

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

2차원 절삭에서 공구이탈시 발생하는 버에 관한 강소성 유한요소해석

고 대 철*, 김 병 민**, 고 성 립***

Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Burr Formation at the Exit Stage in Orthogonal Cutting

Dae-Cheol Ko*, Byung-Min Kim**, Sung-Lim Ko***

ABSTRACT

The objective of this study is to propose a new approach for modelling of burr formation process during orthogonal cutting when the tool exits the workpiece. This approach is based on the rigid-plastic finite element method combined with the ductile fracture criterion and the element kill method. This approach is applied to orthogonal cutting process to predict the fracture location and the fracture angle as well as the cutting force. To validate this approach, orthogonal cutting tests inside SEM(scanning electron microscope) at very low speed are carried out using Al6061-T6 to observe the behavior of the material during the chip and the burr formation. The results of the experiment are compared with those of the finite element simulation.

Key Words : Burr Formation(버 형성), Rigid-Plastic Finite Element Method(강소성 유한요소법), Ductile Fracture Criterion(연성파단기준), Element Kill Method(요소제거기법)

1. 서 론

절삭가공시에 발생하는 버(burr)는 기하학적으로는 가공 후 치수정도를 저하시키며, 피삭재의 물성치로는 가공 경화로 인한 제품 특성의 저하를 야기시킨다. 생산공정의 자동화가 이루어지면서 대부분의 주요한 공정에서 생산성 향상에 주력하여 자동화 및 공정제어에 많은 노력이 이루어져서 오늘과 같은 높은 기술의 생산방식을 보유하게 되었다. 이에 반하여 가공 중 발생하는 버로 인한 문제는 매

우 부수적인 문제로 도외시 되어 오다가 최근에는 전 생산공정의 병목현상을 일으키는 주요한 공정의 하나가 되어서 많은 관심과 연구가 집중되고 있는 실정이다. 버 발생의 문제를 해결하기 위해서 여러 가지의 방법이 사용되고 있으며, 이를 크게 분류하면 첫째 버 발생기구에 대한 이해를 통하여 버 발생을 억제하거나 방지하려는 노력이며, 둘째는 발생한 버의 효율적인 제거방법으로서 기계적, 화학적 그리고 전기적인 방법과 생산공정 중에서 자동화를 위한 시스템의 개발 등에 대한 연구가 진행 중이다.

* 양산전문대학 메카트로닉스과
** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터
*** 건국대학교 기계설계학과

버 발생기구에 관한 연구를 위하여 Pekelharing⁽¹⁾은 실험적인 관찰에 의해서 버 형성기구를 설명하였고, Iwata⁽²⁾는 SEM을 이용하여 버 형성을 자세히 관찰할 수 있는 장치를 제작하여 이를 관찰하였다. Ko^(3,4)는 소성이론과 실험적인 관찰을 이용한 해석적인 방법으로 버 형성기구를 가정하였고, 이를 통하여 버의 크기 및 파단부의 형상을 예측하였다. 또한 Usui 등⁽⁵⁾이 정상상태의 절삭가공에 유한요소법을 이용한 이후로 유한요소법을 활용한 연구가 많이 수행되어 왔으나^(6,7), 대부분 정상상태나 비정상상태의 절삭가공에서 연속형 칩이나 절단형 칩의 형성을 모델링하는 문제에 집중되어 있다. 따라서 버 형성에 관한 유한요소 모델링은 거의 제시되어 있지 않으며, 최근 Obikawa 등⁽⁸⁾은 버 형성과 버 형성시 크랙의 전파를 고려한 연구를 수행하였다. 그러나 Obikawa는 파단의 발생을 판단하기 위한 기준이 모호하며, 일단 파단이 발생한 후에는 더 이상의 절삭가공 해석을 수행하지 않았으므로 실제적으로 나타나는 버 형성을 모델링하기에는 미흡한 점이 많다고 생각된다.

따라서 본 연구에서는 2차원 절삭가공에서 공구이탈시 발생하는 버 발생기구의 모델링을 새로운 해석방법으로 시도하고자 한다. 이를 위하여 연성파단기준 및 요소제거 기법과 결합된 강소성 유한요소 프로그램을 개발하였다. 버 형성 중에 일어나는 파단의 예측을 위하여 연성파단기준을 이용하였으며, 절삭가공으로 인한 파단의 전파현상을 고려하기 위하여 요소제거기법을 도입하였다. 개발된 프로그램으로 2차원 절삭가공의 유한요소 시뮬레이션을 수행하여 버 형성 및 파단위치, 파단각과 공작물 내부의 변형을 분포 등을 예측하였다. 제시된 해석기법의 타당성을 검토하기 위하여 예측된 수치해석의 결과를 실험결과와 비교해 보았다.

