

金屬의 Surface Integrity에 미치는
 塑性스트레인의 影響

金 台永*

Effect of Plastic Strain on the Surface Integrity of Steel

Tae Young Kim *

Abstract

The effect of plastic strain on the surface integrity of mild steel (SS 41) was studied.

This paper shows that the recrystallization technique is adequate to evaluate the plastic strain in a machined surface experimentally. The relations between the plastic strain and the machining conditions are quantitatively evaluated by using the recrystallization technique.

The obtained results are summarized as follows.

1. The surface integrity of steel is considerably influenced by the amount of surface region deformation produced by changes in cutting conditions.
2. The plastic strain in machined surface produced by changes of the cutting conditions is evaluated by the recrystallization technique.
3. The plastic strain increases with the increase of depth of cut and the decrease of rake angle.
4. When the cutting force is high and the rake angle is small, the value of maximum true strain reaches to high.
5. The maximum true strain is related to the cutting energy, and the values increase with the increase of the unit shear and total energy in constant depth of cut. In the case of constant rake angle, the maximum true strain decreases with the increase of the energy values.

* 전북대학교 공과대학 정밀기계공학과

I. 序論

金屬 加工面의 품질은 表面粗度, 硬度的 변화, 組織의 변화, 殘留應力의 존재여부등에 따라서 좌우되며 이러한 金屬加工面의 特性 및 性質을 surface integrity라 한다.¹⁾²⁾ 最近 産業의 발달과 더불어 극심한 應力이나 溫度등에서도 견딜 수 있는 機械部品の 使用이 빈번해지고 있으며, 또한 첨단技術이 요구되는 magnetic recording head등 電子部品の 超精密加工의 必要性이 증대되고 있어, 극심한 環境에서 흔히 發生할 수 있는 피로, creep, 應力腐蝕 龜裂등의 파괴방지와 金屬加工面의 品質 향상을 위해 金屬加工時의 表面生成機構 및 surface integrity에 대한 研究가 필수적으로 이루어져야 한다.

보통 金屬을 加工한 후 生成된 表面에 관해 고찰할 때 表面(surface)과 그 表面의 영향을 직접 받는 表面 바로 아래(subsurface)를 통틀어서 表面域(surface region) 또는 表面層(surface layer)이라 일컬으며, 이러한 表面域은 金屬加工 과정에서 chip과 加工物의 生成 表面에 加工硬化를 수반한 塑性變形(plastic deformation), built-up edge로 인한 表面의 결함(defects), 硬度的 변화, 상변태, 殘留應力의 분포 등의 변화를 초래하게 된다.³⁾

이러한 金屬의 加工 表面域에서 가장 중요시되는 변화중 하나는 塑性變形으로서, 金屬加工面의 塑性變形層(plastic deformed layer)은 그곳에 존재하는 殘留應力등의 영향으로 機械부품의 변형, 피로수명의 감소, 부식저항력의 감소등을 초래하게 되며, 이는 切削工具의 마멸상태가 나쁠때 또는 고속 切削時 더욱 큰 영향을 미치게 된다.⁴⁾

그러므로 機械加工面에 生成되는 加工硬化층의 깊이와 정도, 또한 塑性變形域의 크기와 스트레인의 분포등을 정확히 평가한다는 것은 金屬加工面의 품질향상을 위해 중요한 하나의 과제이다.

지금까지 金屬의 surface integrity와 金屬加工面의 생성거동, 塑性硬化층에 관한 많은 研究⁵⁾⁻⁷⁾가 있었고 塑性스트레인 측정을 위한 많은 방법들이 이용되고 있으나 각기 그 특색을 달리하고 있

며, 여러가지 제약으로 완전한 塑性 스트레인 측정에는 미흡한 실정이다.

