

분말피복압연법에 의해 제조된 Al/Al₂O₃ 복합재료의 가공열처리후의 기계적 성질 및 집합조직

이성희 · 이충효
목포대학교 신소재공학과

Mechanical Properties and Texture after Thermomechanical Treatment of Al/Al₂O₃ Composite Fabricated by Powder-in Sheath Rolling Method

Seong-Hee Lee and Chung Hyo Lee

Department of Advanced Materials Science and Engineering, College of Engineering,
Mokpo National University, 61 Dorim-ri, Chunggye-myun, Muan-gun, Chonnam, South Korea

(Received 30 June 2003 ; Accepted form 15 July 2003)

Abstract The Al/Al₂O₃ composites fabricated by powder in sheath rolling method were cold-rolled by 50% reduction and annealed for 1.8 ks at various temperatures ranging from 200 to 500°C, for improvement of the mechanical properties. The mechanical properties and texture of the composites after rolling and annealing were investigated. The tensile strength of the composites increased significantly due to work hardening after cold rolling, however it decreased due to restoration after annealing. The strength of the composites was improved by thermomechanical treatment. On the other hand, the texture evolution with annealing temperatures was different between the unreinforced material and the composites. The unreinforced material showed a deformation (rolling) texture of which main component is {112}<111> at annealing temperatures up to 300°C. However, the composites have already exhibited a recrystallization texture of which main component is {001}<100> after annealing at 200°C. This proves that the critical temperature for recrystallization is lower in the composites than in the unreinforced ones.

Keywords : Powder-in sheath rolling, Al/Al₂O₃ composite, Thermomechanical treatment, Mechanical property, Texture

1. 서 론

알루미늄기 입자분산 복합재료는 경량의 이점이 있으므로, 자동차 및 항공기 등 여러 수송기기의 구조 재료로서 실용화 되고 있으며, 그 제조 방법에 대해 활발한 연구가 이루어지고 있다¹⁾. 그러나, 아직까지도 제조기술의 한계 또는 고비용의 제조단가로 인하여 그 이용범위가 극히 한정되어 있는 실정이다. 그러므로, 알루미늄기 복합재료의 보다 광범위한 실용화를 위해서는 저비용이며 신뢰성이 높은 새로운 제조 프로세스의 개발이 시급하다고 할 수 있다. 알루미늄기 복합재료는 용탕교반법(stir casting)²⁾, 가압주조법(pressurized casting)³⁾등과 같은 액상공정과 분말

야금법으로 대표되는 고상공정^{4,5)}에 의해 주로 제조된다. 액상공정은 제조 공정이 간단하므로 저비용의 이점이 있으나, 강화입자의 균일 분산과 그 양의 조절에 어려움이 있다. 한편, 분말 야금법은 강화입자의 양을 쉽게 제어할 수 있으며, 강화입자의 종류와 모양의 종류를 자유롭게 선택할 수 있는 장점이 있으나, 제조 공정이 복잡하므로 고비용의 단점이 있다. 분말야금법을 이용한 알루미늄 분말의 벌크(bulk)화에는 큰 가공량을 부여할 수 있는 열간 단조나 열간 압출과 같은 소성 가공법이 자주 이용된다⁶⁾. 그러나, 단조나 압출 가공은 batch 공정이며, 2차 가공을 필요로 하므로 생산성에 한계를 가지고 있다. 저자는 알루미늄 분말의 벌크화를 위한 간편한 방법으로 피

복압연법(sheath rolling method)을 제안하였다⁷⁾. 또한, 피복압연법을 Al/Al₂O₃ 복합재료의 제조에 적용하여 건전한 복합재료를 제조할 수 있음을 확인하였다^{8,9)}. 피복압연법은 연속 생산이 가능한 압연 공정만을 주로 이용하므로, 생산성 면에 있어서 다른 방법들에 비해 월등히 유리하다. 왜냐하면, 피복 재료로서 사용될 금속관은 롤성형(Roll forming)과 전기저항용접(electro-resistance welding)에 의하여 판상으로 부터 연속적으로 제조할 수 있으며, 금속관내로의 혼합분말의 충전 공정도 연속화가 가능하므로 기존의 압연설비에 추가적인 생산라인만 갖춘다면 일련의 공정을 연속적으로 수행할 수 있기 때문이다. 그러나, 피복압연법에 의해 제조한 복합재료는 기계적 성질 면에서 다른 공정에 의해 제조된 복합재료에 비해 우수하다고 할 수 없다. 그러므로, 본 연구에서는 피복압연법에 의해 제조된 알루미늄기 입자분산 복합재료의 기계적 성질을 향상시키기 위하여 가공열처리를 행하여, 가공열처리에 따른 기계적 성질과 집합조직의 변화를 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시편의 준비

