

전자현미경내 마이크로 절삭의 화상처리에 의한 절삭 기구 해석

허성중*

(논문접수일 2003. 5. 9, 심사완료일 2003. 5. 29)

Analysis of Cutting Mechanism by Image Processing on Micro-Cutting in SEM

Sung-Jung Heo*

Abstract

This research analyzes the cutting mechanism of A1100-H18 of commercially pure aluminum by image processing in SEM(Scanning Electron Microscope) for the measurement of strain rate distribution near a cutting edge in orthogonal micro-cutting. The distribution is measured using various methods in order. The methods are in-situ observations of cutting process in SEM, inputting image data, a computer image processing, calculating displacements by SSDA(Sequential Similarity Detection Algorithm) and calculating strain rates by FEM. The main results obtained are as follows: (1) It enables to measure a microscopic displacement near a cutting edge. (2) An application of this system to cutting process of various materials will help to make cutting mechanism clear.

Key Words : SSDA(수차잔차검출법), Image Processing(화상처리), Micro-cutting(마이크로 절삭), SEM(주사형 전자현미경)

1. 서론

금속재료의 절삭기구를 설명하는 것은 공구마모기구와 피삭재의 표면거칠기의 생성기구, 잔류응력의 생성상태 등을 설명하기 위해 대단히 중요하며, 이를 위해 이차원절삭에 있어서 피삭재의 거동을 관찰한 예는 더러 있었다⁽¹⁾⁽²⁾.

또한, 금속재료의 변위와 변형률 측정법으로는 여러 가지 수법이 확립되어 인장, 굽힘 시험으로 대표되는 재료역학의 분야와 균열선단근방의 해석의 분야 등, 그 목적에

맞게 광범위한 분야에 응용되고 있다.

절삭분야에 있어서도 피삭재에 격자를 나누어, 그 변형을 관찰함으로써 변형률을 해석하는 시도가 행해지고 있다^{(3),(4)}.

그러나 이들 방법은 피삭재의 제작에서부터 변형률 계산까지에 걸리는 시간과 노력이 지나치게 많이 소요되어, 실제 절삭에 적용하기에는 부적당하므로, 비접촉형의 측정법인 화상을 이용하는 방식⁽⁵⁾을 이용하는 것이 유리하다고 생각된다.

* 주저자, 두원공과대학 기계과 (sjheo@doowon.ac.kr)
주소: 456-890 경기도 안성시 죽산면 장원리 678

이 방법에 의하면 비교적 큰 변형률의 측정이 가능하고 더구나 2차원적인 변위 분포도 볼 수 있다. 또 변형률과 응력 계산을 위한 피삭재에 가하는 일련의 처리를 행하기 쉽다고 생각된다.

그러나 절삭은 다양하고 복잡한 물리 현상을 수반하기 때문에 이와 같은 방법이 절삭기구해석을 위한 유효한 수단으로 정립되어 있는 것이라고 보기는 어렵다.

모아레법과 광탄성법 등을 이용하여 화상처리를 컴퓨터에 의해 행하는 방식에 관한 연구⁽⁶⁾는 보고되어 있지만 이 수법을 절삭 중의 금속재료의 절삭에 있어서 변형측정에 이용하려고 하는 경우, 모아레용 격자의 에칭과 광탄성용 막의 첩부에 있어서 특수한 기술을 필요로 하는 등의 문제점이 적지 않다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 패턴 매칭(pattern marching)의 수법^{(7),(8)}이 유용하다고 여겨진다. 이 수법은 기상위성으로부터 보내져 온 화상의 위치 조정 등에 이용되고 있으며, 화상의 땅모양으로부터 대응점을 구하는 것이 가능한 것이기도 하다.

연속하는 절삭과정의 화상간에 패턴 매칭 수법을 이용할 경우, 얻어진 정보는 변위가 되므로 그곳으로부터 변형과 응력을 도출할 수 있는데, 여기서는 각종 해석에 폭 넓게 이용되고 있으며 절삭에 있어서도 시뮬레이션 등의 분야에서 많이 사용되고 있는 유한요소법이 적용된다.

