

연속재결정법에 의한 2차원 절삭가공면의 소성스트레인에 관한 연구

飯野 豊*, 김 태 영**, 문 상 돈***

Machined Surface Plastic Strain in Orthogonal Cutting by Subsequent Recrystallizations Technique

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

ABSTRACT

The subsequent recrystallizations technique, an experimental strain measurement method by use of recrystallization phenomena, has been successfully applied for the observation of machined surface plastic zones with equivalent plastic strain $\epsilon \geq 0.5, 0.12$ and 0.02 of type 304 stainless steel. The depth of the zone with $\epsilon \geq 0.5$ is very small, $10-50\mu\text{m}$, while those with $\epsilon \geq 0.12$ and 0.02 are $100-200\mu\text{m}$ and $200-450\mu\text{m}$, respectively. The depths increase with increasing depth of cut and with decreasing rake angle. The relation between the depth of the zones and the cutting parameters is shown. The deformation state ahead of the quick-stop cut was also well visualized by the technique.

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

1. 서 론

기계가공면의 소성변형층(plastically deformed layer)은 피로강도, 치수불안정, 응력부식파괴 등과 같은 기계요소들의 기계적 성질들에 영향을 미친다. 그러므로 소위 surface integrity라 불리는 이러한 성질들은 정밀기계 가공시 반드시 고려되어야 하며, 소성변형, 응력분포를 포함하는 기계가공면의 정량적인 해석이 수행되어야 한다.

기계가공 변형층은 가공표면으로 부터 매우 얇게 국부

적으로 형성되어 있고, 가공 표면으로 부터의 깊이에 따라 그 스트레인의 변화가 매우 크기 때문에 기계가공면의 소성스트레인(plastic strain)의 측정은 매우 어려운 것으로 알려져 왔다. 격자의 크기에 의한 방법 (grid technique)^(1,2), 부식에 의한 방법 (metallographic etching)⁽³⁾, 그리고 금속의 전위구조 해석법 (dislocation structure)⁽⁴⁾ 등과 같은 여러 실험적인 방법들이 이용되었으나, 이러한 방법들은 다소 정성적인 것들이었다.

재결정법(recrystallizations technique)⁽⁵⁻⁷⁾은 금속에

* 日本 豊田工業大學 기계시스템공학과

** 전북대학교 정밀기계공학과

*** 전북대학교 대학원

있어서 재결정 현상을 이용하는 실험적인 스트레인 측정 방법으로서 기계가공면의 소성변형역의 스트레인 측정에 이용되었다⁽⁸⁾. 최근 종전의 재결정법의 단점을 개선한 연속 재결정법 (subsequent recrystallizations technique)^(9,10)이 개발되어 국부에 집중된 소성변형 영역의 스트레인 측정에 사용되었으며, 일부 기계가공면의 소성스트레인의 측정에의 이용 가능성이 검토되었다⁽¹¹⁾.

본 논문에서는 기계가공면의 소성스트레인의 정량적인 측정을 위해 연속재결정법을 도입하여 수행하였고, 경사각, 절삭깊이등의 절삭변수들과의 관계를 살펴보았다.

2. 실험방법

2.1 실험재료와 시험편

실험에 사용된 재료는 두께 5.8mm의 SUS304 판재이다. 2차원 절삭을 위한 시험편(Fig.1)은 표면의 소성변형을 피하기 위하여 방전가공기(electric discharge wire cut)로 가공하였다.

2.2 2차원 절삭실험

2차원 절삭실험을 밀링머시인으로 수행하였다. P20등급의 절삭공구를 밀링머시인에 부착하였고 마이스에 고정된 시험편과 2차원 절삭운동을 하도록 하였다.

절삭공구는 다이아몬드 연삭숫돌과 Arkansas 숫돌을 이용하여 인선을 정밀가공하였다. 절삭인선 반경은 현미경을 이용하여 측정하였다.

실험을 행하기 전에 시험편 가공시 생긴 응력과 불균일등을 제거 하기 위하여 즉 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 절삭실험이 수행되었다.

절삭실험은 Table 1에서와 같이 절삭깊이 0.01, 0.04, 0.07, 0.1mm 와 경사각 -10° , 0° , 10° , 20° 의 각각 네가지 조건으로 변화시켰으며, 절삭속도는 0.507m/min 였다.

