

《論 文》

열처리에 따른 TiAl금속간화합물의 층상조직 변화

신재관 · 정인삼 · 박경채
경북대학교 공과대학 금속공학과Changes of Lamellar Structure of TiAl Intermetallic
Compound Heat Treatment

Jae-kwan Shin, In-Sang Chung and Kyuong-Chae Park

Department of Metallurgical Engineering,
Kyungpook National University, Taegu, 702-701 Korea

ABSTRACT

The changes of lamellar($\alpha_2 + \gamma$) structure of TiAl intermetallic compound which is a high potential, high temperature aerospace material was investigated by heat treatment. The lamellar structure was short and made subgrain in prior α grains after homogenizing at 1523 K. It became longer and finer, and the subgrain went out during subsequent isothermal heat treating at 1273 K. The yield, fracture strength and strain to fracture of the heat treated specimens was increased and the hardness of them was decreased a little in the finer lamellar structure, because fine lamellar interface, subgrain boundary and grain boundary may block initiation and propagation of crack.

1. 서 론

최근 항공기 구조물, 미사일, 가스 터빈엔진 등에 대한 고성능화 욕구는 현재의 재료와 생산기술의 대폭적인 개량 및 대체를 필요로 하고 있다.

TiAl은 기존의 티타늄합금에 비해서 고온강도가 우수하고, creep특성, 내산화성이 좋으며, 비중이 작으므로 Ni기 초합금을 대체할 수 있는 유력한 합금으로 주목받고 있다. 그러나 상온연성이 낮으므로 인해서

실용화에 문제가 되고 있으며, 연성개선을 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

TiAl의 연성을 높이고 벽개과괴를 방지하기 위해서는 조직을 미세화시키는 것이 유리하며, 현재로서는 열처리에 의하여 $\alpha_2(\text{Ti}_3\text{Al})$ 와 $\gamma(\text{TiAl})$ 의 층상조직을 만드는 것이 유효하다.³⁾ 그러므로 연성을 증가시킬 수 있는 요인으로써의 층상조직이 열처리에 의해 어떻게 변화하며, 그에 따른 기계적성질과 변형거동에 대한 구체적인 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는

TiAl의 기계적 성질에 큰 영향을 미치는 층상조직의 열처리 조건에 따른 형상변화를 관찰하고, 그에 따른 기계적 성질의 변화 및 변형거동을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1. 시편제작과 열처리

순도 99.5% Ti sponge, 99.9%의 Al을 플라즈마 용해하여 주괴를 제작한 시료는 두 종류로서 화학 조성은 Ti-44, 45 at.% Al이다. 한번 용해한 시료는 Ti와 Al의 비중차에 의한 편석을 제거하기 위해 뒤집어서 다시 2회 재용해한 후 58mm ϕ ×12mmT의 disk형 시편을 제작하였다.

용고시의 포정반응에 의한 비평형 조직과 편석을 없애기 위해 균질화 처리를 하였다. 균질화 처리는 시료의 산화를 방지하기 위해 10⁻⁵torr로 배기한 석영관에 봉입 후 관상로에서 Ti-Al 이원계 상태도의 α + γ 영역인 1523 K에서 86.4ks동안 유지한 후 수냉하였고, 시편은 wire cutting에 의해 10mm×10mm×1.5mm의 관상시료로 준비하였다.

wire cutting을 한 후에는 조직변화를 고려하여, α 단상영역인 1623 K에서 1.5ks동안 유지한 후 공냉을 하고, 다시 2상영역인 1523 K에서 10.8ks동안 열처리를 하였다. 그 후 1273 K에서 각각 0.6, 3.6, 14.0, 46.8ks동안 시효하였다.

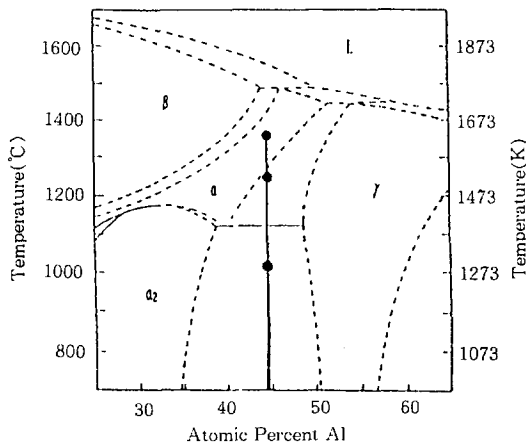


Fig. 1. Ti-Al phase diagram.

이 후 시편의 구별을 간편히 하기 위하여, 주조재를 wire cutting하지 않고 열처리한 시편을 각기 44Al, 45Al로 구분해서 칭하고, wire cutting후 1623K, 1.5ks 열처리하고 1523 K에서 10.8 ks열처리한 시편을 W, 그 후 1273 K에서 각각 0.6, 3.6, 14.0, 46.8ks동안 열처리한 시편을 W1, W2, W3, W4라 부르기로 한다.

Fig. 1은 가장 최근에 작성된 Ti-Al의 평형상태도이며,⁸⁾ 검은 점은 열처리 조건을 나타낸 것이다.

2.2. 조직관찰과 X-선 회절시험

주어진 열처리 온도와 시간에 따른 시편의 조직변화를 관찰하기 위해 광학현미경, SEM 등을 이용하였으며, 부식액은 80% H₂O+15%HF+5%HNO₃을 사용하여 10-15sec부식하였다. 또한 시편의 조직을 관찰함으로써 층상조직의 interspacing과 길이를 측정하였고, 압축변형에 따른 균열의 거동을 조사하였다.

X선 회절은 관상시료를 Rigaku사의 D/max-3C diffractometer를 이용하여 Cu target, 가속전압 30 kV, 주사속도 1°/min, 2 θ 를 30-90°의 조건으로 시험하였다.

2.3. 경도시험과 압축시험

Vickers 경도기를 사용하여 시험하중 10kg, 부하시간 30sec를 경도 측정 조건으로 하여 각 시편의 경도를 측정하였다. 경도값은 각 시편을 8회 측정하여 구한 값중 최고와 최저값을 제외한 나머지 값을 평균하여 나타냈다.

