

< 논문 >

고온용 MEMS 재료의 마이크로 파괴거동에 관한 연구

우병훈* · 김윤해† · 배창원** · 문경만*** · 배성열* · Y. Higo****

(2006년 8월 26일 접수, 2007년 4월 13일 심사완료)

A Study on the Micro-fracture Behavior of the MEMS Material at Elevated Temperature

Byung Hoon Woo, Yun Hae Kim, Chang Won Bae, Kyong Man Moon, Sung Yeol Bae and Yakichi Higo

Key Words : γ -TiAl(γ -Ti 합금), MEMS(멤스), EBSD(일렉트론 백스캐터 디프렉션), FIB(집속 이온 빔), Fracture Behavior(파괴거동)

Abstract

The effective fracture toughness testing of materials intended for application in Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) devices is required in order to improve understanding of how micro sized material used in device may be expected to perform upon the micro scale. γ -TiAl based materials are being considered for application in MEMS devices at elevated temperatures. Especially, in Alloy 4, both α_2 and γ lamellae were altered markedly in 3,000 h, 700°C exposure. Parallel decomposition of coarse α_2 into bunches of very fine ($\alpha_2+\gamma$) lamellae. Parallel decomposition of coarse α_2 into bunches of very fine ($\alpha_2+\gamma$) lamellae. Parallel decomposition of coarse α_2 into bunches of very fine ($\alpha_2+\gamma$) lamellae. The materials were examined 2 types Alloy 4 on heat exposed specimen(700°C, 3,000 h) and no heat exposed one. Micro sized cantilever beams were prepared mechanical polishing on both side at 25~30 μm and electro final stage polishing to observe lamellar orientation of same colony with EBSD (Electron Backscatter Diffraction Pattern). Through lamellar orientation as inter-lamellae or trans-lamellae, Cantilever beam was fabricated with Focused Ion Beam(FIB). The directional behavior of the lamellar structure was important property in single material, because of the effects of the different processing method and variations in properties according to lamellar orientation. In MEMS application, it is first necessary to have a reliable understanding of the manufacturing methods to be used to produce micro structure.

1. 서론

최근, 차세대 기술 발전의 기초가 되는 연구로 거의 모든 분야에서 나노 혹은 마이크로화가 지향되고 있다. 예를 들면, 바이오 기술의 분야로 DNA에 관한 연구와 신물질의 설계연구를 들 수 있고, 재료기술의 분야에서는 원자크기의 재료설계 또는 구성에 관한 연구, 전자분야에서는 전자의 양자성을 이용해 분자, 원자크기를 이용한 많은 연구를 진행하고 있다. 그에 따라 최근 기계 기술분야의 마이크로화에 대한 요구가 현저히 높아지고 있다.⁽¹⁾ 이러한 사회적 배경에 발

맞추어 마이크로 기계에 대한 기대치도 높고, 반도체 집적회로의 제어기술을 이용하여 마이크로 전자 분야에서 기계적인 것을 도입한 MEMS(Micro Electro Mechanical System)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

기본기술로써 거대 기계의 기술체계로부터 발전했던 설계기법, 어셈블리기술, 마이크로 이공학, 가공기술, 평가기술, 재료기술 등의 분야에서 신기술체계의 확립이 필요하다. 여기에서는 마이크로 기계와 MEMS디바이스 개발에 있어서의 재료기술에 주목한다. 현재, 마이크로 기계와 MEMS디바이스에 있어서 박막 재료 등이 마이크로 사이즈 재료로의 사용이 기대되고 있다. 마이크로 기계의 응용 예로서 공업용으로는 그 지름이 수 mm 이하 기계가 배관내의 점검을 할 수 있거나 의료용으로서 혈관 내에 혈전을 제거 하거나 사람 몸의 조직을 직접 획득 할 수도 있고, 필요한 부분에 약을 투입하는 마이크로 의료기구로써 사용 가능할 것으로 기대되고 있다. 따

