

극저탄소강판의 자성에 미치는 변형소둔 결정립도의 영향

安聖權 · 鄭元燮 · 朴正雄*†
부산대학교 공과대학 금속공학과
*공주대학교 공과대학 신소재공학부

Effects of Strain Annealing Grain Size on the Magnetic Properties of Extra-Low Carbon Steel

S. K. An, W. S. Jeong, J. U. Park*†

Dept. of Metallurgical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*Div. of Advanced Materials Engineering, Kongju National University, College of Engineering, Cheonan 330-717, Korea

Abstract The effects of the grain size on the magnetic properties in extra-low carbon steel after strain annealing were investigated. Two kinds of sample were prepared. One is the annealed sheet, which was annealed at 670°C and 850°C for various time periods after cold rolling. The other is the strain annealed sheet, which was temper rolled by 0.4% and subsequently strain annealed at the temperature ranging between 670°C and 850°C for various time periods. The grains after strain annealing became more coarse than those after primary annealing. The grains were coarsened due to the strain induced grain boundary migration (SIGM). It was found that the permeability tended to be increased and coercivity tended to be decreased with the increase of grain size. The optimum magnetic properties was achieved after strain annealing at 850°C for 30 minutes. Under this condition, the coercivity was measured to be 0.6 and the permeability was measured up to be 13000.

(Received July 8, 2006; accepted July 15, 2006)

Key words: Permeability, Coercivity, Texture, Strain annealing, Grain coarsening, Strain induced grain boundary migration (SIGM).

1. 서 론

칼라 텔레비전이나 컴퓨터 모니터의 브라운관 등에 쓰이는 이너실드(inner shield)는, 자기적 성질을 좋게 하기 위해 결정립 크기를 조대화시켜 제조한다. 그림 1에 나타난 것과 같이 이너실드는 브라운 관 내부에 장치되어, 음극관에서 발생한 전자선이 지자계를 포함한 외부자계의 영향을 차폐시킴으로써 브라운관 내부에 전자빔의 진로 변화를 최소화하고 자계 영향에 의해 색순도가 나빠지는 것을 방지하는 기능을 한다. 그러므로, 이너실드는 우수한 자기차폐능(magnetic shielding)을 가져야 한다. 이를 만족하기 위해, 이너실드에 사용하는 소재는 불순물을 극소화시켜 석출물 분율을 낮춰야 하며, 결정립을 조대화시켜야 한다. 자기 차폐능은 투자율(permeability)이

높을수록 좋아지는데, 결정립 크기가 균일한 경우에, 결정립 크기가 클수록 투자율이 높아지기 때문이다 [1-2].

일반적으로 결정립의 크기가 커짐에 따라 지구벽(magnetic domain well)의 이동을 방해하는 입계면적의 감소로 자기 도메인(domain)이 잘 성장하기 때문에 자화손실(hysteresis loss)과 보자력 값이 낮아지고 자기특성이 좋아지는 것으로 알려져 있다[3-4].

일차재결정으로 성장시킬 수 있는 결정립의 크기는 실용적으로 한계가 있기 때문에, 이 방법으로는 우수한 자기 차폐능을 갖는 냉연강판을 제조하기는 곤란하다. 일차재결정으로 결정립을 성장시킬 수 있는 한계를 극복하기 위한 방법 중 하나가 변형소둔법(strain annealing)이다[5]. 이 방법은 재료에 변형을 적게 가한 후 고온에서 어닐링을 하는 것이다.

†E-mail : park@kongju.ac.kr

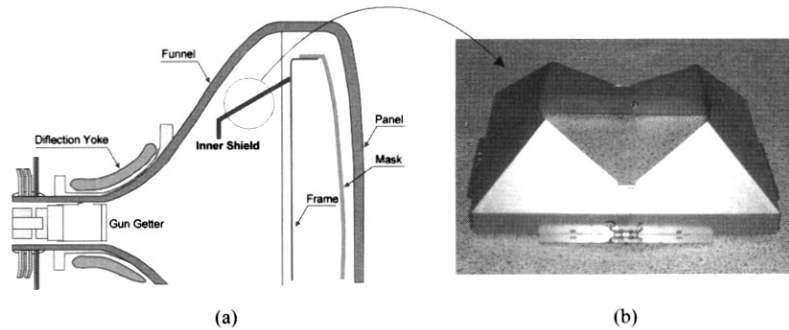


Fig. 1. (a) Schematic diagram of braun tube structure and (b) Figure of inner shield.

변형소둔 후 결정립은 새로운 핵생성 없이 성장한다[6]. 이때 결정립 성장의 구동력은 결정립 성장으로 인한 결정립계 감소로 인한 전체 에너지 감소가 아니라, 인접 결정립 간의 변형에너지 차이이다. 에너지가 적게 축적된 결정립이 거대하게 성장하여 전체 계(system)의 에너지를 낮추게 되는 것이다.

변형소둔법은 기존 생산 공정에 새로운 장치의 설치 없이 비교적 간단한 작업만으로 결정립을 성장시킬 수 있는 경제적인 방법이다. 냉연 판재 생산 공정에서 조절압연은 그 특성상 낮은 변형률로 작업을 하며 압하율을 적절히 조절한다. 이 과정을 거친 후 고온에서 어닐링을 시행하면 일차재결정 때보다 결정립을 더 크게 성장시킬 수 있다.

지금까지의 자성강판에 관한 연구는 대부분 저탄소강[6], 규소강[7] 등을 소재로 연구가 진행되어 왔으며, 특히, 극저탄소강[8-9]을 소재로 한 연구결과는 극히 제한적이었다.

따라서, 본 연구에서는 재결정 및 변형소둔이 극저탄소강의 자기적 성질에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 이를 위해 일차 어닐링 및 변형소둔시 어닐링 온도와 시간을 변화시켜 결정립 크기에 따른 자기적 성질의 변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 일차 어닐링

본 연구에서 사용한 소재는 불순물이 최소화된 극

저탄소강으로써 조성은 표 1과 같다. 상업생산 설비인 가역식 4단 냉간압연기를 이용하여 윤활조건에서 최종두께인 0.18 mm(= 91%)까지 냉간압연하였다. 일차 어닐링은 25%H₂ + 75%N₂ 분위기로 670°C, 750°C, 850°C에서 각각 10분에서 660분까지 시간을 변화시켜가며 어닐링을 실시하였다.

