Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology
Vol. 27, No. 5 (2017) 229-234
https://doi.org/10.6111/JKCGCT.2017.27.5.229

p-ISSN 1225-1429
e-ISSN 2234-5078

Fabrication of TiAl alloy by centrifugal casting and its microstructure

Jeong Ho Ryu*, Ho Jun Lee*, Hyun Su Cho*, Jong Min Paeng*, Jong Bum Park*,** and Jung-Il Lee*,†

*Department of Materials Science and Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju 27469, Korea
**Chunji Corporation, Eunbong-ri 233-1, Yeoju 12663, Korea

(Received September 8, 2017)
(Revised October 18, 2017)
(Accepted October 18, 2017)

Abstract In this study, TiAl alloy was fabricated by a centrifugal casting method for turbo charge of automotive. Optimum conditions for defectless morphology using various ceramic mold were investigated. The crystal structure, microstructure, and chemical composition of the TiAl prepared by centrifugal casting were studied by X-ray diffractometer (XRD), optical microscopy (OM), field emission scanning electron microscopy (FE-SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), microvickers hardness analyzer (HV). Two kinds of dendrite structures were observed with 4-fold and 6-fold symmetries. The FE-SEM, EDS and HV examinations of the as-cast TiAl showed that the thickness of the oxide layer (α-case) was typically less than 50 μm.

Key words TiAl, Centrifugal casting, Turbocharger, α-Case, Dendrite

원심주조법에 의한 TiAl 합금의 제조 및 미세구조 분석

류정호*, **이호준***, **조현수***, **팽종민***, **박종범***,**, **이정일***,†

*한국교통대학교 신소재공학과, 충주, 27469
**천지산업 주식회사, 여주, 12663

(2017년 9월 8일 접수)
(2017년 10월 18일 심사완료)
(2017년 10월 18일 게재확정)

요 약 본 연구에서는 자동차 터보차저(turbo charger)용 터빈휠을 제조하기 위하여 고속원심주조법을 이용하여 TiAl 합금을 주조하였다. 여러 가지 조성의 주형을 사용하여 주조결함이 최소화 되는 최적의 몰드 조건을 찾고자 하였으며, 주조된 TiAl 합금의 결정구조와 미세조직을 고찰하였다. TiAl 샘플의 XRD 분석 결과 γ-TiAl 상과 α_2-Ti_3Al 상으로 구성되어 있음을 확인하였으며, 광학현미경과 FE-SEM 분석을 통하여 TiAl 샘플은 6-fold 및 4-fold 대칭성으로 이루어진 두 개의 수지상(dendrite) 형태로 이루어져 있음을 확인할 수 있었다. 또한 샘플의 단면에서 표면과 가까운 지점과 내부에서 측정한 원소 함량의 차이를 확인할 수 있었으며, 마이크로비커스 경도계를 이용하여 표면에서 50 μm 미만의 영역에서 경도상승 영역 alpha-case 층이 형성되었음을 확인하였다.

1. 서 론

Ti-합금은 높은 비강도와 우수한 기계적 특성으로 과거 40~50년 전부터 현재에 이르기까지 매우 다양한 분야에 적용되어 왔으며, 그 사용량 및 적용분야는 계속 증가할 전망이다[1, 2]. Ti-합금 중 대표적인 조성으로 Ti-6Al-4V(6 wt% Al, 4 wt% V) 합금을 예로 들 수가 있는데, 기계적 특성이 매우 우수하여 실제 상업적으로 응용되는 Ti-합금 중 60 % 이상을 차지한다. Ti-6Al-4V (이하 Ti-64) 합금은 Ti-합금의 일반적인 분류 중 α + β 형 합금이며, α형 Ti-합금의 특징과 β형 Ti-합금의 중간적 성질을 가지기 때문에 다양한 용도로 사용된다. 또한 열처리 및 냉각 방법에 따라 철계 합금과 같이 다양한 미세조직과 기계적 성질을 얻을 수 있기 때문에 그 효용가치가 매우 높은 합금계이다[3, 4].