TiAl 금속간화합물은 상온에서 인장시험시, 연성이 매우 낮은 값을 가지므로 압축시험을 통해 기계적성질을 조사하였다. 압축시험편은 wire cutting에 의하여 3×3×5mm로 제작하였다. 일련의 열처리를 거친 후, 각각의 열처리조건당 세개의 시편으로 압축시험을 거쳐 열처리 조건에 따른 기계적 성질을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 주조재의 열처리에 따른 조직변화

山口등의 연구에 의하면 Ti-44, 45Al합금은 L→

$(\beta+L) \rightarrow (\beta+\alpha) \rightarrow (\alpha) \rightarrow (\alpha_2) \rightarrow (\alpha_2+\gamma)$ 의 과정을 따라서 평형용고가 진행된다고 하였다.⁸⁾

본 실험의 열처리 조건은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 1627 K, 1523 K 및 1273 K 이므로 상태도 상에서 각각 α , $\alpha+\gamma$, $\alpha_2+\gamma$ 영역에 해당된다.

Photo. 1은 주조재와 1523 K, 86.4ks 균질화 시편의 조직사진이다. 주조재에서, 용해되지 않은 Ti가 작은 흑점으로 보이고 있으며, 또한 결정립내에 미세한 층상조직이 보여주고 있다. 균질화 열처리 조직의 경우 주조조직보다 층상조직이 길이가 짧으면서 층간격이 넓은 조직으로써 층상조직이 매우 조대화하였음을 알 수 있으며, 하나의 결정립내에 층상조직이 여러 방향으로 배열하여 있음으로 인해 이들 층상조직이 아 결정립을 형성하여 있음을 알 수 있다. 또한 44Al보

다 45Al이 더 미세한 층상구조임도 알 수 있다. 이들 층상조직은 X-ray회절 시험한 결과 α_2 와 γ 상임을 확인하였다.

Photo. 2는 wire cutting 후 가공에 의한 조직의 변화를 고려하여 단상영역인 1623 K에서 1500 sec동안 열처리한 다음, 다시 1523 K에서 3시간 열처리를 한 조직사진이다. W-44Al, W-45Al에서 길이가 짧은 층상조직들이 100% 형성되어 있다. 이러한 시편을 1273 K에서 열처리했을 때의 조직을 Photo. 3, 4, 5에 각각 나타내었다.

Photo. 3에서 1273 K, 600sec동안 열처리에 의해 W1-44Al, W1-45Al의 경우 Photo. 2보다 층상조직이 조대화하였으나, 3.6ks동안의 열처리에 의해 다시 미세한 층상조직으로 바뀌고 있다.

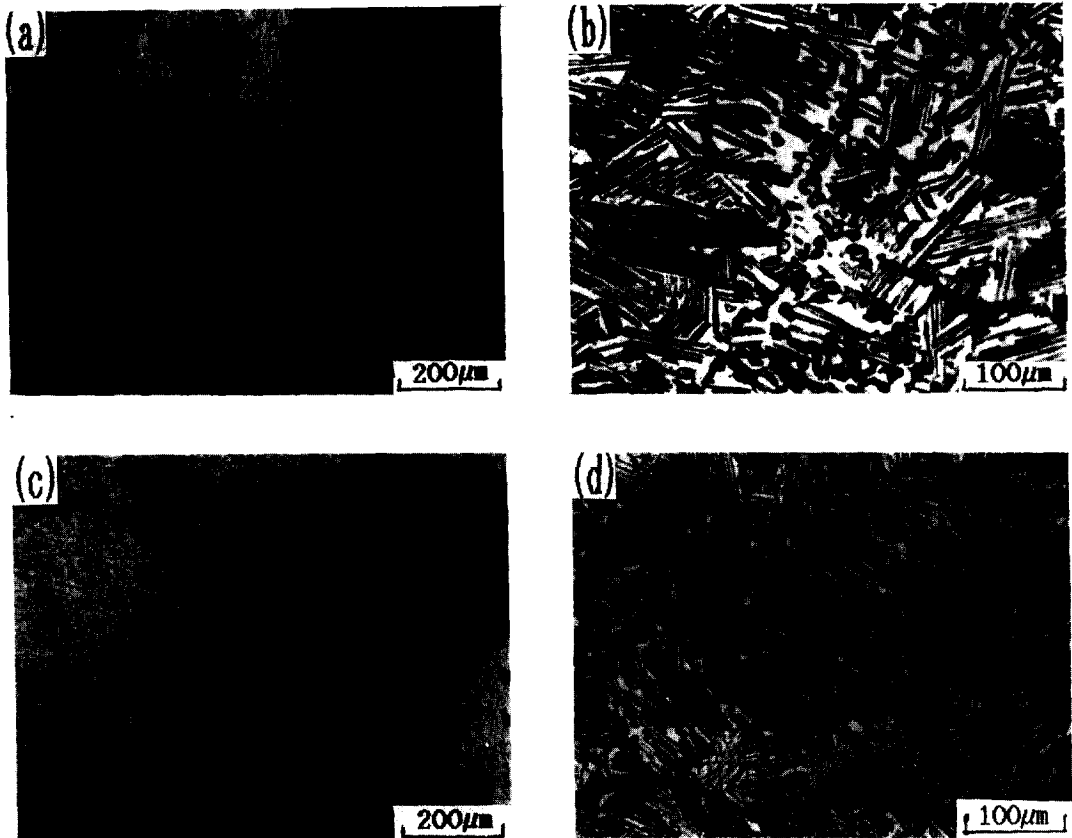


Photo.1. Optical microstructures of as casted alloys and solution treated alloys at 1523 K for 24 hr.

