

2차원 절삭에서 FEM 해석의 유효성에 관한 연구

윤재웅*, 김홍석⁺

(논문접수일 2009. 07. 20, 심사완료일 2009. 11. 15)

A Study on the Effectiveness of Finite Element Method in Orthogonal Cutting

Jae-Woong Youn*, Hong-Seok Kim⁺

Abstract

In general, the direct experimental approach to study machining processes is expensive and time consuming, especially when a wide range of parameters are included: tool, geometry, materials, cutting conditions, etc. The aim of this study is to verify the effectiveness of finite element method for orthogonal cutting process by comparing the simulated cutting forces with measured results. Two commercialized finite element codes AdvantEdge™ and Deform-2D™ have been used to simulate the cutting forces in orthogonal cutting process. In this paper, estimated cutting and feed force components are compared with experimental results for different two materials. As a result, it has been found that FEM simulation is effective for understanding and predicting the orthogonal cutting process although some improvements on friction model and remeshing process are needed.

Key Words : FEM simulation(유한요소 해석), Orthogonal cutting(2차원절삭), Cutting force(절삭력), Cutting condition(절삭조건), Constitutive equation(구성방정식)

1. 서론

절삭가공은 제조공정 중 가장 중요하고 일반적인 공정이
라 할 수 있다. 산업에서 활용되고 있는 절삭가공 공정은 선
삭가공, 밀링가공, 드릴가공 및 연삭가공 등 매우 다양하지
만 이러한 모든 공정은 2차원 절삭현상으로 보다 명확하게

설명될 수 있다고 할 수 있다. 이는 2차원 절삭 메카니즘의
해석 결과가 3차원 절삭에 비교적 잘 적용될 수 있기 때문이다.

절삭가공 공정에서는 일반적으로 금속성형 공정에 비해 높은
온도에서 큰 변형률속도(Strain rate)와 변형량(Deformation)
이 발생하게 되며, 이는 절삭공정의 정확한 분석과 예측을
어렵게 만드는 요인이다. 이러한 어려움에도 불구하고 절

* 대구대학교 자동차·산업·기계공학부 (jwyoun@daegu.ac.kr)

주소: 712-714 경북 경산시 진량읍 내리리 15번지

+ 대구대학교 자동차·산업·기계공학부

삭 메카니즘을 단순화한 모델을 세우고 절삭가공을 이론적으로 해석함으로써 가공공정에 유익한 정보를 제공한 많은 연구가 있었다⁽¹⁾. 그러나 이러한 이론적 모델은 단순화에 의한 영향으로 인해 실 공정에 적용하는 것에는 한계가 있다고 할 수 있다. 최근에는 컴퓨터 성능의 비약적인 발전을 계기로 유한요소해석(Finite Element Method)이 절삭가공 공정의 분석에 활용되기 시작하고 있다⁽²⁾. 이러한 접근법을 통하여 새로운 공구와 공작물의 절삭가공 특성을 실험 없이 이해할 수 있을 뿐만 아니라, 공구의 설계, 가공 표면의 예측 및 최근 그 필요성이 크게 증가하고 있는 초정밀 가공분야 등에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 이와 같은 절삭공정 해석의 수요가 증가함에 따라 최근 몇 개의 상용화된 FEM 소프트웨어가 출시되고 있다. 그러나 절삭가공 분야는 다른 소성가공 분야에 비해 정확성과 응용성 등의 제한으로 인하여 FEM 해석 소프트웨어의 상품화 사례가 그리 많지 않은 상황이며, 이미 출시된 상용 소프트웨어도 그 유효성이 확실하게 입증되지 않아 성형 해석 등을 목적으로 하는 소프트웨어에 비해 그 사용이 아직은 제한적이라 할 수 있다.

FEM 해석을 이용한 절삭공정의 해석은 주로 절삭공정의 주요 변수인 마찰계수의 분석^(3,4)과 가공경화지수 등 소재 물성치⁽⁵⁾의 영향을 분석하는 데 활용되거나, 절삭력 및 절삭온도 등의 공정에 관한 해석⁽⁶⁻⁹⁾ 및 공구의 기하학적 형상 분석⁽¹⁰⁾ 등 다양한 해석에 활용되고 있을 뿐만 아니라, 최근에는 3차원 절삭가공의 해석^(11,12) 및 이를 통한 밀링 공구 등의 변형 예측⁽¹³⁾ 등에도 활용되고 있다. 특히, 절삭력의 해석에 관한 기존의 연구는⁽⁶⁻⁸⁾, 절삭공정의 FEM 해석 정확성을 높이기 위한 다양한 해석 파라미터들의 설정 등에 관해 언급하고 있어 절삭력 해석에 있어서 중요한 결과들을 제시하고 있으나, 다양한 가공조건에서 해석결과가 어떠한 차이를 보이고 있는 지에 대한 해석 및 실험결과를 제시하지 못하고 있어 실제 적용 관점에서 미진한 부분이 있었다고 할 수 있다. 또한, 다양한 가공조건 하에서의 절삭온도 변화를 해석과 실험으로 비교한 연구⁽⁹⁾는 절삭온도에 관한 유효한 정보를 주고 있으나, 산업현장에서 보다 많이 필요로 되고 있는 절삭력에 관한 정보를 주지는 못하고 있다.