2.2 이차 어닐링

극저탄소강을 최종두께 0.15 mm(= 92.5%)까지 6 패스에 걸쳐 냉간압연한 후 비연속(Batch) 소둔 설비를 이용하여 앞서 기술한 열처리 분위기로 670°C에서 7시간 동안 어닐링하여 완전히 재결정시켰다. 이후 직경 480 mm인 실제 생산설비인 조절압연기를 사용하여 0.4%의 압하율로 조절압연한 후 온도 650°C에서 850°C까지 변화시키고 또한 각 온도에서 어닐링 시간을 변화시켜 이차 어닐링(이하, 변형소둔)을 실시하였다.

2.3 자성측정 및 집합조직 조사

어닐링이 끝난 시편에 대하여 미세조직, 자성, 및 집합조직을 분석하였다. 미세조직은 시편의 측면방향(TD: transverse direction)을 연마한 후 관찰하였으며, 이때 영상분석기(image analyzer)를 이용하여 어닐링 온도 및 시간 변화에 따른 재결정립의 평균 결정립도(이하, 결정립도)를 측정하였다.

자성은 단판 자성측정기(single strip tester: electronics사)를 이용하여 자계를 400e로 인가하여 보자

Table 1. Chemical Compositions of IF Steel Sheet

Element	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Ti	Nb	Fe
wt%	0.0005	0.0052	0.1028	0.015	0.007	0.007	0.027	0.0009	0.0011	Bal.

력(H_c)과 최대투사율(μ_{max})을 측정하였다. 시편을 압연방향으로 길이 300 mm×폭 25 mm×두께 0.15 mm의 크기로 절단하고 표면을 세척한 후 측정하였다. 각 3회 측정 후 평균하여 각 시편의 자성 데이터로 사용하였다.

또한 X-ray diffractometer를 이용하여 조대립 발생에 따른 판재의 집합조직의 변화를 관찰하였다. X-ray 측정은 Cu target을 이용하여 반사법(reflection method, $\theta = 10^\circ - 80^\circ$)으로 하였다.

실기 조절압연기에서 무윤활 압연한 판재의 두께 방향에 따른 마찰계수의 유효변형률 변화를 계산하기 위하여 유한요소법을 이용하였으며, 두께 0.15 mm의 소재를 0.2와 0.3%의 압하율로 무윤활 조절압연하는 과정을 해석하였다.

변형소둔 후 성장한 결정립과 기존 기지의 방위관계를 EBSD[10]를 사용하여 측정하였다. 670°C에서 10분, 660분 동안 열처리한 시편의 측면부(판재 압연방향-판재 수직방향; RD-ND)를 측정하였고, 조대

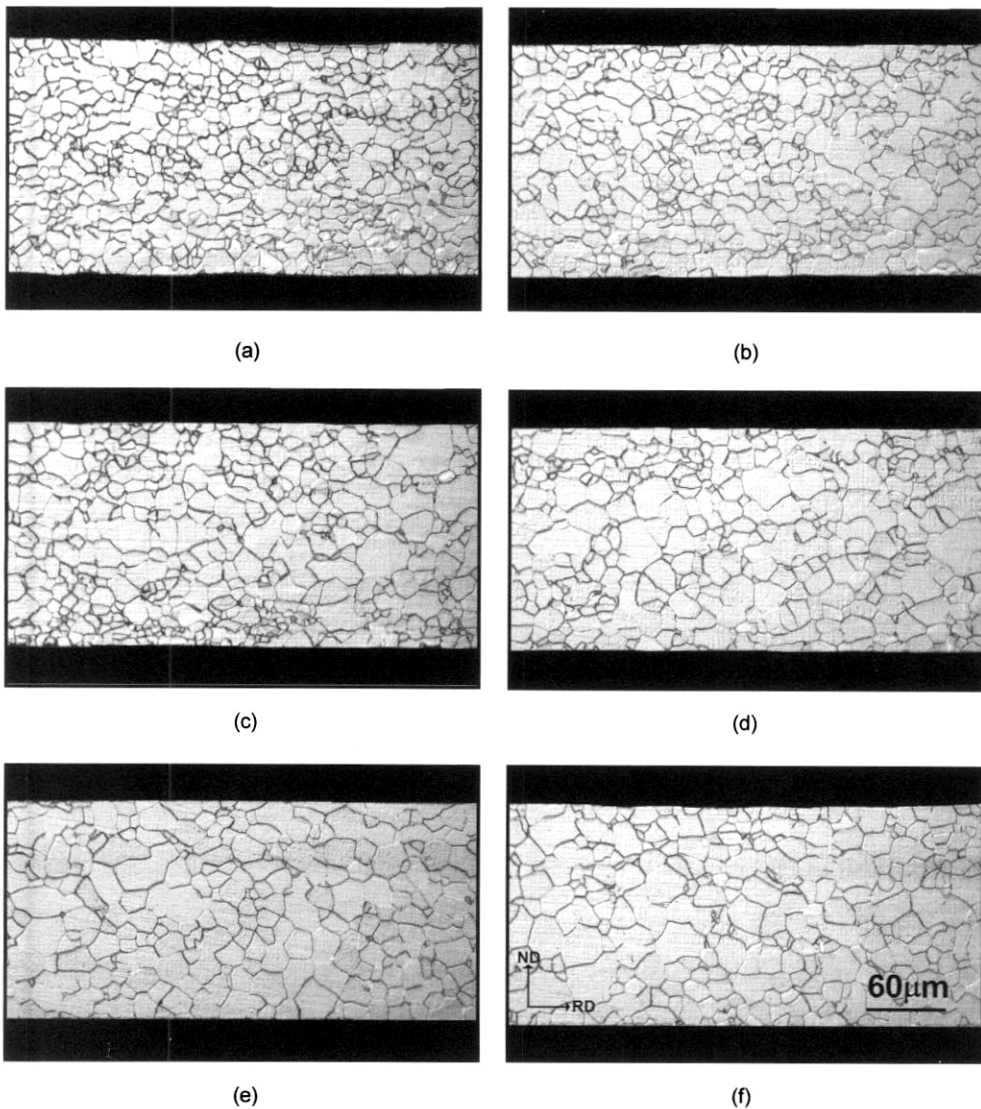


Fig. 2. Microstructures of 90% cold rolled IF steel sheets after annealing at 670°C for 30 min and (b) 660 min, at 750°C for (c) 30 min and (d) 660 min, at 850°C for (e) 30 min and (f) 660 min.

