

L₁₂형 (Al, Cr)₃Ti기 2상 금속간화합물의 소성거동

박정용 · 오명훈* · 위당문 · 三浦誠司** · 三島良直**

한국과학기술원 전자재료공학과

*금오공과대학교 재료공학과

**東京工業大學 精密工學研究所

Plastic Behavior of Two-Phase Intermetallic Compounds Based on L₁₂-type (Al, Cr)₃Ti

J. Y. Park, M. H. Oh*, D. M. Wee, S. Miura** and Y. Mishima**

Dept. of Electronic Materials Engineering, KAIST, Taejon 305-701

*Dept. of Matls. Sci. & Eng., Kum-Oh National Univ. of Tech., Kumi 730-701

**Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Yokohama 227, Japan

초 록 상온과 액체질소온도에서 압축시험을 통하여 L₁₂형 (Al, Cr)₃Ti기 2상 금속간화합물의 소성거동을 조사하였다. Al-Ti-Cr 3원계 상태도에서 L₁₂단상합금 및 L₁₂상에 제 2상을 수% 또는 20% 정도 포함하는 합금조성을 선택하였다. 일반적으로 제 2상을 20% 정도 포함하는 2상합금들은 L₁₂단상합금에 비해 항복강도는 높으나 연성은 좋지 않았다. 그러나 Cr₂Al을 제 2상으로 20% 정도 포함하는 Al-21Ti-23Cr합금은 다른 합금들에 비해 비교적 높은 항복강도와 함께 우수한 연성을 나타내었다. 또한 L₁₂단상합금 및 Cr₂Al을 수% 포함하는 2상합금에 대한 소성거동도 조사하였다. 균질화처리 후에 제 2상의 양은 줄었으나 pore의 양은 증가하였다. 균질화처리 후에 L₁₂단상조직에서 나타나는 pore의 양은 Cr의 양이 증가할수록 줄어들었으며, Cr의 양이 더욱 증가하여 Cr₂Al이 제 2상으로 생성될 때는 pore가 완전히 소멸하였다. 변형속도를 1.2×10⁻⁴/s와 1.2×10⁻²/s의 두가지 조건으로 변화시키면서 압축시험을 행하여 합금의 연성에 미치는 환경취성의 영향을 조사하였다. L₁₂단상합금인 Al-25Ti-10Cr합금이 환경취성의 영향을 가장 적게 받는 것으로 나타났다. 그러나 pore의 생성, 환경취성, ingot 주조조직 등을 종합평가해 보면 Cr₂Al을 제 2상으로 20% 정도 포함하는 Al-21Ti-23Cr합금이 가장 우수한 인장연신율을 나타낼 것으로 기대된다.

Abstract Plastic behavior of two-phase intermetallic compounds based on L₁₂-type (Al, Cr)₃Ti was investigated using compression test at R.T. and 77K. L₁₂ single phase alloys and two-phase alloys consisting of mainly L₁₂ phase and a few or 20% second phases were selected from Al-Ti-Cr phase diagram. In general, compared with L₁₂ single phase, two-phase alloys consisting of 20% second phase showed relatively high yield strength and poor ductility. Among the alloys, however, Al-21Ti-23Cr alloy consisting of 20% Cr₂Al phase showed available ductility as well as high yield strength. Plastic behavior of L₁₂ single phase alloys and two-phase alloys consisting of a few% Cr₂Al was also investigated. Homogenization of arc melted ingots substantially reduced the amount of second phases but introduced extensive pore. When Cr content increased in L₁₂ single phase alloys after the homogenization, the volume fraction of pore in the alloys decreased, and no residual pore was observed in two-phase alloys consisting of a few% Cr₂Al phase. Environmental effect on the ductility of the alloys was investigated using compression test at different strain rates (1.2×10⁻⁴/s and 1.2×10⁻²/s). Environmental embrittlement was least significant in Al-25Ti-10Cr alloy consisting of L₁₂ single phase among the alloys tested in this study. However, based on the combined estimation of the pore formation, environmental embrittlement and ingot cast structure, Al-21Ti-23Cr alloy consisting of 20% Cr₂Al as the second phase is expected to show the best tensile elongation behavior.

1. 서 론

Ti-Al합금계의 Ti_3Al , $TiAl$, Al_3Ti 등의 금속간화합물은 차세대의 경량 내열재료로서 실용화가 기대되고 있으며, 특히 우주항공용 후보재료로서 최근 미국과 일본 등지에서는 실용화를 위한 연구 개발이 의욕적으로 진행되고 있다. 최근 수년간 Ti-Al계 금속간화합물에 관한 연구는 주로 $TiAl$ 에 관하여 집중적으로 수행되어 왔으나, 특히 Al_3Ti 는 더욱 경량인 장점과 매우 우수한 내산화성을 나타내기 때문에 가장 매력적인 경량 내열재료로서 그 개발이 기대되고 있다¹⁾. 그러나 Al_3Ti 는 대칭성이 낮은 정방정계의 $D0_{22}$ 결정구조를 가지므로 298-893K의 온도 범위에서 1%이하의 매우 제한된 압축연신율을 나타내며, 그 주된 변형 기구는 ordered twinning인 것으로 보고되어 있다²⁾. Al_3Ti 가 구조재료로서의 실용화가 지연되고 있는 원인은 이와 같이 상온에서의 연성이 매우 불충분하기 때문이며, 이를 개선하기 위한 방법으로서 제 3원소의 첨가에 의한 결정구조의 변환에 관한 연구가 최근 수년간 주목의 대상이 되어 왔다.

