

ARB법에 의해 강소성가공된 Al/SiC_p 입자분산복합재료의 미세조직 및 기계적 특성

이성희* · 김형욱^a

목포대학교 신소재공학과, 한국기계연구원 재료연구부^a

Microstructure and Mechanical Properties of Al/SiC_p Particle Reinforced Composite Severely Deformed by ARB Process

Seong-Hee Lee* and Hyoung-Wook Kim^a

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

^aDepartment of Materials Technology, Korea Institute of Machinery and Materials,
66 Sangnam, Changwon 641-010, Korea

(Received January 23, 2006; Accepted February 13, 2006)

Abstract The Al/SiC_p particle reinforced composite fabricated by a powder-in sheath rolling (PSR) method was severely deformed by the accumulative roll-bonding (ARB) process. The ARB process was performed up to 8 cycles at ambient temperature without lubricant. The ARBed composite exhibited an ultrafine grained structure similar to the other ARBed bulky materials. Tensile strength of the composite increased gradually with the number of ARB cycles, but from the 6th cycle it rather decreased slightly. These characteristics of the composite were somewhat different from those of Al powder compact fabricated by the same procedures. The difference in microstructure and mechanical properties between Al powder compact and the composite was discussed.

Keywords : Accumulative roll-bonding (ARB), Particle reinforced composite, Ultra grain refinement, Mechanical properties, Microstructure

1. 서 론

산업발전이 급속히 고도화됨에 따라 다기능성 복합재료의 개발이 여러 분야에서 요구되고 있다. 특히, 알루미늄기 입자분산 복합재료는 경량인 장점이 있으므로, 기존의 철계 합금의 대체 구조재료로서 자동차 및 항공기 등 여러 수송기에 활용이 점차 증가하는 추세이며, 그 제조 방법에 대해서도 활발한 연구가 이루어지고 있다¹⁾. 알루미늄기 복합재료는 용탕 교반법(stir casting)²⁾, 용탕단조법(squeeze casting)³⁾ 등과 같은 액상공정과 분말야금법으로 대표되는 고상 공정^{4,5)}에 의해 제조된다. 액상공정은 제조 공정이 간단하므로 제조비용이 적은 장점이 있으나, 강화입자

의 균일 분산과 그 양의 조절에 어려움이 있다. 한편, 분말야금법은 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 1차 가공 공정이며, 2차 가공공정을 필요로 하므로 생산성에 한계를 가지고 있다. 저자는 알루미늄기 복합재료의 제조를 위한 간편한 방법으로 분말피복압연(powder-in sheath rolling, PSR)법을 제안하였으며⁷⁾, PSR법이 알루미늄기 복합재료의 제조에 효과적인 방법임을

*Corresponding Author : [Tel : +82-61-450-2494; E-mail : shlee@mokpo.ac.kr]

입증하였다^{8,9)}.

최근, 금속재료의 결정립을 초미세화시킴으로 기계적 특성을 크게 향상시키는 강소성가공법들이 많은 주목을 받고 있다. 그 중에도, 구속전단가공법(Equal Channel Angular Pressing, ECAP)¹⁰⁾, 극한비틀림변형법(Severe Torsional Straining, STS)¹¹⁾, 반복접침접합압연법(Accumulative Roll Bonding, ARB)¹²⁾, 연속전단법(Conshearing)¹³⁾, 반복주름압연법(Repetitive Corrugation and Straightening, RCS)¹⁴⁾ 등과 같은 강소성 가공법들은 소재의 형상변화 없이 고강도화를 달성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이런 방법들 중에서, ARB법은 연속공정이 가능한 압연을 이용한 방법으므로 생산성이 높으며 비교적 큰 재료에도 적용이 가능하므로 실용 가능성이 높은 프로세스라 할 수 있다. 그러므로 최근 ARB법에 의한 Al합금^{15,16)}, Fe합금¹⁷⁾, Cu합금¹⁸⁻²⁰⁾ 등의 결정립초미세화 및 고강도화에 대한 연구가 많이 보고되고 있다. 그러나 ARB법을 금속기 복합재료에 적용한 예는 거의 없다. 만약, 금속기 복합재료에 ARB법의 적용이 가능하다면 모상금속의 결정립이 초미세한 복합재료의 제조가 가능하게 되어 초소성 변형 특성 등 여러 가지 기계적 성질의 향상이 기대된다. 저자는 이전 연구²¹⁾에서 PSR법에 의해 제조한 Al 분말성형체에 ARB법을 적용하여 ARB에 따른 Al 분말성형체의 미세조직 및 기계적 특성변화를 조사하여 보고하였다. 이전 연구를 통하여 ARB된 Al 분말성형체도 다른 금속재료들과 유사하게 초미세한 결정립이 형성되지만 두께 방향으로 불균질한 조직을 나타내며 동적 회복이 활발히 일어나 ARB에 의한 강화 효과가 비교적 적음을 알 수 있었다. 그러나, 입자분산 복합재료의 경우는 강화입자의 존재로 인해 Al 분말성형체와는 다른 거동을 나타낼 가능성이 있다. 그러므로 본 연구에서는 이전과 동일한 PSR법에 의해 제조한 Al/5vol.% SiC_p 복합재료에 ARB법을 적용하여 미세조직 및 기계적 특성 변화를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 복합재료의 제조 및 ARB 공정