본 실험에 사용된 Al/Al₂O₃ 입자분산 복합재료는 피복압연법에 의해 제조된 것이다. 모상(母相)은 평균 입경이 36 μm인 고순도 알루미늄 분말(순도: 99.9999%)을 사용하였고, 강화재료는 평균 입경 5 μm의 α-Al₂O₃ 입자를 사용하였다. Al 분말과 Al₂O₃ 입자의 혼합은 Al₂O₃의 체적 분율을 5~20%로 하여 볼 밀에 의해 행하였다. 피복압연은 혼합분말을 스테인리스 관에 봉입하여, 370°C에서 1시간 동안 전기로 내에서 탈가스 처리한 후, 전압하율 75%로 냉간 압연함으로써 행하였다. 그 후, 시편을 전기로 내에서 370°C, 1.8 ks 소결하여 건전한 복합재료를 제조하였다. 피복압연법에 의한 복합재료의 제조에 관한 상세한 사항은 이전 연구⁸⁾에 보고되어 있다. 피복압연법에 의하여 제조한 복합재료의 기계적 특성이 표 1에 나타나 있다.

2.2. 가공 열처리

복합재료의 가공 열처리의 도식적 그림을 그림 1에 나타내었다. 먼저, 피복압연법에 의해 제조한 Al/

Table 1. Mechanical properties of Al/Al₂O₃ composite fabricated by power-in sheath rolling method

Mechanical property	V _r (%)				
	0	5	10	15	20
UTS (MPa)	63	74	79	86	90
Elongation (%)	62	50	48	32	14

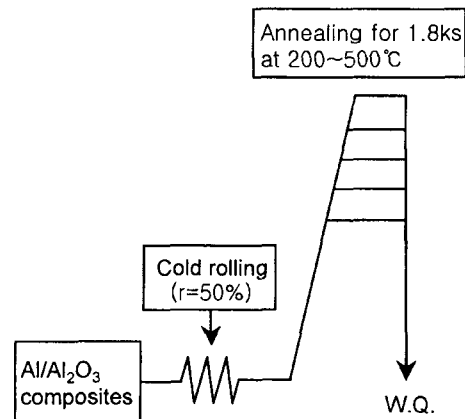


Fig. 1. Schematic illustration of experimental procedure.

Al₂O₃ 복합재료를 50%의 압하율로 냉간 압연하였다. 그 후, 200~500°C의 여러 온도에서 1.8 ks동안 전기로 내에서 어닐링한 후, 수냉하였다.

2.3. 시험 및 특성분석

기계적 성질은 상온에서의 인장시험으로 평가하였다. 인장시험을 위한 시편은 인장 방향이 압연 방향과 평행하도록 방전 가공기로 잘라서 준비하였다. 인장시험은 평행부의 길이가 15 mm, 폭이 6 mm, 두께가 1.7 mm의 인장 시편을 사용하여 Instron type의 인장 시험기를 사용하여 10⁻³ s⁻¹의 일정한 변형속도로 행하였다. 집합조직은 CuKα선 40 kV, 30 mA를 이용하여 Schultz의 반사법으로 측정하였으며, 무방향성 표준시료에 의하여 정규화하여 {111} 불완전 극점도(Pole figure)를 작성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 기계적 성질

그림 2는 냉간압연 및 어닐링에 따른 복합재료의 기계적 성질의 변화를 나타낸다. 냉간압연 후, 복합재료의 인장 강도(그림 2a)는 가공경화에 의해 크게

