

## 급속응고 Al-20 wt% Si 합금분말 압출재의 ECAP

윤승채 · 홍순직\* · 서민홍 · 팜광 · 김형섭

충남대학교 금속공학과

\*충남대학교 급속응고신소재연구소

### Equal Channel Angular Pressing of Rapidly Solidified Al-20 wt % Si Alloy Powder Extrudates

Seung Chae Yoon, Soon-Jik Hong\*, Min Hong Seo, Pham Quang and Hyoung Seop Kim

Department of Metallurgical Engineering Chungnam National University, Daejeon 305-764 Korea

\*RASOM ERC, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 11 December 2003 ; Accepted form 17 February 2004)

**Abstract** In this paper processing and mechanical properties of Al-20 wt% Si alloy was studied. A bulk form of Al-20Si alloy was prepared by gas atomizing powders having the powder size of 106-145  $\mu\text{m}$  and powder extrusion. The powder extrudate was subsequently equal channel angular pressed up to 8 passes in order to refine grain and Si particle. The microstructure of the gas atomized powders, powder extrudates and equal channel angular pressed samples were investigated using a scanning electron microscope and X-ray diffraction. The mechanical properties of the bulk sample were measured by compressive tests and a micro Vickers hardness test. Equal channel angular pressing was found to be effective in matrix grain and Si particle refinement, which enhanced the strength and hardness of the Al-20Si alloy without deteriorating ductility in the range of experimental strain of 30%.

**Keywords** : Al-20Si alloy, Rapidly solidified powder, Extrusion, Equal channel angular pressing(ECAP), Powder consolidation

#### 1. 서 론

산업이 발전함에 따라 연비절감과 환경문제가 대두되고 있는 이 시대에 차세대의 자동차, 항공기 및 전자장비에는 기존의 재료보다 향상된 기계적 성질의 새로운 소재와 공정 개발이 요구된다. 최근 획기적인 물성의 향상을 가져올 수 있는 나노/초미세 결정재료에 대한 연구가 큰 관심을 끌면서 많은 연구자들이 나노결정의 Al 합금을 개발하려는 노력이 계속되고 있다.<sup>1-3)</sup> 나노 결정재료는 결정립 크기가 아주 작으므로 결정립계 부근에 무질서하게 분포되어 있는 원자의 비율이 높고, 따라서 결정립계의 면적이 큰 비율을 차지한다. 이러한 커다란 결정립계의 비율

의 효과로 인하여 많은 물리적 성질이 영향을 받는다. 특히 기계적 성질 면에서는, 강도가 증가하고 내마모성이 좋아지는 효과가 있다. 이러한 나노/초미세 결정재료의 제조 방법에는 고상법, 기상법, 및 액상법을 예들 들 수 있으나, 액상법을 이용한 급속응고법은 액상급속을 10<sup>4</sup> K/s 이상의 속도로 급속히 응고시켜서, 과포화고용체, 준 안정상 뿐 만 아니라 나노 결정 재료의 제조가 가능하다. 이와 같은 결과를 고려해 볼 때, 급속응고법을 Al-Si계 합금에 응용하여 기계적 강도 및 내마모성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

과공정 Al-Si합금은 강도 및 내마모성이 우수할 뿐만 아니라 열팽창계수와 밀도가 작아서 주로 자동차

의 엔진부품이나 에어컨용 공기압축기에 광범위하게 사용되어 왔다. 그러나 급속한 산업의 발전은 더욱 가혹한 환경에서도 가동이 가능한 재료가 요구되어 지면서 Al-Si계 합금에서도 새로운 공정에 의한 강도와 내마모성을 향상시키려는 연구가 시도되고 있다. 급속응고 기술을 이용한 Al-Si계 합금에 대해서는 Fe 함량 변화에 의한 미세조직과 기계적 특성 그리고 분말입자 크기 효과에 관한 연구가 진행되었으며, 4원계 합금으로는 Cu, Mg, Zr, Cr 첨가에 의한 미세조직과 기계적 특성 평가 그리고 제조공정에 관한 논문들이 보고 되고 있다.<sup>4,6)</sup> 그러나 Al-Si계 합금에서 나노결정 재료를 제조하기 위한 연구는 일부 논문에서 보고<sup>7)</sup> 되고 있으나 새로운 합금설계나 공정에 의한 고강도 재료의 개발이 계속적으로 요구된다. 이에 본 연구에서는 이들 재료의 합금설계에 의한 기계적 성질 개선보다는 성형화 공정을 변화시켜서 이들 재료의 기계적 특성을 향상시키려고 한다.