모재로는 질소가스 분사법으로 제조된 고순도 알루미늄 분말(Cu:1, Fe:1, Si:2, O₂:533 mass ppm, Al:bal.)을 사용하였다. 알루미늄 분말은 이전 연구⁸⁾

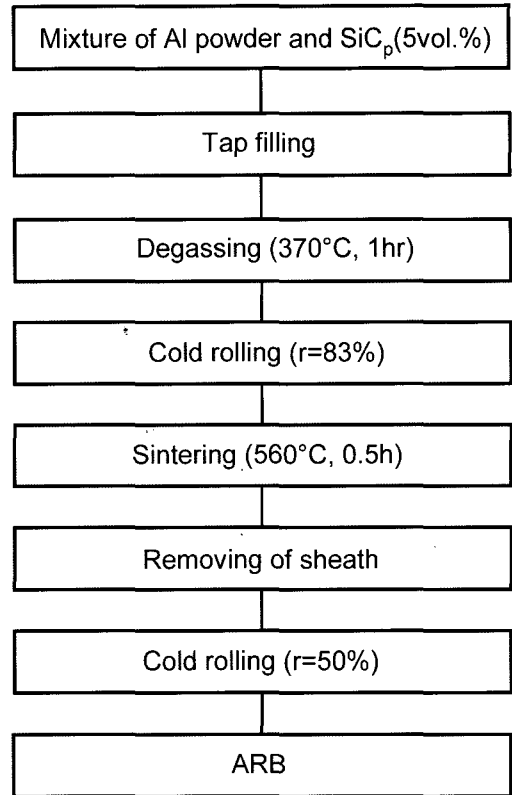


Fig. 1. Flow chart of experimental procedure.

에 사용한 것과 동일한 것으로 거의 구형을 하고 있으며, 평균 입경은 36 μm 이다. 피복(sheath) 재료로서는, 외경 18 mm, 벽 두께가 1 mm인 SUS304 스테인리스 튜브를 사용하였다.

PSR법을 통한 시편의 준비절차를 그림 1에 나타내었다. 먼저, 볼 밀에 의해 혼합한 알루미늄 분말과 5vol.%SiC_p강화입자의 혼합분말을 미리 한쪽 끝을 밀봉한 길이 300 mm의 스테인리스 튜브에 충전(Tap filling) 한 후, 다른 한쪽도 진공배기가 가능한 정도의 틈만 남겨 놓고 밀봉하였다. 그 후, 370°C에서 1 hr 동안 전기로 내에서 탈가스(Degassing) 처리를 하고, 완전히 밀봉한 후, 물 직경이 310 mm인 2단 압연기를 사용하여, 두께 3 mm(압하율 83%)로 냉간 피복압연하여 판상의 Al/SiC_p 복합재료를 제작하였다. 그 후, 시편을 전기로 내에서 560°C에서 30 분간 소결한 후 Trimming에 의해 피복된 스테인리스를 제거한 후 50% 냉간압연하여, 두께를 1 mm로 하였다.

이상과 같이 PSR법에 의해 제조한 동일 크기(두께

1 mm, 폭 20 mm, 길이 300 mm)의 2매의 Al/SiC_p 복합재료를 ARB법에 적용하였다. ARB 공정은 이전의 연구²¹⁾와 동일한 방법 및 절차에 의해 실시하였으며 실온에서 8사이클(ε~6.4)까지 행하였다.