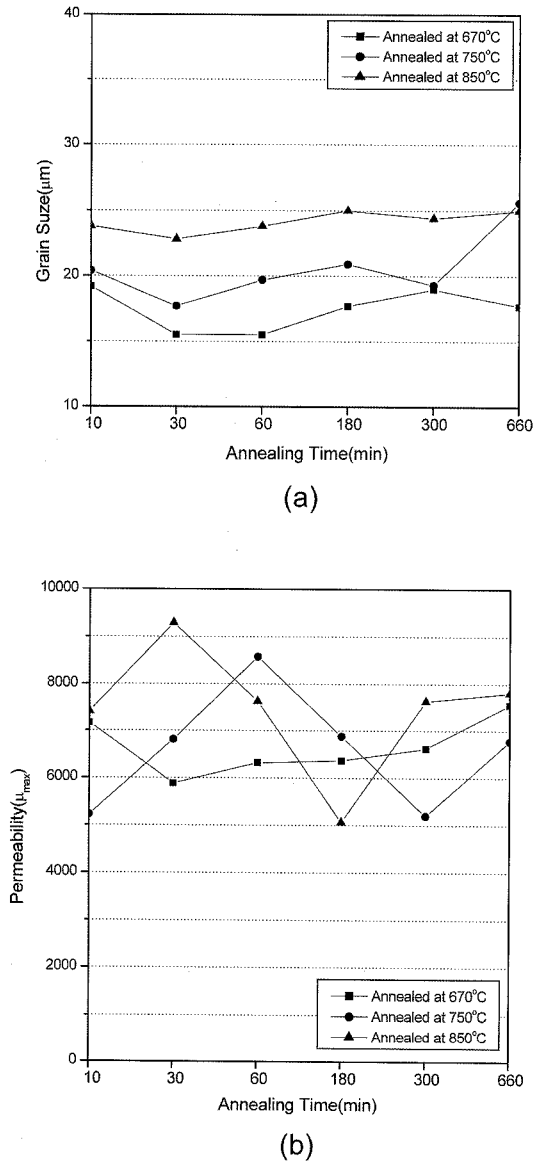


Fig. 3. Changes of grain size and maximum permeability as function of annealing time and temperature.

한 결정립이 있는 경우 통계적으로 충분한 데이터를 얻기 위해 여러 부분 측정한 후 각 데이터를 합하였다.

3. 실험 결과

그림 2은 90%의 압하율로 두께 0.18 mm로 냉간 압연하고 난 후 25%H₂ + 75%N₂ 분위기로 670°C, 750°C, 850°C에서 각각 10분, 660분 동안 어닐링한

시편의 미세조직 변화를 나타내었다. 그림에서 온도가 증가할수록 전형적인 결정립성장 현상에 의해 결정립도가 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나, 이는 다음에 기술한 변형소둔재에 비해 결정립 성장은 미약하였다.

그림 3에는 일차 어닐링 온도에 따른 결정립도와 자기적 물성 변화를 나타내었다. 그림에서 어닐링 온도의 증가에 따라 670°C에서 평균 결정립 크기는 17.8 μm이었고, 750°C에서는 20.1 μm, 그리고 850°C에서는 24.1 μm로 결정립도는 계속 증가하는 반면 보자력은 감소하였고 투자율은 증가하였다. 이러한 경향은 850°C로 어닐링 온도를 증가시키면 더 두드러졌다. 최적의 자기적 물성은 850°C에서 30분 동안 일차재결정 시켜 평균 결정립도가 24 μm까지 성장한 시편으로, 이때 보자력은 1.0, 최대투자율은 9000을 나타내었다. 이는 다음에 설명할 결정립 크기와 균일한 분포에 관련이 있으며 결정립이 균일한 크기로 분포하고 클수록 보자력이 작아지고 투자율이 커지기 때문이다.

그림 4에는 자성 변화와 결정립 성장과의 관련성을 파악하기 위해서 850°C에서 시간의 변화에 따른 집합조직의 변화를 살펴본 결과이다. 조대립의 발생이 전혀 없었던 시편으로, 일반적으로 냉연강판에서 냉간압연 후 일차재결정에 의해 얻어지는 집합조직 [11-13]인 α선 방위와 γ선의 방위가 강하게 발달된 집합조직임을 알 수 있다. α선 상에서는 {111} <110> 방위가 주방위로 발달하고, γ선에서는 {111} <112>가 주방위로 발달함을 알 수 있다.

일차 어닐링한 시편에서 어닐링 온도가 증가할수록 보자력이 감소하고 투자율이 증가했음에도 불구하고 집합조직의 방위변화가 없었다는 것은 일차 어닐링에서는 비정상 결정립 성장과 같은 조대립의 발생이 일어나지 않았다는 것을 알 수 있다.

