

## Al-Si 합금에 Ni, Ce 첨가 효과와 압출온도의 영향

이태행 · 홍순직\*

천안공업대학 신소재 열공정학과, \*충남대학교 급속응고 신소재연구소

### The Effect of Ni, Ce Addition and Extrusion Temperature on Al-Si Alloy

Tae-Haeng Lee and Soon-Jik Hong\*

Department of Advanced Materials Chonan National Technical College,  
275 Budaedong, Chonan, Chungnam 330-717, Korea

\*Rapidly Solidified Materials Research Center (RASOM) Chungnam National University,  
Gung-dong, Yuseong-gu, Dajeon 305-764, Korea

(Received 5 January 2004 ; Accepted form 29 January 2004)

**Abstract** The effect of extrusion temperature on the microstructure and mechanical properties were studied in He-gas atomized  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  alloy powders and their extruded bars using SEM, tensile testing and thermal expansion testing. The extruded bar of  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  alloy consists of a mixed structure in which fine Si particles with a particle size below 20~500 nm and very fine  $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ce$  compounds with a particle size below 200 nm are homogeneously dispersed in Al matrix with a grain size below 500 nm. With increasing extrusion temperature, the microstructural scale was decreased. The ultimate tensile strength of the alloy bars has increased with decreasing extrusion temperature from 500 to 350°C and  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  alloy extruded at 350°C shows a highest tensile strength of 810 MPa due to the fine nanostructure. The addition of Ni and Ce decreased the coefficients of thermal expansion and the effects of extrusion temperature on the thermal expansion were not significant.

**Keywords :** Al-Si alloy, Nano structure, High strength, Gas atomization

### 1. 서 론

최근 들어 나노/초미세 결정재료에 관한 연구가 큰 관심을 끌면서 많은 연구자들이 우수한 특성을 나타내는 나노결정 Al 합금을 개발하려는 노력이 계속되고 있다. 나노결정 재료는 결정립 크기가 매우 작으므로 결정립계 부근에 무질서하게 분포되어 있는 원자의 분율이 높고 따라서 결정립계의 면적이 큰 분율을 차지한다. 이러한 커다란 결정립계의 분율의 효과로 인하여 물리적 성질이 영향을 받는다. 특히 기계적 성질 면에서는, 강도가 증가하고 내마모성이 좋아 지는 효과가 있다. 최근에는 높은 냉각속도로 인하여 비정질과 나노결정을 형성하는 미세분말 압출재와 리본의 Al-Ni-Y(Mm) 합금에서 700 MPa 이상의 고강도를 갖는 알루미늄합금에 대한 연구가 보고

되었다<sup>1-3)</sup>. 이들 연구의 대부분은 급속응고 공정을 이용한 연구로써 냉각속도를 향상시켜서 비정질 또는 나노결정을 갖는 분말이나 리본을 제조하여 이들 재료의 기계적 성질 및 미세조직에 관한 연구들이었다. 합금설계 또한 이들 재료를 제조하는데 중요한 역할을 하며, 이들 재료의 강화메카니즘에 대한 연구도 활발히 진행 되고 있다. 최근의 연구결과에 의하면 비정질 재료에서 나노결정화가 이루어지면서 잔류 비정질 내에 용질원자 농도와 미세한 나노 크기의 Al 입자가 재료의 강도향상에 크게 기여하는 것으로 보고 되고 있다<sup>4)</sup>. 이와 같은 급속응고 기술에 의하여 우수한 기계적 특성을 나타내는 재료가 활발히 진행 되고 있음에도 불구하고, 나노결정을 갖는 Al-Si계 합금을 제조 하려는 연구는 미비하였다. 특히, 대량 생산이 용이하여 산업화에 바로 응용하기 쉬운 가스

분무법에 의한 연구가 활발히 진행되었음에도 불구하고 초미세조직을 갖는 Al-Si계 합금 분말을 제조하는 것이 어려웠다. 이와 같은 주 원인은 미세한 분말, 즉 냉각속도가 매우 높은 분말을 제조하는 것이 기술상으로 부족하였기 때문이다. 그러나 최근 가스 분무법에 의한 분말 제조기술이 발달함에 따라 미세한 분말을 제조하는 것이 가능하게 되었다. 결과적으로 나노결정의 Al-Si 합금분말을 제조하기 위해서는 냉각속도를 증가 시키는 법과 새로운 합금을 설계하는 것이 요구된다.

이에 본 연구에서는 냉각속도가 우수한 헬륨가스를 이용하여 재료의 냉각속도를 향상시키고, 이들 재료에 비정질 형성능이 우수한 Ni, Ce 원소를 첨가하여 과포화 고용체의 Al-Si-Ni-Ce 합금을 제조하고자 한다. 또한 열간압출 온도를 변화시켜 과포화 고용된 Si과 금속간화합물을 정출시켜서 기계적 특성을 향상 시키고 동시에 미세조직 변화를 연구하고자 한다.