2.2. 시험 및 특성분석

기계적 성질은 상온에서 인장시험으로 평가하였다. 인장시험편은 KS규격의 제 5호 시험편의 1/4 크기(평행부의 길이 15 mm, 폭 6 mm, 두께 1.7 mm)로 인장방향에 압연방향과 평행하도록 방전가공기로 잘라서 준비하였으며, 인장시험은 Instron type의 인장시험기를 사용하여 10⁻³s⁻¹의 일정한 변형속도로 수행하였다. 미세조직은 광학현미경(OM) 및 투과전자현미경(TEM)을 사용하여 관찰하였다. OM조직은 ARB 전과 후의 Al/SiC_p 복합재료의 횡단면을 과염소산 용액에서 전해부식을 한 후에 관찰하였다. TEM 관찰용 시험편은 1 mm두께의 시험편을 두께방향으로 100 μm까지 연마하여 3 mm 지름의 디스크로 만든 다음, 에탄올(90%)과 과염소산(10%)의 혼합용액으로 jet polishing을 실시하여 준비하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분말피복압연 후의 미세조직 및 기계적 성질

그림 2는 분말피복압연/소결 후(그림 2a) 및 냉간압연 후(그림 2b)의 횡단면의 광학현미경 조직사진을 나타낸다. 분말피복압연/소결 후의 Al/SiC_p 복합재료는 그림에서와 같이 모상인 Al의 평균 결정립 크기가 42 μm인 재결정 조직을 나타내며 SiC 강화입자들이 비교적 균일하게 분산되어 있음을 알 수 있다. 소결 후 복합재료의 인장강도는 94 MPa, 연신율은 32% 였다. 냉간압연 후(ARB전)는 압연방향으로 신장된 전형적인 가공조직을 나타낸다. 냉간압연 후에 가공경화에 의하여 인장강도는 크게 증가하여 154 MPa를 나타내었으며, 연신율은 7%로 크게 감소하였다.

3.2. ARB에 따른 미세조직의 변화

8사이클(상당변형량~6.4)까지의 강소성가공을 시험편의 깨짐 없이 성공적으로 행하여 건전한 Al/SiC_p 복합재료를 얻을 수 있었다. 그림 3은 ARB의 사이클 수에 따른 Al/SiC_p 복합재료의 횡단면의 중간부위의

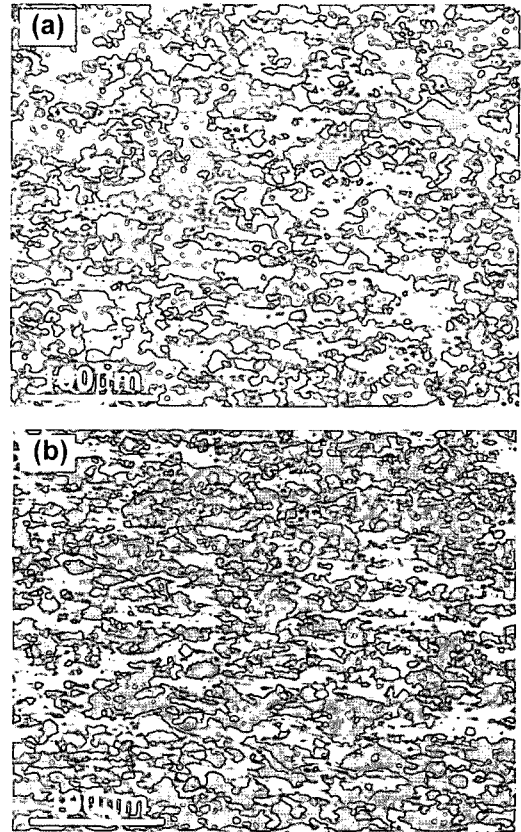


Fig. 2. Optical micrographs of Al/SiC_p composite processed by PSR (a) and subsequent cold rolling (b).