분말재료를 벌크성형화하는 대표적인 분말가공 공정으로는 열간압출 공정을 들 수 있으며, 이 공정은 단일 공정에 의해 이론밀도까지의 성형이 가능하고, 열간정수압성형법(HIP) 보다 낮은 성형온도에서 완전치밀화가 가능하므로, 분말을 성형할 경우 우수한 기계적 성질을 나타낼 뿐만 아니라, 대량 생산에도 유리한 이점 등이 있다.<sup>8)</sup> 그러나 분말압출법은 분말의 완전치밀화를 이루는 것이 가능하지만, 일반 냉간가공보다는 높은 온도에서 성형을 하기 때문에 결정립 미세화에 한계를 가지고 있다. 이에 본 연구에서는 이러한 열간압출 공정에서 나타나는 결정립미세화의 한계를 심한소성가공(SPD, Severe Plastic Deformation) 공정을 통한 추가 결정립미세화를 통하여 이들 문제점을 극복하고자 한다. 심한소성변형공정 중에서 ECAP (Equal Channel Angular Pressing)<sup>8-11)</sup> 공정은 다결정의 벌크재료를 다이로 통과시켜 단면적과 단면형상의 변화 없이 압출하는 새로운 성형법으로 재료의 탄성성질, 강도, 미소경도, 초소성, 자기적 성질 등에서 우수한 특성을 나타내는 것으로 보고 되고 있다. ECAP 공정은 전단응력을 재료에 가함으로 전위의 상호 작용을 크게 할 수 있을 뿐만 아니라, 재료 내의 불순물이나, 기공, 산화막 등을 깨뜨림으로 재료의 조직을 더 효과적으로 미세화할 수 있는 공정이다. ECAP 공정에서는 다결정재료를 1  $\mu\text{m}$  이하의 초미세결정립이나 나노결정립 재

료까지 제조할 수 있다. ECAP로 제조된 초미세한 결정의 재료는 조대한 결정의 재료와 다른 많은 우수한 성질을 나타내어 많은 재료에(Al<sup>12)</sup>, Cu<sup>13)</sup>, Mg<sup>14)</sup>, Ni<sup>15)</sup>, 공정합금<sup>16)</sup>, 금속간화합물<sup>17)</sup> 등) 응용되고 있다. 기존 연구에서 보고된 급속응고, 열간압출 성형 그리고 ECAP공정을 함께 진행하면 새로운 특성을 나타내는 재료의 제조가 가능할 것으로 기대된다.

이에 본 연구에서는 급속응고, 열간압출 및 ECAP 공정을 이용한 새로운 공정을 통하여 초미세 조직과 우수한 기계적 특성을 갖는 Al-20 wt% Si계 합금을 개발하고자 한다. 특히, 이번 연구에서는 이원계 Al-20 wt% 합금에서 이들 공정을 진행하는 동안 결정립과 Si 입자 변화에 대한 미세조직과 기계적 특성 평가에 대한 결과를 보고하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구의 Al-20 wt% Si 합금 분말은 기체분사법으로 제조되었으며, 분말제조를 위한 Al-20 wt% Si (이후에는 Al-20Si로 표기하였음) 합금 용탕은 상업용으로 이용되는 순금속을 흑연 도가니에 주입하여 용융하였다. 용융된 용탕은 용탕온도와 동일한 온도로 유지된 턴디쉬 노에 주입되었으며, 용탕은 턴디쉬 바닥에 설치된 노즐의 3 mm 오리피스를 통하여 흐르다가 분사되는 질소기체에 의해 분무되어 합금분말로 제조되었다. 분사된 질소기체의 압력은 0.8 MPa 이었으며, 용탕유속은 약 0.8 Nm<sup>3</sup>/min이었다. 제조된 분말의 입도는 수 마이크로에서 수 백 마이크로 그 크기가 다양하였으나 본 연구에서는 106-145  $\mu\text{m}$  크기의 분말을 이용하였다. 26  $\mu\text{m}$  이하의 미세한 분말이 기계적 성질은 우수하지만, 미세한 분말의 회수율이 높지 않으므로 회수율이 높은 조대한 분말을 이용하여 후 가공을 통한 물성향상을 시도하였다. 기체분사법으로 제조된 분말은 알루미늄 캔에 주입하여 75% 이상의 밀도로 냉간압분 성형되었으며, 냉간압분 성형체는 400°C에서 10<sup>-3</sup> torr로 1시간 동안 탈기체 처리를 하였다. 탈기체 처리 후 밀봉된 성형체는 수평형 압출기를 이용하여 2.5 mm/s의 램 속도로, 25:1의 압출비로 400°C의 압출온도에서 열간압출을 하였다. 압출재의 표면에는 압출결함에 의한 부풀림이나 균열은 관찰되지 않았다.