## 2. 연구방법

본 연구에 사용된 Al-Si-Ni-Ce계 합금은 상업용으로 사용되고 있는 각 성분의 순 금속을 진공아크용해로에서 용해하여 인고트(ingot)를 제조하였다.  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$ 계 합금분말은 제조된 인고트를 아르곤 가스 분위기하에서 고주파용해로를 이용하여 용융시켰으며, 챔버 내의 분위기를 아르곤가스분위기로 한 후 용융된 용탕을 3 mm 오리피스를 통과시키면서 헬륨 가스를 9.8 MPa 압력으로 분사하여 제조하였다. 헬륨 가스는 냉각속도를 증가시키고, 분말의 산화를 방지하기 위해서 사용하였다. 헬륨가스분사로 제조된 분말의 크기는 체를 이용한 기계적 분급법을 이용하였으며, 분말크기는 98% 이상이 25  $\mu$ m 이하로 측정되었다. 본 연구에 이용된 분말의 크기는 25  $\mu$ m 이하의 분말을 사용하였다.

헬륨가스분사법으로 제조된 25  $\mu$ m 이하의 분말은 순동 캔(외경 23 mm, 내경 20 mm)에 주입하여 75% 이상의 밀도로 냉간압분 성형하였으며, 냉간압분 성형체는 400°C에서  $10^{-3}$  torr로 1시간 동안 탈가스처리 하였다. 탈가스 처리 후 아크용접으로 밀봉된 압분성형체는 수평형 압출기를 이용하여 2.5 mm/s의 램 속도로, 10 : 1의 압출비로 350, 400, 450 그리고 500°C의 압출온도에서 각각 열간압출하였다. 압출된

압출재의 표면에는 압출결함에 의한 부풀림이나 크랙은 관찰되지 않았으며 압출재의 인장시험 후 파단면 관찰에서도 미세기공은 관찰되지 않은 것으로 보아 탈가스는 충분하였다고 판단되었다.

가스분사된 분말과 압출재의 미세조직 관찰은 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometers)가 장착된 주사전자현미경(SEM, JSM 5410)과 투과전자 현미경을 이용하였으며, 분말과 압출재의 결정구조는 30 kV, 50 mA로 Cu K $\alpha$  타겟이 부착된 X선 회절분석기를 이용하여 분석하였다. 압출재의 인장강도는 장비(인스트롱 4206)를 이용하여  $5.0 \times 10^{-4}$ /s의 변형속도로 상온에서 측정하였다. 인장시험편의 파단면은 주사전자 현미경을 이용하여 관찰하였다. 압출재의 비커스 경도는 압출재의 평행한 방향으로 시료를 채취하여 연마한 후 하중 50 g으로 비커스 경도기를 이용하여 측정하였다. 열팽창계수(ULVAC TA1500)는 적외선 가열로에 내장된 석영관에 5°C/min의 가열속도로 가열하면서 시편의 길이 변화를 자동기록계로 기록하고 이로부터 열팽창계수를 측정하였다. 시험편은 압출방향과 평행한 방향으로 준비하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 분말 및 압출재의 미세조직

그림 1은 가스분사법으로 제조된  $Al_{81}Si_{19}$ 과  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금분말의 단면을 과부식시킨 후 주사전자 현미경으로 관찰한 조직사진이다.  $Al_{81}Si_{19}$  합금분말(그림 1(a))의 단면조직은 약 200~1000 nm의 크기를 갖는 미세한 입자들이 Al 기지에 균일하게 분포하고 있다. X선 회절시험 결과(그림 2)에서 나타난 것과 같이 가스분사법으로 제조된  $Al_{81}Si_{19}$  합금분말은 fcc-Al과 Si 두 개의 상이 존재하고 있으며, 형상은 다각형과 불규칙한 형상을 나타내고 있다. 초정 Si과 공정 Si은 주조조직이나 가스분사된 조대한 분말에서는 쉽게 구별되나 본 연구의 미세한 분말에서는 높은 냉각속도로 인하여 이들 조직을 구별하는 것이 어려웠다.  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$ (그림 1(b)) 합금분말의 조직은 미세한 조직을 나타내고 있으며, Si 입자들을 구분하는 것이 어려웠다. 또한  $Al_{81}Si_{19}$  합금에 비하여 입자의 구형화가 이루어졌으며,  $Al_{81}Si_{19}$  합금분말과는 달리 Keller 부식액에 대한 반응이 매우 약해져서 조직을 구별하는 것이 어려웠다. 이와 같은 원인

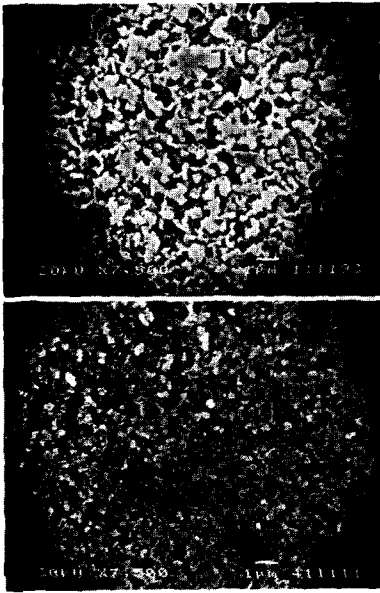


Fig. 1. Cross-sectional SEM micrographs of  $Al_{81}Si_{19}$ (a) and  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$ (b) alloy powders( $\sim 25 \mu m$ ) fabricated by He-gas atomization.

은 비정질 형성능이 우수한 Ni과 Ce 첨가에 의한 고용도의 증가와 조직의 미세화 때문인 것으로 생각된다.