2. 이 론

2.1 강소성 유한요소법

강소성 유한요소법은 대소성변형의 해석을 위한 가장 유용한 해석방법이므로, 본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용하여 2차원 절삭가공의 해석을 수행하였다. 이의 수식화 과정은 이미 많은 문헌^(9,10)에 잘 알려져 있으므로, 여기서는 간략하게 언급하고자 한다. 강소성 재료에 대한 범함수(functional), Π 는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\epsilon} dV - \int_{S_f} \bar{t}_i v_i dS \quad (1)$$

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

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \dot{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

여기서, $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적변형률 속도이다.

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

2.2 연성파단기준과 요소제거기법

연성파단예측을 위한 기준은 실제 산업현장에서 적용되는 공정과 유사한 실험을 근거로 제시되었다. 연성파단의 시작은 응력과 변형률 경로에 좌우되므로, 대부분의 연성파단기준식은 응력과 변형률의 적분형태로 나타난다. 또한 이와같이 적분된 값이 임의의 값에 도달했을 때, 연성파단이 시작되는 것으로 고려한다. McClintock⁽¹¹⁾은 파단이 일어나는 과정을 기공생성 및 성장에 근거를 두고 연성파단기준을 제시하였으며, Oyane 등⁽¹²⁾은 다공질 재료에 대한 연성파단기준을 제시하였다. Cockcroft와 Latham⁽¹³⁾은 파단시 소성변형률 경로에 대한 최대 주인장응력의 영향을 고려한 연성파단기준을 제시하였고, 이러한 연성파단기준은 Oh 등⁽¹⁴⁾에 의해 수정되었다. Osakada와 Mori⁽¹⁵⁾는 비틀림시험 결과를 이용하여 연성파단예측을 위한 파단기준식을 유도하였다.

이러한 연성파단기준은 재료의 변형과 관련된 문제의 연구를 위해 최근에 개발된 유한요소법과 결합하여 보다 정확하게 적용될 수 있다. 본 연구에서는 Oh 등⁽¹⁴⁾이 제시한 연성파단기준을 이용하였다. 즉,

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \left(\frac{\sigma^*}{\bar{\sigma}} \right) d\bar{\epsilon} = C \quad (3)$$

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

$$\int_0^{\bar{r}} d\bar{\epsilon} \approx C \quad (4)$$

또한 유한요소 해석을 위해 위의 식(4)는 증분 개념으로 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n (\Delta \bar{\epsilon}_e)_i = C' \quad (5)$$

여기서, n는 스텝 수, $\Delta \bar{\epsilon}_e$ 는 각 요소의 유효변형률 증분이다. 본 연구의 시뮬레이션에서는 식(5)의 C'의 값 즉, 유효변형률이 인장시험으로 구한 파단 유효변형률에 도달하면 파단이 일어난다고 가정하였다.

절삭가공으로 인한 파단의 전파현상을 수치적으로 접근하기 위하여 어떤 특정 요소의 유효변형률의 값이 파단기준에 도달하면 이 요소에 대하여 요소제거기법을 적용하였다. 즉, 제거되는 요소의 강성 값에 감소계수(reduction factor)를 곱하여 강성 값을 매우 작게함으로써 다른 요소에 거의 영향을 미치지 못하도록 하였다. 이러한 해석기법은 파단이 일어나는 변형의 각 단계에서 실제 파단이 일어난 요소를 해석영역으로부터 직접 제거하는 것이 아니므로 변형소재의 영역을 다시 정의할 필요가 없다. 따라서 격자 재구성이 요구되지 않으며, 또한 보편적으로 파단의 전파를 위해 요소간의 분리를 행하는 경우 미지의 절점수가 증가함으로써 이에 따른 해석시간도 자동적으로 증가하게 된다. 따라서 본 연구의 해석방법은 실제 파단의 전파를 해석적으로 다루기 위해 격자 재구성과 요소간의 분리를 고려하지 않고 파단의 전파를 고려함으로써 해석에 소요되는 시간을 줄일 수 있다. 또한 제시된 해석방법을 적용하여 파단기준을 초과하는 요소들을 추적함으로써 절삭가공의 연속적인 해석과 파단의 전파를 동시에 고려할 수 있으므로 파단이후 더 이상의 절삭 해석을 행하지 않은 Obikawa 등⁽⁸⁾에 의한 방법보다 실제 현상에 가깝게 해석할 수 있다.

2.3 버 형성의 유한요소 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 강소성 유한요소법을 이용하여 비정상상태 절삭가공의 해석을 수행하였다. 공구인선부에서 칩 형성부와 가공면의 처리를 위해 Ueda 등⁽¹⁶⁾이 제시한 기하학적 조건을 이용하였으며, 이는 Fig. 1과 같다. 절삭이 진행됨에 따라 공구인선부로부터 적정거리에 위치한 공작물의 절점(Fig. 1의 I)은 칩으로 형성되는 절점과 가공면으로 형성되어 공구와 접촉하는 2개의 절점(Fig. 1

의 J, K)으로 분리된다.