金屬의 surface integrity에 관하여서는 M. Field¹⁾ 등이 강 및 합금, 機械部品등의 surface integrity에 대해 많은 研究를 발표하였고, J. A. Bailey⁵⁾⁻⁷⁾등도 金屬 加工面의 surface integrity 및 殘留應力 분포에 관한 고찰을 해 왔으며 Y. Matsumoto²⁾등이 AISI 4340강의 surface integrity에 미치는 硬度的 영향등을 고찰하였다.

한편, 機械加工時 生成된 加工表面의 생성거동과 塑性硬化층에 관하여는 E. G. Herbert⁸⁾가 연성 재질의 金屬을 切削했을때 그 加工面은 硬化된다는 사실을 발표한 이래 많은 연구자들에 의해 연구되어 왔고 그 방법 등이 개선되어 왔다. C. Rubenstein⁹⁾등은 미소 硬度的 측정에 의한 방법으로 塑性域의 크기와 加工硬化의 정도를 정상적으로 측정하여 金屬切削機構의 解析을 시도하였으나, 이 방법은 측정부위가 일정량의 면적을 필요로하기때문에 加工表面에 대단히 얇게 형성된 加工層의 解析에는 쓸수가 없는 단점이 있다. C. R. Liu¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾등이 변형에너지의 정도와 경화율, 殘留應力등을 변수로 하여 切削加工에 의해 生成된 硬化層의 機械的인 상태를 분석했으며, W. Graham¹⁾등이 선삭에서 生成된 硬化層의 경화율에 관한 고찰을 시도했다. 그 밖에도 機械加工表面의 機械的인 특성 및 殘留應力의 측정을 Liu¹⁰⁾, Bailey¹⁾등이 시도하였고 김¹³⁾은 X-ray 회절 시험법에 의해 機械加工表面의 殘留應力을 측정할 바 있으며 최근에는 재결정법을 이용하여 機械加工 변형층의 塑性스트레인을 측정하였다¹⁴⁾.

그러나 이상의 연구들에서는 金屬切削機構와 surface integrity의 관계등에 관해서 분명치 못한 점이 많으며, 특히 surface integrity의 중요한 인자인 塑性변형층에서의 스트레인 분포와 金屬切削거동과의 관계등이 충분히 규명되어 있지 않은 실정이다.

본 研究에서는 金屬加工面의 surface integrity의 완전한 解析을 위해 再結晶法¹⁵⁾⁻²¹⁾(recrystallization technique)을 金屬切削機構에 도입하여 金屬加工面에 生成된 소성역의 解析을 시도하고 塑性

스트레인이 surface integrity에 미치는 영향 및 金屬切削거동과의 관계등을 규명 검토하고자 한다.

II. 시험편 및 실험 방법

II-1. 시험편

본 실험에 사용된 실험재료로서는 판 두께 25 mm인 연강(SS41)판이며, 그 화학적 성분 및 機械的 성질은 Table 1과 같다.

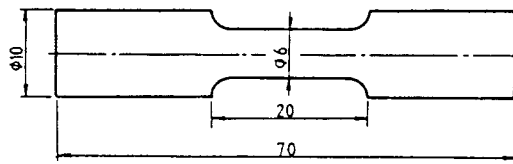
Table1. Chemical compositions and mechanical properties

a) chemical compositions (wt. %)

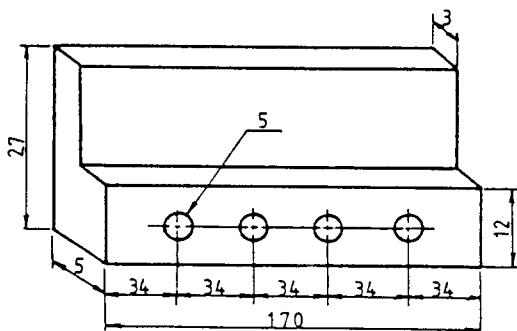
C	S _i	M _n	P	S
0.18	0.252	0.84	0.018	0.012

b) mechanical properties

yield strength (kg/mm ²)	tensile strength (kg/mm ²)	elongation (%)
31.5	47.2	42



(a)



(b)

Fig.1 Specimens for tensile test (a) and orthogonal cutting(b)

Fig.1은 본실험에 사용된 시험편을 도시한 것으로, 인장 파단후 진 스트레인(true strain)과 再結晶粒의 크기 D와의 관계를 정량적으로 구하기 위한 인장 시험편과 2차원 切削시험을 하기위한 시험편으로 나누어 加工하였다.