그림 2는 가스분사법으로 제조된  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  합금분말( $<25 \mu m$ )과 압출재의 X선 회절분석 결과를 나타내고 있다. 가스 분사된  $Al_{81}Si_{19}$  합금분말은 Al과 Si 두 개의 상으로 구성되어있으며, Al 피크에 비하여 약한 Si의 피크를 나타내고 있다. 또한  $2\theta=70$ 과  $80$  부근의 Si 피크는 관찰되지 않았다. 그러나  $400^\circ C$ 에서 열간 압출된 압출재의 X선 회절분석 결과에서는 고용되었던 Si들이 정출되면서 강한 Si 피크를 나타내고 있다. Ni과 Ce이 각각 2 at% 그리고 0.5 at% 첨가된  $Al_{78.5}Si_{19}Ni_2Ce_{0.5}$  합금분말에서는 아주 매우 약한 Si 피크를 나타내고 있으며, Ni, Ce 첨가에 따른 다른 금속간 화합물의 피크는 관찰되지 않고 완전 고용되었다. 열간 압출된  $Al_{78.5}Si_{19}Ni_2Ce_{0.5}$  합금에서는 Al 피크 외에 고용되었던 원소들이 열간 압출에 의하여 석출되면서 강한 피크의 Si,  $Al_3Ni$  그리고  $Al_3Ce$  상이 관찰되었다. Ni과 Ce의 함량을 증

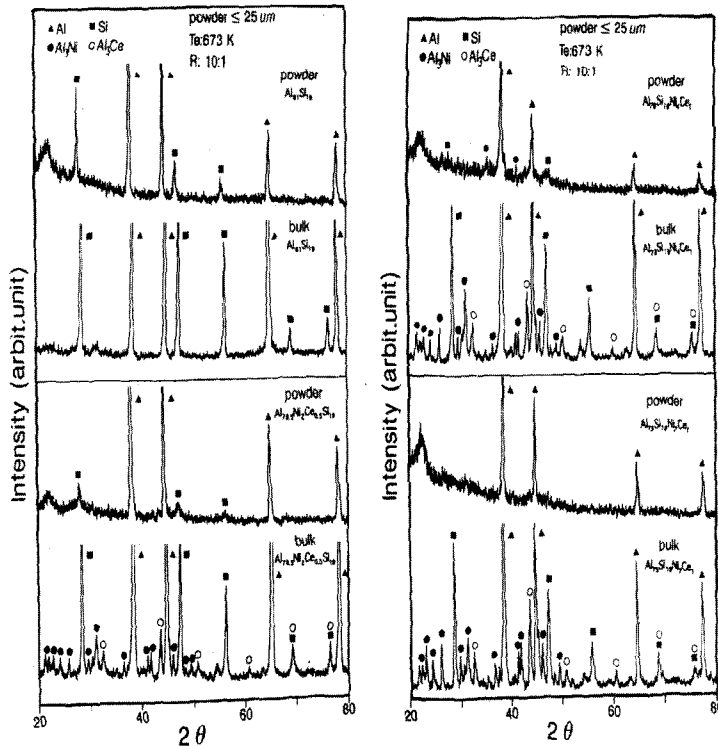


Fig. 2. X-ray diffraction patterns of gas atomized  $Al_{81}Si_{19}$ ,  $Al_{78.5}Si_{19}Ni_2Ce_{0.5}$ ,  $Al_{76}Si_{19}Ni_4Ce_1$ , and  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  alloy powders and extruded bars at  $400^\circ C$ .

가시킨  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금분말에서는 Si이 완전 고용되어 피크를 관찰 할 수 없었다. 열간압출된 압출재에서는  $Al_3Ni$ ,  $Al_3Ce$  상의 피크가 강하게 나타났다. 이와 같이  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금은 Si, Ni, Ce이 과포화 고용된 알루미늄 고용체를 나타내고 있으며, Ni과 Ce이 증가함에 따라 Si의 고용도가 증가함을 알 수 있다. Al-Ni-Ce계 합금에서 Ni, Ce의 첨가는 비정질 형성능을 향상시켜 비정질 상을 갖는 재료를 제조 하는 것이 가능하였다<sup>5)</sup>. 특히, Ce 보다는 Ni의 농도증가가 비정질상의 생성에 효과적이며 결정화 온도도 증가하는 것으로 보고 되고 있다<sup>6)</sup>. 이와 같이 결정화 온도가 높다는 것은 고온 성형에도 유리할 것으로 기대된다. 본 연구에서도 Ni과 Ce의 효과에 의하여 Ni, Ce 량이 증가함에 따라 특히, Ni 함량이 증가함에 따라 Si의 고용도도 증가하였다. Al-Si 합금에서 Si의 고용도는 일반 주조법에 의해서는 12.6 wt%까지 증가 시킬 수 있으며, Splate Quenching법에 의하여 11 at%까지 증가 시킬 수 있는 것으로 보고 되고 있다<sup>7)</sup>. 그러나 본 연구에서는 가스분무법과 Al-Si 합금에 Ni과 Ce을 첨가하여 Si의 고용도를 19 at%까지 증가시킬 수 있는 새로운 결과를 얻을 수 있었다. 이와같은 고용도의 증가는 Al-Si 합금계에서 Si의 크기에 따라 인장강도 및 마모특성이 변화하는 점을 고려해 볼때 Si 입자의 크기를 임의로 조절하여 미세조직 뿐만 아니라 기계적 성질에도 새로운 영향을 끼칠것으로 기대된다. X-선 회전분석결과에서 나타난 각 상의 투과전자 현미경 사진을 그림 3에 나타냈다. 그림 3은 400°C에서 압출된  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금 압출재의 명시야상 투과전자 현미경 조직 사진을 나타내고 있다. 각각의 상 분석은 투과전자 현미경의 EDS 분석을 통하여 이루어졌다. 압출재의 미세조직은 약 500 nm 크기를 갖는 Al 기지에 50~200 nm 크기의 Si, 100 nm 크기의  $Al_3Ni$  그리고 약 200 nm 크기를 갖는 침상형  $Al_3Ce$  상들이 균일하게 분포하고 있다. 일반적으로 가스분사법으로 제조된 분말의 초정 Si는 열간압출 공정 동안 큰 소성응력에 의하여 미세화 되는 것으로 알려져 있다. 60~120  $\mu m$ 의 크기 분말을 압출한 Al-20 wt% Si-5 wt% Fe 합금 압출재에서는 2~3  $\mu m$ 의 Al 상과 0.5~1  $\mu m$ 의 Si 입자를 나타내었다<sup>8)</sup>. 그러나 본 연구에서 나노미터 크기의 미세한 입자가 형성되는 것은 과포화 고용된 Si이 열간 공정을 통하여 석출되었기 때문에 고용된