670°C에서 5시간 동안 충분히 재결정시켜 결정립 크기가 19 μm인 시편을 실제 생산설비인 압연기를 사용하여 0.4% 압하율로 무윤활 조절압연을 실시한 후 변형소둔 조건에 따른 미세조직변화를 그림 5에 나타내었다. 변형소둔을 한 시편의 결정립 성장은 위의 일차 어닐링에 비해 더 두드러졌다. 또한, 670°C에서 10분 동안 어닐링한 시편의 경우에는, 판 표층부에서부터 이차재결정형성을 보였으며, 어닐링 온도

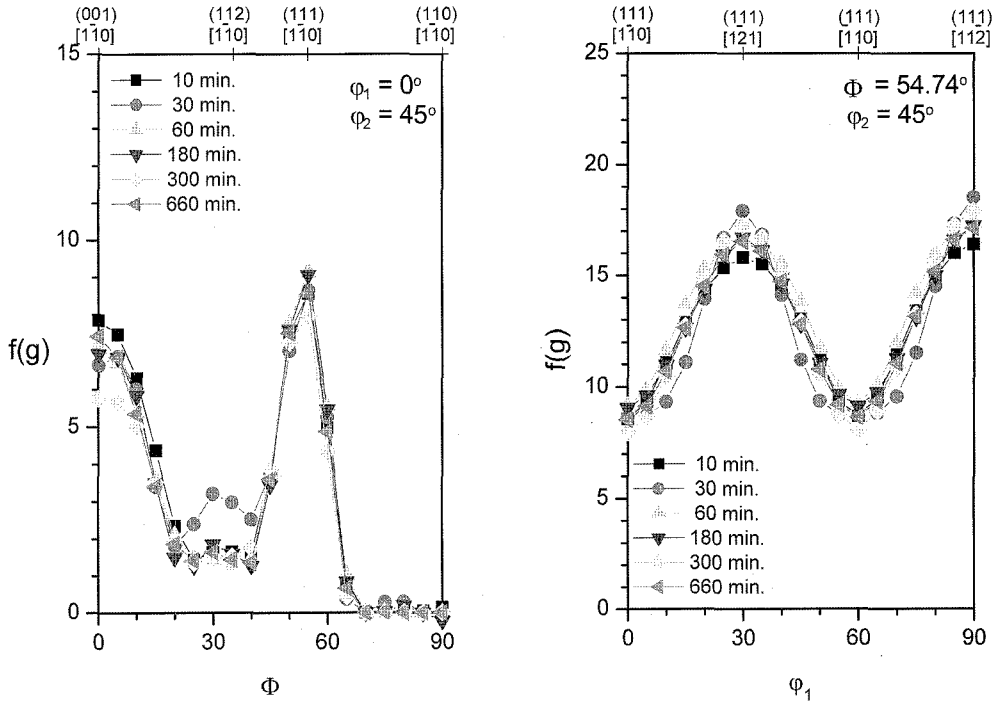


Fig. 4. Orientation densities along (a) α fiber and (b) γ fiber for 90% cold rolled IF steel sheets after annealing at 850°C for various time periods.

및 시간이 증가할수록 두께 중심부까지 조대립이 성장하는 것이 관찰되었다. 이는 일차 어닐링한 시편의 경우와 달리 비정상 결정립성장(abnormal grain growth)한 현상으로 이해된다.

또한, 어닐링 온도의 증가에 따라 조대립이 보다 용이하게 발생하는 이유는 동일한 결정립 성장의 구동력을 갖더라도 온도의 증가에 따라 확산속도가 빨라지기 때문에 결정립계의 이동이 용이하기 때문이다.

그림 6은 변형소둔중 이차재결정이 일어난 시편의 어닐링 온도에 따른 자성 변화와 결정립 성장과의 관련성을 나타내었다. 그림에서 변형소둔 온도와 시간의 증가에 따라, 조대립의 발생이 용이해 짐을 알 수 있다. 즉, 670°C에서 어닐링한 시편의 경우에는 29.6 μm , 750°C에서는 78.8 μm , 그리고 850°C에서는 108 μm 로 결정립의 크기가 증가하는 것을 알 수 있다. 이때, 자기적 물성은 결정립도의 증가에 따라 보자력은 감소하고 투자율은 증가하는 경향을 나타내었으며, 최적의 자기적 물성은 850°C에서 30분간 어닐링한 평균 결정립도가 83 μm 인 경우로 보자력은 0.6까지 낮아졌고, 투자율은 최대 13000까지

높아졌다.

따라서, 본 실험결과 극저탄소강판에 있어서 일차 어닐링한 것보다 더 우수한 자기적 성질을 얻을 수 있는 가장 효과적인 방법은 변형소둔법이며, 또한 이 공정 제어를 통해 조대한 적정 결정립도를 얻는 것이라 생각된다.

그림 7은 670°C와 850°C에서 각각 시간의 변화에 따른 변형소둔한 시편의 집합조직 측정 결과 α 선 방위와 γ 선 방위를 나타내었다. α 선 상에서는 $\{111\}\langle 110\rangle$ 방위가 주방위로 발달하고, γ 선 상에서는 $\{111\}\langle 112\rangle$ 가 주방위로 발달하였다. 이는 그림 4에 나타난 일차 어닐링한 집합조직의 발달 양상과 차이가 없는 것이다. 다만 어닐링 온도가 850°C로 증가할수록 α 선 방위와 γ 선 방위 밀도가 감소하고 있다. 이와 같이 변형소둔 온도가 증가할수록 조대립이 일어났으며, 보자력이 감소하고 투자율이 증가했음에도 불구하고 집합조직은 큰 변화를 보이지 않은 것은 변형소둔시 새로운 재결정립의 핵생성 없이 결정립 성장만이 일어나기 때문인 것으로 해석된다. 조질압연의 압하량이 새로운 재결정립이 발생할