Al_3Ti 는 대칭성이 낮은 정방정계의 $D0_{22}$ 형 결정구조를 가지고 있으나 제 3원소의 첨가에 의해 대칭성이 높은 면심입방정계의 $L1_2$ 형 결정구조로 변환이 가능하며³⁻⁵⁾, 현재까지 결정구조 변환이 확인된 제 3원소들로서는 Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Rh, Pd, Ag, Pt 및 Au가 단독첨가로 $L1_2$ 형 금속간화합물을 형성하고, Zr과 V은 상기의 원소와 동시 첨가시에만 $L1_2$ 형 결정구조를 형성하며, Nb, Mo, Cd, Ta 및 W 등의 원소의 첨가는 $L1_2$ 형 결정구조를 형성하지 못하고 대부분 $D0_{22}$ 구조의 Al_3Ti 에 고용되는 것으로 보고되어 있다. $L1_2$ 형 결정구조로 변환시킴으로써 Al-Ti-Cr합금과 Al-Ti-Mn합금 등에서는 굽힘시험에서도 연성 개선효과가 있음이 확인되었으며⁶⁾, 특히 Cr첨가에 의해 생성된 $L1_2$ 형 금속간화합물의 경우에는 다른 제 3원소가 첨가된 합금과 비교하여 가장 우수한 상온 압축연성⁷⁾과 내산화성⁸⁾을 나타내는 것으로 보고되어 있다. 한편, Al_3Ti 에 제 3원소를 첨가하여 생성된 $L1_2$ 형 금속간화합물은 결정의 대칭성이 높아 소성변형을 가능하게 하는 충분한 슬립계를 가지므로 상

온 압축연성을 크게 개선시키고 있음에도 불구하고 인장연신율은 매우 제한되어 있으며, 상온에서는 취성적인 입내벽개파괴⁹⁾를 일으키는 것으로 보고되어 있다.

본 연구에서는 Al-Ti-Cr합금계에서 $L1_2$ 상과 그 주변의 상들로 이루어진 2상조직을 갖는 합금들의 소성거동을 조사하였다. $TiAl$ 의 경우 r 단상보다는 a_2/r 의 2상조직의 합금에서 연성이 더욱 좋아지고 있는 점에 착안하여, 본 연구에서는 Al-Ti-Cr합금계에서 $L1_2$ 단상에 제 2상을 도입하여 연성개선에 대한 가능성을 타진하여 보았으며 이와 함께 환경취성, pore의 생성, ingot 주조조직 등이 동합금의 상온 및 저온에서의 연성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험방법

고순도의 Al(99.99%), Ti(99.99%), Cr(99.9%) 등을 정량한 후 진공아크용해로를 이용하여 Ar 가스분위기하에서 용해하여 15g 정도의 button을 만들어 균질도를 높이기 위하여 5번의 재용해를 하였다. 본 실험에서 사용된 시편의 조성은 Fig. 1의 Al-Ti-Cr 3원계 상도상에 나타내었다. 또한 Al-25Ti-10Cr과 Al-21Ti-23Cr합금조성에 대하여 ingot조직의 as-cast상태에서의 특징을 조사하기 위하여, 진공아크용해로에서 제조한 15g 정도의 button 10개를 대형 진공아크용해로에서 $120 \times 25 \times 15\text{mm}^3$ 의 크기를 갖는 mold에 넣고 재용해하여 150g 정도의 큰 ingot를 만들었다. 아크용해한 각각의 button은 10^{-3} torr이하의 진공을 유지하며 1423K에서 48시간 동안 균질화 열처리한 후 노냉하였다. 균질화처리 후 각 시편의 상을 분석하기 위하여 Cu-K α 특성 X선을 이용하여 X선 회절분석을 실시하였다. 또한, 기지조직과 제 2상의 분석을 위하여 EDS분석을 실시하였다. 각 조성의 시편에 대하여 열처리 전후에 대한 미세조직의 변화를 관찰하기 위하여, 각 시편은 0.5 μm 알루미나 분말까지 표면연마하고, 85ml distilled water + 10ml HF + 5ml HNO₃의 용액에서 etching한 후 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 또한 주사형 전자현미경(JSM-840A)을 이용하여 조성변화에 따른 제 2상의 분포형태와 pore의 생성조직을 관찰하였다. 압축시편은 균질화처리된

button을 방전가공기와 diamond wheel cutter를 이용하여 $3 \times 3 \times 7 \text{mm}^3$ 의 크기로 가공한 후 $0.5 \mu\text{m}$ 알루미나 분말까지 표면연마하였다. 압축시험은 Static Instron(Model 4206)을 이용하였고, 환경취성의 영향을 조사하기 위하여, 시험온도는 상온과 액체질소 온도(77K)로 하였으며, 변형속도는 $1.2 \times 10^{-4}/\text{s}$ 와 $1.2 \times 10^{-2}/\text{s}$ 의 두가지 조건으로 하였다.

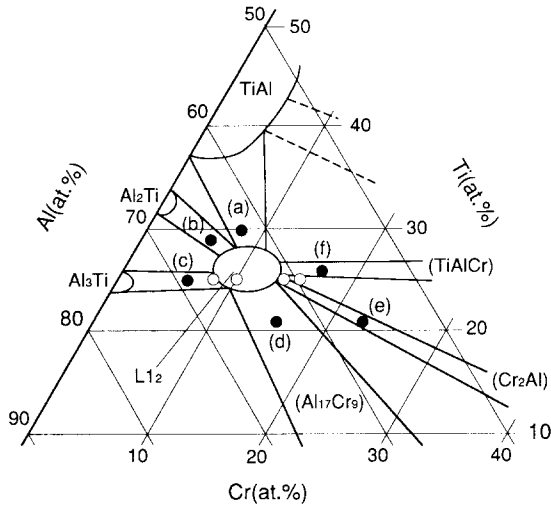


Fig. 1. Aluminum-rich corner of the isothermal section of Al-Ti-Cr system at 1423K. Closed circles represent the alloy compositions consisting of 20% second phases and open circles the alloy compositions of Al-25Ti-xCr(x=8, 10, 14 and 15).