†책임저자, 회원, 한국해양대학교 기계소재공학부

E-mail: yunheak@hhu.ac.kr,

TEL : (051)410-4355 FAX : (051)405-5506

* 한국해양대학교 대학원

** 한국해양수산연수원

*** 한국해양대학교

**** 동경공업대학

라서 마이크로 기계의 크기는 다기능 및 구조가 복잡할 경우 마이크로 사이즈 보다 더 커질 수도 있고, 만약 더 작게 제작 되어진다면 그 구성부재의 사이즈가 마이크로 사이즈 이하가 될 수도 있다. 결정성 재료에 대해서, 다결정 재료로 이뤄진 부재의 사이즈가 결정립의 입계에 대해 충분이 크다면 그 기계적 성질은 등방등질로 생각할 수 있다.⁽²⁾ 그러나 부재의 사이즈가 마이크로 크기로 되면 재료를 구성하는 결정립의 사이즈와 부재단면의 치수가 상당히 비슷한 치수가 된다. 그러면 마이크로 기계의 성질이 이방성으로 흐트러짐이 생길 수 있다. 반도체 분야에서 널리 사용되어지고 있는, 실리콘 단결정 재료에 있어서도 이방성 에칭을 이용해서 정밀도를 높여서 가공하는 것이 가능하다. 따라서 재료의 이방성을 고려하여 마이크로 사이즈의 구성부재를 가공, 설계할 필요가 있다. 또 마이크로 기계와 MEMS 디바이스 개발에 재료기술에서는 벌크 특성과는 다른 특성을 지니는 박막 등의 마이크로 사이즈 재료를 이용할 때의 마이크로적 기계적 성질을 평가할 필요가 있다. 마이크로 사이즈 재료에 있어서는, 특히 재료표면 층부의 특성, 예를 들면 벌크재에 있어서는 무시될 수 있는 마이크로 크기의 결함 혹은 손상이 재료의 강도에 영향을 끼치기 때문에 매우 중요한 연구이다. 왜냐하면 마이크로 사이즈 구조물에 있어서는, 마이크로 크기의 결함 혹은 손상조차도 응력 집중장이 되고, 재료의 강도가 저하 될 수 있다는 것을 예상할 수 있다.⁽³⁾ 본 연구에서는 고온용 MEMS 재료로 기대되어지는 γ -TiAl을 이용하여 마이크로 굽힘 실험을 했을 때 나타나는 파괴의 양상과 매크로 사이즈에서의 그것을 비교하여 파괴인성에 대한 규명을 하고자 한다. 그리고 EBSD를 이용하여 트랜스라멜라(translamellar)구조와 인터라멜라(interlamellar) 구조를 정확히 규명하고, 또한 거시적 파괴의 이론이 마이크로 영역에서도 사용될 수 있는지의 여부를 실험을 통해 확인하고자 한다.

2. 실험

2.1 시험재료

γ -TiAl은 가벼운 무게, 높은 강도와 고온에서의 높은 파괴 저항력 때문에 여러 응용분야에서 연구되어져 왔다. 높은 크리프 특성과 기계적 특성 때문에 항공기 엔진 터빈 브레이드와 자동차용 엔진 터빈 브레이드로 많은 연구가 이루어 지고 있는 금속간 화합물의 대표적인 재료이다.^(4,5) 일반적으로 γ -TiAl은 2 개의 상으로 이루어져 있다. 주 상

으로서 γ -TiAl(L10 규칙 Face Centered Tetragonal)과 두 번째 상으로서의 α_2 -Ti₃Al(규칙 hexagonal DO₁₉)이다.⁽⁶⁾ 이 연구에서는 Ti-45.6Al-2.25Nb-1Cr-0.7Mn-0.15C-0.1Si at%의 조성의 라멜라 구조 시험편을 이용하였다. 기존의 연구에서 장시간 열 노출 되었을 때 미세한 α_2 조직이 더욱 미세한($\alpha_2+\gamma$) 상으로 분화로 인해 기계적 강도가 더 높아지는 연구 결과가 있었다.⁽⁷⁾ 이런 연구 결과를 바탕으로 마이크로 사이즈에서도 열 노출 되어진 시험편은 더 높은 파괴 저항성을 가질 것으로 사료된다.

