

본 연구는 전북대학교 자동차신기술연구소의 연구지원에 의해 수행된 연구의 일부임.

## 정밀가공면의 소성스트레인 측정을 위한 새로운 기법의 개발

김태영\*, 飯野豊\*\*, 문상돈\*\*\*

### A New Technique Development for Measuring Plastic Strain of Precision Machined Surface

T. Y. Kim\*, Y. Iino\*\*, S. D. Mun\*\*\*

#### ABSTRACT

A plastically deformed layer in the precision machined surface affects in various forms the physical properties of machined components such as the fatigue strength, the dimensional instability, microcracks and the stress corrosion cracking. These physical properties, so called surface integrity, are very important for designing highly stressed and critically loaded components. Typical plastic strains in the precision machined surface are very difficult to measure, since they are located within a very short distance from the surface and they change very rapidly. A new way is suggested to determine the residual strain in plastically deformed materials by analyzing the plastically deformed layer after a subsequent recrystallization process. This investigation is to explore a new technique for measuring plastic strain in machining applications, and in particular, to find the effect of cutting parameters(rake angle, depth of cut, specific cutting energy), on the plastic strains and strain energy.

**Key Words** : subsequent recrystallizations technique (연속재결정법), plastically deformed layer(소성변형층), quick-stop cut (순간정지 절삭)

#### 1. 서론

정밀한 기계나 구조물, 리어 액슬, 엔진 피스톤 등 기계가공면의 품질은 가공면의 표면품질(surface integrity) 즉 표면조도, 경도의변화, 잔류응력의 존재여부 등에 따라 좌우된다.<sup>(1-3)</sup> 특히 사용 중 잦은 주기적인 스트레스(cyclic stress)에 놓여지는 기계부품의 경우 균열의 진전 등이 기계가공면으로 부터 시작되는 예가 많아 기계가공면의 품질향상을 위한 연구가 필

수적으로 이루어져야 한다.

기계가공면은 소성변형(plastic deformation), 잔류응력(residual stress)의 변화, 미세조직의 변화 등을 일으키며, 그 중 정밀가공면에 형성된 소성변형층(plastically deformed layer)은 기계부품의 물리적 특성에 여러가지 형태로 영향을 주고있어, 가공면질층의 깊이와 정도, 또한 전단변형역에서의 스트레인의 분포 및 크기 등을 정확히 평가하는 것은 기계가공면의 품질향상을 위해 중요시 되어야 한다.

\* 전북대학교 정밀기계공학과  
 \*\* 日本 豊田工大 기계시스템공학과  
 \*\*\* 전북대학교 대학원

지금까지 기계가공면의 표면품위와 기계가공면의 생성 거동, 소성경화층에 관한 많은 연구<sup>(1-5)</sup>가 있었고 소성스트레인의 측정을 위한 많은 방법<sup>(6,8)</sup>들이 이용되고 있으나 각기 그 특색을 달리하고 있으며, 여러가지 제약으로 완전한 소성스트레인의 평가에는 미흡한 실정이다.

Moire technique, Grid technique, 금속의 미소입자 유동의 금속학적 관찰, 미소경도 시험법 등이 있으나 표면만의 변형의 측정 및 측정의 불완전 등의 단점이 있다. 금속이나 합금의 국부적인 스트레인을 측정하는 매우 유효하고 실제적인 방법으로 재결정법(recrystallization technique)<sup>(6,8)</sup>을 응용하여 2차원 절삭가공면의 소성스트레인을 성공적으로 측정한 바 있으며, 또한 최근에는 기존의 재결정법보다도 측정의 정확성이 크게 향상된 새로운 방법으로 연속재결정법(subsequent recrystallization technique)<sup>(9)</sup>이 개발되어 금속재료의 국부적인 소성스트레인 평가에 적용되었다. 특히 필자들은 2차원 절삭가공면과 구멍 가공면에 형성된 소성스트레인을 연속재결정법으로 측정하여 이 기법이 기계가공면에도 적용될 가능성이 있음을 밝히고,<sup>(10)</sup> 이 연구결과를 토대로 경사각, 절삭깊이 등의 절삭변수들과 정량적으로 측정한 소성스트레인과의 관계를 검토하였다.<sup>(11,12)</sup>