ECAP 공정을 위한 시험편은 압출된 압출재 표면

의 알루미늄(알루미늄 캔으로 형성된 표면)을 제거한 후 압출방향과 평행한 방향으로 6 mm×6 mm×50 mm의 크기로 준비되었다(그림 1). 그림 2는 본 연구에 이용된 ECAP 가공용 다이의 개략도 나타내고 있다. ECAP 금형은 채널각과 모서리각이 각각 90°인 것을 사용하였으며, 재료에 부여되는 유효변형량은 약 1에 해당한다. ECAP 공정은 압출방향과 평행한 방향에서 채취된 시료를 윤활재를 바른 후 냉간에서 변형속도 1 mm/s로 8회(pass)까지 수행되었다. 매 공정 후 시험편을 180° 회전시켰으며, 이는 짝수 회수의 공정에 의해 전단면상에서 전 공정과 반대 방향으로 전단변형이 작용하여 등축의 결정립을 얻을 수 있기 때문이다.

기체분사된 분말, 압출재 및 ECAP된 시료의 미세조직 관찰은 Keller 부식액으로 과부식시킨 후 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer)가 장착된 주사전자현미경(SEM, JSM 5410)으로 분석하였으며, 결정구조는 구리 타겟을 이용하여, 30 mA, 40 kV로 20-80°까지 X선 회절분석기(SIEMENS D5000)를 이용하여 분석하였다. 압축시험은 ECAP된 재료를 3 mm×2 mm×2 mm 크기로 가공한 후 MTS장비를 이용하여 10<sup>-3</sup> mm/s의 크로스헤드 속도로 상온에서 수행되었다. 경도시험은 미세하크스 경도계(HM-122 AKASHI)를 이용하여 하중 100 g에서 부하시간 10 초의 조건으로 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 기체분사된 분말 및 성형체의 미세조직

기체분사법으로 제조된 Al-20Si 합금분말은 수 마이크로에서 수 백 마이크로 크기의 다양한 크기를 나타냈으며, 미세한 분말에서는 미려한 표면을 나타냈지만 조대한 분말의 표면은 낮은 냉각속도에 의하여 거친 형태를 나타냈다. 기체분사된 106-145 μm 크기 분말의 형상은 일부 구형인 것도 관찰되었지만, 대부분은 중/형 비가 3-4 정도 되는 침상형을 나타냈다. 일반적으로 분말입자가 작을수록 우수한 기계적 특성을 나타내지만, 본 연구에서는 기체분사로 제조된 분말을 압출성형하고, 압출재의 ECAP 가공 회수

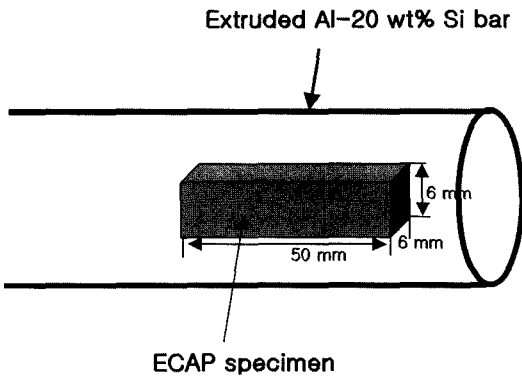


Fig. 1. Schematic diagram of the preparation of ECAP specimen from extruded Al-20 wt% Si bar.

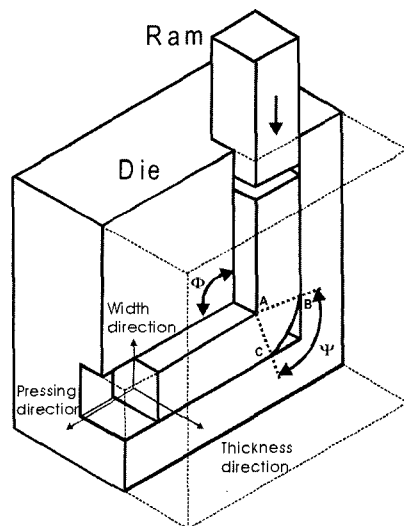
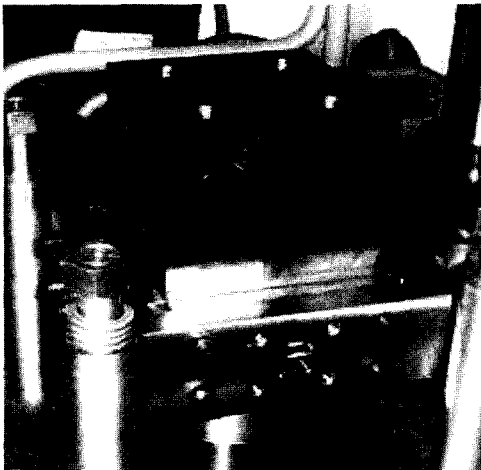


Fig. 2. ECAP die set and the schematic diagram of the ECAP processing.

(pass)가 미세조직과 기계적 성질에 미치는 효과를 해석하기 위하여 초정이나 공정 Si입자의 크기 변화를 쉽게 관찰할 수 있는 106-145  $\mu\text{m}$  크기의 조대한 분말을 선택하였다.