Table 1 Cutting conditions

work material	: austenitic type SUS 304
width	: 3mm
tool	: P20 grade
rake angle	: -10° , 0° , 10° , 20°
clearance	: 7°
radius of cutting edge	: less than 2 μ m
cutting speed	: 0.507 m/min
depth of	: 0.01-0.1 mm

2.3 재결정 열처리^(9,10)

절삭실험 후 시험편들은 다시 연속재결정실험(부록 참조)을 위하여 wheel cutter를 사용하여 두개의 시험편으로 절단하였다. Fig.1에서 볼 수 있는 것 처럼 절단시험편들의 하나는 소성스트레인이 $\epsilon \geq 0.5$ 인 영역을 관찰하기 위하여 열처리 조건 A(750°C , 24hr)가 이용되었다. $\epsilon \geq 0.12$ 인 영역을 관찰하기 위하여 열처리 조건 B(900°C , 24hr)가 그리고 $\epsilon \geq 0.02$ 인 영역을 관찰하기 위하여 열처리 조건 C(950°C , 24hr)가 이용되었다. A조건으로 열처리 후 시험편을 연마하고 부식액 ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{HCl} : \text{NH}_3 = 100 : 15 : 30$)으로 부식하여 재결정 영역을 관찰하였다.

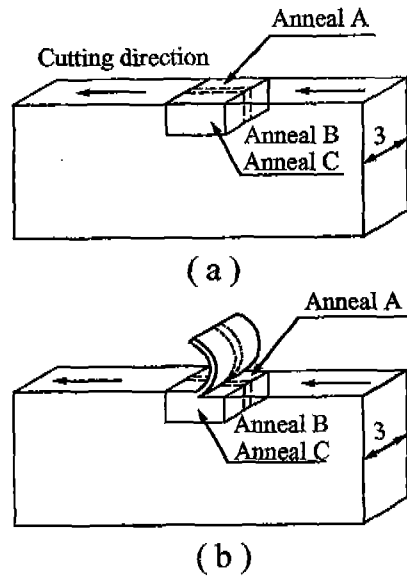


Fig. 1 Specimen
(a)through cut.
(b)quick stop cut

3. 실험결과 및 고찰

3.1 2차원 절삭(orthogonal through-cut)

Fig.2는 경사각 20° , 절삭깊이가 0.01과 0.07mm일 때 A,B,C의 열처리 조건으로 열처리한 후의 금속조직을 나타내고 있으며, 재결정 영역과 기지금속(matrix)을 뚜렷하게 구별할 수 있다. 각 재결정 영역선단(기지과 재결정영역의 경계부)의 소성스트레인이 각각 0.5((a),(d)),

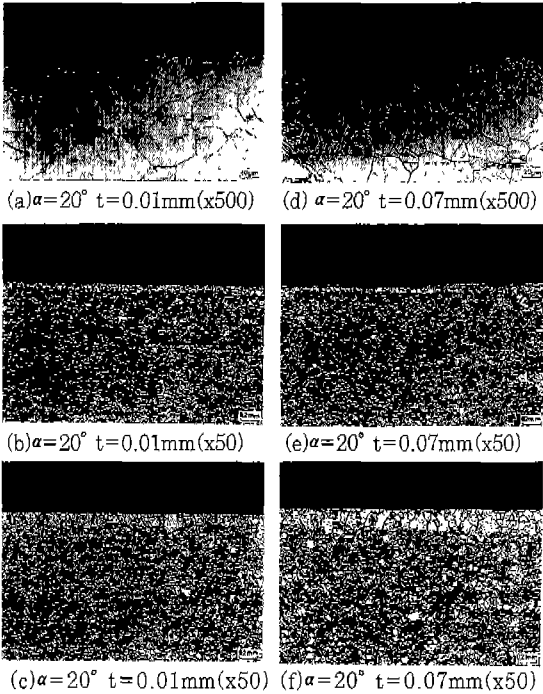


Fig. 2 Recrystallized microstructures showing plastic zone with $\epsilon \geq 0.5$ ((a), (d)), with $\epsilon \geq 0.12$ ((b), (e)) with $\epsilon \geq 0.02$ ((c), (f)) rake angle = 20° , (a)-(c) $t=0.01\text{mm}$, (d)-(f) $t=0.07\text{mm}$

0.12((b), (e)), 0.02((c), (f))이다. 기계가공면으로 부터 소성변형역의 깊이, 즉 기계가공면으로 부터 재결정역 선단까지의 거리를 조직사진으로 부터 측정하였다.