3. 실험결과

3-1. 제 2상을 20% 정도 포함하는 L_{12} 형 Al-Ti-Cr합금의 상분석 및 소성거동

Fig. 1은 1423K에서 Al-Ti-Cr 3원계 상태도의 일부를 나타낸 것이다. L_{12} 상 영역을 중심으로 그 주변에는 6개의 제 2상영역이 존재한다. L_{12} 단상영역의 크기는 Cr조성에 대하여 6at.% 정도의 고용범위와 Ti조성에 대하여 4at.% 정도의 고용범위를 나타내며¹⁰⁾, L_{12} 상 주변의 6개의 제 2상은 TiAl, Al_2Ti , Al_3Ti , $Al_{17}Cr_9$, Cr_2Al 및 TiAlCr으로 이루어졌다. 본 연구에서는 L_{12} 단상 및 L_{12} 상에 제 2상이 수% 또는 20% 정도 석출되어 있는 합금조성에 대하여 압축시험을 행하여 소성거동을 조사하였다. L_{12} 상에 제 2상이 20% 정도 석출되어 있는

합금(Fig. 1의 상태도상에 closed circle로 표시)들에 대하여 XRD와 EDS를 이용하여 미세조직과 제 2상을 분석한 결과를 Table 1에 나타내었다. Fig. 2는 Table 1에 나타난 합금들에 대하여 상온과 액체질소 온도에서 압축시험을 행한 결과를 응력-연신을 곡선으로 나타내었다. TiAl이 20% 정도 석출된 Al-30Ti-8Cr합금이 가장 높은 항복강도를 나타내고 있으나, 압축연신율은 비교적 낮은 값을 가지고 있다. 압축연신율은 Al_3Ti 이 20% 정도 석출된 Al-25Ti-6Cr합금과 Cr_2Al 이 20% 정도 석출된 Al-21Ti-23Cr합금이 각각 약 15% 정도로 가장 높은 값을 나타내었다. Al_2Ti 이 20% 정도 석출된 Al-29Ti-6Cr합금은 항복강도 이하 혹은 항복점을 벗어나자마자 파괴가 일어났으며, 따라서 Al_2Ti 상은 합금의 연성에 치명적인 악영향을 미친다는 것을 예측할 수 있다.

Table 1. Second phases in Al-Ti-Cr alloys at 1423K.

Alloy composition	Second phase	Structure	Pearson's symbol
(a)Al-30Ti- 8Cr	TiAl	Ll_0	tP4
(b)Al-29Ti- 6Cr	Al_2Ti	Ga_2Hf	tI24
(c)Al-25Ti- 6Cr	Al_3Ti	DO_{22}	tI8
(d)Al-21Ti-15Cr	$Al_{17}Cr_9$	-	hR52
(e)Al-21Ti-23Cr	Cr_2Al	Cll_b	tI6
(f)Al-26Ti-16Cr	TiAlCr	C14	hP12

3-2. L_{12} 단상 및 Cr_2Al 을 수% 포함하는 L_{12} 형 Al-Ti-Cr합금의 상분석 및 소성거동

L_{12} 단상합금 및 Cr_2Al 이 수% 석출된 합금(Fig. 1의 상태도상에 open circle로 표시)들을 선택하여 Cr조성의 증가에 따른 합금의 미세조직과 소성거동에 미치는 영향을 살펴보았다. 광학현미경, XRD 및 EDS를 이용한 상분석 결과로부터 Al-25Ti-8Cr 및 Al-25Ti-10Cr합금은 L_{12} 단상으로 이루어져 있으며, Al-25Ti-14Cr 및 Al-25Ti-15Cr합금은 L_{12} 상에 제 2상으로서 Cr_2Al 이 소량 석출되어 있음을 확인할 수 있었다. Fig. 3은 L_{12} 단상영역에 속하는 Al-25Ti-10Cr합금에 대한 열처리 전후의 미세조직의 변화를 나타낸 것이다. As-cast상태에서는 interdendrite영역에 다량의 제 2상이 포함되어 있지만, 균질화처리 후에는

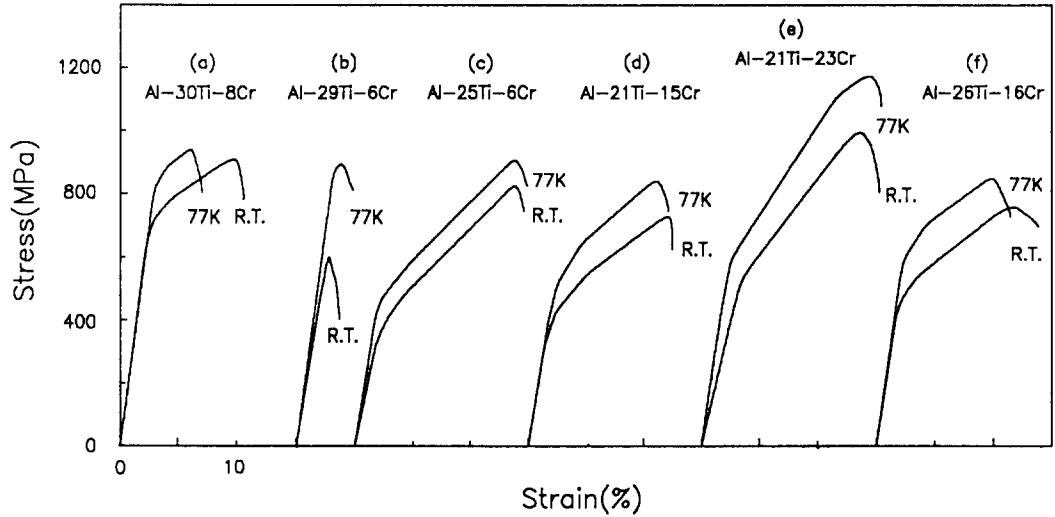


Fig. 2. Stress-strain curves of Al-Ti-Cr alloys consisting of 20% second phases.