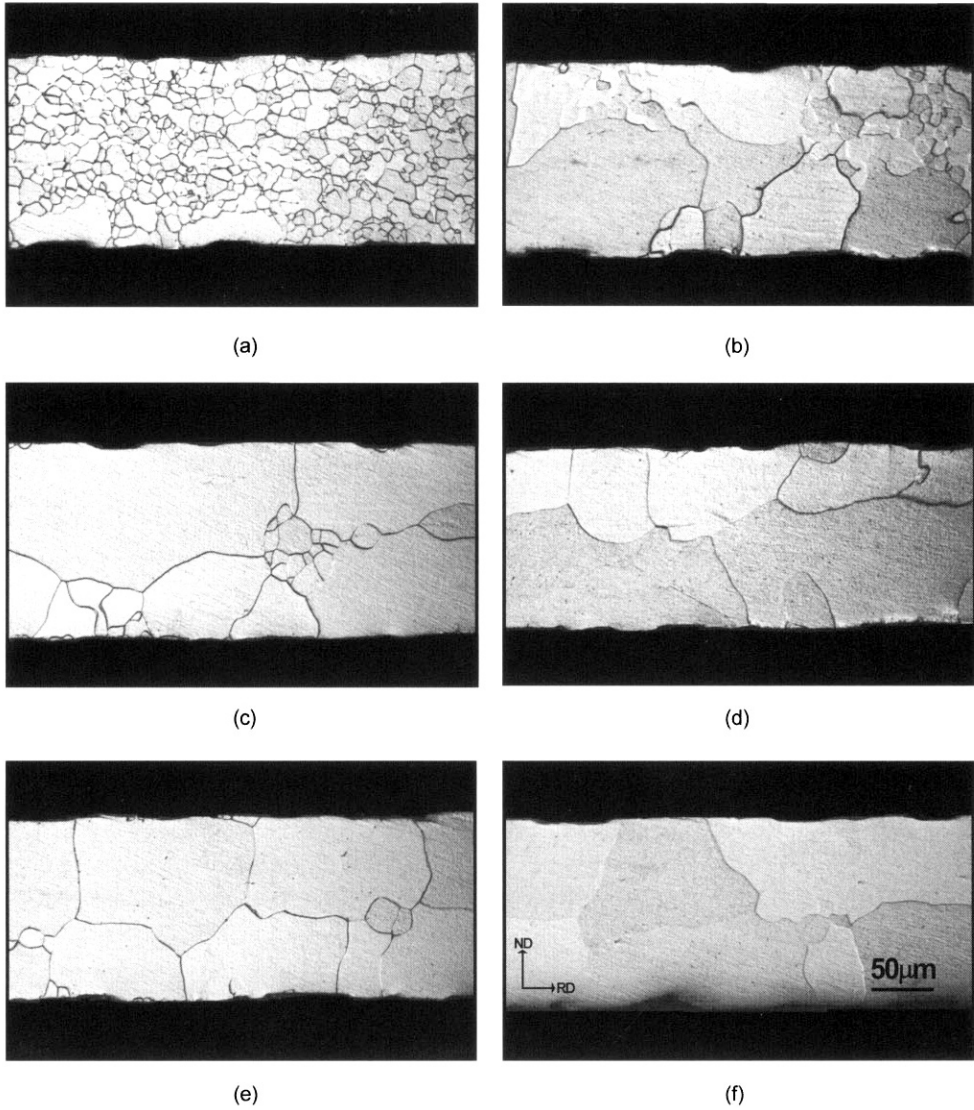


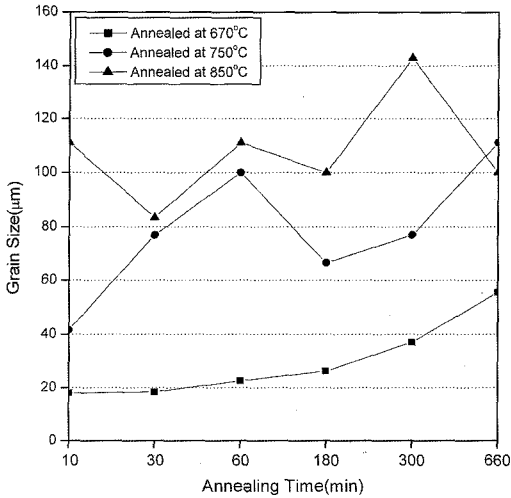
Fig. 5. Microstructures of 0.4% temper rolled IF steel sheets after strain annealing at 670°C for (a) 10 min and (b) 660 min, at 750°C for (c) 10 min and (d) 660 min, at 850°C for (e) 10 min and (f) 660 min.

만큼 변형을 주지 못했다. 그리고, 집합조직에서 알 수 있듯이 어떤 특정 결정립의 선택적인 성장에 의하여 뚜렷이 다른 집합조직을 갖는 것이 아니라 기존의 섬유 집합조직을 유지하기 때문이다. 또한 변형소둔 온도가 증가할수록 집합조직의 강도가 약해진다는 것은 조대립의 성장시 특정 결정립의 우선성장은 없었다는 것을 의미한다. 또한, 변형소둔 후 조대화된 결정립 방위는 일차 어닐링한 결정립 방위와 특정한 방위관계를 나타내고 있지 않다.

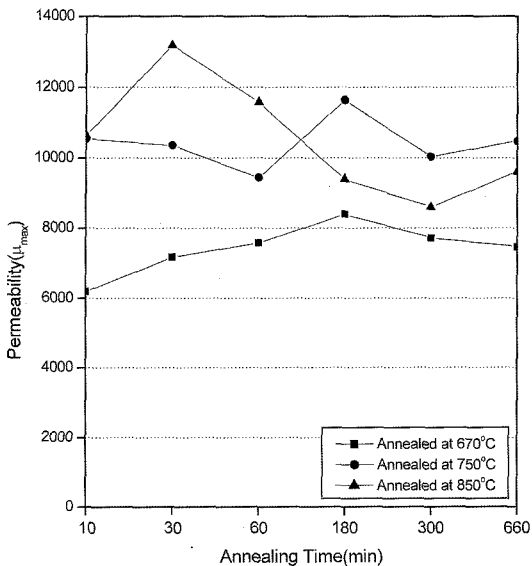
4. 고 찰

4.1 변형소둔에 의한 이차재결정 성장

본 시험결과에서 관찰되는 조대립은 변형소둔에 의해 생성된 것으로서, 조절압연시 가해진 변형 에너지가 표면에 존재하는 결정립간에 불균일하게 분포하기 때문에 그 변형 에너지의 차이를 구동력으로 하여 재결정이 일어나는 변형유기 결정립 성장(strain induced grain boundary migration)현상으로 이해된



(a)



(b)

Fig. 6. Changes of grain size and maximum permeability as function of strain annealing time and temperature.