본 연구에서는 절삭가공에서 FEM 해석의 적절성 및 유효성의 평가를 위해 주로 절삭력 관점에서 실험값과 해석값의 차이를 분석하고 그 활용성을 검토하고자 한다. 이를 위해 다양한 공구 형상 및 가공 조건에서 절삭력 실험을 수행하였으며, FEM 해석을 위해서는 상용 FEM 해석 소프트웨어인 AdvantEdge™와 Deform-2D™를 이용하여 얻어진 해석결과와 비교하였다. 이러한 연구 결과는 향후, 절삭력 해석의

이해와 활용 등에 있어 중요한 단서를 제공할 것으로 기대된다.

2. 절삭력 해석 모델

상용화된 FEM 해석 소프트웨어인 AdvantEdge™와 Deform-2D™는 2차원 절삭의 해석에 있어서 평면변형률상태(Plane-strain state)를 가정하고, 유동응력(Flow stress)은 변형률, 변형률속도 및 온도에 의해 결정되며 공작물은 탄소성(Elasto-plastic) 거동을 한다고 가정한다.

Deform-2D™의 경우 4개의 절점(Node)을 갖는 사각형 요소(Element)를 사용하며, 절삭 현상의 수치적 모사를 위하여 Cockroft-Latham의 연성파괴식(Ductile Fracture)을 사용하는데, 해석 진행 중 공구의 선단과 접촉하는 요소의 손상지수(Damage Factor)가 한계값에 도달하면 절점 분리(Node Separation)를 수행한다. 또한, Fig. 1에 나타낸 바와 같이, 공구에는 변위 구속조건을 부여하고 공작물 하단에 y 방향의 변위 구속조건 및 x 방향의 속도 경계조건을 부여함으로써 2차원 상태의 절삭공정을 모델링 한다. 해석에 사용되는 소재 물성치는 Fig. 1에 나타낸 예와 같이 데이터베이스화되어 있는 Johnson-Cook 모델을 사용하며, 전단 마찰에 의한 마찰상수(Friction Factor)를 이용한다.

이에 비해 AdvantEdge™는 라그랑지(Lagrange) 방식의 FEM 패키지(Package)로서 6개의 절점을 갖는 삼각형 요소를 사용하고 있으며, Marusich-Ortiz의 구성방정식⁽¹⁴⁾ 및 쿨롬(Coulomb) 마찰 조건을 사용하고 있다. 특히, 일반적인 소성변형 문제에 대해 비교적 범용성을 가지고 있는 Deform-2D™와는 달리 AdvantEdge™는 절삭공정 전용 소프트웨어

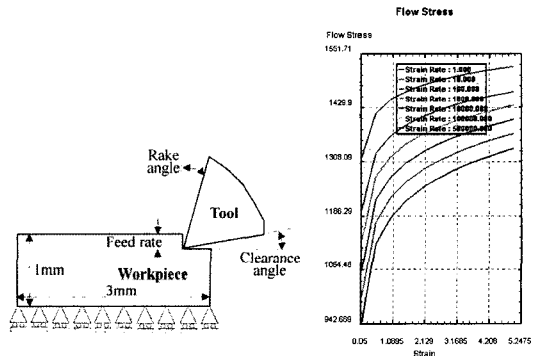


Fig. 1 Boundary condition and material property in Deform-2D™

어로서 소재 물성치나 경계조건 등의 해석 변수가 사용자에게 감춰져 있기 때문에 FEM 해석에 친숙하지 않은 사용자의 경우에도 큰 어려움이 없이 해석의 수행이 가능하다.

본 연구에서는 각 소프트웨어의 이러한 차이에도 불구하고 해석 모델의 엄밀성보다는 사용자 측면에서 엔지니어링 도구로서의 유효성 고찰이 목적이기 때문에 가급적 각 소프트웨어가 기본적으로 제공하고 있는 소재 물성치나 경계조건 등의 해석 조건을 활용하고자 하였다. 따라서, 공작물은 SM45C와 Al 6061-T6와 같이 절삭가공에 많이 사용되는 표준 소재를 사용함으로써 특이 소재의 물성치 오차로 인한 영향을 줄이고자 하였으며, 마찰계수나 경계조건 등의 해석 변수들도 기본 설정치를 사용함으로써 특정 절삭조건에서만 해석의 정밀도를 높일 수 있는 임시적인 해석 기법을 배제하고자 하였다.

