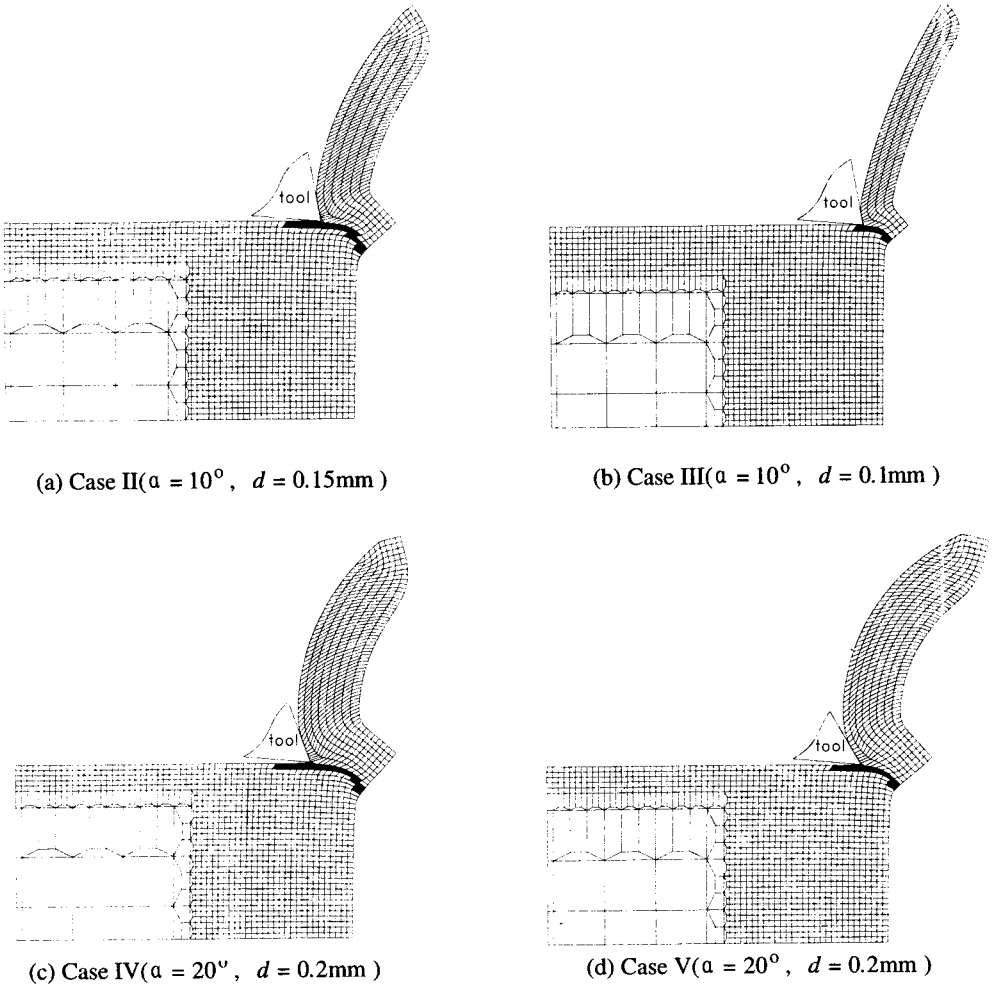
발생하며 파단의 전파가 절삭예정선을 따라 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 특히, Copper 의 경우 형성되는 버의 높이와 두께가 알루미늄 합금보다 크므로 버 형성동안에 일어나는 파단의 전파가 버의 높이에 상당한 영향이 있음을 Fig. 7 에서 관찰할 수 있다.

공구이송에 따른 버의 형성단계를 보다 구체적으로 관찰하기 위하여 Fig. 3 에 나타낸 D 점의 변위를 조사하여 Fig. 8 에 나타내었다. AL6061-T6 와 AL2024-T4 의 경우 D 점 변위의 변화가 파단발생 시점을 기준으로 급격하게 변화함을 관찰할 수 있다. 이에 반해 Copper 의 경우 절삭가공의 초기단계부터 공구가 진행함에 따라 D 점의 변위가 급격하게 변하고 있으며, 파단발생 이후에는 변위의 변화가 거의 없다. 따라서 알루미늄 합금의 경우 버 형성이 완료되기 전에 피삭재의 파단을 유발하며, 파단의 시작으로 인하여 버 형성부위의 급격한 변형이 이루어짐을 알 수 있다.