II-2. 시험 방법

(i) 재결정 열처리

먼저 재결정법에 있어서의 적정 열처리 조건을 찾기 위해 재료에 Rockwell硬度계로 압흔을 낸 다음 몇가지 조건으로 열처리를 한뒤 연마, 부식시켜 재결정 조직을 확인하였다. 본 실험에 사용한 재료의 적정 재결정 열처리 조건은 720°C×3hr으로 결정할 수 있었다.

(ii) 2차원 切削

切削은 만능밀링머시인 (feed speed : 15-3000 mm/min, bed : 1300×280mm)의 arbor yoke에 單刃切削공구를 부착하고 바이스에 切削 시험편을 고정하여 2차원 切削을 행하였다. 切削력의 측정 은 공구동력계에 charge amplifier를 연결하고 증폭된 切削력의 크기를 A/D converter에 연결하여 computer와 multipen recorder에 기록하였다. 切削력을 계산할때 배분력은 0.5kg 간격으로 127 kg까지, 주분력은 1kg간격으로 254kg까지 측정할 수 있게 하였다.

Table2. Cutting conditions

Work material	: SS41
width	: 3mm
Tool : Single Straight Cutting Edge SKH 9	
Rake angle	: -10~20 deg
Clearance angle	: 5 deg
Radius of cutting edge	: less than 2μm
Cutting speed	: 0.507m/min
Depth of cut	: 0.05~0.2mm

切削깊이는 정밀도가 0.1 μm인 전기 마이크로 미터를 사용하여 0.05, 0.1, 0.15, 0.2mm로 변화 시키면서 切削하였고 공구의 경사각(rake angle)

은 -10° , 0° , 10° , 20° 로 변화시키면서 切削하였다.

切削전에 시험편 加工時 생긴 應力이나 불균일 등을 제거하기 위해 0.05, 0.04, 0.03, 0.02, 0.01mm의 순으로 切削 깊이를 주어 석유를 切削유로 사용하여 각각 切削하고 아세톤으로 시험편과 공구에 묻어있는 석유를 제거한 다음에 다시 0.01mm의 切削깊이로 豫切削(pre-cutting)을 한 다음 2차원 切削을 실시하였다. 이때 切削속도는 0.507m/min로 일정하게 하였다.

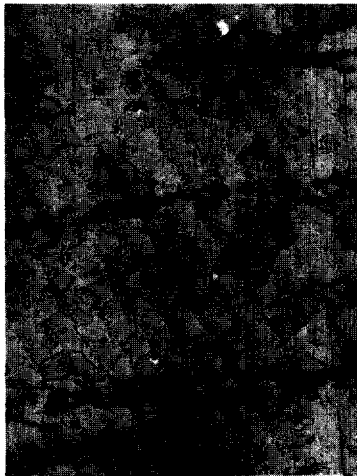
Table 2는 본 실험의 切削 조건을 나타낸다.

III. 실험결과 및 고찰

III-1. 교정곡선

선택된 열처리 조건($720^\circ\text{C} \times 3\text{hr}$)으로 인장 시험편을 실온에서 인장파단하여 열처리한 후 축방향으로 절단하여 연마, 부식처리한 다음에 조직을 관찰하였다. 이로부터 재결정이 생기는 최소의 스트레인 $\bar{\epsilon}_{cr}$, 재결정 입도의 크기 D와 진스트레인 $\bar{\epsilon}$ 과의 관계를 정량적으로 구하였다.

Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 파단면으로부터 멀어질수록 진스트레인 $\bar{\epsilon}$ 은 감소하며 진스트레인이 생기는 최소의 변형 $\bar{\epsilon}_{cr}$ 에 이르면 再結晶粒을 관찰할 수 없게 된다.



a) $\bar{\epsilon} = 0.248$



b) $\bar{\epsilon} = 0.488$



c) $\bar{\epsilon} = 1.25$

Fig. 2 Microstructures in the tensile specimen strained to various amount of true strains $\bar{\epsilon}$ and annealed at $720^\circ\text{C} \times 3\text{hr}$.

이때 再結晶粒의 크기 D는

$$D = L/B \dots\dots\dots (1)$$

여기서 L : 임의의 선분의 길이

B : 재결정입계와 직선이 만나는 점의 수이다.

또 진스트레인은 $\bar{\epsilon}$ 은

$$\bar{\epsilon} = \ln A_0/A_1 = 2.1 \ln d_0/d_1 \dots \dots \dots (2)$$

로 표시¹⁵⁾⁻¹⁷⁾ 되는데

여기서 A_0, d_0 : 파단전 시험편의 단면적과 직경
 A_1, d_1 : 파단후 시험편의 단면적과 직경
 이다.

Fig. 3은 이와같이 하여 구해진 $\bar{\epsilon}$ 과 D 와의 관계를 나타내는 선도이다.

여기서 $\bar{\epsilon}_{cr}$ 은 약 0.15이었다.

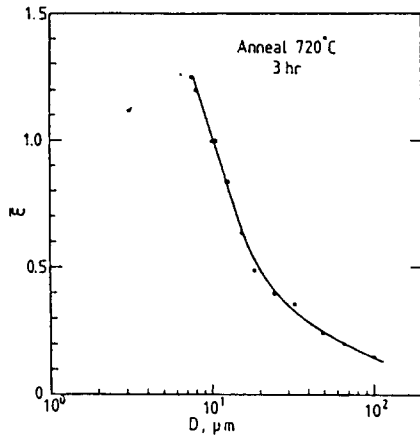


Fig. 3 Relation between true strain $\bar{\epsilon}$ and recrystallized grain size D

III-2. 切削시험편의 塑性스트레인 측정

각 切削조건으로 切削된 切削시험편을 인장시험편과 동일한 재결정 열처리조건(720°C×3hr)으로 아르곤 가스 분위기에서 열처리한 다음 길이 방향으로 가공면에 수직이 되도록 중앙부를 절단한 후 그 조직을 관찰하였다.

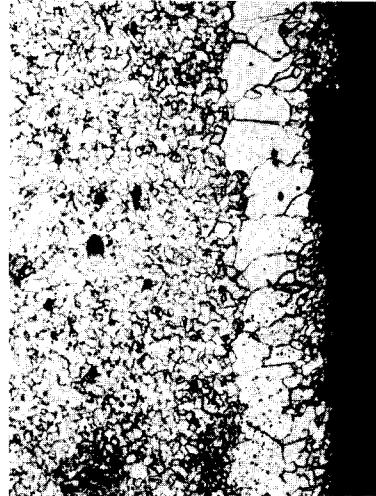
각 切削조건에 따라 즉 塑性변형의 정도에 따라 그 조직의 양상이 다르게 나타났으며 Fig. 4는 그 한 예를 나타낸 사진이다.

이상의 관찰로부터 機械加工 변형층의 解析에 재결정법을 적용할 수 있음을 알수 있다.

