

분말시스압연법에 의해 제조된 Al/Al₂O₃ 복합재료의 기계적 성질

이성희 · 이충효

목포대학교 신소재공학과

Mechanical Properties of Al/Al₂O₃ Composite Fabricated by a 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, Chyunggye-myun, Muan-gun, Chonnam, South Korea

(Received 10 March 2003 ; Accepted form 28, March 2003)

Abstract The powder-in sheath rolling was applied to the fabrication of Al/Al₂O₃ composite. A stainless steel tube with outer diameter of 12 mm and wall thickness of 1 mm was used as a sheath. Mixture of aluminum powder and Al₂O₃ particles of which volume content was varied from 5 to 20 vol.% was filled in the tube by tap filling and then rolled to 75% reduction at ambient temperature. The rolled specimen was sintered at 560°C for 0.5 hr. The Al/Al₂O₃ composite fabricated by the sheath rolling and subsequent sintering showed the relative density higher than 0.96. The tensile strength of the composite increased with the volume content of Al₂O₃ particles, and it reached a maximum of 90 MPa which is 1.5 times higher than unreinforced material. The elongation decreased with the volume content of Al₂O₃ particles. It is concluded that the powder-in sheath rolling is an effective method for fabrication of Al/Al₂O₃ composite.

Keywords : Powder-in sheath rolling, Al/Al₂O₃ composite, Mechanical properties

1. 서 론

금속을 모상(母相)으로 한 입자분산 복합재료(MMC)는 고비강도, 뛰어난 내마모성 및 고온 안정성 등 우수한 기계적 성질을 나타내므로, SAP(sintered aluminum powder product)의 발견¹⁾ 이래로 많은 연구자들의 관심의 대상이 되어 왔다. 특히, 알루미늄 복합재료는 자동차 및 항공기 등 여러 수송기기의 유망한 구조재료로서, 그 제조 방법에 대해 많은 연구가 이루어지고 있다²⁾.

알루미늄 복합재료는 용탕교반법(stir casting)³⁾, 가압주조법(pressurized casting)⁴⁾ 등과 같은 액상공정과 분말야금법으로 대표되는 고상공정^{5,6)}에 의해 주로 제조된다. 액상공정은 제조공정이 간단하므로 저비용의 이점이 있으나, 강화 입자의 균일 분산과 그 양의 조절에 어려움이 있다. 한편, 분말야금법은 강

화 입자의 양을 쉽게 제어할 수 있으며, 강화 입자의 종류와 모양의 종류를 자유롭게 선택할 수 있는 장점이 있으나, 제조 공정이 복잡하므로 고비용의 단점이 있다. 분말야금법에 의한 알루미늄 복합재료의 제조를 위해서는 알루미늄 입자의 표면에 형성되어 입자간의 결합을 방해하는 경질의 산화물 피막을 파괴하기 위하여 많은 양의 소성변형을 부여하여야 한다. 또한, 입자들간의 결합 향상을 위하여 확산이 활발히 진행되어야 한다. 그러므로, 알루미늄 분말의 벌크(bulk)화에는 큰 가공량을 부여할 수 있는 열간 단조나 열간 압출과 같은 소성가공법이 자주 이용된다⁷⁾. 그러나, 단조나 압출가공은 batch 공정이며, 2차 가공을 필요로 하므로 생산성에 한계를 가지고 있다. 저지는 알루미늄 분말의 벌크화를 위한 간편한 방법으로 시스압연법을 제안하였다⁸⁾. 시스압연법은 연속 생산이 가능한 압연공정만을 이용하므로, 생산성 면

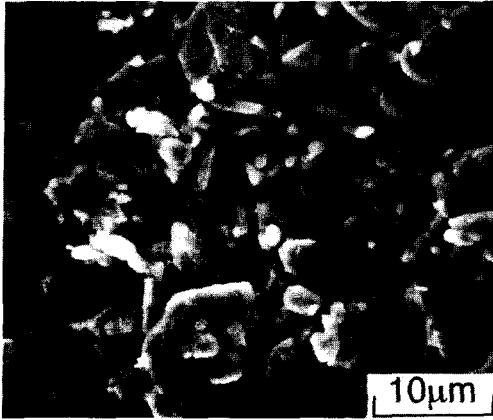


Fig. 1. SEM micrograph of Al_2O_3 used as reinforcement particle.

