

단결정, 일방향응고, 다결정 TiAl+Mo합금의 소성거동  
(Plastic Behavior of Single-, DS- and Poly-Crystalline TiAl+Mo Alloys)

한국과학기술원 김민철, 위당문

금오공과대학 오명훈

한국기계연구원 김승언

### 1. 서 론

금속간화합물 TiAl은 높은 비강도 및 고온강도 등 고온구조용재료로서의 우수한 특성 때문에 차세대 경량내열재료로서 주목을 받고 있는 신소재이다. 이 소재에 관한 연구관심은 실용화 장애요소로서 지적되어온 상온연성개선에 집중되어 왔으며 따라서 상대적으로 상온연성이 우수한 것으로 밝혀진 47~50at.%Al 조성의 Ti-rich TiAl이 최근 연구의 주대상이 되고있다. 본 연구에서는 우수한 고온특성을 나타내는 완전층상조직의 Ti-rich TiAl을 주연구 대상으로 이 조직의 기계적성질에 미치는 첨가원소의 영향에 대한 정성 및 정량적 분석을 실시하고, 외부환경이 기계적성질에 미치는 영향까지를 평가하므로서 완전층상조직의 소성변형거동에 미치는 첨가원소의 영향을 조사하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 floating zone melting 방법으로 제작된 미량의 Mo이 첨가되고 단일 결정립의 TiAl/Ti<sub>3</sub>Al 층상구조로 이루어지는 삼원계 TiAl Polysynthetically Twinned (PST) 결정을 사용하여 그 미세구조 및 상온인장변형거동에 대한 체계적인 연구를 수행하므로서 합금화의 효과에 관한 기본적인 개념을 얻었다. 이러한 연구결과를 바탕으로 하여 동일조성의 다결정(polycrystal) 시료를 이용하여 가공열처리에 따른 미세조직 및 기계적특성의 변화에 관한 연구를 수행하였으며, 특히 우수한 고온특성을 나타내는 층상조직 TiAl의 실용화를 위한 유력한 제조방법중의 하나로 고려되고 있는 방향성응고법(Directional Solidification)으로 제조된 시료에 대한 기계적성질 평가도 실시하여 TiAl PST 결정에서의 결과와 연관지어 고찰하였다.

### 2. 실험방법

ASGAL FZ-SS35W optical floating zone furnace중에서 성장시킨 PST결정의 미세조직을 광학현미경과 TEM을 이용하여 분석하였으며 또한 ALCHEMI법(Atom Location by Channeling Enhanced Microanalysis)을 사용하여 미량첨가원소인 Mo의 치환위치를 조사하였다. 다결정 시료는 PST결정과 동일한 조성의 합금을 Skull-melting하여 1150℃에서 80% 향온 단조를 행한 시료를 사용하였다. 다결정 시료의 조직제어는 복합조직과 완전층상 조직을 갖도록 하기 위해 각각 1290℃ 3hr와 1380℃ 2hr의 열처리를 실시하였다. 방향성응고(DS) 시료는 PST결정과 동일조성의 button을 진공아크 용해로에서 용해한 후 아크용해 일방향 응고장치에 장입하여 Ar 분위기에서 300mm/hr의 속도로 성장시켜서 제조하였다. PST 결정의 상온인장시험에서는 두가지의 다른 층상경계(lamellar boundary) 방향(A 및 B방위)을 갖는 인장시편을 일방향응고된 합금에서는 성장방향에 대하여 3가지 방향의 인장시편에 대하여 방향에 따른 인장특성의 변화를 관찰하였다. 또한 다결정합금에서는 미세조직 및 변형속도에 따른 인장변형특성의 변화를 조사하였다. 인장시험은 Instron-type의 만능시험기를 이용하여  $1.0 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 과  $2.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 의 변형속도로 상온에서 수행하였으며, 시험후의 인장변형조직은 광학현미경과 전자현미경을 이용하여 관찰하였다.