다. 또한, 압하율이 낮은 조건에서 주로 표층부에서만 관찰되는 이유는 통상적인 압연공정에서 롤과 소재 사이의 마찰에 의해 부가적 전단변형이 발생되며 그 분포는 주로 판 표층부에 집중되기 때문이다[14]. 특히 조절압연의 경우에는 압연시 무유효 압연을 실시하기 때문에 통상의 유효 압연을 행하는 냉연강판에 비해 마찰계수가 크고[15], 두께방향의 불균일 변형정도도 이에 따라 증가할 것으로 예상된다. 따라서 일

정 압하율로 압연을 행하더라도 표층부에서의 유효변형률은 내부에 비해 높게 되고 이에 따라 표층부에서 결정립 성장이 보다 용이하게 일어난다고 생각된다.

그림 8은 유한요소해석을 통해 0.4% 압연한 판재의 유효변형률의 변화를 계산한 그림이다. 마찰계수는 각각 0.2와 0.3인 경우를 계산하였고, 이는 조절압연시 유효를 하지 않는 조건과 대응한다. 그림에서 볼 수 있듯이 마찰계수와 관련없이 표면의 유효변형률이 더 높음을 알 수 있다. 이 유효변형률이 더 높다는 것은 잉여일(redundant work)의 집중이 더 있다는 것과 같다. 실제로 2% 미만의 압연을 하는 조절압연 공정에서는 내부에는 거의 변형을 받지 않고, 표면에만 변형에너지가 집중된다고 해도 무리는 없다. 내부는 어닐링 후 완전히 재결정되어 축적된 변형에너지가 거의 다 없어졌다고 볼 수 있으나, 표면부는 조절압연에 의해 새로운 변형에너지가 추가되어 있는 상황으로 볼 수 있다. 이 변형에너지가 가해지는 정도는 존재하는 결정립의 방위에 따라 달라지게 된다.

본문에 기술한 바와 같이 에너지가 적게 존재하는 결정립이 성장하여 전체 시편에 존재하는 에너지를 낮추는 방향으로 재결정이 아닌 비정상 결정립 성장이 일어나는 것이다[6].

그림 9에 670°C에서 10분간 변형소둔한 시편의 EBSD(Electron Back Scattered Diffraction) 결과를 나타냈다. 그림은 측정된 시편의 측면부 결정립 형상에 판면방향(normal direction)의 방위를 투영한 결과이다. 판재 표면에서 각각 $\{15\ 51\ 5\} \langle 5\ 1\ 22 \rangle$, $\{5\ 6\ 6\} \langle 13\ 5\ 6 \rangle$ 의 방위가 판 표층부에서부터 성장한 것을 알 수 있었다. 그림 9에 표시한 660분 변형소둔한 경우도 이와 유사한 경향을 보였고, $\{5\ 5\ 7\} \langle 16\ 21\ 5 \rangle$, $\{2\ 2\ 1\} \langle 33\ 5\ 56 \rangle$, $\{1\ 1\ 1\} \langle 1\ 2\ 1 \rangle$, $\{6\ 5\ 5\} \langle 6\ 15\ 5 \rangle$ 방위의 결정립이 가장 크게 성장한 것을 관찰하였다.

위의 측정된 방위들은 성장하는 모든 방위들의 대표적인 방위는 아니다. 이들 방위 이외에도 다양한 방위들이 존재하지만, 이 방위들과 주위의 결정립 간 특별한 방위관계를 보이진 않는다. 기존의 일차재결정에서는 변형기지의 주방위인 $\langle 110 \rangle$ 의 결정립이 빨리 성장한다고 하나[16], 본 실험결과는 이와 같은 특정한 방위관계를 보이지

