

순수 2차원 절삭에서 속도화상입자계측(PIV)을 이용한
주변형 영역 내 변형률 분포 고찰이주호^a, 이은호^b, 황지흥^{b*}Investigating the Strain Distribution in the Primary Deformation Zone in
2-D Orthogonal Machining Using Particle Image VelocimetryJoo Ho Lee^a, Eunho Lee^b, Jihong Hwang^{b*}^a OBPeng Corporation, 6F, Nara-Building, 5, Seongnam-daero 1390beon-gil, Sujeong-gu, Seongnam, Gyeonggi-do, 13119, Korea^b Department of Mechanical Design and Manufacturing Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	14	December	2018
Revised	13	January	2019
Accepted	14	January	2019

Keywords:

2-D orthogonal machining
Strain distribution
Shear zone
High-speed photographing
Particle image velocimetry (PIV)

ABSTRACT

In the present study, a system for direct observation and quantitative analysis of the chip formation process in 2-D orthogonal machining was developed. The system consists of an optical system for high-speed photographing of the shear zone at high temporal and spatial resolution and an image analysis system for calculating the strain rate and strain distributions from the acquired images using particle image velocimetry. The effects of cutting conditions, such as cutting edge radius and depth of cut on the deformation behavior in the shear zone, were investigated by comparing the strain rate and strain distributions obtained using the developed system. The results indicate that the developed system can be utilized to enhance the understanding of the mechanics of machining and the development and validation of machining models.

1. 서론

절삭은 본질적으로 칩(chip)을 생성하는 과정이라 할 수 있는데, 칩은 전단 영역(shear zone)이라 불리는 극히 좁은 영역에서 매우 짧은 시간에 극심한 변형을 겪으면서 연속적으로 일어난다. 따라서 절삭의 본질을 이해하기 위해서는 전단 영역에서의 칩 생성 과정을 직접적으로 살펴보는 것이 필요하다.

하지만 앞서 언급했듯이 칩 생성은 국부적인 영역에서 매우 짧은 시간에 이루어지기 때문에 이를 직접적으로 살펴보는 것은 쉬운 일이 아니다. 따라서 실제에 있어서는 칩 생성 중에 작업을 순간적

으로 멈춰 정지 상태에서의 전단 영역을 관찰하거나¹⁻³⁾, 절삭이 끝난 후 남겨진 칩들을 살펴보고 이를 토대로 절삭 중 전단 영역에서 발생하는 현상들을 유추한다^{4,5)}. 하지만 이 방법들은 칩이 생성되는 순간에서의 실시간 관찰이 아니라는 점에서 본질적으로 한계를 지니고 있다. 한편 최근에는 컴퓨터 시뮬레이션을 활용한 분석이 종종 활용되기도 하는데^{6,7)}, 시뮬레이션 결과의 정확성에 대한 검증은 아직 충분히 이루어지지 못한 실정이다.

이러한 이유로 절삭에서의 칩 생성 과정을 직접적으로 관찰하고자 하는 노력들이 지속적으로 이루어져 왔는데, 최근 고속 디지털 촬영 기술의 발전으로 인해 그 수준이 비약적으로 높아졌다^{8,9)}. 한

* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6396

Fax: +82-2-976-5173

E-mail address: hwangjh@seoultech.ac.kr (Jihong Hwang).

예로서 일부 연구자들은 단순 관찰을 넘어 유동 가시화를 위해 사용되던 분석 기법들을 디지털 영상에 적용하여 전단 영역 내 변형 양상을 정량적으로 분석하고자 하는 시도들을 하고 있다^[10,11].

본 연구에서는 이러한 앞선 연구들에 비해 상대적으로 높은 시간적, 공간적 해상도를 가지면서 전단 영역 내 변형 양상의 정량적 분석을 가능케 하는 칩 생성 관찰 및 분석 시스템을 개발하는 것을 목표로 한다. 칩 생성 관찰 및 분석 시스템은 미세 영역의 고속 촬영을 위한 미세 고속 화상 시스템과, 획득된 이미지를 분석하여 전단 영역 내 변형률속도 및 변형률 분포를 구하기 위한 이미지 분석 시스템으로 구성된다. 개발되는 이미지 분석 시스템은 금속 재료의 변형 양상을 분석하기 위해 유체의 유동 분석에 활용되던 입자화상 속도계측(*particle image velocimetry, PIV*)을 활용하는데, 이를 통해 전단 영역 내 변형률, 변형률속도 분포의 계산이 가능하다. 본 연구의 궁극적 목표는 이렇게 구축된 시스템을 통해 절삭 기하(공구날 반경, 절입량)에 따른 전단 영역 내 변형 양상(변형률, 변형률속도 분포)의 변화를 분석하여 전단 영역 내 변형 양상에 대한 절삭 조건의 영향을 고찰하는 것이다.