2.2 시편준비

열노출 되지 않은 일반 시편과 열노출 된(공기 유동로에서 700℃, 3,000시간 동안) 가로 1cm 세로 1cm 길이 15cm 봉을 각각 Electro Discharge Machining(EDM)으로 $\approx 100\mu\text{m}$ 두께로 절단했고 양면 모두 30 μm 크기까지 기계연마(Emery paper 2000#)를 하였다. 재료 표면 및 내부 lamellae의 방위를 알기 위하여 EBSD(Electro Back-Scattered Diffraction pattern)을 이용하였다. 기계적 연마만으로는 표면의 변형층(deformed layer) 때문에 Kikuchi pattern이 나오지 않아 전해연마(Electro polishing)을 실시하였다. 연마조건으로는 과염소산 : 부탄1-ol : 메탄올=1 : 6 : 13의 비율로 전해 연마처리를 하였다. 이 조건은 γ -TiAl의 열적 안정성에 대한 논문을 참고 하였다.⁽⁷⁾ EBSD의 결과를 바탕으로 트랜스라멜라 및 인터라멜라구조를 FIB를 이용하여 가공하였다.

2.3 EBSD (Electron Back-scatter Diffraction Pattern)

을 이용한 금속 결정의 방위 분석

EBSD는 후방산란전자의 Kikuchi pattern을 이용하여 각각의 결정립의 방위 해석을 하는 장비이다. 65~70°로 기울여진 결정 시료에 의해 비탄성 전자들이 형광 스크린에 회절된 각도를 컴퓨터가 분석하여 시료 결정립의 방위해석 및 어긋남 각도(misorientation angle)의 측정, 입계 크기를 쉽게 알 수 있게 해준다. 또 phase 분포 및 phase 비율 등 다양한 정보들을 프로그램으로 쉽게 얻을 수 있다.⁽⁸⁾ γ 상은 FCT(Face Centered Tetragonal)구조이고 α_2 상은 HCP(Hexagonal)구조로서 (111)면과 (0001)면이 평행을 이루면서 결합되어 있다.⁽⁹⁾ 이 면이 두 상의 계면이다. 극점을 이용하여 정벽면(habit plan) {111}을 찾아내었다. 각 표면에 정대면들이 있기 때문에 극점에서는 {111}면이 4개가 나오게 된다. 이들 중 원하는 면을 찾기 위해서 Fig. 1과

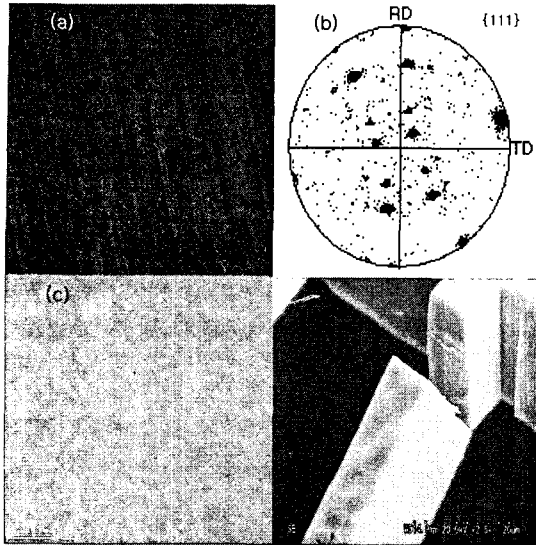


Fig. 1 (a) EBSD mapping interlamellar structure, (b) pole figure of {111} plane, (c) SEM picture of surface after radiated by FIB, (d) Fracture surface

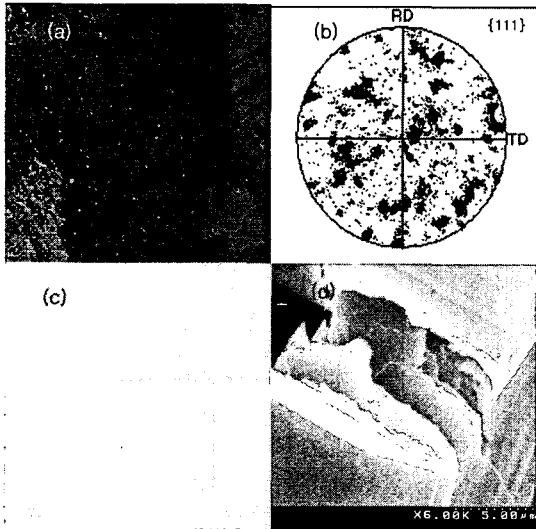


Fig. 2 (a) EBSD mapping translamellar structure, (b) pole figure of {111} plane, (c) SEM picture of surface after radiated by FIB, (d) Fracture Surface