본 연구에서는 기계부품의 정밀기계가공면의 소성스트레인 측정을 위한 새로운 기법으로 연속재결정법을 도입하였다. 특히 소성스트레인에 미치는 금속 절삭거동과의 관계를 규명 검토하기 위해 경사각, 절삭깊이 등의 절삭변수들에 따른 소성스트레인의 분포 및 변형역의 크기, 소성변형역에 형성된 소성스트레인 에너지 등을 정량적으로 평가하여 연속재결정법이 소성스트레인의 측정을 위한 새로운 기법으로 적용할 수 있음을 밝혔다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험재료와 시험편

실험에 사용한 재료는 스테인리스강 판재 (SUS304)로서 판의 두께는 5.8mm이다. 2차원 절삭을 위한 시험편(Fig.1)은 표면의 소성변형을 피하기 위하여 방전가공기(electric discharge wire cut)로 가공하였다. 사용한 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1, 2와 같다.

### 2.2 2차원 절삭실험

2차원 절삭실험을 밀링머신으로 수행하였다. P20등

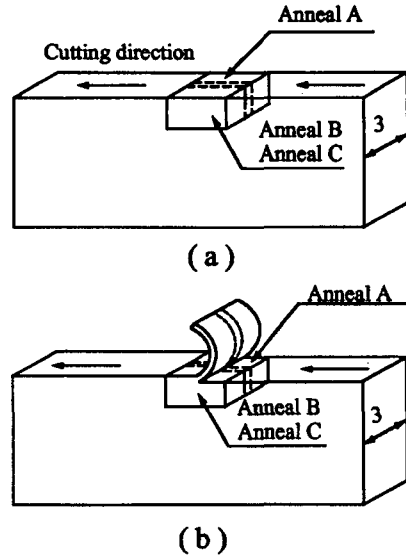


Fig. 1 Specimen (a) through cut (b) quick stop cut

Table 1 Chemical compositions (wt. %)

C	Ni	Cr	Si	Mn	P	S
0.08	8.0-10.5	18.0-20.0	1.00	2.00	0.04	0.03

Table 2 Mechanical properties

Yield stress $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	Ultimate tensile strength UTS (N/mm <sup>2</sup> )	True fracture strain $\epsilon_f$	True fracture stress $\sigma_f$ (N/mm <sup>2</sup> )
255	657	1.5	2350

급의 절삭공구를 밀링머신에 부착시켰으며 바이스에 고정된 시험편과 2차원 절삭운동을 하도록 하였다. 절삭공구는 다이아몬드 연삭숫돌과 Arkansas 숫돌을 이용하여 인선을 정밀가공하였다.(인선반경: 2 $\mu$ m이내, 인선폭: 3mm)

실험을 행하기 전에 시험편 가공시 생긴 응력과 불균일 등을 제거하기 위하여 (stress-free surface 상태를 얻기 위하여) 각각 0.05, 0.04, 0.03, 0.02, 0.01mm의 순으로 절삭깊이를 주고 중유를 절삭유로 사용하여 가공한 시험편에 대하여 2차원 절삭실험을 수행하였다.

절삭실험은 절삭깊이 0.01, 0.04, 0.07, 0.10mm 와 경사각 -10°, 0°, 10°, 20°의 각각 네가지 조건으로 변화시켰으며, 절삭속도는 밀링머신의 테이블의 이송을 일정한 속도로 유지시켜 0.507m/min가 되도록 하였

다. 또한 순간절삭장치를 이용하여 칩을 동결시켜 가공면 뿐만 아니라 절삭선단 부근의 소성스트레인 상태를 알아 보았다.

2.3 재결정 열처리 및 소성스트레인 에너지<sup>(9),(13)</sup>

본 연구에 사용한 연속재결정법 (subsequent recrystallizations technique)<sup>(9),(11),(12)</sup>은 금속학적으로 다양한 소성스트레인을 받은 소성구역을 관찰하고 측정하기 위해 개발된 방법으로서, 몇가지 열처리 온도에서 재결정이 일어나는 한계값  $\epsilon_{CR}$  을 구할 수 있다. 열처리 시간이 일정한 경우 열처리 온도가 증가하면  $\epsilon_{CR}$ 은 감소한다. 이는 잘 가공된 인장시험편을 몇 종류로 소성 변형을 가하고 난 다음 열처리 하여 재결정이 발생 했는지 아닌지를 관찰함으로써 결정할 수 있다.

