

기계가공면의 塑性 스트레인에 관한 연구

김태영 (전북대)
신영근 (전북대 대학원)
소울영 (전북 산업대)

Abstract

It is well known that metal cutting leaves a plastically deformed layer in the machined surface. This residual phenomenon 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 machined surface are very difficult to measure, since they are located within a very short distance from the surface and they change very rapidly. There is an alternative way to determine the residual strain in plastically deformed materials by measuring the grain size after a subsequent recrystallization process. Although, this technique has been successfully applied by several researchers to find the plastic zone around notches and cracks in various materials and welding beads, few works have been reported using the recrystallization method to determine the residual strains in machined surface.

Therefore, the purpose of this investigation is to explore the effectiveness of the recrystallization technique in machining applications, and in particular, to find the effect of cutting parameters, i.e., depth of cut and rake angle on the plastic strains.

1. 序論

기계 가공면의 품질은 표면조도, 경도의 변화, 組織의 변화, 잔류응력의 존재여부 등에 따라서 좌우되며 이러한 기계 가공면의 특성 및 성질을 surface integrity라 한다. 최근 산업의 발달과 더불어 극심한 응력이나 온도등에서도 견딜 수 있는 기계부품의 사용이 빈번해 지고 있어 기계 가공면의 품질향상을 위한 연구가 필수적으로 이루어져야 한다.

금속절삭을 한 다음 기계가공면에 塑性 變形層(plastically deformed layer)이 존재한다는 것은 잘 알려진 사실이다. 이러한 현상은 피로강도, 치수불안정 (dimensional instability), 미소크랙, 응력부식파괴등 기계부품의 물리적 특성에 여러가지 형태로 영향을 주고 있다. 기계 가공면에 남아있는 이러한 물리적 성질 즉 surface integrity는 높은 응력이나 극한하중을 받는 부품의 설계시 매우 중요하게 고려되어야 한다.

이러한 가공면의 塑性 스트레인(plastic strain)의 측정은 중요한 반면 매우 어려운 특성이 있다. 塑性 變形層은 기계 가공면으로부터 매우 얇게 형성되어 있으며 표면으로부터 깊이에 따라 매우 급격한 변화를 보이기 때문이다. 塑性 變形層을 평가하는 몇가지 방법 외에 금속의 再結晶(recrystallization)후 그 조직의 크기를 측정함으로써 塑性 變形을 받은 재료의 잔류 스트레인을 결정하는 방법이 이용되고 있다. 여러가지 재료들과 용접 bead등 notch나 크랙 주위의 塑性 變形을 평가하는데 이 방법이 성공적으로 응용되고 있으나, 기계가공면의 잔류 스트레인을 결정하는데 再結晶法이 이용된 예는 그리 많지 않으며 충분한 자료가 없는 실정이다.

이러한 관점에서 본 연구에서는 기계가공면의 塑性 스트레인 평가에 再結晶法의 응용 여부를 시험하며, 특히 각 절삭조건 즉 절삭깊이, 경사각도 등이 塑性 스트레인에 미치는 영향에 대해 연구하는데 그 목적을 둔다.

2. 試驗片과 實驗裝置 및 實驗方法

2-1. 試驗片

본 실험에서는 切削 變數들의 影響을 파악하기 위해 판 두께 25mm인 인강(SS41)판을 使用하였다. 試驗片은 二次元 切削을 위한 試驗片과 인장실험을 위한 시험편으로 나누어 가공하였다.

2-2. 實驗裝置

실험에 使用된 기기로는 만능 milling machine, tool - dynamometer, charge amplifier, multipen recorder, A / D converter, single straight cutting edge tool, electric-micrometer, Apple computer, tool - microscope, quick - stopping device등이다.

2-3. 實驗方法

2-3-1. 입자크기와 塑性變形率과의 관계

再結晶法은 재료들을 일정조건으로 再結晶 열처리함으로써, 加工된 表面에서 塑性變形率을 쉽게 알아낼수 있다. 再結晶된 입자의 크기는 어니일링 전 조직의 축적된 에너지에 따라 달라지며 축적된 에너지는 塑性變形에 의해 생성되고, 塑性變形率의 증가에 따라 선형적으로 증가한다.

본 논문에 使用된 再結晶法의 주요 세 단계는 다음과 같다.