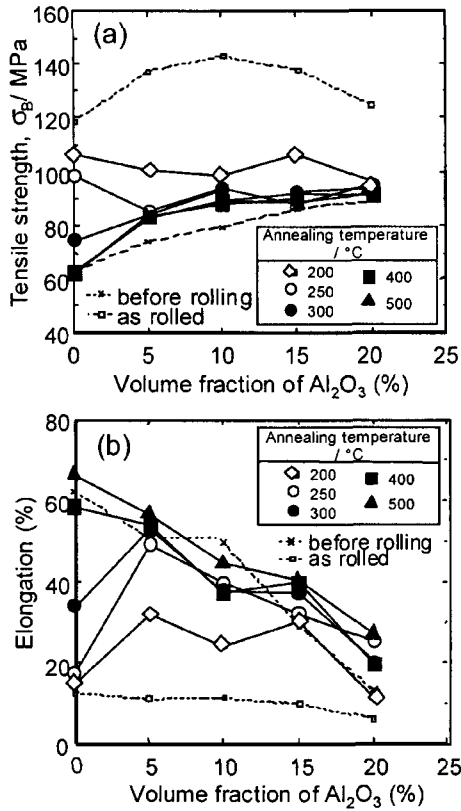


Fig. 2. Changes in tensile strength (a) and elongation (b) of the Al/Al₂O₃ composites with volume fraction of Al₂O₃ at various annealing temperatures.

증가한다. 또한, 인장강도는 10 vol.% Al₂O₃까지는 체적함량이 증가함에 따라 증가하지만, 그 이상에서는 오히려 감소하는 경향을 나타낸다. 낮은 체적함량에서의 인장강도의 증가는 압연에 의해 강화입자 부근에 도입된 여분의 가공경화로 인한 것으로 사료된다. 높은 체적함량에서 복합재료의 강도가 감소하는 것은 강화입자의 깨짐(cracking)과 모상과 강화입자 사이의 분리(debonding)현상이 많이 발생하기 때문이다. 그림 3은 Al+20 vol.%Al₂O₃ 복합재료에서 나타난 Al₂O₃의 깨짐(그림 3a)과 모상과 강화입자 사이의 분리(그림 3b)의 모습을 보여주는 SEM 사진이다. 사진에서 보여지듯이, 강화 입자들과 모상 사이의 분리는 강화입자가 군집체(clusters)를 이루고 있는 지역에서 주로 발생하며 잘 분산된 강화입자에서는 모상과의 결합상태가 비교적 양호함을 알 수 있다. 200°C에서 어닐링한 복합재료의 인장강도는 Al₂O₃의 체적함량이 증가함에 따라 다소 복잡한 변화를 보인

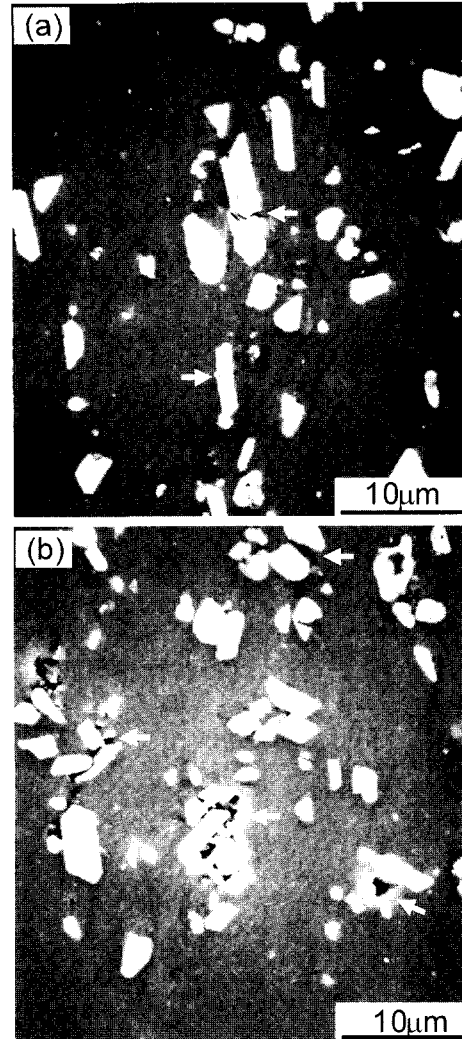


Fig. 3. SEM micrographs showing cracking of Al₂O₃ particles (a) and debonding between matrix and Al₂O₃ particles (b).