본 연구에 사용된 SUS304의 경우 한계소성스트레인 값( $\epsilon_{CR}$ )들은 Fig.2와 같으며, 750°C×24 hr 열처리한 경우 (anneal A)  $\epsilon_{CR}$ 은 0.5, 또한 같은 시험편으로 연속해서 900°C×24hr 열처리를 추가로 한 경우(anneal B)의  $\epsilon_{CR}$ 은 0.12, 950°C×24hr 연속 열처리한 경우 (anneal C)의  $\epsilon_{CR}$ 은 0.02임을 보여주고 있다. 그럼에서 알 수 있듯이 anneal B 즉 900°C×24hr 연속 재결정 열처리한 경우와 900°C×24hr 단일 열처리한 경우, anneal C 즉 950°C×24hr 연속 재결정 열처리한 경우와 950°C×24hr 단일 열처리한 경우의 재결정 현상( $\epsilon_{CR}$  값)은 동일했다. 이는 높은 온도(900°C와 950°C)의 경우의  $\epsilon_{CR}$ 은 750°C의 열처리 효과가 없음을 나타내 줌을 알 수 있는 것으로서 본 연구에서는 anneal B 와 anneal C 의 경우 750°C×24hr 열처리는 생략했다. anneal B 와 anneal C에서 소성 변형역을 가시화 하는데 진공로 중에서 열부식(thermal etching)이 효과적인 임을 알 수 있었다. 재결정 구역과 미소 조직들은 화학용액 부식을 하지 않고 열처리한 후 직접 관찰할 수 있었으며 anneal A 즉 750°C의 경우는 열 부식의 상태가 나빠 부식액을 사용하여 조직을 관찰하였다.

한편 절삭가공면의 소성 변형역에 형성된 소성스트레인 에너지(plastic strain energy, PSE)를 구해 보면<sup>(13)</sup>

$$PSE = \int \bar{\sigma} d \bar{\epsilon}_p d t \tag{1}$$

여기서 PSE는 소성스트레인 에너지(plastic strain energy),  $\bar{\sigma}$  와  $\bar{\epsilon}_p$  는 각각 유효스트레스(effective stress)와 유효스트레인 (effective strain)이다.

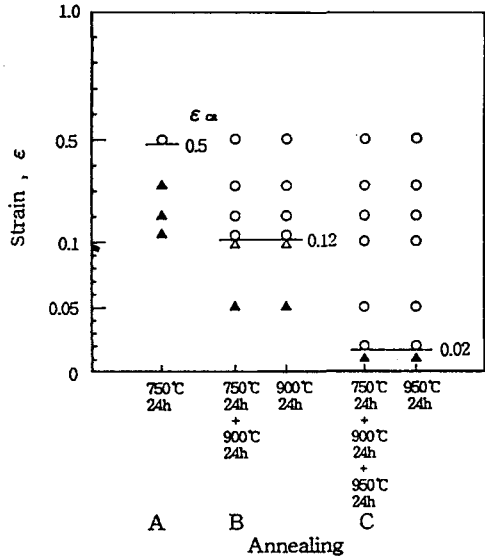


Fig. 2 Critical strain for recrystallization,  $\epsilon_{CR}$  versus recrystallization conditions:( $\blacktriangle$ )no recrystallization,( $\triangle$ )50% recrystallization and ( $\circ$ )full recrystallization<sup>9)</sup>

(1)식의 소성스트레인 에너지는 다시 절삭표면에 형성된 스트레인과 스트레스를 고려하여 Fig.3에 도시한 것과 같이 소성변형역의 크기 즉 절삭 표면으로부터의 거리와 재료의 기계적 성질 등에 따라 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$PSE = \int \left( \frac{\sigma_i + \sigma_{i+j}}{2} \right) \left( \frac{\epsilon_i + \epsilon_{i+1}}{2} \right) (dt_i - dt_{i+j}) \tag{2}$$

여기서  $\sigma_i$ 는  $\epsilon_i = i$  ( $i = 0 \dots i+j \dots \epsilon_f$ )일 때의 스트레스,  $dt_i$ 는 절삭표면으로부터의 거리이다.

(2)식은 본 연구에 사용한 SUS304의 경우 기계적성질을 고려하여 절삭표면으로부터의 거리에 관한 다음 식<sup>(13)</sup>으로 표현할 수 있으며, 이 식으로부터 소성스트레인 에너지를 계산하였다.