4.2 절삭조건의 영향

동일한 재질의 피삭재에 대해 절삭조건의 변화에 따른 버 형성의 영향을 관찰하기 위하여 4.1 절의 AL6061-T6 에 대한 절삭조건(공구 경사각, $\alpha = 10^{\circ}$, 절삭깊이, $d = 0.2$mm)을 Case I 으로 정하고 절삭깊이, d 를 0.15mm, 0.1mm 로, 공구 경사각, α 를 20°, 30° 로 각각 변화시켜 Case II~V 의 4 가지 경우에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 이러한 조건들은 3 절에서 언급한 바와 같이 Table 2 에 요약해 놓았다.

절삭깊이와 공구 경사각의 변화에 따른 피삭



(a) Case II($\alpha = 10^{o}$, $d = 0.15$mm)

(b) Case III($\alpha = 10^{o}$, $d = 0.1$mm)

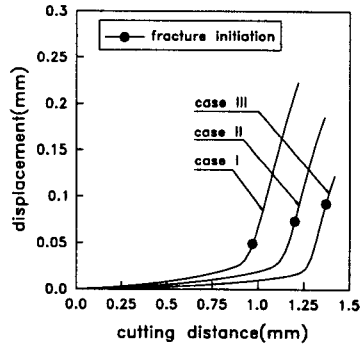
(c) Case IV($\alpha = 20^{o}$, $d = 0.2$mm)

(d) Case V($\alpha = 20^{o}$, $d = 0.2$mm)

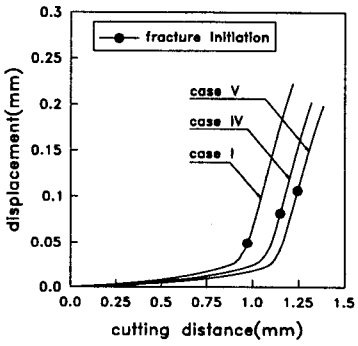
Fig. 9 Finite element simulation of various cutting depths and rake angles.

재의 칩 형성과 버 형성에 관한 시뮬레이션 결과는 Fig. 9 와 같다. 절삭깊이와 공구 경사각의 변화에 상관없이 Case II~V 의 4 가지 경우 모두 Fig. 4 의 Case I 보다 정상상태의 절삭이 많이 진행되다가 파단이 발생함을 볼 수 있다. Figs. 4 와 9 에서 절삭깊이가 작을수록 공구 경사각이 클수록 파단의 시작이 지연됨을 관찰할 수 있고, Case II~V 의 모든 경우에서 공구가 DF 면에 접근함에 따라 버의 회전중심에 가까운 고정점을 중심으로 버가 회전에 의한 변형을 함에 따라 파단면은 음의 전단면을 따라 발생함을 볼 수 있다. 또한 절삭깊이와 공구 경사각이 큰 가공조건에서 공구 인선부 주위의 변형이 상당히 크다는 것을 알 수 있다.

절삭깊이와 공구 경사각의 변화에 따른 버 형성의 단계를 자세히 관찰하기 위해 Fig. 3 에 나타낸 초기 피삭재의 버 형성부 끝점인 D 점의 변위 변화를 시뮬레이션으로 측정하여 Fig. 10 에 나타내었다. Fig. 10(a), (b)에서 절삭깊이가 작을수록 공구 경사각이 클수록 어느정도의 버 형성이 이루어진 후에 파단이 발생함을 볼 수 있다. 이는 절삭깊이가 작고 공구 경사각이 큰 절삭조건일수록 버 형성부위에 적은 소성변형을 유발시키므로 피삭재가 보다 많은 소성변형을 받아야 비로소 파단이 발생하기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다.

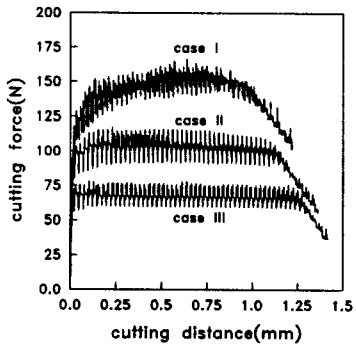


(a) effect of cutting depth

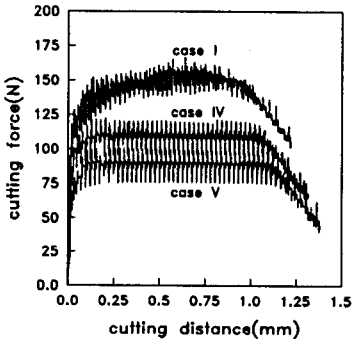


(b) effect of rake angle

Fig. 10 Variation of displacement of point D in Fig. 3.



