

분말피복압연법에 의해 제조된 Al 분말성형체의 반복겹침접합압연

이 성 희*

목포대학교 신소재공학과

Accumulative Roll-Bonding of Al Powder Compact Fabricated by a Powder-in Sheath Rolling Method

Seong-Hee 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 10 January 2005 ; Accepted 28 January 2005)

Abstract An aluminum powder compact consolidated by a powder-in sheath rolling (PSR) method was severely deformed by accumulative roll-bonding (ARB) process. The ARB process was performed up to 8 cycles at ambient temperature without lubrication. Optical microscope and transmission electron microscope observations revealed that microstructure of the ARB-processed Al powder compact is inhomogeneous in the thickness direction. The ultra-fine subgrains often reported in the ARB-processed bulky materials were also developed near surface of the Al powder compacts in this study. Tensile strength of the ARB-processed Al powder compact increased at the 1st cycle, but from the 2nd cycle it rather decreased slightly.

Key words : Accumulative Roll-bonding (ARB), Al powder compact, Mechanical properties, Microstructure

1. 서 론

알루미늄기 입자분산 복합재료는 경량인 장점이 있으므로, 기존의 철계 합금의 대체 구조재료로서 자동차 및 항공기 등 여러 수송기기에 활용이 점차 증가하는 추세이며, 그 제조 방법에 대해서도 활발한 연구가 이루어지고 있다¹⁾. 알루미늄기 복합재료의 제조 방법은 용탕교반법(stir casting)²⁾, 가압주조법(pressurized casting)³⁾ 등과 같은 액상공정과 분말야금법으로 대표되는 고상공정^{4,5)}으로 분류된다. 액상공정은 제조 공정이 간단하므로 제조비용이 적은 장점이 있으나, 강화입자의 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. 분말야

금법을 이용한 알루미늄 분말의 벌크(bulk)화에는 큰 가공량을 부여할 수 있는 열간 단조나 열간압출과 같은 소성 가공법이 자주 이용된다⁶⁾. 그러나, 단조나 압출 가공은 1차 가공 공정이며, 2차 가공을 필요로 하므로 생산성에 한계를 가지고 있다. 저자는 알루미늄기 복합재료의 제조를 위한 간편한 방법으로 분말 피복압연(powder-in sheath rolling, PSR)법을 제안하였으며⁷⁾, PSR법이 알루미늄기 복합재료의 제조에 효과적인 방법임을 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⁾, 반복겹침접합압연법(Accumulative Roll Bonding, ARB)¹²⁾, 연속전단법(Conshearing)¹³⁾, 반복주름압연법(Repetitive

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

Corrugation and Straightening, RCS)¹⁴⁾ 등과 같은 강소성 가공법들은 소재의 형상변화 없이 고강도화를 달성할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이런 방법들 중에서, ARB법은 압연을 이용한 방법으로 실용화에 비교적 유리한 기술이라 할 수 있다. ARB법이란 동일 크기를 가진 두 판재를 표면처리후 적층하여 50% 압하율에서 압연하여 압접(Roll-Bonding)시킨 후, 압연된 재료의 길이를 2등분하여 다시 적층한 후 접합압연을 반복함으로써 금속재료에 강소성 가공을 부여하여 결정립을 초미세화시키는 방법이다. ARB법은 연속공정이 가능한 압연을 이용한 공정이므로 생산성이 높으며 비교적 큰 재료에도 적용이 가능하므로 실용 가능성이 높은 프로세스라 할 수 있다. 그러므로 최근 ARB법에 의한 Al합금^{15,16)}, Fe합금¹⁷⁾, Cu합금¹⁸⁾ 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 기계적 성질의 향상이 기대된다. 본 연구에서는 장차 ARB법의 복합재료에의 적용을 목적으로 PSR법에 의해 제조한 Al 분말성형체를 우선 ARB법에 적용하여, ARB에 따른 Al 분말성형체의 미세조직 및 기계적 특성변화를 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 시편 준비

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

시편의 준비절차를 그림 1에 나타내었다. Al 분말을 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 직경