2. 칩 생성 관찰 및 분석 시스템

2.1 미세 고속 화상 시스템

절삭 현상은 기본적으로 매우 짧은 시간 동안 극심한 변형을 일으키는 소성 가공의 한 형태라고 할 수 있다. 일반적으로 소성 가공의 변형 거동을 파악하는 방법은 정적인 상태에서 이루어지기 때문에, 절삭 가공의 거동을 이해하는 데는 한계가 있다. 따라서 절삭 가공의 칩 생성 영역 내 거동을 관찰하기 위해서는 높은 배율의 렌즈와 매우 빠른 촬영 속도를 가진 측정 장치가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 1,000 FPS(*frame per second*) 이상의 속도로 고화질의 화상을 얻어낼 수 있는 초고속 카메라(*PHANTOM Miro-M310*)가 사용되었다. *PHANTOM Miro-M310*의 경우 최대 해상도 1,280×800 pixels에서 3,260 FPS의 속도로 촬영이 가능하다. 또한 미세한 크기의 칩 생성 영역을 관찰하기 위하여 최대 X18배율까지 초점 조정이 가능한 마이크로 줌 렌즈(*Navitar26-4195*)가 사용되었다. 초고속 카메라 CMOS 소자 하나의 크기는 20×20 μm이므로 X18 배율의 마이크로 줌 렌즈를 사용할 경우 공간 분해능은 약 1.111 μm×1.111 μm가 되는데, 이는 1.422 mm×0.889 mm의 면적을 일반 PC모니터 크기의 해상도로 분해할 수 있는 성능이다. 본 연구에 사용된 초고속 카메라와 마이크로 줌 렌즈의 사양은 Table 1과 2에 주어져 있다.

칩 생성 영역 내에서 피삭재의 흐름을 관찰하기 위해서는 충분히 빠른 속도에서 촬영이 이루어져야 한다. 또한 촬영 속도 증가와 배율 확대에 의한 빛 부족을 보완하기 위해 강한 조명을 필요로 한다.

이 때 주의할 점은 조명 장치에 의해 칩 생성 영역에 그림자 상이 맺히는 것을 피하고, 너무 강한 빛으로 인한 반사에 의해 간섭 받는 것을 피해야 한다. 따라서 촬영 속도와 노출 시간, 조명의 위치와 소재의 반사 영역을 조절하기 위해 본 실험에 앞서 예비 2차원 절삭 실험을 수행하였다. 즉, 절입량을 10 μm 간격으로 증가시키면서 칩 생성 영역 내 재료의 유동 관찰이 가능한 절입량을 확인하였다. 또한 렌즈의 배율을 저배율(X0.7)에서 고배율(X18)로 증가시키면서 적절한 배율을 선정하였다. 마지막으로 피삭재의 이송 속도를 10 mm/s에서 1,000 mm/s까지 증가시키면서 적절한 촬영 속도를 선정하였다. 그 결과 본 실험을 위해 선정된 실험 조건은 Table 3과 같다.

2.2 이미지 분석 시스템

칩 생성 과정 중 전단 영역 내 발생하는 재료의 유동을 분석하여 변형과 관련된 정량적 데이터를 얻기 위한 과정은 Fig. 1과 같다.

Table 1 Specification of high speed camera (Phantom Miro-M310)

Full resolutions	1,280×800 [pixel]
Pixel size	20 μm
Frame rate in full resolutions	3,260 FPS
Maximum frame rate	650,000 FPS
Minimum exposure time	1 μs
ISO sensitivity	13,000T mono-color
Lens mount	Nikon F-mount

Table 2 Specification of micro zoom lens (Navitar 26-4195)

Magnification	X0.7-X4.5
Optional parts	X2 attachment lens X2 F-mount adapter
Maximum available magnification	X18

Table 3 Photographic conditions

Range of depth of cut	30~200 μm
Optimal frame rate	5000 FPS
Optimal exposure time	40 μs
Optimal resolution	640×640 [pixel]
Actual projective area	1.42×1.42 [mm]
Magnification	X9
Maximum cutting speed	400 mm/s
Lighting system	100W-LED source

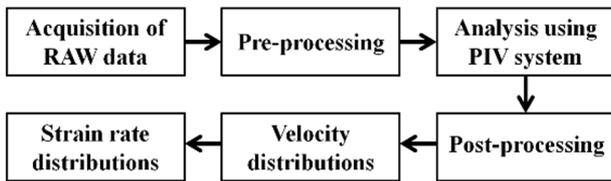


Fig. 1 Procedure of image analysis

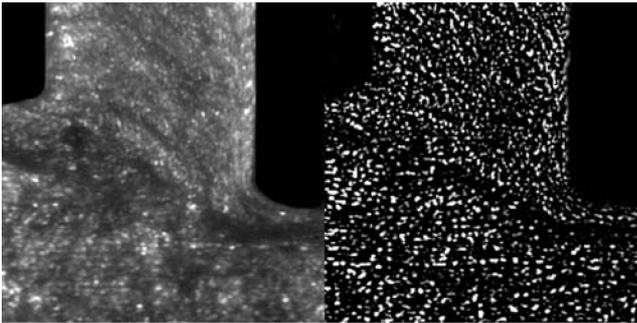


Fig. 2 Images before and after pre-processing

Fig. 1에서 RAW data는 카메라를 통해 촬영된 디지털 이미지로서 카메라 해상도와 같은 배열 크기를 가지며, 각 픽셀은 빛의 세기에 비례하는 8비트의 디지털 값(0-255)을 갖는다. RAW data는 전 처리 과정을 통해 분석에 용이한 형태의 화상으로 변환되고, PIV기법을 통해 속도 벡터로 표현된다. 마지막으로 후처리 과정을 거쳐 속도 분포 및 변형률속도 분포가 산출된다.