기계가공면으로 부터의 거리에 대한 소성스트레인 분포는 Fig.3과 같다. 스트레인은 가공표면에 가까울수록 증가하고 있으며 가공표면에서 매우 큰 스트레인을 확인 할

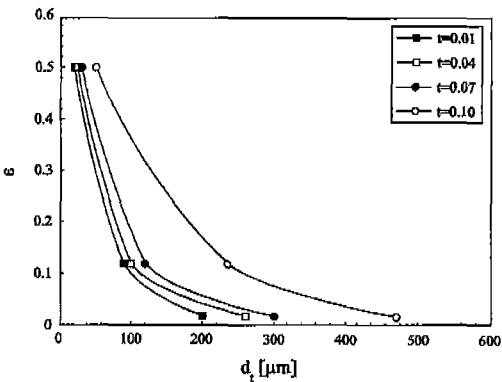


Fig. 3 The relation between plastic strain ϵ and the distance from the machined surface d_1 ($\alpha=20^\circ$)

수 있다. 소성변형의 깊이는 절삭깊이가 증가함에 따라 증가한다.

Fig.4는 경사각이 0° , 절삭깊이가 각각 0.01, 0.07mm의 절삭조건에서 가공한 시편의 열처리 후의 금속조직을 보여주고 있다. 경사각이 20° 인 경우(Fig.2)와 동일한 관찰이 이루어졌다. 단 소성변형역의 깊이는 경사각이 20° 인 경우보다 약간 큼을 알 수 있었다

Fig.5와 Fig.6은 가공면으로 부터의 거리 d_t 와 절삭깊이 t 와의 관계를 도기한 것으로 각각 $\epsilon \geq 0.5$ 와 $\epsilon \geq 0.12$ 의 경우이다. 소성변형역의 깊이는 절삭깊이가 증가함에 따

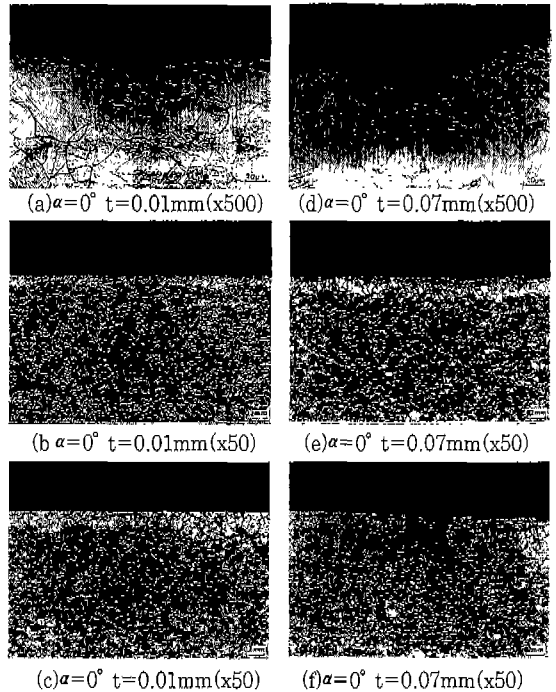


Fig. 4 Recrystallized microstructures showing plastic zone with $\epsilon \geq 0.5$ ((a), (d)), with $\epsilon \geq 0.12$ ((b), (e)) with $\epsilon \geq 0.02$ ((c), (f)) rake angle = 0° , (a)-(c) $t=0.01\text{mm}$, (d)-(f) $t=0.07\text{mm}$

라 증가함을 알 수 있다.

Fig.7과 Fig.8은 소성변형역의 깊이에 대한 경사각의 영향을 보여주고 있다. 이 결과들은 경사각이 클수록 또한 절삭깊이가 작을수록 소성변형역이 감소하고 소성변형층의 깊이도 감소한다는 전 결과들과 일치하고 있다⁽⁸⁾.