에 있어서 다른 방법들에 비해 월등히 우수하다. 본 연구의 목적은, 시스압연법을 이용하여 알루미늄기 입자분산 복합재료를 제조하고, 그것의 기계적 성질을 조사하는 것이다.

2. 실험 방법

2.1. 시편 준비

모상(母相)으로 질소가스 분사법으로 제조된 고순도(순도: 99.9999%) 알루미늄 분말(Cu:1, Fe:1, Si:2, O_2 :533 mass ppm, Al:bal.)을 사용하였다. 알루미늄 분말은 이전 연구⁸⁾에 사용한 것과 동일한 것으로 거의 구형을 하고 있으며, 평균 입경은 $36\mu m$ 이다. 그림 1에 강화입자로서 사용한 $\alpha-Al_2O_3$ 를 나타내었다. 그림과 같이, Al_2O_3 입자는 거의 구형을 하고 있으며, 평균 입경은 $5\mu m$ 이다. 시스(sheath) 재료로서는, 외경 12 mm, 벽 두께가 1 mm인 SUS304 스테인리스 튜브를 사용하였다.

시편의 준비절차가 그림 2에 나타나 있다. 알루미늄 분말을 미리 한쪽 끝을 봉해 놓은 길이 300 mm의 스테인리스 튜브에 충전한 후, 다른 한쪽도 진공할 수 있을 정도의 틈만 남겨 놓고 봉하였다. 그 후, $370^\circ C$ 에서 1 hr 동안 전기로 내에서 탈가스 처리를 하고, 완전히 봉한 후, 물 직경이 100 mm인 압연기를 사용하여, 두께 3 mm(압하율 75%)로 냉간 압연하여 복합재료를 제작하였다. 이후, 이 복합재료를 시스압연 복합재료라고 칭한다. 그 후, 시편을 전기로 내에서 $560^\circ C$ 에서 0.5 h 동안 소결(sintering)하였다.

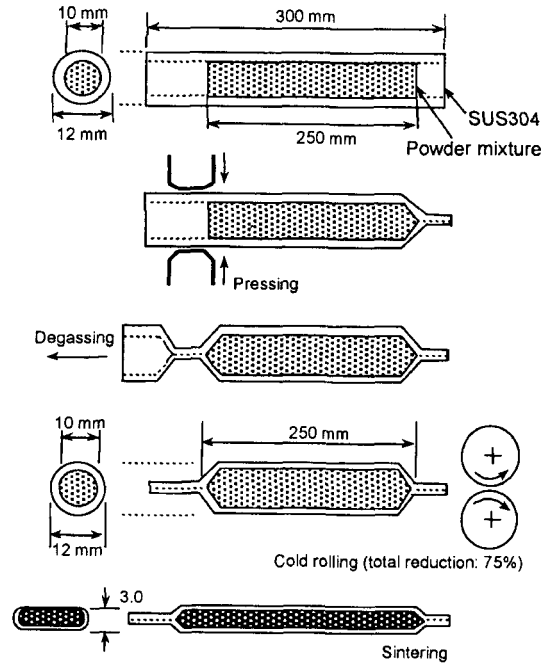


Fig. 2. Schematic illustration showing preparing procedure of the specimen.

여기서, 소결온도를 $560^\circ C$ 로 한 것은 이전 연구를⁸⁾ 참고로 정한 것이다. 이후, 이 복합재료를 소결 복합재료라고 칭한다.

2.2. 시험 및 특성분석

상대밀도는 아르키메데스법에 의해 측정하였다. 기계적 성질은 상온에서의 인장시험으로 평가하였다. 인장시험을 위한 시편은 시스를 제거한 후, 인장방향에 압연방향과 평행하도록 방전 가공기로 잘라서 준비하였다. 인장시험은, 평행부의 길이가 15 mm, 폭이 6 mm, 두께가 1.7 mm의 인장시편을 사용하여 행하였다. 또한, 시험은 Instron type의 인장시험기를 사용하여 $10^{-3} s^{-1}$ 의 일정한 변형속도로 하였으며, 시험 후의 파면은 주사전자현미경(SEM)으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강화입자의 분포