그림 3(a)와 (b)는 기체분사된 Al-20Si 합금분말(106-145  $\mu\text{m}$ )의 단면조직과 열간압출된 압출재의 길이 방향의 단면조직을 주사전자현미경으로 관찰한 사진을 각각 나타내고 있다. 분말의 단면조직은 약 10  $\mu\text{m}$  크기의 초정 Si과 미세한 공정조직이 Al 기지에 균일하게 분포하고 있음을 알 수 있다. 초정 Si의 형상은 주조조직<sup>19)</sup>에서 주로 관찰되는 판상이나 침상의 Si은 관찰되지 않고 급속응고 효과에 의하여 주로 다각형의 형상을 나타내고 있다. 그림 3(b)는 압출재의 미세조직을 나타내는 것으로 분말의 미세조직과 마찬가지로 Al 기지 외에 초정과 공정 Si으로 구성되어 있으며, 초정 Si 입자의 크기는 약 5  $\mu\text{m}$ 의 크기를 나타내고 있다. 이와 같은 Si 입자의 크기 감소는 압출공정 동안에서의 큰 소성변형에 의한 것으로 이미 보고 된 바 있다. 분말 및 압출재 조직의 초정과 공정 Si입자의 크기나 형상, 분포는 Al-Si합금에서 인장강도와 내마모성에 매우 중요하게 작용을 한다. 특히 Al-Si합금의 초정 Si 입자크기나 분포에 따른 인장강도와 내마모성에 관한 연구는 Si 함량과<sup>19)</sup>, 제 3, 4원소의 첨가에 의한 초정 Si 입자의 미세화<sup>5)</sup>, 새로운 금속간화합물<sup>5)</sup>의 형성, 강화제 첨가<sup>20-21)</sup> 그리고 열처리에 의한 석출경화 효과<sup>22)</sup>에 대한 연구가 많은 연구자에 의하여 보고되었다. 그러나 본 연구에서는 ECAP라는 새로운 공정을 응용하여 재료의 강도를 개선하고자 하였으며, 이런 공정을 통하여 제조된 성형체의 미세조직을 그림 4에 나타냈다.

그림 4는 압출된 압출재의 평행한 방향으로 시료를 채취하여 ECAP 공정 회수에 따라 제조된 성형체의 길이방향의 조직을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. 기체분사와 열간압출된 Al-Si 합금 압출재의 절단 방향(압출방향과 평행, 수직, 그리고 대각선 방향)에 따른 기계적 특성 평가 결과 압출방향과 평행한 방향에서 초정 Si입자의 미세화와 방향성때문에 가장 우수한 기계적 강도를 나타내었다는 연구결과를<sup>23)</sup> 토대로 본 연구에서도 성형체의 조직과 기계적 특성 평가는 성형 방향과 평행한 방향으로 분석되었다. ECAP된 재료의 조직에서는 압출재의 조직에 비하여 많은 기공들이 관찰되었는데 이것은 미세한 입자를 관찰하기 위하여 과부식시켰기 때문에 과부식으로 Al 기지의 일부가 심하게 부식되어 형성된 기공으로 생각된다. 또 다른 이유는 냉간에서 ECAP 가공을 받으면 재료에는 큰 전단응력이 가해져 많은 양의 전위가 발생하며, 이들 전위들은 초정 Si를 자르고 통과하지 못하므로 초정 Si의 주위에 강한 응력장을 형성하고, 부식을 시킬 때 초정 Si의 주위의 기지에서 높은 에너지로 인하여 부식이 다른 곳에 비하여 빨리 되어 초정 Si와 기지와의 계면에서 많은 에칭기공이 형성된 것으로 생각된다. 즉, 우수한 압축강도를 고려해 볼 때 이러한 주사전자현미경 사진에 나타나는 기공공정 후에 잔류한 기공이 아니고 과부식에 의하여 재료의 일부가 녹아서 형성된 에칭기공으로 생각된다. 2회 가공된 성형체의 단면조직(그림 4(a))은 압출재의 단면조직과 초정 Si의 크기와 형상에서 다른 경향을 보이고 있다. 초정 Si 입자와 공정 Si의 입자가 미세화 되었으며, 초정 Si과 공정 Si 입자의 형상도 다각형에서 구형으로 변화되었다.

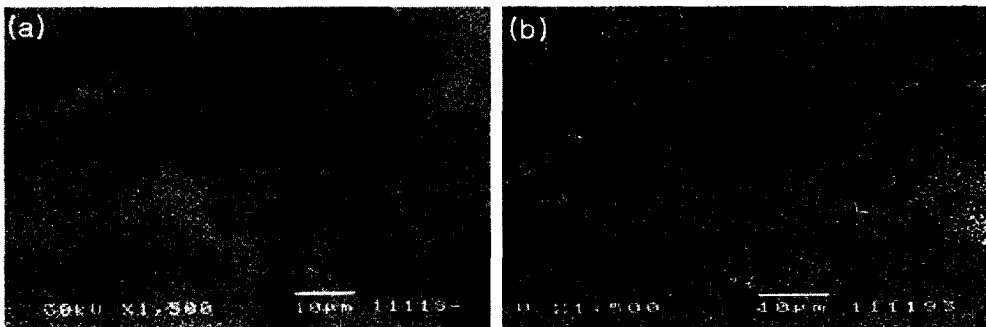


Fig. 3. Cross sectional SEM micrographs of (a) as atomized Al-20 wt% Si alloy powder and (b) extruded bar.