- 1) 선명한 입자크기 분포를 알기 위해 선택된 자료에 대한 적당한 어니일링 온도와 지속시간의 선택.
- 2) 어니일링된 재료에서 재결정 입자의 크기와 塑性變形量 사이의 定量的인 관계를 결정하기 위한 인장 試驗片의 테스트. 이 단계에서 塑性變形率과 입자크기 사이의 관계를 보여주는 矯正曲線을 얻는다.
- 3) 塑性的으로 변형된 영역에서 입자크기의 측정과 2)단계에서 얻어진 곡선을 使用하여 塑性變形率 값으로 입자크기를 전환.

여러개의 試驗片들을 Rockwell 경도 테스터로 압흔하였고, 이 試驗片들은 Ar gas상에서 각각 다른 온도들과 지속 시간들을 使用하여 어니일링하였다. 압흔주위에서 가장 선명한 입자 크기의 변화를 주는 어니일링조건을 위의 실험들로부터 선택하였다. 압흔 주위의 再結晶된 조직들은 Fig.1에서 보여준다. 다음으로 인장실험은 입자크기와 塑性變形率 사이의 관계를 결정하기 위해 실행하였다. 용량이 10 ton인 Instron 인장시험기로 상온에서 파괴될 때까지 잡아당기고, 다음에는 再結晶을 위해 1)단계에서 선택된 조건들로 어니일링한다. 그 후 축방향으로 중심부를 절단하여 입자크기 분포를 알기위해 신중히 polishing하고, 4% Nital로 腐蝕하여 조직을 profile projector와 金屬현미경으로 관찰하였다. 이 관찰로부터 再結晶이 생기는 최소의 變形 ϵ_{cr} , 再結晶입도 D와 진변형률 ϵ 와의 관계를 정량적으로 구할 수 있다. 여러 위치들에서 變形率과 입자크기들의 측정을 반복하므로써 變形率과 입자들 사이의 관계를 보여주는 矯正曲線을 얻을 수 있다. Fig. 2는 SS41강의 矯正曲線을 나타냈고 ϵ 의 범위가 0.109 ~ 1.25까지 었다.

2-3-2. 切削實驗

a) 切削變數들의 影響

만능 milling machine의 arbor yoke에 고정된 소형 vise를 장착한 후 2차원 切削을 행하였다. 工具 動力計에 增幅器를 연결시켜 A/D 變換器를 통하여 Apple computer에서 切削力을 계산하고 multipen recorder에서 기록하였다. 또 절삭깊이는 精度가 0.1 μ m인 전기 micrometer를 使用하여 0.05 ~ 0.2mm로 변화시키면서 切削하였고 工具의 傾斜角은 -10° ~ 20°로 변화시키면서 切削하였다. 剪斷변형영역에서의 소성변형율을 관찰하기 위해 금정지장치를 이용하여 chip을 切削面으로 부터 분리시키기 前에 보전시켰다. 切削速度는 0.507m/min로 一定하게 하였고, 再結晶 조건은 720°C에서 6시간으로 선택하였다.

b) 切削試驗片의 塑性變形率 測定

각 切削條件으로 切削된 切削試驗片을 引張試驗片과 동일한 再結晶 熱處理 條件 720°C, 6hr으로 Ar gas 분위기에서 熱處理한 다음 길이방향으로 加工面에 垂直이 되도록 중앙부를 切斷한 후 polishing 하였다. 그 뒤 4%Nital로

腐蝕하고 camera를 부착시킨 현미경으로 100배 확대하여 사진을 촬영하였다. 이 사진으로부터 再結晶 입도 D를 측정하고, 矯正曲線으로부터 眞變形率 ϵ 를 구하였다. 剪斷領域에서 chip과 塑性變形된 領域의 境界面을 기준으로 각 試驗片 공히 40 μ m인 곳의 ϵ_a 라 하여 資料分析에 이용하였다.

3. 實驗結果 및 考察

Fig. 3은 SS41강의 切削試驗片을 각 切削條件으로 quick stopping device로 切削한 뒤 720°C, 6hr으로 Ar gas분위 기에서 熱處理 한후 길이방향으로 중앙부를 cut-off wheel을 이용하여 切斷한 뒤 斷面을 polishing하고 4% Nital로 腐蝕시켜 camera가 부착된 현미경으로 100배 擴大하여 관찰한 사진으로서 塑性變形을 받은 부분은 再結晶이 분명히 나타남을 보여주고, 각 切削조건에 따라 再結晶 構造들이 확실히 다름을 알수있다. 切削깊이가 깊어질수록 變形層이 넓어지고 큰 再結晶領域이 生成된다. 또한 이것은 再結晶法이 剪斷領域에서 塑性變形率의 變化를 매우 잘 구별할 수 있다는 것을 증명한다.