3. 절삭력 측정 실험

2차원 절삭 실험을 위하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 파이프 형태로 사전에 제작된 공작물과 이송방향에 수직인 절삭날각을 갖도록 준비하였다. 공작물은 SM45C 강(브리넬 경도 : 170)과 6061-T6 계열의 알루미늄 합금 두 가지 재료를 사용함으로써 공작물의 강도 및 경도 등 재료 특성에 따라 해석결과가 달라지는지 확인하였다. 실험은 경사각(Rake angle)의 변화, 절삭깊이(Depth of cut)의 변화, 이송

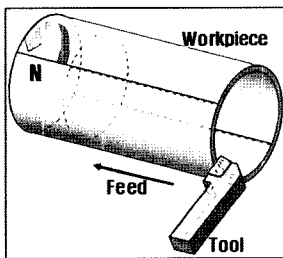


Fig. 2 Orthogonal cutting method

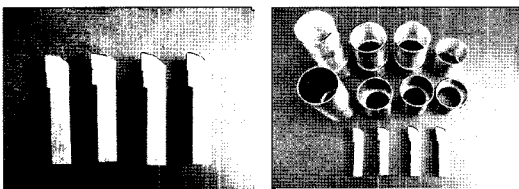


Fig. 3 The shapes of tool and workpiece

속도(Feedrate) 및 절삭속도 등 공구의 기하학적 형상 및 다양한 가공조건에 따른 절삭력의 변화를 관찰하였다. 절삭실험에 필요한 절삭조건은, 일반적으로 산업현장에서 널리 활용되고 있는 절삭조건 범위를 포함할 수 있도록 Table 1과 같이 설정하였다. 특히, 경사각의 변화에 따른 절삭력의 변화를 측정하기 위하여, 공구는 임의의 경사각을 유지할 수 있도록 초경 인서트를 공구 홀더에 브레이징(Brazing)하는 방법으로 특수 제작하였다. 절삭실험에 활용한 공구와 공작물의 형태는 Fig. 3과 같다.

절삭실험은 일반 범용선반에서 수행하였고, 절삭력을 측정하기 위한 공구동력계는 Kistler사의 9272, 앰프는 5019B를 사용하였다. 한편, 측정된 절삭력 신호의 추출은 National Instrument 사의 A/D 변환기인 6009 모델을 사용하였고, A/D 변환을 위한 소프트웨어는 LabView를 이용하였다. Fig. 4는 실험장치 및 절삭력 측정을 위한 과정을 보여 주고 있다.

실험은 Table 1에서와 같이 다른 절삭조건을 고정시킨 후 경사각을 바꾸면서 수행하였고, 각각의 절삭깊이, 이송속도

Table 1 Cutting conditions

◆ Workpiece Material		◆ Tool	
<ul style="list-style-type: none"> SM45C(Bhn : 170) Aluminum 6061-T6 		<ul style="list-style-type: none"> Clearance Angle : 7 deg. Edge Radius : 0.02mm Entrance angle : 0 deg. 	
Rake angle (deg.)	Speed (m/min)	Depth of Cut (mm)	Feedrate (mm/rev)
0, 5, 10, 15	150	1.0	0.105
5	150	0.5, 1.0, 1.5, 2.0	0.105
5	150	1.5	0.06, 0.105, 0.15, 0.195, 0.24, 0.3
5	50, 100, 150, 200, 250	1.0	0.105

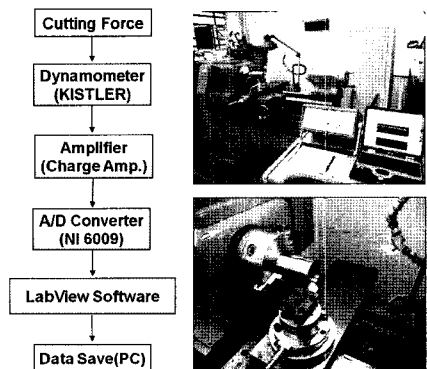


Fig. 4 Experimental Setup

및 절삭속도의 변화에 따른 실험을 수행할 때도 나머지 절삭 조건은 동일하게 고정함으로써 다른 절삭조건에 영향을 최소화할 수 있도록 하였다.

4. 실험 결과 및 절삭력 해석 결과

4.1 SM45C 강의 해석 결과

본 연구에서는 Table 1에서와 같은 조건으로 실험과 해석을 각각 수행하였다. 먼저, 2차원 절삭의 절삭력 해석에 있어서는 앞서서도 언급한 바와 같이, 소프트웨어가 기본적으로 제공하는 재료의 물성치를 해석에 사용하였다. 그러나 AdvantEdge™의 경우에는 SM45C강이라고 하더라도 그 브리넬 경도값을 입력하게 되어 있어 경도시험을 통해 경도값 170을 입력하고 해석을 수행하였다.