- | | |
|--------------------|---------------------------|
| (a) 44Al as casted | (b) 44Al solution treated |
| (c) 45Al as casted | (d) 45Al solution treated |

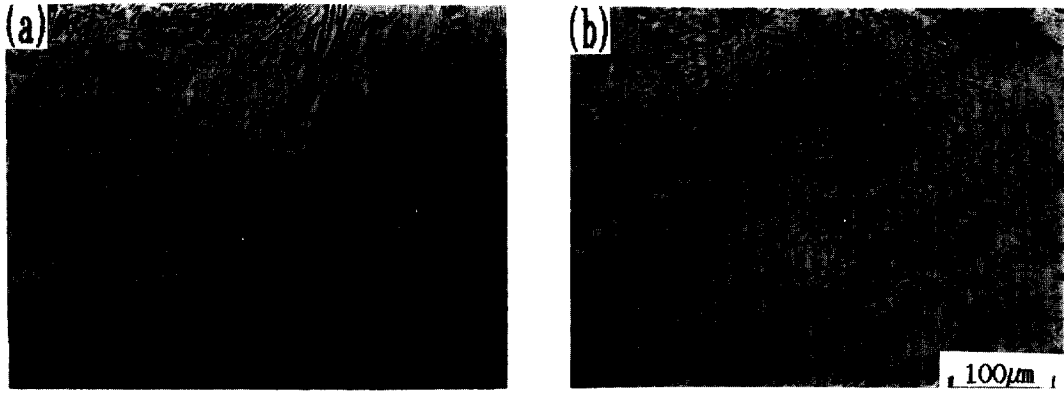


Photo. 2. Optical microstructures of the heat treated alloys at 1523 K for 10.8 ks after heat treatment at 1623 K for 1.5ks. (a) W-44Al (b) W-45Al

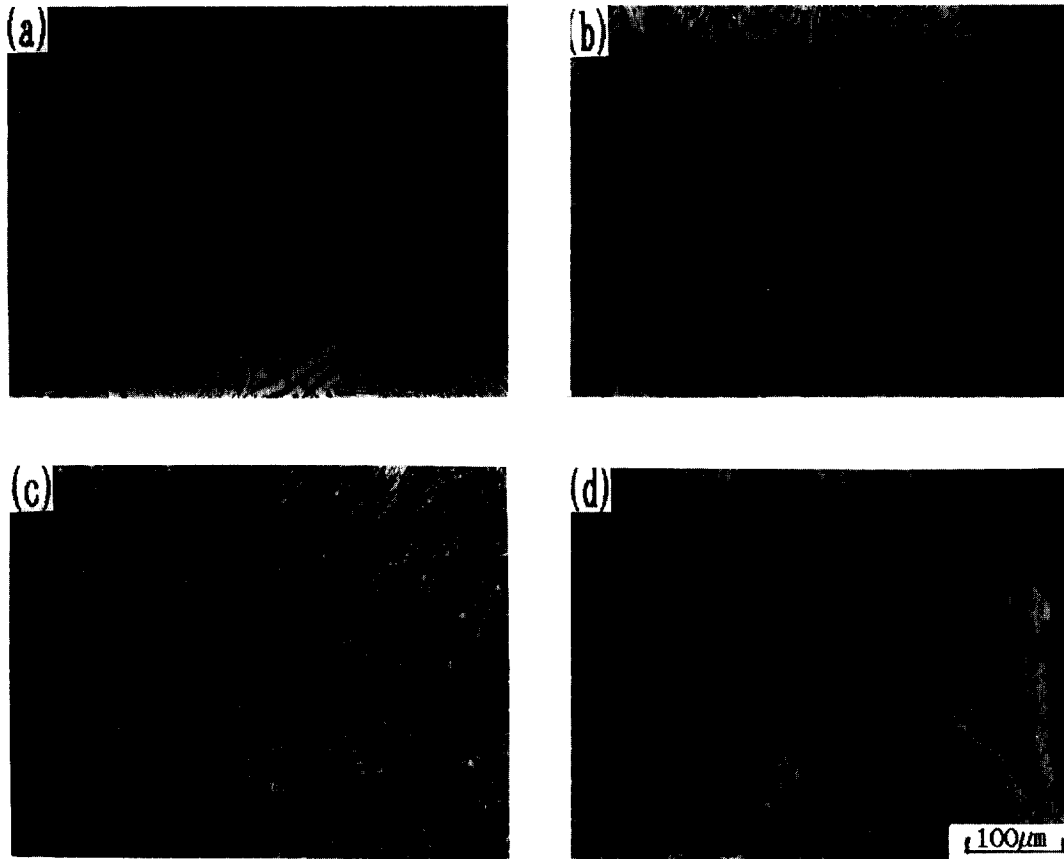


Photo. 3. Optical microstructures of the heat treated alloys at 1273 K for 600 sec 3.6 ks.
(a) W1-44Al (b) W2-44Al
(c) W1-45Al (d) W2-45Al

Photo. 4는 1273 K, 14.4ks동안 열처리한 W3 시편으로 두 종류위 합금 모두 a), b)에서 알 수 있는대로 더욱 미세한 층상조직으로 바뀌는 과정을 보여 주고 있다.

Photo. 5는 W3-45Al 시편에서 조대화 층상조직이 미세 층상조직으로 바뀌는 Photo. 4 b)의 화살표 부분을 확대하여 관찰한 사진이다. 화살표가 가르키는 부분에서 조대화한 층상조직이 미세한 층상조직으로 바뀌고 있다.

Photo. 6는 1273 K에서 46.8ks 동안 열처리한 W4 시편으로 미세한 층상조직이 보이고 있다.

이상의 결과를 열처리조건에 따른 층상조직의 층간격과 길이변화를 조성에 따라 시간을 변수로 해서

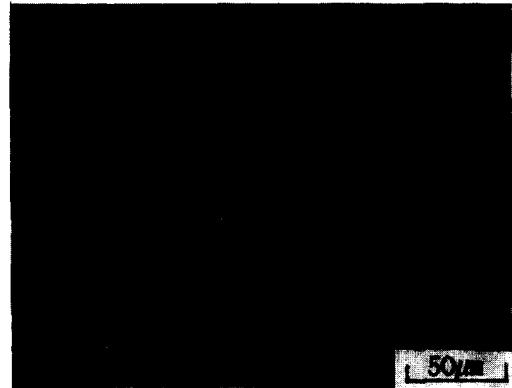


Photo. 5. Optical microstructures of W3-45Al heat treated at 1273 K for 14.4 ks.