광학현미경 조직변화를 보여준다. ARB의 사이클 수가 증가함에 따라 모상인 알루미늄의 결정립들이 점차적으로 압연방향으로 연신되고 미세화되어, 8사이클 후에는 결정립의 모양을 거의 식별할 수 없게 됨을 알 수 있다. 또한, 1사이클 후의 시험편에서는 화살표로 표시한 것과 같은 SiC 강화입자들의 군집체(cluster)가 부분적으로 발견되나 사이클 수가 증가함에 따라 그러한 강화입자들의 군집체가 사라지며 더욱 균일한 분산상태를 나타냄을 알 수 있다. 이와 같은 ARB에 의한 강화입자의 분산효과를 더욱 면밀히 조사하기 위해 횡단면에서 SEM관찰을 하였는데 그 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 회색부위가 모상인 알루미늄을 나타내고 흰 부위가 SiC 강화입자를 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 ARB 사이클 수가 증가함에 따라 강화입자의 크기가 감소하고 그 수가 많아지는 것처럼 보임을 확인할 수 있다. 이

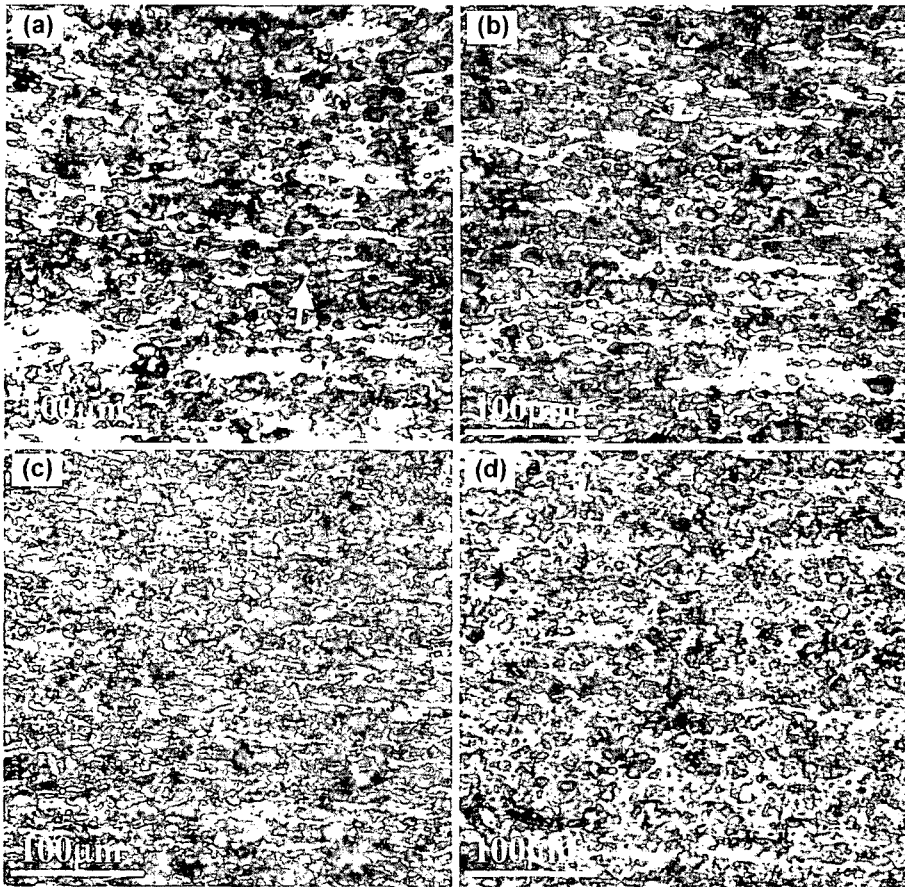


Fig. 3. Optical micrographs of Al/5vol.%SiC composite processed by ARB of 1 cycle (a), 3 cycles (b), 5 cycles (c) and 8 cycles (d). Observed on the plane perpendicular to transverse direction (TD plane).

것은 실제로 강화입자의 크기가 감소하거나 그 수가 많아진 것이 아니고 균집체를 이루고 있던 강화입자의 균일분산에 의한 것이며, ARB가 강화입자의 분산에 매우 효과적임을 재확인시켜 주는 것이라 할 수 있다.