Fig. 4는 切削깊이 t와 切削면에서 chip의 입자와 소성변형된 입자의 경계면을 기준으로 40 μ m인 곳에서 구한 眞變形率 ϵ_a 와의 관계를 도시한 것으로 동일 切削깊이에서 傾斜角이 작을수록 ϵ_a 는 커지며 동일 傾斜角에서 切削깊이가 커지면 ϵ_a 는 증가한다. 그러나 切削條件이 본 實驗의 切削條件보다 더 重切削하는 쪽으로 되어도 ϵ_a 는 더이상 커지지 않게 되는데 이는 한계치인 $\epsilon = 1.25$ 에 수렴하게 되기 때문이다.

Fig. 5는 傾斜角 α 와 眞變形率 ϵ_a 와의 관계를 도시한 것으로 傾斜角이 증가하면 동일 切削깊이에서 ϵ_a 가 감소함을 보이고 동일 傾斜角에서는 切削깊이가 커질수록 ϵ_a 가 증가하는 것을 볼 수 있다. 切削變數들과 塑性變形率 사이의 관계가 線形的이며 깊은 切削이 剪斷領域에서 큰 變形率과 깊고 넓은 塑性層을 生成한다. 큰 傾斜角과 작은 切削깊이 둘다 切削工具 앞쪽의 주 變形域에서 塑性變形的 領域을 감소하고 塑性的으로 變形된 층의 깊이를 減少시킨다. 이 발견들은 앞서 발표된 논문의 결과들과 一致한다. Haslam과 Rubenstein은 表面硬度和 加工硬化層의 깊이가 uncut chip 두께의 증가와 傾斜角의 감소로 인해 증가한다는 것을 발견하였다.

Fig. 6은 切削力 F_c 와 眞變形率 ϵ_a 와의 관계를 도시한 것으로 F_c 가 증가하면 ϵ_a 도 따라서 증가하고 F_c 가 감소하면 ϵ_a 도 작아짐을 볼 수 있다.

이상과 같은 결과들은 切削條件의 상이에 따른 切削에너지의 變化로 인한 결과라고 생각되어 ϵ_a 와 切削에너지와의 관계를 도시하면, Fig. 7은 剪斷面상의 단위 切削에너지 u_s 와 眞變形率 ϵ_a 와의 관계를 傾斜角과 切削깊이에 대해 도시했는데 傾斜角이 一定할때 切削깊이가 증가하면 u_s 는 감소하나 ϵ_a 는 증가하는데 u_s 가 감소하는 것은 size effect 때문이라 추정된다.

또 切削깊이가 一定할때 傾斜角이 감소하면 u_s 도 ϵ_a 도 증가한다. 塑性變形率의 크기에는 傾斜角이 切削깊이보다 더 큰 影響을 미친다는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8은 單位體積을 切削하는데 필요한 전에너지 u_t 와 眞變形率 ϵ_a 와의 관계를 도시한 것으로 傾斜角이 一定할때 切削깊이가 증가하면 ϵ_a 는 증가하나 u_t 는 감소하는데 이 역시 size effect 때문이라 추정된다. 또 切削깊이가 일정할 때 傾斜角이 감소하면 u_t 도 ϵ_a 도 공히 增加하게 된다.

4. 結 論

이상의 實驗結果도 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 再結晶法은 加工된 표면뿐만 아니라 剪斷領域에서도 塑性變形率을 측정하는데 使用되며, 이 방법은 加工時 生成되는 塑性變形된 영역의 깊이를 아는데 성공적으로 적용된다.
2. 切削變數들, 즉 切削깊이와 傾斜角에 따라 저 탄소강(SS41)의 剪斷領域에서 塑性變形率이 다름을 알수 있다.
3. 眞變形率 ϵ_a 는 다음 切削條件과 관련되어 있다.
 - 1) ϵ_a 는 切削깊이가 커짐에 따라 증가하고 傾斜角이 커짐에 따라 減少하며, F_c 와 F_t 가 커질수록 增加한다.
 - 2) 傾斜角이 작아짐에 따라 u_s 와 ϵ_a 값이 增加함을 보였고, 切削깊이 t가 減少함에 따라 u_s 는 增加하였으나 ϵ_a 는 減少한다.
 - 3) 切削깊이가 커질수록 u_t 는 減少하나 ϵ_a 는 增加하고 傾斜角이 커짐에 따라 u_t 와 ϵ_a 는 減少한다.