같이 EBSD의 데이터를 가지고 라멜라 계면이 표면과 직각을 이루는 라멜라 조직(interlamellar structure) (Fig. 1)과 표면에 대해서 {111}면이 0°각을 이루는 조직(Fig. 2)을 찾았다. 데이터를 바탕으로, 시편 표면에 마킹을 하고 FIB(Focused Ion Beam)으로 약 10~20 초 정도 스퍼터링을 시키면 표면의 라멜라를 확인

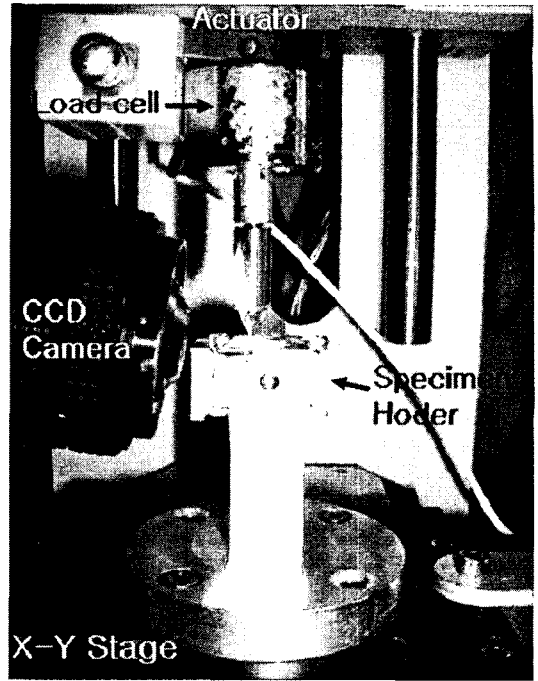


Fig. 3 a photograph of the machine for the testing of micro-sized materials

하고 방위가 4 가지 가능성 중 어떤 방향으로 기울어져 있는지를 확인하는 것이 가능하다. Fig. 3은 마이크로 사이즈 시편편의 굽힘시험을 할 수 있는 시험기이다. 이 장치는 TERFENOL-D 디바이스를 사용하였으며 X-Y stage의 분해능은 10 nm 이고 반지름이 5 μm인 다이아몬드 팁은 10 mN에서 200 mN 범위의 하중 제어가 가능하다. 이 장비는 기존의 연구에서도 많이 사용되었으며 마이크로 사이즈 재료평가에 사용되어 왔다.⁽¹⁰⁾ 또 Fig. 3와 같이 시편편의 크기는 길이 두께 폭을 50×20×10 μm 크기로 해 주었다. 또 시험을 하기 전에 기하학적인 형상을 정확히 측정하기 위하여 Field Emission Scanning Electron Microscopy(FE-SEM)을 이용하여 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

하중-변위 곡선은 11개의 시편으로 실험값을 얻었다. 시험편 중 열노출하지 않은 시험편과 열노출된(700°C, 3,000 h) 시험편을 각각 EBSD를 이용하여 인터라멜라 구조와 트랜스라멜라구조를 찾을 수 있었다. 이는 기존의 연구에서 보면 알 수 있지만 시험편을 채취하는데 있어서 상당한 발전을 보인 부분이다.⁽¹¹⁾ 기존의 방법은 양면에 폴리싱한 재료를 고정 치구에 장착시키고 FIB로 라디에이

