

기계가공면의 소성스트레인 분포에 관한 연구

김태영*, 飯野 豊**, 문상돈***

A Study on Plastic Strain Distribution of Machined Surface

Tae Young Kim*, Yutaka Iino**, Sang Don Mun***

Abstract

The plastically deformed layer in a machined surface must be considered in precision machining process. Therefore the analysis of the machined surface, including the plastic deformation and strain distribution should be carried out quantitatively. The subsequent recrystallization technique was presented for analysis of the plastically deformed layer in the machined surface, and the technique was successfully applied to determine the plastic strain in the machined surface. This investigation is to evaluate the plastic strain in the distance 0.1mm from the machined surface, and in particular, to find the effect of shear angle, shear strain, cutting energy etc. on the plastic strain.

Key Words : plastically deformed layer(소성변형층), machined surface(기계가공면), precision machining(정밀가공), strain distribution(스트레인 분포), subsequent recrystallization technique(연속재결정법), plastic strain(소성스트레인)

1. 서론

기계가공면의 품질은 가공면의 조도, 가공변형층의 조직 및 경도의 변화, 잔류응력의 존재여부등에 따라 좌우되며, 특히 가공중 형성된 소성변형층(plastically deformed layer)은 그곳에 존재하는 잔류응력등으로 인해 기계부품의 품질과 성능에 큰 영향을 주고 있으나, 소성변형의 분포양상은 복잡하여 규명이 쉽지 않다.^(1,2) 그러므로 기계가공면의 품질 향상을 위해서 기계가공면의 생성 메커니즘

의 이해와 가공면에서의 잔류응력, 소성스트레인등의 정량적인 해석이 필요하다.⁽³⁾

기계가공 변형층에 관하여 지금까지 많은 연구⁽⁴⁾가 있었고, 소성스트레인(plastic strain) 측정을 위한 많은 방법등이 이용되고 있으나 각기 그 특색을 달리하고 있으며 주로 정성적인 측정에 불과한 실정이다.

최근 금속의 재결정 현상을 이용한 실험적인 스트레인 측정법인 연속재결정법(subsequent recrystallization technique)⁽⁵⁾이 기계가공면의 스트레인의 측정에 응용⁽¹⁰⁻¹²⁾되고

* 전북대학교 정밀기계공학과
** 日本 豊田工大 기계시스템공학과
*** 전북대학교 시간강사

있으며, 특히 미세한 변형을 받는 정밀가공면의 스트레인의 분포를 확인하는데도 이용되고 있다.

본 연구에서는 연속재결정법을 이용하여 몇 가지 절삭 조건을 달리하여 생성된 기계가공면의 소성스트레인을 분석하였다. 특히 가공표면에서 일정한 거리에서의 스트레인 값은 절삭조건에 따라 어떻게 변하는지를 연속재결정법을 이용하여 정량적으로 구하여 확인하였으며, 이 들 값을 절삭변수들과 비교함으로써 기계가공면의 소성스트레인의 분포 양상을 확인하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료 및 시험편

실험에 사용한 재료는 두께 5.8mm의 스테인리스강(SUS 304)이며, 그 화학적 성분은 Table 1과 같다. 시험편은 표면의 소성변형을 피하기 위해 방전가공기로 가공하였으며 가공 폭은 3mm 이었다. Fig. 1은 시험편의 형상을 도시한 것이며, 이 시험편 들은 2차원 절삭실험 후 소성스트레인을 측정하는데 이용되었다.

Table 1 Chemical composition (wt. %)

C	Ni	Cr	Si	Mn	P	S
0.08	8.0-10.5	18.0-20.0	1.0	2.0	0.04	0.03

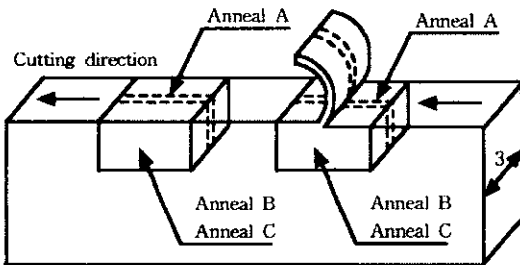


Fig. 1 Specimen (through cut, quick stop cut)

2.2 절삭실험

가공된 시험편에 대해 2차원 절삭실험을 수행하였다. 절삭공구 (인선반경 : 2 μ m 이내, 인선폭 : 3mm, P20 등급)를 다이아몬드 연삭숫돌 등으로 정밀 가공한 다음 밀링 아머에 부착시켰으며 바이스에 고정된 시험편과 2차원 절삭운동을 하도록 하였다.