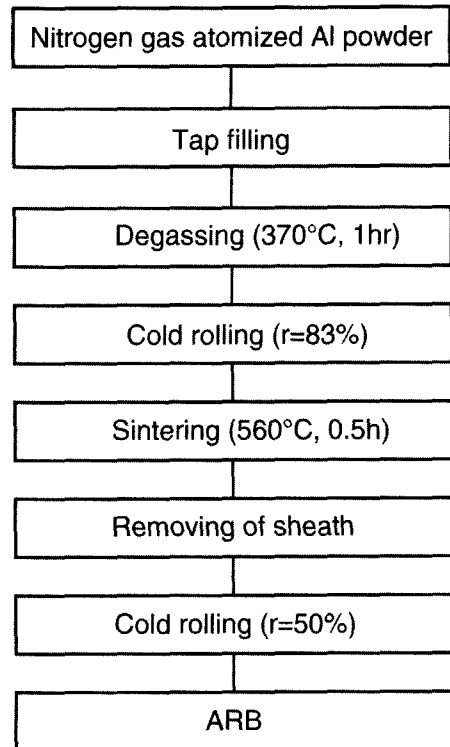


Fig. 1. Flow chart of experimental procedure.

이 310 mm인 2단 압연기를 사용하여, 두께 3 mm(압하율 83%)로 냉간 피복압연하여 판상의 Al 분말성형체를 제작하였다. 그 후, 시편을 전기로 내에서 560°C에서 30분 동안 소결한 후 Trimming에 의해 피복된 스테인리스를 제거한 후 50% 냉간압연하여, 두께를 1 mm로 하였다.

2.2. 반복겹침접합압연(ARB)

그림 2에 ARB법의 모식도를 나타내었다. 먼저, 분말피복압연법에 의해 제조한 동일 크기(두께 1 mm, 폭 20 mm, 길이 300 mm)의 2매의 Al분말성형체 판재를 탈지 및 와이어 브러싱 등의 표면처리하였다. 그 후 적층하여 물 직경이 310 mm인 2단 압연기를 사용하여 롤주속 17 m/min로 50%의 냉간압연하여 두께 1 mm의 판재로 압접(roll-bonding)하였다. 압접된 판재를 절반 길이로 절단한 후, 같은 방법으로 반복하여 접합압연을 행하였다. 이런 ARB를 무운할 조건에서 8사이클($\epsilon \sim 6.4$)까지 행하였다.

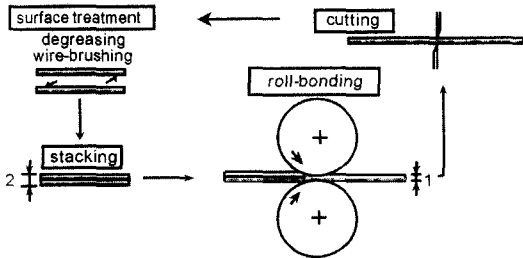


Fig. 2. Schematic illustration of accumulative roll-bonding process.

2.3. 시험 및 특성분석

기계적 성질은 상온에서 인장시험으로 평가하였다. 인장시편은 KS규격의 제5호 시편의 1/4 크기(평행부의 길이 15 mm, 폭 6 mm, 두께 1.7 mm)로 인장방향의 압연방향과 평행하도록 방전가공기로 잘라서 준비하였으며, 인장시험은 Instron type의 인장시험기를 사용하여 $10^{-3}s^{-1}$ 의 일정한 변형속도로 수행하였다. 미세조직은 광학현미경(OM) 및 투과전자현미경(TEM)을 사용하여 관찰하였다. OM조직은 ARB 전과 후의 Al 분말성형체의 횡단면을 과염소산 용액에서 전해 부식을 한 후에 관찰하였다. TEM 관찰용 시편은 1 mm두께의 시편을 두께방향으로 100 μm 까지 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 3은 분말피복압연/소결 후(그림 3a) 및 냉간압연 후(그림 3b)의 횡단면의 광학현미경 조직사진을 나타낸다. 분말피복압연/소결 후의 Al분말성형체는 그림에서와 같이 재결정조직을 나타내지만 결정립이 압연방향으로 다소 신장된 조직을 나타내는데 이것은 분말피복압연에 의해 제조된 Al분말성형체 조직의 특징 중의 하나이다⁹⁾. 냉간압연 후(ARB전)는 압연방향으로 신장된 전형적인 가공조직을 나타낸다. 이런 재료들의 기계적 성질을 표 1에 나타내었다. 냉간압연 후에 가공경화에 의하여 인장강도는 크게 증가하고 연신율은 감소함을 알 수 있다.