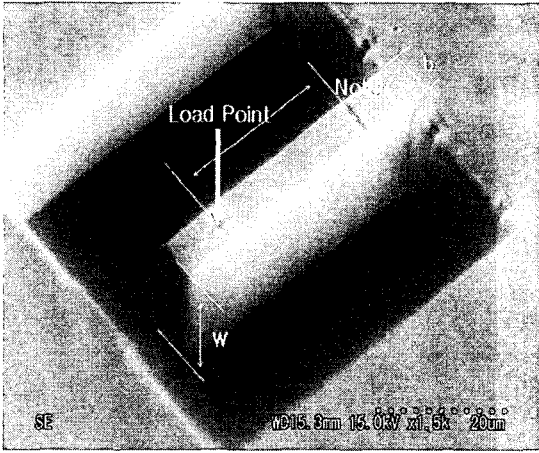


Fig. 4 A FIB machined cantilever with dimensions and loading point shown. [length(L) : thickness(W) : width(b)] = 50:20:10 μm

선한 표면을 보고 라멜라들의 간격이 가장 좁은 부분과 가장 넓은 부분을 각각 인터라멜라, 트랜스라멜라 구조라 생각하고 시험편을 제작하였다. 하지만 각 시험편의 라멜라가 기울어져 있거나 내부에서 다른 도메인이 접하면서 계면의 영향으로 정확한 시험편 채취에 어려움을 겪었다. 하지만 EBSD를 이용하였을 때 시험편에 대한 기술기 및 내부 정보를 알 수 있기 때문에 정확한 시험편을 찾을 수 있었다. Fig. 1, 2의 b그림은 γ -TiAl의 {111}면 즉 라멜라 구조의 계면에 대한 방위 정보를 말해 보여주고 있다.

$$K_Q = \frac{6P_Q S}{W^2 B} \sqrt{\pi a} F(a/W) \text{MPa} \sqrt{\text{m}} \quad (1)$$

$$F(a/W) = 1.22 - 1.40(a/W) + 7.33(a/W)^2 - 13.08(a/W)^3 + 14.0(a/W)^4 \quad (2)$$

(a:노치크기)

임시 파괴 인성값인 K_Q 는 위 식을 이용하였다. Fig. 5, 6은 인터라멜라 시험편으로 부터의 하중-변위 그래프 결과이다. 결과를 보면 알겠지만, 인터라멜라구조의 시험편은 취성적인 파괴의 형태를 보였다. 그러나 트랜스라멜라구조의 파괴는 Fig. 7과 Fig. 8의 그래프에서 알 수 있듯이 지그재그 형태의 파괴 형태를 보여주고 있다. 파괴 저항에너지 또한 인터라멜라 구조보다는 더 큰 것을 알 수 있다. 기존에 연구되어진 매크로 사이즈 시험편의 K_{IC} 의 값 $18 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 과 비교해 보면 마이크로 사이즈 시험편의 파괴 인성은 평균 $5.43 \text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 밖에 되지 않는다는 것을 알 수 있다.

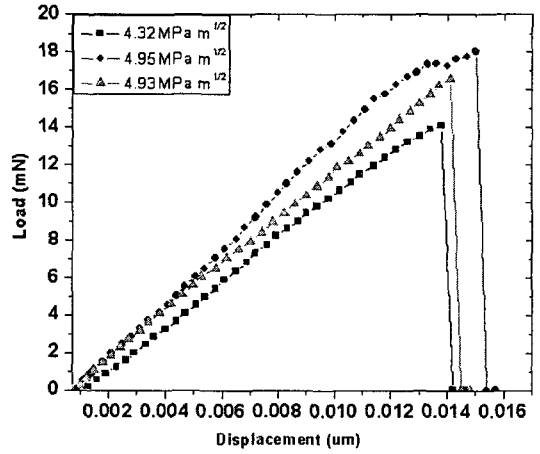


Fig.5 Fracture toughness curves of 0 h interlamellar structure samples

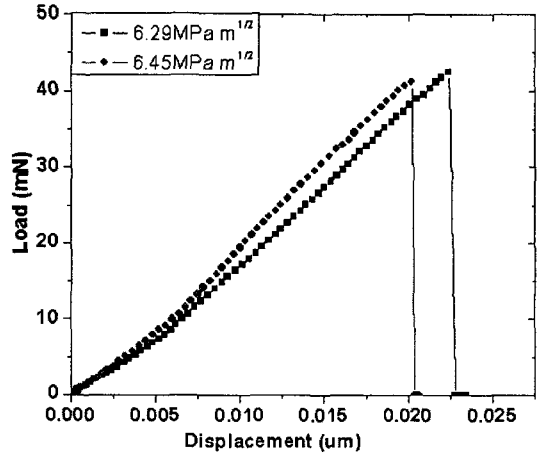


Fig. 6 Fracture toughness curves of 700°C, 3,000 h interlamellar structure samples