방전가공된 시험편의 표면은 다시 중유를 절삭유로 미세 가공하여, 시험편 제작시 생긴 응력과 불균일을 제거한 다음 2차원 절삭실험을 수행하였다. 절삭실험은 절삭깊이 $t=0.01, 0.04, 0.07, 0.10$ mm 와 공구경사각 $\alpha=10^\circ, 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ 로 각각 네 가지 조건으로 변화시켜 행하였으며, 절삭속도는 0.507m/min이었고 절삭유는 사용하지 않았다.

또한 순간절삭장치(quick stop device)를 이용하여 2차원 절삭시 배출되는 chip을 동결시켜 가공면과 더불어 공구선단 부근의 소성스트레인의 분포를 확인하였다.

절삭 시 얻어진 데이터는 2차원 절삭역학 이론식⁽¹⁵⁻¹⁶⁾으로 분석하였다.

전단각 ϕ 는

$$\tan \phi = \frac{r_c \cos \alpha}{1 - r_c \sin \alpha} \quad (1)$$

여기서 α 는 공구경사각, r_c 는 절삭비이다.

전단변형률 γ 는

$$\gamma = \cos \phi + \tan(\phi - \alpha) \quad (2)$$

단위체적의 금속제거에 요하는 비절삭에너지 U_1 는

$$U_1 = \frac{F_c}{b \cdot t} \quad (3)$$

여기서 F_c 는 절삭저항의 수직분력, b 는 절삭폭, t 는 절삭깊이이다.

2.3 재결정 열처리 및 소성스트레인⁽⁹⁻¹³⁾

본 연구에 사용한 연속재결정법(subsequent recrystallizations technique)⁽⁹⁾은 금속학적으로 다양한 소성스트레인을 받은 소성구역을 관찰하고 측정하기 위해 쓰여지는 방법으로, 2차원 절삭 가공면과 드릴 가공면 등에 형성된 소성스트레인을 측정할 수 있음이 밝혀졌다.⁽¹⁰⁻¹²⁾

이 방법으로 몇 가지 열처리 온도에서 재결정이 일어나는 한계값 ϵ_{CR} 을 구할 수 있다. 열처리 시간이 일정한 경우 열처리 온도가 증가하 ϵ_{CR} 은 감소한다. 이러한 한계값은 인장 시험편을 몇 종류로 소성변형을 가하고 난 다음 열처리하여 재결정의 발생 여부를 관찰함으로써 결정할 수 있다.

본 연구에 사용한 재료(SUS 304)의 경우, 세 가지의 열처리 조건에서 한계 소성스트레인의 값(ϵ_{CR})들은 Fig. 2와 같으며, 750°C×24 hr 열처리한 경우(열처리 조건 A) ϵ_{CR} 은 0.50, 또한 같은 시험편으로 연속해서 900°C×

