

기계적 합금화한 Al-Ti 복합금속분말의 화학적 균질성과 분산상 형성

李光敏[†] · 文仁炯

한양대학교 공과대학 재료공학과

(1992. 3. 15 접수)

Chemical Homogeneity and Dispersoid Formation in Mechanically Alloyed Al-Ti Composite Metal Powders

Kwang-Min Lee[†] and In-Hyung Moon

Department of Materials Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received Mar. 15, 1992)

요 약. 본 연구에서는 고온용 Al-Ti 합금을 제조하기 위하여 복합금속분말의 화학적 균질성과 합금내에 형성되는 미세한 분산상에 대하여 조사하였다. Al-Ti 복합금속분말의 화학적 균질성은 400 rpm의 회전속도로 10시간 이상 기계적 합금화하였을 때 나타났으며 MA Al-Ti 합금의 화학분석결과, Ti 함량은 8.2 wt.%, 탄소 함량은 1.135 wt.%, 그리고 산소 함량은 0.233 wt.%였으며, 특히 탄소 함량은 스테아린산의 공정 제어제 중에 있는 약 90% 정도의 탄소가 최종적으로 합금 시편에 혼입되었음을 알 수 있었다. TEM 분석을 통하여 MA Al-Ti 합금의 기지조직내에 구형의 250 nm 크기인 Al₃Ti 금속간 화합물상과 침상형태의 폭 50 nm, 길이 150 nm 크기인 Al₂C₃ 탄화물상의 형성을 관찰하였으며 구형 모양을 갖는 약 20 nm 크기의 Al₂O₃ 탄화물상들이 이 합금의 입내 및 입계에 균일하게 분포되었음을 알 수 있었다.

ABSTRACT. Chemical homogeneity and dispersoid formation in mechanically alloyed Al-Ti composite metal powders were investigated in order to fabricate the high temperature Al-Ti alloys. The homogeneity of composite particles was able to be obtained by MA milling time more than 10 hours with the milling velocity of 400 rpm. The amounts of titanium, carbon and oxygen elements in MA Al-Ti alloys by chemical analysis were 8.2, 1.135 and 0.233 wt.%, respectively. The amount of carbon analyzed corresponds to 90 pct. of carbon contained the PCA of stearic acid. TEM analysis has revealed the presence of the rounded Al₃Ti dispersoids with the size of 250 nm and the Al₂C₃ dispersoids of cylindrical shape with a size of 50 nm in thickness and 150 nm in length. Also, the some rounded Al₂O₃ dispersoids with a size of about 20 nm were found in grain boundaries as well as in matrix.

Key Words: Chemical homogeneity and dispersoid formation, Al-Ti composite metal powders,

1. 서 론

일반적으로 Al 합금은 석출강화형 합금보다 분산강화형 합금에서 더 우수한 고온특성을 보이기 때문에 이 분산강화 합금의 분산상에 대한 연구가 고온재료

응용을 위해 주요 관심의 대상이 되고 있으며 고온에서의 사용온도 한계의 향상을 위하여 보다 열적으로 안정한 분산상을 지닌 Al 합금을 개발하고자 하는 많은 연구가 시도되고 있다.¹⁻⁴

기계적 합금화(Mechanical Alloying; MA) 방법은 1966년 경에 INCO사의 Paul D. Merica 연구 그룹의 Benjamin에 의하여 gas turbine용 Ni가 초내열 합금의 γ' 석출강화와 미세 산화물에 의한 분상강화 효과를 동시에 얻기 위하여 개발된 것으로서⁵, 이 방법은 합금을 구성하는 성분 원소의 분말들을 강력한 교반을 수반하는 고에너지 볼 밀에서 처리함으로써 성분 분말들을 분쇄 볼 사이에서 연속적으로 압접(cold welding)과 파괴(fracture)의 과정을 반복시켜 균일하고 미세한 합금상을 이룬 복합금속분말을 제조하는 방법이다. 이러한 MA 방법은 합금화가 되기 힘든 성분 원소를 혼합하여 미세한 분산상으로 얻을 수 있다는 점은 물론 성분의 합금화와 분산처리가 액상의 등장이 없이 고상반응으로만 이루어진다는 점에서 급냉응고기술(rapid solidification processing : RSP)이나 금속기지 복합상(metal matrix composite : MMC)의 제조방법보다 더 우수한 조직 특성을 기대할 수 있다.^{6,7}