### 3. 실험결과

TiAl PST결정에서 인장연신율에 미치는 Mo의 효과를 알아보기 위해서 hard type(변형이 층상경계를 가로지른 방향으로 일어나는 형태) 및 easy type(변형이 층상경계와 평행한 방향으

로 일어나는 형태)의 변형이 일어나는 2종류(A<sub>2</sub> 및 B<sub>2</sub> 방위)의 시편으로 인장변형거동을 조사하였다. 모든 시편은 상온 대기 중에서  $2.0 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ 의 변형속도로 파괴시까지 변형되었다. 인장시의 항복응력은 A<sub>2</sub>, B<sub>2</sub>방향을 가지는 시편 모두 2원계에 비해 약 두배의 값을 갖는다. 또한 인장시와 압축시의 항복응력에는 특별한 차이가 없는 것으로 나타나서 압축-인장 이방성이 존재하지 않는 것으로 분석되었다. 이것은 2원계 TiAl PST 결정에서도 동일하게 관찰된 현상이다. Mo 첨가 PST 결정의 A<sub>2</sub> 및 B<sub>2</sub>방향의 상온연신율은 각각 9.5% 및 18.4%로서 이원계 PST 결정의 동일방위에서 기록한 4.3%, 13.3%에 비하여 높은 값을 나타내는데 반해서 다결정에서는 1% 이하의 낮은 값을 나타내었다. 복합조직의 경우 Mo를 첨가하므로써 기존의 2원계보다 상당히 개선된 상온연신율을 나타내었으며 대기중에서의 인장시에는 인장속도가 빨라짐에 따라 연신율이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 진공중의 결과에서는  $1 \times 10^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 인장속도일 때는 대기중의 결과와 비슷한 정도의 연신율을 나타냈으나 속도가 감소함에 따라 연신율이 오히려 증가하는 경향을 나타냈다. 일방향응고 합금에서 성장방향으로의 인장시에는 항복이 일어나기도 전에 파괴가 일어나는 전형적인 취성파괴의 양상을 나타내었다. 그러나 성장방향에 수직하게 제작한 인장시편의 경우는 1%정도의 인장연신율을 나타내었다. 이러한 결과는 PST 결정의 A<sub>2</sub>와 B<sub>2</sub>방향의 인장 결과와 비교해보면 절대치로는 상당히 낮은 값이지만 DS시료 역시 lamellar방향에 따라서 인장특성, 특히 인장연신율이 좌우될 수 있다는 것을 보여주는 것으로서 층상조직의 방향제어 여하에 따라서는 PST결정과 동일하게 높은 상온연신율을 얻을 수 있는 가능성을 암시하는 결과라고 생각된다.

#### 4. 참고문헌

1. M. H. Oh, M. C. Kim and D. M. Wee, Korean J. Materials Research, 5(2), 157 (1995).

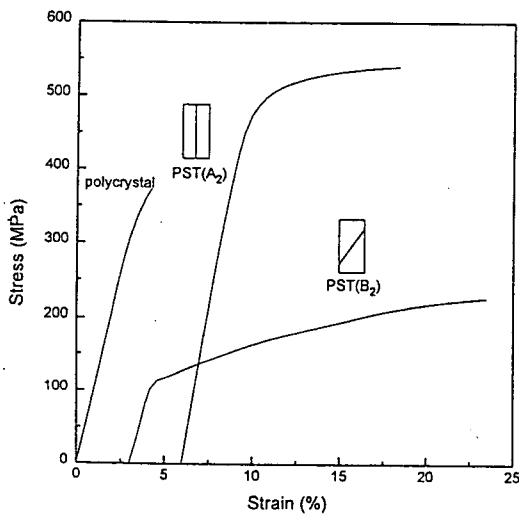


Fig. 1. Stress-strain curves of Mo-doped TiAl PST crystals with two different orientations and Mo-doped polycrystal with fully lamellar structure.

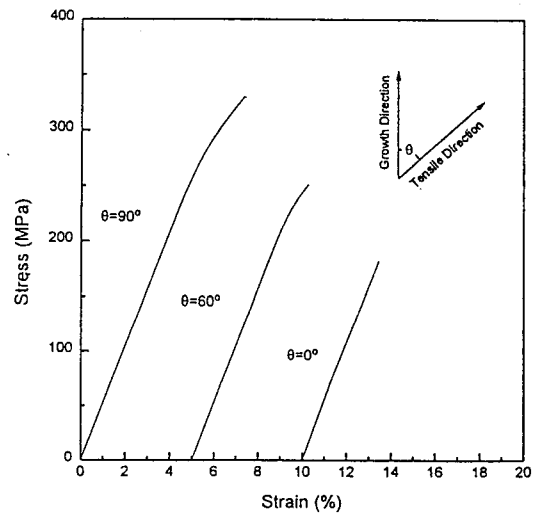


Fig. 2. Stress-strain curves of Mo-doped DS specimens with three different lamellar orientations.