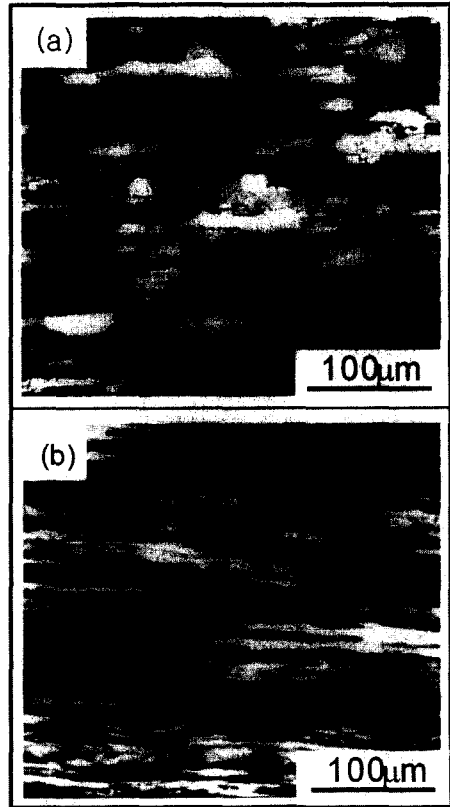


Fig. 3. Optical micrographs of Al powder compact after sheath rolling followed by sintering (a) and subsequent cold rolling (b).

3.2. ARB에 따른 미세조직의 변화

그림 4는 ARB의 사이클 수에 따른 Al 분말성형체의 두께방향의 반평면의 광학현미경 조직사진(횡단면)의 변화를 보여준다. 그림에서 $1c(c: 사이클)$ 후의 시편에서 결정립들이 압연방향으로 크게 연신되어 있으며, 결정립의 크기(두께)가 중심부위보다 표면부위에서 더욱 작은 것을 확인할 수 있다. 이것은 물과

Table 1. Mechanical properties of Al powder compact after sheath rolling followed by sintering and subsequent cold rolling

	소결 후	냉간압연 후 (ARB 전)
인장강도 (MPa)	69	117
연신율 (%)	58	9.7

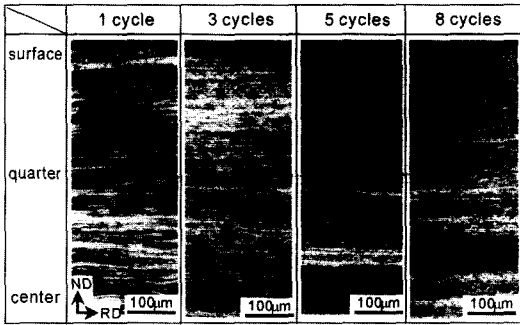


Fig. 4. Change in optical microstructure of Al powder compact with the number of ARB cycles.

피가공재의 마찰계수가 큰 상태의 압연에서 자주 나타나는 현상으로 중심 부위와는 달리, 표면 주위에는 압축변형(compression deformation)이외에도 롤과 재료 사이의 마찰로 인한 전단변형(shear deformation)이 부가적으로 도입되기 때문이다. 그런데, ARB에 있어서는 일반 압연에서 표면부위에만 도입되는 전단변형이 그 다음 사이클에서 중심부위로 겹쳐 들어가기 때문에 사이클 수가 증가함에 따라 더욱 복잡한 변형양상을 초래한다¹⁹⁾. 그러나, 두께방향으로의 조직적 불균일 상태는 사이클 수가 증가함에 따라 약화되어 8c 후에는 비교적 균일한 조직을 형성한다. 또한, 그림 4에서 사이클 수가 증가함에 따라 결정립 크기가 미세화 되어가는 것을 확인할 수 있으며, 5c 후에는 결정립의 형상을 거의 식별할 수가 없다. 또한, 사이클 수가 증가함에 따라 접합면의 수도 기하급수적으로 증가하여 8c 후에는 반평면에 127개의 접합면이 존재함에 틀림없으나, 오직 몇 군데만 식별이 가능할 뿐이다. 이것은 분말피복압연법에 의해 제조한 Al 분말성형체의 ARB에 있어서도 두 판재의 접합이 비교적 양호함을 나타낸다.