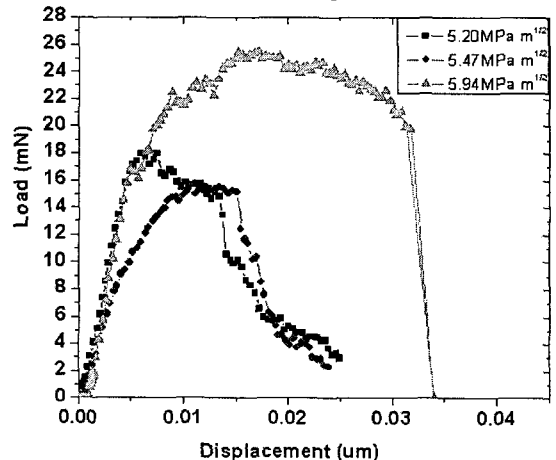


Fig.7 Fracture toughness curves of 0 h translamellar structure

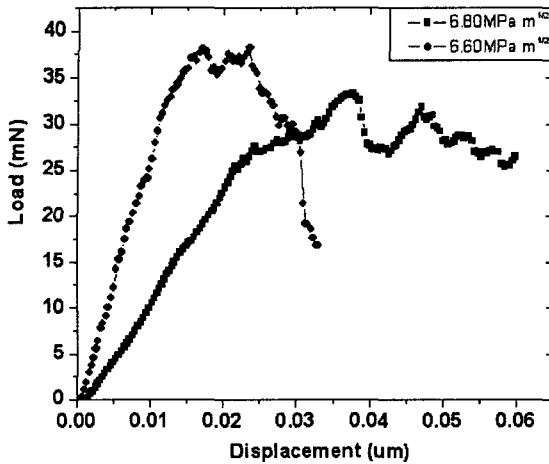


Fig. 8 Fracture toughness curves of 700°C, 3,000 h translamellar structure

기존의 연구 되어졌던 시험은 시험편안에 여러 콜로니가 함께 있기 때문에 크랙이 진전하는데 영향을 받았다. 매크로 사이즈 시험에선 파괴 저항에 영향을 미치는 요소로서 시험편 영역 속에서 크랙의 굴절이나 브레킹이 크게 영향을 미치는 요인이다. 하지만 마이크로 파괴에선 재료 자체의 파괴 혹은 라멜라 사이의 계면적인 파괴만이 크랙의 진전 및 파괴인성에 영향을 미치므로 더 작은 값이 나왔다. 이는 마이크로 사이즈의 기계를 만들었을 때 나타나는 크기 효과가 재료에 대해서도 나타난다는 것을 보여주고 있다. 재료를 선정하는 데 있어서 재료 계면 및 입계를 고려하여 설계해야만 한다는 것을 시사하고 있다. 방위에 따라서 기계적 강도가 좋은 재료를 얻을 수도 있고 경우에 따라서는 구조물이 쉽게 부서지는 특성을 원하는 경우엔 그에 맞춰서 설계 제조하는 것이 가능하리라 생각된다. 그리고 여기에서 실험되어진 파괴 인성의 값들은 시험편 두께에 대한 조건을 만족시켜주지 못하기 때문에 완벽한 K_{IC} 값이라고 볼 수 없다. 이것은 평면 변형 조건을 만족시키지 못하기 때문이다. 그래서 이곳에서 사용된 값들은 K_{IC} 의 임시 값인 K_Q 의 값으로 나타내었다. 하지만 본 실험에서 실시하였고 선택한 라멜라 방위에서 인터라멜라 시험편은 크랙이 계면을 따라 진전하여 파단 되기 때문에 깨끗한 파단면을 보여준다. 이는 축에 대한 평면 변형조건 파괴라고 보아도 된다. 두께에 대한 조건을 만족시켜주지 못하지만 매크로 사이즈의 K_{IC} 값과 인터라멜라 시험편의 값을 비교하는 것이 가능하다. 매크로 사이즈 파괴 시험 조건에서 크랙의 성장 과정은 마이크로 시험편에서와 비