Al-Ti 합금계는 전 조성 영역에서 3개의 금속간 화합물상을 형성하고 있으나 이 중 Al-rich 화합물인 Al₃Ti상은 DO₂₂ 형태로 a_0 가 3.848Å, c_0 가 8.596Å인 bct(body centered tetragonal) 구조로서 단위정당 8개의 원자를 갖는다.⁸ 이러한 Al₃Ti상은 중량비로 Al이 62.8%를 이루며 밀도는 3.3g/cm³로서 비교적 낮으나 용융온도는 1350°C나 되며 또한 내산화성도 양호한 것으로 알려져 있다.⁹ 따라서 이러한 Al₃Ti 화합물상들이 Al 기지금속내에 미세하게 분산되어진다면 기지금속을 크게 강화시킬 수 있을 것이다. 그러나 Al₃Ti상은 Al-Ti 계의 상평형도에서 알 수 있는 바와 같이 Al₃Ti상의 파괴분율이 10% 이상인 조성범위에서는 계가 너무 넓은 응고구간을 갖고 있기 때문에 용해응고방법으로는 조대한 조성의 Al₃Ti 형성을 피하기가 어렵다.¹⁰

따라서 본 연구에서는 MA 방법에 의한 고온용 Al-Ti 분산강화합금의 제조를 위해 근간이 되는 미세한 분산상의 형성을 관찰하고자 하였다. 즉 합금원소로 첨가되는 Ti이 MA 과정에 의해 submicron 크기의 Al₃Ti 금속간 화합물의 안정한 평형상으로 상변화되는가를 조사하였고 더 나아가 Al₆C₃와 Al₂O₃와 같은 MA 특유의 분산상들의 형성을 MA 분말의 화학분석 및 최종 합금에서의 TEM 분석을 통하여 조사하였다.

2. 실험방법

Al-Ti계의 기계적 합금화를 위하여 Al 분말은 창성

(주)사의 순도 99.5%인 -200mesh 입도의 입상 분말을 사용하였으며 Ti 분말은 Johnson Matthey사의 순도 99%인 -200mesh 입도의 스폰지상의 분말을 사용하였다. 기계적 합금화를 위한 Ti 분말의 첨가는 Al 분말의 중량비로 8%를 첨가하였으며 공정제어제(process control agent; PCA)로서는 1.5wt.%의 스테아린산을 사용하였다.

기계적 합금화는 미국 Union Process사의 0-1 batch attritor를 이용하여 행하였으며 attritor의 용기는 tefzel로 표면처리된 750cc 용량의 용기였다. 용기내의 분위기는 MA 도중 시료분말의 산화방지를 위해 아르곤 가스의 분위기로 하였으며 400 rpm의 회전속도로 기계적 합금화하였다.

MA 분말입자내의 Ti 분포형태의 EPMA 분석을 위한 시편은 호마이카 holder 안에 8mm 크기의 구멍을 내어 MA 처리된 분말을 넣고 이 구멍 위에 강력 접착제를 충분히 적시도록 부어서 경화시킨 후, 금 도금(gold coating)을 행하여 준비하였다.

MA Al-8wt.% Ti의 시료분말의 성형은 진공 열간 압축성형의 방법으로 행하였다. Hot press의 진공 chamber내로 성형 다이틀 넣고 3.5°C/min.의 온도로 승온하여 430°C의 온도에서 1.3 Pa의 진공으로 1시간 동안 degassing을 한 후, 연속적으로 200 MPa의 압력으로 성형하였다. 이렇게 성형된 시편의 X-선 회절시험은 Rikagu사의 X-Ray diffractometer를 사용하였으며 X-선은 Cu-K α radiation이었다. 이때 scanning speed는 8°/min.이었으며 scanning 각도는 5°에서 85°까지로 하여 시험하였다.

MA 합금분말 및 열간 압축성형된 시편들의 탄소분석은 Horiba사의 EMIA-1200, 산소분석은 Leco사의 TC-436의 분석기를 이용하여 행하였으며 이들 분석기들은 수 ppm까지 측정할 수 있는 고정밀 기기들이었다. 또한 합금 원소로 첨가된 Ti 원소의 분석은 0.02~0.03 ppm까지의 검출 한계를 지닌 Perkin-Elmer사의 Sequential Inductively Coupled Plasma Spectrophotometer(Model : Plasma 40 Emission Spectrometer)를 이용하여 3회씩 측정하였다.

진공 열간 압축성형된 시편의 TEM(Transmission Electron Microscopy) 조직관찰은 JEOL사의 JEM-200CX의 TEM을 이용하여 합금의 미세구조와 합금내의 분산상 크기 및 형태를 조사하였고 제한시야회절(selective area diffraction, SAD) 패턴을 통하여 분산상

의 정성분석을 행하였다. 이때 가속전압은 200kV였다. TEM 시편은 40 μ m 두께까지 기계적으로 연마한 후, -20 $^{\circ}$ C의 Nital(30% HNO₃+70% CH₃OH) 전해액 속에서 25V(DC)로 전해 연마하여 준비하였다.