Fig. 5는 다양한 절삭조건에서의 절삭력의 합력 변화를 보여주는 그림으로서 실험값 및 두 해석 소프트웨어의 해석 결과를 보여주고 있다. 먼저, 경사각 변화에 따른 절삭력의 변화는 비교적 실험값과 경향이 일치하고 있는 모습을 볼 수 있으며 경사각이 커지면 절삭력이 작아지는 경향을 잘 묘사하고 있다. 절삭력의 크기는 해석값이 모두 실험값에 비해 작게 나타나고 있으며, 특히 Deform-2D™의 경우엔 절삭력의 해석값이 실험결과에 비해 매우 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 절삭깊이의 변화에 따른 절삭력의 변화는 실험값의 경우에는 절삭깊이의 변화에 따른 절삭력의 증가가 선형적이지 않은 반면, 해석값의 경우 모두 선형적으로 증가하는 모습을 볼 수 있으며, 여기에서도 Deform-2D™는 실험값에 비해 매우 작은 값을 보이고 있으나 AdvantEdge™의 경우에는 절삭력 합력에 있어서 실험값과 매우 유사한 값을 갖는다는 것을 알 수 있다. 한편 이송속도의 변화에 따른 절삭력의 변화는 실험값 및 해석값 모두 이송속도의 증가에 따라 절삭력의 변화가 선형적이지 않은 경향은 유사하나, AdvantEdge™가 거의 정확하게 일치하는 반면 Deform-2D™는 여전히 해석값에서 큰 편차를 보이고 있다. 이와 같은 절삭력 합력의 변화는 절삭속도의 변화에 대해서도 유사한 것으로 나타나고 있다.

한편, 절삭력의 합력이 아닌 주분력(Cutting force)과 이송분력(Feed force)의 변화는 합력의 경우와는 그 양상이 다르게 나타나고 있다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이, 절삭깊이 및 이송속도의 변화에 대한 주분력의 변화는 AdvantEdge™의 해석결과는 실험값보다 약간 크게, Deform-2D™의 해석결과는 실험값보다 약간 작게 나타나고 있으며, 이송분력의 경

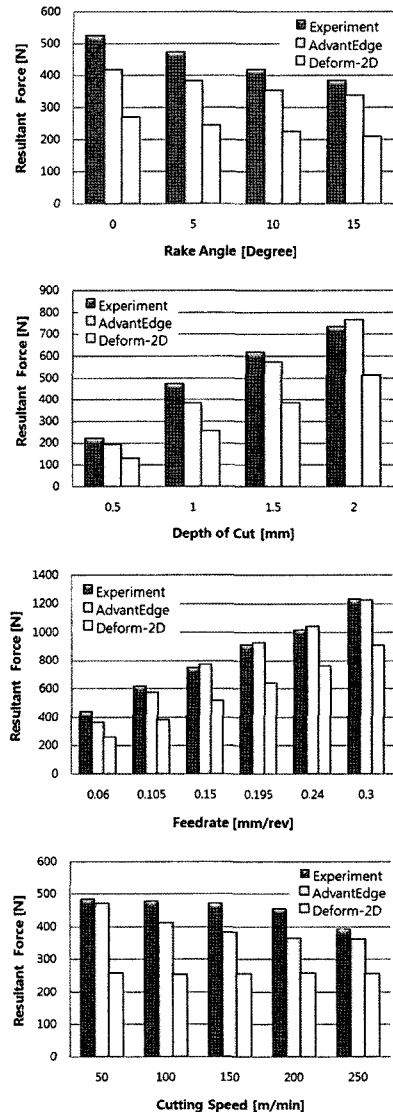
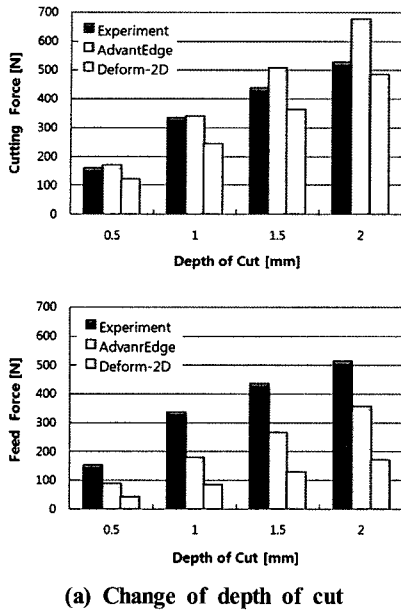


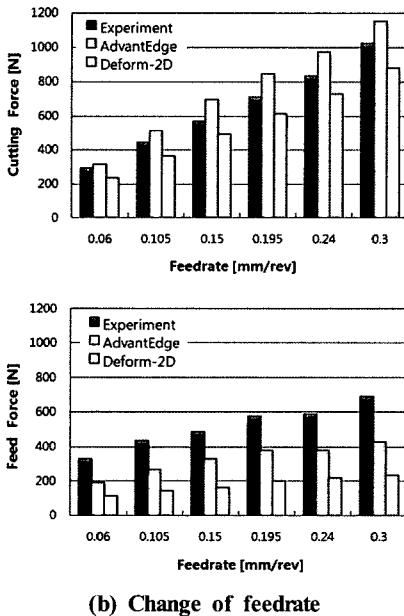
Fig. 5 Variations of resultant force for various cutting conditions(SM45C steel)

우는 모두 작게 나타나고 있다. 단지 주분력과 이송분력의 해석결과와 실험값의 차이에 있어서 AdvantEdge™는 상대적으로 차이가 작고, Deform-2D™의 경우는 그 차이가 매우 큰 것으로 나타나고 있다. 이와 같이 절삭력의 해석값이 실험값에 비해 주분력은 크게, 그리고 이송분력은 작게 나타나고 있는 것은 다른 연구의 결과와도 일부 유사하다^(6,9,11).