그럼 5는 ARB에 따른 복합재료의 TEM 조직사진의 변화를 나타낸다. 각 조직사진의 우측상단에 있는 회절도형은 각 조직의 중심에서 직경 1.6 μm 범위에 조리개를 삽입하여 찍은 제한시야회절(selected area diffraction, SAD) 도형을 나타낸다. 1사이클 후의 시편은 전형적인 가공조직인 전위셀 조직(dislocation cell structure)을 나타내고 있으며, SAD 도형도 단순한 모양을 나타낸다. 그러나, 3사이클 후의 조직은 1사이클 후의 조직과는 달리 SiC 강화입자 주위에 비교적 선명한 입계(boundaries)를 가진 초미세한 결정

립 조직을 나타내고 있으나 결정립간의 방위차는 그리 크지 않음을 SAD도형을 통해 짐작할 수 있다. 5사이클 후에도 3사이클 조직과 유사한 결정립 조직을 나타내지만, 결정립계가 더욱 선명하며, SAD도형에서 회절점의 퍼짐현상이 두드러지게 나타나며, 여분의 회절점들도 많이 관찰된다. 이것은 결정립간의 방위차가 크게 증가했음을 보여준다. 8사이클 후 시편의 조직도 5사이클 후와 유사하였다. 이와 같은 Al/SiC_p 복합재료의 ARB 사이클 수의 증가에 따른 TEM 미세조직의 발달과정은 Al 분말성형체의 경우와 다음과 같은 점에서 다소 다르다. 첫째, 복합재료의 경우 SiC 강화입자로 인한 모상의 변형량 증가 효과²²⁾로 인해 더욱 낮은 사이클(변형량)에서 초미세 결정립이 형성된다. 이것은 Al 분말성형체가 5사이클 후에 초미세결정립이 형성되었던 것에 반해 복합재

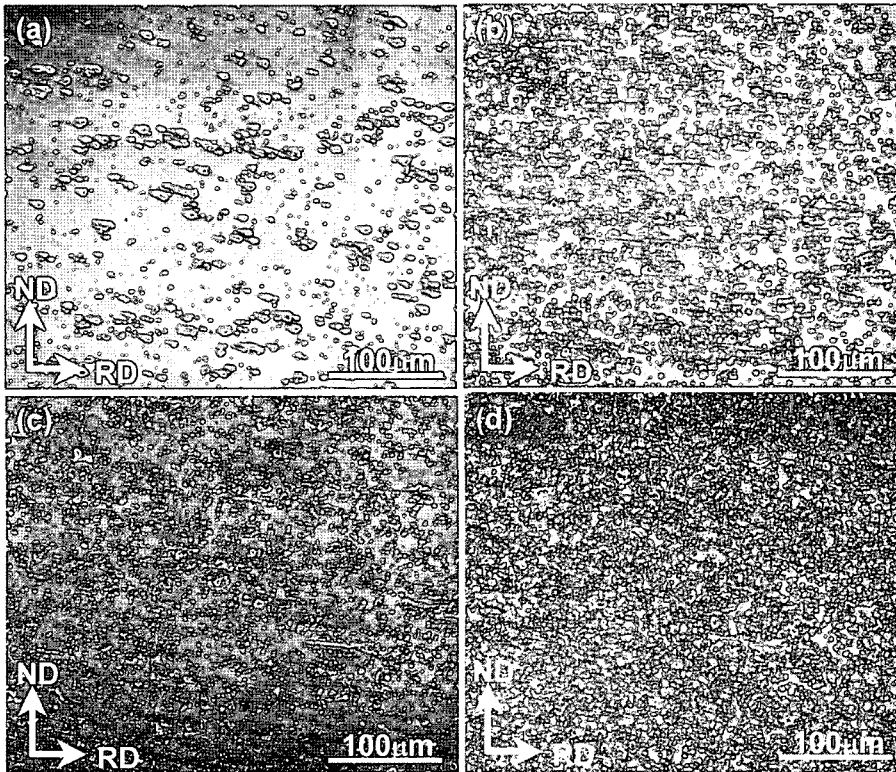


Fig. 4. SEM micrographs of Al/5vol.%SiC composite processed by ARB of 1 cycle (a), 3 cycles (b), 5 cycles (c) and 8 cycles (d). Observed on the plane perpendicular to transverse direction (TD plane).

료의 경우 3사이클 후에 이미 광범위하게 초미세결정립이 형성된 것을 통해 알 수 있다. 둘째, ARB에 의해 형성된 결정립의 크기는 Al 분말성형체에서 보다 복합재료에서 더 작다. 실제로 8사이클 후 복합재료(그림 5d)의 평균 결정립경이 600 nm로, Al 분말성형체²¹⁾의 800 nm에 비해 더 작았다. 이것은 ARB 시에 SiC 강화입자 주위의 모상 영역이 다른 영역보다 국부변형량이 증가하여 결정립의 세분화(fragmentation) 및 회복²³⁾이 더욱 활성화되었기 때문인 것으로 사료된다.