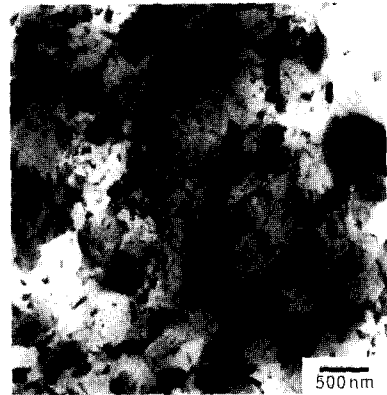


Fig. 3. Bright-field electron micrograph of  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  alloy extruded at 400°C and an extrusion ratio of 10 : 1.

지 않은 Si 입자가 압출공정에 의하여 미세화된 것보다 더 미세한 Si 입자를 나타낸 것으로 여겨진다. 또한 높은 분율의 미세한 금속간 화합물은 Al 입자의 성장을 방해하여 나노 미터 크기의 입자를 형성하는 것으로 여겨진다. 그림 4는 400°C에서 압출된  $Al_{81}Si_{19}$ ,  $Al_{78.5}Si_{19}Ni_2Ce_{0.5}$  그리고  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금압출재의 단면조직(압출방향과 평행한 방향)을 나타내고 있다.  $Al_{81}Si_{19}$  합금압출재의 단면조직은 초기 분말의 미세한 조직과 압출공정의 소성변형으로 인하여 초정 Si과 공정 Si을 구분하는 것이 어려웠으며, 미세한 입자들이 균일하게 분포하고 있다. 이들 입자의 형상은 타원형에서 다각형의 형상을 하고 있으나 초기 분말의 입자들(그림 1(a))과 비교하여 구형화가 이루어졌음을 알 수 있다. Ni과 Ce이 각각 2 at% 그리고 0.5 at% 첨가된  $Al_{78.5}Si_{19}Ni_2Ce_{0.5}$  합금의 압출재에서는 입자들의 크기가 감소하여 0.5  $\mu m$  전 후의 입자 크기를 나타내고 있다. 또한 입자들의 형상은  $Al_{81}Si_{19}$  합금보다 구형화가 이루어졌으며, 이와 같은 원인은  $Al_{78.5}Si_{19}Ni_2Ce_{0.5}$  합금분말이  $Al_{81}Si_{19}$  보다 Si 상의 피크가 크게 감소하여 더 많은 Si이 고용되었다가 탈가스 및 열간압출 공정 동안 정출하여 기존에 분말입자에서 정출되었던 Si 입자들보다 더 미세화되고 구형화가 이루어진 것으로 생각된다.  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금 압출재의 단면조직은  $Al_{81}Si_{19}$  합금과는 달리 입자들의 형상과 크기를 구별하는 것이 어려웠다. 분말의 단면조직에서 나타난 것과 같이 압출재의 단면조직에서도 Ni, Ce이 증가함에 따라 부식반응이 약한 것을 쉽게 알 수 있다. 이와 같은 결과는 이미 본 연



Fig. 4. SEM micrographs of Al-Si and Al-Si-Ni-Ce alloy bar extruded from  $-25 \mu\text{m}$  powders at  $400^\circ\text{C}$  and an extrusion ratio of 10 : 1. (a)  $\text{Al}_{81}\text{Si}_{19}$ , (b)  $\text{Al}_{78.5}\text{Si}_{19}\text{Ni}_2\text{Ce}_{0.5}$ , and (c)  $\text{Al}_{73}\text{Si}_{19}\text{Ni}_7\text{Ce}_1$ .