또 다른 합금계로서, γ-TiAl 합금은 기존의 대표적 내열합금으로 개발된 니켈기 초합금에 비하여 비중이 절반밖에 되지 않을 뿐만 아니라, 융점 부근인 1700 K까지

†Corresponding author
E-mail: jilee@ut.ac.kr

www.kci.go.kr

금속간 화합물의 규칙구조를 유지하며, 높은 비강도, 우수한 내산화성 및 고온 크리프 특성을 고루 가진 내열경량합금이다. 따라서 현재까지 TiAl 합금은 이러한 우수한 특성들을 바탕으로, 극한의 환경에서 사용되는 항공기 엔진의 성능을 비약적으로 발전시키기 위하여, 항공기 등의 엔진 터빈 블레이드로 적용하고자 하는 연구가 진행되었다[5-7].

특히, TiAl 합금은 1100 K 이상에서의 급격한 산화와 거의 세라믹과 같은 수준의 낮은 연성으로 인한 취성파괴 및 고온의 동적하중 하에서의 이상파괴 현상으로 인하여 경제성 보다는 안정성을 더 지향하는 항공기의 특성상, 고온 고압의 극한 환경을 요구하는 엔진 후반 연소부분의 터빈 블레이드가 아니라, 비교적 사용온도 및 압력이 낮은 엔진 선단의 흡입부분 블레이드로만 실적용되고 있는 것이 현실이다[8, 9]. 특히 층상조직 및 복합조직 등의 미세구조를 가진 TiAl/Ti_3Al 2상 합금은 그 실용화 가능성에서도 크게 주목받고 있다. 최근에는 우수한 고온물성이 요구되는 부품들을 경량화하기 위하여, 우수한 고온성질을 지닌 완전층상조직 TiAl/Ti_3Al 2상 합금의 부족한 상온연성개선을 위하여 많은 연구들이 시도되고 있으며, 일방향 응고법을 도입하여 층상경계 방향을 연성화 방향으로 제어하려는 연구가 활발히 진행중이다[10].

또한 세계 자동차 시장은 연비경쟁 및 배기가스 저감에 대한 신기술 개발과 적용에 대해 높은 관심을 보여주고 있다. 가솔린 자동차의 경우 터보차저(turbo charger) 장착을 통한 엔진다운사이징으로 연비향상과 배기가스 저감에 탁월한 효과를 내고 있으며 이를 위해 경량소재로서 950°C에서 적용할 수 있는 TiAl계 터빈휠 적용이 필요한 실정이다[11]. 그러나, TiAl계 합금은 용탕의 유동성이 다른 합금보다 현저하게 떨어져서 일반 주조공정을 통해 정밀한 형상을 구현하는 것이 대단히 어렵다. 따라서 터빈휠의 모서리(edge) 부위까지 완전한 성형이 가능하기 위해서는 고속원심력을 부여해 줄 수 있는 주조공법이 적용되어야 한다[12, 13]. 본 연구에서는 자동차 터보차저(turbo charger)용 터빈휠을 제조하기 위하여 고속원심주조법을 이용하여 TiAl 합금을 주조하고, 주조된 TiAl 합금의 결정구조와 미세조직을 고찰하였다.

2. 실험 방법

용탕 상태에서 반응성이 심한 TiAl을 주조하는 경우에는 용탕의 온도를 올리거나 주형을 예열하는 방법에 의해 유동성을 향상시키는 방법 보다는 원심력에 의하여 용탕 유동성을 확보하는 것이 TiAl의 특성 상 보다 더 효과적이다[10-13]. 또한 본 연구에서 사용한 원심주조 공정의 차이점은 Fig. 1에서 확인할 수 있듯이, 기존의 주형 내에서 원심력을 발생시키는 수직형 원심주조가 아니라, 용탕 자체에 원심력을 부여하는 수평형 원심주조를 이용하여 낮은 원심력으로 정밀 형상 부품의 치밀한 조직으로의 성공적인 주조가 가능하도록 하였다. 또한 기존 graphite 주형 및 고가의 산화물 주형을 적용한 TiAl의 용해주조의 경우에는 주조품 표면에 산화물층(alpha-case)을 생성시켜 부품의 특성 저하를 야기한다. 본 연구에서는 기존 주조공정에서 사용되는 산화물(zirconia, yttria, alumina)들과 알루미나에 Ti power를 혼합한 주형(mould)을 사용하여 주조결함이 최소화되는 최적의 몰드 조건을 찾고자 하였다.