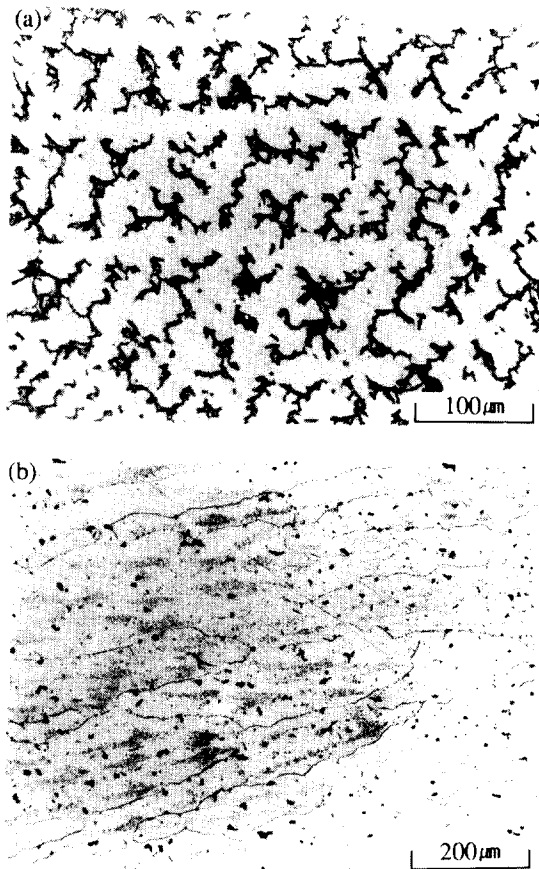


Fig. 3. Optical micrographs of Al-25Ti-10Cr alloys : (a) as-cast and (b) homogenized at 1423K for 48h.

이러한 제 2상들이 대부분 확산소멸하고 이 확산소멸과정에서 재료내부에 다량의 pore가 생성되어 있다. 그러나, Fig. 4에 나타난 바와 같이, Al-25Ti-8Cr 및 Al-25Ti-10Cr의 L_{12} 단상합금의 경우 Cr의 양이 증가할수록 균질화 처리후에 생성되는 재료내부의 pore의 양은 줄어들었으며, Cr의 양이 더욱 증가하여 제 2상이 소량 석출되는 Al-25Ti-14Cr과 Al-25Ti-15Cr합금에서는 재료내부에 pore가 거의 소멸하는 것으로 관찰되었다.

Fig. 5는 Fig. 4의 미세조직을 갖는 합금들에 대하여 압축시험을 행한 결과를 응력-연신율곡선으로 나타낸 것이다. 항복강도는 Cr의 양이 증가할수록 상온과 액체질소 온도 모두에서 다소 증가하는 결과를 나타내고 있다. 상온에서의 압축연신율은 L_{12} 단상합금들이 제 2상이 소량 석출되어 있는 합금들보다 높게 나타났으며 파괴형태는 모든 합금들이 취성적인 입내벽개파괴를 나타내었다. 이와 같은 파괴형태는 본질적으로 매우 낮은 금속간화합물의 정합강도를 가지고 있기 때문에 나타나는 결과로⁹⁾, 이것이 L_{12} 형 3원계 Al-Ti-X합금의 상온 취성에 가장 큰 원인 중의 하나로 이해되고 있다. 한편, L_{12} 단상합금들 중 Cr의 양이 많은 Al-25Ti-10Cr합금이 Al-25Ti-8Cr합금보다 더 높은 상온 압축연신율을 나타내고 있으며, 이와는 반대로 액체질소 온도에서는 Al-25Ti-10Cr이 Al-25Ti-8Cr합금보다 오히려 압