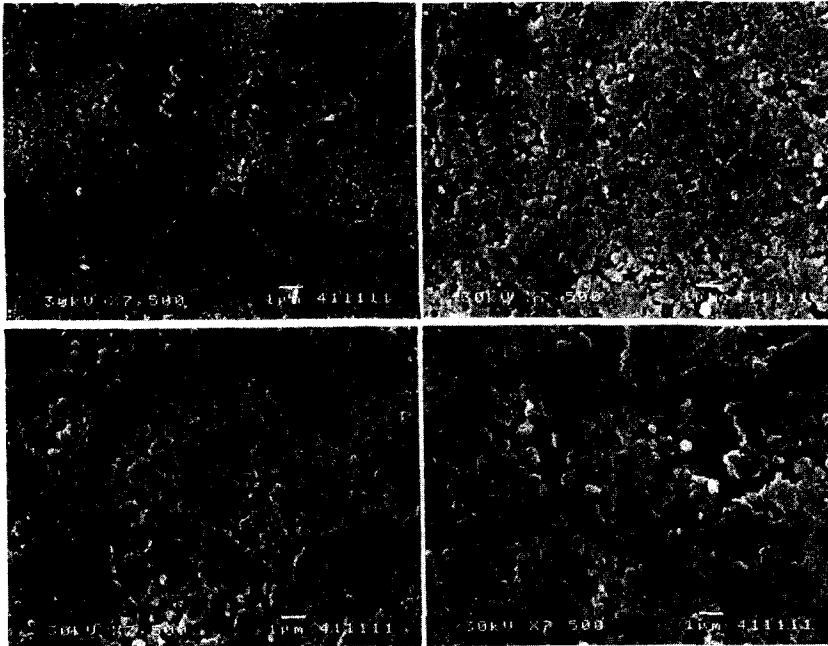


Fig. 5. SEM micrographs of extruded  $\text{Al}_{73}\text{Si}_{19}\text{Ni}_7\text{Ce}_1$  bar from  $-25 \mu\text{m}$  powders with different extrusion temperatures. (a)  $350^\circ\text{C}$ , (b)  $400^\circ\text{C}$ , (c)  $450^\circ\text{C}$ , (d)  $500^\circ\text{C}$ .

구자에 의하여 보고<sup>9)</sup>된 바 있으며, Ni과 Ce 첨가에 의하여 각각의 원소들이 고용되었던 입자들이 압출 공정에 의하여 정출되어 나노조직의 미세한 조직 때문에 부식반응에 약한 결과를 나타냈다. 그림 5는 Si 이 가장 많이 고용되었던  $\text{Al}_{73}\text{Si}_{19}\text{Ni}_7\text{Ce}_1$  합금의 압출 온도 변화에 따른 압출재의 단면 조직을 나타내고 있다. 압출재의 미세조직은 정확한 입자의 크기와 구분이 어려웠으나 압출온도가 350에서 500°C로 압출 온도가 증가함에 따라 압출재의 미세조직이 조대해지는 것을 알 수 있다.

### 3.2. 압출재의 기계적 성질

그림 6은  $\text{Al}_{81-(x+y)}\text{Si}_{19}\text{Ni}_x\text{Ce}_y$  합금 압출재의 압출 온도 변화에 따른 인장강도 값을 나타내고 있다.  $400^\circ\text{C}$ 에서 압출된  $\text{Al}_{81}\text{Si}_{19}$  합금의 인장강도는 282 MPa에서 압출온도가  $500^\circ\text{C}$ 로 증가함에 따라 236 MPa로 감소하였다. 그러나 Ni과 Ce이 첨가된  $\text{Al}_{78.5}\text{Si}_{19}\text{Ni}_2\text{Ce}_{0.5}$  합금의  $350^\circ\text{C}$  압출재에서는 625 MPa이며  $500^\circ\text{C}$ 에서 압출된 압출재는 355 MPa를 나타냈다.  $\text{Al}_{81}\text{Si}_{19}$  합금에 Ni과 Ce첨가는 상온 인장강도를 증가시켰으며, 최고 높은 인장강도는  $350^\circ\text{C}$ 에서 압출된  $\text{Al}_{78.5}\text{Si}_{19}\text{Ni}_2\text{Ce}_{0.5}$  합금에서 810 MPa를 나타냈다. 이와 같이

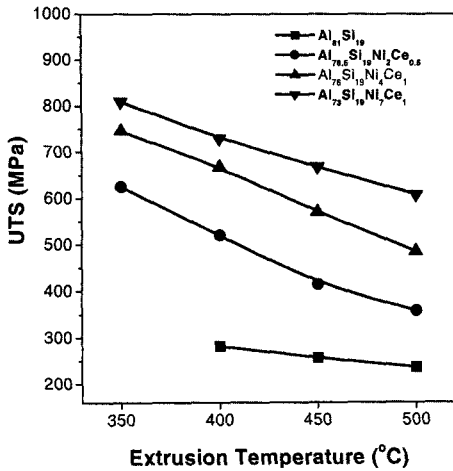


Fig. 6. Ultimate tensile strength of  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  alloy at room temperature with different extrusion temperature.