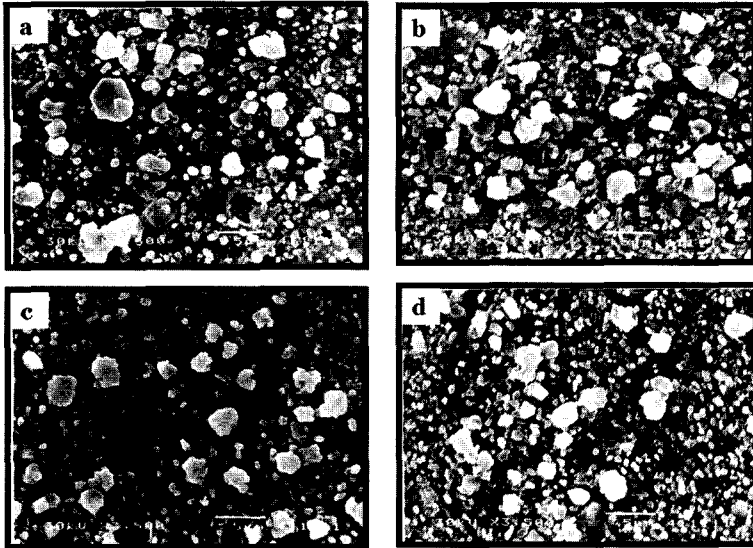


Fig. 4. Scanning electron micrographs of longitudinal sections of equal channel angular pressed Al-20 wt% Si bars with processing number; (a) 2, (b) 4, (c) 6 and (d) 8 passes.

그림과 같이 가공 회수가 4, 6 그리고 8회로 증가해도 따라 초정 및 공정 Si 입자의 크기에는 큰 변화가 없었으며, 형상 또한 큰 차이가 없었다.

그림 5는 ECAP가공된 성형체의 주사전자현미경 사진에서 측정된 초정 Si입자의 크기 분포를 나타내고 있다. 압출재의 4.5-5 μm 크기의 초정 Si 입자는 2회 가공 후 4-4.5 μm로 감소하였으며, 그 이후에는 일정한 크기를 나타냈다. 결과적으로 2회 가공 후 입자미세화 효과가 가장 크게 나타났다.

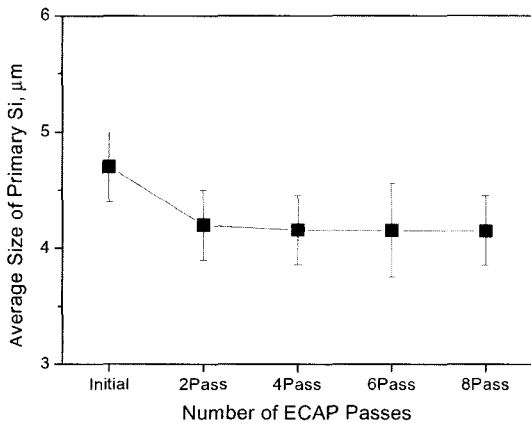


Fig. 5. Average primary Si size measured from SEM micrographs as a function of the number of ECAP passes.

그림 6은 입자 미세화가 가장 많이 이루어진 2회 가공된 시료의 단면조직사진으로써 ECAP의 큰 소성응력에 의하여 조대한 초정 Si입자가 크랙을 형성하면서 파괴된 입자들이 많이 관찰되었다. 이와 같이 조대한 초정 Si는 강도가 높고 취약하여 ECAP의 큰 소성응력에 의하여 쉽게 파괴되며, 파괴된 일부 초정 Si 입자들은 전단응력으로 인해 모서리 부분들이 깨져서 점점 구상화가 진행되는 것으로 판단된다. 전단 변형을 심하게 가하는 ECAP 공정에 의해 초정 Si 입자가 미세화되지만, 4회의 공정부터는 ECAP 가공을 통한 미세화 현상이 초기 2회보다는 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 원인은 ECAP 가공을 받은 일반 다결정 재료에서 결정립미세화공정의 초기에 이루어지고 이후에 늦어지는 결과와 유사한 결과를 나타내고 있다.<sup>24)</sup>