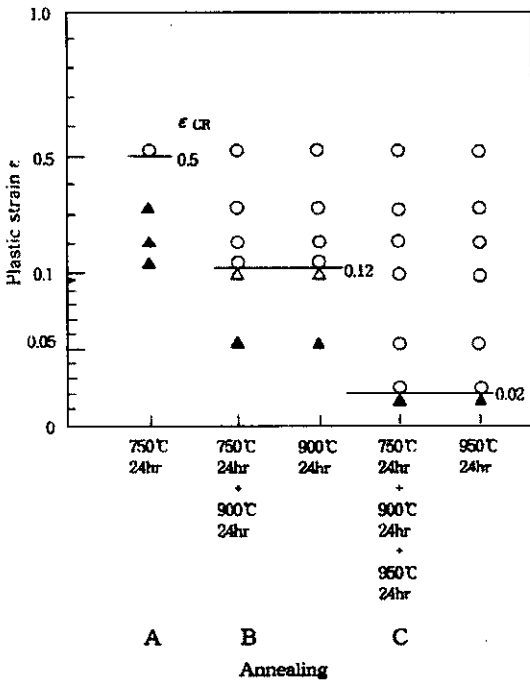


Fig. 2 Critical strain for recrystallization, ϵ_{CR} , versus recrystallization conditions: (▲) no recrystallization, (△) 50% recrystallization and (○) full recrystallization⁽⁹⁾

24hr 열처리를 추가로 한 경우(열처리 조건 B)의 ϵ_{CR} 은 0.12, 950°C×24hr 연속 열처리한 경우(열처리 조건 C)의 ϵ_{CR} 은 0.02임을 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 열처리 조건 B 즉 900°C×24hr 연속 재결정 열처리한 경우와 900°C×24hr 단일 열처리한 경우, 열처리 조건 C 즉 950°C×24hr 연속 재결정 열처리한 경우와 950°C×24hr 단일 열처리한 경우의 재결정 현상(ϵ_{CR} 값)은 동일했다. 이는 높은 온도(900°C와 950°C)의 경우의 ϵ_{CR} 은 750°C의 열처리 효과가 없음을 나타내 줌을 알 수 있는 것으로서 본 연구에서는 열처리 조건 B와 열처리 조건 C의 경우 750°C×24hr 열처리는 생략했다.

열처리 조건 B와 열처리 조건 C에서 소성 변형역을 가시화 하는데는 진공로 중에서 열부식(thermal etching)이 효과적임을 알 수 있었다. 재결정 구역과 미소 조직들은 화학용액 부식을 하지 않고 열처리한 후 직접 관찰 할 수 있었으며 열처리 조건 A 즉 750°C의 경우는 열 부식의 상태가 나빠 부식액(C₂H₅OH : HCl : HNO₃ = 100 : 15 :

Table 2 Annealing conditions and critical amounts of plastic strain

	Anneal A	Anneal B	Anneal C
Annealing conditions	750°C×24hr	750°C×24hr + 900°C×24hr	750°C×24hr + 900°C×24hr + 950°C×24hr
ϵ_{CR}	0.50	0.12	0.02

30)을 사용하여 조직을 관찰하였다. Table 2는 열처리 조건과 한계 소성스트레인의 값을 나타낸다.

한편 각각의 조건으로 절삭된 시험편의 경우 위와 같은 방법으로 연속재결정 열처리를 시행하여 스트레인 분포 상태를 확인하였다. 즉, 절삭실험 후 가공표면으로부터 깊이방향으로 생성된 소성스트레인의 분포를 확인하기 위해 Fig. 1에서와 같이 시험편을 두 개로 폭 3mm의 wheel cutter를 이용하여 절단하였다. 시험편 절단시 피이드량을 최소화하고 절삭유를 주입하여 가공경화나 소성변형을 방지하였다.

절단된 시험편은 새 가지 열처리 조건으로 연속 재결정 열처리가 시행되었다.

3. 실험결과 및 고찰

각각의 조건으로 절삭된 시험편을 재결정 열처리하여 소성변형역과 변화된 조직을 관찰하였으며, Fig. 3은 그 결과를 나타낸 사진의 한 예이다. 이들 사진으로부터 재결정영역과 기지금속(matrix)을 뚜렷이 구별할 수 있으며, 각 재결정영역 선단 즉 기지금속과 재결정영역의 경계부까지의 소성스트레인을 알 수 있다. (a), (b)는 절삭깊이 t=0.01mm의 경우로 (a)의 소성스트레인 값 $\epsilon=0.12$ (b)는 $\epsilon=0.02$ 이며, (c)와 (d)는 절삭깊이 t=0.10mm의 경우로 (c)의 $\epsilon=0.12$ (d)는 $\epsilon=0.02$ 이다. 또한 (a)와 (c), 또는 (b)와 (d)를 비교함으로써 절삭깊이의 차이가 소성스트레인 영역의 변화를 가져오기도 알 수 있다.