3.2 2차원 순간정지 절삭(orthogonal quick-stop cut)

Fig.9는 순간정지 절삭 선단 부근의 열처리된 시험편의

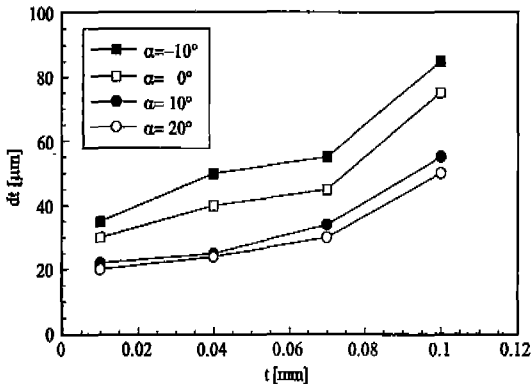


Fig. 5 The relation between the distance from the machined surface d_t and depth of cut t ($\epsilon=0.5$)

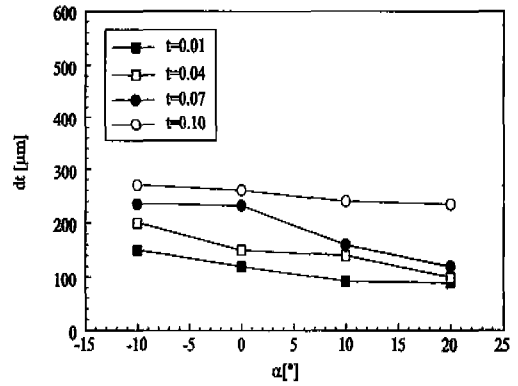


Fig. 8 The relation between the distance from the machined surface d_t and rake angle α ($\epsilon=0.12$)

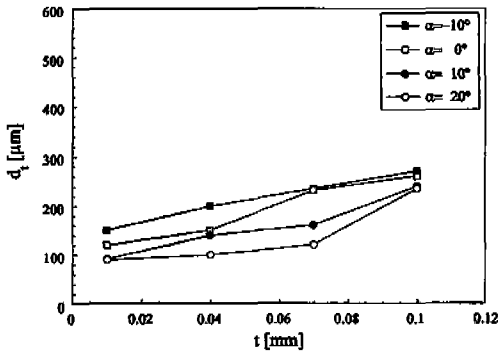


Fig. 6 The relation between the distance from the machined surface d_t and depth of cut t ($\epsilon=0.12$)

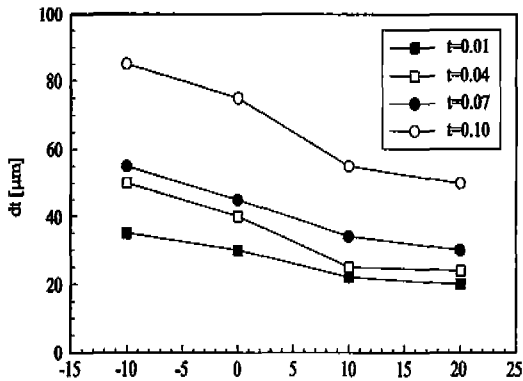


Fig. 7 The relation between the distance from the machined surface d_t and rake angle α ($\epsilon=0.5$)

금속조직으로서 소성변형된 구역을 잘 볼 수 있다. Fig.9의 (a)와(d)는 소성스트레인 0.5부근의 미세한 재결정입자들이 성장한 것을 보여주고 있다. 또한 절삭팁 부근의 소성변형역은 절삭깊이가 큰 0.07mm의 경우 ((d),(e),(f))가 0.01mm의 경우((a),(b),(c))보다 더욱