본 연구에서는 이와 같이 이송분력이 상대적으로 작게 계



(a) Change of depth of cut



(b) Change of feedrate

Fig. 6 Cutting force components for various cutting conditions(SM45C steel)

산되는 원인으로서 두 가지 원인을 검토하였다. 먼저, 공구/공작물 접촉면에서의 마찰이 실험과 해석에 있어서 차이가 있을 수 있는 원인과, 2차원 절삭을 위해 파이프 형태의 가

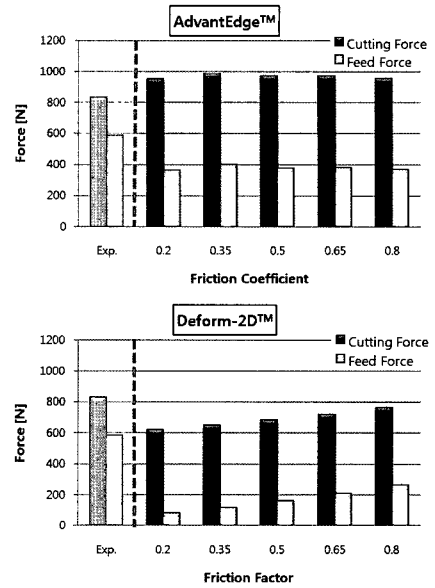


Fig. 7 Simulation results for different friction coefficients (Depth of cut : 1.5mm, Feedrate : 0.24mm/r)

공을 수행하게 될 때 발생하는 버(Burr)의 생성이 해석에서는 반영되지 않아 생기는 편차를 생각해 볼 수 있다. 앞에서도 언급한 것과 같이 AdvantEdge™의 경우에는 공구의 경사면과 칩 사이의 마찰을 쿨롬 마찰로 가정하고 마찰계수는 기본값을 0.5로 하고 있으며, Deform-2D™의 경우에는 마찰인자(Friction factor)로 마찰을 정의하고 기본값은 0.7로 하고 있다. 앞의 해석은 이와 같은 기본값을 이용한 해석 결과이다. 본 연구에서는 두 가지 해석 소프트웨어에 대해 마찰계수를 변화시키며 해석을 다시 수행하였다. 해석 결과는 Fig. 7에서 보는 바와 같이, AdvantEdge™의 경우 주분력은 그래프 좌측의 실험값보다 크게, 이송분력은 작게 계산되는 결과에는 큰 차이가 없으며, 대부분 유사한 크기의 절삭력이 계산되었다. Deform-2D™의 경우 마찰인자가 커지면 절삭력의 각 분력이 조금씩 상승하는 모습을 볼 수 있으나 여전히 이송분력은 실험값에 비해서 매우 작은 값을 나타내고 있다.

한편, AdvantEdge™는 버의 생성을 고려한 해석이 가능하다. 본 연구에서는 가공 시에 발생하는 버의 영향을 고려하여 해석을 재 수행한 결과 오히려 기존의 해석에 비해 이송분력이 약간 작아지고, 전체적으로는 다른 해석 결과와 큰 차이가 나타나지 않는 것을 알 수 있었다.

또 다른 해석상의 변수로서 FEM 메쉬(Mesh)의 크기 및

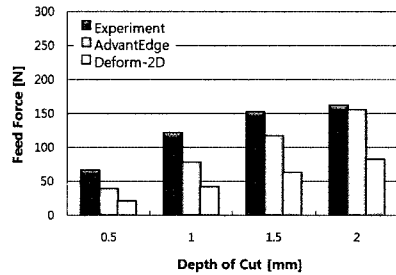
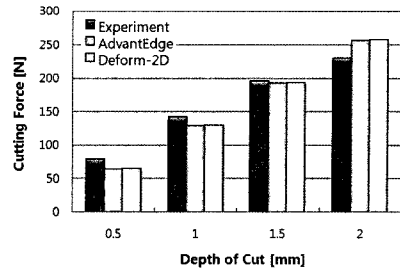
개수 등을 달리하며 해석할 수 있는데, 메쉬의 크기를 작게 할 경우, 일부 가공조건에서 앞의 결과보다는 좀 더 정확한 결과가 얻어지는 경우가 있지만, 전체적으로 해석의 정확도가 크게 좋아진다고는 볼 수 없었고 여전히 주분력은 크게, 이송분력은 작게 해석되는 결과가 나타났으며, 계산 시간이 매우 길어지는 문제가 발생하였다.