한편, 저속 2차원절삭에 있어서 절삭 상태의 관찰은, 종래에도 광학현미경등을 이용하여 행하여져 왔지만 성능상, 관찰 배율상, 분해능 및 집점 심도상에 큰 제약이 있었다.

따라서, 본 연구에서는 주사형전자현미경(Scanning Electron Microscope: 이하 SEM으로 표기함)내 직접관찰법을 통하여 기존 연구에서의 문제점들을 해결하고 정확한 절삭 거동

을 해명하기 위해 대표적인 연질 난삭재인 공업용 순알루미늄을 마이크로 절삭하는 것을 시도하였다. 구체적으로는 SEM 내의 마이크로 절삭으로 얻어진 연속 화상을 패턴 매칭법과 유한요소법(FEM: Finite Element Method)으로 해석하여 절삭과정에 있어서 변형률과 응력의 분포를 도출하는 시스템을 구축하며, 실험에 의해 본 수법의 유효성을 검증하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험 및 해석시스템

2.1 SEM내마이크로 절삭 장치

Fig. 1은 마이크로 절삭장치를 내장한 SEM의 외관이며, Fig. 2는 SEM의 경통 내부에 장치된 마이크로 절삭 장치의 구조를 나타낸 것이다.

본 장치는 크게 나누어 SEM내 시료대에 고정된 베이스 블록부 (1), 그 위를 이동하는 시료대 베이스부 (2) 및 시료대 (3)과 공구대 (4)로 구성되어 있다.

공구는 공구대에 삽입하며, 시료대 베이스는 시판되고 있는 레일 블록(rail block)과 볼 나사(ball screw)에 의해 이송 방향으로 베이스 블록 위를 부드럽게 미끄럼 운동할 수 있다. 피삭재의 이송은 볼 나사를 SEM 경통 외부의 스텝핑 모터(steping motor)에 직접 연결하여 제어할 수 있다.

2.2 피삭재 및 실험 조건

SEM 내 마이크로 절삭 장치의 시료대에 물릴 수 있는 피삭재의 크기는 최대 10mm(절삭방향)×17mm(안쪽방향)×2mm(두께)까지 사용하는 것이 가능하나, 본 실험에서는 10mm×10mm×0.5mm의 크기로 일정하게 하였다.

피삭재를 순알루미늄(A1100-H18)으로 택한 이유는 재

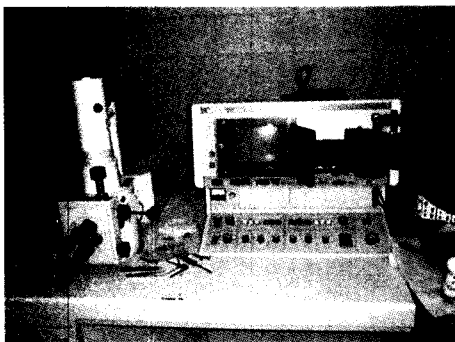


Fig. 1 SEM experimental apparatus

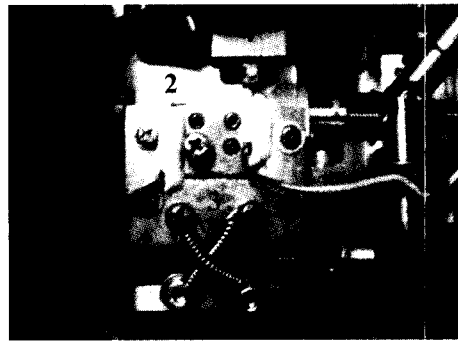


Fig. 2 Experimental setup for micro-cutting

Table 1. Workpiece and Experimental condition

Workpiece	Aluminum(Al1100) H18 Young modulus: 72[GPa] Poissons' ratio: 0.34 Flow stress characteristics: $\sigma = 255(0.00364 + \epsilon)^{0.64}$
Tool	Diamond Rake angle: 0° Clearance angle: 3°
Cutting condition	45.8[$\mu\text{m/s}$]
Depth of cut	12.0[μm]

료의 특성상 절삭 열에 의해 칩의 공구응착, 즉 빌트 업 에지가 잘 생성되는 대표적인 연질 난삭재이기도 하여 여타의 난삭재에 대한 해석 가능성을 살펴보기 위한 것이기도 하고 한편으로는 시편의 제작 및 해석이 용이하기 때문이다.