References

1. E. G Herbert, Trans. Am. soc. Mech. Engrs. Vol. 48, pp. 705, 1926.
2. P. K. Wright, "Predicting the Shear Plain Angle in Machining from Workmaterial Strain-Hardening Characteristics", ASME, 1982.
3. Field, M, J. F. Kahles and J. J. Commett, "Review of Measuring Methods for Surface Integrity", Annals of the CIRP, Vol. 21, No. 2, 1972.
4. Yutaka Iino, Tae-Young Kim and Se-Hi Chung, Recrystallization Technique of Plastic Deformation in Weld of Mild Steel, Trans. Japan Welding Society, Vol 13, No 2, 1982.
5. Haslam, D. and Rubenstein, "Surface and Sub-surface Work-Hardening Produced by the Planning Operation", Annals of the CIRP, Vol. 18, pp. 369 - 381, 1970.
6. Tae-Young Kim, Yoichi Matsumoto, Hyung-Gon Shin and D. William Wu, "A New Technique to Measure Plastic strain in the Machined Surface", wear, 147, pp. 311-322, 1991
7. Yutaka Iino, "Highly Deformed Zone and Cyclic Strain History near Fatigue Crack Tip", Technology Reports of the Tohoku University, Vol. 43, No. 1, pp. 221-230, June 1987.
8. P. K. Wright and J. L. Robinson, "Variables Governing Patterns of Mechanical Residual Stress in a Machined Surface", ASME, Journal of Engineering for Industry, Vol. 104, pp. 257, 1982.



Fig.1 Recrystallized microstructure around indentation. (SS41 steel, 720°C × 6hr)

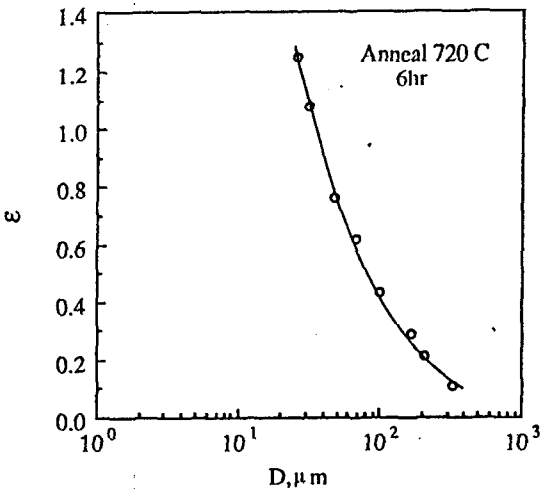
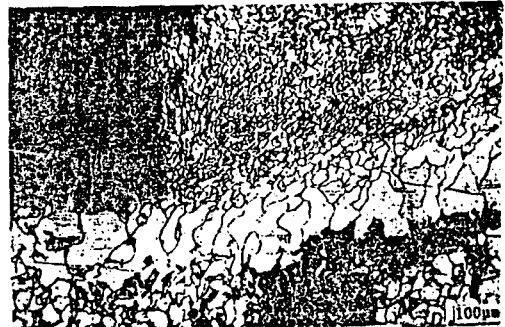
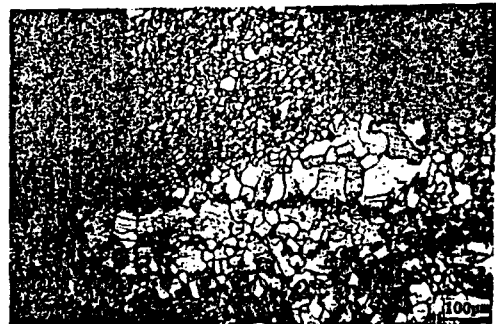


Fig.2 The relation between true strain ϵ and recrystallized grain size D .



(a) Rake angle = 20°
Depth of cut = 0.15 mm



(b) Rake angle = 10°
Depth of cut = 0.1 mm

Fig.3 Micro - structures of mechanically strained zone.