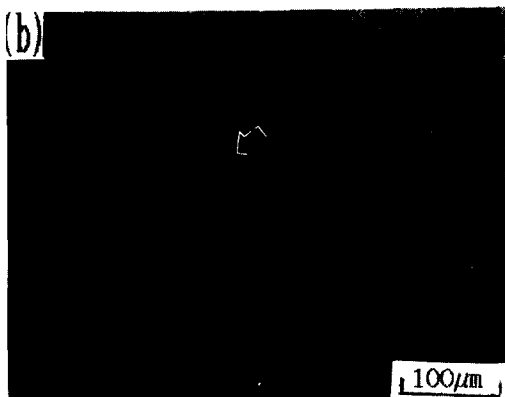
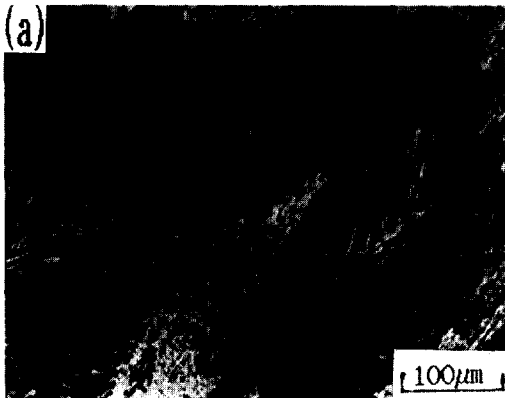


Photo. 4. Optical microstructures of the heat treated alloys at 1273 K for 14.4 ks
(a) W3-44Al, (b) W3-45Al

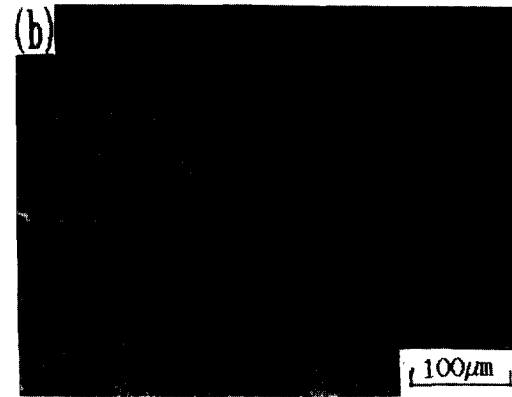


Photo. 6. Optical microstructures of the heat treated alloys at 1273 K for 46.8ks
(a) W4-44Al, (b) W4-45Al

Table 1. Changes of lamellar interspacing and length on heat treatment times at 1273 K after solution treatment. (μm)

	alloy	Homomized at 1523 K for 86.4ks	Heat treated at 1273 K		
			for 50sec	150 sec	3.6 ks
Interspacing	44Al	2.5-9.4	1.5-12.5	0.6-13.1	0.7-2.4
	45Al	4.1-5.0	2.0-7.1	1.2-13.7	1.2-5.9
Length	44Al	30-115	30-transgranular	77-transgranular	transgranular
	45Al	50-177	31-transgranular	39-transgranular	transgranular

Table 1에 종합하여 나타내었다. 44Al의 경우, 균질화 열처리 후 층간격 2.5-9.4 μm 의 층상조직이 1273 K, 150sec 동안 열처리되면서 층상조직의 합체에 의해서 층간간격이 10 μm 가 넘는 조대화 층상조직들을 형성하면서 동시에 미세한 층상조직들이 형성되기 시작한다. 열처리 시간이 지남에 따라 조대화된 층상조직은 점차 사라지고 미세한 층상조직이 생성되는 과정을 거친다. 균질화 시편에서 층상조직들이 하나의 결정립내의 여러곳에서 공석형태($\alpha \rightarrow \alpha_2 + \gamma$)를 일으키면서 층상조직은 여러 방향으로 배열하여 아결정립을 이루고 있고, 따라서 층상조직의 길이가 30-115 μm 로 짧다. 그러나 열처리 시간이 경과함에 따라서 결정립내의 층상조직들은 층상간격이 미세화되는 과정에서 한 방향으로 재배열하게 되고 이들 층상조직은 결정립계에도 도달 때까지 폭과 길이가 계속 성장한다.

45Al 합금 역시 300sec까지 열처리되는 동안 층간간격이 넓고 직선적인 층상조직과 층간간격이 수십 μm 에 이르는 과형의 층상조직이 생성되고 있다. 이러한 조대화된 층상조직들도 열처리시간이 경과함에 따라서 미세한 층상조직으로 바뀐다. 즉, 균질화 시편에 있어서 하나의 결정립내에서 여러방향으로 배열한 층상조직들은 그 길이가 50-177 μm 였으나 열처리 시간이 경과함에 따라서 결정립을 관통하는 길이까지 성장한다.

3.2. 경도시험

Fig. 2는 주조재와 균질화 열처리한 시편의 경도값과 균질화 시편을 1273 K에서 시효했을 때 열처리 시간에 따른 경도변화를 나타냈다. wire cutting하지

않은 시편에 대한 경도값으로서 wire cutting에 의한 조직의 변화가 없었으며, 44Al이 45Al보다 경도값이 크게 나타나고 있다.³⁾ 주조재에서 균질화 처리를 거치는 과정에서 경도값은 크게 감소하지만, 1273 K에서의 열처리에 따라서는 경도값의 변화가 크게 나타나지 않는다. 조직사진과 Fig. 2을 비교 분석하면 44Al은 150 sec까지의 열처리 시간 동안 조대화 층상조직이 생성되는데, 이 때의 경도값은 증가함을 보이고 있다. 45Al 역시 300 sec의 열처리시간까지 조대화된 층상조직이 생성되고, 이 때의 경도값 역시 증가하고 있다. 두 조성의 시편에서 열처리 시간이 지남에 따라 이들 조대화 층상조직이 미세한 층상조직으로 변화하게 되고 그에 따라 경도값이 감소하고 있다. 즉 조대화 층상조직의 존재는 경도값을 증가시키고 있으며, 미세층상조직은 경도값을 감소시킬 수 있다. 층상조직은 Blackburn의 방위관계가 성립한다.³⁾

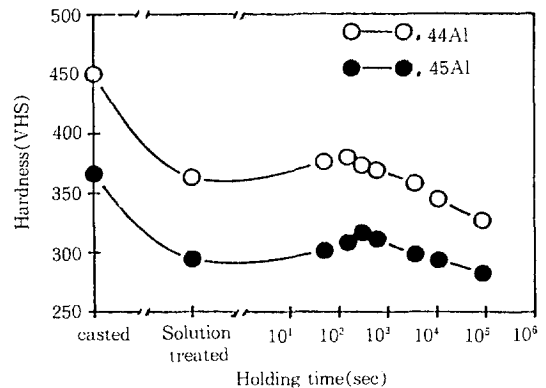


Fig. 2. Variations in hardness of as casted and solution treated alloy, the heat treated alloys at 1273 K after solution treatment.