앞서 언급한 연성파단기준, 요소제거기법, 절점 분리법을 이용하여 2차원 절삭가공에서 발생하는 칩과 버 형성의 유한요소 시뮬레이션을 수행하기 위한 흐름도는 Fig. 2와 같다. 공작물의 치수와 경사각 또는 여유각과 같은 공

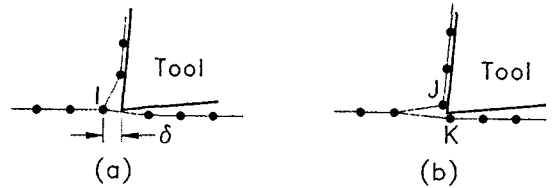


Fig. 1 Treatment of the nodal points near the tool edge. (a) before separation, (b) after separation

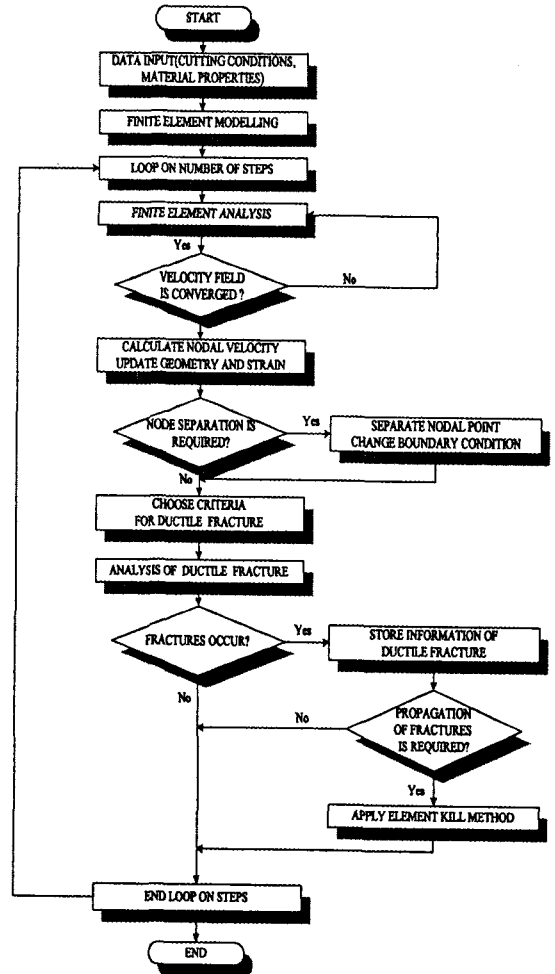


Fig. 2 Finite element simulation procedure of chip and burr formation in orthogonal cutting.

구 형상에 관한 정보로부터 초기격자 시스템이 자동적으로 구성된다. 변형경로의 각 스텝에서 계산된 절점속도와 시간증분으로 절점좌표가 변화되고, 유효변형률은 변형 경로를 따라 적분된다. 변형경로의 각 스텝에서 기하학적 조건을 이용하여 공구인선부에서의 절점분리가 행해지고, 분리된 절점에 대하여 새로운 경계조건을 부여한다. 또한 변형률장은 연성파단의 발생여부를 판단하기 위해 식(5)의 연성파단기준식을 계산하는데 이용된다. 만약 파단기준을 초과하는 요소가 나타나면, 그 요소에서 파단이 일어난 것으로 간주하고 앞서 제시한 요소제거기법을 이용하여 계속적인 시뮬레이션을 수행하게 된다.

3. 유한요소 모델링

2차원 절삭가공의 해석에 사용된 공작물의 형상과 경계 조건은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. 유한요소모델은 크게 공작물과 공구로 나누어 모델링하였으며, 공작물은 Mises의 항복조건을 따르는 강소성 재료로 가정하였다. 시뮬레이션에 이용된 공작물의 재료는 Al6061-T6이며, 이러한 재료의 응력-변형을 관계는 다음의 식(6)과 같다. 또한 연성파단의 발생여부를 판단하기 위한 파단 변형률 값은 0.5이며, 재료의 초기항복강도는 275MPa이다.⁽⁴⁾

$$\bar{\sigma} = 414\bar{\epsilon}^{0.05} [\text{MPa}] \quad (6)$$

Fig. 3의 EF면에 공구를 접촉시키고 Strenkowski 등⁽⁷⁾의 해석과 같이 평면변형을 상태로 좌측에서 우측으로 수평 절삭을 행하였다. 공작물의 길이는 1.5mm, 높이는 1.0mm, 절삭깊이는 0.2mm이며, 절삭폭은 단위깊이로 가공하였다. 공구 경사각 및 여유각은 각각 10°, 5°이다. Fig. 3의 AF면은 공작물의 상면, AC면은 이탈단의 모서리이며, 공작물 중 가공면이 될 부분인 BE면에는 절삭에

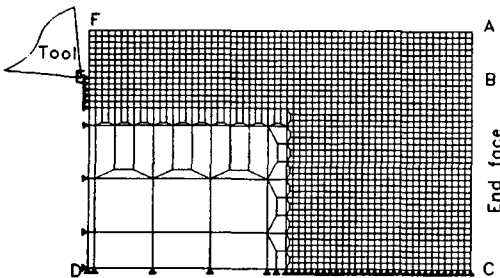


Fig.3 Finite element modeling for simulation of orthogonal cutting.