피삭재의 관찰 표면은 연마포지의 1000번까지 표면 연마하여, 버핑으로 마무리한 다음 10% 수산화나트륨(NaOH) 용액으로 약 10분간 에칭(etching)하여 산화마그네슘(MgO)의 결정립을 부착시킴으로써 화상처리에서 유효한 표면의 막을 형성하게 되었다. 마지막으로 전자현미경의 전자의 반사율을 일정하게 시키기 위해 표면에 금(Ag) 코팅을 입혔다.

피삭재의 재질 및 기계적 성질과 SEM 내에서의 각종 마이크로 절삭 조건은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

사용한 공구는 단결정 다이아몬드공구(경사각 $\alpha=0^\circ$, 여유각 $\beta=3^\circ$)이다. 우선 정해진 절삭 깊이를 설정한 후, 스테핑 모터에 의해 이송을 주면서 절삭을 반복하여, 수 μm 씩의 절삭 현상을 기록함으로써 화상 처리용 데이터들을 수집하였다.

2.3 화상 입출력 시스템과 변형률 · 응력 해석

화상처리는 초대형의 계산기로부터 워크스테이션, 그리고 퍼스널 컴퓨터가 이용되어 지고 있다.

계산기 시스템의 규모에 있어서 고급언어의 이용, 파일의 관리, 시스템의 충실, 연산의 고속화, 주기억의 용량이라는 측면에서 막대한 데이터를 취급하는 화상처리에 있어서는 대형계산기가 바람직하지만 화상용의 입출력기기는 표준적인 시스템이 아니므로 접속이 용이하지 않아 제어용의 퍼스널 컴퓨터가 적당하다.

따라서 본 연구에서는 SEM내 마이크로절삭의 관찰에 있어서 객관성, 재현성, 정도, 효율을 높일 수 있도록 퍼스널 컴퓨터내에 부착된 화상처리보드에 SEM 화상을 입력하는

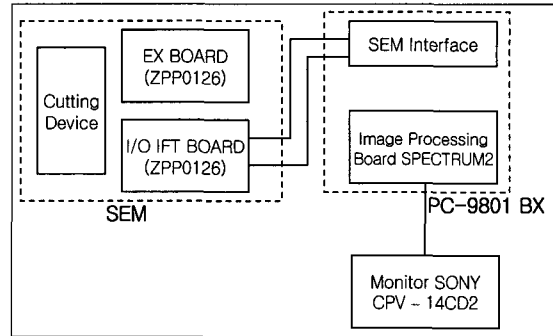


Fig. 3 Schematic apparatus for image processing system

시스템을 구축하였다.

SEM 화상을 퍼스널 컴퓨터로써 받아 출력하기 위한 시스템 전체의 개념도를 Fig. 3에 나타내었다.

SEM의 기본원리는 전자선에서 시료의 표면상을 주사하여, 그 시점에서의 2차 전자의 크기를 화상신호로써 화면상에 표시하게 된다.

입력화상은 RGB 출력에서 모니터에 표시되며 필요한 화상은 화상 데이터를 변환소프트를 이용하여 BMP 형식으로 출력할 수 있다.

또 화상메모리로의 액세스 등 고속연산의 필요한 부분 등은 어셈블리어에 기록되어, C언어와 링크시켜 대화형식의 화상처리 프로그램을 구성하였다.

이와 같이 본 연구에서 행해진 공구의 에지 검색과 평균화, 변위 계산(패턴 매칭) 등의 화상처리 프로그램도 C언어에 의해 구성하여, 라이브러리에 추가하는 형식으로 소프트웨어 개발을 행하였다.