상온에서 γ 상에서는 $1/2[110]$ 전위가 변형에 크게 기여한다고 한다.³⁾ 균질화 조직의 층상간격은 좁고 층상조직의 길이가 짧음으로 인해 많은 $1/2[110]$ 전위가 이동을 하지만 아결정립계에 의해 방해받게 되고 이동이 어렵게 된다. 열처리 시간이 경과함에 따라서 층상조직이 조대화되고 아결정을 형성하고 있으므로 보다 적은 $1/2[110]$ 전위가 이동을 하고, 또한 아결정립계에 의해 방해받으므로 인해서 경도압흔이 작게 되어 경도값이 크게 나타난다. 열처리 시간이 경과하면서 층상조직이 미세화 되고 아결정립계가 사라지므로써 아주 많은 $1/2[110]$ 전위가 방해를 받지 않고 이동을 할 수 있으므로 경도는 낮은 값을 나타낸다. 또한 상대적으로 조직이 미세한 45Al에서 많은 $1/2[110]$ 전위가 이동을 하므로써 경도값이 낮다.

wire cutting후의 1273 K에서 열처리 시간에 따른 경도값을 Fig. 3에 나타내었는데 여기서도 상기와 같은 경향을 보인다. W-44Al이 W-45Al보다 경도값이 크다. 또한 층상조직이 조대화되면서 경도값이 증가하고, 미세한 층상조직이 되면서 경도값이 감소하는 경향을 보인다.

3. 3. 압축시험

조직의 변화에 따른 기계적 성질의 변화를 알아 보

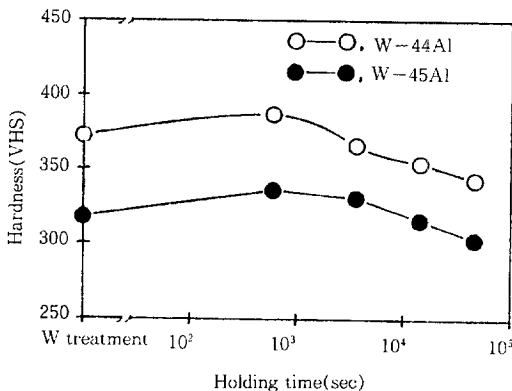


Fig. 3. Changes in hardness of W-44Al and W-45Al heat treated at 1273 K. * W heat treatment: A series of heat treatment at 1523 K for 3 hr after 1623 K for 1.5 Ks.

기 위해 압축시험을 행하였다. 압축시험의 결과로부터 1273 K에서 열처리 시간에 따른 항복 및 파괴강도를 Fig. 4에 나타내었다.

여기서 알 수 있듯이 항복강도와 파괴강도는 두 조성의 시편에서 열처리 시간이 길어짐에 따라 감소했다가 증가하는 경향을 보인다. 이러한 응력값을 조직의 변화와 비교하면, 열처리 시간의 증가에 따라 층상조직이 조대화되고 이때의 항복강도와 파괴강도가 감소한다. 층상조직이 미세화되면서 항복응력과 파괴응력은 증가함을 알 수 있다. 또한 층상조직이 미세화되면서 45Al이 44Al보다 항복 및 파괴강도가 높아짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 1273 K에서 열처리 시간에 따른 압축과단

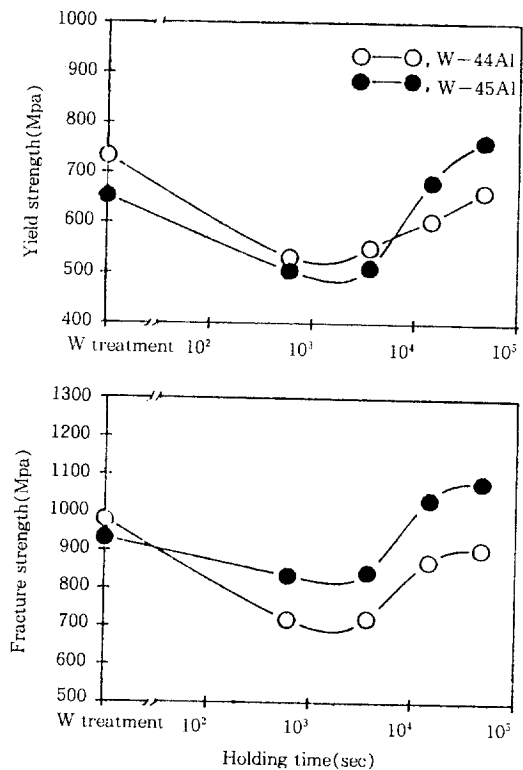


Fig. 4. Changes in yield and fracture strength of W-44Al and W-45Al heat treated at 1273 K after wire cutting. (a) yield strength (b) fracture strength

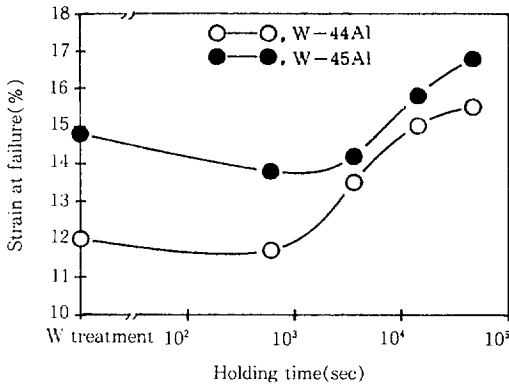


Fig. 5. Changes in strain at failure of W-44Al and W-45Al heat treated at 1273 K after wire cutting.