정조건을 부여하였다. 공작물의 강제회전에 대한 영향을 줄이고, 비정상상태 절삭가공을 빠른 계산시간 내에 정상 상태로 도달시키기 위하여 CD면과 DE면에 위치한 절점은 고정하였다. 또한 공작물과 공구 접촉면에 대해서는 마찰경계조건을 부여하였으며, 마찰응력의 계산은 Iwata 등⁽⁶⁾이 제시한 아래의 마찰조건식을 사용하였다. 즉,

$$\tau_f = (H_v / 0.07) \tanh(0.07 \mu_p / H_v) [\text{MPa}] \quad (7)$$

여기서, μ 는 마찰계수, H_v 는 공작물의 비커스 경도이다. 개발된 프로그램을 이용하여 앞서 2.3절에서 언급한 절차에 따라 2차원 절삭가공의 유한요소 시뮬레이션을 수행하였다.

4. 해석결과 및 고찰

Fig. 3에서 주어진 경계조건 하에서 공구가 매우 낮은 속도로 진행함에 따른 칩 형성과정과 버 형성과정이 단계별로 Fig. 4(a)-(e)에 잘 나타나있다. 초기에 공구가 절삭을 위하여 피삭재에 진입하는 단계인 Fig. 4(a)에서는 칩 형성이 공구진행에 따라서 변하고 있으며, Fig. 4(b) 근처에 이르러서 균일한 칩 형성상태에 도달하고 있음을 관찰할 수 있다. 칩 형성의 정상상태 도달 여부는 절삭저항의 변화를 관찰함으로써 판단할 수 있다. 정상적인 칩 형성이 이루어진 상태에서 피삭재의 끝부분인 Fig. 3에서의 AC면에 접근할수록 버 형성단계가 시작됨을 끝면 AC의 변형을 통하여 알 수 있다. 좀 더 구체적인 버 형성 단계를 관찰하기 위해서는 Fig. 3의 끝점 'A'의 변형을 측정함으로써 알 수 있다. 버 형성이 진행됨에 따라서 가장 높은 유효변형률을 갖는 공구인선부 부위에서의 유효변형률이 증가함에 따라서 피삭재 재질의 파단 변형률에 이르게 되면 파단을 일으킨다는 가정에 의해 연성파단 기준으로서 식(5)를 사용하고 있다. Fig. 4(c)는 이미 연성파단을 일으키기 시작한 후의 상태를 나타내고 있다. 검게 나타난 요소는 유효변형률의 크기가 인장시험시의 파단 변형률에 도달한 요소를 나타내고 있다. Al6061-T6의 경우에는 유효변형률이 0.5이상인 요소에 대하여 요소제거기법을 적용하여 요소의 강성을 크게 낮추어서 실제로 다른 요소에 대한 영향을 제거함으로써 파단효과를 유지하고 있다. Fig. 4(d)에서는 파단발생 후 파단의 성장방향이 공구진행방향과 같은 방향임을 알 수 있다. 공구가 더욱 진행함에 따라서 피삭재 끝면에서의 변형시

버의 회전중심에 가까운 고정점(hinge point)을 중심으로 버가 회전에 의한 변형을 함에 따라서 파단면의 방향이 회전 중심점으로 향하는 것을 Fig. 4(e)에서 관찰할 수 있다. 파단면을 나타내는 검은 부분을 제거한

버 형성 상태를 Fig. 4(f)에 나타내고 있다. Fig. 4(d), (e)의 버 형성단계에서 유효변형률의 분포를 Fig. 5에 나타내었다. 버 형성 중에 발생하는 유효변형률의 발전