4.2 알루미늄 합금의 해석 결과

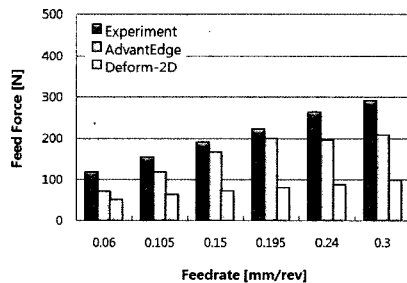
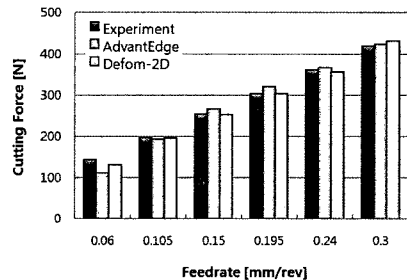
본 연구에서는 해석의 정밀도가 공작물의 경도 및 연성 등의 변화에 의해 달라질 수 있는 지를 조사하기 위하여 6061-T6 알루미늄 합금에 대하여도 강과 유사한 실험을 수행하였고, 그 결과 전반적인 절삭력의 합력은 강의 해석 결과와 유사한 정도의 정확도를 보여주고 있다. 한편, Fig. 8에서와 같이, 절삭력의 각 분력에 대해서는 강과는 조금 다른 양상을 보여 주고 있다. 먼저, 주분력의 경우에는 전반적으로 해석의 결과와 실험값이 유사한 크기를 갖는 것으로 나타나고 있다. 한편, 다양한 절삭조건에 대해 전반적인 이송분력의 해석결과는 실험값에 비해 여전히 작게 나타나고 있으나, 실험값과의 편차는 강의 해석에 비해 상당히 줄어드는 모습을 볼 수 있다. 이와 같은 결과로부터, 공작물 소재의 강도 및 경도에 무관하게 주분력은 해석값과 실험값이 비슷하게 나타나고 있으며, 이송분력의 경우에는 대체로 작게 계산되어 진다는 알 수 있었다.

5. 결과 및 고찰

이와 같이 절삭력의 해석에 있어서 절삭력의 합력은 실험값과 비교할 때 비교적 신뢰할 만한 결과를 보여주고 있다고 할 수 있다. 그러나 각 분력 부분에 있어서는 주분력의 해석값이 실험값보다 일부 크게, 이송분력의 해석값이 작게 나타나는 모습을 볼 수 있는데 이는 다른 연구와도 유사한 결과를 보여주고 있다^(6,9,11). 이와 같이 주분력에 비해 상대적으로 이송분력의 해석값에 오차가 많은 이유에 대해서는 아직 정확한 원인분석이 이루어지고 있지는 않지만 대략 다음과 같은 세 가지 원인으로 분석되고 있다. 첫 번째는 해석에 있어서 마찰계수를 일정하게 두고 있다는 것이다. 즉, 공구/공작물계의 마찰은 하중과 온도 등의 가공 환경에 의해 변하는 가변적인 함수로 설정하여 해석을 수행하는 것이 바람직하다는 것이다. 앞의 결과에서도 볼 수 있듯이, 단순히 마찰계수의 크기만을 변화시키는 것은 이송분력의 해석값에 별 차이를 발생시키지 않고 있으며, 결국은 응력상태 등에 따라



(a) Change of depth of cut



(b) Change of feedrate

Fig. 8 Cutting force components for various cutting conditions(Aluminum 6061-T6)

달라지는 마찰모델이 필요하다는 것을 의미한다고 할 수 있다. 두 번째는 다른 소성가공 공정과는 달리 전단변형이 큰 절삭가공 공정에서는 지속적인 격자재구성 과정이 수행되게

Table 2 Comparison of simulation error for steel machining

SM45C Steel (BHN 170)	Cutting Condition	AdvantEdge™			Deform-2D™		
		Cutting Force Error (%)	Feed Force Error (%)	Resultant Force Error (%)	Cutting Force Error (%)	Feed Force Error (%)	Resultant Force Error (%)
Rake angle (D.O.C. : 1.0 mm, Feed : 0.105 mm/r, Speed : 150 m/min)	0°	2.1	45.7	20.5	30.4	71.8	48.8
	5°	1.7	47.0	19.1	31.4	75.4	48.6
	10°	2.9	46.3	15.3	31.6	74.9	46.3
	15°	6.2	45.9	11.9	31.2	77.1	45.6
Depth of cut (Rake angle : 5°, Feed : 0.105 mm/r, Speed : 150 m/min)	0.5 mm	6.3	41.6	13.2	24.2	72.0	41.9
	1 mm	1.7	47.0	19.1	27.5	74.6	45.8
	1.5 mm	15.9	38.6	7.1	17.3	70.6	37.7
	2 mm	28.6	30.8	4.0	8.2	66.9	30.4
Feedrate (Rake angle : 5°, D.O.C. : 1.5 mm, Speed : 150 m/min)	0.06 mm/r	7.7	43.0	17.1	19.3	66.7	41.3
	0.105 mm/r	15.9	38.6	7.0	17.7	67.7	37.3
	0.15 mm/r	23.1	32.5	3.3	13.5	66.7	30.8
	0.195 mm/r	19.0	34.0	1.4	13.8	65.7	29.6
	0.24 mm/r	16.9	35.6	2.5	12.4	63.2	25.4
Cutting Speed (Rake angle : 5°, D.O.C. : 1.0 mm, Feed : 0.105 mm/r)	0.3 mm/r	12.5	38.0	0.5	14.1	66.4	26.4
	50 m/min	14.5	25.6	3.1	30.3	74.3	47.1
	100 m/min	3.6	38.2	14.3	30.5	74.8	47.4
	150 m/min	1.7	47.0	19.1	27.6	74.7	45.9
	200 m/min	1.8	48.8	20.4	27.3	72.5	43.8
250 m/min	5.2	36.0	8.5	22.2	66.0	35.6	
Average Error (%)		9.9	40.0	10.9	22.7	70.6	39.8