2.2.1 이미지 전처리 과정

유체의 유동 분석에 PIV기법을 적용하기 위해서는 유체 추적을 쉽게 하기 위해 유체 안에 추적 입자를 섞어야 한다. 마찬가지로 PIV기법을 활용하여 칩 생성 과정 중 재료의 유동을 관찰하기 위해서는 이에 상응하는 추적 입자를 확보하는 것이 요구된다. 하지만 유체와 달리 금속 재료는 추적 입자를 인위적으로 섞는 것이 어려우므로 거친 표면, 계층물, 결정립(grain) 등에 의한 난반사 영역을 대체물로 이용한다. 그러나 이러한 대체물들은 주변 배경에 비해 충분한 대비를 갖지 못할 수 있기 때문에 PIV 기법 적용 시 오류 벡터를 발생시킬 수 있다. 따라서 필터를 적용하여 이미지를 보정하는 영상처리과정, 즉 전처리(pre-processing) 과정이 요구된다. 전처리 과정에서는 sharpen 필터를 사용하여 경계를 날카롭게 하고, 밝기와 대비를 적절하게 조절하여 외부 경계와의 구분을 명확하게 한다. 그 다음으로는 고역 통과 필터(high-pass filter, HPF)를 사용하여 Fig. 2와 같이 추적 입자와 배경(background) 사이에 높은 대비 효과를 만들어낸다.

2.2.2 입자화상속도계측

입자화상속도계측(particle image velocimetry, PIV) 은 이미지

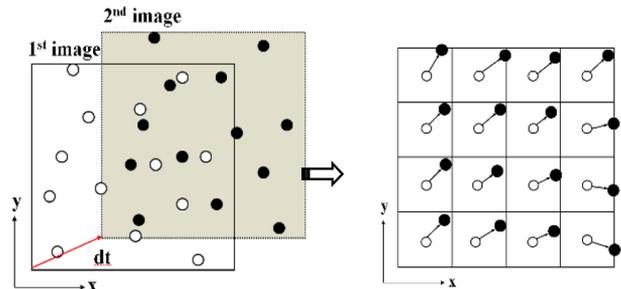


Fig. 3 Principle of particle image correlation

상의 입자 이동을 추적하여 벡터로 출력하고, 이를 통해 속도장, 압력 분포, 온도 분포 등을 산출하는 디지털 화상 상관법(digital image correlation)의 한 기법이다. 기본 원리는 Fig. 3과 같이 미소 시간 간격으로 촬영한 두 화상에서 일정 크기로 격자를 나누고 각각의 격자 내에서 입자가 가지는 픽셀값을 서로 비교하여 가장 높은 상관관계를 갖는 입자를 찾아 두 입자 사이의 위치 벡터를 확정하는 것이다. 속도 벡터는 위치 벡터를 두 화상의 시간차로 나눠 줌으로서 구한다.

본 연구에서 PIV는 서울대학교 Flow Systems Lab에서 개발된 FlowVision 프로그램을 이용하여 수행되었다. 칩 생성 이미지의 분석은 한 번의 질삭 실험을 통해 얻어진 만 장 이상의 연속 이미지 중에서 칩의 유동이 정상 상태(steady state)에 도달했을 때의 1,000개 이상의 이미지에 대해 2장씩 짝을 지어 수행되었다. 칩 생성 영역 내 속도 분포는 PIV를 통해 산출된 500개 이상의 속도 장을 동일한 배열 위치에서 산출평균내어 구하였다.

2.2.3 변형률속도 및 변형률 분포 계산

앞서 PIV를 통해 구한 속도 분포는 Eq. (1)을 이용하여 비교적 간단히 평면에 대한 변형률속도 분포로 변환될 수 있다. 즉, 속도 성분(u, v)의 수평과 수직 방향(x, y)으로의 변화량을 구함으로써 수평 방향 변형률속도($\dot{\epsilon}_{xx}$), 수직 방향 변형률속도($\dot{\epsilon}_{yy}$), 전단 변형률속도($\dot{\gamma}_{xy}$)를 각각 구할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \dot{\epsilon}_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \dot{\gamma}_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (1)$$

유효 변형률속도(effective strain rate)는 금속 재료가 유동하며 변형을 일으킬 때 총체적으로 얼마나 빨리 변형이 발생하는지 보여주는 척도가 되는데 앞서 구한 가로, 세로, 전단 변형률 속도를 Eq. (2)에 대입함으로써 구할 수 있다. 참고로 Fig. 4는 PIV 이용하여 얻어진 벡터장으로부터 속력, Von-mises 유효변형률 속도($\dot{\epsilon}_{eff}$)를 구한 예이다.

$$\dot{\epsilon}_{eff} = \sqrt{\frac{4}{9} \left\{ \frac{1}{2} [(\dot{\epsilon}_{xx} - \dot{\epsilon}_{yy})^2 + \dot{\epsilon}_{xx}^2 + \dot{\epsilon}_{yy}^2] + \frac{3}{4} \dot{\gamma}_{xy}^2 \right\}} \quad (2)$$