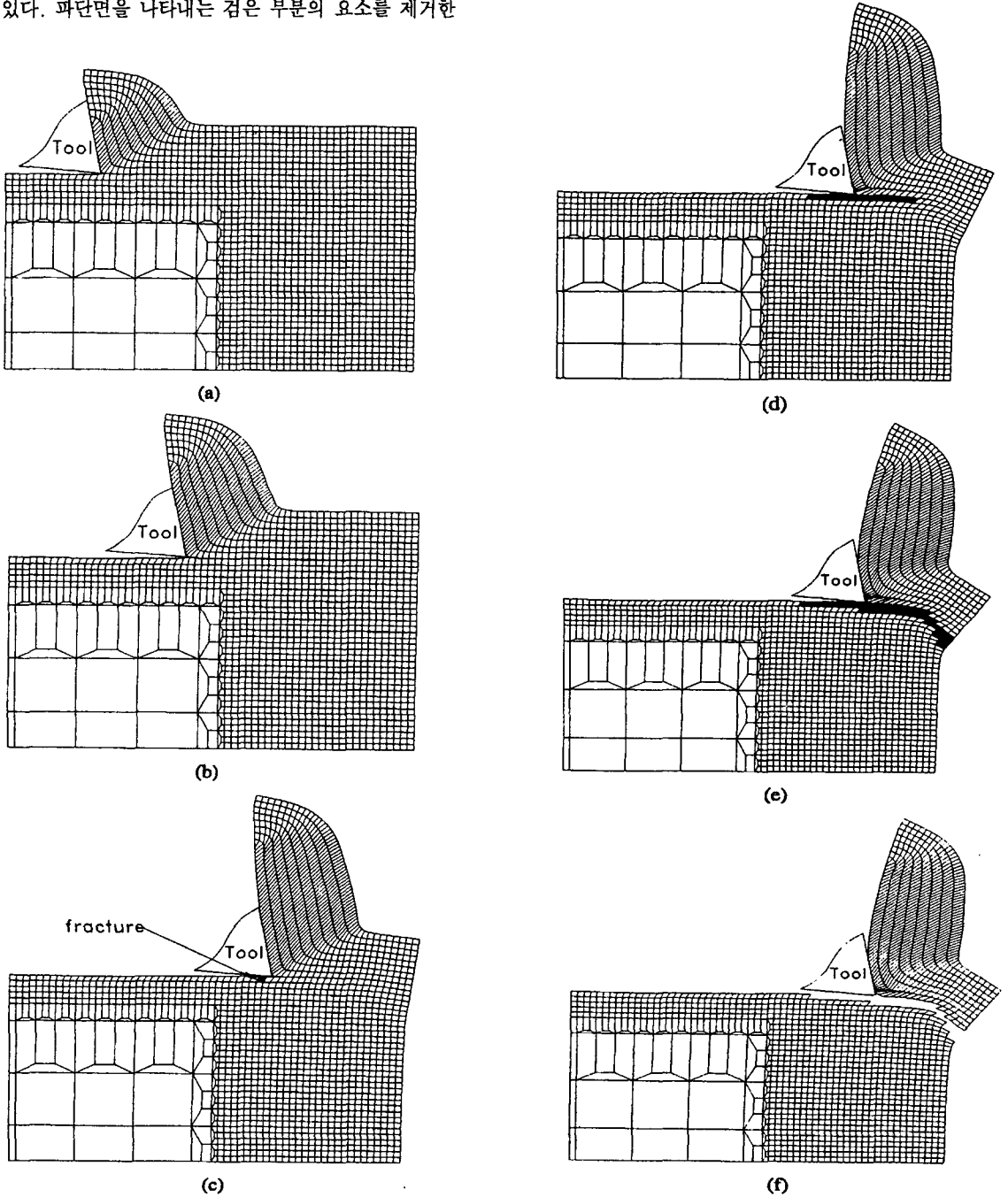


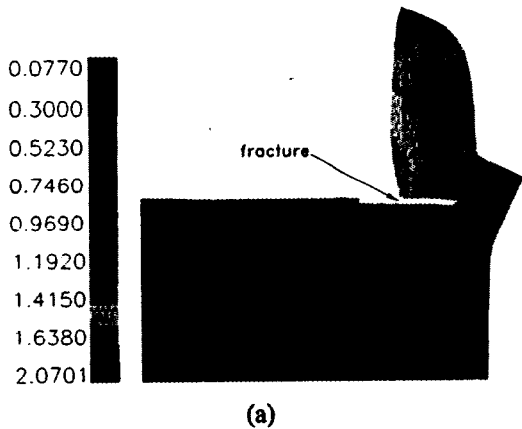
Fig. 4 Finite element simulation of cutting process with chip and burr formation at cutting distant of (a)0.3482; (b)0.6535; (c)1.0060; (d)1.1317; (e)(f)1.2187.

상태가 Fig. 5(a)에서 진행방향이 잘 나타나있다. 미리 파단면의 진행 이전에 변형률의 진행이 이루어져 있으며, 이와 같은 현상은 Ko⁽³⁾에 의해 제시된 음의 전단면(negative shear plane)의 발달과 고정점을 잘 나타내고 있다.

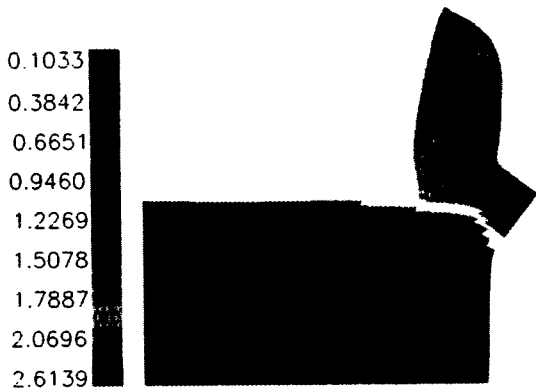
이상으로 유한요소법과 요소제거기법에 의한 버 형성단계를 시뮬레이션을 통하여 관찰하였으며, 이에 대한 검증을 위하여 실험에 의한 결과와 비교하고자 한다. Al6061-T6을 2차원절삭시 버 형성과 파단면의 발생을 관찰하기 위하여 주사형 전자현미경내에서 절삭을 실시하였다.⁽⁴⁾ Fig. 6에서 2차원 절삭시에 버 형성의 발달과 함께 파단면의 형성을 관찰할 수 있다. 우선 파단면의 형성이 Fig. 4(f)에 도시된 해석결과와 매우 유사함을 알 수 있다. Fig. 6의 경우는 파단면이 발생한 후에 공구의 진행이 조금 이루어진 다음의 상태를 나타내기 때문에 공