3.3. ARB에 따른 기계적 성질의 변화

ARB의 상당변형량의 증가에 따른 Al/SiC_p 복합재료의 기계적 성질의 변화를 그림 6에 나타내었다. 비교를 위하여 이전 연구 결과인 Al 분말성형체의 결과도 함께 나타내었다. 그래프 내의 숫자는 ARB사이클 수를 나타낸다. 복합재료의 인장강도는 냉간압연 후 크게 증가하며 그 후 ARB 사이클 수(상당변형량)가 증가함에 따라 점차적으로 증가하여 5사이클

에서 최고치인 176 MPa를 나타낸다. 이 값은 소결 후 복합재료에 비해 약 2배 증가한 수치로 ARB에 의한 강화 효과가 Al 분말성형체의 경우보다 다소 큼을 잘 나타낸다. 그러나 5사이클 후에는 변형량이 증가해도 강도는 오히려 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 인장강도의 거동은 1사이클 이후 변형량이 증가함에도 불구하고 강도가 계속 감소했던 Al 분말성형체의 경우와 다소 다르다. 이전 연구²¹⁾에서 언급한 바와 같이, Al 분말성형체에서 강도가 감소한 것은 압연 도중 또는 후에 회복이 활발히 일어났기 때문이다. 이와 같은 회복은 동일한 Al을 모상으로 한 복합재료의 경우에서도 발생하여 복합재료의 강도증가를 저해하는 요인으로 작용하였을 것이다. 그럼에도 불구하고 5사이클까지 변형량이 증가함에 따라 강도가 증가한 것은 첫째, 앞에서 언급한 바와 같은 SiC 입자에 의한 결정립미세화 효과, 둘째, ARB에 따른 SiC 강화입자의 분산효과(그림 4)에 기인한 것이라 사료된다. 한편 연신율은 복합재료에서도 Al 분

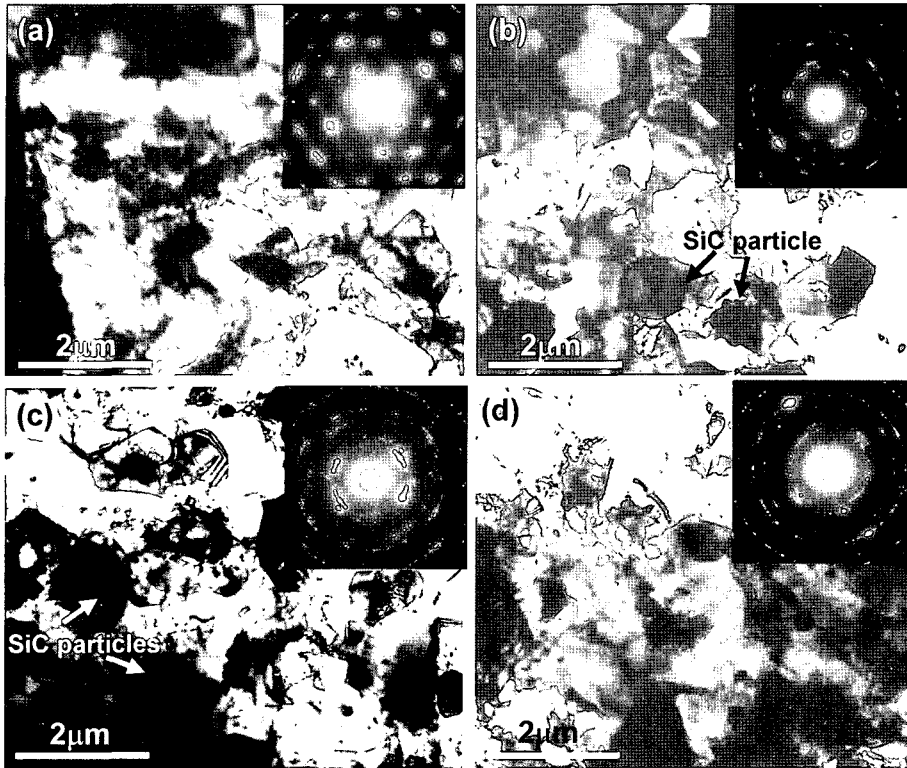


Fig. 5. TEM microstructures and the corresponding SAD patterns of Al/5vol.%SiC composite processed by ARB of 1 cycle (a), 3 cycles (b), 5 cycles (c) and 8 cycles (d). Observed on the normal plane.