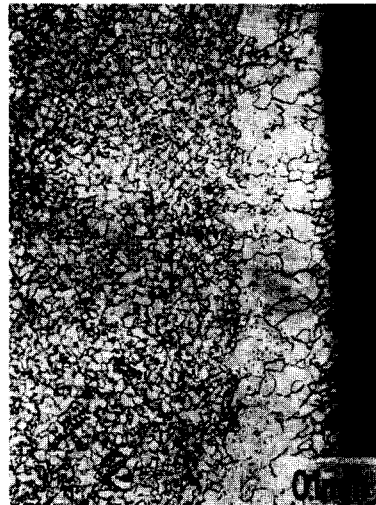
한편 이들 切削 시험편의 재결정 조직 사진들로부터 再結晶粒度 D 를 측정하고 D 와 $\bar{\epsilon}$ 과의 관계도(Fig. 3)로부터 切削조건을 각기 달리한 시험

편의 진스트레인 $\bar{\epsilon}$ 을 구하였다.

Fig. 5는 경사각의 변화에 따른 진스트레인 $\bar{\epsilon}$ 과 加工面에 수직인 거리 d 와의 관계를 나타낸



a)



b)

Fig. 4 Microstructures of machined layer
 a) Rake angle=20°
 Depth of cut=0.2mm
 b) Rake angle=0°
 Depth of cut=0.1mm

그림의 한 예로서, 切削깊이가 큰 경우가 ϵ 도 큰 값을 가짐을 알 수 있으며 d의 증가에 따라 ϵ 은 곡선적으로 감소함을 알 수 있다.

이들 결과는 切削시 형성된 機械加工 변형층의 塑性스트레인의 정도와 깊이가 각 切削조건들에 따라 다름을 보여주는 것으로서, 이는 각 切削조건 즉 切削력이나 切削에너지등이 機械加工 변형층의 塑性변형역에 크게 영향을 미쳤으리라 생각하여 切削력, 切削에너지와 塑性스트레인과 의 관계를 구하였다.

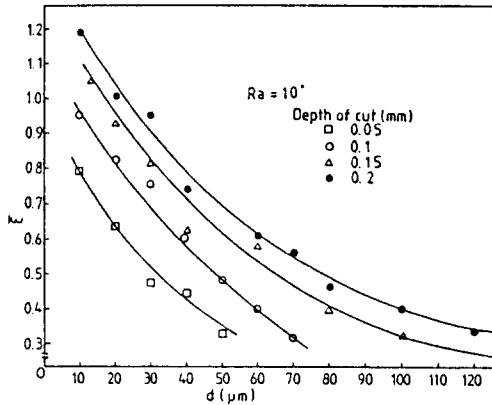


Fig. 5 Relation between distance from machined surface d and true strain $\bar{\epsilon}$

본 실험에서는 d가 10 μ m인 경우의 각 값을 취하여 최대 진스트레인을 $\bar{\epsilon}_{max}$ 라 하고 각 切削조건과의 관계를 구하였으며, M. E. Merchant등이 확립한 2차원 切削이론²²⁾을 적용하여 切削에너지등을 구하였다.

전단면상의 단위전단에너지 U_s (kg/mm²)는

$$U_s = (F_c \cos \varphi - F_t \sin \varphi) \frac{\cos R_a}{\cos(\varphi - R_a)} \dots (3)$$

여기서 F_c : 主分力 (kg)
 F_t : 배分力 (kg)
 R_a : 경사각 (deg)
 φ : 전단각 (deg)

$$\left(= \tan^{-1} \cdot \frac{r_c \cdot \cos R_a}{1 - r_c \sin R_a} \right)$$

r_c : 切削比 (= 切削깊이/칩의 두께)
 공구면상의 단위마찰에너지 U_f (kg/mm²)는

$$U_f = (F_c \cos \varphi - F_t \sin \varphi) \times \frac{\sin \beta \cdot \sin \varphi}{\cos(\varphi + \beta - R_a) \cos(\varphi - R_a)} \dots (4)$$

여기서 β : 마찰각 (deg) $\left(\tan^{-1} \cdot \frac{F_c \cdot \tan R_a + F_t}{F_c - F_t \cdot \tan R_a} \right)$

단위 전체에너지 U_t (kg/mm²)는

$$U_t = U_s + U_f \dots (5)$$

이다.