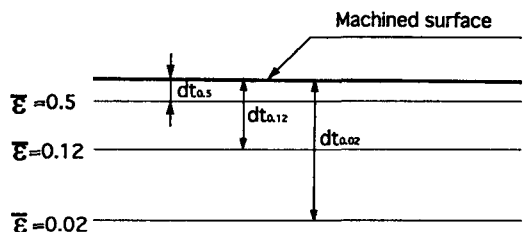


Fig. 3 Plastic strain and the distance from the machined surface

$$PSE = 25dt_{0.02} + 188dt_{0.12} + 1438dt_{0.5} \quad (3)$$

### 3. 실험결과 및 고찰

Fig.4는 순간정지 절삭선단 부근의 시험편을 연속재결정법에 의해 처리한 후 관찰한 금속 조직사진의 일례로서 소성 변형된 구역을 잘 볼 수 있다. 이 그림은 경사각 20°, 절삭깊이 0.05 mm 로 절삭한 것으로 (a)는 소성스트레인 0.5(열처리 조건 A), (b)는 0.12(열처리 조건 B), (c)는 0.02(열처리 조건 C)의 경우이다. 절삭 선단 부근과 가공면에서 재결정 입자들이 성장한 것을 보여주고 있으며, 또한 가공면의 소성스트레인 분포 상태를 확인할 수 있다. 이들 조직사진들로부터 절삭 선단 부근의 소성스트레인 분포를 연속 재결정법으로 가시화할 수 있음을 알 수 있으며, 이러한 소성스트레인의 분포를 도시한 일례가 Fig.5이다. 이 그림은 경사각 20°의 경우로 절삭 깊이가 증가함에 따라 스트레인 분포의 양상이 다를 수 있으며, 절삭 선단 부근의 제 1 변형역(primary deformation zone)에서와 절삭 표면에서  $\epsilon \geq 0.5$ 의 소성 변형역이 형성되어 있으며 표면으로부터 멀어짐에 따라  $\epsilon \geq 0.12$ 와  $\epsilon \geq 0.02$ 의 스트레인이 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 이는  $\epsilon \geq 0.02$  정도의 미세한 변형을 받는 정밀가공면의 스트레인의 분포를 알 수 있음을 보여주고 있다.

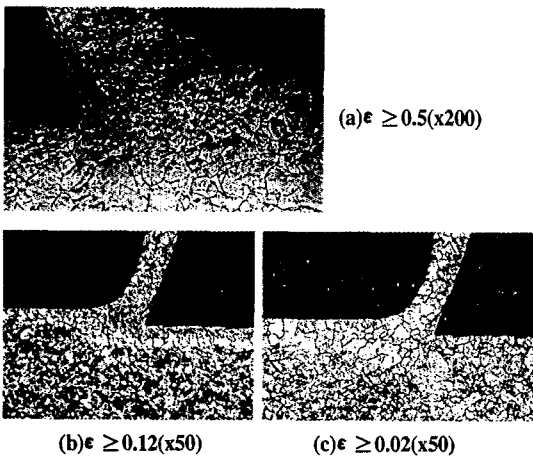


Fig. 4 Recrystallized microstructures around the quick stop cut tip showing plastic zone with (a)  $\epsilon \geq 0.5$  with (b)  $\epsilon \geq 0.12$ , with (c)  $\epsilon \geq 0.02$ . ( $\alpha = 20^\circ$ ,  $t=0.05\text{mm}$ )

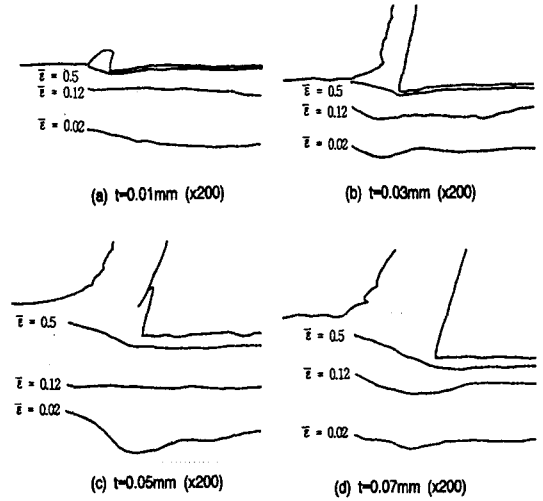


Fig. 5 Plastic strain distribution around the quick stop cut tip. (a)  $t=0.01\text{mm}$ , (b)  $t=0.03\text{mm}$ , (c)  $t=0.05\text{mm}$ , (d)  $t=0.07\text{mm}$ . ( $\alpha = 20^\circ$ )