Ni, Ce첨가에 의하여 인장강도 값이 증가 한 것은 압출재의 미세조직과 투과전지 현미경 조직사진에서 나타난 것과 같이 Ni, Ce첨가에 의하여 Si과 Ni, Ce의 과포화 고용체를 형성하여 열간 압출공정 동안 정출되면서 형성된 나노미터 크기의 미세한 금속간 화합물과 Al 입자의 미세화 효과로 사료된다. 또한  $Al_3Ni$  금속간 화합물은  $7,000\sim 7,700\text{ MN/m}^2$ 의 높은 경도 값을 나타내며, 약  $327^\circ\text{C}$ 까지 일정한 값을 나타내고  $577^\circ\text{C}$ 까지 직선적으로 감소하는 것으로 보고 되고 있다<sup>10-11)</sup>. 이와 같이 Ni과 Ce의 첨가는 이러한 금속간화합물의 체적분율을 증가시켜서 강도를 증가 시킨 것으로 여겨진다. 압출온도 변화에 따른 강도변화의 기울기를 보면 Al-Si 합금의 경우에는 고온에서도 안정한 Si 효과에 의하여 경도 변화가 크게 없는 것으로 생각되나 Al과 Ni, Ce 화합물의 체적분율이 높은  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금에서는 위에서 언급한 것과 같이 고온에서  $Al_3Ni$ 와 같은 금속간 화합물의 강도가 저하되고 입자성장에 의하여 강도 값이 감소하는 것으로 여겨진다. 본 연구의 810 MPa 인장강도는 Al-20Si-5Fe-2Ni 합금의 415 MPa 보다 2배 높은 인장강도를 나타내고 있다<sup>12)</sup>. 그림 7은  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  합금 압출재의 압출온도 변화에 따른 경도 값을 나타내고 있다. 압출온도 변화에 따른 합금들의 경도값 변화는 인장강도와 유사한 경향을 나타내고 있으며 최고 경도는 인장강도와 마찬가지로  $350^\circ\text{C}$ 에서 압출된  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금에서 나타났다. 그림 8

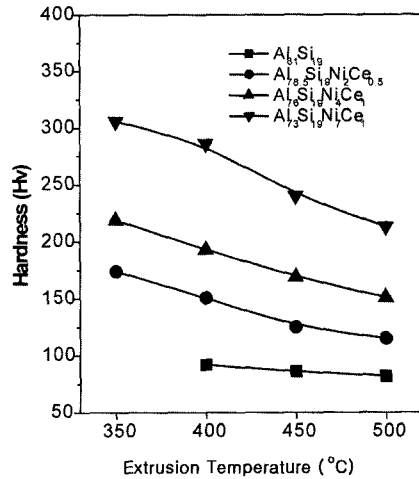


Fig. 7. Vickers hardness of  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  alloy with different extrusion temperature.

은  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  합금 압출재의 압출온도 변화에 따른 연신율을 나타내고 있다.  $400^\circ\text{C}$ 에서 압출된  $Al_{81}Si_{19}$  합금 압출재의 연신율은 14.6%를 나타냈으며,  $Al_{78.5}Si_{19}Ni_2Ce_{0.5}$ ,  $Al_{76}Si_{19}Ni_4Ce_1$ , 그리고  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금에서 각각 5, 1.5 그리고 0.3%로 각각 감소하였다. 4개의 합금 모두 압출온도가 증가함에 따라 연신율이 증가하였지만 증가폭은 크지 않았다.

$Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  합금의 인장강도와 연신율의 변화를 이해하기 위하여 인장파단면을 그림 9과 10에

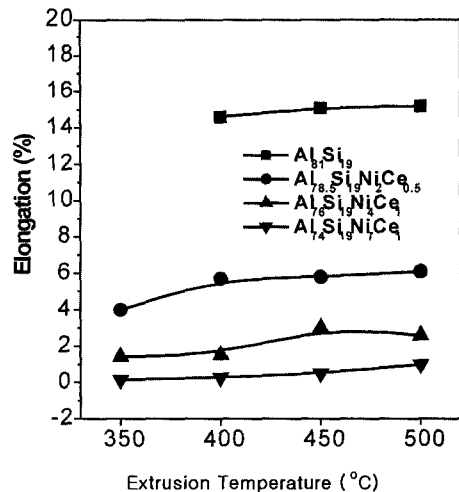


Fig. 8. Variation of elongation of  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  alloy with different extrusion temperature.

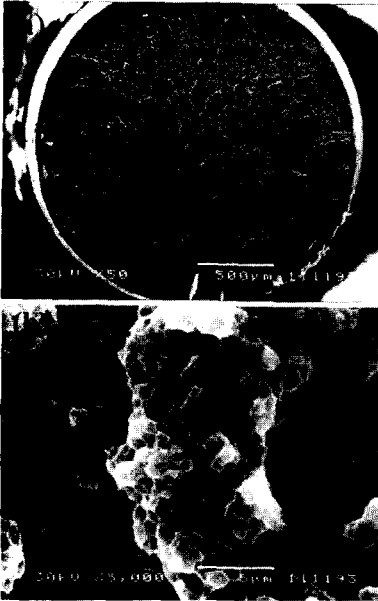


Fig. 9. Scanning electron micrographs showing the tensile fracture surface of extruded  $Al_{81}Si_{19}$  alloy bar. (a) low magnification and (b) high magnification.