Fig. 6은 주분력 F_c 와 최대 진스트레인 $\bar{\epsilon}_{max}$ 과의 관계를 도시한 것으로 F_c 가 증가함에 따라 $\bar{\epsilon}_{max}$ 도 선형적으로 증가함을 볼 수 있다. 이들 결과는 切削깊이가 커질때와 경사각이 작아질때 즉 F_c 가 커지는 切削조건일때 $\bar{\epsilon}_{max}$ 값이 증가한다는 종전의 결과¹⁴⁾와 일치하고 있다.

Fig. 7은 배분력(thrust force) F_t 와 최대 진스트레인 $\bar{\epsilon}_{max}$ 과의 관계를 경사각과 切削깊이에 대해 도시한 것으로 F_t 가 커짐에 따라 $\bar{\epsilon}_{max}$ 도 커지며, 切削깊이 t가 큰 경우의 $\bar{\epsilon}_{max}$ 값이 큼을 알 수 있다.

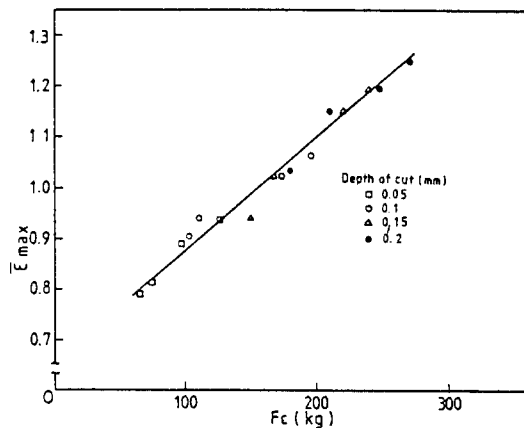


Fig. 6 Relation between principal cutting force F_c and maximum true strain $\bar{\epsilon}_{max}$.

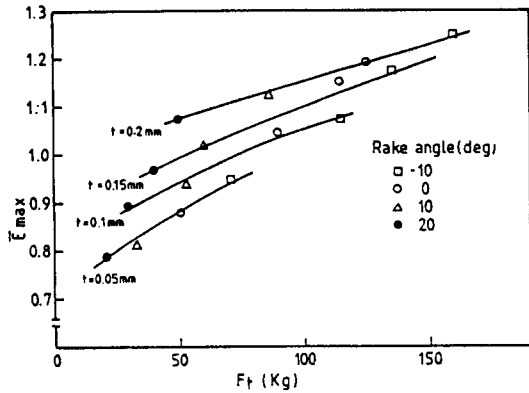


Fig. 7 Relation between thrust force F_t and maximum true strain $\bar{\epsilon}_{max}$.

이상의 결과들을 볼 때 塑性 스트레인은 切削력의 크기에 큰 영향을 받으며 切削력이 크게 작용하는 切削 조건의 소성 스트레인 값이 큼을 알 수 있다.

이들은 또한 切削 조건의 상이에 따른 切削에너지의 변화로 인한 결과라고 생각되어 $\bar{\epsilon}_{max}$ 과 切削에너지와의 관계를 Fig. 8, 9에 도시한다.