변형율을 나타냈다. 열처리에 따라 층상조직이 조대화 되면서 압축과단 변형율이 감소하고 미세화되면서 압축 과단 변형율이 증가하고 있다.

이상의 결과로 부터 미세한 층상조직이 조대한 층상 조직보다 상온에서의 기계적 성질을 향상시키는 것을 알 수 있다. 그에 대한 이유는 변형조직관찰에서 변형 조직과 함께 병행하여 설명된다.

3. 4. 변형조직관찰

Photo. 7은 W-44Al을 5.8% 압축변형시킨 조직으로, a)는 광학현미경, b), c)는 a)의 균열을 SEM에 의해 관찰한 것이다. 균열이 각기 다른 방향을 가진 층상조직의 아결정립계에서 발생하여 전파하고 있다.

Photo. 8은 W-45Al을 6.2% 변형시킨 조직이다. a)에서는 결정립계에서 균열이 발생, 전파하고 있다. b)에서는 아결정립계, 층상의 계면을 따라 균열이 전파하는 경우와 층상조직을 관통하면서 균열이 전파함을 알 수 있다. Photo. 7과 8의 균열을 관찰하면서 대부분의 균열은 아결정립계와 결정립계에서 발생, 전파하기가 용이함을 알 수 있다.

Photo. 9 a)는 9.5%의 변형을 가한 W-44Al, b)는 7.6%의 변형을 한 W1-44Al, c) 9.4% 변형을 한 W4-44Al의 조직사진이다. A로 표시된 화살표가 균열을 나타내고 B로 표시된 화살표가 변형대를 나타낸다. a)에서는 보이지 않는 파형의 변형대가 b), c)에

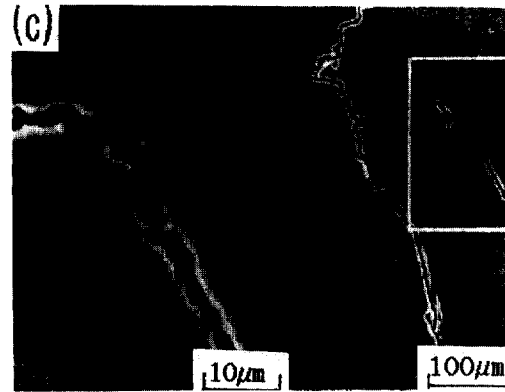
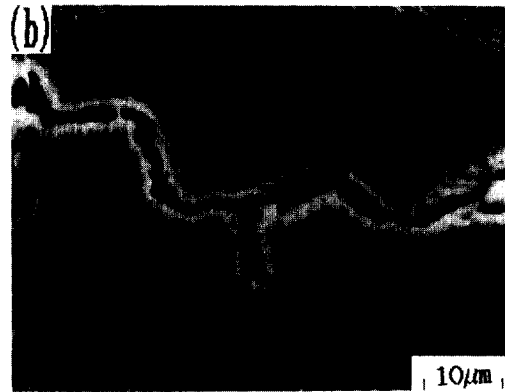
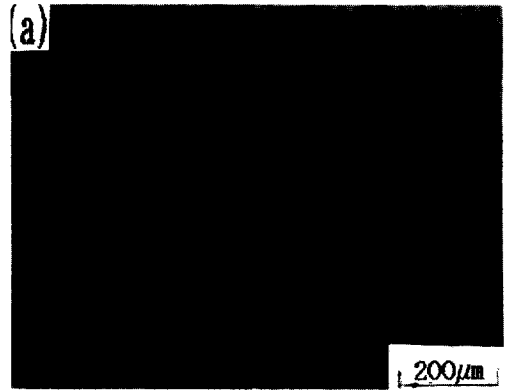


Photo. 7. Microstructures of W-44Al deformed at 5.8%
(a) by optical microscope
(b), (c) by SEM

서 보이고 있으며 이러한 변형대는 미세한 층상조직에서 화살표에서 확연히 볼 수 있듯이 층상조직과 수직인 방향으로 생성되고 있다. 층상조직과 수직으로 형

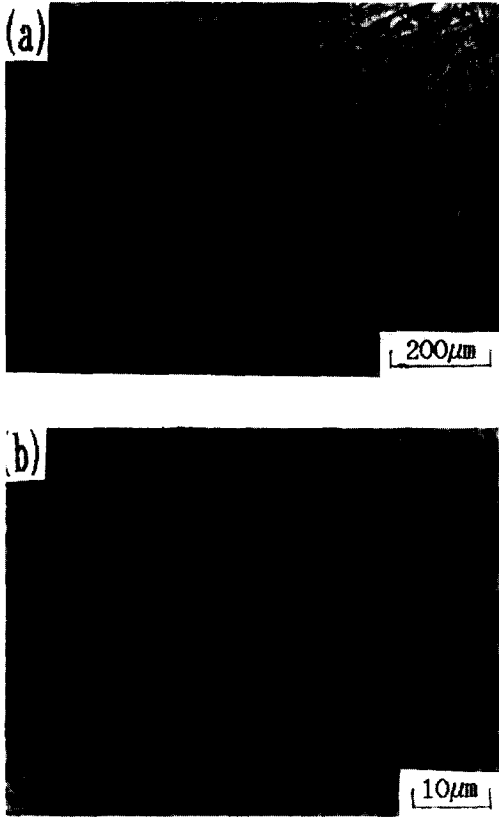


Photo. 8. Optical microstructures of W-45Al deformed at 6.2%

성되는, 변형이 진행됨에 따른 층상조직의 변형대는 Nonaka등에 의해 발표된 바 있다.¹⁶⁾

Photo. 10 a)는 Photo. 9 c)와 동일한 시편의 변형 전 조직이다. 결정립계에 조대한 층상조직들이 형성되어 있고 결정립내에 미세한 층상조직들이 형성되어 있다. Photo. 9 c)와 비교하면 변형대가 바로 미세한 층상조직에서 형성되고 있음을 알 수 있다. b)는 Photo. 9 c)의 화살표 B를 확대한 것으로 미세한 층상조직들이 변형을 일으키면서 변형대를 형성하고, 다시 균열이 이들 변형대에 수직, 또는 평행하게 발생, 전파하는 것을 보여주고 있다. c)는 W1-44Al을 파괴시켰을 때의 조직이고 d)는 c)의 화살표 부분을 확대한 것이다. 변형대에 균열이 수직 또는 평행하게 발생, 전파하고 있음을 뚜렷이 알 수 있다.