그림 3은 소결 복합재료의 종단면의 SEM사진을 나타내고 있다. 사진에서 알 수 있듯이, Al+5 vol.%

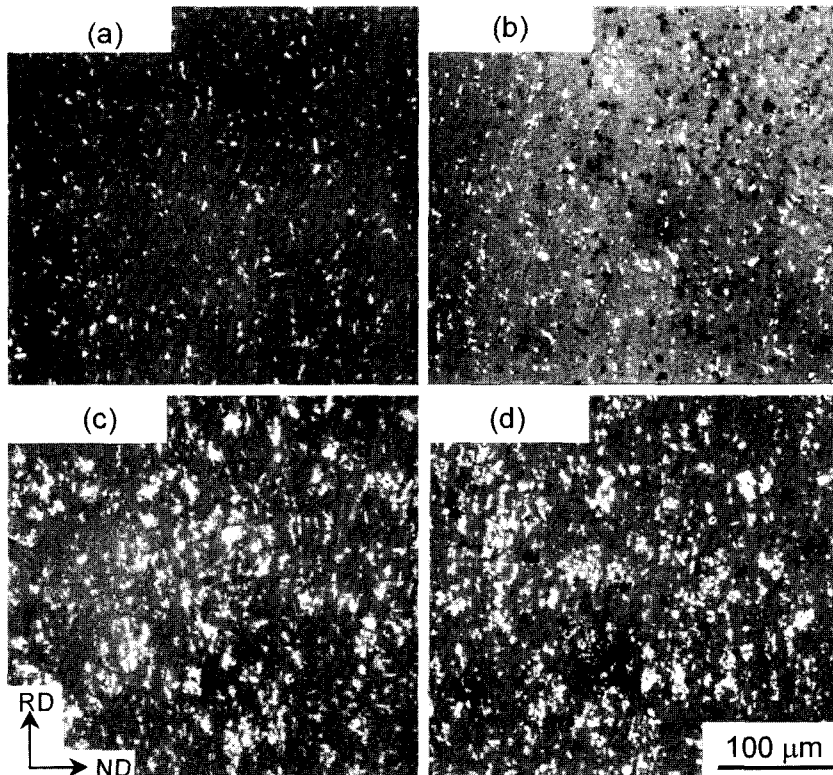


Fig. 3. SEM photographs observed on the plane perpendicular to the transverse direction of the composite fabricated by the sheath rolling and subsequent sintering: (a) Al+5% Al₂O₃, (b) Al+10% Al₂O₃, (c) Al+15% Al₂O₃ and (d) Al+20% Al₂O₃.

Al₂O₃ 복합재료에는 모상인 알루미늄 내에 기공(pores)들을 거의 관찰할 수 없으나, 체적함량이 10 vol.% 이상의 복합재료에서는 검은 점 모양의 기공이 부분적으로 관찰된다. 또한, Al₂O₃ 입자들은 압연방향과 평행하게 정렬되어 있으며, 10 vol.% 이하의 체적분율에서는 비교적 균일하게 분포되어 있으나, 15 vol.% 이상에서는 Al₂O₃ 입자들의 군집체(clusters)가 발견됨을 알 수 있다.

3.2. 상대밀도

그림 4는 시스압연 복합재료와 소결 복합재료의 상대밀도에 끼치는 Al₂O₃ 함량의 영향을 나타낸다. 두 경우 모두 강화입자의 체적분율이 증가함에 따라 상대밀도는 감소함을 알 수 있다. 높은 체적함량에서의 상대밀도의 감소는 기공 및 Al₂O₃ 입자들의 군집체와 관계가 있으며, 특히, 군집체를 이루는 각 입자들 사이의 공극(空隙)의 존재가 상대밀도를 저하시키는 가장 큰 원인이라 사료된다. 그러나, 소결 복합재료는

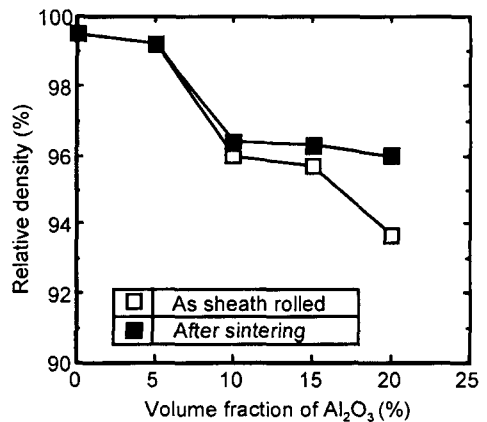


Fig. 4. Effect of volume fraction of Al₂O₃ on relative density of the composite fabricated by the sheath rolling and subsequently sintered.