이러한 스트레인 분포 양상은 절삭 표면으로부터의 거리에 따라 다음을 보여주는 사진의 일례가 Fig.6이다. 이 그림은 경사각  $-10^\circ$ ,  $\epsilon \geq 0.02$  (열처리 조건 C,  $950^\circ\text{C} \times 24\text{hr}$ )의 경우로 절삭깊이의 크기에 따른 재결정조직을 보여주고 있다. 이들 조직 사진으로부터 얻은 각 절삭 조건에 대한 절삭 표면으로부터의 거리에 대한 결과의 일례를 Fig.7에 도시하였다. 이 그림은  $\epsilon \geq 0.5$ 의 경우의 절

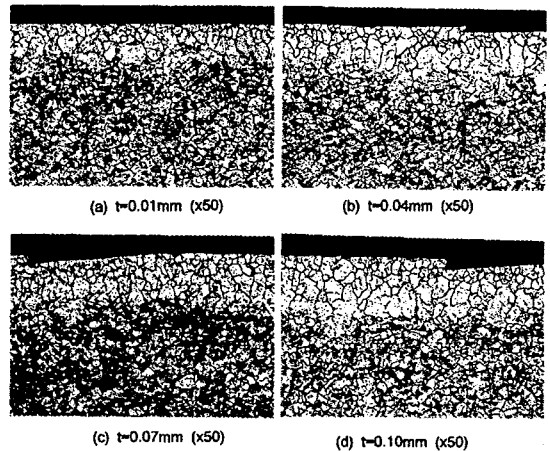


Fig. 6 Recrystallized microstructures showing plastic zone with  $\epsilon \geq 0.02$ ,  $\alpha = -10^\circ$ . (a)  $t=0.01\text{mm}$ , (b)  $t=0.04\text{mm}$

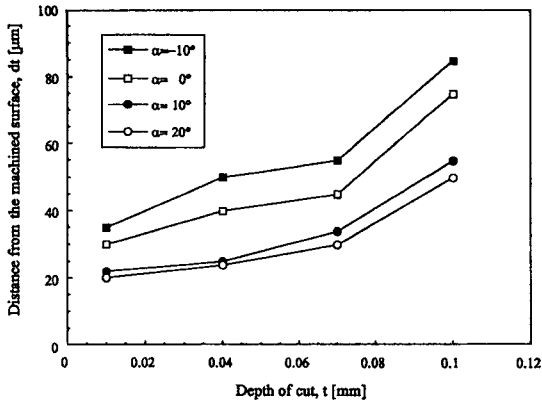


Fig. 7 The relation between the distance from the machined surface  $d_t$  and depth of cut  $t$  ( $\epsilon=0.5$ )

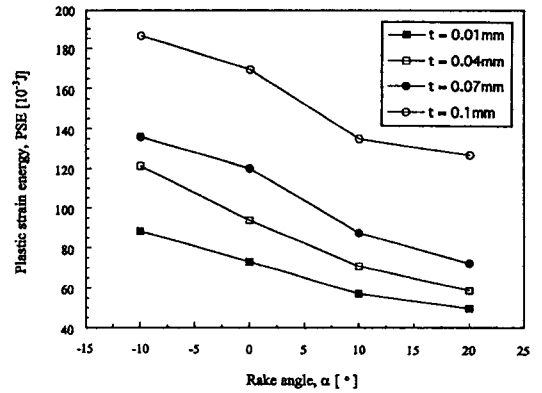


Fig. 9 The relation between plastic strain energy PSE and rake angle  $\alpha$

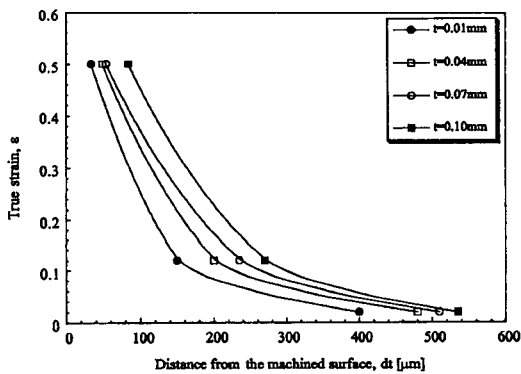


Fig. 8 The relation between plastic strain  $\epsilon$  and the distance from the machined surface  $d_t$  ( $\alpha=0^\circ$ )