변형이 진행됨에 따라서 W1-44Al의 경우, 전위들

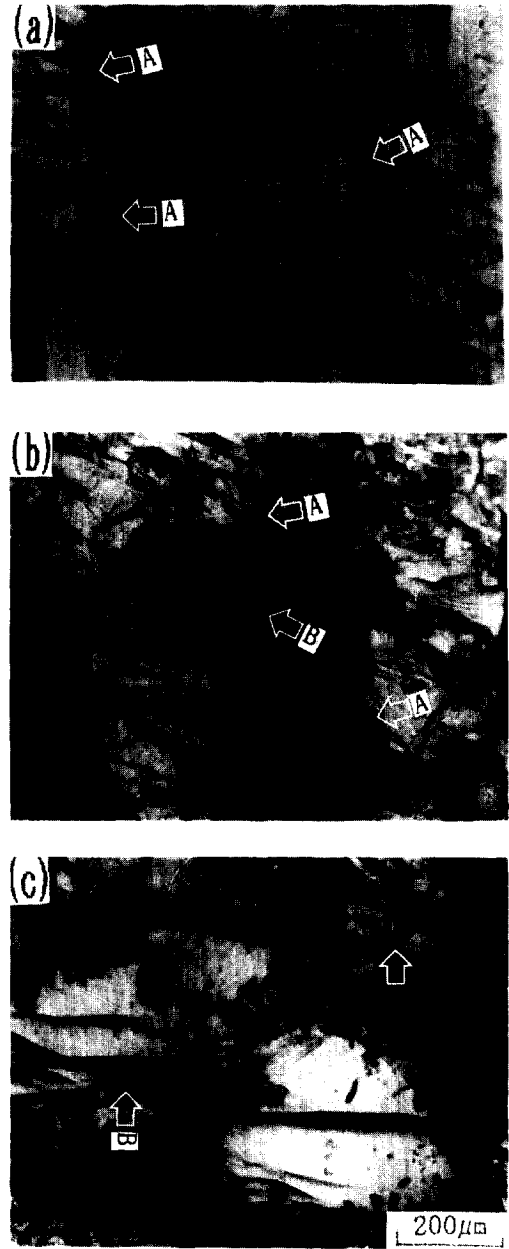


Photo. 9. Optical microstructures at the surface of each specimens

- (a) W-44Al deformed at 9.5%
- (b) W1-44Al deformed at 7.6%
- (c) W4-44Al deformed at 9.4%

이 아결정립 입계에서 이동을 방해 받음으로써 pile up되고 이러한 전위의 pile up은 아결정립 입계에서

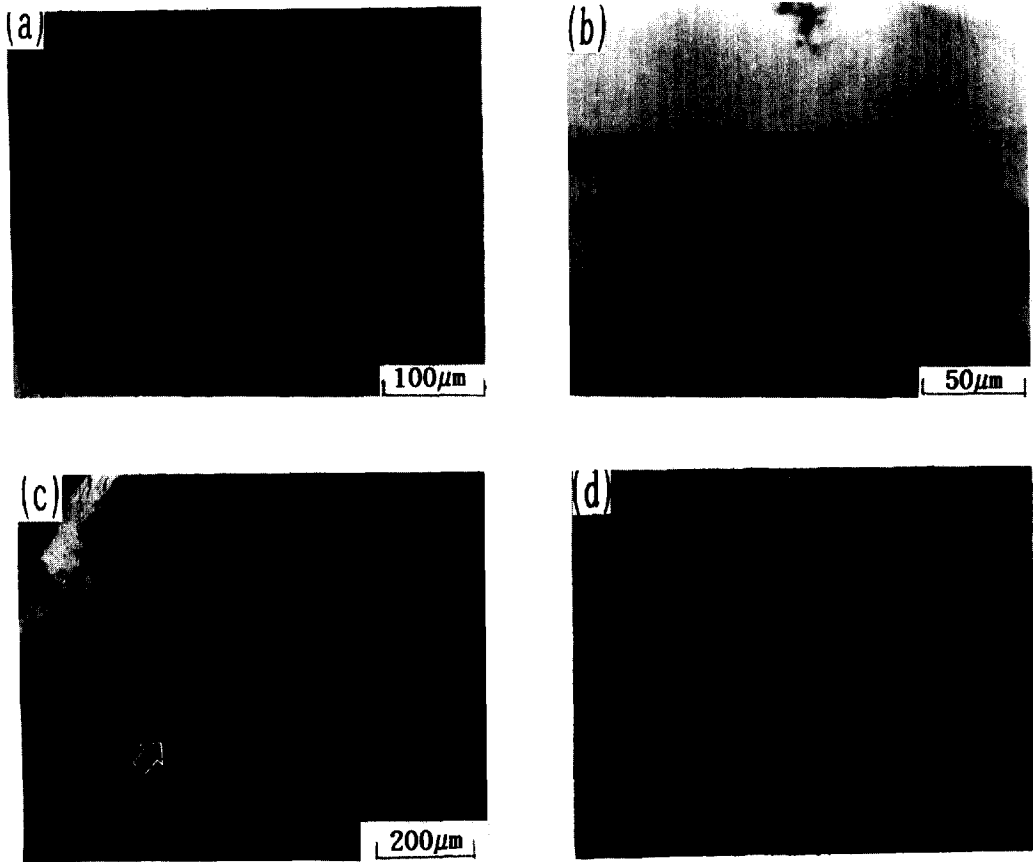


Photo. 10. Microstructures at the surface of each specimens
 (a) W4-44Al before deformation by optical microscope
 (b) W4-44Al deformed at 9.4% by SEM
 (c) (d) W1-44Al after fracture by SEM

균열을 발생시킴으로써 높은 경도에도 불구하고 낮은 강도와 연성을 나타낸다. W4-44Al의 경우는 아결정립계가 없음으로 해서 전위가 아결정립계에 pile up되지 않고, 미세 층상조직들이 변형을 일으킴으로써 균열의 발생, 전파를 지연시킨다. 변형이 계속되면 변형이 심한 변형대에서 균열이 발생, 전파한다. 이로 인해 낮은 경도에도 불구하고 강도와 연성이 증가한다.