구의 위치가 약간 차이가 날 따름이다. 좀 더 정량적인 해석결과와 실험과의 비교를 위하여 Fig. 6에 표시된 파단 시작점의 위치, x_f 와 파단면의 발달방향을 나타내는 파단각, β_f 의 크기를 비교하고자 한다. 실제 2차원 절삭 후, 파단면을 측정하기 위해서는 절삭면과 파단면의 경계로부터 파단의 시작을 구별할 수 있다. Fig. 6에서 인지할 수 있는 바와 같이 절삭면과 파단면의 형성기구의 차이로 인하여 두 면의 경계가 비교적 분명하다. 파단각의 측정도 2차원 절삭 후, 측면 관찰을 통하여 피삭재 끝면과 회전변형의 중심인 고정점을 연결하는 직선과 공구진행 방향이 이루는 각도를 의미한다. 시뮬레이션에서 파단의 시작위치를 정확하게 파악하기 위해서는 사용하는 격자의 크기가 작을수록 정확할 것이다. 파단이 시작하는 순간부터 버 형성부의 변위가 크게 증가할 것이 쉽게 유추되며, 또 한가지는 파단면의 발달과 함께 절삭저항의 크기가 크게 감소할 것이라는 사실 역시 쉽게 예상할 수 있다. 파단면의 형성 후로는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 유효변형률이 큰 음의 전단면을 따라서 급격히 변형이 증가하기 때문이다. 이와 같은 유추를 통하여 파단의 시작점을 절삭저항의 변화로부터도 얻을 수 있다고 본다.

Fig. 7에서는 Fig. 3의 초기 피삭재 상태에서 버 형성부의 끝점인 'A'의 이동의 크기를 나타내고 있다. x축은 공구의 절삭이동거리를 나타내고 있으며, y축은 'A'점의 좌표변화의 크기를 나타내고 있다. 공구이동거리 0.75와 1.0사이에서 'A'점의 급격한 좌표이동이 있음을 관찰할 수 있다. 이것은 Fig. 4(c)에서 관찰할 수 있는 공구이동



(a)



(b)

Fig. 5 Distribution of total effective strain at cutting distance of (a)1.1317; (b)1.2187.

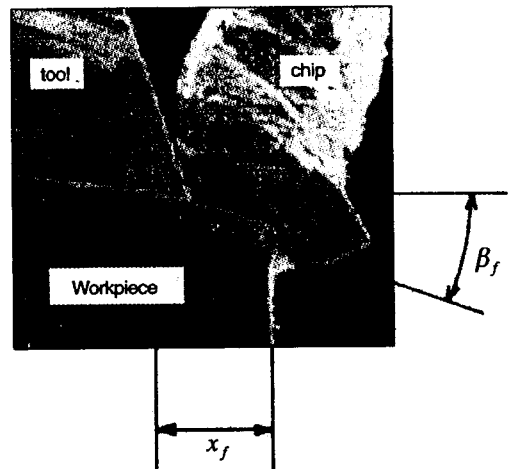


Fig. 6 Fracture during burr formation in machining Al6061-T6.

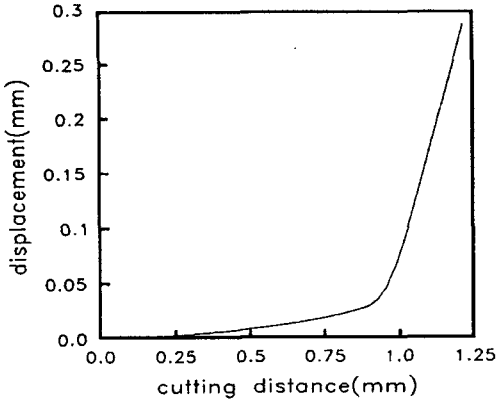


Fig. 7 Displacement of point 'A' in Fig.3.

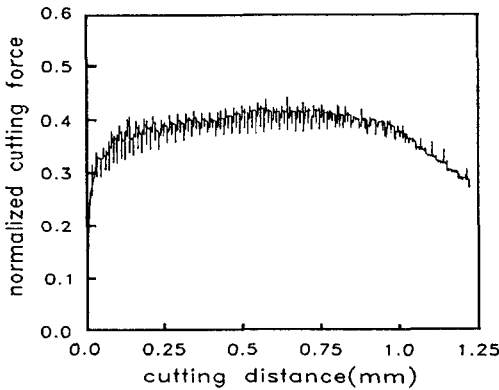


Fig. 8 Variation of cutting force during cutting process.