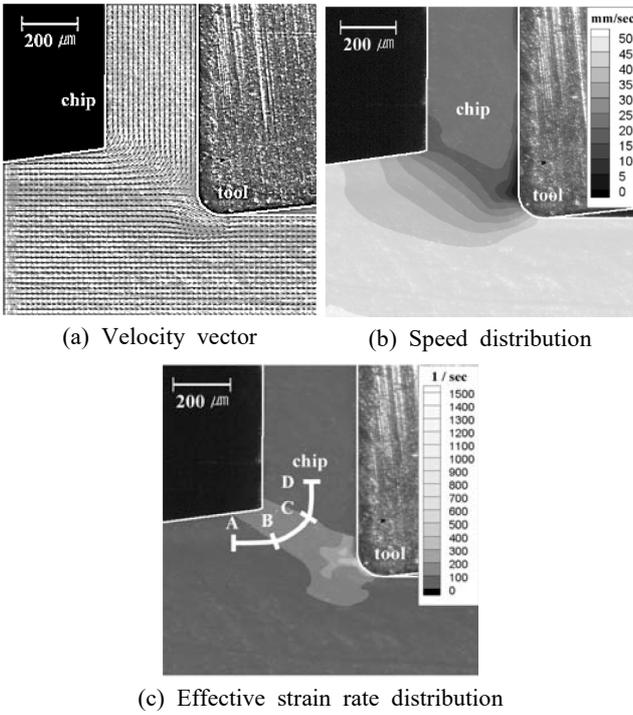


Fig. 4 Examples of strain and strain rate distributions calculated from the vector field

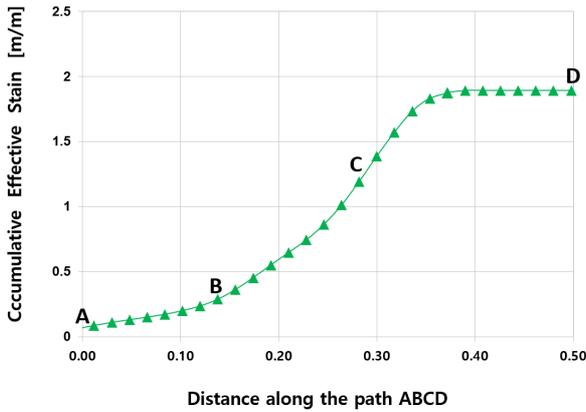


Fig. 5 Cumulative effective strain along the chip flow path in the deformation zone (line ABCD) in Fig. 4(c)

소재가 전단 영역을 지나 칩으로 배출되기까지 겪게 되는 변형률 ($\dot{\epsilon}_{eff[A-D]}$)은 칩 생성(flow) 경로(Fig. 4(a)에서 경로 ABCD)를 따라가면서 각 지점의 유효변형률속도($\dot{\epsilon}_{eff}(i)$)와 체류 시간(Δt_i)을 곱한 값을 누적시킴으로써 구할 수 있다(Eq. (3)). Fig. 5는 Fig. 4(c)에 이 방법을 적용하여 구한 누적 유효변형률을 보여준다.

$$\epsilon_{eff[A-D]} = \sum \epsilon_{eff}(i) = \sum \dot{\epsilon}_{eff}(i) \times \Delta t_i \quad (3)$$

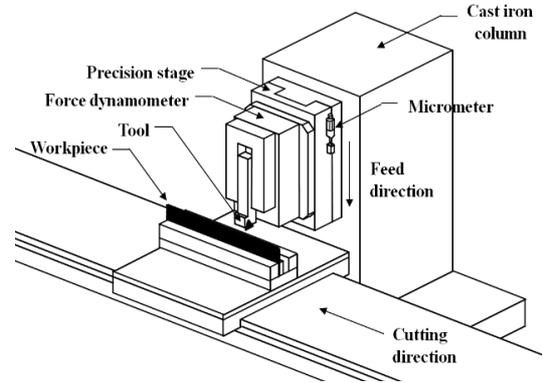


Fig. 6 Two dimensional orthogonal cutting arrangement

3. 이차원 직교 절삭 실험

3.1 실험 장치

본 연구에서는 절삭 실험을 위해 Fig. 6과 같이 선형 슬라이드(linear slide)와 마이크로 스테이지로 구성된 순수 2차원 절삭 실험 장치가 사용되었다. z축에는 진동의 영향을 최소화하기 위해 주철 재질의 column을 사용하였고 강성이 뛰어난 무마찰 슬라이드(쥘MID MVRU9210)를 부착하였다. 또한 자중에 의한 무마찰 슬라이드의 낙하를 방지하기 위해 에어 실린더를 설치하여 카운터 밸런싱을 구현하였다. 그리고 1 μ m의 분해능을 가진 디지털 마이크로미터를 설치하여 마이크로 단위의 절입량을 조절할 수 있도록 하였다. 피삭재는 최대 1,000 mm/s의 속도로 움직일 수 있는 슬라이드에 부착되었으며, 이송 속도는 서보모터 컨트롤러에 의해 제어되었다.