높은 체적함량에서도 0.96 이상의 상대밀도를 나타내고 있으며, 이것은 시스압연법을 통하여 건전한 복합재료를 제조할 수 있음을 나타낸다.

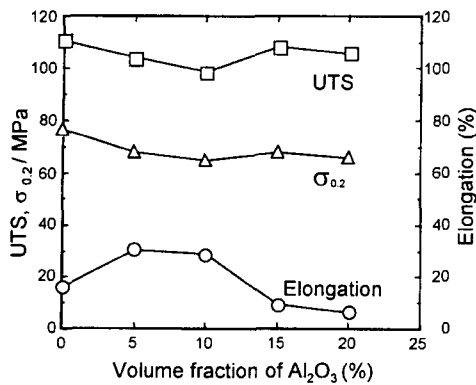


Fig. 5. Mechanical properties of the composite fabricated by the sheath rolling.

3.3. 시스압연 복합재료의 기계적 성질

시스압연 복합재료의 인장강도, 0.2% 항복강도, 연신율에 끼치는 Al₂O₃ 함량의 영향이 그림 5에 나타나 있다. 강화입자의 함량에 관계없이, 0.2% 항복강도, 최대 인장강도, 연신율이 각각 60 MPa, 100 MPa, 5%을 넘는 값을 나타내고 있다. 이것은 스테인리스 튜브내에 충전되었던 알루미늄과 Al₂O₃ 입자들의 혼합분말이 겔보기 압하율 75%의 냉간 시스압연에 의해서도 성공적으로 벌크화됨을 나타낸다. 복합재료에 있어서, 강화입자의 함량이 증가함에 따라 강도가 증가하는 것이 일반적이지만, 시스압연 복합재료의 강도는 약간 복잡한 변화를 보인다. 즉, 인장강도는 Al₂O₃의 체적함량이 10 vol.%까지 함량증가와 함께 감소하고, 10~15 vol.%사이에서는 증가하였다가, 15~20 vol.%사이에서 다시 감소한다. 연신율은 강도의 경우와 거의 상반되게 변화함을 알 수 있다. 모상(알루미늄)의 항복강도는 압연 중에 Al₂O₃ 입자들 부근에 국부적으로 축적되는 여분의 변형에 의한 가공경화로 인하여 강화입자의 함량이 증가함에 따라 증가할 것이다⁹⁾. 그러나, 과도한 가공경화는 회복(recovery)과 재결정(recrystallization)을 유발하게 된다. 한편, 압연 중에는 강화입자의 깨짐(cracking) 또는 모상과 강화입자 사이의 분리(debonding)등도 발생한다¹⁰⁾. 15 vol.%이상에서 인장강도, 0.2% 항복강도, 연신율 모두가 감소하는 것은 바로 입자 깨짐과 분리가 많이 발생하기 때문이다. 낮은 함량에서 항복강도와 인장강도가 감소하고 연신율이 증가한 것은 압연중에 스테인리스 시스의 소성변형으로 인한 온

도상승으로 인해 재결정과 회복이 발생했기 때문인 것으로 사료된다.