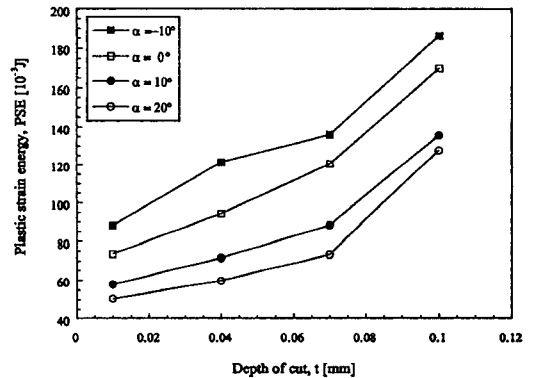


Fig. 10 The relation between plastic strain energy PSE and depth of cut  $t$

삭표면으로 부터의 거리  $d_t$  와 절삭깊이  $t$ 와의 관계로서, 절삭깊이가 증가함에 따라 소성변형역의 깊이는 커짐을 알 수 있다.

Fig.8은 절삭표면으로 부터의 거리에 대한 소성스트레인의 분포의 일예이다. 스트레인값은 절삭표면에서는 큰 값을 가지다가 절삭표면으로 부터 멀어짐에 따라 감소함을 알 수 있다.

이상의 결과들은 연속재결정법에 의해 각각의 절삭조건에 따른 소성스트레인의 분포 및 변형역의 크기 등을 알 수 있음을 나타내준다.

Fig.9와 Fig.10은 절삭가공면의 소성변형역에 형성된 소성스트레인 에너지(plastic strain energy, PSE)를 식 (3)에 의하여 구하여 경사각  $\alpha$  그리고 절삭깊이  $t$ 와의 관계를 도식한 것이다. Fig.9는 경사각이 증가함에 따라 소성스트레인 에너지는 감소하고 있음을 보여주고 있으

며, Fig.10은 절삭깊이의 증가에 따라서 소성스트레인 에너지는 증가하고 있음을 보여주고 있다.

소성스트레인 에너지에 관한 이상의 결과들은 연속재결정법으로 구한 소성스트레인 분포로부터 얻은 결과로서, 연속재결정법은 절삭가공면 특히 미세한 변형을 받는 정밀가공면에 형성된 소성스트레인의 측정을 위한 유효한 방법임을 입증하고 있다.

이들 절삭가공면에 형성된 소성스트레인 에너지는 절삭력 측정 결과로부터 계산한 비절삭에너지와 관계가 있을 것으로 생각되어, 단위 체적을 절삭하는데 필요한 에너지(비절삭에너지)를 구하고<sup>(14)</sup> 각 절삭조건에 대하여 도시해본 결과가 Fig.11이다. 이는 단위체적을 절삭하는데 필요한 전체에너지(비절삭에너지)  $U_t$ 와 절삭깊이  $t$ 와의 관계로서, 비절삭에너지는 절삭깊이가 증가함에 따라 감소하고 있음을 알 수 있다. 비절삭에너지가 절삭조건에 따

라 변화하는 위의 결과들은 일반적인 절삭결과들과 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig.12는 연속재결정법으로 부터 구한 소성스트레인 에너지 PSE와 비절삭에너지  $U_t$ 와의 관계이다. 이들은 각 절삭조건에 따라 일대일의 대응의 관계가 있음을 알 수 있으며, 연속재결정법에 의해 소성스트레인 에너지를 정량적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