3.2 실험 조건

순수 2차원 절삭 실험에는 99.95%의 높은 순도를 가지는 두께 1.5 mm의 아연(제조사: Goodfellow) 판재가 피삭재로 사용되었다. 공구로는 한국아금(주)에서 생산된 선삭용 초경 인서트(가 사용되었는데, 공구 홀더에 부착되었을 때 공구 경사각(rake angle)은 0°, 공구 여유각은 7°였다.

실험은 두 가지 절삭 조건의 영향을 살펴볼 수 있도록 설계되었다. 먼저 공구날 반경의 영향을 살펴보기 위해 공구날 반경을 세 가지 수준(35, 70, 105 μ m)으로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 이 경우 절입량은 53 μ m로 고정되었다. 다음으로는 절입량(depth of cut)에 대한 영향을 살펴보기 위해 절입량을 세 가지 수준(35, 70, 105 μ m)으로 변화시키면서 실험을 수행하였는데, 공구날 반경은 70 μ m로 고정되었다. 절삭 속도는 100 mm/s로 고정되었다.

한편, 절삭 중 칩 생성 과정을 촬영하기 위해서는 피삭재, 공구,

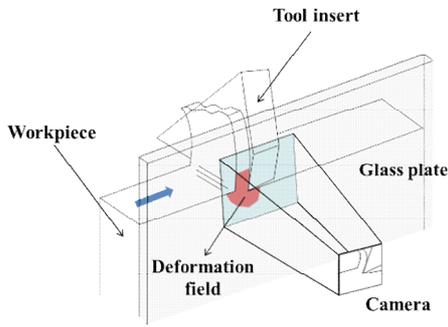


Fig. 7 Optical arrangement for photographing the deformation field in 2-D orthogonal machining

칩 모두에 초점을 맞추는 것이 요구된다. 하지만 버(burr)가 발생하거나 칩이 올바른 방향으로 유동하지 않는 경우 초점이 맞지 않게 되는 경우가 생길 수 있다. 따라서 이러한 현상을 방지할 목적으로 Fig. 7에 보이는 것과 같이 연삭된 인서트와 피삭재의 옆면에 투과율이 높은 유리면을 설치하여 초점면이 유지될 수 있도록 하였다.

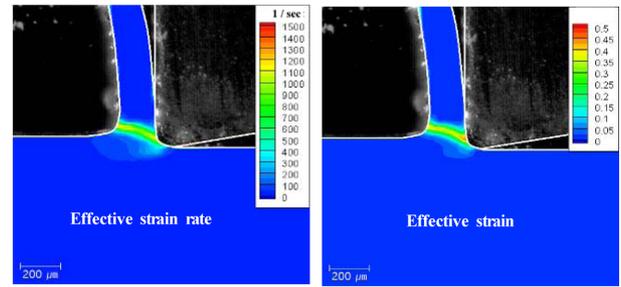
4. 결과 및 분석

4.1 공구날 반경의 변화에 따른 실험 결과

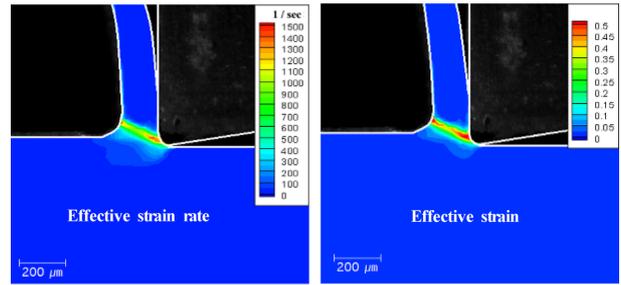
Fig. 8은 공구날 반경을 세 가지 수준(35, 70, 105 μm)으로 변화시키면서 2차원 직교 절삭 실험을 수행했을 때 주변형영역에서의 유효변형률속도 및 유효변형률의 분포 변화를 보여준다. 이 경우 절삭 속도는 100 mm/s, 절입량은 53 μm 로 고정되었다. 그림에서 전단 변형이 집중적으로 일어나는 주변형 영역은 유효변형률속도 또는 유효변형률이 급격히 증가하는 영역이며, 이 영역은 band 형태를 지님을 알 수 있다. 또한 유효변형률속도와 유효변형률이 최대가 되는 지점은 주변형 영역의 중간 지점임을 알 수 있다.

Fig. 8에서 공구날 반경에 따른 유효변형률속도와 유효변형률의 변화 양상은 Fig. 4에서와 같은 방법으로 주변형 영역 내 칩 생성 경로를 따라 구한 유효변형률속도와 유효변형률 선도를 통해 알아볼 수 있다. 예로서 Fig. 9는 Fig. 8에서 주변형 영역 내 칩 생성 경로를 따라 구한 유효변형률속도 선도를 보여주는데 그림에서 알 수 있듯이 최대 유효변형률속도는 공구날 반경에 따라 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다. 이는 변형률속도에 가장 큰 영향을 주는 절삭 속도가 100 mm/s로 고정되어 있기 때문인 것으로 판단된다.