Table 3 Comparison of simulation error for Aluminum machining

Aluminum (6061-T6)	Cutting Condition	AdvantEdge™			Deform-2D™		
		Cutting Force Error (%)	Feed Force Error (%)	Resultant Force Error (%)	Cutting Force Error (%)	Feed Force Error (%)	Resultant Force Error (%)
Rake angle (D.O.C. : 1.0 mm, Feed : 0.105 mm/r, Speed : 150 m/min)	0°	9.5	36.8	23.2	14.6	71.1	38.7
	5°	12.6	35.4	22.4	16.0	71.1	35.5
	10°	10.0	36.2	20.0	15.0	74.2	33.3
	15°	1.7	11.7	2.2	2.0	69.2	13.2
Depth of cut (Rake angle : 10°, Feed : 0.105 mm/r, Speed : 150 m/min)	0.5 mm	18.6	40.8	26.9	18.1	68.5	33.9
	1 mm	10.0	36.2	20.0	9.5	66.1	27.8
	1.5 mm	1.7	23.6	9.4	1.1	59.4	18.2
	2 mm	11.6	3.7	6.8	12.3	48.8	3.5
Feedrate (Rake angle : 10°, D.O.C. : 1.5 mm, Speed : 150 m/min)	0.06 mm/r	22.9	40.3	29.5	7.9	57.8	24.2
	0.105 mm/r	1.7	23.6	9.4	0.7	59.3	17.8
	0.15 mm/r	4.8	12.7	1.2	0.6	62.8	17.5
	0.195 mm/r	5.2	10.1	0.1	0.3	64.4	16.9
	0.24 mm/r	1.7	25.8	6.9	1.1	67.0	17.8
Cutting Speed (Rake angle : 10°, D.O.C. : 1.0 mm, Feed : 0.105 mm/r)	0.3 mm/r	0.8	28.8	7.8	2.9	66.3	13.4
	50 m/min	17.4	9.7	15.5	0.3	36.5	7.1
	100 m/min	24.7	43.8	31.8	15.1	66.1	31.2
	150 m/min	10.0	36.2	20.0	9.1	66.0	27.5
	200 m/min	2.7	30.5	13.3	2.2	63.4	18.7
250 m/min	6.2	25.8	5.2	13.3	58.5	8.2	
Average Error (%)		9.2	26.9	14.3	7.5	63.0	21.3

되는데 이때에 해석의 오차가 커질 수 있다는 것이다. 마지막으로 세 번째는 실험에 사용한 공작물과 해석에 사용한 공작물의 기계적인 물성치 차이라고 할 수 있다. 이것은 특히, 다양한 열처리여 있어서 기계적 특성이 달라지는 강의 경우에 해석의 오차가 커질 수 있는 문제를 야기할 수 있다고 할 수 있다.

한편, Table 2와 Table 3은 각각 다양한 가공조건에서 강과 알루미늄 합금의 가공에서 실험을 통해 측정된 절삭력크기에 대한 해석결과의 오차를 나타내고 있다. Table 2에서 볼 수 있듯이, 강의 2차원 가공에서 Deform-2D™에 비해 AdvantEdge™의 해석이 전반적인 절삭조건에서 실험결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 앞서서도 언급한 바와 같이 두 소프트웨어 모두 이송분력에서의 오차는 크지만, AdvantEdge™의 주분력 경우는 오차가 상당히 작게 나타나고 있으며, 절삭 합력에 있어서도 평균오차가 10%이내 정도에 달하고 있어 상당히 정확한 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 또한, 알루미늄 합금의 2차원 가공 해석 결과 역시 강과 유사하게 나타나고 있으며, 이송분력의 오차는 전체적으로 강에 비해 작은 것으로 나타나고 있다.

앞서서도 언급한 바와 같이, 일반적인 소성가공 공정의 FEM해석에 비해 절삭가공 공정은 큰 전단변형과 높은 변형 속도 및 많은 격자재구성 공정 등으로 인해 해석의 정밀도가 떨어지는 것이 당연하다고 할 수 있다. 그러나, 본 절삭력 해석의 결과에 의하면 공정 및 공구의 설계, 새로운 소재 및

공구계의 절삭 메카니즘 이해 등을 목적으로 하는 경우에는 그 유효성이 충분히 있다고 판단된다. 또한, 이러한 절삭공정 해석의 정확도를 높이기 위해서는 절삭가공 공정에 적합한 마찰모델의 설정 및 격자재구성 과정에서의 계산 정밀도 향상 등 절삭가공에 맞는 추가적인 해석 모델 개발이 필요하다고 생각된다.