본 연구에서 사용한 TiAl 합금의 조성은 Ti-48Al-1.5Nb-1.5Cr(atomic %)이었으며, Table 1에는 본 연구에서 사용한 원심주조 조건을 나타내었다. 주조공정 전 500°C로 예열된 주형을 장비에 고정시킨 후, 가열 및 원심주조 공정을 일괄진행방식(one-step)으로 진행하였다. 회전시작 후 0.3 sec 만에 최대 회전속도인 250 rpm에 도달하였으며, 진공분위기(2.0×10^{-3} Torr)에서 20 sec 동안 진행되었다. WD-XRF(Wavelength-dispersive X-ray fluorescence) 분석을 통하여 주조된 시편의 화학성분과

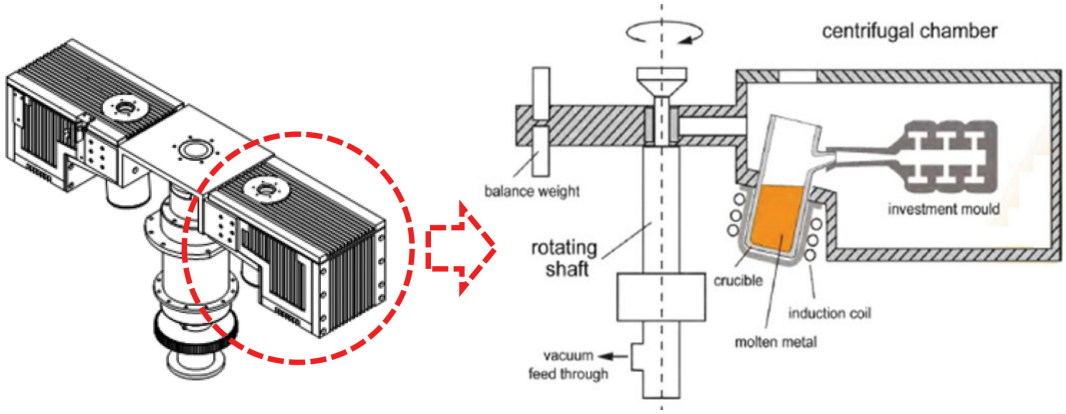

Fig. 1. Schematic diagram of centrifugal casting apparatus for TiAl alloy.

www.kci.go.kr

Table 1
Experimental conditions for centrifugal casting of TiAl

Process	Condition
Mold temperature	500°C
Vacuum level	2.0×10^{-3} Torr
Rotation speed	250 rpm
Time to maximum rotation speed	0.3 seconds
Time to maximum vacuum degree	300 seconds
Melt temperature	≒ 1650°C
Duration time for a charge	20 seconds

불순물 함입 여부를 조사하였다. 원심주조된 TiAl 휠 제품의 상분석은 XRD(X-ray diffraction)법으로 이루어졌으며, 광학현미경(Optical Microscopy), FE-SEM(Field Emission Scanning Electron Microscopy), EDX(Energy Dispersive X-ray Spectrometer), 마이크로비커스 경도기를 이용하여 미세구조 분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에 TiAl 합금의 원주주조 공정에 있어서 여러 가지 몰드 재질에 따른 터보타처 휠의 주조 결과를 보여주고 있다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이, zirconia(ZrO_2) 및 yttria(Y_2O_3) 몰드를 사용하였을 경우에는 터보타저 휠의 형상구현에 문제가 발새하고 여러 주조결함들이 생성됨을 확인할 수 있다. Alumina(Al_2O_3) 몰드의 경우에는 블레이드는 양호하게 주조되었으나 hub 부위에 형상결함이 발견되었다. 알루미나에 티타늄 분말을 혼합한

Fig. 2. Centrifugal casting results on the kinds of ceramic molds using (a) zirconia, (b) yttria, (c) alumina, and (d) alumina mixed with Ti powder.