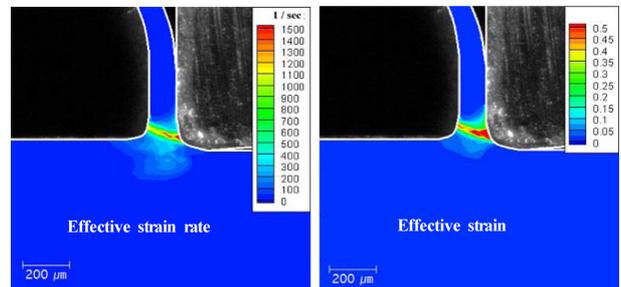
한편 Fig. 10은 Fig 8에서 주변형 영역 내 칩 생성 경로를 따라 구한 유효변형률을 보여주는데, 최대 유효변형률은 공구날반경이 35 μm 일 때 최소가 되나 공구날 반경이 70, 105 μm 일 때는 유사한 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 공구날반경이 작을 때, 즉 공구가



(a) Cutting Edge Radius: 35 μm



(b) Cutting Edge Radius: 70 μm



(c) Cutting Edge Radius: 105 μm

Fig. 8 Variation of the strain rate and effective strain fields in the deformation zone with the increase of cutting edge radius (cutting speed: 100 mm/s, depth of cut: 53 μm)

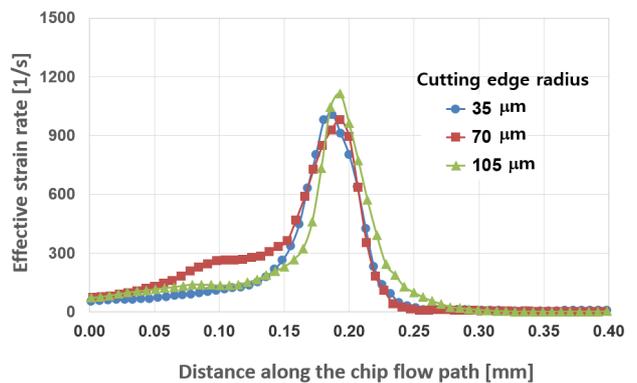


Fig. 9 Effective strain rate along the chip flow path in the deformation zone with the variation of cutting edge radius (cutting speed: 100 mm/sec, depth of cut: 53 μm)

날카로울 때 칩 생성 시 수반되는 변형의 양이 상대적으로 작아지기 때문인 것으로 판단된다. 칩 생성 시 수반되는 변형의 총 양은 유효변형률의 누적 곡선(Fig. 11)을 통해 알 수 있는데, 그림에서

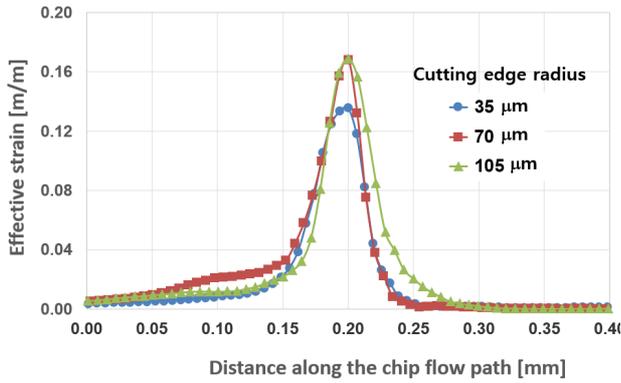


Fig. 10 Effective strain along the chip flow path in the deformation zone with the variation of cutting edge radius (cutting speed: 100 mm/sec, depth of cut: 53 μm)

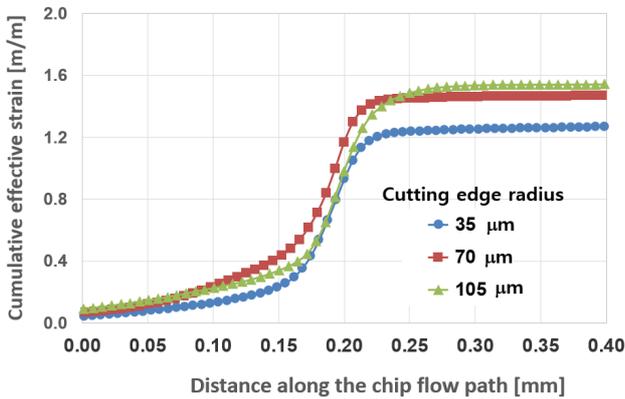


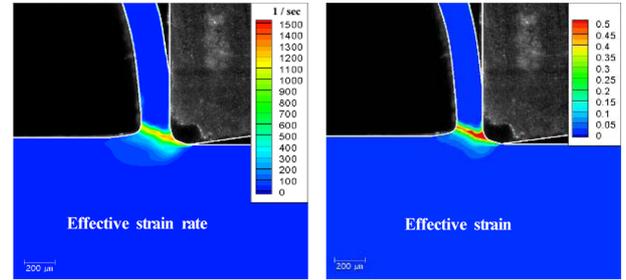
Fig. 11 Total effective strain along the chip flow path in the deformation zone with the variation of cutting edge radius (cutting speed: 100 mm/sec, depth of cut: 53 μm)

공구날반경이 35 μm 일 때 유효변형률의 누적량이 최소가 됨을 확인할 수 있다.