Fig. 8은 전단면상의 단위 전단에너지 U_s 와 최대 진스트레인 $\bar{\epsilon}_{max}$ 과의 관계를 경사각과 절삭깊이에 대해 도시한것으로, 같은 경사각의 경우 切削깊이가 증가함에 따라 U_s 값은 감소하나 $\bar{\epsilon}_{max}$ 값은 증가하고 있다. 이는 切削시의 크기효과(size eff

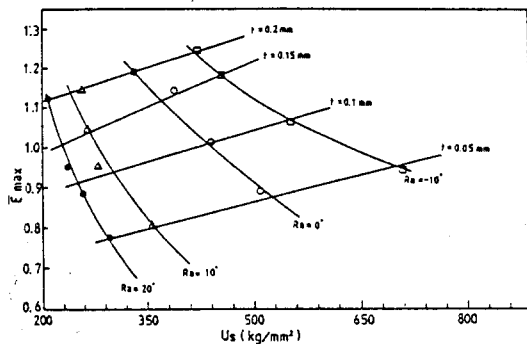


Fig. 8 Relation between maximum true strain $\bar{\epsilon}_{max}$ and unit shear energy on the shear plane u_s .

ect)에 의한 결과며, 또한 같은 切削깊이의 경우 경사각이 감소함에 따라 U_s 도 $\bar{\epsilon}_{max}$ 도 증가하고 있다.

Fig. 9는 단위 체적을 切削하는데 필요한 전에너지 U_t 와 최대 진스트레인 $\bar{\epsilon}_{max}$ 과의 관계를 도시한 것으로 이역시 크기효과의 이유로 경사각이 일정한 경우 切削깊이가 증가하면 U_t 는 감소하나 $\bar{\epsilon}_{max}$ 는 증가하고 있으며, 切削깊이가 일정할때 경사각이 감소하면 U_t 도 $\bar{\epsilon}_{max}$ 도 공히 증가하게 된다.

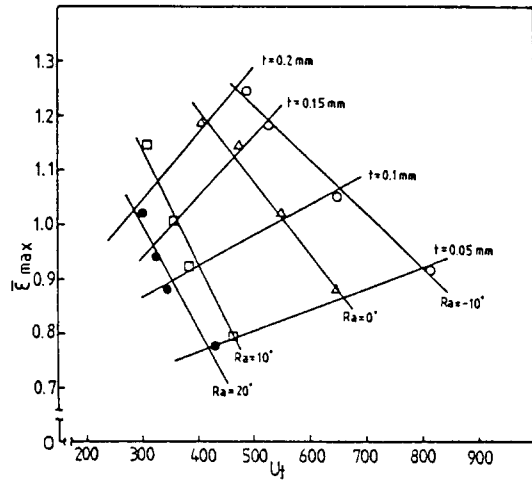


Fig. 9 Relation between maximum true strain $\bar{\epsilon}_{max}$ and unit total energy u_t .

이상의 결과들을 종합해보면 切削시 형성된 塑性스트레인은 각 切削조건 즉 切削깊이, 경사각, 전단에너지등에 크게 영향을 받아 변화하고 있으며 이들 변화된 塑性 변형층이 金屬의 表面상태 즉 surface integrity에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

이상의 실험결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 金屬의 surface integrity는 각 切削조건에 의해 형성된 表面域의 變形量에 큰 영향을 받고 있다.

2. 金屬加工面의 塑性 스트레인은 切削조건에 따라 그 양상을 달리하고 있으며, 재결정법에 의해 측정할 수 있다.
3. 塑性 스트레인은 切削깊이가 커짐에 따라 또한 경사각이 작아짐에 따라 큰 값을 가진다.
4. 최대 진스트레인은 切削력이 크게 작용할 때 또한 경사각이 작은 경우에 큰 값을 가진다.
5. 최대 진스트레인은 切削에너지와 관계가 있으며, 切削깊이가 일정할 때 단위 전단에너지와 단위 전에너지가 증가함에 따라 최대 진스트레인 값도 증가하며, 경사각이 일정할 때는 에너지 값이 증가함에 따라 최대 진스트레인 값은 감소한다.