나타냈다.  $Al_{81}Si_{19}$  합금압출재(그림 9(a))의 파단면에서는 분말의 결합이 완전히 이루어지지 않은 상태에서 나타나는 분말입계의 파단면은 관찰 할 수 없었

으며, 10:1의 압출비로 압출하였음에도 불구하고 분말의 결합이 완전히 이루어졌음을 알 수 있다. 인장 시험편의 파단면에서는 많은 ridge들이 관찰되었으며, 이들 ridge의 증가는 연신율을 증가시키는 것으로 보고 되고 있다. 그림 9(b)에서는 일부의 덩플이 관찰 되었으며, 입자의 크기도  $1\mu m$  이하의 미세한 조직을 나타냈다. 그러나 Ni과 Ce이 첨가된 합금에서는 다른 파괴양상을 나타냈으며, 그림 10은 가장 우수한 인장강도를 나타내는  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금의 압출온도 변화에 따른 인장파단면을 나타내고 있다.  $350^{\circ}C$ 에서 압출된 압출재의 파단면에서는 인장시험편 테두리에 취성파괴를 나타내는 파단면을 보여주고 있으며, 압출온도가 증가함에 따라 취성파면이 감소하였으며,  $500^{\circ}C$ 에서는 관찰되지 않았다. 또한 이와 같은 파괴의 경향은 Ni과 Ce의 함량이 증가함에 따라 증가하였다. 그림 11(a, b)은  $350^{\circ}C$ 에서 압출된 압출재의 인장시험편 파단면을 고배율로 관찰한 것이다. 인장 시험편의 테두리에 형성된 이들 파괴 경향은 심한 취성파괴의 경향을 보이고 있으며, 덩플과 같은 연성파괴의 조직은 관찰되지 않았다. 이와 같은 취성파괴 영역의 형성은 인장시험의 연신율 결과와 잘 일치하고 있다.

표 1은  $Al_{81-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  합금 압출재의 압출온도

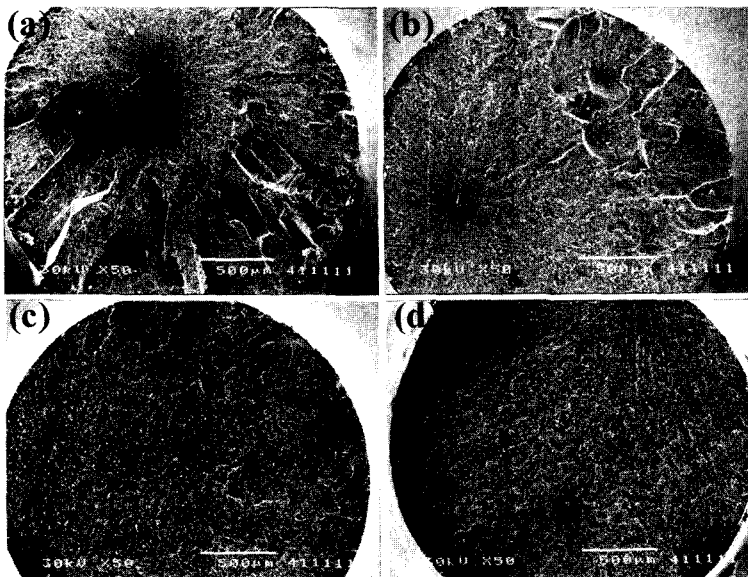


Fig. 10. Scanning electron micrographs showing the tensile fracture surface of extruded  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  alloy bar with extrusion temperature. (a)  $350^{\circ}C$ , (b)  $400^{\circ}C$ , (c)  $450^{\circ}C$ , (d)  $500^{\circ}C$ .

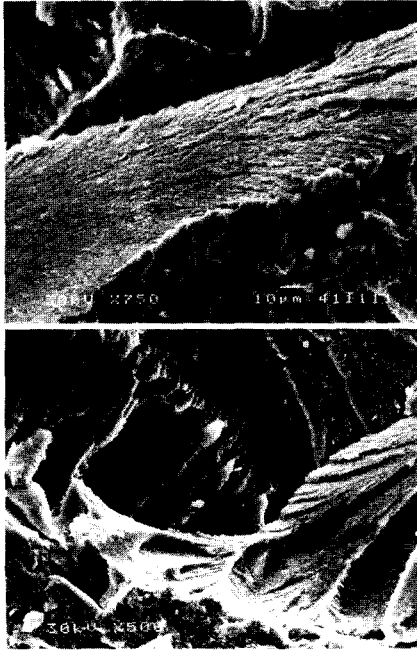


Fig. 11. Scanning electron micrographs showing the high magnification tensile fracture surfaces((a) and (b)) of extruded  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  alloy bar.