Fig. 4는 2차원 순간정지장치를 이용하여 절삭가공 중 배출되는 chip을 동결시켜 얻은 절삭 선단부근을 포함한 기계가공면의 소성스트레인 영역을 나타내주는 사진의 한 예이다. 이는 절삭깊이 t=0.05mm, 경사각 $\alpha=10^\circ$ 의 경우로서 (a)는 소성스트레인 $\epsilon=0.50$ (b)는 $\epsilon=0.12$ (c)는 $\epsilon=0.02$ 의 소성스트레인을 나타내고 있다. 이는 순간정

지장치를 이용하여 공구선단의 스트레인이 일정한 분포를 보이고 있음을 보고한 결과⁽¹⁴⁾와 같으며, 아울러 정량적인 소성스트레인의 값을 구할 수 있다.

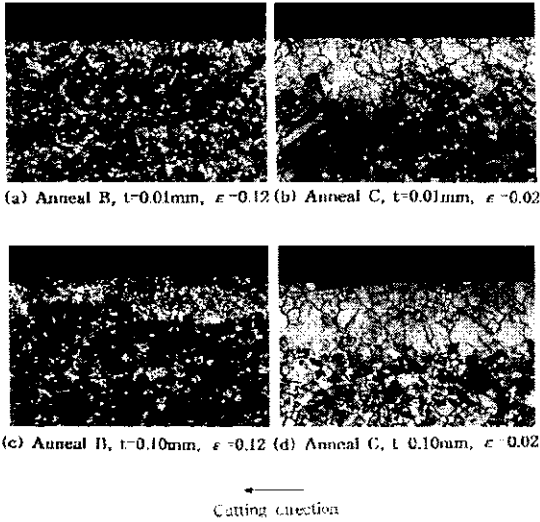


Fig. 3 Recrystallized microstructures ($\alpha=10^\circ$, X50)

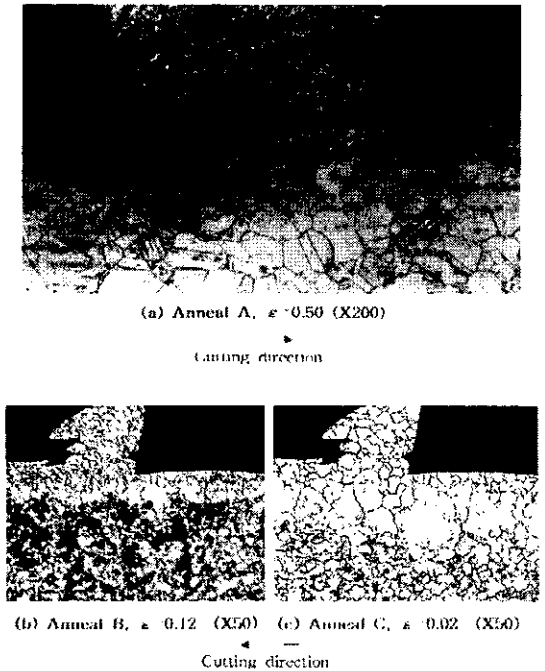


Fig. 4 Recrystallized microstructures around the quick stop tip ($\alpha=10^\circ$, $t=0.05\text{mm}$)

Fig. 5는 이들 기계가공면에서의 소성스트레인의 영역을 각 기계가공조건별로 도시한 그림의 예이다. 각각의 기계가공 조건에 따라 소성스트레인의 분포가 다름을 알 수 있으며 특히 $\epsilon=0.02$ 정도의 미세한 변형을 받은 가공면의 스트레인도 가시화 할 수 있음을 보여주고 있다.