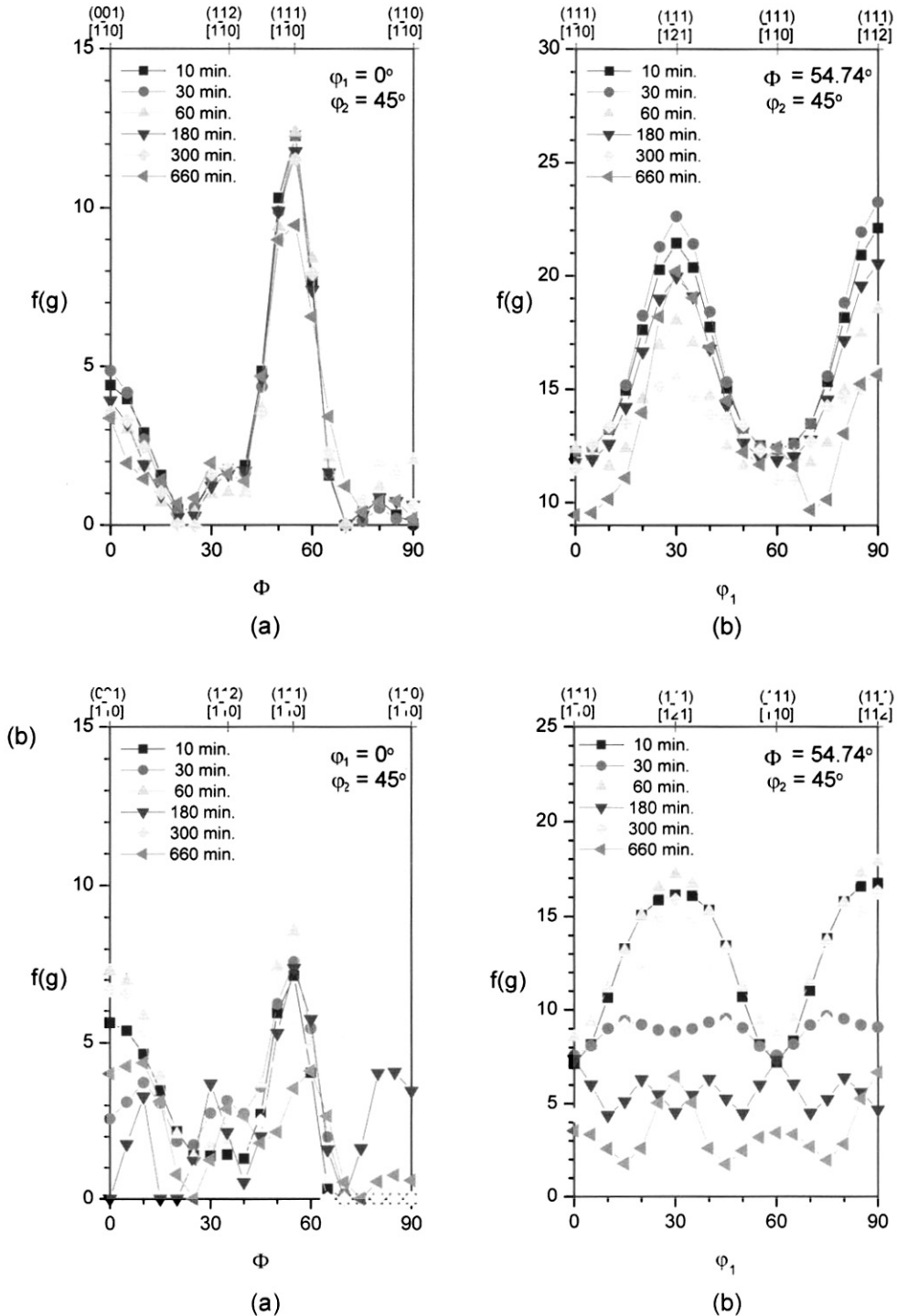


Fig. 7. (a) Orientation densities along (a) α fiber and (b) γ fiber for 0.4% temper rolled IF steel sheets after strain annealing at 670°C for various time periods.
 (b) Orientation densities along (a) α fiber and (b) γ fiber for 0.4% temper rolled IF steel sheets after strain annealing at 850°C for various time periods.

않았다. 일차재결정에 의해 얻어지는 집합조직인 γ 선이라고 정의하는 ND(압연면 방향)//<111>와 성장하

는 결정립 방위와는 연관성이 없음을 알 수 있었다.

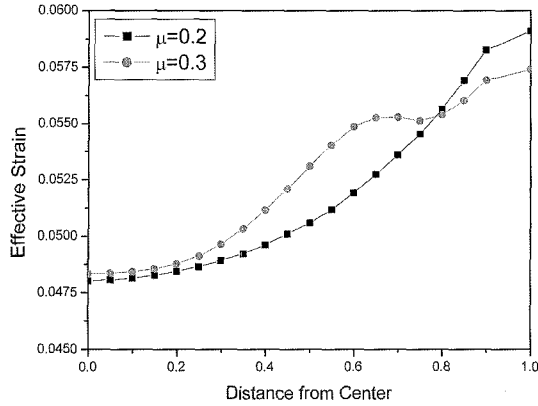


Fig. 8. Variation of the effective strain though thickness direction with friction coefficient of 0.2 and 0.3.

4.2 결정립크기와 투자율과의 상관관계

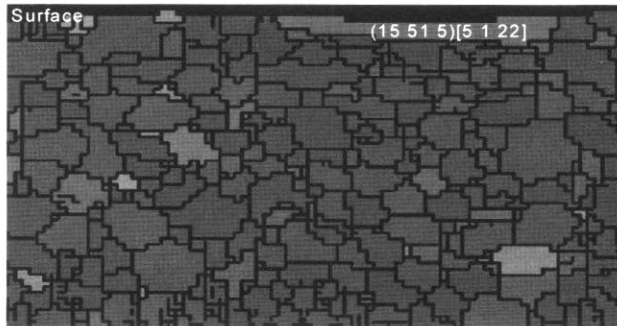
자속의 재료내부 통과 정도를 나타내는 투자율은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$\mu = \frac{B}{H}$$

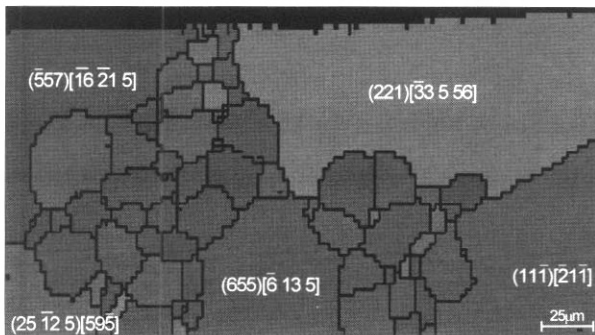
여기서 $B = H + 4\pi M$ 이므로 위의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$B/H = 1 + 4\pi(M/H), \mu = 1 + 4\pi\kappa \quad (1)$$

여기서, B: 자속밀도(magnetic flux density), H: 자장(magnetic field), M: 자화강도(magnetization intensity), κ : 질량 자화율(mass susceptibility), μ : 투자율(permeability)를 나타낸다. 외부에서 전류를



(a)



(b)

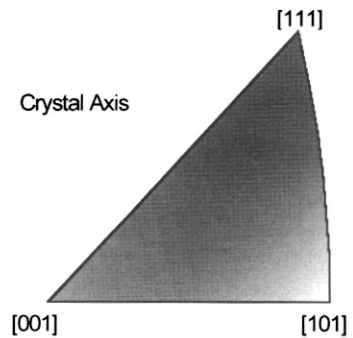


Fig. 9. EBSD map showing growing grains in IF steel sheet after strain annealing at 670°C for (a) 10 min and (b) 660 min.

가하면 재료의 성질에 따라 $4\pi M$ 만큼 유도자기가 생성된다. Fe, Co, Ni 등과 같은 강자성 재료는 $4\pi M$ 이(+)로 되어 $H < B$ 되고, $4\pi k$ 가 증가되기 때문에 고투자율을 얻을 수 있다[16].