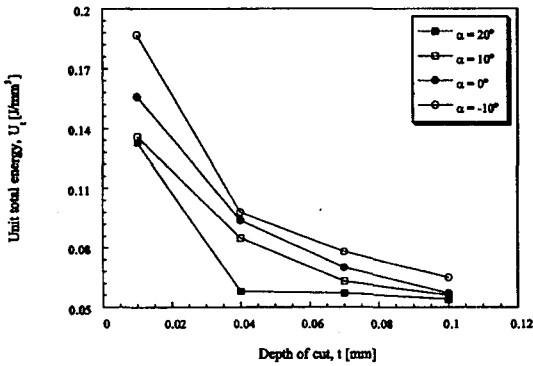


Fig. 11 The relation between unit total energy  $U_t$  and depth of cut  $t$

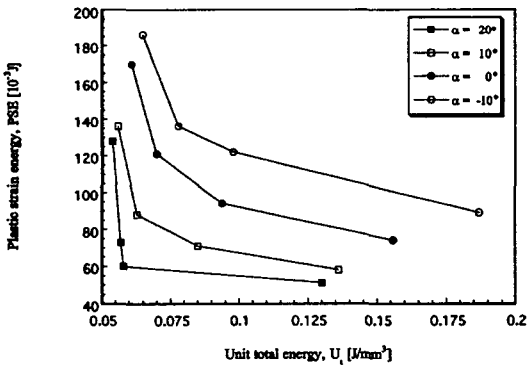


Fig. 12 The relation between plastic strain energy PSE and unit total energy  $U_t$

#### 4. 결 론

1. 절삭 선단 부근의 소성스트레인 분포를 연속재결정법으로 가시화할 수 있음을 알 수 있으며, 소성스트레인 분포를 평가하는데 성공적으로 응용될 수 있다.

2. 각각의 절삭조건에 따른 소성스트레인의 분포 및 변형영역의 크기 등을 연속재결정법에 의해 구할 수 있음을 알 수 있다.

3. 연속재결정법에 의해 소성스트레인 에너지를 정량적으로 평가할 수 있음을 알 수 있다.

종합적으로, 연속재결정법은 절삭가공면 특히 미세한 변형을 받는 정밀가공면에 형성된 소성스트레인의 측정을 위한 유효한 방법임을 입증하고 있다.

#### 참 고 문 헌

1. 김태영, "금속의 Surface integrity에 미치는 소성스트레인의 영향", 한국정밀공학회지, 제6권, 제4호, pp.94-102, 1989.
2. M.Field et al, "Review of Surface Integrity of Machined Components", Annals of the CIRP, vol.20, No. 2, pp. 153-162, 1971.
3. Y.Matsumoto, "Effect of Hardness on the Surface Integrity of AISI 4340 Steel", ASME J. of Engng for Industry, Vol.108, pp.169-175, 1986.
4. J.Bailey et al, "Surface Integrity in Machining AISI 4340 steel", ASME J. of Engng for Industry, Vol. 98, pp.999 - 1007, 1976.
5. T.Y.Kim et al, "Effect of Machining Process on the Fatigue Strength of Hardened AISI Steel", ASME PED-Vol.38, 1989, pp.131-141, and ASME, J. of Engng for Industry, Vol.113, pp.154-159, 1991.
6. T.Y.Kim, et al, "A New Technique to Measure Plastic Strain in the Machined Surface", Wear, Vol.147, pp.311-322, 1991.
7. Y.Iino, "Accumulated Plastic Zone around Fatigue Crack in Type 304 Stainless Steel", Paper No.MS 509, pp.159-164, 1975.
8. T.Y.Kim, et al, "Recrystallization Technique of Plastic Deformation in Weld of Mild Steel", Trans. Japan Welding Society, Vol.13, No.2, pp.27-31, 1982.
9. Y.Iino, "Subsequent Recrystallization Technique of Local Plastic Strain in 304 Stainless Steel", J. of Material Science Letters, pp.1253-1256, November 1992.
10. Y.Iino, T.Y.Kim, et al, "Machined Surface Plastic Zone and Strain by Subsequent

- Recrystallization Technique", J. of Material Science Letters, Vol.12, pp.520-522, 1993.
11. 飯野 豊, 김태영, 문상돈, "연속재결정법에 의한 2차원 절삭가공면의 소성스트레인에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제13권, 제4호, pp.61-66, 1996.
  12. Y.Iino, T.Y.Kim, S.D.Mun, "Machined surface plastic strain in orthogonal cutting by subsequent recrystallizations technique", wear, 199, pp.211-216, 1996.
  13. Y.Iino, "Fatigue Crack Propagation Work Coefficient-A Material Constant Giving Degree of Resistance to Fatigue Crack Growth", Engng Fracture Mechanics, Vol.12, pp.279-299, 1979.
  14. 서남섭, 금속절삭이론, 동명사, pp.80-82, 1988.