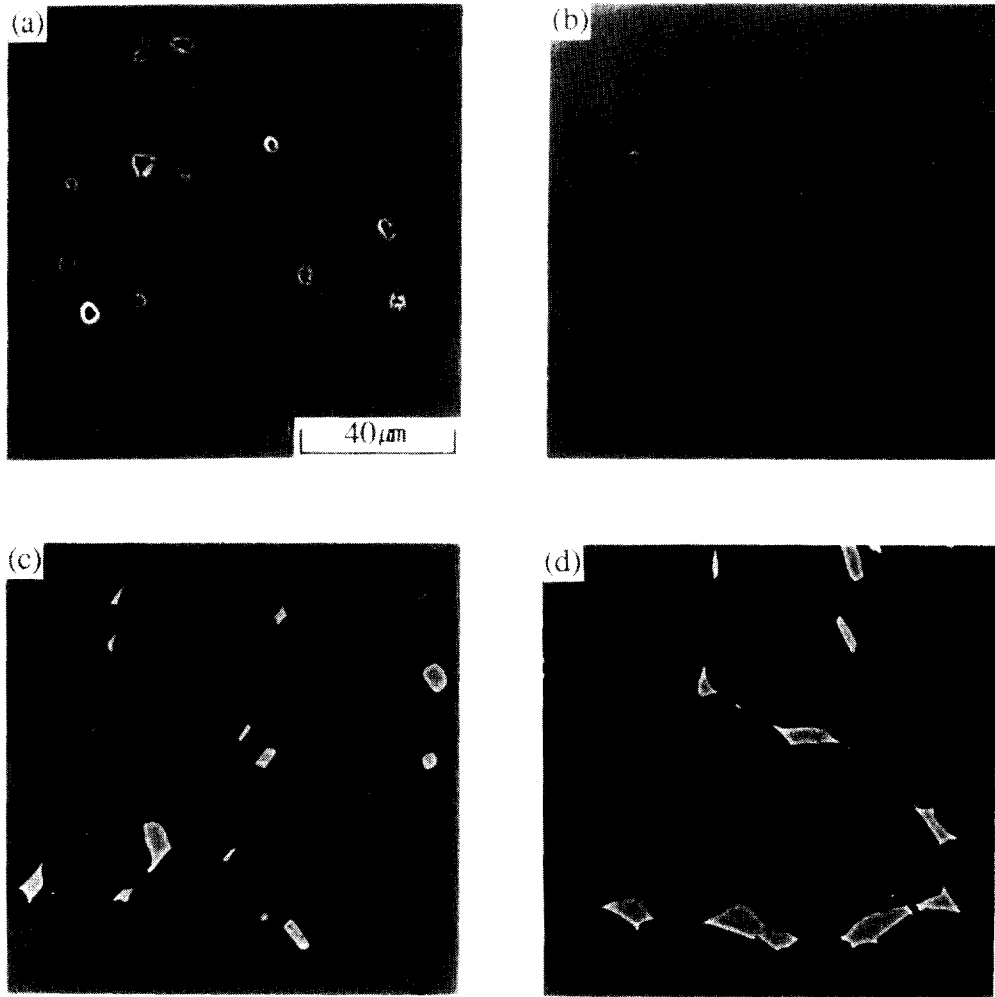


Fig. 4. Scanning electron micrographs of Al-25Ti-xCr alloys homogenized at 1423K for 48h: (a) Al-25Ti-8Cr, (b) Al-25Ti-10Cr, (c) Al-25Ti-14Cr and (d) Al-25Ti-15Cr

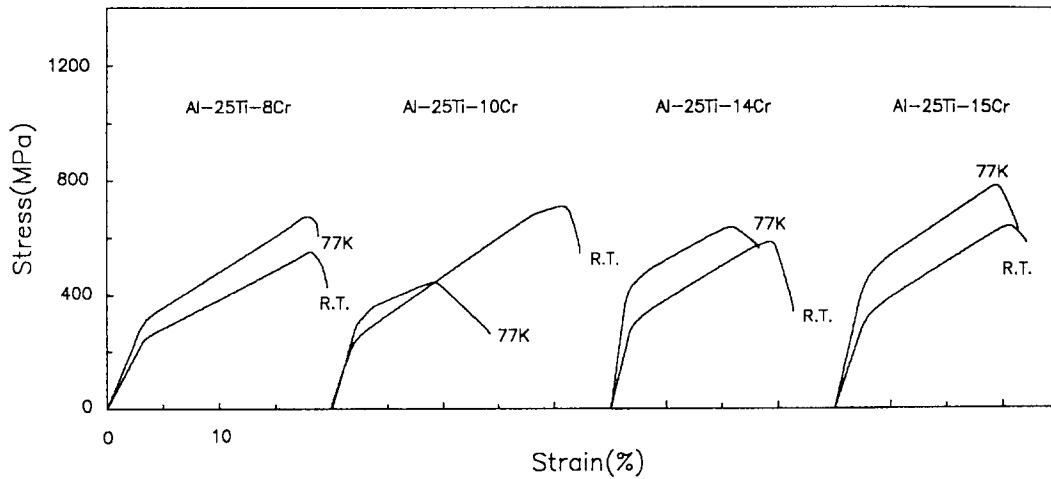


Fig. 5. Stress-strain curves of Al-25Ti-xCr alloys (x=8, 10, 14 and 15).

축연신율이 감소하였다. 또한 Al-25Ti-15Cr 합금에서는 액체질소 온도에서의 압축연신율이 Al-25Ti-10Cr 및 Al-25Ti-14Cr 합금에서 보다 약간 증가하는 결과를 나타내었다. 이와 같은 상온과 77K에서의 압축연신율의 특이한 거동은 단순히 온도변화에 따른 효과만으로는 설명하기 힘들며 대기중과 액체질소 분위기에 따른 환경효과 및 pore의 양에 의해 크게 영향을 받고 있음을 예측할 수 있다.

4. 고찰

4-1. 환경취성

금속간화합물의 취성은 일반적으로 재료의 본질적인 성질로 이해되고 있으나, 최근 수소에 의한 환경취성¹¹⁾도 금속간화합물의 상온취성에 어느정도 영향을 미치는 것으로 보고되어 있다. 금속간화합물의 환경취성은 금속간화합물의 구성원소와 대기중의 수증기가 반응하여 수소원자를 생성하고, 이 수소원자가 금속간화합물의 입계 또는 벽개면의 결합에너지를 약하게 하여 파괴가 쉽게 일어나기 때문인 것으로 해석되고 있다. 이러한 금속간화합물의 환경취성은 제 3원소의 첨가에 의해 그 효과를 줄이거나 완전히 억제할 수도 있는 것으로 보고되고 있으며, Izumi등의 연구결과¹²⁾는 Ll_2 형 금속간화합물인 Co_3Ti 에 제 3원소를 첨가하여 환경취성의 효과를 억제할 수 있다는 것을 잘 나타내고 있다. TiAl합금에서도¹³⁾ 진공중에서는 Cr을 첨가한 경우가 Cr을 첨가하지 않은 경우 보다 낮은 연신율을 나타내지만, 대기중에서는 Cr을 첨가한 경우가 연신율이 오히려 증가하는데 이것은 Cr이 합금의 환경취성을 억제하는 효과가 있기 때문일 것으로 해석되고 있다. 본 연구의 결과도 이와 유사하게 Ll_2 단상합금인 Al-25Ti-8Cr과 Al-25Ti-10Cr 합금을 비교해 보면, Fig. 5에서와 같이, Cr양의 증가로 액체질소 온도에서의 압축연신율은 감소한 반면 상온에서의 압축연신율은 증가하였으며, 이것은 상온 대기중에서 합금의 압축연성에 미치는 환경취성의 효과가 억제된 것에 기인하는 결과라고 생각된다.