교되는 외부적인 파괴 메커니즘(extrinsic toughness mechanism)이 기여할 수 있는 수많은 콜로니(colony)의 수를 포함한다. 하지만 마이크로 시험편과 같은 것은 내부적인 파괴 메커니즘(intrinsic toughness mechanism)만이 작용하기 때문에 더 작은 파괴 인성치를 나타내게 된다. 이런 정보로부터 이 방법은 평면 변형 조건을 만족하는 인터라멜라 시험편에 있어서는 마이크로화 파괴 시험을 위한 표준방법으로 생각할 수 있다. 마이크로 기계를 제작하거나 MEMS 재료로 사용되어지길 원할 때 크기 효과 및 마이크로 재료 자체만의 파괴에 대한 값은 입계나 계면의 특성 및 순도 역시 매우 중요한 요인이 될 수 있다는 것을 알 수 있다.

가장 낮은 파괴 인성의 값은 인터라멜라 ($4.32 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) 파괴 모드를 보여 주는 것이고, 가장 큰 값은 트랜스라멜라 파괴($6.8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$) 모드의 값을 나타내어준다. 매크로 사이즈에서 방위에 관한 수많은 연구가 이뤄져 왔으며 트랜스 라멜라 값이 상대적으로 큰 파괴 인성값을 가진다는 결과 역시 보고 되었다.⁽¹³⁾ 상대적으로 낮은 파괴 인성값을 나타내는 인터라멜라 모드의 파괴면을 보면 깨끗한 취성적 파단면을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 크랙의 성장은 γ/γ 또는 γ/α_2 상 사이에서의 계면에서 크랙이 진전하여 파괴가 일어나게 된다. 외팔보는 이런 파괴 모드가 일어나도록 인터라멜라 조직 콜로니와 관계되도록 위치시킨다. Fig. 1의 (d)의 파단면을 보면 알 수 있듯이 인터라멜라 조직 파괴모드로 상대적으로 특징이 없고 형태가 부드럽고 깨끗한 형태의 표면이 지배적이다. 그에 반해 트랜스라멜라 조직의 파괴 모드는 Fig. 2의 (d)에 나타내어진 바와 같이 노치를 따라 크랙이 진전된다. 하지만 노치에 대한 계면이 저항이 일어나는 방향으로 형성되어 있기 때문에 파괴에 필요한 에너지가 더 많이 필요하다. 그에 의해 상대적으로 더 큰 파괴 인성값을 가지는 것도 알 수 있다. 이는 노치에서 응력이 집중되고 크랙의 진전이 판에 수직한 방향으로 진전하다가 에너지가 더 낮은 계면을 통해서 크랙이 진전되었을 것이라 생각된다.

0 h와 3,000 h의 트랜스라멜라 시험편을 비교하였다. Fig. 7과 Fig. 8에서 알 수 있듯이 트랜스라멜라는 취성파괴의 형태보다 어느 정도의 소성변형을 동반하고 있다는 것을 알 수 있으며 깨끗한 응력 분포도를 보여주는 것이 아니라 주름형태의 결과를 나타내고 있다. 0 h 트랜스라멜라와 3,000 h 트랜스

라멜라 사이의 파괴인성을 비교해본 결과 3,000 h 트랜스라멜라의 파괴인성치가 약 12% 증가한 것을 알 수 있다. 이 결과는 거친 α_2 상이 700°C 3,000 시간이 열노출 시키면 γ/α_2 상으로 분화되었기 때문이다. 이는 크랙 성장에 더 많은 에너지가 필요하다는 것을 의미한다. 계면의 수가 많아짐에 따라 전위의 이동에 대한 장애물로 작용하게 된다.