식 (1)에는 결정립도에 관한 항이 직접적으로 표시되어 있지는 않다. 그렇지만 일반적으로 자구(magnetic domain) 이론에 의하면 외부 자장(H)의 힘에 의해 이동하는 자구벽(magnetic domain wall)은 결정립도가 커짐에 따라 자구벽의 이동을 방해하는 입계면적이 줄어들어 자회손실(hysteresis loss)이 감소하여 투자율(μ)의 값이 증가하는 반면, 너무 커지게 되면 자구의 이동과 회전에 의해 발생하는 미세와전류(micro eddy current)가 오히려 증가하여 자기특성 즉, 투자율에 나쁜 영향을 미치므로 적정 결정립도가 존재한다고 알려져 있다[3-4]. 실제로 우수수등은[17] 본 실험에 사용된 소재와는 다른 소재인 무방향성 규소강판을 사용하여 철손을 최소화시키는 적정 결정립도는 약 $85 \mu m$ 라고 보고한 적이 있다.

이제까지 미세조직과 방위분포함수에서 잘 나타난 변형소둔한 시편의 경우에는 고온어닐링중에 이차재결정하기 때문에 결정립이 크고, 균일한 미세조직을 이루었으며, 그 결과 $850^\circ C$ 에서 30분간 어닐링한 시편의 경우 평균 결정립도는 $83 \mu m$ 으로, 보자력은 0.6 이하이었고, 최대투자율은 13000의 우수한 자기적 성질을 확보한 반면, 일차 어닐링한 시편의 경우에는 결정립이 작은 크기로 일차재결정한 결과, 보자력은 1.0, 최대투자율은 9000으로써 변형소둔한 시편의 자기적 성질보다 열위하였다.

변형소둔은 고온어닐링공정에서 재결정된 결정립들을 적정 크기로 성장시켜 투자율을 증가시키는 공정으로 적정 결정립도가 존재한다. 본 실험에서의 적정 결정립도는 $83 \mu m$ 였다. 이 경우 $100 \mu m$ 이상의 결정립도를 갖는 시편과 비교해 집합조직도 큰 차이가 없었다. $100 \mu m$ 이상으로 결정립도가 증가하면 투자율이 낮아지는 것으로 보아 본 실험에 사용된 소재에 대해서는 적정 결정립도가 80-100 μm 사이임을 암시한다고 할 수 있다.

5. 결 론

극저탄소강의 최종 냉연판을 이용하여 재결정미세

조직을 만들고 변형소둔 공정에서 이러한 미세조직의 변화가 이차재결정 형성과 자성변화에 어떠한 영향을 주는지 연구한 결과, 다음을 알 수 있었다.

- (1) 변형소둔강판의 자기적 성질이 일차 어닐링재에 비해 더 우수하였는데 이는 주로 결정립도가 크고, 균일하게 발달되었기 때문으로 생각된다.
- (2) 변형소둔된 미세조직의 경우에는 고온어닐링중에 조대립의 이차재결정이 판 표층부에서 주로 관찰되다가 시간의 증가에 따라 판두께 중심부에서도 조대립이 발달하였다. 또한, 조대립의 발달에 따라 집합조직의 변화는 없었으며, 집합조직의 발달정도는 점차 약화되는 경향을 보였다.
- (3) 조대립의 발달은 결정립계의 특성 차이 보다는 결정에 축적된 에너지 차이에 의해 결정립이 성장하였다.
- (4) 조대립의 발달에 따라 보자력은 낮아지고, 최대 투자율은 높아지는 경향을 보였으며, 최적의 자성물성은 $850^\circ C$ 에서 30분간 변형소둔한 경우로써 평균 결정립도는 $83 \mu m$ 으로, 이때 보자력은 0.6 이하, 최대투자율은 13000으로 일차 어닐링한 시편보다 우수한 자기특성을 확보하였다.

참고문헌

1. S. Tsunematsu and Y. Yamanaka: Sumitomo Metal, **48** (1996) 45.
2. G. Kim, K. Kim, and O. Kwon: POSCO research report, 97P025 (1998).
3. R. R. Judd and Blazek: Energy Efficient Electrical Steel, Proc. TMS-AIME, A. R. Marder and E. T. Stephenson(Ed.) (1980) 147.
4. M. Shimanaka, Y. Ito, T. Irie, K. Matsumura, H. Nakamura and Y. Shono: Energy Efficient Electrical Steel, Proc. TMS-AIME, A. R. Marder and E. T. Stephenson(Ed.)(1980) 193.
5. C. R. Austin, L. A. Luini and R. W. Lindsay: Trans. ASM. **35** (1945) 446.
6. S. K. An, S. -H, Hong, J. -H, Choi and W. -S, Chung, J. Kor. Inst. Met. & Mater., **40**(8) (2002) 903.
7. H. Nakae and H. Yamamura: *J. JIM*, **32** (1968) 130.
8. G. Kim, K. Kim and O. Kwon: Inter. Symp. Modern LC and ULC Sheet Steels for Cold Forming: Processing and Properties, W. Bleck (ed.), RWTH Aachen, Aachen (1988) 479.
9. S. -H. Hong, S. K. An, J. H. Choi and D. N. Lee: Rex and GG, Aachen, G. Gottstein and D.A.

- Molodov (ed.), RWTH Aachen, Aachen (2001) 1101.
10. V. Randle: *Microtexture Determination and Its Application*, Inst. Mat., Bourne Press, Bournemouth, Great Britain (1992).
 11. W. B. Hutchinson: *Inter. Met. Rev.*, **29** (1984) 25.
 12. U. von Schlippenbach, F. Emren and K. Lucke: *Acta Metall.*, **34** (1986) 1289.
 13. C. S. Barrett: *Trans. AIME.*, **137** (1940) 128.
 14. T. Sakai, Y. Saito, K. Hirano and K. Kato: *Trans. ISIJ*, **28** (1988) 1028.
 15. W. L. Roberts: *Iron and Steel Engineer*, (1972) 56.
 16. K. Lucke and M. Holscher: *Texture and Microstruct.*, 14-18 (1991) 585.
 17. J. S. Woo, and C. S. Lee: *J. Kor. Inst. Metals*, **28**(2) (1990) 179.