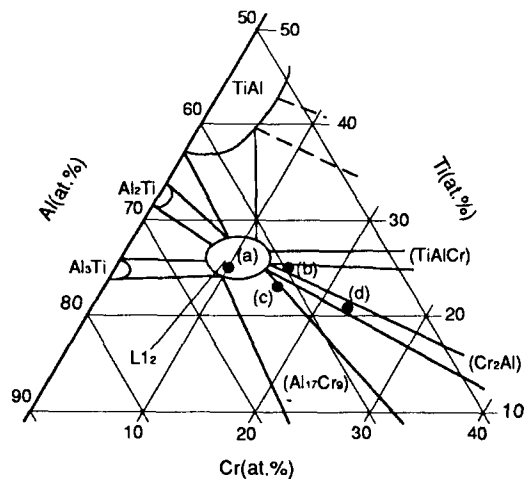
합금조성의 연성에 미치는 환경취성의 효과를 알아보기 위하여, Fig. 6에 도시한 바와 같이, 3원계 상태도상의 4가지 조성의 합금에 대하여 상온과 액체질소 온도에서 변형속도를

변화시키면서 압축시험을 행하였다. Ll_2 단상합금인 Al-25Ti-10Cr합금은 상온과 액체질소 온도에서 변형속도의 변화에 따른 압축연신율의 변화가 거의 없으며 따라서 환경취성의 영향을 가장 적게 받는다는 것을 보여주고 있다. 그러나 Cr_2Al 이 수% 석출된 Al-25Ti-15Cr합금은 액체질소 분위기하에서는 변형속도가 증가할수록 연신율이 감소한 반면, 상온 대기중에서는 변형속도가 증가할수록 연신율이 오히려 약간 증가하는 결과를 나타내고 있으며, 이러한 결과는 Al-25Ti-10Cr합금보다 Al-25Ti-15Cr합금에서 환경취성의 영향이 크게 나타나고 있음을 보여주고 있다. Ti이 화학양론조성인 25at.%보다 다소 적은 Al-23Ti-15Cr합금과 제 2상으로 Cr_2Al 이 20% 정도 석출된 Al-21Ti-23Cr도 Al-25Ti-15Cr합금과 유사한 결과를 나타내고 있으며, 상온 대기중에서 변형속도의 증가에 따른 압축연신율의 증가의 크기가 Al-25Ti-15Cr합금에 비해 더욱 크며 따라서 환경취성의 영향이 더욱 커지고 있다. 이상과 같이 환경취성의 효과는 압축연신율의 크기에 매우 중요한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

한편, 본 연구의 결과 Al-Ti-Cr계 Ll_2 단상합금은 환경취성의 영향에도 불구하고 20% 전후의 압축연신율을 나타내고 있으나, 인장연성에 관한 Nakayama등의 연구결과⁶⁾ bend ductility는 최대 0.9% 정도인 것으로 보고되어 있다. 따라서, 이와 같은 압축연성과 인장연성의 현격한 차이는 동합금의 본질적인 특성인 pore의 생성 등 제 2의 요인이 결정적인 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

4-2. Pore의 생성

Ll_2 형 3원계 Al-Ti-Cr합금에서 균질화처리 후에 생성되는 pore는 as-cast상태와 균질화처리 후에 나타나는 제 2상의 종류⁶⁾와 깊은 관계가 있는 것으로 보고되어 있다. 대부분의 Ll_2 형 3원계 Al-Ti-X합금에서 응고 직후 제 2상이 석출되는 것은 Ll_2 상의 조성영역이 온도가 감소함에 따라 그 크기가 축소되며, 이와 함께 Ll_2 상영역의 중심의 위치가 이동하기 때문¹⁴⁾인 것으로 이해되고 있다. 즉 고온에서의 Ll_2 단상영역에 속하는 합금조성일지라도 응고 후 상온에서는 2상 혹은 3상영역에 속



하게 되어 상온에서 L_{12} 단상조직을 얻기가 어렵게 된다. 따라서 Al-Ti-Cr 합금계에서 Cr의 양이 비교적 적은 L_{12} 단상합금의 경우 as-cast 상태에서는 응고수축에 따른 소량의 pore와 함께 $Al_{17}Cr_9$ 이 제 2상으로 생성되므로, 균질화처리시 $Al_{17}Cr_9$ 이 확산소멸하고 이 과정에서 Kirkendall effect에 의해 pore가 다량 생성되는 것으로 생각된다. 그러나, Cr의 양이 비교적 많은 합금들의 경우에는 as-cast 상태에서 제 2상으로 Cr_2Al 이나 $TiAlCr$ 이 생성되며, 응고수축에 의한 pore도 존재하지 않으며 또한 균질화처리 동안에도 이러한 제 2상은 확산과정을 통하여 소멸하거나 그 양이 줄어들 뿐 재료내부에 pore를 생성하지 않는 것으로 보고⁶⁾되어 있다. 이는 확산소멸하는 제 2상과