### 3.2. 성형체의 기계적 성질

그림 7은 ECAP 가공회수에 따른 압축 진응력-진 변형률 곡선을 나타내고 있다. ECAP 가공회수가 2, 4, 6 및 8회로 증가함에 진응력은 지속적으로 증가하였으며, 진응력 증가 비율은 가공회수가 증가함에 따라 비례적으로 증가하였다. 최고 진응력은 8회를 가공한 시료에서 약 400 MPa를 나타냈다. 압축시험에

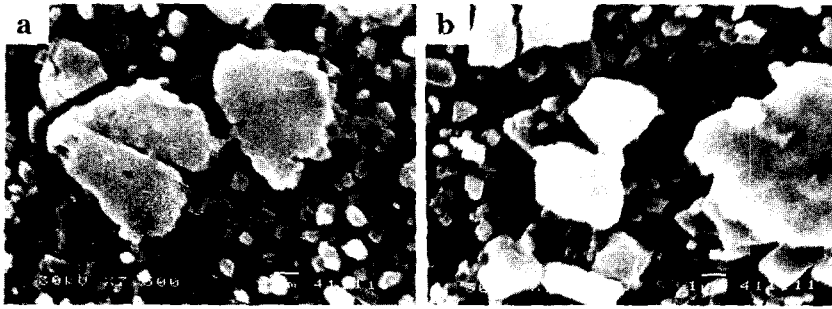


Fig. 6. Scanning electron micrographs of longitudinal sections of equal channel angular pressed Al-20 wt% Si bars showing partly broken Si particles; (a) 2 passes and (b) 4 passes.

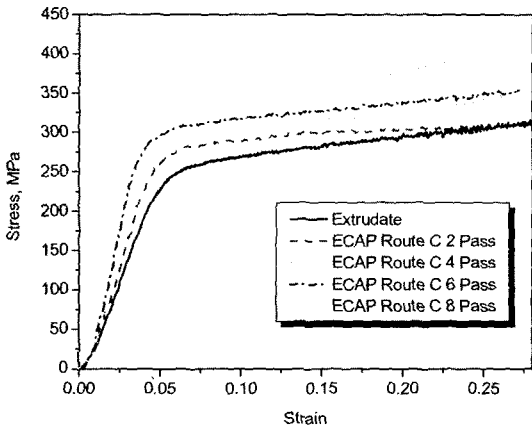


Fig. 7. True stress-strain curves of the extruded bar and the ECAP processed Al-20 wt% Si alloy.

서는 30%의 변형을 가하였을 때까지도 재료가 파괴되지 않고 초기 압출재와 동일한 30% 이상의 우수한 연신율을 나타냈다.

그림 8은 ECAP가공 회수에 따른 성형체의 항복응력과 경도를 나타내고 있다. 항복응력과 경도는 비슷한 경향을 나타냈으며, ECAP 가공 회수가 증가함에 따라 증가하였다. 가공 초기에 증가의 경향이 뚜렷하게 나타났으며 회수가 증가함에 따라 증가 폭이 감소하였다. ECAP 가공 회수에 따라 응력의 증가율이 감소하는 결과는 금속 및 합금의 ECAP 가공에서는 일반적인 현상으로서, 전위의 증가율이 감소하는 것으로부터 이해될 수 있다. 그러나 일반적인 금속에서 4회 정도의 ECAP 가공에서 강도가 더 이상 증가하지 않고 포화되는 것과는 달리, Al-20Si 합금에서는 8회까지도 항복응력이 증가하였다. 이와 같이 Al-Si 합금에서 강도에 중요하게 영향을 미치는 인자로는

Al입자, 초정 Si 및 전위밀도 증가에 의한 것이다. 특히, Al-Si 합금에서는 초정 Si 입자의 크기가 강도에 매우 중요하게 작용하는 것으로 보고 되고 있으나 본 연구에서는 흥미로운 결과를 얻을 수 있다. 그림 5에 나타낸 것과 같이 초정 Si 입자는 2회 가공까지 미세화 되고 이후에는 입자의 크기가 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉, 초정 Si 입자의 크기는 2회의 ECAP 가공 이후에는 거의 변화가 없으나 강도는 계속적으로 증가하는 것을 볼 때 2회 가공 이후 항복강도나 경도가 계속적으로 증가하는 원인은 초정 Si 입자의 미세화 보다는 Al 입자의 미세화와 격자변형률증가 등을 원인으로 들 수 있다. 특히 본 연구에서 압출된 압출재의 ECAP 가공은 상온에서 이루어진 관계로 격자변형이나 Al 입자의 크기가 크게 영향을 받을 것으로 생각된다. 이들 인자에 대한 결과를 얻기 위하여 X-회절 분석을 하였으며, 그 결과를 그림 9에 나타냈다.