Table 2
WD-XRF result on the TiAl sample prepared by centrifugal casting

	Weight %	Atomic %
Ti	56.90	44.09
Al	31.10	42.79
Nb	5.44	2.17
Cr	2.61	1.86
Ni	0.03	0.02
Si	0.03	0.04
O	3.89	9.02
Total	100.00	100.00

주형을 사용한 경우에는 설계와 공차가 거의 없었으며, 특히 hub 부위와 blade 부위의 형상결함 혹은 주조결함이 발견되지 않았다. 이러한 현상은 알루미나에 티타늄 분말을 혼합한 주형의 경우에 주형 내부에 alpha-case 성분이 미리 형성되어, 용탕과의 접촉시에 주조품 표면에 alpha-case 생성이 최대한 억제되었기 때문인 것으로 사료된다.

Table 2는 원심 주조방식으로 주조된 TiAl(Al 48 mol%) 터보차저 제품의 WD-XRF 분석결과를 보여준다. Table 2에서 확인할 수 있듯이 원심주조방식으로 제조된 TiAl 시편의 Ti : Al 조성의 비는 50.00 : 48.52 %로 계산되어 최종적으로 원하는 TiAl(Al 48 mol%) 조성이 성공적으로 제조되었음을 확인할 수 있었다. 주요한 조성인 Ti, Al 이외에 소량의 Nb, Cr, Ni, Si이 함유되어 있었으며 산소의 함량이 9 % 정도로 관찰되었고, 이러한 높은 산소 함량은 주조시편 표면의 산화층(alpha-case) 에 포함되어 있는 산소함량에 의한 것으로 사료되었다.

Fig. 3은 원심주조방식으로 제조된 TiAl 샘플의 XRD 분석 결과이다. Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 TiAl 샘플은 tetragonal lattice(a = 0.4016 nm, c = 0.4073 nm, c/a ratio 1.014)인 γ-TiAl 상이 main phase로 구성되어 있었

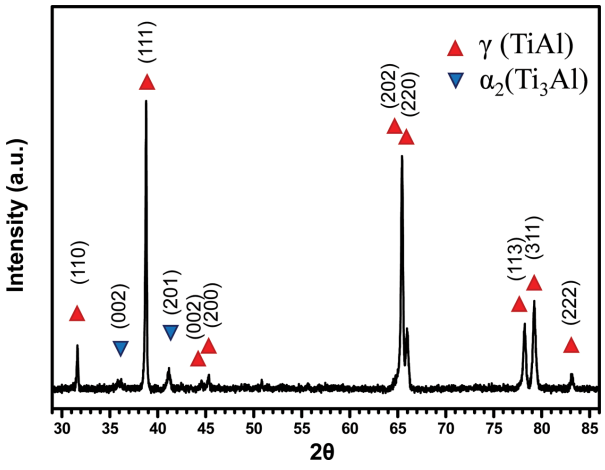

Fig. 3. XRD pattern of the TiAl alloy sample prepared by centrifugal casting.

www.kci.go.kr

으며, close packed hexagonal lattice(a = 0.5753 nm, c = 0.4644 nm)인 α_2-Ti_3Al 상이 minor phase로 구성되어 있음을 확인하였다. 본 연구에서 제조된 TiAl 샘플의 c/a 비율은 약 1.02로 계산된다. 이러한 c/a 비율 값은 Al의 함량이 올라감에 따라 증가하고, Ti/Al의 비율이 1 : 1이 되었을 때 c/a의 비율이 1.03이 되는 것으로 알려져 있는 것을 감안할 때, XRF 분석에서의 측정된 Ti/Al 함량비와 합치하는 결과로 판단되었다. TiAl 주조시에 쉽게 발견되는 bcc(body centered cubic) 구조인 β상은 발견되지 않았으며, 불순물 탄소(carbon)에 의해 쉽게 발생할 수 있는 TiC 혹은 TiCN 불순물도 발견되지 않았다.