(a) effect of cutting depth



(b) effect of rake angle

Fig. 11 Variation of cutting force.

동일한 피삭재에 대해 절삭깊이와 공구 경사각의 변화에 따른 절삭력의 변화를 Fig. 11 에 나타내었다. Case II~V 는 Case I 에 비해 피삭재에 적은 소성변형을 유발시키므로 파단발생 및 버 형성의 시기가 지연된다. 따라서 정상상태의 절삭이 오래 지속됨을 관찰할 수 있다. 또한 절삭깊이가 작고 공구 경사각이 큰 절삭조건일수록 절삭력이 작으며, 모든 경우에 있어서 파단발생이후에는 파단의 전파로 인한 변형영역의 감소로 인해 절삭력이 급격히 감소함을 볼 수 있다.

4.3 실험결과와의 비교

시뮬레이션 결과의 검증을 위해 AL6061-T6 와 AL2024-T4 를 주사형 전자현미경내에서 절삭하여 얻은 실험결과[4]와 비교해 보고자 한다. 절삭실험 조건은 시뮬레이션에서 사용한 조건과 동일하며 절삭폭은 2 차원 가공시 평면변형률 상태를 유지하기 위하여 3mm 를 사용하였다. 실험에서 절삭깊이는 정확히 측정하기 어려우므로 절삭저항의 크기를 이용하여 단위 절삭폭에 대하여 동일한 절삭저항은 동일한 절삭깊이로 가정하였다.

시뮬레이션이 단위 절삭폭에 대해 수행되었으므로 측정한 절삭력을 단위 절삭폭에 대한 절삭력으로 환산하였다. 실험 및 시뮬레이션에서 버 형성중 파단시의 공구위치, $x_{f,EXP}$, $x_{f,FEM}$ 과 파단시 음의 전단각, $\beta_{f,EXP}$, $\beta_{f,FEM}$ 을 각각 측정하여 Table 3 에 나타내었다. 앞서의 연구결과[4,5]에서 제시하였듯이 파단각의 크기는 절삭깊이에 무관하며, 파단위치는 절삭깊이의 크기에 비례하기 때문에 시뮬레이션에서 측정된 동일한 절삭저항에 해당하는 절삭깊이에서의 파단위치로 환산하여야 한다. 그 결과를 $x_{f,EXP}'$ 로 Table 3 에 나타내었다. 두 알루미늄 합금에 대한 시뮬레이션결과와 측정결과를 비교해보면 파단각의 측정치는 시뮬레이션 결과인 23.04° 와 21.20° 를 포함하고 있으며, 파단

Table 3 Comparison between predicted and measured value.

Material	Cutting force(N)		Fracture location(mm)			Fracture negative shear angle(°)	
	F_{EXP}	F_{FEM}	$x_{f,EXP}$	$x_{f,EXP}$	$x_{f,FEM}$	$\beta_{f,EXP}$	$\beta_{f,FEM}$
AL6061-T6	155.8	155.6	0.56	0.56	0.5291	28.2	23.04
	203.1		0.81	0.62		22.4	
	228.6		0.94	0.63		25.2	
	221.1		0.94	0.66		24.7	
AL2024-T4	171.4	223.6	0.56	0.73	0.8195	29.6	21.20
	184.1		0.56	0.68		25.5	
	228.6		0.76	0.74		22.4	
	215.8		0.81	0.83		20.6	
	235.0		0.81	0.77		25.3	

면의 위치는 매우 근사한 예측을 하고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 절삭가공에서 버 형성을 예측하기 위한 유한요소 해석모듈을 개발하고 버 형성에 대한 피삭재 재질 및 절삭조건의 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 개발된 유한요소 해석모듈을 활용하여 버 형성의 초기단계부터 최종단계까지 연속적인 시뮬레이션이 가능하였다.