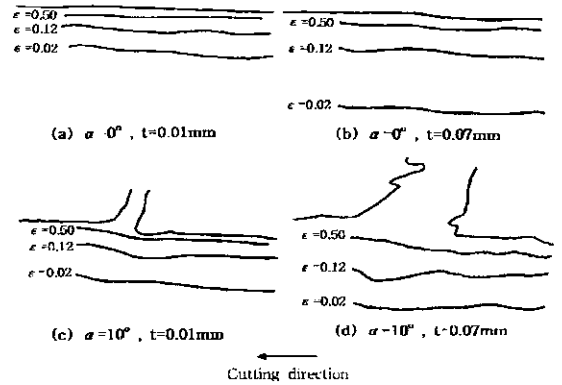


Fig. 5 Plastic strain distribution around the quick

이와 같이 가공표면에서의 소성변형역을 재결정범으로 가시화하였으며, 이들로부터 가공표면으로부터 소성변형역의 깊이, 즉 가공표면으로부터 재결정영역의 선단까지의 거리(dt)를 조직사진으로부터 측정하였으며, 이들 재결정선단까지의 거리에 따른 소성스트레인의 변화를 알 수 있다.

Fig. 6은 경사각 $\alpha=10^\circ$ 의 예로서, 가공표면으로부터의 거리에 따라 소성스트레인의 분포양상을 각각의 절삭깊이에 따라 나타내고 있으며, 가공표면으로부터 멀어짐에 따라 소성스트레인은 급속히 감소함을 알 수 있다.

이와 같이 소성스트레인은 각각의 절삭조건에 따라 그 분포 양상이 다름을 확인할 수 있었으며, 각 절삭조건에 따라 가공표면으로부터 일정한 거리(0.1mm)에서의 소성스트레인 값 ($\epsilon_{0.1}$)을 구하여(Fig. 7) 각각의 절삭변수들과 비교함으로써 기계가공면의 소성스트레인의 분포 양상을 확인하였다.

Fig. 8은 각각의 절삭조건으로 가공한 절삭시험편에 대해 가공표면으로부터 0.1mm 거리에서의 소성스트레인 값 $\epsilon_{0.1}$ 의 변화를 보여주고 있다. 절삭 깊이의 증가에 따라 스트레인 값은 거의 일정하게 증가하고 있으며, 공구의 경사각이 큰 경우의 스트레인 값은 작음을 확인할 수 있다.

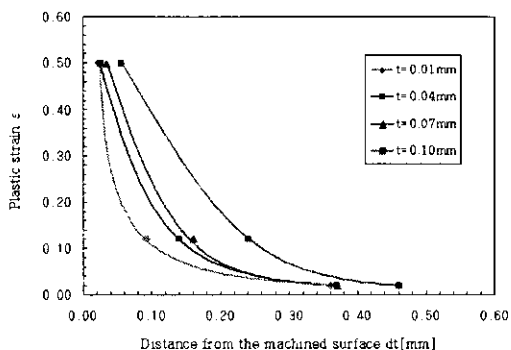


Fig. 6 The relation between plastic strain ϵ and the distance from the machined surface dt ($\alpha=10^\circ$)

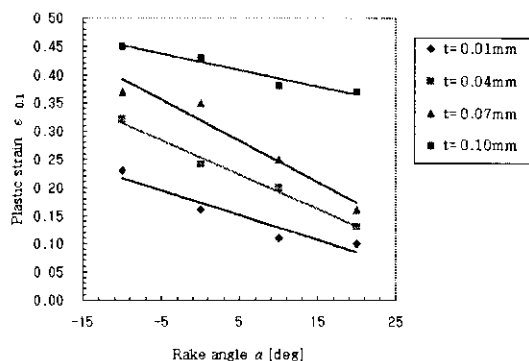


Fig. 9 The relation between plastic strain $\epsilon_{0.1}$ and rake angle α

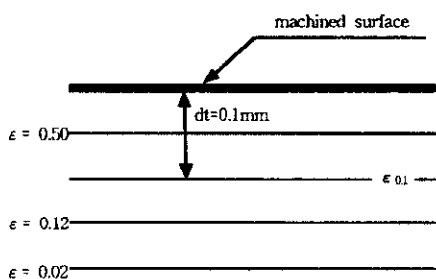


Fig. 7 Plastic strain of the distance 0.1mm from the machined surface

이들의 결과는 기계가공면의 스트레인의 변화는 절삭조건에 따라 변하며 가공표면으로부터 일정한 거리에서의 스트레인 값을 연속재결정법에 의한 방법으로 확인할 수 있음을 보여주고 있다.