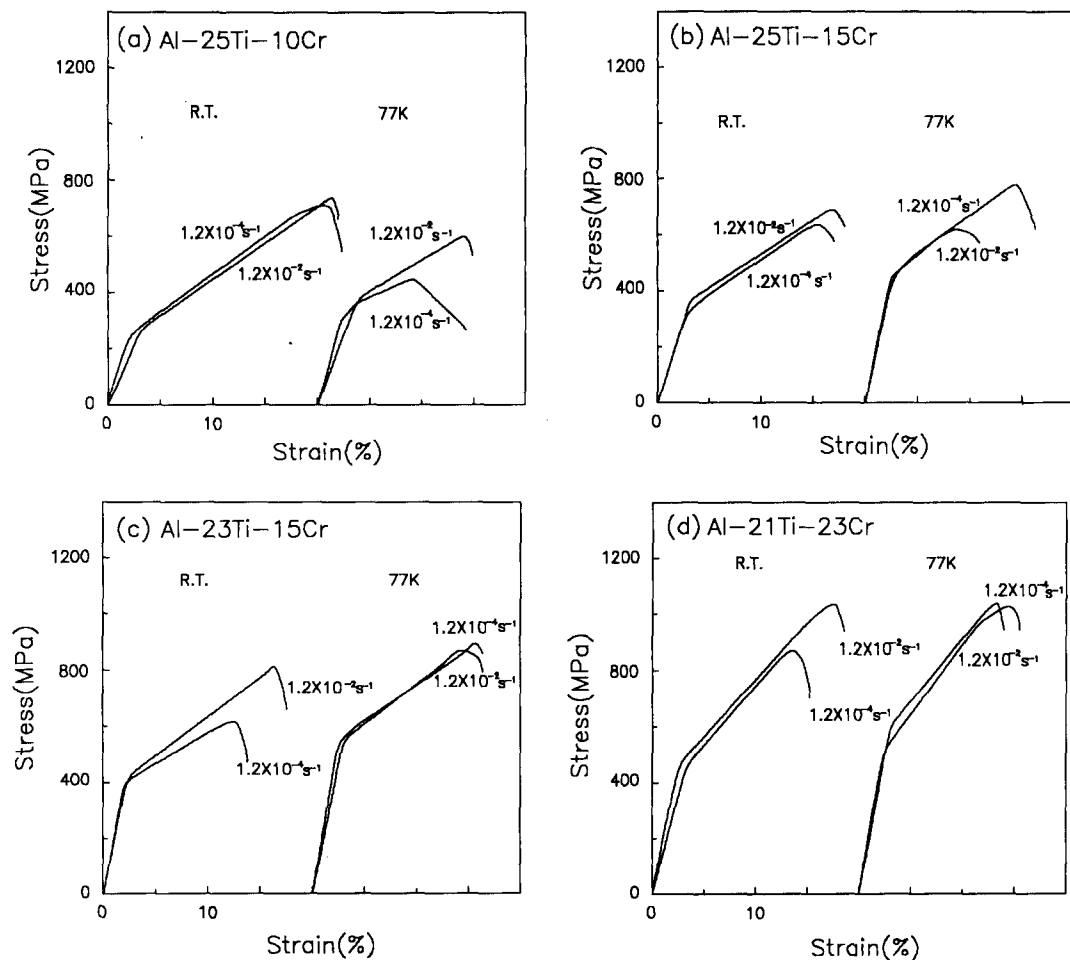


Fig. 6. Stress-strain curves of (a) Al-25Ti-10Cr, (b) Al-25Ti-15Cr, (c) Al-23Ti-15Cr and (d) Al-21Ti-23Cr alloys tested at strain rates of $1.2 \times 10^{-4}/s$ and $1.2 \times 10^{-2}/s$.

기지조직과의 사이에 원자당 용적차이가 거의 없기 때문에 제 2상의 확산소멸과정에서 pore가 생성되지 않기 때문일 것으로 판단된다. 재료내부에 생성되는 pore는 합금의 기계적성질에 큰 영향을 미칠 것으로 생각되며, 굽힘시험의 결과⁶⁾에서도 재료내부에 pore를 포함하고 있는 Ll_2 단상합금인 Al-25Ti-8Cr의 경우에는 0.25%의 연성만을 나타내지만, Cr의 양이 증가하여 pore가 소멸한 합금조성에서는 연성이 더욱 증가하여 Al-25Ti-14Cr합금의 경우에는 약 0.9%의 연성을 나타내고 있다. 따라서, pore의 소멸은 인장연성의 개선에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

그러나 Ll_2 단상영역부근의 합금에 대한 상온 압축시험에서는, pore의 생성(Fig. 4)과는 무관하게, 환경취성(Fig. 6)의 영향을 가장 적게 받는 Al-25Ti-10Cr합금이 가장 우수한 압축연성(Fig. 5)을 나타내었다. 따라서 압축연성은, 인장연성에서와는 달리, pore의 소멸보다 오히려 환경취성의 영향이 더욱 크게 작용하는 것으로 생각된다. 한편, Ll_2 상에 제 2상이 20%정도 석출된 합금들 중에서는 Cr_2Al 과 Al_3Ti 이 제 2상으로 존재할 때 가장 우수한 압축연신율을 나타내었으나, Al_3Ti 이 석출될 경우 재료내부의 pore가 다수 존재하는 반면 Cr_2Al 이 석출될 경우에는 pore가 전혀 생성되지 않으므로, 인장응력하에서는 Cr_2Al 을 제 2상으로 포함하고 있는 Al-21Ti-23Cr합금이 가장 우수한 연신율을 나타낼 것으로 예측된다. Klansky 등의 최근의 연구¹⁰⁾에 의하면 Cr_2Al 의 경도값은 Ll_2 상 보다 높은 값을 나타내므로, Cr_2Al 석출상 그 자체는 Ll_2 상의 연성 개선에 직접적인 도움이 되지 못할 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고, Fig. 2에 도시한 바와 같이, Al-21Ti-23Cr합금이 특히 우수한 연신율을 나타내는 이유는 Cr_2Al 의 석출로 인하여 미세조직상의 pore가 완전히 소멸했기 때문이라고 생각된다. 이상의 결과를 토대로, Al-Ti-Cr합금계에서 높은 강도를 유지하며 가장 우수한 인장연성을 나타낼 수 있는 최적 합금조성은 Cr_2Al 이 제 2상으로 20%정도 석출된 Al-21Ti-23Cr합금일 것으로 기대된다.