參 考 文 獻

- 1) M. Field et al, "Review of Surface Integrity of Machined Components", Annals of the CIRP Vol. 20, No. 2, 1971, pp. 153-162
- 2) Y. Matsumoto, "Effect of Hardness on the Surface Integrity of AISI 4340 Steel", ASME J. of Engng for Industry, Vol. 108, 1986, pp. 169-175
- 3) S. Jeelani, "Residual Stress Distribution in Machining Annealed 18 Percent Nickel Maraging Steel", ASME J. of Engng Materials and Technology, Vol. 108, 1986, pp. 93-98
- 4) W. Graham et al, "An Investigation into the Degree and Depth of Work-hardening Produced at the Surface of a Workpiece by Turning", MTD, 1966, pp. 463-478
- 5) J. Bailey et al, "Surface Integrity in Machining AISI 4340 Steel", ASME J. of Engng for Industry, Vol. 98, 1976, pp. 999-1007
- 6) M. Elkhabeery et al, "Surface Integrity in

Machining Solution-Treated and Aged 2024-Aluminum Alloy, Using Natural and Controlled Contact Length Tools. Part 1-Unlubricated Conditions" ASME J. of Engng and Technology, Vol. 106, 1984, pp. 153-160

- 7) J. Bailey et al, "Surface Integrity in Machining Solution-Treated and Aged 2024-Aluminum Alloy, Using Natural and Controlled Contact Length Tools. Part 2-Lubricated Conditions" ASME J. of Engng Materials and Technology, Vol. 106, 1984, pp. 161-166
- 8) E. Herbert, Trans. Am. Soc. Mech. Engrs., Vol. 48, 1926, pp. 705
- 9) C. Rubenstein et al, "Surface and Sub-surface Work-hardening Produced by the Planing Operation", Annals of the CIRP, Vol. 18, 1970, pp. 369-381
- 10) C. Liu et al, "Variables Governing Patterns of Mechanical Residual Stress in a Machined Surface", ASME J. of Engng for Industry, Vol. 104, 1982, pp. 257-264
- 11) C. Liu et al, "The Mechanical State of the Sublayer of a Surface Generated by Chip-Removal Process, Part 1", ASME J. of Engng for Industry, Vol. 98, 1976, pp. 1193-1201
- 12) C. Liu et al, "The Mechanical State of the Sublayer of a Surface Generated by Chip-Removal Process, Part 2", ASME J. of Engng for Industry, Vol. 98, 1976, pp. 1202-1208
- 13) Tae Young Kim, "A Study on the Residual Stress Distribution Left in Machined Surface (on the EDM)", 全北大 工學研究, 第15輯, 1984, pp. 229-236
- 14) 金台永 外 1人, "再結晶法을 이용한 機械加工變形層의 塑性變形率 측정에 관한 研究(1)",

- 全北大 工學研究, 第17輯, 1986, pp.87-92
- 15) 金台永, “鋼材 熔接熱影響部の 熱變形 脆化에 관한 研究”, 全北大 博士學位論文, 1983
- 16) 飯野 豊, 日本 金屬學會 會報, 第18卷, 1979, p. 645
- 17) T. Shoji, Metal Science, Vol. 10, 1976, p. 165
- 18) Y. Iino, “Recrystallization-Thermal Etching of Local Plastic Strain in Heat Resistant Alloys”, ASM Metallurgical Transactions, Vol. 11A, 1980, pp. 1939-1950
- 19) Y. Iino, “The Recrystallization Techique for Local Plastic Zone Observation in Type 304 Stainless Steel in the Temperature Range of -196°C to 950°C”, Experimental Mechanics, Vol. 20, 1980, pp. 1-4
- 20) Y. Iino, “Accumulated Plastic Zone around Fatigue Crack in Type 304 Stainless Steel”, Metal Science, 1976, pp. 159-164;
- 21) Tae Young Kim et al, “Recrystallization Technique of Plastic Deformation in Weld of Mild Steel”, Trans. Japan Welding Society, Vol. 13, 1982, pp. 27-31
- 22) M. Shaw, “Metal Cutting Principles”, Clarendon, Oxford, 1984, pp. 18-46