3. 실험결과 및 고찰

Al-Ti 복합금속분말의 특성 및 화학적 균질성

Photo. 1은 Al-8wt.% Ti의 조성에 1.5wt.%의 스테아린산을 첨가한 혼합 분말을 아르곤 가스의 분위기하에서 400rpm의 회전속도로 120분 동안 기계적 합금화시켜 SEM으로 관찰한 복합금속분말의 단면과 Ti 분말입자를 EDS의 X-ray image로 분석한 결과를 나타낸 것이다. Photo. (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 화살표로 표시된 Ti 분말입자는 Al 분말입자들 사이에 샌드위치식으로 끼워져 있으며 EDS로 분석한 (b)의 사진을 보면 분말단면의 화살표로 표시된 부위에 Ti 원소의 dot mapping된 상들을 확인할 수가 있다. 이 미세구조는 기계적 합금화하는 동안 볼 사이의 큰 압축응력으로 인하여 금속 분말입자들이 판상으로 변형되고 이때 나타나는 새로운 표면들이 서로 접촉하여 냉간압접(cold welding)되기 때문에 형성되는 층상 구조이다. 이 단면 조직은 MA 초기 단계의 특유한 lamellar 조직이라 할

수 있다. 이와 같이 띠 모양(band) 형태를 하는 Ti 입자는 대략 1 μ m 크기의 폭을 가지나 기계적 합금화가 더 진행됨에 따라 이러한 띠 모양의 형태는 계속 얇아질 것이며 최종단계에서는 깨져서 Al 입자내에 매우 미세하게 분포될 것이다.

MA 분말의 합금 여부는 MA 과정을 거친 한 개의 Al 분말입자 내에 합금원소인 Ti의 분포 형태가 어떻게 존재할 것인지 하는 것을 규명해 봄으로써 그 합금 여부에 대한 보다 구체적인 제시를 할 수 있을 것이다. Photo. 2는 10시간 동안 기계적 합금화시켰을 때의 분말의 미세 구조와 Ti 원소를 EDS로 분석한 결과를 보여주고 있다. (a)의 미세조직에서는 미소기공이 다소 존재하나 분말조직의 불균질성을 관찰할 수 없으며 이 (a) 부위를 Ti 원소의 X-ray image로 나타낸 (b)의 경우를 보면 Ti 분포 형태는 한 개의 분말입자내에 거의 미세한 크기로 균일하게 분포되었음을 알 수 있었다. 결국 이렇게 균일하게 분포된 Ti 원소는 후속 열처리에 의해서 Al과 반응하여 안정한 평형상인 Al₃Ti 금속간 화합물로 상변화될 것으로 생각되며, 이의 확인은 Figure 2의 X-선 분석과 Photo. 3의 TEM 분석에서 행하였다.

한편, 본 MA 공정의 정상상태(steady state)는 분말의 미세구조외에 MA 분말의 포화 정도(saturated

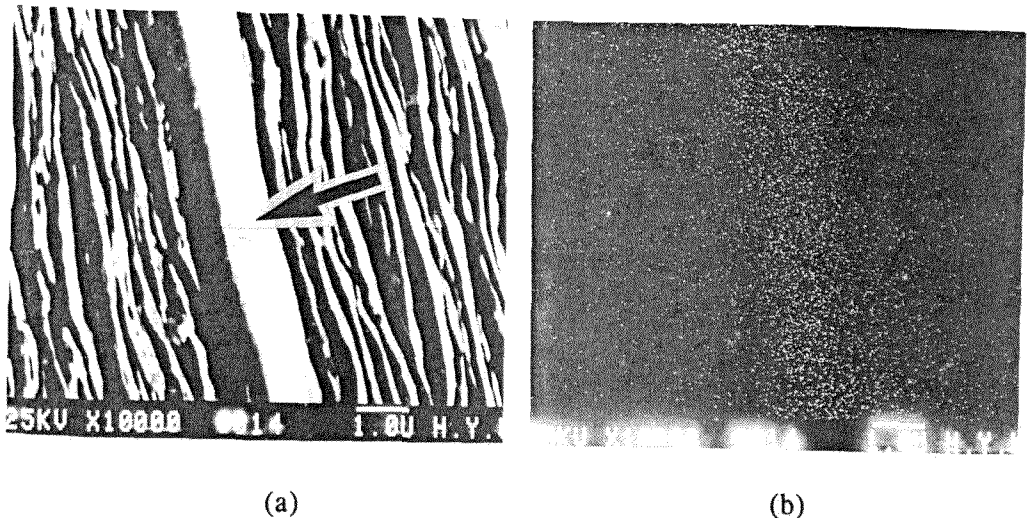


Photo. 1 SEM micrograph (a) and EDS analysis (b) of Al-8wt.% Ti powder after mechanical alloying for 120 min. with 400 rpm velocity showing the unique lamellar structure. The arrow indicates Ti element.