또한 기계가공면의 스트레인과 절삭에 관여하는 여러 인자 중 전단각(ϕ), 전단변형율(γ)과의 관계를 알기 위하여⁽¹⁵⁾, 이들과 가공표면으로부터 일정한 거리에서의 소성스트레인($\epsilon_{0.1}$)과를 비교한 그림이 Fig. 10과 Fig. 11이다.

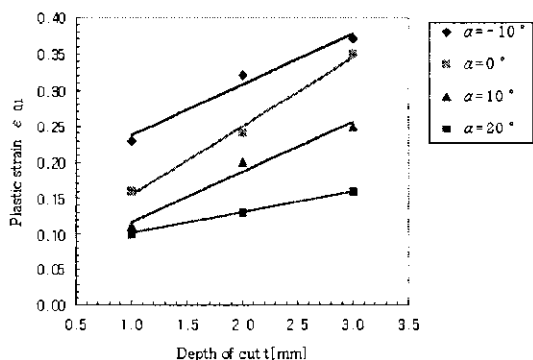


Fig. 8 The relation between plastic strain $\epsilon_{0.1}$ and the depth of cut t

Fig. 9는 공구의 경사각의 변화에 따른 $\epsilon_{0.1}$ 의 변화양상이며 역시 경사각의 증가함에 따라 스트레인은 일정하게 감소함을 알 수 있으며, 절삭깊이가 큰 경우의 스트레인 값도 큼을 알 수 있다.

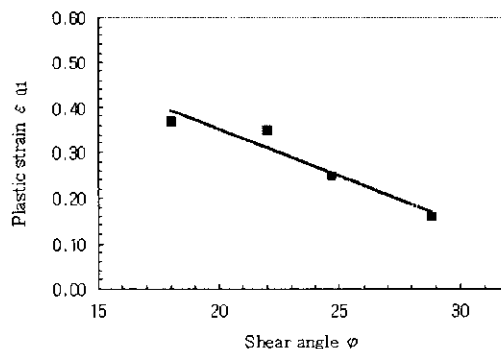


Fig. 10 The relation between plastic strain $\epsilon_{0.1}$ and the shear angle ϕ ($t=0.07\text{mm}$)

Fig. 10은 전단각과 소성스트레인 $\epsilon_{0.1}$ 과의 관계로서, 전단면의 전단각이 커짐에 따라 소성스트레인은 감소함을 알 수 있다. 또한 전단변형율이 증가할 경우 소성스트레인은 일정하게 증가함을 알 수 있다.(Fig. 11)

Fig. 12는 단위체적의 금속제거에 요하는 비절삭에너지 u_1 의 변화에 따른 소성스트레인의 변화를 알아본 것으로 비절삭에너지의 증가에 비례하여 가공표면으로부터 일정

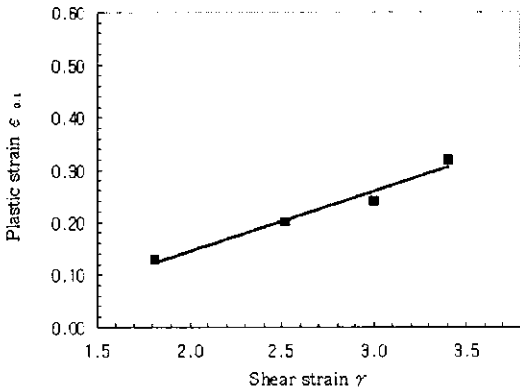


Fig. 11 The relation between plastic strain $\epsilon_{0.1}$ and the shear strain γ ($t=0.04\text{mm}$)