2.4 SEM내 마이크로절삭의 정량 해석

SEM 내 마이크로 절삭에 있어서는 목적에 따라 여러 가지 관찰 배율을 사용하게 된다. 따라서 화상 처리 보드에 입력 화상의 1pixel이 나타내는 실제의 길이는 각 관찰 배율에 의해 다른 값이 된다. 화상처리의 단위는 pixel으로 행해

Table 2. Magnitude of 1 pixel

× 500	0.66 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
× 750	0.44 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
× 1,000	0.33 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
× 1,500	0.22 $\mu\text{m}/\text{pixel}$
× 2,000	0.11 $\mu\text{m}/\text{pixel}$

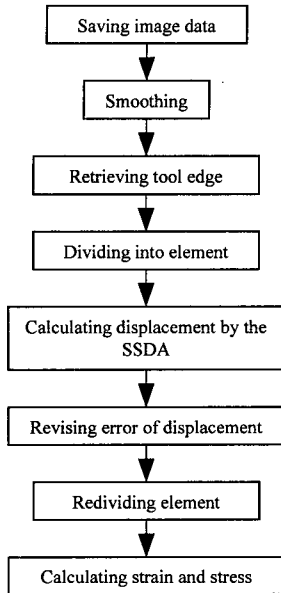


Fig. 4 Flowchart of analysis

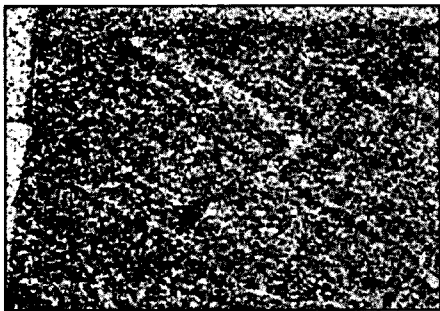


Fig. 5 Gathering of initial SEM image

지기 때문에, 공구 이동량 등 실제의 길이를 파악하기 위해서는 계산을 필요로 한다.

따라서, SEM 내의 시료대에 스케일을 부착하여, 그 화상을 같이 입력하여 1pixel에 해당되는 실제의 길이를 측정하였다. Table 2에 본 연구에서 사용된 화상 데이터의 SEM 배율과 그 때의 1pixel 당 길이를 나타내었다.

SEM내 마이크로 절삭에서 얻어진 연속화상으로부터 공구 날 끝 부근의 응력, 변형을 분포를 도출하는 순서를 Fig. 4에 나타내었으며, 이하에 각각의 수법에 대해 상세히 설명한다.

SEM내 마이크로 절삭으로부터 얻어진 화상의 처리는 컴퓨터 내에 설치한 화상처리 보드의 화상처리 라이브러리를

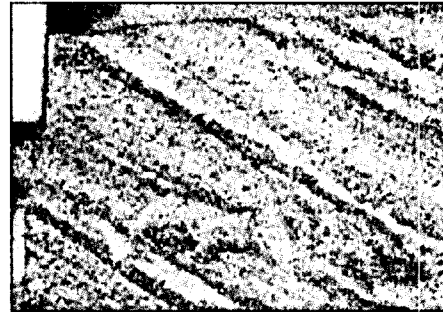


Fig. 6 Average of SEM images



Fig. 7 Retrieving of tool edge

이용하여 행하였다.

변형률과 응력의 해석 과정의 첫 번째 순서로서 Fig. 5과 같이 SEM 내에서의 절삭과정을 관찰하여 그 SEM 화상을 화상처리 보드를 통하여 컴퓨터 내에 기억시킨다.

입력한 상태로의 화상 데이터에서는 노이즈가 많아 뒤의 대응점 탐색에서 오대응을 일으키므로 평균화의 처리를 이용하여 Fig. 6와 같이 노이즈를 경감시키며 Fig. 7와 같이 공구이동 전후의 화상에 대하여 공구의 에지 검색을 행한다.