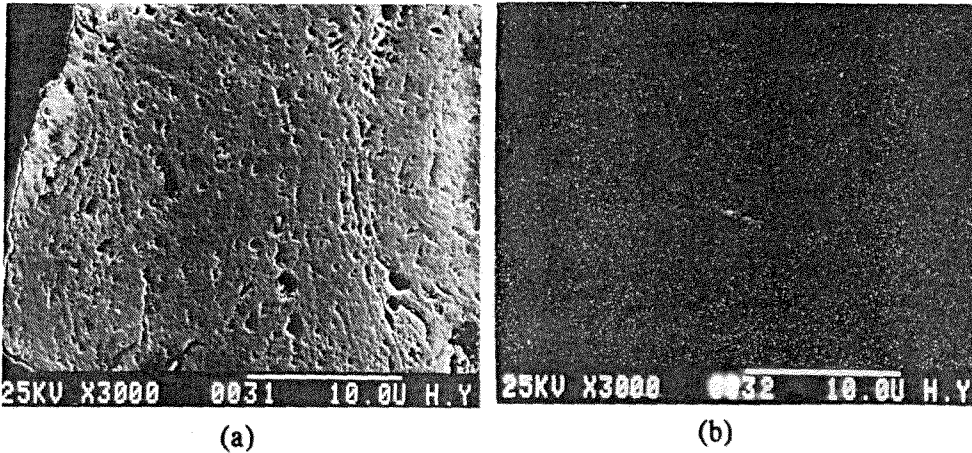


Photo. 2 SEM micrograph and EDS analysis of Al-8wt.% Ti powder after mechanical alloying for 10hr. with 400 rpm. ; (a) the polished powder surface and (b) X-ray image of Ti element on the particle shown in (a).

hardness), 일정한 입도분포, 화학적 균일성 등으로 최종단계를 평가하였으며¹¹ submicron 크기의 AlTi 화합물상을 형성하기 위한 시료분말은 400rpm의 회전속도에서 15시간 동안 기계적 합금화를 행하여 준비하였다.

화학분석과 분산상의 최대 부피분율

Figure 1은 기계적 합금화 시간에 따라 분석된 MA 분말의 산소 및 탄소의 함량 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 초기 원료 분말의 탄소 함량은 0.01%이나 1시간 동안 MA가 진행된 경우의 그 함량은 약 0.8%까지 급격히 증가함을 알 수 있다. 그 후 7시간에서부터는 약 1.01%로 일정한 값을 나타내고 있다. 이러한 탄소의 근원(source)은 공정 제어제인 스테아린산으로부터 기인된다. MA 전 혼합 분말의 1.5%의 스테아린산에서 계산되어지는 탄소량이 1.14%이고 실제 정상상태라 할 수 있는 10시간 이후에서의 측정된 탄소량이 1.01%를 나타내는 바, 공정 제어제 중에 있는 약 90%의 탄소가 MA 도중에 분말에 혼입되었음을 알 수 있다.

MA 시간에 따른 산소 함량의 변화는 불규칙한 양상을 보여주고 있다. MA 초기 단계에서의 산소량의 급속한 증가는 MA시킨 분말의 형태와 매우 밀접한 관계를 갖는 것으로 생각된다. 즉 MA 초기 단계에서는 분말입자가 판상화 및 층상화되는 영향 때문에 분말의

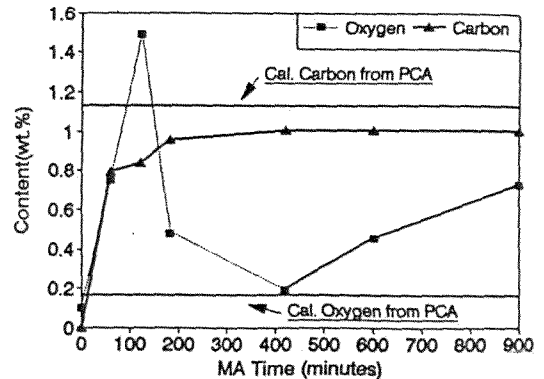


Figure 1. Variation of oxygen and carbon content in mechanically alloyed powder as a function of MA processing times.