그림 5는 ARB에 따른 시편의 표면 부근의 TEM 조직사진을 나타낸다. 각 조직사진의 우측상단에 있는 회절도형은 각 조직의 중심에서 직경 1.6µm 범위에 조리개를 삽입하여 찍은 제한시야회절(selected area diffraction, SAD) 도형을 나타낸다. 1c 및 3c 후의 시편은 전형적인 가공조직인 전위셀 조직(dislocation cell structure)을 나타내고 있으며, SAD 도형도 단순한 모양을 나타낸다. 5c 후의 조직은 회복으로 인하여 전위밀도가 감소하여 비교적 선명한

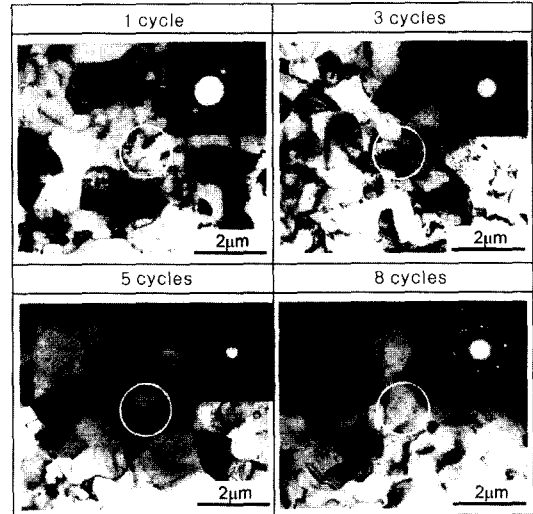


Fig. 5. Change in TEM microstructure near surface of Al powder compact with the number of ARB cycles. Observed on the plane perpendicular to normal direction (ND plane).

경계(boundaries)를 가진 초미세한 아결정립 조직(subgrain structure)을 나타내고 있으나 아결정립간의 방위차는 아주 작음을 SAD도형을 통해 알 수 있다. 8c 후에도 5c 조직과 유사한 아결정립 조직을 나타내지만, 결정립계가 더욱 선명하며, SAD도형에서 회절점의 퍼짐현상이 두드러지게 나타나며, 여분의 회절점들도 많이 관찰된다. 이것은 아결정립간의 방위차가 크게 증가했음을 보여준다. ARB사이클 수의 증가에 따른 이러한 TEM미세조직의 발달과정은 ARB된 타 재료¹⁶⁾와 매우 유사하다.

그림 6은 두께방향의 1/4부근의 TEM조직을 나타낸다. 1c, 3c 후의 재료 모두 표면부근과 유사하게 전위셀 조직을 나타내며 SAD도형에서 나타내듯이 cell 간 방위차가 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 그러나 표면부근의 조직과 비교해서 cell 사이즈가 크며 전위밀도도 큰 것을 알 수 있다. 5c 후의 재료의 경우, cell크기가 작아졌을 뿐 1c과 3c 후의 재료들과 유사한 전위셀 조직을 나타낸다. 이것은 표면부근 5c에서 아결정립이 발달했던 것과 큰 차이를 보인다. 이와 같은 부위에 따른 미세조직의 차이는 8c 후의 조직에서도 현저히 나타나며, 그림 6(d)에서 보듯이, 표면부근에서 나타났던 초미세한 아결정립들은 그다지 관찰되지 않음을 알 수 있다. TEM 조직에 있어

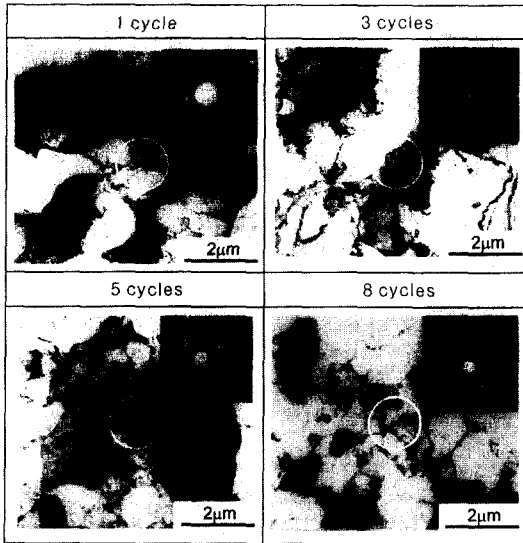


Fig. 6. Change in TEM microstructure in quarter of thickness of Al powder compact with the number of ARB cycles. Observed on the plane perpendicular to normal direction (ND plane).

서, 표면과 1/4부근에서의 이러한 조직형성의 차이는 ARB 중에 시편에 부여된 변형량이 두께방향으로 불균일하기 때문이다¹⁹⁾.