Fig. 4는 광학현미경으로 관찰한 TiAl 샘플의 미세구조를 (a) 100배와 (b) 400배의 배율로 관찰한 결과이다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 TiAl 샘플의 미세구조는 명암이 서로 다른 두 개의 상의 수지상(dendrite) 형태로 이루어져 있음을 확인할 수 있었다. Ti-Al 2원계는 액상 중에서 bcc인 β상이 초정(primary crystal)으로 생성될 때와 hcp인 α상이 초정으로 생성될 때 수지상의 형태가 달라진다고 알려져 있다[14, 15]. Ti-44Al 조성의 경우 β상이 초정으로 형성되며, 이 때 β상이 bcc 구조이기 때문에 4-fold 대칭성을 갖게 되고 성장방향과 평행한 단면에서는 수지상의 1차 가지와 2차 가지가 90°를 이루게 된다[14, 15]. Al의 함량이 더 높은 Ti-52Al 조성의 경우 α상이 hcp 구조이기 때문에 6-fold 대칭성을 갖게 되고 수지상의 1차 가지와 2차 가지가 60°를 이루게 된다. 본 연구에서 광학현미경에서는 이러한 수지상 구조

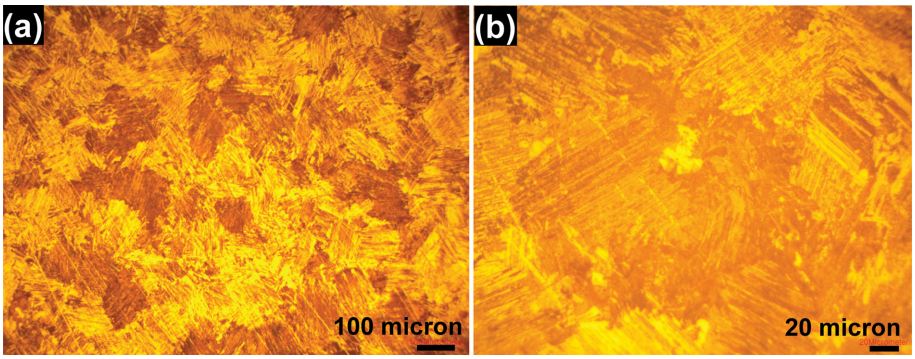

Fig. 4. Optical microscope pictures of surface of the TiAl alloy sample prepared by centrifugal casting.

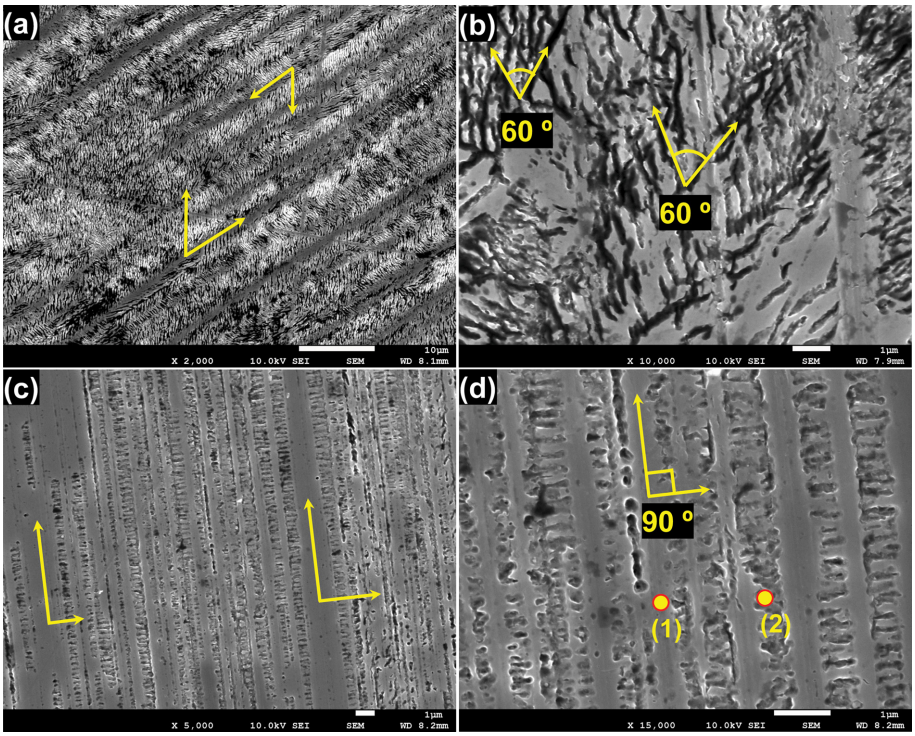

Fig. 5. FE-SEM images of TiAl alloy sample prepared by centrifugal casting showing (a, b) hexagonal dendrite and (c, d) cubic dendrite morphology.

www.kci.go.kr

를 발견할 수 없었으나, FE-SEM 분석을 통하여 이를 확인하고자 하였다.