비표면적이 증가하게 됨으로써 이 시료 분말들이 분석 전 대기 중에 노출됨에 따라 산화가 급속도로 진행되어 고농도의 산소를 나타낸 것으로 생각된다.¹² 10시간 및 15시간 MA한 경우의 산소량은 각각 0.46%, 0.73%로 분석되었는데, 이는 PCA로부터 혼입될 수 있는 산소의 양(0.17%)보다는 매우 큰 값을 나타내고 있다. 이러한 경향은 대기 중의 분석전 노출 뿐만 아니라 장시간 MA시 일어난 분말의 산화로 생각된다. 물론 MA 분말의 산소 함량은 성형전의 진공 탈가스 과정에서 상당량이 제거되기 때문에 최종 합금의 화학조성에서

다시 논의하였다. 한편, MA전에 분석된 원료분말의 산소량은 0.09%였다.

Table 1은 열간 압축성형된 MA Al-Ti 합금의 화학 분석 결과와 이들 결과로부터 얻어진 Ti 및 잔류 탄소와 산소의 함량들이 기지금속인 Al과 반응하여 각각 Al₃Ti, Al₄C₃, Al₂O₃의 화합물상들을 형성한다 할 때 이론적으로 계산된 각 분산상들의 최대 부피분율을 나타낸 것이다. 분석된 8.2wt.%의 Ti 함량은 MA 초기에 첨가된 Ti 양과 거의 같은 값을 보이고 있으며 탄소 및 산소량은 각각 1.135wt.%와 0.233wt.%씩 합금내에 함유되었음을 알 수 있다. 정상상태의 MA 조건하에서 제조된 MA 분말과 열간 압축성형된 합금에서 각각 분석된 탄소 및 산소 함량, 그리고 PCA로부터 이론적으로 계산된 각각의 값들을 비교하여 보면 분말 중의 탄소 함량은 열간 압축성형된 최종 합금에서의 탄소량과 거의 같은 값을 보이고 있는데, 결국 이로부터 공정 제어 중에 있는 약 90% 정도의 탄소가 최종적으로 합금 시편에 혼입되었음을 알 수 있다. 그러나 압축성형된 합금에 잔류하는 0.23wt.%에 해당하는 산소 함량은 성형전 MA 분말에 있던 0.73wt.%의 산소 함량보다 매우 낮은 값을 보이는데, 이는 성형전의 진공 탈가스 과정에서 약 70%의 산소가 제거되었기 때문이다.

Table 1. Chemical Compositions and Maximum Theoretical Volume Percent of Dispersoids as Calculated from the Compositions of MA Al-Ti Alloys.

[(wt. %)/(vol. %)]					
Alloy	Al	Ti/Al ₃ Ti	C/Al ₄ C ₃	O/Al ₂ O ₃	Total
Al-8Ti	bal.	8.2/18.7	1.1/4.9	0.2/0.4	9.5/23.9

각 분산상들의 이론적인 최대 부피분율은 다음과 같은 과정에 의해서 계산되었다(Al₃Ti, Al₄C₃, Al₂O₃의 분산상이 있으나 계산 과정은 모두 같은 방법에 의해서 하기 때문에 Al₃Ti 분산상인 경우만 예를 든다). 8.2wt.%의 Ti 함량(w_{Ti})이 모두 Al₃Ti상을 형성할 때 필요한 Al 양(w_{Al})은 Al₃Ti의 화학양론비에 의해서 식 (3.1)과 같은 관계식에 따라 계산되었다.

$$w_{Al} = w_{Ti} \cdot \frac{\Phi_{Al} / Al_3Ti}{\Phi_{Ti} / Al_3Ti} \quad (3.1)$$

여기서 Φ_{Al/Al_3Ti} : Al₃Ti 중의 Al 무게비

Φ_{Ti/Al_3Ti} : Al₃Ti 중의 Ti 무게비이다.

윗 식에 의해서 계산된 Al의 무게비와 초기 Ti의 무게비를 더하게 되면 전체적인 Al₃Ti의 무게비(22.04wt.%)가 얻어진다. 이상과 같은 방법으로 Al₄C₃와 Al₂O₃ 분산상인 경우에도 각 화합물상의 화학양론비에 근거하여 각 상의 무게비를 계산할 수 있다. 이러한 방법으로 구해진 무게비는 각 분산상의 밀도 (Al₃Ti : 3.3g/cm³, Al₄C₃ : 2.36g/cm³, Al₂O₃ : 3.99g/cm³)를 고려하여 다시 부피분율로 계산되어질 수 있으며 Table 1에서 볼 수 있는 바와 같이 최종적으로 계산된 Al₃Ti 화합물상의 부피분율은 18.7%, Al₄C₃의 경우는 4.89%, Al₂O₃의 경우는 0.35%였다. 결국 MA Al-Ti 합금의 고온응용에 기여할 수 있는 계산된 분산상들의 총 부피분율은 23.9%였다.