6. 결론

일반적으로 공구 및 공작물의 재료 및 절삭조건 등 절삭가공의 변수들이 다양하게 변화하는 경우, 실험을 통해 절삭 메카니즘을 이해하는 것은 시간과 경제적으로 어려운 일이다. 본 연구에서는 이와 같은 경우에 실험을 수행하지 않고, 해석만으로 절삭 공정을 이해하고 예측할 수 있는 지에 대한 가능성에 대해 절삭력 관점에서 검토하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 절삭력 합력의 경우, 소재의 경도와 무관하게 해석값과 실험값의 크기 및 절삭조건에 대한 합력의 변화 경향은 유사하며, 그 크기도 적절한 오차 내에서 일치한다고 할 수 있다.
- (2) 절삭력 분력의 경우에는, 절삭조건의 변화에 대한 크기 변화 경향은 실험과 해석의 결과가 유사하나, 각 분력의 크기는 상당히 큰 오차를 보이고 있다. 즉, 주분력의 경

우에는 일반적으로 해석값과 실험값의 오차가 비교적 작게 나타나는 반면, 이송분력의 경우에는 해석값이 실험값보다 작게 계산되며 그 편차도 큰 것으로 나타나고 있다.

- (3) 이와 같이 주분력과 이송분력의 편차 원인은 공구/공작물 경계면에서의 마찰계수에 대한 해석 모델이 잘못되어져서 나타나는 현상으로 판단되며, 향후 이에 대한 보완이 필요하다고 판단되어 진다.

이와 같이 절삭력의 각 분력의 해석 오차에도 불구하고, 전체적인 절삭 힘력은 해석과 실험의 차이가 Advant-Edge™의 경우 10% 이내로서 실험의 오차 범위 안에서 비교적 정확하게 해석되었다고 볼 수 있다. 따라서, 공구 및 새로운 공정 설계 등의 목적으로 절삭력 해석은 실험을 대체할 수 있는 충분한 효용성을 갖는다고 판단된다.

후 기

본 논문은 2007학년도 대구대학교 학술연구비의 지원에 의한 논문임.

참 고 문 헌

- (1) Astakhov, V. P., Osman, M. O. M., and Hayajneh, M. T., 2001, "Re-evaluation of the basic mechanics of orthogonal metal cutting : velocity diagram, virtual work equation and upper-bound theorem," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 41, pp. 393~418.
- (2) Mackerle, J., 1999, "Finite-element analysis and simulation of machining: a bibliography (1976~1996)," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 86, pp. 17~44.
- (3) Childs, T. H. C., 2006, "Friction modeling in metal cutting," *Wear*, Vol. 260, pp. 310~318.
- (4) Arrazola, P. J., Ugarte, D., and Dominguez, X., 2008, "A new approach for the friction identification during machining through the use of finite element modeling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, pp. 173~183.
- (5) Umbrello, D., M'Saoubi, R., and Outeiro, J. C., 2007, "The influence of Johnson-Cook material constants on finite element simulation of machining of AISI 316L steel," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 462~470.
- (6) Shet, C., and Deng, X., 2000, "Finite element analysis of the orthogonal metal cutting process," *Journal of Material Processing Technology*, Vol. 105, pp. 95~109.
- (7) Bil, H., Kilic, S. E., and Tekkaya, E., 2004, "A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite element models," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 44, pp. 933~944.
- (8) Umbrello, D., Filice, L., Rizzuti, S., and Settineri, L., 2007, "On the effectiveness of finite element simulation of orthogonal cutting with particular reference to temperature prediction," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, pp. 284~291.
- (9) Lee, H. U. and Cho, D. W., 2004, "Calculation of a reference force for feedrate scheduling using FEM analysis of a tool," *Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, pp. 416~421.
- (10) Yen, Y. C., Jain, A., and Altan, T., 2004, "A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, pp. 72~81.
- (11) Ceretti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L., and Altan, T., 2000, "Turning simulations using a three-dimensional FEM code," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, pp. 99~103.
- (12) Aurich, J. C., and Bil, H., 2006, "3D finite element modeling of segmented chip formation," *Annals of the CIRP*, Vol. 55, No.1, pp. 47~50.
- (13) Saffar, R. J., Razfar, M.R., Zarei, O., and Ghassemieh, E., 2008, "Simulation of three-dimension cutting force and tool deflection in the end milling operation based on finite element method," *Simulation Modeling Practice and Theory*, Vol. 16, pp. 1677~1688.
- (14) Marusich, T. D. and Ortiz, M., 1995, "Modeling and simulation of high-speed machining," *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, Vol. 38, pp. 3675~3694.