4. 결론

γ -TiAl 기존의 연구에서 표면의 방위만으로 내부 시험편 부분을 선택했던 것과 달리 EBSD 를 이용하여 내부방위를 확인한 후에 방위를 선별하여 시편방위(interlamellae, translamellae)를 찾을 수 있었다. 기존의 포커스 이온 빔의 라디에이션 한 후 전자현미경을 이용하여 lamellae 방위를 확인하던 방법보다 더 정확하게 방위를 찾는 것이 가능해졌다. 열에 노출하지 하지 않은 트랜스라멜라 과 3,000 시간 700°C 에서 열 노출한 트랜스라멜라 사이의 파괴인성을 비교해 본 결과 열에 노출된 시편의 파괴 인성치가 약 12% 증가한 것을 알 수 있다. 이 결과는 거친 α_2 상이 α_2/γ 상으로 분해하는 한 것 때문으로 크랙의 성장 및 파괴를 위한 에너지가 더 많이 필요하다는 것을 의미한다. 마이크로 사이즈로 크기가 작아졌을 때 무게/부피에 대한 크기효과만이 아니라 재료를 설계하는데 있어서도 크기효과를 고려하여야 하겠다. 또 매크로 사이즈 시험편과의 K_{IC} 비교에 있어서는, 평면 변형조건을 만족하는 인터라멜라 시험편과 비교하는 것이 가능하다. 그에 따라 비교한 결과 매크로 사이즈 결과와 비교하였을 때 약 30%인성치 밖에 나오지 않는다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) 1995, Micro-Machine Center: Micro Machine

Revolution (1999) 1-19 Hirano:Plasticity and Processing, pp. 686-692.

(2) Kan, S.C., Eng, T.T. H., Sin, S.S. Y. and Wong, G.K. L., 1996, *Sensors and Actuators A* pp. 679-683.

(3) Hata, S., Sato, K. and Shimokobe, A., 1999, *Proc. Pat of the Conference on Device and Process Technology for MEMS and Microelectronics*, pp. 97-108.

(4) McQuay, P.A., 2001, Cast gamma TiAl alloys, Are we There Yet? In *Proceedings of Third International Symposium on Structural Intermetallics (ISSI 3)*, Structural Intermetallics, TMS, Warrendale, USA. 2001.

(5) Loria, E.A., 2001, Quo vadis titanium aluminide. *Intermetallics*, pp.997-1001.

(6) Ohnuma, I., et al., 2000, Phase Equilibria in the Ti-Al Binary System. *Acta material*, pp. 3113-3123..

(7) Jiang, Z.W., Voice, W. E. and Bowen, P., 2002, Thermal Stability of Ti-46Al-5Nb-1W Alloy, *Materials Science and Engineering a*, pp.329-331.

(8) Adam J. Schwartz (Editor), Mukul Kumar (Editor), Brent L. Adams (Editor), *Electron Backscatter Diffraction in Materials Science*, pp.1-30.

(9) Huang, Z.W., Bowen, P., Davey, S. and Blenkinshop, P.A., 1997, Crystallographic Features of Intralamellar Fracture in a Fully Lamellar TiAl Based Alloy.

(10) Higo, Y., Takashima, K., Shimojo, M., Sugiura, S. and Swain, M.V., 2000, New Equipment for Evaluating Performance of Microelements on MEMS, *MicroMat* pp.997-1000.

(11) Halford, T.P., Takashima, K., Higo, Y. and Bowen, P., 2005, Fracture Tests of Micro-sized TiAl Specimens *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures* pp. 695-701.

(12) Halford, T.P., 2003, "Fatigue and Fracture of a High strength, Fully Lamellar g-TiAl base Alloy," PhD Thesis, The University of Birmingham

(13) Kim, H.Y. and Maruyama, K., 2003, Stability of Lamellar Microstructure of Hard Orientated PST Crystal of TiAl Alloy.

(14) Murakami, S., Yun Hea Kim and Guskawa, H., Strength of Material and Foundation of Fracture, West Japan Laws Publication.