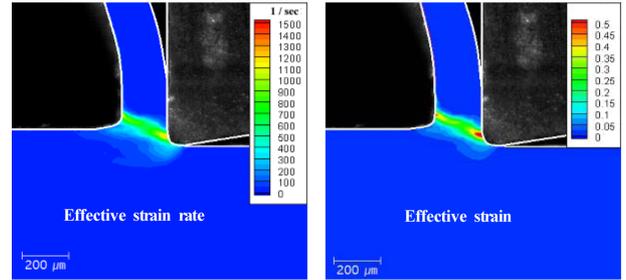
4.2 절입량 변화에 따른 실험 결과

Fig. 12는 절입량(depth of cut)을 세 가지 수준(35, 70, 105 μm)으로 변화시키면서 2차원 직교 절삭 실험을 수행했을 때 주변형 영역에서의 유효변형률속도 및 유효변형률의 분포 변화를 보여 준다. 이 경우 절삭 속도는 100 mm/s, 공구날반경은 70 μm 로 고정되었다. 그림에서 전단 변형이 집중적으로 일어나는 주변형 영역은 유효변형률속도 또는 유효변형률이 급격히 증가하는 영역이며, 이 영역은 Fig 8에서와 같이 band 형태를 지님을 알 수 있다.

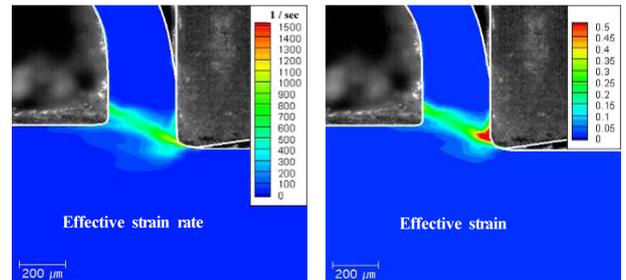
Fig. 13은 Fig. 12에서 주변형 영역 내 칩 생성 경로를 따라 구한 유효변형률속도 선도를 보여주는데 그림에서 알 수 있듯이 최대 유효변형률속도는 절입량이 작아짐에 따라 커지는 것을 알 수 있다. 이는 공구날 반경이 70 μm 로 비교적 크기 때문에 절입량이 35 μm 와 같이 작은 경우에는 음의 공구 경사각이 커져 순간적으로



(a) Depth of Cut: 35 μm



(b) Depth of Cut: 70 μm



(c) Depth of Cut: 105 μm

Fig. 12 Variation of the strain rate and effective strain fields in the deformation zone with the increase of depth of cut (cutting speed: 100 mm/s, cutting edge radius: 70 μm)

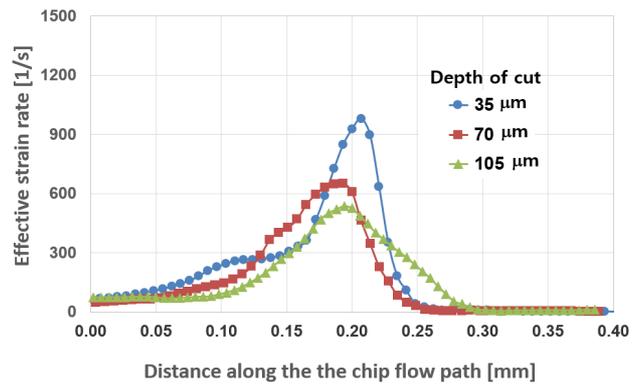


Fig. 13 Effective strain rate along the chip flow path in the deformation zone with the variation of depth of cut (cutting speed: 100 mm/s, cutting edge radius: 70 μm)

극심한 변형이 수반되기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 영향은 절입량이 커짐에 따라 작아져 최대 유효변형률속도 역시 작아짐을

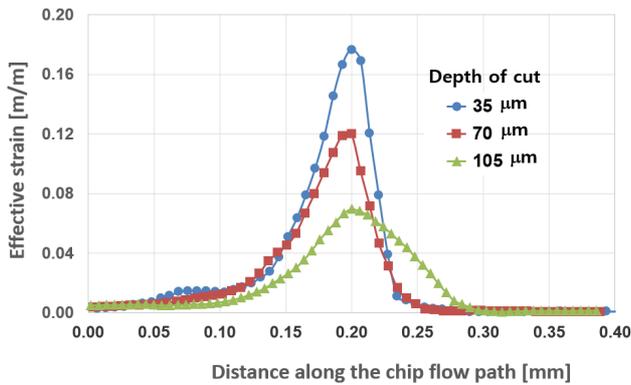


Fig. 14 Effective strain along the chip flow path in the deformation zone with the variation of depth of cut (cutting speed: 100 mm/s, cutting edge radius: 70 μm)

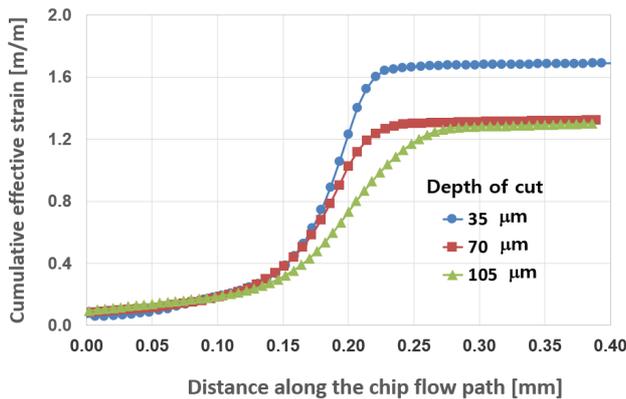


Fig. 15 Total effective strain along the chip flow path in the deformation zone with the variation of depth of cut (cutting speed: 100 mm/s, cutting edge radius: 70 μm)

알 수 있다.