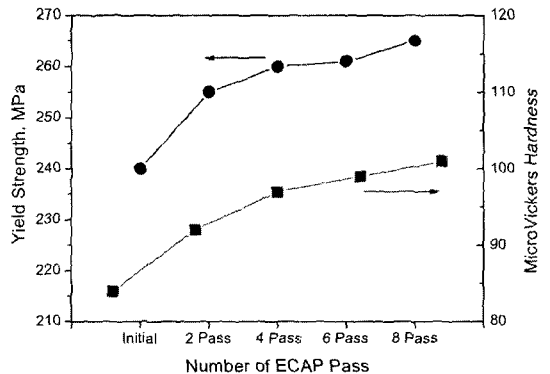


Fig. 8. Yield strength and microvickers hardness with the number of ECAP passes.

그림 9는 압출재 및 ECAP 가공 회수에 따른 성형체의 X선 회절분석 결과를 나타내고 있다. 압출재 및 ECAP 가공된 시료의 X선 회절분석결과 분말이나 압출재와 같이 Al과 Si의 두 개의 상을 나타내고 있으며, ECAP 가공 회수 변화에 따른 상변화는 관찰되지 않았다. 그러나 가공 회수 증가함에 따라 Al 및 Si 피크의 강도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 결정입자의 크기나 격자변형률을 알아보기 위하여 X선 회절피크의 Al과 Si 피크의 반가폭을 측정하여 그림 10에 나타냈다. X선 회절분석에서 표준시험편을 이용한 정확한 결정입자의 크기나 격자 변형률을 측정할 수 없었으나 반가폭을 이용하여 Al 입자나 격자변형률 변화의 경향을 예측할 수 있었다. ECAP 가공 회수에 따른 시료의 입자크기나 격자변형률 계산하기 위해서는 각 상의 주피크의 반가폭과의 관계를 이용할 수 있다. Al이나 Si 입자의 크기는 아래의 수식으로 측정이 가능하며 여기서 피크의 반가폭은 결정립의 크기에 반비례한다.

$$l = \frac{0.9\lambda}{B_c \cos\theta} \quad (1)$$

위에서  $l$ 는 결정입자크기,  $\lambda$ 는 타겟의 파장,  $B_c$ 는 반가폭,  $\theta$ 는 Bragg법칙을 만족하는 각도이다.

Al 피크의 반가폭은 ECAP 가공 회수가 증가하면서 계속적으로 증가하였으며, Si 피크의 반가폭은 ECAP 공정 2회까지 증가 한 후 일정한 값을 나타내고 있다. Si 피크의 반가폭은 주사전자현미경으로

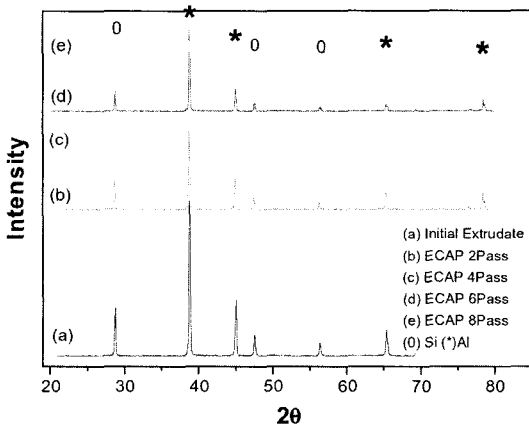


Fig. 9. X-ray peaks of the preform extrudate and the equal channel angular pressed (2, 4, 6 and 8 passes) Al-20Si samples.

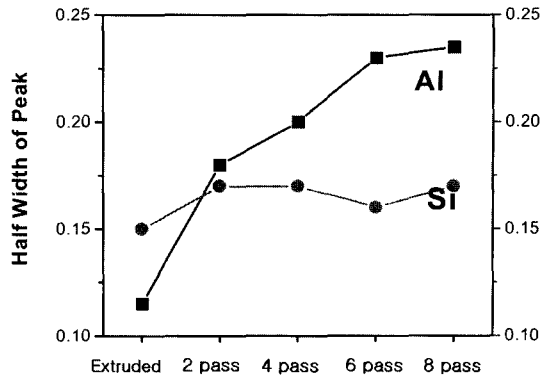


Fig. 10. Average half width of Al and Si peak obtained from extruded bar and ECAP processed Al-20Si alloy.

측정된 Si입자의 크기와 마찬가지로 2회 ECAP 가공 후 일정한 값을 나타냈다. 그러나 Al의 경우는 2회 가공 이후에도 반가폭이 계속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 이와 같이 Al 피크 반가폭의 계속적인 증가 원인은 Al입자의 미세화와 격자변형률의 증가와 밀접한 관계가 있다. 이와 같이 X선회절 분석결과와 반가폭의 결과를 통하여 ECAP 가공 회수가 증가함에 따라 강도가 증가하는 원인을 해석할 수 있을 것으로 생각된다. 즉, 2회 가공 후의 강도 증가는 초정 Si입자의 미세화 뿐 만 아니라 Al입자와 격자변형률의 증가에 의한 것으로 생각되며, 2회 가공 이후에는 초정 Si의 효과보다는 Al입자와 격자변형률이 강도증가에 중요한 역할을 한 것으로 생각된다. 그러나 이에 대한 강도증가의 원인은 투과전자현미경을 이용한 더 자세한 분석을 진행할 예정이다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 우수한 기계적 특성을 갖는 Al-20Si계 합금 개발을 목적으로, 기체분사된 106-145 μm 크기의 Al-20 Si 분말을 압출비 25:1로 400°C에서 압출한 후 ECAP 가공을 하였다. 가공 회수에 따른 미세조직과 기계적 성질을 조사하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