공구 에지 부근에서는 화상에 큰 농도의 변화가 나타나기 때문에 미분처리에 의해 에지를 검출한 후, 최소자승법으로 공구 에지라인을 나타내어 공구 영역과 피삭재 영역을 분할한다.

다음으로 피삭재 영역을 삼각형 요소로 분할하여 그 절점을 변위 측정의 기준점으로 한다.

대응점 탐색의 방법으로서 수차잔차검출법(逐次殘差檢出法, SSDA: Sequential Similarity Direction Method)을 이용하여 Fig. 8과 같이 절점이 이동한곳을 결정하여 변위를 구한다.

SSDA법은 2화상간의 위치 합을 행하기 위한 수법으로 이동전의 화상의 일부분을 일정 크기의 윈도우로 따내어 이

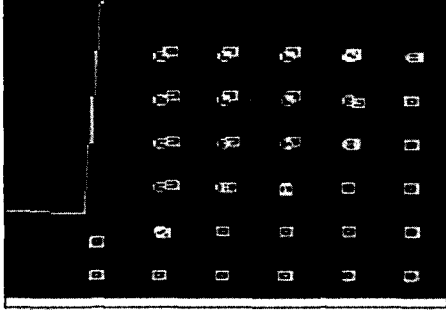


Fig. 8 Measurement of displacement by SSDA

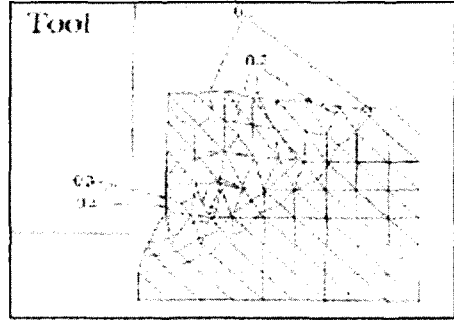


Fig. 9 Calculation of strain and stress

동 후의 화상의 어느 부분에 대응하고 있는가를 탐색한다. 대응하고 있다고 생각되어지는 것은 화상 간에 있어서 휘도 오차의 누적된 잔차가 최소화되는 곳이다. 이것에 의해 화상 간에 대응하는 윈도우를 구할 수 있으며 그 때의 윈도우의 중심점의 이동량을 변위로 한다.

다음으로 측정된 변위를 탄소성구성식에 대입하여 각 요소의 변형률과 응력을 계산한 결과를 Fig. 9와 같이 나타낸다.

여기서, 절삭 폭이 절삭 깊이에 비해 대단히 크기 때문에 평면 변형률 문제로서 피삭재는 등방형 경화재로 되어 있다고 가정한다.

탄성 상태에서 소성상태로의 천이를 판별하기 위한 요소의 항복판정은 Mises의 항복함수를 이용하며, 요소의 제하판정(除荷判定)은 응력속도의 항복곡면에 대한 방향을 따르고, 소성 상태에서 탄성 상태로의 천이를 판별하여 잔류응력을 해석한다.

또한 적선변위(適宜變位)의 오차수정과 요소의 재분할

을 행한다. 끝으로 구해진 변형률과 응력을 등고선으로 표시한다.

3. 해석결과 및 고찰

앞에서 설명한 해석 방법 및 순서에 따라 SEM 내 마이크로 절삭 실험으로부터 얻어진 화상을 이용하여 절삭 거리 5.6 μm 지점에서의 예에 있어서 변형률 및 응력을 해석한 결과를 Fig. 10~Fig. 13에 나타내었다.

여기서 X축은 공구진행 방향, Y축은 그 수직 방향으로 하였다. 또 X방향 및 Y방향의 변형률과 응력에서 정(+)이 인장, 부(-)가 압축 변형률과 응력을 나타낸다.