다. 즉, 체적함량이 10%까지는 강화입자의 첨가에도 불구하고 강도가 오히려 감소하다가 15%에서 증가한 후 20%에서는 다시 감소한다. Al₂O₃의 체적함량의 증가에 따른 이와 같은 강도의 변화는 피복압연에 의해 제조한 복합재료의 강도 변화와 매우 유사하다⁹⁾. 이처럼, 낮은 체적함량에서 강화입자의 첨가에도 불구하고 강도가 감소하는 것은 강화입자에 의한 강도의 증가보다 모상인 Al의 연화에 의한 강도 저하가 더 크기 때문이다. 다만, 피복압연 복합재료에 있어서는 소성변형으로 인한 온도 상승으로 모상인 Al에 회복과 재결정이 발생하여 강도가 저하되었

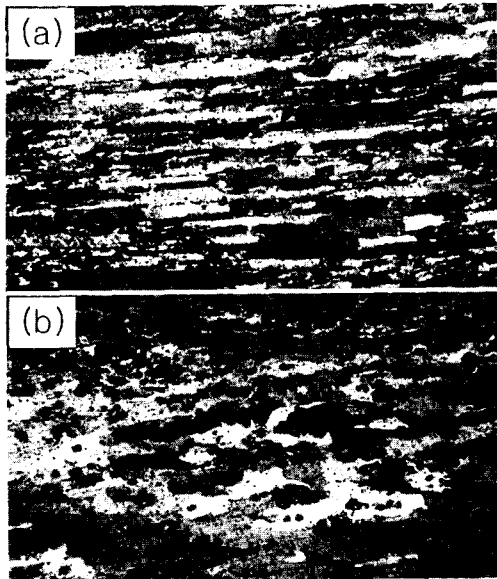


Fig. 4. Optical microstructures of unreinforced Al (a) and Al+10 vol.%Al₂O₃ composite (b) annealed for 1.8 ks at 200°C after cold rolling.

으나⁹⁾, 본 연구에서는 어닐링(가열)으로 인한 연화 현상에 의해 강도가 감소하였다. 250°C 어닐링의 경우, 인장강도는 Al₂O₃의 체적함량이 5%에서 감소하지만 그 이상에서는 체적함량의 증가에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 비강화 재료(Al₂O₃의 체적함량 : 0%)에서는 회복 및 부분 재결정으로 인하여 강도가 다소 감소하였으나, 복합재료의 경우는 완전 재결정이 발생하여 강도가 크게 저하되었음을 시사한다. 그림 4는 200°C에서 어닐링된 비강화 재료(그림 4a)와 Al+10 vol.%Al₂O₃ 복합재료(그림 4b)의 광학현미경 조직사진을 나타낸다. 그림과 같이, 비강화 재료에서는 여전히 가공조직을 나타내지만, 복합재료에서는 이미 완전 재결정이 발생했음을 잘 알 수 있다. 비강화 재료는 300°C 어닐링에서도 회복 및/또는 부분 재결정이 더욱 진전될 뿐 완전 재결정은 이루어지지 않음을 기계적 성질의 변화를 통하여 짐작할 수 있다. 즉, 비강화 재료는 350°C 이상의 온도에서 비로소 완전 재결정이 이루어진다. 한편, 연신율(그림 2b)은 냉간압연후 크게 감소하나, 어닐링후에 다시 증가한다. 또한, 어닐링된 복합재료의 연신율은 체적함량의 증가에 따른 강도의 변화와 상반된 경향을 보이며, 강화입자의 체적함량이 증가함에 따라 감소한다.

그림 5는 가공열처리 전과 후의 복합재료의 기계

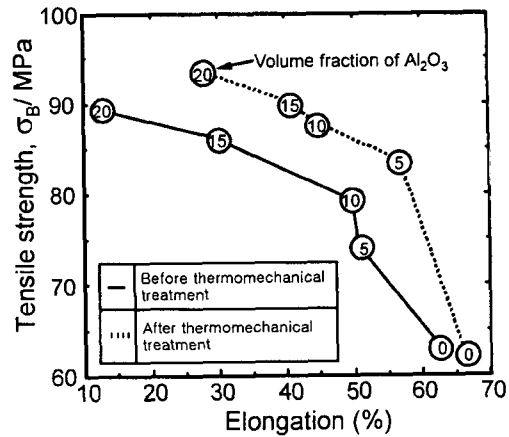


Fig. 5. Tensile strength-elongation relationship of Al/Al₂O₃ composites before and after thermomechanical treatment.