합금내의 분산상 관찰 및 상(phase)의 확인

Figure 2는 진공 열간 압축성형된 Al-8wt.% Ti 합금의 X-선 회절 시험결과를 나타낸 것으로서 (111), (200)면 등에서의 Al peak 와 (112), (200)면 등에서의 Al₃Ti의 금속간 화합물상의 peak를 관찰할 수 있다. 이 Al₃Ti 금속간 화합물상의 peak는 MA 과정 중에 과포화 고용된 Ti이 고온 성형시의 후속 열처리에 의해서 안정한 평형상인 Al₃Ti 금속간 화합물상으로 변화되었기 때문에 형성된 것이며, 이 화합물상의 형상 및 크기는 Photo. 3에 나타내었다.

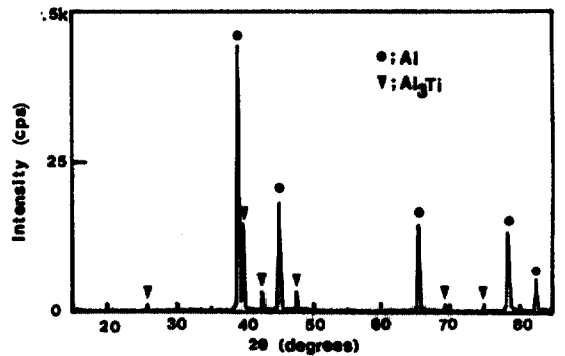


Figure 2. X-ray diffraction pattern of MA Al-8wt.% powder compact, hot pressed in a vacuum of 1.3 Pa at 430°C for 1hr.

Photo. 3은 MA Al-8wt.% Ti 합금을 600°C에서 3시간 동안 열처리한 후, TEM으로 관찰한 Al₃Ti 화합물상의 크기 및 형상(a)과 SAD pattern(b)을 나타낸 것이다.

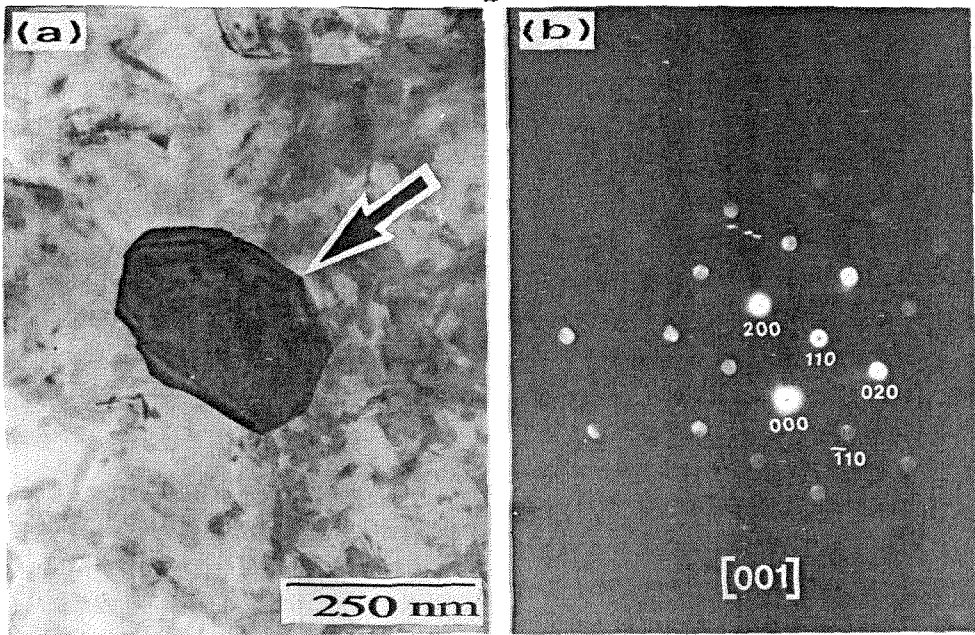


Photo. 3 Transmission electron micrograph and selected area diffraction pattern of MA Al-8wt.% Ti alloy after annealing at 600°C for 3hr. ; (a) bright field showing the image of Al_3Ti indicated by an arrow, (b) SAD pattern with $B=[001]$ identifying Al_3Ti phase with $D0_{22}$ structure.