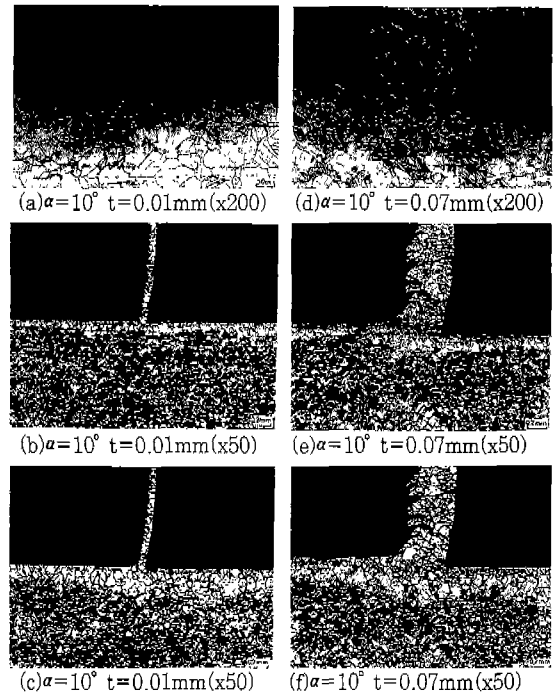


Fig. 9 Recrystallized microstructures around the quick stop cut tip showing plastic zone with $\epsilon \geq 0.5$ ((a),(d)), with $\epsilon \geq 0.12$ ((b),(e)) with $\epsilon \geq 0.02$ ((c),(f))rake angle = 10° . (a)-(c) $t=0.01$ mm, (d)-(f) $t=0.07$ mm

크음을 알 수 있다. 특히 열처리 조건 B (Fig.9(e))로 열처리한 경우의 제1변형역(primary deformation zone)의 재결정된 입자의 크기는 주위의 입자보다 매우 작았으며 이것은 제1변형역이 심하게 변형되었음을 입증하고 있고, 아울러 재결정법으로 소성변형역을 가시화 하고 측정할 수 있음을 알 수 있다. Fig.9의 결과들로부터 절삭립 주변의 소성스트레인의 분포를 파악할 수 있다.

Fig.10은 경사각 10° 절삭깊이 0.01, 0.07mm 그리고 경사각 20°, 절삭깊이 0.01, 0.07mm일 때의 스트레인의 분포를 나타내고 있다. 2차원 절삭(through-cut)의 경우와 같이 $\epsilon \geq 0.5$ 의 높은 소성변형역이 절삭표면근처에 형성되어있으며, $\epsilon \geq 0.12$ 와 0.02의 경우에는 $\epsilon \geq 0.5$ 에 비하여 변형역의 깊이가 크음을 알 수 있다.

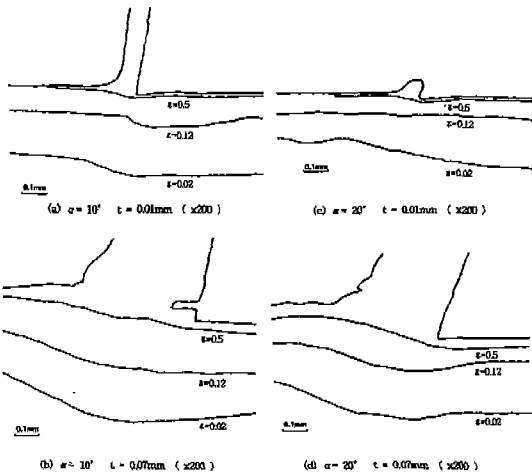


Fig. 10 Plastic strain distribution around the quick stop cut tip.
 (a) $\alpha=10^\circ, t=0.01\text{mm}$ (b) $\alpha=10^\circ, t=0.07\text{mm}$
 (c) $\alpha=20^\circ, t=0.01\text{mm}$ (d) $\alpha=20^\circ, t=0.07\text{mm}$

4. 결 론

1. 연속재결정법(subsequent recrystallizations technique)은 기계가공면의 소성변형역과 소성스트레인 분포를 평가하는데 성공적으로 응용될 수 있다.
2. 가공표면에 형성된 높은 스트레인은 $\epsilon \sim 0.5$ 까지는 수십 μm 이내에서 매우 급하게 감소하고 그 이후에는 완만하게 감소한다.
3. 소성변형역의 깊이는 절삭깊이가 증가함에 따라 그

리고 경사각이 감소함에 따라 증가한다.

4. 절삭립 주변의 소성변형상태 역시 연속재결정법에 의해 잘 관찰할 수 있다.