초기 기체분사법으로 제조된 Al-20 wt% Si 합금 분말의 초정 Si 크기는 약 10 μm이고, 압출공정을 통하여 약 5 μm로 미세화시켰으며, 또한 추가로 ECAP 가공공정을 통해서 약 4 μm로 미세화시킬 수

있었다. 압축시험에 의한 진변형률-진응력 곡선에서 항복강도는 ECAP 가공 회수가 2회에서 8회로 증가함에 약 280 MPa에서 400 MPa로 증가하였으며, 압축 연신율이 약 30%에 이르도록 재료는 파괴가 되지 않는 우수한 연신율을 나타냈다. 이와 같이 ECAP 가공 회수가 증가함에 따라 강도가 증가하는 원인은 초기의 Si 입자 미세화 뿐만 아니라 Al 입자의 미세화와 격자변형률의 증가 때문이다. 본 연구에서는 기체분사법으로 제조된 Al-20 wt% Si 합금분말을 열간압출을 한 후 ECAP 가공을 통하여, 제 3 원소를 첨가하지 않고 입자미세화와 격자변형률의 증가로 인하여 기계적 강도를 개선시킬 수 있었다.

### 감사의 글

이 연구는 나노핵심기반기술사업의 지원으로 수행되었다.

### 참고문헌

1. A. Inoue, K. Ohtera, A. P. Tsai and T. Massumoto: Jpn. J. Appl. Phys., **27** (1988) 280.
2. Y. Kawamura, A. Inoue, K. Sasamori and T. Masumoto: Scripta Met., **29** (1993) 275.
3. S. J. Hong, H. S. Kim, C. Suryanarayana and B. S. Chun: Mater. Sci. Tech., **19** (2003) 966.
4. T. S. Kim, S. J. Hong, W. T. Kim, C. W. Won, S. S. Cho and B. S. Chun: Mater. Trans. JIM, **39** (1998) 1214.
5. S. J. Hong, T. S. Kim, W. T. Kim and B. S. Chun: Mater. Sci. Eng., **A226** (1997) 878.
6. J. Zhou, J. Duszczynk and B. M. Korevaar: J. Mater. Sci., **26** (1991) 5257.
7. T. H. Lee and S. J. Hong: J. Kor. Powder Metall. Inst., **10** (2003) 325.
8. H. S. Kim and S. J. Kim: J. Kor. Powder Metall. Inst., **3** (1996) 104.
9. H. S. Kim, S. I. Hong and M. H. Seo: J. Mater. Res., **16** (2001) 856.
10. H. S. Kim, M. H. Seo and S. I. Hong: Mater. Sci. Eng., **A291** (2000) 86.
11. H. S. Kim: J. Mater. Res., **17** (2002) 172.
12. J. Wang, Y. Iwahashi, Z. Horita, M. Furukawa, M. Nemoto, R. Z. Valiev and T. G. Langdon: Acta Mater., **44** (1996) 2973.
13. R. Z. Valiev, E. V. Kozlov, Y. F. Ivanov, J. Lian, A. A. Nazarov and B. Baudelet: Acta Metall. Mater., **42** (1994) 2467.
14. M. Mabuchi, H. Iwasaki and K. Higashi: Mater. Sci. Forum, **243-245** (1997) 547.
15. V. M. Segal: Mater. Sci. Eng., **A197** (1995) 157.
16. R. Z. Valiev: Mater. Sci. Forum, **243-245** (1997) 207.
17. S. L. Semiatin, V. M. Segal, R. L. Goetz, R. E. Goforth and T. Hartwig: Scripta Metall. Mater., **33** (1995) 535.
19. 홍순직: 충남대학교 석사학위논문
20. X. G. Zou, H. Miyahara, K. Yamamoto and K. Ogi: Mater. Sci. Tech., **19** (2003) 1519.
21. X. G. Zou, H. Miyahara, K. Yamamoto and K. Ogi: Mater. Sci. Tech., **19** (2003) 1527.
22. J. Zhou, J. Duszczynk and B. M. Korevaar: J. Mater. Sci., **26** (1991) 3041.
23. S. J. Hong, C. Suryanarayana and B. S. Chun: Mater. Res. Bull., (2003) in press.
24. J. Y. Chang: J. Kor. Inst. Met. Mater., **40** (2002) 1315.