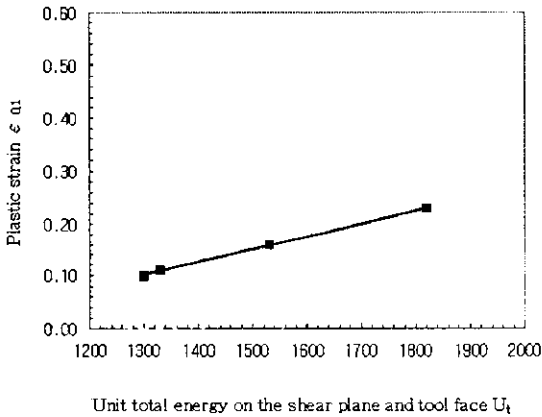


Fig. 12 The relation between plastic strain $\epsilon_{0.1}$ and the unit total energy U_t on the shear plane and tool face ($t=0.01\text{mm}$)

한 거리에서의 소성스트레인 값은 일정하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 각 절삭조건에 따라 가공표면으로부터의 일정한 거리에서의 소성스트레인의 분포 양상을 연속재결정법으로 확인할 수 있었다.

4. 결 론

연속재결정법을 이용하여 몇 가지 절삭조건을 달리하여 생성된 기계가공면의 소성스트레인을 정량적으로 구하고 이를 각 절삭변수들과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 소성스트레인은 각각의 절삭조건에 따라 그 분포양상이 다름을 확인할 수 있었으며, 각 절삭조건에 따라 가공표면으로부터 일정한 거리에서의 소성스트레인 값을 구하여 각각의 절삭변수들과 비교함으로써 기계가공면의 소성스트레인의 분포양상을 확인하였다.
- (2) 절삭 깊이의 증가에 따라 스트레인 값은 거의 일정하게 증가하고 있으며, 공구의 경사각이 큰 경우의 스트레인 값도 큼을 확인할 수 있다.
- (3) 전단면의 전단각이 커짐에 따라 소성스트레인은 감소함을 알 수 있다. 전단 변형율이 증가할 경우 소성스트레인은 일정하게 증가함을 알 수 있다.
- (4) 비절삭에너지의 증가에 비례하여 소성스트레인은 낮은 일정하게 증가하고 있음을 알 수 있다.

종합적으로, 기계가공면의 소성스트레인을 연속재결정법으로 분석하였으며, 이를 통해 절삭깊이와 공구경사각, 비절삭에너지 등의 감소는 최적의 절삭을 위한 조건이 됨을 확인하였다.

후 기

본 연구는 전북대학교 자동차신기술연구소의 연구지원에 의해 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- (1) J.Bailey et al, "Surface Integrity in Machining AISI 4340 Steel", ASME J. of Engng for Industry, Vol. 98, pp. 999~1007, 1976.
- (2) C.R.Liu et al, "Variables Governing Patterns of Mechanical Residual Stress in a Machined Surface", ASME J. of Engng for Industry, Vol.104, pp. 257~264, 1982.
- (3) 주호윤, 이용성, "절삭가공시 잔류응력에 관한 연구", 한국공작기계기술학회지, 제6권, 제3호, pp. 111~117, 1997.
- (4) M.Field et al, "Review of Surface Integrity of Machined Components", Annals of the CIRP, vol.20, No. 2, pp. 153~162, 1971.
- (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) 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.
- (12) 김태영, 飯野豊, 문상돈, "정밀가공면의 소성스트레인 측정을 위한 새로운 기법의 개발", *한국정밀공학회지*, 제15권, 제4호, pp. 141~147, 1998.
- (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) P.K.Wright, "Predicting the Shear Angle in Machining From Workmaterial Strain-Hardening Characteristics", *ASME, J. of Engng. for Industry*, Vol.104, pp. 285~292, 1982.
- (15) 서남섭, *절삭가공학*, 동명사, pp. 27~91, 1999.
- (16) 김동현, "이종금속의 선삭가공 특성에 관한 연구", *한국공작기계학회지*, 제7권, 제3호, pp. 43~50, 1998.