거리 1.0부근에서 파단의 시작으로 인한 버 형성부의 급격한 변형을 의미한다고 볼 수 있다. 그러나 변화하는 전환점이 예리하게 나타나지 않아서 정확한 파단의 시작점을 찾는 데는 어려움이 있다. Fig. 8은 절삭시 각 절점에 작용하는 절점력으로부터 칩과 공구의 접촉면에 전달되는 절삭저항의 크기를 나타내고 있다. x축은 공구의 절삭 이동거리를, y축은 절삭력을 나타낸다. 절삭력은 초기항복강도로 무차원화하여 나타내었다. 여기에서 절삭력의 변화가 심하게 나타나는 것은 유한요소해석에서 절점이 절삭공구와 접촉(contact)하거나 이탈(separation)함에 따른 절삭력의 증감으로 인해 나타나는 현상이다. 그리고 이송거리가 약 0.6mm 정도에 이르면 절삭력의 변화가 거의 없는 정상상태인 0.42의 값에 도달하는 것을 관찰할 수 있다. 이 값은 항복강도가 275MPa이기 때문에

Table 1 Comparison between experimental result and simulation result.

Measured Cutting Force, F_c [N]	$\frac{F_c}{b}$ [N]	measured fracture angle $(\beta)_{mes}$	measured fracture location $(x_r)_{mes}$	modified fracture location $(x_r)_{mes}$	fracture angle in simulation $(\beta)_{sim}$	fracture location in simulation $(x_r)_{sim}$
467.4	155.8	28.2	0.56	0.559	23.04	0.5291
609.4	203.13	22.4	0.81	0.62		
686.9	228.63	25.2	0.94	0.63		
663.2	221.07	24.7	0.94	0.66		

155.5N의 절삭저항에 해당한다. 공구가 피삭재 끝면으로 접근함에 따라서 최초의 크랙이 생기는 약 1.006mm까지는 정상상태의 절삭이 이루어지나, 이 이후부터는 절삭력이 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이는 파단의 전파로 인해 변형영역이 감소하기 때문이라고 생각된다. 절삭저항의 정상상태는 공구가 피삭재 끝면으로 접근함에 따라 버 형성이 시작되면서 절삭저항이 감소한다. Fig. 8에서 공구위치 0.73mm 근처에서 절삭력의 1차적인 감소현상이 발생함을 알 수 있다. 이것을 버 형성의 시작으로 볼 수 있으며, 1차 감소 후에 공구위치가 0.97mm에 이르렀을 때에 2차 감소현상을 발견할 수 있다. 이것은 파단면의 발생으로 사료되며 이것은 Fig. 4(c)에서 이미 파단면이 발생되어 있는 상태에서 공구위치가 1.0060mm임을 고려하면 매우 설득력있는 추론이라고 생각한다. Fig. 4의 유한요소해석 결과에서 파단시작점은 $x_r = 0.5291$ mm이고 고정점이 공구진행방향으로부터 0.225mm 떨어져 있으므로 Fig. 6에서 파단각에 해당하는 β_f 는 \tan^{-1}

$$\left(\frac{0.0025}{0.5291}\right) = 23.04^\circ$$

로 계산된다. 이 결과를 실험으로부터의 관찰과 비교하기 위하여 Table 1을 작성하였다. 절삭 실험은 시뮬레이션에서 사용한 절삭조건과 동일한 조건으로서 Al6061-T6에서 공구경사각이 10°이다. 절삭폭, b는 2차원 가공시 평면변형을 상태를 유지하기 위하여 3mm를 사용하였다. 유한요소해석에서는 단위 절삭폭 즉, 1mm를 사용하였다. 절삭깊이는 정확한 측정이 어려워 절삭저항의 크기를 사용하여 단위 절삭폭에 대하여 동일한 절삭저항은 동일한 절삭깊이로 가정하였다.