또한, 본 연구에서 얻어진 해석의 결과에 있어서 주어진 데이터는 요소의 절점에 있어서의 변위이므로, FEM에 의한 수치해석을 이용하여 응력과 변형률을 구하였으며 화상 간의 이동 변위는 연속화상 추적에 있어서의 오차를 수정하

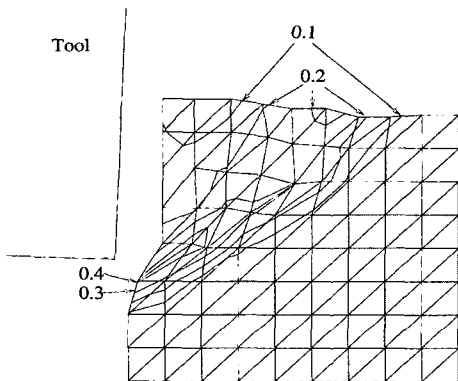


Fig. 10 Distribution of equivalent strain rate after tool displacement 5.6 μm

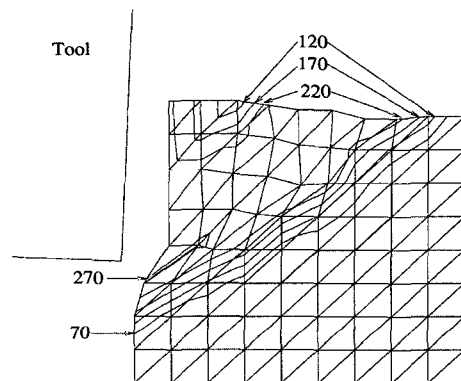


Fig. 11 Distribution of XY direction strain rate after tool displacement 5.6 μm

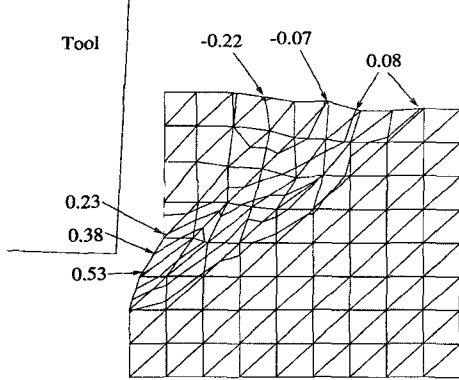


Fig. 12 Distribution of equivalent stress after tool displacement 5.6 μ m [MPa]

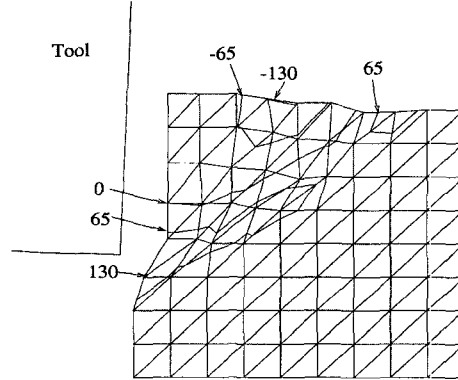


Fig. 13 Distribution of XY direction stress after tool displacement 5.6 μ m [MPa]

여 해석하였다.

먼저, Fig. 10은 피삭재의 변형률의 크기를 알기 위한 것으로 상당 소성 변형률을 나타낸 것이다.

절삭초기 시점에서도 공구의 인선 부근에서 전단면에 걸쳐서 변형을 일으키고 있음을 알 수 있으며 절삭이 진행됨에 따라 상당 응력 변형률이 점점 전단면 부근에 집중되어, 공구가 5.6 μ m 진행한 상태, 즉 절삭거리가 5.6 μ m 지점에서는 공구의 인선 부근으로부터 전단면에 이어 명료한 변형을 일으키고 있으므로 전단과파가 진행되고 있다고 생각할 수 있다.

Fig. 11은 XY방향 전단 변형률의 분포로서 전단 변형률은 일반적으로 절삭 전단면에 인접한 방향에 있으나, XY방향 전단 변형률에 있어서는 전단면의 상태가 충분히 반영되고 있지 않다고 여겨진다. 그러나 절삭 칩 부분을 중심으로 전단영역이 뚜렷해짐을 알 수 있다.