변화에 따른 열팽창계수 값을 나타내고 있다. 열팽창계수는 재료의 용점과 반비례하며, 첨가원소와 그 함량에 따라 변화할 수 있다. 열팽창은 열전도도와 맞물려 제품과 공구 및 금형 양쪽에 열응력을 야기시키는 가장 중요한 인자이다. 특히, 단조공정에서 단조작업 시 금형에 열적피로가 생기는데 이때 열응력을 감소시키려면 열전도도가 높고 열팽창이 작아야 한다. 일반 강이나 주철에서 영률이 증가하면 열팽창계수도 증가하는 것과 같은 조화가 이루어지지 않으나 Al 합금에서는 이런 문제점을 해결 할 수 있다. Al 합금에서 열팽창계수를 감소시키는데 가장 효과적인 원소는 Si, Fe, Ni를 들 수 있다. 표 1은 Al-Si 합금에 Ni, Ce의 첨가량을 증가시키에 따라 열팽창계수는 18.4에서 15.5로 감소함을 나타내고 있으며, 압출온도변화에 따른 변화는 크게 변화가 없는 것으로 나타났다. 특히,  $Al_3Ni$  및  $Al_3Ce$  화합물은 열팽창계수가 낮은 것으로 보고 되고 있다. 결론적으로 Ni, Ce량이 증가함에 따라 이들 화합물의 체적분율이 높아지면서 열팽창계수를 낮추었다. 또한 용점이 높은 원소의 첨가와 열적으로 안정한 금속간화합물

Table 1. Coefficient of thermal expansion of  $Al_{Si-(x+y)}Si_{19}Ni_xCe_y$  alloy bar with extrusion temperature

Alloys	Extrusion Temperature (°C)	Coefficient of Thermal Expansion ( $10^{-1}K^{-1}$ )
$Al_{78.5}Si_{19}Ni_2Ce_{0.5}$	350	18.4
$Al_{76}Si_{19}Ni_4Ce_1$	350	15.7
	400	15.8
$Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$	350	15.3
	400	15.3
	450	15.4
	500	15.4

그리고 열팽창계수가 낮은 Si 입자의 균일하고 미세한 분포가 열팽창 계수를 낮춘 것으로 사료된다. 또한 압출온도 변화에 따라서 큰 변화가 없는 것으로 보아 입자크기 보다는 첨가원소에 따른 금속간화합물의 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는  $Al_{81}Si_{19}$  합금에 비정질형성능이 우수한 Ni과 Ce을 첨가하여 고압 He 가스분사법으로 분말을 제조한 후 압출온도 변화에 따라 압출을 하여 압출재를 만들고, 압출재의 미세조직과 기계적 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

$Al_{81}Si_{19}$  합금에 Ni, Ce의 첨가는 Si의 고용도를 증가시켰으며,  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금 분말에서는 Si이 완전 고용된 과포화고용체를 얻을 수 있었다. 과포화 고용체의 분말은 열간 압출동안 초정 Si,  $Al_3Ni$  및  $Al_3Ce$  상으로 정출하였으며, 압출재의 조직은 500 nm 크기의 Al 기지 조직에 약 50~200 nm 크기의 Si 입자, 100 nm크기 이하의  $Al_3Ni$  상 그리고 200 nm이하의 길이를 갖는 침상형의  $Al_3Ce$ 상을 형성하는 나노조직을 얻을 수 있었다. Ni, Ce 첨가는 인장강도를 증가 시켰으며, 최고 인장강도는 350°C에서 압출된  $Al_{73}Si_{19}Ni_7Ce_1$  합금에서 나타났으며 압출온도가 증가함에 따라 인장강도는 감소하였다. 열팽창 계수는 Ni, Ce 첨가량이 증감함에 따라 감소하였으며, 압출온도 변화에 따라서는 차이가 없었다. 본 연구에서는 Al-Si 2원계 합금에 Ni, Ce을 첨가하여 기존의 제조공정이나 합금설계에서는 얻을 수 없는 19 at% 까지 Si을 과포화 고용시켰으며, 압출온도를 변화에 따라 기계적 성질이 우수한 새로운 합금을 설계할 수



있었다.

### 참고 문헌

1. Y. Kawamura, A. Inoue, K. Sasamori, and T. Masumoto : *Scripta Met.*, **29** (1993) 275.
2. Y. Kawamura, A. Inoue, K. Sasamori, and T. Masumoto : *Mater. Trans.*, **JIM 34** (1993) 969.
3. S. J. Hong, T. S. Kim, H. S. Kim, W. T. Kim, and B. S. Chun : *Mater. Sci. Eng.*, **A271** (1999) 469.
4. S. J. Hong, H. S. Kim, C. Suryanarayana, and B. S. Chun : *Mater. Sci. Tech.*, **19** (2003) 966.
5. A. Inoue, T. Zhang, and T. Masumoto : *J. of Non-crystalline Solids*, **473** (1999) 156.
6. C. H. Bae, H. Y. Jeong, Y. Kawamura, and A. Inoue : *J. of the Korean Inst. of Met. & Mater.* Vol. 33, No. 8, (1995).
7. J. L. Murray and A.J. McAlister : *Bull. Alloy Phase Diagrams*, **5**(1), Feb 1984.
8. S. J. Hong, T. S. Kim, W. T. Kim, and B. S. Chun : *Mater. Sci. Eng.*, **A226** (1997) 878.
9. 이태행, 홍순직 : *한국분말야금학회지*, 제10권, 제6호, (2003) 406쪽.
10. D. Deng and A. S. Argon : *Acta Metall.*, **34**, 2001 (1986).
11. *Rapidly Solidified Alloys* edited by Howard H. Liebermann (Allied Signal Inc. Parsippany, New Jersey), 279.
12. T. S. Kim and B. S. Chun : *J. Kor. Inst. Met. & Mater.* Vol. 40, No. 8 (2002).