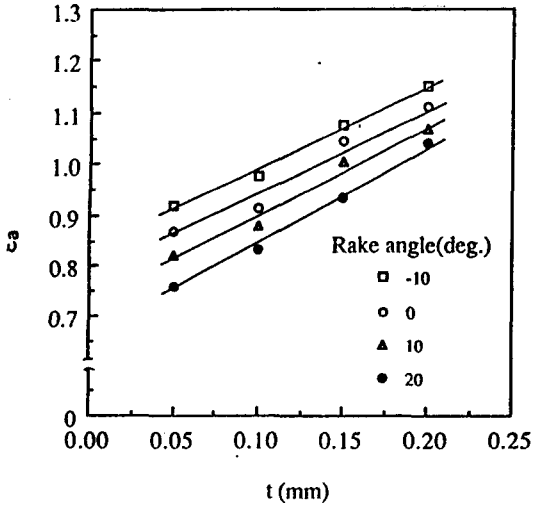


Fig. 4 The relation between true strain ϵ_s and depth of cut t .

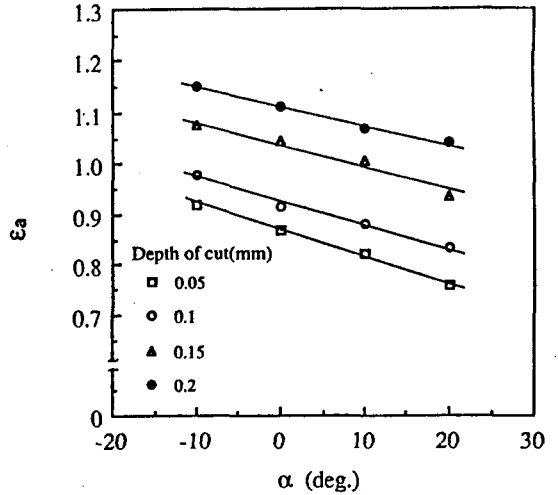


Fig. 5 The relation between true strain ϵ_s and rake angle α .

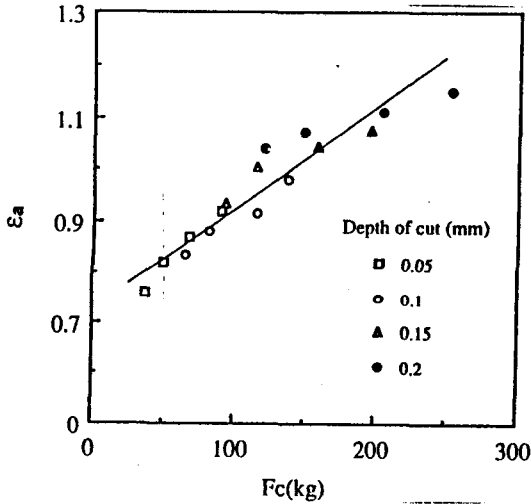


Fig. 6 The relation between true strain ϵ_s and cutting force F_c .

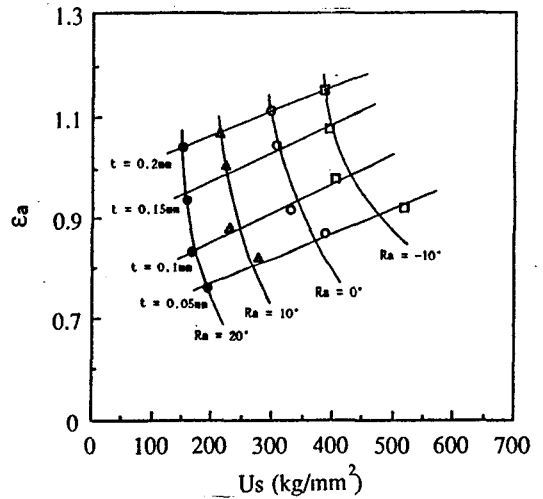


Fig. 7 The relation between true strain ϵ_s and unit shear energy on the shear plane u_s .

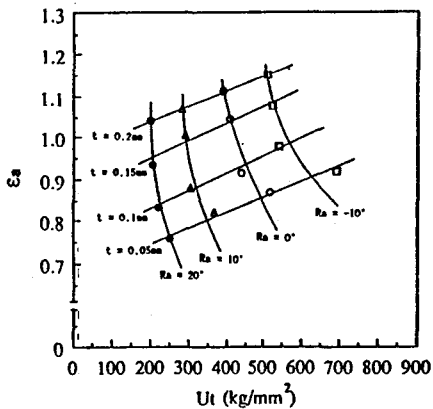


Fig. 8 The relation between true strain ϵ_s and unit total energy u_t .