소성변형으로 인한 금속의 온도상승은 다음 식으로 계산된다.¹¹⁾

$$\Delta T = \eta \sigma \epsilon / \rho C \quad (1)$$

여기서, η 는 기계적 에너지의 열 에너지로의 변환 효율, σ 는 가공시의 평균 변형저항, ϵ 는 변형량, ρ 는 밀도, C 는 비열을 각각 나타낸다. 본 실험에 있어서, 압연전의 혼합 분말체의 직경은 10 mm였고, 압연후의 두께는 1.9 mm, 그리고 압연후의 시스의 두께는 0.55 mm였다. 그러므로, 혼합 분말체의 겔보기 압하율은 약 81%, 스테인리스 시스의 압하율은 약 45%이다. 분말체의 겔보기 변형은 치밀화에 기여하는 부분도 포함하고 있으므로 혼합 분말의 실제 변형량은 겔보기 압하율보다 더 낮을 것이다. SUS304 스테인리스강의 변형저항, 밀도, 비열은 각각 800 MPa, 8.6×10^6 g/m³, 0.51 J/g · °C이다. 변환효율 η 의 값을 0.95라 가정하고, 식(1)에 각 값을 대입하여 계산하면 소성변형에 의한 스테인리스강의 온도상승은 약 125°C 정도가 된다. 변형에 의한 알루미늄 분말의 온도상승은 알루미늄의 변형저항(40 MPa), 밀도(2.7×10^6 g/m³), 비열(0.88 J/g · °C)의 각 값을 식(1)에 대입하여 계산하면 최대 30°C 정도이다. 이처럼 알루미늄 분말은 압연 중 또는 압연 후 얼마동안은 고온의 시스에 의해 싸여져 있게 된다. 또한, 본 연구에서 사용된 고순도 알루미늄의 경우, 재결정 개시 온도가 일반 알루미늄 합금보다 크게 낮으며, 100°C 이하까지 저하되는 것이 알려져 있다¹²⁾. 그러므로, 냉간 시스압연에 의해서도 가공열에 의한 온도상승으로 인해, 모상인 알루미늄 내에 회복 또는 재결정이 발생할 수 있으리라 사료된다.

3.4. 소결 복합재료의 기계적 성질

소결 복합재료의 인장강도, 0.2% 항복강도, 연신율에 끼치는 Al₂O₃ 함량의 영향이 그림 6에 나타나 있다. 소결 동안에 모상 금속이 회복 또는 재결정하기 때문에 항복강도와 인장강도는 시스압연 후의 값보다 낮아진다. 한편, 연신율은 회복 또는 재결정으로 인한 연화(軟化)와 알루미늄 분말 상호간의 결합 증진으로 인해 시스압연 복합재료의 값들보다 증가한다. 소결 복합재료의 강도는 강화입자의 함량이 증

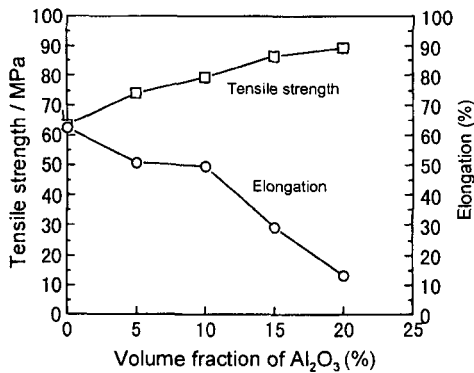


Fig. 6. Mechanical properties of the composite fabricated by the sheath rolling and subsequent sintering.

가함에 따라 증가하여, 20 vol.% Al₂O₃에서는 비강화 재료보다 1.5배 강화된다. 0.2% 항복강도는 강화입자의 함량이 증가함에 따라 약간 증가하는 경향을 나타낸다. 한편, 연신율은 강화입자의 함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

그림 7은 소결 복합재료의 인장시험 파단면의 SEM

사진을 나타낸다. 5, 10 vol.%의 체적함량에서 모상은 연성(dimple)파면을 나타내고 Al₂O₃ 입자들은 딴플의 중앙부분에서 관찰된다. 이것은 파단이 모상과 강화입자사이의 경계부위에서 시작되었음을 나타낸다. 연신율이 약 10%의 낮은 값을 나타내었던 Al₂O₃ 체적함유량이 20 vol.%인 복합재료에서도 모상은 연성파면을 보이고 있다. 그러나, 강화입자의 군집체가 많이 관찰되며, 그곳을 기점으로 균열(crack)이 발생하여 바로 파단으로 이어져 연신율의 저하를 초래하였음을 잘 보여주고 있다. 그러므로 복합재료의 기계적 성질을 더욱 향상시키기 위해서는 군집체가 형성되지 않는 혼합법의 채용과 형성된 군집체를 분산시키는 기술적인 연구가 필요하리라 사료된다.