4-3. 주조조직

상온 압축연신율이 최대로 나타난 Ll_2 단상

합금인 Al-25Ti-10Cr과 제 2상으로 Cr_2Al 을 20%정도 포함하는 Al-21Ti-23Cr합금에 대하여 진공아크용해로에서 $120 \times 25 \times 15mm^3$ 의 크기로 제조한 ingot조직의 as-cast상태에서의 특징을 조사하였다. Al-25Ti-10Cr합금의 ingot 상단에는 길이 45mm, 너비 7mm 크기의 비교적 큰 응고수축공이 생성되었고 그 주위에 ingot의 길이방향에 수직으로 crack이 다수 발생되었으며, 이러한 crack의 발생은 응고수축에 따른 큰 내부잔류응력에 기인한 것으로 생각된다. 반면, Al-21Ti-23Cr합금의 ingot 상단에서의 수축공의 크기는 길이 25mm, 너비 7mm로서 Al-25Ti-10Cr합금의 경우에 비해 수축공의 크기가 비교적 작고 또한 ingot표면에서는 어떠한 crack도 관찰할 수 없었다. 더욱이, Al-21Ti-23Cr합금의 경우에는 양호한 주조조직과 함께, 앞에서도 언급한 바와 같이, 재료내부에 pore가 전혀 생성되지 않으므로 Al-Ti-Cr합금계에서 가장 우수한 인장연신율을 얻을 수 있는 합금조성일 것으로 기대된다.

5. 결 론

Ll_2 형 (Al, Cr)₃Ti기 2상 금속간화합물의 소성거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 환경취성의 영향을 고찰한 결과, Ll_2 단상합금인 Al-25Ti-10Cr합금이 환경취성의 영향을 가장 적게 받으며, 또한 가장 우수한 상온 압축연신율을 나타내었다. 한편, pore의 생성과 ingot주조조직의 특징을 고찰한 결과, Cr_2Al 을 제 2상으로 20%정도 포함하는 Al-21Ti-23Cr합금은 재료내부에 pore를 전혀 생성하지 않으며, Ll_2 단상합금인 Al-25Ti-10Cr합금보다 매우 양호한 ingot 주조조직을 가지고 있는 것으로 나타났다. 따라서 환경취성, pore의 생성, ingot 주조조직 등을 종합적으로 평가하여 보면 압축연성은 환경취성의 효과가 가장 중요한 요인으로 작용하는 것으로 생각되며, 인장연성은 환경취성의 효과보다는 오히려 pore 및 주조조직의 영향이 더욱 중요한 요인으로 작용할 것으로 판단된다. 이상의 결과를 바탕으로, Cr_2Al 을 제 2상으로 20%정도 포함하는 Al-21Ti-23Cr합금이 가장 우수한 인장연신율을 나타낼 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구의 수행에 유익한 조언을 해 주신 Hokkaido대학의 T. Suzuki교수, Kyoto대학의 M. Yamaguchi교수, Osaka Prefecture대학의 Y. Nakayama교수 그리고 Kyushu대학의 M. Nemoto교수에게 깊은 감사를 드리며 또한 본 연구는 항공재료연구센터(ERC)의 연구사업으로 한국과학재단의 연구비 지원에 의해 수행되었으므로 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

1. Y. Umakoshi, M. Yamaguchi, T. Sakagami and T. Yamane, *J. Mater. Sci.*, 24, 1599 (1989).
2. M. Yamaguchi and Y. Shirai, *Dispersion Strengthened Aluminum Alloys* (edited by Y. W. Kim and W. M. Griffith), p. 721, The Metallurgical Society, Warrendale, Pa. (1988).
3. Y. Nakayama and H. Mabuchi, *Intermetallics*, 1, 41 (1993).
4. D. M. Wee and T. Suzuki, *Trans. JIM*, 20, 634 (1979).
5. D. M. Wee, O. Noguchi, Y. Oya and T. Suzuki, *Trans. JIM*, 21, 237 (1980).
6. H. Mabuchi and Y. Nakayama, *Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium*, p. 1503 (1993).
7. H. Mabuchi, K. Hirukawa, H. Tsuda and Y. Nakayama, *Scripta Metall. Mater.*, 24, 505 (1990).
8. K. Hirukawa, H. Mabuchi and Y. Nakayama, *Scripta Metall. Mater.*, 25, 1211 (1991).
9. E. P. George, J. A. Horton, W. D. Potter and J. H. Schneibel, *J. Mater. Res.*, 5, 1639 (1990).
10. J. L. Klansky, J. P. Nic and D. E. Mikkola, *J. Mater. Res.*, 9, 255 (1994).
11. C. T. Liu and C. G. McKamey, *High Temperature Aluminides and Intermetallics* (edited by S. H. Whang, C. T. Liu, D. P. Pope and J. O. Steigler), p. 133, TMS, Warrendale, Pa. (1990).
12. O. Izumi and T. Takasugi, *J. Mater. Res.*, 3, 426 (1988).
13. M. H. Oh, H. Inui, M. Misaki, M. Kobayashi and M. Yamaguchi, *High-Temperature Ordered Intermetallic Alloys V* (edited by Ian Baker, Ram Darolia, J. Daniel Whittenberger and Man H. Yoo), p. 1001, MRS, Pittsburgh, Pa. (1993).
14. K.S. Kumar, *Structural Intermetallics* (edited by R. Darolia, J. J. Lewandowski, C. T. Liu, P. L. Martin, D. B. Miracle and M. V. Nathal), p. 87, TMS, Champion, Pa. (1993).