Fig. 5는 FE-SEM으로 원심주조법에 의해 제조된 TiAl 샘플의 내부 미세구조를 보여주고 있다. Fig. 5에서 관찰할 수 있는 바와 같이 샘플 전반적으로 6-fold 대칭성 및 4-fold 대칭성 수지상 구조가 혼합되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 샘플 전반적으로 특이한 석출물이나 불순물은 발견되지 않았으며 Fig. 5(d)의 EDX 분석 결과 Table 3과 같은 성분분석 결과를 나타내고 있으며, 이러한 Ti/Al 조성비는 XRF로 분석한 결과와 유사하였다.

Fig. 6은 원심주조법에 의해 제조된 TiAl 샘플의 FE-SEM 단면 미세구조와 Ti, Al, O 원소에 대한 EDX mapping 이미지를 보여주고 있다. Fig. 6에서 관찰할 수 있는 바와 같이 샘플의 단면에서 표면과 가까운 지점과 내부에서 측정한 원소함량의 차이를 확인할 수 있다. 샘플의 표면과 내부에서 Ti 및 Al의 농도는 샘플의 깊이에 따른 차이가 거의 없었으나, 산소원소의 농도는 대부분 샘플의 표면근처에 분포하고 있는 것을 확인할 수 있었으며, 이것은 세라믹 몰드와 TiAl 융액과의 접촉에 의한 산소의 침입에 의한 것임을 다시 한 번 확인시켜 주는 결과이다.

Fig. 7은 마이크로비커스(Microvickers) 경도기를 사용하여 시편의 표면으로부터 50 μm 간격으로 측정한 경도값을 나타내고 있다. 일반적으로 Ti 및 TiAl 합금은 용탕상태에서의 활성으로 인하여 주조공정시, 육안으로 관찰되는 반응층과 경도상승층으로 이루어진 alpha-case를 형성한다. 특히, 일반적으로 사용되는 Al_2O_3 몰드의 경우 500~600 μm 이상의 alpha-case를 형성하는 것으로 알려져 있다[16, 17]. 본 연구에서는 Ti 분말을 Al_2O_3에 혼합한 세라믹 몰드를 사용하여 몰드 내부에 alpha-case 성분을 미리 형성시켜, 용탕과의 접촉시에 주조품 표면에 생성되는 alpha-case 생성을 최대한 억제하고자 하였다. Fig. 7의 경도값 변화 그래프에서 표면에서 50 μm 미만의 영역에서 경도상승 영역 alpha-case 층이 형성되었음을 확인할 수 있었으며, 이러한 alpha-case 층의 형

Table 3
Chemical composition analyzed by EDX for two points of the Fig. 5(d)

Atomic%	Point (1)	Point (2)
Ti	45.57	44.31
Al	42.46	45.85
O	8.18	6.16
Cr	1.63	1.65
Nb	2.15	2.03
Total	100.00	100.00