Fig. 12에 나타난 상당응력 분포는 피삭재 응력의 크기를 알기 위해 중요한 것이다. 공구는 인선이 예리할 수록 공구 경사면의 마찰은 작으며 피삭재와의 친화성도 작으므로 절삭 칩의 배출이 좋아져서 결과적으로 안정된 절삭이 행해질 수 있다.

그림에서 전단면에 큰 응력이 생기고 있으며, 그 분포는 전단면을 형성시키고 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 XY 방향 전단응력의 분포에 대한 해석 결과를 나타낸 것이다. 통상의 절삭에 있어서 전단응력은 전단면 방향에 있으므로 XY 방향 전단응력의 분포가 전단면의 상태를 충분히 반영한다고는 볼 수 없으며 Fig. 13에서도 전단영역이 그다지 확실하지 않게 나타냄을 알 수 있다.

이상에서 알아본 바와 같이, Fig. 10~Fig. 13에서 나타난 해석 결과는 알루미늄의 2차원 절삭에 대한 기존의 연구 결과⁽⁹⁾와도 일치하는 것으로 본 연구에서의 개발한 해석 시스템 및 방법은 타당한 것으로 판명된다.

4. 결론

본 연구에서는 주사형 전자현미경 내의 절삭을 행하여 화상처리를 이용한 절삭기구의 해석 수법을 개발하고, 그 타당성을 검토하였다.

우선 절삭기구 시스템을 개발하고 제작된 시스템의 원리 및 구조에 대해 논하였으며, 이것을 이용하여 공업용 순 알루미늄을 대상으로 해석을 행하였다.

구해진 변형률과 응력의 분포는 타당한 것으로 판명되어, 제안된 수법의 유효성을 확인하였으므로 본 시스템을 이용함으로써 일반 강재 및 난삭재의 절삭기구 해명에 보탬이 될 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로의 연구과제는 해석정도의 향상, 절삭거리가 보다 길 경우의 해결점 등을 들 수 있다.

참고 문헌

- (1) S. Hanasaki, J. Fuziwara and T.Miyamoto., 1996, "Measurement of strain rate near cutting edge by image processing on micro-cutting commercially pure aluminum in SEM", *Journal of Japan Institute of Light Metal*, Vol. 46, No. 4, pp. 177~182.

- (2) S. Hanasaki, J. Fuziwara and T. Miyamoto., 1990, "Study on cutting mechanism of fiber reinforced metals(1st Report)", *Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 56, No. 12, pp. 2225~2230.
- (3) S. Hanasaki, M. Touge, E. Tanokubo and Y. Hasegawa., 1990, "Study on microcutting of particulate dispersion-hardened alloys with SEM direct observation method", *Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 56, No. 10, pp. 1877~1882.
- (4) S. Hanasaki, M. Touge, E. Tanokubo and Y. Hasegawa., 1989, "In situ observation of micro-cutting of Al-Si alloy by using scanning electron microscope", *Journal of Japan Institute of Light Metal*, Vol. 39, No. 10, pp. 705~709.
- (5) S. Zaima, Y. Suzuki and M. Yamashita, 1974, "Some Photoelastic Considerations on Orthogonal Cutting of Aluminium", *J. of Japan Ins. Metal*, Vol. 38, No. 7, p. 615.
- (6) G. Yagawa, S. Matsuura, and Y. Ando, "Strain Measurement Using Point Recognition Picture Processing", *J. of JSME, A*, Vol. 49, No. 447, p. 1435.
- (7) Image processing edit committee, 1990, *Image processing Hand Book*, Shokodo Co., LTD, Tokyo, pp. 163~189.
- (8) Daniel I. Barnia, Harvey F. Silverman, A Class of Algorithms for Fast Digital Image Registration, *IEEE, C-21*, 2, 179 (1972).
- (9) S. Zaima, 1978, "Considerations on the built-up edge in orthogonal cutting of aluminum", *Journal of Japan Institute of Light Metal*, Vol. 28, No. 4, pp. 186~192.