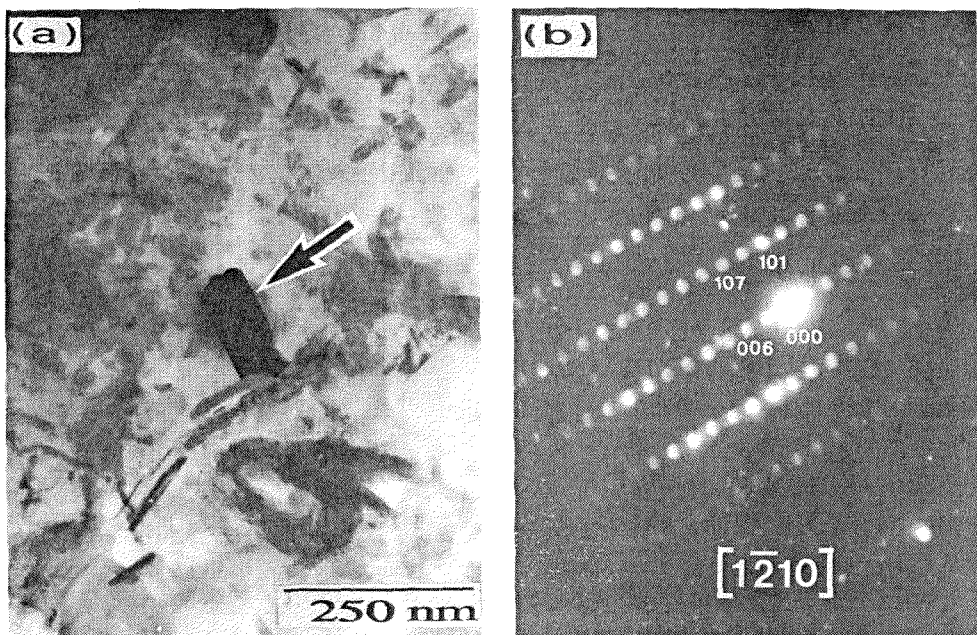


Photo. 4 Transmission electron micrograph and selected area diffraction pattern of MA Al-8wt.% Ti alloy after annealing at 600°C for 3hr. ; (a) bright field showing the image of Al_4C_3 indicated by an arrow, (b) SAD pattern with $B=[1\bar{2}10]$ identifying Al_4C_3 phase with hexagonal structure.

명시야상의 (a) 조직에서 화살표로 표시된 구형의 250 nm 크기의 분산상은 (b)의 spot pattern 분석 결과, [001]의 zone axis에서 나타난 Al₃Ti 금속간 화합물상임을 확인할 수 있었다. 앞서 서론에서 언급한 바와 같이 고온에서 열적으로 안정한 이러한 submicron 크기의 Al₃Ti 화합물상의 형성은 이 합금의 고온 응용의 가능성을 긍정적으로 제시해 주는 결과라 할 수 있다.

Photo. 4는 MA 합금내의 탄화물(Al₃C₃) 분산상을 TEM으로 관찰하여 그 크기 및 형상(a)과 SAD pattern (b)을 나타낸 것이다. (a) 조직에서 화살표로 표시된 바와 같이 기지조직내에 침상 형태의 폭 50 nm, 길이 150 nm 크기인 Al₃C₃ 탄화물상의 분산체를 관찰할 수 있다. 이러한 탄화물상은 (b)에서 보이는 [1210]의 zone axis에서 얻어진 spot pattern의 분석으로부터 확인되었다. 여기서 Al₃C₃의 탄화물상은 공정 제어제인 스테아린산으로부터 탄소가 MA 분말에 혼입되어 이 탄소가 후속 열처리 과정에서 Al과 반응하여 안정한 평형상으로 되었기 때문에 형성되는 것으로 간주된다.

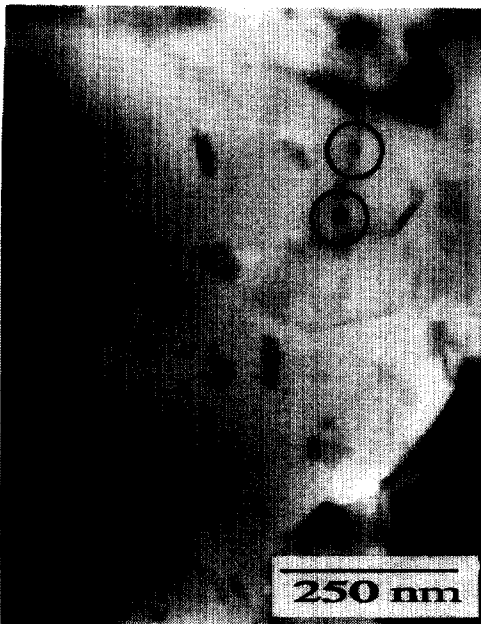


Photo. 5 Bright field transmission electron micrograph of MA Al-8wt.% Ti alloy after annealing at 600°C for 3hr. showing the morphology and size of Al₂O₃ dispersoids (by circles.)