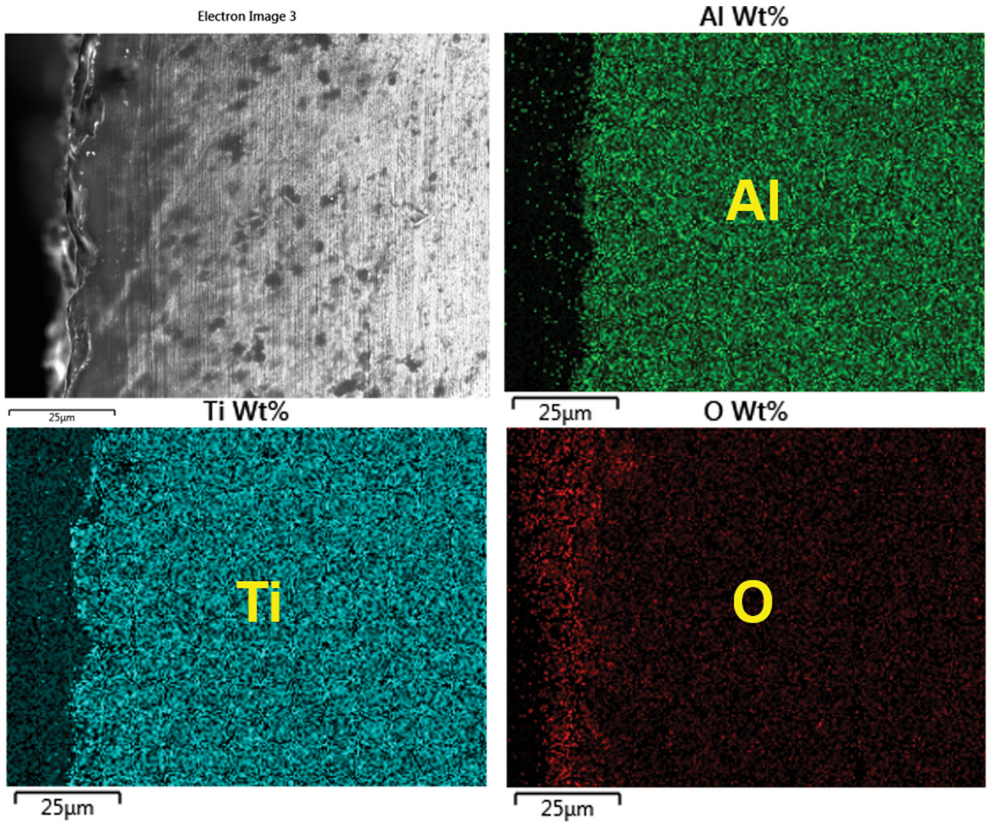

Fig. 6. Cross-sectional image of the TiAl alloy sample preapred by centrifugal casting and EDX mapping for the Al, Ti and O elements.

www.kci.go.kr

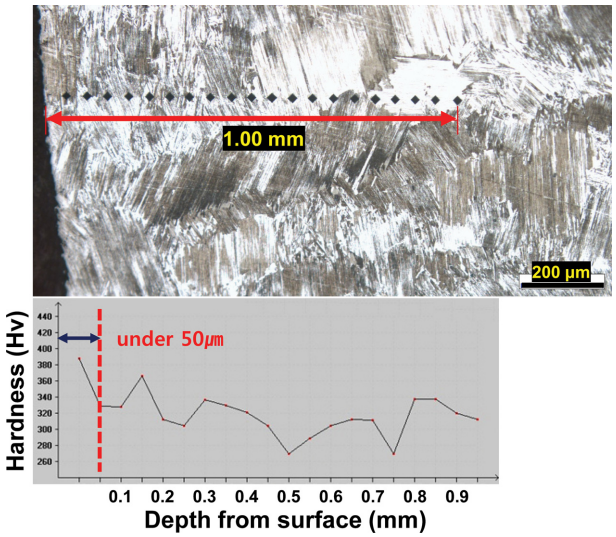

Fig. 7. Hardness profile of the TiAl alloy sample as depth from the surface.

성두께는 Fig. 6에 나타난 산소원자의 농도분포 변화와도 일치하는 결과이다.

4. 결 론

본 연구에서는 자동차 터보차저(turbo charger)용 터빈휠을 제조하기 위하여 고속원심주조법을 이용하여 TiAl 합금을 주조하였다. 알루미나에 티타늄 분말을 혼합한 주형을 사용하여 형상결함 혹은 주조결함이 없는 양질의 주조 제품을 제조할 수 있었다. TiAl 주조품의 XRD 분석 결과, tetragonal lattice인 γ-TiAl 상과 close packed hexagonal lattice 구조의 α_2-Ti_3Al 상으로 구성되어 있음을 확인하였으며, *c*/*a* 비율 값은 XRF 분석에서의 측정된 Ti/Al 함량비와 합치하는 결과로 판단되었다. FE-SEM에서 관찰한 결과 TiAl 시편 전반적으로 6-fold 대칭성 및 4-fold 대칭성 수지상 구조가 혼합되어 있는 것을 확인할 수 있었으며, EDX 분석 결과 XRF로 분석한 결과와 유사하였다. 마이크로비커스 경도값 변화 그래프에서 표면에서 50 μm 미만의 영역에서 경도상승 영역 alpha-case 층이 형성되었음을 확인할 수 있었으며, 이러한 alpha-case 층의 두께는 EDX mapping 결과에서 나타난 산소원자의 농도 분포 변화와도 일치하였다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청의 기술혁신개발사업의 일환으로 수행하였음[S2296345, 자동차용 TiAl계 터보차저 터빈휠 제조기술 개발].