적 성질의 변화를 인장강도-연신율 그래프로 요약해서 나타낸 것이다. 그림에서 보여지듯이, 강화입자의 체적함량이 증가함에 따라 복합재료의 강도는 증가하고 연신율은 감소하는 일반적인 경향을 보임을 알 수 있다. 또한, 가공열처리를 통하여 복합재료의 기계적 성질이 향상됨을 알 수 있다. 이것은 피복압연법에 의해 제조된 Al/Al₂O₃ 복합재료의 기계적 성질을 향상시키는데 가공열처리가 효과적인 방법이라는 것을 나타낸다.

3.2. 집합조직

그림 6는 냉간압연후의 비강화 재료의 어닐링 온도에 따른 집합조직의 변화 과정을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 압연 후의 비강화 재료(그림 6a)는 {112}<111>성분을 주성분으로 하는 전형적인 압연 집합조직(최고 강도 : 4)을 나타낸다. 이와 같은 압연 집합조직은 300°C 어닐링후에도 그 최고 강도가 3으로 다소 약화되기는 하였으나 여전히 지배적임을 확인할 수 있다(그림 6b). 그러나, 그림 6(c)에 나타나 있듯이, 350°C 어닐링 재료에서는 300°C 어닐링 재료와는 전혀 다른 집합조직을 형성한다. 즉, 압연 집합조직은 거의 자취를 감추고, {001}<100>성분을 주성분으로 하는 재결정 집합조직이 발달됨을 알 수 있다. 이것은 비강화 재료의 경우, 350°C 부근에서 재결정이 거의 완료됨을 시사한다. 이와 같은 어닐링 온도에 따른 집합조직의 변화는 앞에서 언급한 기계적 성질의 변화와 좋은 일치를 보인다.

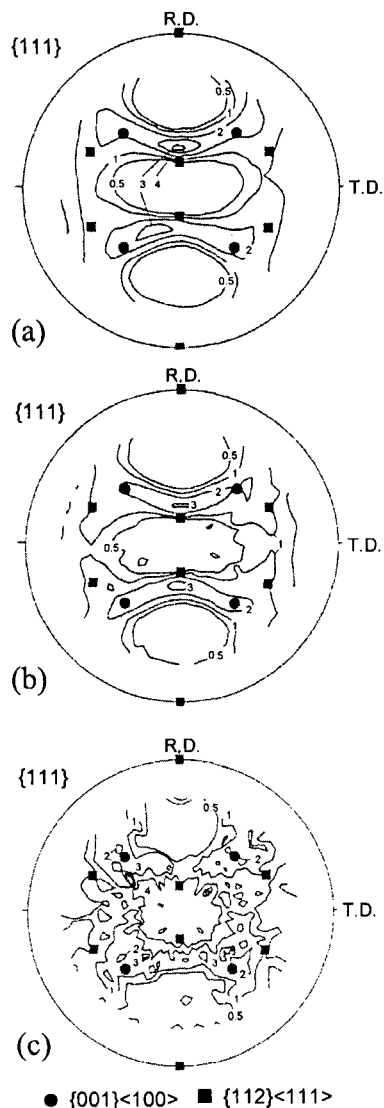


Fig. 6. {111} pole figures of the unreinforced Al after rolling (a) and annealing for 1.8 ks at 300°C (b) and 350°C (c).

그림 7은 냉간압연후와 200°C에서 어닐링된 Al+10 vol.%Al₂O₃ 복합재료의 {111}극점도를 나타낸다. 압연 후의 복합재료(그림 7a)는 비강화 재료와 유사하게 {112}<111>성분을 주성분으로 하는 압연 집합조직을 나타내지만, 그 강도는 비강화 재료에 비해 크게 감소되어 있음을 알 수 있다. 이것은 동일한 변형량(압하율)으로 압연될 경우, 복합재료에서 압연 집합조직의 발달이 현저하게 약화되는 것을 시사해 준다. 이와 같은 현상은 피복압연 복합재료에서도 나타

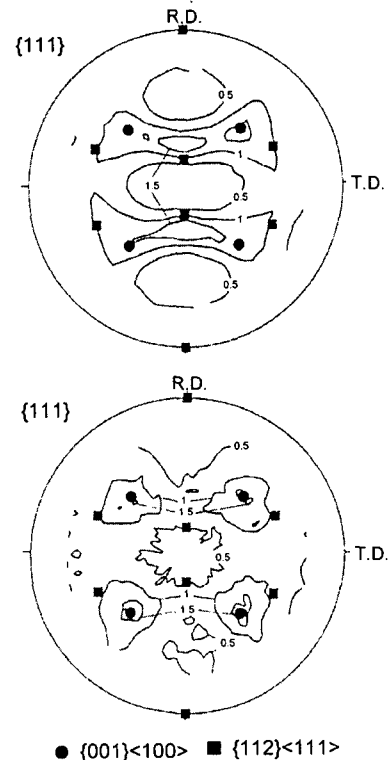


Fig. 7. {111} pole figures of the Al+10 vol.%Al₂O₃ composites after rolling (a) and annealing for 1.8 ks at 200°C (b).