Photo. 5는 Photo. 3과 같은 조건의 시편에서 관찰된 TEM 미세조직을 나타낸 것으로, 구형 또는 타원형 모양을 갖는 약 20nm 크기의 Al₂O₃ 산화물상들이 입내 및 입계에 균일하게 분포되어 있음을 알 수 있다. 이러한 산화물상은 spot pattern으로는 상의 확인을 못하였지만 보고된 Arzti의 분산강화 Al 합금의 연구¹¹⁾와 회절환의 분석¹²⁾으로 미루어 보아 γ-Al₂O₃의 상으로 생각된다. 이러한 Al₂O₃의 산화물상은 초기 Al 원료 분말의 산화피막이 파괴되어 기지조직에 분산되는 것과 MA 공정중에 새로이 형성되는 산화물에서부터 형성되는 것으로 생각된다.

4. 결 론

1. Al-Ti 복합금속분말의 화학적 균질성은 10시간 이상 기계적 합금화하였을 때 나타났다.
2. MA Al-Ti 합금의 화학분석결과, Ti 함량은 8.2wt.%, 탄소 함량은 1.135wt.%, 그리고 산소 함량은 0.233wt.%였으며, 특히 탄소 함량은 스테아린산의 공정 제어제 중에 있는 약 90% 정도의 탄소가 최종적으로 합금 시편에 혼입되었음을 알 수 있었다.
3. TEM 분석을 통하여 MA Al-Ti 합금의 기지조직내에 구형의 250nm 크기인 Al₃Ti 금속간 화합물상과 침상 형태의 폭 50nm, 길이 150nm 크기인 Al₃C₃ 탄화물상의 형성을 관찰하였다. 또한 타원형 또는 구형 모양을 갖는 약 20nm 크기의 Al₂O₃ 산화물상들이 이 합금의 입내 및 입계에 균일하게 분포되었음을 알 수 있었다.

5. 후 기

본 연구는 한국과학재단의 1991년도 목적기초 연구비로 이루어진 연구결과입니다. 연구비를 지원하여 주신 한국과학재단에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. B. Saal, J. Albrecht, G. Luetjering, J. Becker and G. Fischer : *Light-Weight Alloys for Aerospace Applications*, ed. Eui W. Lee, E. Henry Chia and Nack J. Kim, p. 3, TMS, Warrendale, PA, 1989.
2. F. H. Froes and J. R. Pickens : *J. Met.*, **36**, 14, (1984).
3. D. C. Erich and S. J. Ponachie : *Met. Prog.*, **121**, 228, 1982.
4. W. M. Griffith, R. E. Sanders, Jr. and C. J. Hildeman : *High Strength Powder Metallurgy Aluminum Alloys*,

- ed. M. J. Koczak and G. J. Hildeman, p.209, TMS, Warrendale, PA, 1982.
5. J. S. Benjamin : *New Materials by Mechanical Alloying Techniques*, ed. E. Arzt and L. Schultz, p. 3, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde, Oberursel. 1989.
 6. F. H. Groes : *J. Met.*, **41**, 25, (1989).
 7. J. S. Benjamin : *Metal Powder Report.* **45**, 122, (1990).
 8. K. Schubert : *Intermetallic Compounds*, ed. J. H. Westbrook, p. 118, p. 159, Robert, E. Krieger Publishing Co., New York, NY, 1977.
 9. R. C. Benn, R. K. Mirkandani and A. S. Watwe : *Moder Developments in P/M*, **21**, 479, (1988).
 10. W. E. Frazier and M. J. Koczak : *High Strength Powder Metallurgy Aluminum Alloys II*, ed. G. J. Hildeman and M. J. Koczak, p. 517, TMS, Warrendale, PA. 1986.
 11. 이광민, 김진천, 문인형 : *대한금속학회지*, **29**, 158, 1991.
 12. 이광민 : 박사학위논문, 한양대학교, 서울, 1992
 13. E. Arzt and J. Rösler : *Dispersion Strengthened Aluminum Alloys*, ed. Y. W. Kim and W. M. Griffith, p. 31. TMS, Warrendale, PA, 1988.