References

[1] S.G. Pyo, J.K. Oh, N.J. Kim and M. Yamaguchi, “Al compositional dependence on the deformation behavior and mechanical properties in ultra high purity TiAl alloys”, J. Kor. Inst. Met. & Mater. 38 (2000) 629.
[2] I.-S. Jung, M.-C. Kim, J.-H. Lee, M.-H. Oh and D.-M. Wee, “Phase equilibria of TiAl alloy by directional solidification”, J. Kor. Inst. Met. & Mater. 37 (1999) 448.
[3] Y.H. Lee, J.T. Yeom, N.K. Park, S.S. Hong, I.O. Shim, S.M. Hwang and C.S. Lee, “Prediction of microstructure durign high temperature forming of Ti-6Al-4V alloy”, J. Kor. Inst. Met. & Mater. 43 (2005) 847.
[4] D.-G. Lee, Y.H. Lee, C.S. Lee and S. Lee, “Effect of volume fraction of tempered martensite on dynamic deformation properties of Ti-6Al-4V alloy having bimodal microstructure”, J. Kor. Inst. Met. & Mater. 42 (2004) 455.
[5] X. Wu, “Review of alloy and process development of TiAl alloys”, Intermetallics 14 (2006) 1114.
[6] J.Y. Jung, J.K. Park and C.H. Chun, “Influence of Al content on cast microstructures of Ti-Al intermetallic compounds”, Intermetallics 7 (1999) 1033.
[7] T. Tetsui, K. Shindo, S. Kobayashi and M. Takeyama, “A newly developed hot worked TiAl alloy for blades and structural components”, Scripta Mater. 47 (2002) 399.
[8] S. Djanarthany, J.-C. Viala and J. Bouix, “An overview of monolithic titanium aluminides based on Ti_3Al and TiAl”, Mater. Chem. Phys. 72 (2001) 301.
[9] H. Clemens and H. Kestler, “Processing and application of intermetallic γ-TiAl-based alloys”, Adv. Eng. Mater. 2 (2000) 551.
[10] T. Tetsui, “Application of TiAl in a turbocharger for passenger vehicles”, Adv. Eng. Mater. 3 (2001) 307.
[11] K. Liu, Y.C. Ma, M. Gao, G.B. Rao, Y.Y. Li, K. Wei, X. Wu and M.H. Loretto, “Single step centrifugal casting TiAl automotive valves”, Intermetallics 13 (2005) 925.
[12] S.-Y. Sung and Y.-J. Kim, “Modeling of titanium aluminides turbo-charger casting”, Intermetallics 15 (2007) 468.
[13] P.X. Fu, X.H. Kang, Y.C. Ma, K. Liu, D.Z. Li and Y.Y. Li, “Centrifugal casting of TiAl exhaust valves”, Intermetallics 16 (2008) 130.
[14] J. Fan, X. Li, Y. Su, J. Guo and H. Fu, “Effect of growth rate on microstructure parameters and microhardness in directionally solidified Ti-49Al alloy”, Mater. Des. 34 (2012) 552.
[15] H.-S. Jang, I.-S. Jung, M.-H. Oh and D.-M. Wee, “Characterization of TiAl alloy including β-stabilizer I. Phase transformation at elevated temperatrure”, J. Kor. Inst. Met & Mater. 38 (2000) 1042.
[16] I.-S. Jung, H.-S. Jang, M.-H. Oh and D.-M. Wee, “Characterization of TiAl alloy including β-stabilizer II. Directional solidification and mechanical properties”, J. Kor. Inst. Met & Mater. 38 (2000) 1047.
[17] S.Y. Sung and Y.J. Kim, “Alpha-case formation mechanism on titanium investment casting”, Mater. Sci. Eng. A 405 (2005) 173.

www.kci.go.kr