참고문헌

1. J. A. Bailey and S. Jeelani, *Wear*, 36 (1976), pp 196-206.
2. M. M. Elkhberry and J. A. Bailey, *Trans. ASME, J. Engng Mat. Tech.*, 106(1984), pp. 152-160.
3. D. M. Turkey, *J. Inst. Metals*, 96 (1968), pp. 2451.
4. F. Dupont, C. A. Brown and B. Ilchner, *Z. Metallkde*, 79 (1988), pp. 74-80.
5. Y. Iino, *Metal Sci.*, 10 (1976), pp. 159-164.
6. T. Shoji, *Metal Sci.*, 10 (1976), pp.165-171.
7. Y. Iino, *Metall. Trans. A*, 11A (1980), pp. 1939-1950.
8. T. Y. Kim, Y. Matsumoto, H. G. Shin and D. W. Wu, *Wear*, 147 (1991), pp. 311-322.
9. Y. Iino, *J. Mat. Sci. Lett.*, 11(1992), pp. 1253-1256.
10. Y. Iino, *Metall. Mat. Trans. A*, (in press).
11. Y. Iino, T. Y. Kim and S. H. Chung, *J. Mat. Sci. Lett.*, 12 (1993), pp.520-522.

부 록

연속재결정법

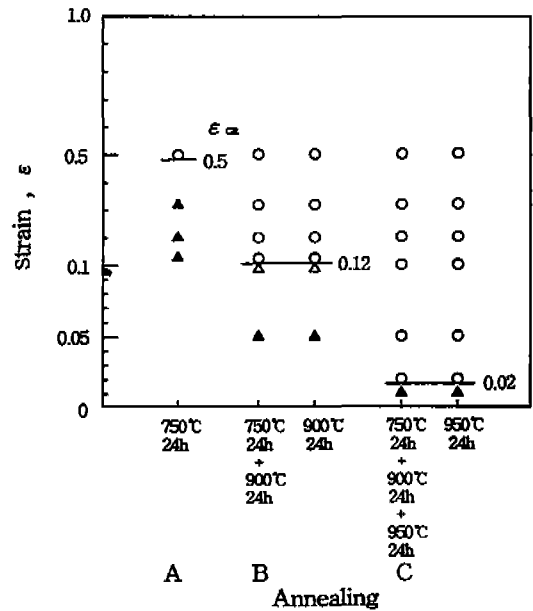
(Subsequent recrystallizations technique)⁽⁹⁾

이 방법은 금속학적으로 다양한 소성스트레인을 받은 소성구역을 관찰하고 측정하기 위해 개발된 방법으로서, 몇가지 열처리 온도에서 재결정이 일어나는 한계값 ϵ_{CR} 을 구할 수 있다. 열처리 시간이 일정한 경우 열처리 온도가 증가하면 ϵ_{CR} 은 감소한다. 이는 잘 가공된 인장시험편을 몇 종류로 소성 변형을 가하고 난 다음 열처리 하여 재결정이 발생 했는지 아닌지를 관찰 함으로서 결정할 수 있다.

본 연구에 사용된 SUS304의 경우 한계소성스트레인 값(ϵ_{CR})들은 App. Fig.1 과 같으며, 750°C×24 hr 열처리한 경우 (anneal A) ϵ_{CR} 은 0.5. 또한 같은 시험편으

로 연속해서 900°C×24hr 열처리를 추가로 한 경우 (anneal B)의 ϵ_{CR} 은 0.12, 950°C×24hr 연속 열처리 한 경우(anneal C)의 ϵ_{CR} 은 0.02임을 보여주고 있다. 그림에서 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 (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 anneal B와 anneal C의 경우 750°C×24hr 열처리는 생략 했다.

anneal B와 anneal C에서 소성 변형역을 가시화 하는데는 진공로 중에서 열부식(thermal etching)이 효과적임을 알 수 있었다. 재결정 구역과 미소 조직들은 화학 용액 부식을 하지 않고 열처리한 후 직접 관찰 할 수 있었 으며 anneal A 즉 750°C의 경우는 열 부식의 상태가 나 빠 부식액을 사용 하여 조직을 관찰하였다.



App. Fig.1 Critical strain for recrystallization, ϵ_{CR} , versus recrystallization conditions: (▲)no recrystallization, (△) 50% recrystallization and (○) full recrystallization(9).