3.3. ARB에 따른 기계적 성질의 변화

ARB 사이클 수의 증가에 따른 Al 분말성형체의 기계적 성질의 변화를 그림 7에 나타내었다. 인장강도는 1c에서 크게 증가하지만 그 후로는 사이클 수가 증가함에 따라 오히려 다소 감소하는 경향을 보인다. 이와 같은 인장강도의 거동은 적어도 6c까지는 사이클 수의 증가와 함께 증가했던 다른 Al 합금들과 대조된다¹⁶⁾. 본 연구에 있어서, 이처럼 낮은 ARB 사이클에서 강도가 감소하는 것은 압연도중 또는 후에 회복 또는 재결정이 활발히 일어났기 때문이라 사료된다. 본 연구에 사용된 재료는 순도가 99.999%인 고순도 알루미늄 분말이다. 일반적으로 순도가 높으면 회복 또는 재결정 온도는 감소한다. 본 연구에 있어서 ARB전 재료는 이미 50% 냉간압연된 상태의 재료이다. 즉 ARB 전에 이미 1c 분량의 상당변형량($\epsilon \sim 0.8$)이 부가되어 시편은 가공경화로 인하여 인장강도가 69 MPa에서 117 MPa로 약 70% 증가한 상

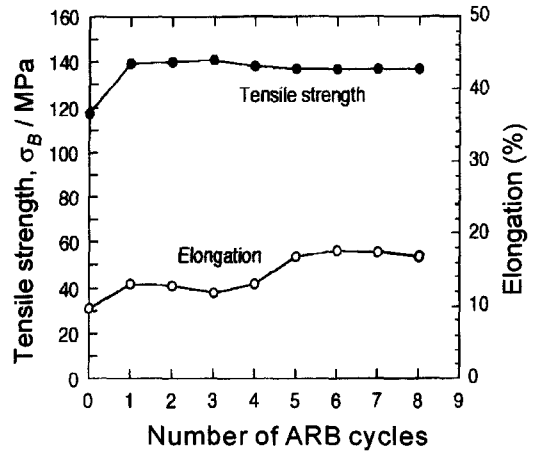


Fig. 7. Change in mechanical properties of Al powder compact with the number of ARB cycles.

태였다. ARB 1c 후에, 재료($\epsilon \sim 1.6$)는 더욱 가공경화되어 그림 7에서 보듯이 인장강도는 140 MPa까지 증가한다. 이것은 소결 후의 재료보다 2배 증가한 수치이다. 그러나 1c 이후에는 강도가 더 이상 증가하지 않는데, 이것은 가공경화에 의한 강도의 증가가 회복 또는 재결정에 의한 연화에 의해 소멸되기 때문이다. 한편 연신율은 사이클 수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸다.

4. 결 론

분말피복압연법에 의해 제조한 Al 분말성형체를 ARB법에 적용하여, 다음과 같은 결과가 얻어졌다.

1) ARB된 Al 분말성형체는 두께방향으로 불균일한 조직을 나타내었으며, 이것은 압연중에 도입되는 변형량이 두께방향으로 다르기 때문이다. 전단변형량의 도입이 컸던 표면부위에서 상대적으로 작았던 두께방향으로 1/4부위에서보다 초미세한 아결정립의 형성이 현저히 나타났다.

2) Al 분말성형체의 인장강도는 ARB의 1c 후에 소결 후의 재료보다 약 2배 증가하지만, 그 후는 ARB 사이클 수가 증가함에 따라 오히려 조금씩 감소하였다. 그 반면 연신율은 점진적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이것은 ARB중에 Al분말성형체 내에 회복 또는 재결정이 발생했기 때문이다.

감사의 글

본 연구는 2003학년도 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. S. H. Lee: J. Korean Powder Metall. Inst., **9** (2002) 153 (Korean).
8. S. H. Lee and C. H. Lee: J. Korean Powder Metall. Inst., **10** (2003) 97 (Korean).
9. S. H. Lee and C. H. Lee: J. Korean Powder Metall. Inst., **10** (2003) 103 (Korean).
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. S. H. Lee, S. J. Hahn and C. Y. Lim: J. Copper Tech., **19** (2004) 13 (Korean).
19. S. H. Lee, Y. Saito, N. Tsuji, H. Utsunomiya and T. Sakai: Scripta Mater., **46** (2002) 281.