났으며⁹⁾, 그 원인은 강화입자 주위에 변형영역 (deformation zone)이라고 불리는 특수한 영역이 형성되어 집합조직의 형성이 방해받게 되는 것과 강화입자 그 자체가 가공 중에 모상의 슬립 양상을 혼란스럽게 하기 때문이다¹⁰⁾. 그림 7(b)는 200°C에서 어닐링된 복합재료의 극점도를 나타낸다. 그림과 같이, 복합재료에서는 200°C에서 이미 {001}<100>성분을 주성분으로 하는 재결정 집합조직이 지배적임을 분명히 확인할 수 있다. 이것은 복합재료의 경우, 200°C에서 완전 재결정이 발생함을 입증해 주는 것이다. 또한, 이것은 350°C에서 재결정이 일어난 비강화 재료와 크게 대조되는 것으로, 복합재료의 재결정 온도가 약 150°C정도 낮음을 의미한다. 이와 같이 복합재료에서 재결정이 더욱 쉽게 일어나는 것은 입자 유도핵생성(Particle Stimulated Nucleation, PSN)¹¹⁾ 때문인 것으로 사료된다. 즉, 가공(압연) 중에 강화입자(Al₂O₃) 부근의 금속 모상(알루미늄)에는 여분의 변형이 부가되고 재결정에 필요 불가결한 변형 구배가

더 커지기 때문에 강화입자 부근의 모상에서는 재결정이 쉽게 발생하게 되는 것이다.

이것은 재결정을 위한 임계온도가 비강화 재료보다 복합재료에서 낮다는 것을 입증한다.

4. 결 론

분말피복압연법에 의해 제조된 Al/Al₂O₃ 입자분산 복합재료에 가공 열처리(압연 및 어닐링)를 행하여 기계적 성질 및 집합조직을 조사한 결과, 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

1) 가공 열처리에 의하여 Al/Al₂O₃ 복합재료의 기계적 성질을 향상시킬 수 있었다.

2) 압연후의 비강화 재료는 {112}<111>성분을 주성분으로 하는 전형적인 압연 집합조직을 나타내었다. 이런 압연 집합조직은 300°C 어닐링후에도 여전히 지배적이었으며, 350°C 어닐링후에야 {001} <100>성분이 주성분인 재결정 집합조직으로 변화되었다.

3) 압연후의 복합재료는 비강화 재료와 유사하게 {112}<111>성분을 주성분으로 하는 압연 집합조직을 나타내었으나, 200°C 어닐링후에 {001}<100>성분을 주성분으로 하는 재결정 집합조직으로 변화되었다.

참고 문헌

1. I. J. Palmear: *Light Alloys*, Arnold, Butterworth-Heinemann Press, London (1995) 325.
2. Y. Genma, Y. Tsunekawa, M. Okumiya and N. Mohri: *Materials Transactions, JIM*, **38** (1997) 232.
3. K. Otori, H. Watanabe and Y. Takeuchi: *Mater. Sci. & Tech.*, **3** (1987) 57.
4. N. C. Kothari: *Powder Metall. Int.*, **18** (1986) 321.
5. S. H. Hong and K. H. Chung: *Mater. Sci. Eng.*, **A194** (1995) 165.
6. W. F. Wang: *Powder Metall.*, **38** (1995) 289.
7. S. H. Lee: *J. Kor. Powder Metall. Inst.* **9** (2002) 153.
8. S. H. Lee and C. H. Lee: *J. Kor. Powder Metall. Inst.* **10** (2002) 97.
9. S. H. Lee and C. H. Lee: *J. Kor. Powder Metall. Inst.* **9** (2002) 103.
10. F. J. Humphreys, W. S. Miller and M. R. Djazeb: *Mater. Sci. Tech.*, **6** (1990) 1157.
11. Ferry and F. J. Humphreys: *Acta mater.* **44** (1996) 3089.