Table 1에서 시뮬레이션이 단위 절삭폭에서 이루어졌

기 때문에 측정된 절삭력, F_c 를 단위 절삭폭에 대한 절삭력, F_c/b 으로 환산하였다. 각 실험에서 Fig. 6에 나타난 파단각과 파단위치, $(x_f)_{mean}$ 를 측정하였다. 앞에서의 연구 결과로서 파단각의 크기는 절삭깊이에 무관하며 파단 위치는 절삭깊이의 크기에 비례하기 때문에 시뮬레이션에서 측정된 동일한 절삭저항인 155.6N에 해당하는 절삭깊이에서의 파단위치로 환산을 하여야 한다. 그 결과가 $(x_f)_{mean}$ 로서 Table 1에 나타나있다. 각 경우에 있어서 측정결과와 시뮬레이션 결과를 비교하면 파단각의 측정치는 22~28°로서 시뮬레이션에서의 23.04°의 결과를 포함하고 있음을 알 수 있다. 파단면의 위치는 실험결과와 약 14%의 오차를 포함하고 있으며, 이것은 공구와 칩 사이의 마찰력에 대한 모델링이나 연성파단기준의 오차 등으로 부터 기인한다고 볼 수 있다. 그러나 현재의 결과만으로도 매우 근사한 예측을 하고 있음을 알 수 있다. 향후 이에 대한 보정을 통하여 좀 더 정확한 해석이 가능하리라 본다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 절삭가공에서 공구이탈시 발생하는 버 발생기구의 모델링을 위한 새로운 해석방법을 제시하였으며, 제시된 해석방법을 이용한 강소성 유한요소 시뮬레이션으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2차원 절삭시의 칩 형성과 버 형성과정을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 버 형성 중에는 유효변형률의 증가로 인한 파단이 발생한다. 연성파단기준을 이용하여 누적 유효변형률의 크기가 인장시험시의 파단 변형률에 도달하면 파단이 발생한다고 가정하였다.

(2) 유한요소해석 중 발생하는 파단면의 형성은 요소제거기법을 이용하여 처리하였다. 요소제거기법은 파단 변형률에 도달한 요소의 연결강성을 감소시킴으로서 실질적으로는 각 요소들의 재정리 없이 분리되는 효과를 지니게 된다.

(3) 시뮬레이션의 결과에 대한 신뢰성 검증을 위하여 동일한 재료인 Al6061-T6에 대하여 2차원 절삭실험을 수행하여 버 형성 및 파단현상에 대한 결과를 정량적으로 비교하였다. 버 형성은 버 형성의 초기위치와 초기 음의 전단각으로 파악되지만 관찰이 어려워서 비교가 어렵다. 버 형성 중에 발생하는 파단면은 파단시작시 공구위치와 파단각으로 규정된다. 절삭실험에서 파단각은 22~28°이고 시뮬레이션에서는 23.04°이며, 파단위치는 약 14%

의 최고 오차를 나타내었다. 이로부터 비교적 시뮬레이션의 결과가 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. A. J. Peklharing, "The Exit Failure in Interrupted Cutting", *Annals of the CIRP*, Vol. 27, pp. 5-10, 1978.
2. K. Iwata, K. Ueda and K. Okuda, "Study of Mechanism of Burr Formation in Cutting Based on Direct SEM Observation", *JSPE*, Vol. 148-4, pp. 510-515, 1982.
3. S. L. Ko and D. A. Dornfeld, "A Study on Burr Formation Mechanism", *Transactions of the ASME, J. of Engineering Materials and Technology*, Vol. 113, pp. 75-87, 1991.
4. S. L. Ko and D. A. Dornfeld, "Analysis of Fracture in Burr Formation at the Exit Stage of Metal Cutting", *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 58, pp. 189-200, 1996.
5. E. Usui and T. Shirakashi, "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.
6. K. Iwata, K. Osakada and Y. Terasaka, "Process Modeling of Orthogonal Cutting by the Rigid-Plastic Finite Element Method", *J. Engineering Materials and Technology*, Vol. 106, pp. 132-138, 1984.
7. J. S. Strenkowski and J. T. Carroll, "A Finite Element Model of Orthogonal Metal Cutting", *J. Engineering Materials and Technology*, Vol. 107, pp. 349-354, 1985.
8. T. Obikawa, T. Matumura and E. Usi, "Chip Formation and Exit Failure of Cutting Edge(1st Report)-FEM Analysis of Chip Formation at Exit", *JSPE*, pp. 102-108, 1990.
9. O. C. Zienkiewicz, "The Finite Element Method", 3rd Edition, McGraw-Hill, 1977.

10. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, "Metal Forming and Finite Element Method", Oxford University Press, 1989.
11. F. A. McClintock, "A Criterion for Ductile Fracture by the Growth of Hole", J. Appl. Mech., Vol. 35, pp. 363-371, 1968.
12. M. Oyane, T. Sato, K. Okimoto and S. Shima, "Criteria of Ductile Fracture and Their Application", J. Mech. Work. Tech., Vol. 4, pp. 65-81, 1980.
13. M. G. Cockcroft and D. J. Latham, "Ductility and the Workability of Metals", J. Inst. Metals, Vol. 96, pp. 33-39, 1968.
14. S. I. Oh, C. C. Chen and S. Kobayashi, "Ductility Fracture in Axisymmetric Extrusion and Drawing-Part 2", J. Eng. Ind., Vol. 101, No. 1, pp. 36-44, 1979.
15. K. Osakada and K. Mori, "Prediction of Ductile Fracture in Cold Forging", Annals of CIRP, Vol. 27, No. 1, pp. 135-139, 1978.
16. K. Ueda and K. Manabe, "Rigid-Plastic FEM of Three-Dimensional Deformation Field in Chip Formation Process", Annals of CIRP, Vol. 42, pp. 35-38, 1993.