한편 Fig. 14는 Fig 12에서 주변형 영역 내 칩 생성 경로를 따라 구한 유효변형률을 보여주는데, 최대 유효변형률은 절입량이 35 μm 일 때 최대가 되고 절입량이 105 μm 일 때 최소가 됨을 알 수 있다. 이는 동일한 공구날반경에 대해서는 절입량이 작을 때는 공구가 상대적으로 무디게 작용하여 칩 생성 시 수반되는 변형의 양이 상대적으로 커지기 때문인 것으로 판단된다. 칩 생성 시 수반되는 변형의 총 양은 유효변형률의 누적 곡선(Fig. 15)을 통해 알 수 있는데, 그림에서 절입량이 35 μm 일 때 유효변형률의 누적량이 최대가 되고 절입량이 105 μm 일 때 유효변형률의 누적량이 최소가 됨을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 상대적으로 높은 시간적, 공간적 해상도를 가지면서 전단 영역 내 변형 양상의 정량적 분석을 가능케 하는 칩 생성

관찰 및 분석 시스템이 개발되었다. 개발된 시스템은 미세 영역의 고속 촬영을 위한 미세 고속 화상 시스템과, 획득된 이미지를 분석하여 전단 영역 내 변형률속도 및 변형률 분포를 구하기 위한 이미지 분석 시스템으로 구성된다. 이미지 분석 시스템에는 유체의 유동 분석에 활용되던 입자화상속도계측(particle image velocimetry, PIV)이 금속 재료의 변형 양상 분석을 위해 활용되었는데 이를 통해 전단 영역 내 변형률, 변형률속도 분포 계산이 가능하게 되었다.

이렇게 구축된 시스템을 통해 절삭 기하(공구날 반경, 절입량)에 따른 전단 영역 내 변형 양상(변형률, 변형률속도 분포)의 변화를 분석하여 전단 영역 내 변형 양상에 대한 절삭 조건의 영향이 고찰되었다. 그 결과 절삭속도와 절입량이 일정할 때 공구날반경의 변화에 따른 최대 변형률속도 변화는 크지 않은 것으로 파악되었다. 하지만 공구날반경이 작을 때 칩 생성에 필요한 누적 변형량은 상대적으로 작아짐을 알 수 있었다. 한편, 절삭속도와 공구날 반경이 일정할 때 최대 변형률속도 및 누적 변형량은 절입량이 작아짐에 따라 커짐을 알 수 있었다.

이러한 결과는 본 연구를 통해 개발된 칩 생성 관찰 및 분석 시스템이 절삭에 대한 보다 근본적인 이해를 높이는데 활용될 수 있음을 보여준다고 할 수 있다. 또한 이렇게 획득한 정보는 절삭 메커니즘에 대한 새로운 모델 개발 및 기존 모델의 검증에 유용하게 활용될 수 있으리라 기대된다.

후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] Hasting, W. F., 1957, A New Quick-stop Device and Grid Technique for Metal Cutting Research, *Annals of the CIRP*, 15 109-116.
- [2] Yeo, S. H., Lui, W. W., Phung, V., 1992, A Quick-stop Device for Orthogonal Machining, *Journal of Materials Processing Technology*, 29 41-46.
- [3] Ozturk, S., Altan, E., 2012, Design of a Computer Aided Quick-stop Device for Study of Dead Metal Zone Formation, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34 501-505.
- [4] Trent, E. M., 1967, Conditions of Seizure at the Chip-tool Interface, *Machinability*, ISI Special Report, 94 11-18.
- [5] Wright, P. K., Trent, E. M., 1974, Metallurgical Appraisal of Wear Mechanisms and Processes on High Speed Tools, *Metals Technology*, 6 13-23.

- [6] Beak, S. Y., Kong, J. S., Jung, S. T., Kim, S. H., Jin, D. S., 2017, A Study on the Simulation for Prediction of Cutting Force in Milling Process, Transactions of Korean Society of Mechanical Engineers A, 41 353-359.
- [7] Youn, J. W., Kim, H. S., 2010, A Study on the Effectiveness of Finite Element Method in Orthogonal Cutting, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 19:1 42-49.
- [8] Pujana, J., Arrazola, P. J., Villar, J. A., 2008, In-process High-Speed Photography Applied to Orthogonal Turning, Journal of Materials Processing Technology, 202:1-3 475-485.
- [9] Hwang, J., Chandrasekar, S., 2011, Contact Conditions at the Chip-Tool Interface in Machining, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 12:2 183-193.
- [10] Lee, S., Hwang, J., Shankar, M. R., Chandrasekar, S., Compton, W. D., 2006, Large Strain Deformation Field in Machining, Metallurgical and Materials Transactions, 37A 1633-1643.
- [11] Cai, S. L., Chen, Y., Ye, G. G., Jiang, M. Q., Wang, H. Y., Dai, L. H., 2015, Characterization of the Deformation Field in Large-strain Extrusion Machining, Journal of Materials Processing Technology, 216 48-58.