아결정립을 가진 W-44Al과 W1-44Al에 있어서, W-44Al보다 W1-44Al이 경도가 높지만 강도와 연성이 낮은 이유는 아결정립계에서 발생한 균열이 전파할 때에 상대적으로 작은 아결정립 조직의 W-44Al에서 전파하기가 어렵기 때문이다.

층상조직이 미세화되면서 연성이 증가하게 되는 이유는 응력을 가하였을 시 미세한 층상조직에 수직으로 변형하여 이러한 변형대를 형성함으로써 균열의 발생과 전파를 지연시키기 때문이다. 변형이 계속되면 더 이상 변형대는 형성되지 못하고 균열이 변형대에 수직 또는 평행하게 발생, 전파한다. W1-44Al의 경우 미세 lamellar가 일부 존재하지만 조대한 층상조직이 대부분이다. 조대한 층상조직은 길이가 짧으므로 아결정립을 많이 형성해 있다. 균열은 아결정립 입계를 따라 발생, 전파하기가 용이함으로, 응력을 받을 경우 일부 미세한 층상조직이 변형을 일으켜 변형대를 형성하지만 균열이 아결정립 입계를 따라 전파함으로 연성을

해친다.

4. 결 론

상온연성 결립과 난가공성이라는 특성을 가진 Ti-Al계 금속화합물의 연성에 큰 영향을 미치는 층상조직이 열처리에 의해 변하는 형상과 함께 기계적성질, 변형거동을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 44, 45 at. %Al 합금에서 주조 후 1523 K 균질화 열처리에 의해 얻어진 층상조직은 그 길이는 짧았다. 이것을 ($\alpha_2 + \gamma$)구역이 1273 K에서 열처리하면, 초기에는 층상조직들의 합체에 의해서 결정립을 관통하는 길고 층간간격이 넓은 조대한 층상조직으로 변화했다. 열처리 시간이 경과함에 따라서 이러한 조대한 층상조직은 다시 층간간격이 좁고 긴 미세한 층상조직으로 변화했다.

2) 경도값은 각 조성에서 주조재는 높았으나, 균질화 처리에 의해 크게 감소한다. 1273 K 열처리에 의해 조대화 층상조직이 생성됨에 따라서 경도값이 증가하고, 미세 층상조직이 형성되면서 감소하는 경향을 보였다.

3) 압축시험에 얻어진 항복응력과 파단응력값은 조대한 층상조직이 형성된 조직에서 낮게 나타나고 미세 층상조직조직에서 높게 나타났다. 파단 변형을 역시 조대한 층상조직에서 낮게 나타나고 미세 층상조직에서 높게 나타났다.

4) 균열은 층상조직에서 아결정립 입계와 결정립 입계에서 발생하기가 용이하다. 균열의 전파는 아결정립 입계, 결정립 입계, lamellar intersurface 등의 계면을 따라 이루어 지고, 또한 층상조직을 수직으로 가로지르며 전파를 했다. 균열이 층상조직을 수직으로 관통하는 경우는 균열의 전파가 어려우므로 주로 위의 세가지 계면에서 균열은 발생, 전파한다. 층상조직이 조대한 경우, 변형이 일어날 때 많은 아결정립의 입계를 따라 균열이 발생, 전파하므로 강도와 변형율이 낮게 나타났다. 층상조직이 미세할 경우, 미세한 층상조직은 변형을 일으켜 변형대를 형성하면서 균열의 발생, 전파를 지연시킨다. 이로 인해 강도와 변형율이 높게 나타났다.

「후 기」

이 연구는 91년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행되었습.

참 고 문 헌

1. P. L. Martin, M. G. Mendiratta and H. A. Lipsitt : Metall. Trans. A, 14A(1933) 2170
2. T. Takahashi, H. Nagai and H. Oikana : Trans. JiM, 30(1989) 1044
3. Y. W. Kim : J. Met., 7(1989) 24
4. 山邊容子, 菊池 實 : 日本金屬學會會報 30 (1991) 37
5. M. Kikuchi, Y. Yamabe : Tokyo Ins., 152 (1991) 815
6. Y. Yamabe, N. Honjo, M. Kikuchi : Tokyo Ins., 152(1991) 821
7. 橋本健紀, 土肥春夫, 等原華男, 笠野 理 : 日本金屬學會會誌 52(1988) 1159
8. 山口政治, 乾 晴行, 吳 明勳 : 日本金屬學會會報, 30(1991) 43
9. C. McCullough, J. J. Valencia, H. Mateos, C. G. Levi and R. Mehrabian : Scr. Metall., 22(1988) 1131
10. G. J. Mahon and J. M. Howe : Metall. trans. A, 21A(1990) 1655
11. S. M. L. Sastry and H. A. Lipsitt : Metall. Trans. A, 8A(1977) 299
12. S. C. Huang and E. L. Hall : Acta Metall., 39 (1991) 1053
13. B. Dogan, R. Wagner and P. A. Beaven : Scr. Metall., 25(1991) 773
14. C. R. Feng, D. J. Michel and C. R. Crowe : Scr. Metall., 22(1988) 1481
15. E. L. Hall and S. C. Huang : Mat. Res. Soc. Symp. proc., 133(1989) 693
16. 野中勝彦, 田野崎和夫, 藤田正義, 千葉晶彦, 用畑武, 和泉 修 : 日本金屬學會會誌 55(1991) 1045