(2) 취성재료인 AL6061-T6 와 AL2024-T4 의 경우 높은 유효변형률이 존재하는 음의 전단영역을 따라 파단이 진행되었으며, 연성재료인 Copper 의 경우에는 버의 형성이 거의 완료된 이후에 파단이 발생하며 파단의 진행은 절삭 예정선을 따라 이루어졌다.

(3) Copper 의 경우 버의 높이와 두께가 알루미늄 합금보다 크므로 버 형성동안에 일어나는 파단의 전파가 버의 높이에 상당한 영향이 있음을 관찰할 수 있었다.

(4) 절삭깊이가 작고 공구 경사각이 큰 절삭가공 조건일수록 버 형성부에 적은 소성변형을 유발시키므로 피삭재가 보다 많은 소성변형을 받아야 비로소 파단이 발생하므로 파단 발생의 시기가 지연되었다.

(5) 절삭깊이가 작고 공구경사각이 큰 절삭조건은 피삭재에 적은 소성변형을 유발시켜 파단발생 및 버 형성의 시기가 지연되므로 정상상태의 절삭이 오래 지속됨을 관찰할 수 있었다.

(6) 절삭깊이가 작고 공구 경사각이 큰 절삭조건일수록 절삭력이 작으며, 절삭력은 절삭조건에 관계없이 파단시작 이후에는 파단의 전파로 인한 변형영역의 감소로 인해 급격히 감소하였다.

(7) AL6061-T6 와 AL2024-T4 에 대한 시뮬레이션 결과와 실험결과를 비교해보면 파단각의 측정치 및 파단면의 위치는 매우 근사함을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단 1998 년 과학기술 기초중점 연구지원 사업(과제번호:1998-018-E00136)으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Pekelharing, A. J., "The exit angle failure in interrupted cutting," Annals of the CIRP, Vol. 27, No. 1, pp. 5-10, 1978.
2. Gillespie, L. K., Blotter, P. T., "The formation of and properties of machining burrs," J. of Engineering for

Industry, No. 2, pp. 66-74, 1976.

3. Iwata, K., Ueda, K., Ikuda, K., "Study of machanism of burr formation in cutting based on direct SEM observation," JSPE, Vol. 48, No. 4, pp. 510-515, 1982.
4. Ko, S. L., Dornfeld, D. A., "A study on burr formation mechanism," J. of Engineering materials and Technology, Vol. 113, pp. 75-87, 1991.
5. Ko, S. L., Dornfeld, D. A., "Analysis of fracture in burr formation at the exit stage of metal cutting," J. of Mater. Process. Technol., Vol. 58, pp. 189-200, 1996.
6. Usui, E., Shirakashi, T., "Mechanics of machining-from descriptive to predictive theroy-on the art of cutting metals-75 years later," ASME Publication PED, Vol. 7, pp. 13-35, 1982.
7. Iwata, K., Osakada, K., Terasaka, Y., "Process modeling of orthogonal cutting by the rigid-plastic finite element method," J. of Mater. Process. Technol., Vol. 106, pp. 132-138, 1984.
8. Strenkowski, J. S., Carroll, J. T., "A finite element model of orthogonal cutting by the rigid-plastic finite element method," J. of Engineering materials and Technology, Vol. 107, pp.349-354, 1985.
9. Zienkiewicz, O. C., The finite element method, 3rd Edition, McGraw-Hill, 1977.
10. Kobayashi, S., Oh, S. I., Altan, T., Metal forming and the finite element method, Oxford University Press, 1989.
11. Hashimura, M., Chang, Y. P., Dornfeld, D. A., "Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting," J. of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 121, pp. 1-7, 1999.
12. Cockcroft, M. G., Latham, D. J., "Ductility and the workability of metals," J. of Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
13. Oh, S. I., Chen, C. C., Kobayashi, S., "Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing; part 2," J. of Engineering for Industry, Vol. 101, No. 1, pp. 36-44, 1979.
14. Oyane, M., Sato, T., Okimoto, K., Shima, S., "Criteria of ductile fracture and their application," J. of Mater. Process. Technol., Vol. 4, pp. 65-81, 1980.
15. ANSYS user's guide, Revision 5.0 Tutorials Vol. III, Swanson analysis System, Inc., 1994.
16. Ueda, K., Manabe, K., "Rigid-plastic FEM of three-dimensional deformation field in chip formation process," Annals of the CIRP, Vol. 42, pp. 35-38, 1993.