4. 결 론

분말시스압연법을 Al/Al₂O₃ 입자분산 복합재료의 제조에 적용하여, 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

- 1.시스압연법에 의해 상대밀도가 0.96 이상인 건

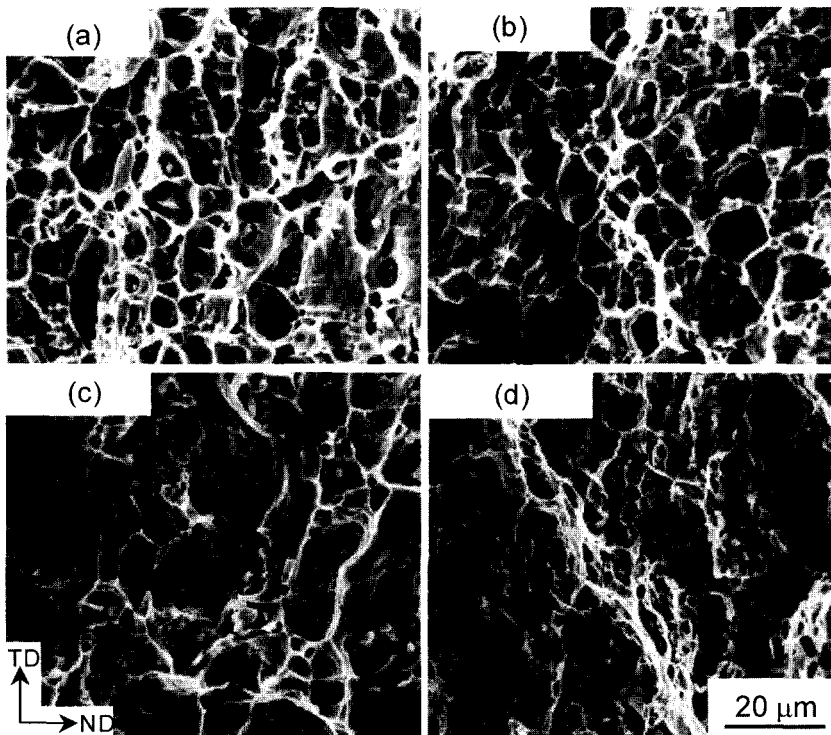


Fig. 7. Fracture surfaces after tensile test of the composite fabricated by the sheath rolling and subsequent sintering: (a) Al+5vol.% Al₂O₃, (b) Al+10vol.% Al₂O₃, (c) Al+15vol.% Al₂O₃ and (d) Al+20vol.% Al₂O₃.

전한 Al/Al₂O₃ 복합재료를 제조할 수 있었다.

2. 알루미늄 분말과 Al₂O₃ 입자의 혼합분말은 압하율을 75%의 냉간 시스압연만으로 고화가 달성되었으나 강화입자의 첨가에 의한 강화효과는 없었다.

3. 소결 복합재료의 인장 강도는 Al₂O₃ 입자의 함량에 비례하여 증가하였으며, 20 vol.%Al₂O₃에서 최대값인 90 MPa를 나타내었다. 이 최대값은 비강화재료보다 1.5배 높은 값이다. 연신율은 Al₂O₃ 입자의 함량에 따라 감소하였다.

4. 분말시스압연법은 Al/Al₂O₃ 입자분산 복합재료의 제조에 유효한 방법이다.

참고 문헌

1. E. A. Bloch: Metall. Rev., **6** (1961) 193.
2. I. J. Palmear: *Light Alloys*, Arnold, London (1995) 325.
3. Y. Genma, Y. Tsunekawa, M. Okumiya and N. Mohri: Materials Transactions, JIM, **38** (1997) 232.
4. K. Ohori, H. Watanabe and Y. Takeuchi: Mater. Sci. & Tech., **3** (1987) 57.
5. N. C. Kothari: Powder Metall. Int., **18** (1986) 321.
6. S. H. Hong and K. H. Chung: Mater. Sci. Eng., **A194** (1995) 165.
7. W. F. Wang: Powder Metall., **38** (1995) 289.
8. S. H. Lee: 한국분말야금학회지, **9** (2002) 153.
9. N. Kanetake, T. Kaneko and T. Choh: J. Japan Inst. Metals, **61** (1997) 1153.
10. J. C. Lee and K. N. Subramanian: Mater. Sci. Eng., **A159** (1992) 43.
11. R. W. K. Honeycombe: *The Plastic Deformation of Metals*, Arnold, Cambridge (1982) 180.
12. 일본 경금속학회: 알루미늄의 조직과 성질 (1991) 160.