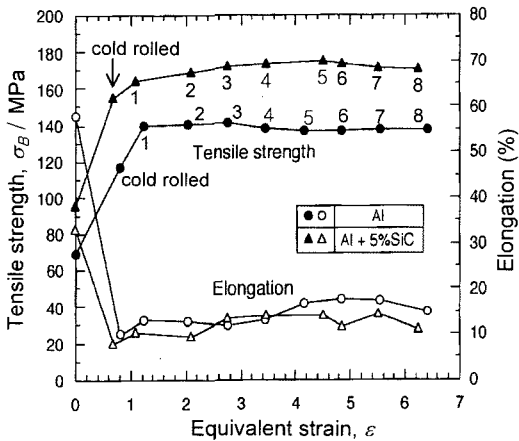


Fig. 6. Variation of mechanical properties of Al/SiCp composite with equivalent strain.

말성형체와 유사하게 사이클 수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸다.

4. 결론

분말피복압연법(PSR법)에 의해 제조한 Al/5vol.% SiC_p 복합재료에 ARB법을 적용하여, 다음과 같은 결과를 얻었다.

ARB에 의한 강소성 가공(상당변형량~6.4)에 의해 초미세립 알루미늄기 입자분산강화 복합재료의 제조가 가능하였다.

1사이클 ARB 후의 복합재료는 전위셀 조직을 나타내지만 3사이클 이후에는 초미세결정립 조직을 나타내었으며, 이것은 ARB법에 의한 결정립미세화 효과가 Al 분말성형체에 비해 복합재료에서 더욱 효과적임을 나타낸다. 또한 ARB에 의해 형성된 초미세 결정립의 크기도 Al 분말성형체에 비해 복합재료에서 더 작았다.

복합재료의 인장강도는 냉간압연 후 크게 증가하였으며 그 후 ARB 사이클 수가 증가함에 따라 점차적으로 증가하여 5사이클에서 최고치인 176 MPa

를 나타내었으며, 그 후는 다소 감소하였다. ARB에 의한 복합재료의 강도 증가 효과는 SiC 입자에 의한 결정립미세화 효과 및 SiC 강화입자의 분산효과에 기인한 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2005학년도 목포대학교 학술연구지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

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. Ohori, 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. 이성희: *한국분말야금학회지*, **9** (2002) 153.
8. 이성희, 이충효: *한국분말야금학회지*, **10** (2003) 97.
9. 이성희, 이충효: *한국분말야금학회지*, **10** (2003) 103.
10. R. Z. Valiev, N. A. Krasilnikov and N. K. Tsenev: *Mater. Sci. Eng.*, **A137** (1991) 35.
11. R. Z. Abdulov, R. Z. Valiev and N.A. Krasilnikov: *Mater. Sci. Lett.*, **9** (1990) 1445.
12. Y. Saito, H. Utsunomiya, N. Tsuji and T. Sakai: *Acta Mater.*, **47** (1999) 579.
13. Y. Saito, H. Utsunomiya and H. Suzuki: *Proc. Inst. Mech. Eng. Ser. B*, **215** (2001) 947.
14. J. Y. Huang, Y. T. Zhu, H. Jiang and T. C. Lowe: *Acta Mater.*, **49** (2001) 1497.
15. N. Tsuji, Y. Ito, Y. Saito and Y. Minamino: *Scripta Mater.*, **47** (2002) 893.
16. S. H. Lee, Y. Saito, T. Sakai and H. Utsunomiya, *Mater. Sci. Eng.*, **A325** (2002) 228.
17. N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya and S. Tanigawa: *Scripta Mater.*, **40** (1999) 795.
18. 이성희, 한승전, 임차용: *동기기술 연구회지*, **19** (2004) 13.
19. 이성희, 조준, 한승전, 임차용: *한국재료학회지*, **15** (2005) 240.
20. 이성희, 조준, 이충효, 한승전, 임차용: *한국재료학회지*, **15** (2005) 555.
21. 이성희: *한국분말야금학회지*, **12** (2005) 30.
22. Ferry and F. J. Humphreys: *Acta mater.*, **44** (1996) 3089.
23. N. Tsuji, R. Ueji, Y. Ito and Y. Saito: *Proc. of the 21st Riso Int. Symp. on Mat. Sci.*, Riso National Laboratory, Denmark, (2000) 607.