

논문

TiAl 합금의 주형계면반응 및 유동성 평가

이상화[†] · 성시영* · 최봉재* · 김명균** · 김영직*

동아대학교 신소재공학과
*성균관대학교 신소재공학과
**포항산업과학연구원

Evaluation of Metal-mold Reactions and Fluidity of TiAl Alloys

Sang-Hwa Lee[†], Si-Young Sung*, Bong-Jae Choi*, Myoung-Gyun Kim**, and Young-Jig Kim*

Department of Material Science and Engineering, Donga University, 840 Hadan2-dong, Saha-gu, Busan 604-714, Korea

*Department of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, 300 Chunchun-dong, Jangan-gu, Suwon 440-746, Korea

**New Metallic Materials Research Team, Research Institute of Industrial Science and Technology,

San 32 Hyoja-dong, Nam-gu Pohang, 790-600, Korea

Abstract

Metal-mold reactions between investment mold and TiAl alloys were investigated for the economic net-shape forming of TiAl alloys. The effect of mold preheating temperatures on the metal-mold reaction were investigated using a vacuum induction-melting furnace. In the case of TiAl alloys, there were no α -case formation reactions. There were neither interstitial nor substitutional α -case formations as TiAl alloys have both negligible solubility of oxygen and low activity in molten states. The fluidity of TiAl alloys increases with mold preheating temperature since they have a peritectic reaction that appears in the form of envelope, surrounding each particles of the primary constituent. The results of the investment casting of TiAl alloys confirm that the casting route in our study can be an effective approach for the economic net-shape forming of TiAl alloys.

Key words : Investments casting, Alpha-case, Net-shape forming, TiAl Alloys, Fluidity

(Received March 10, 2006; Accepted April 15, 2006)

1. 서 론

TiAl 합금은 기존의 대표적 내열합금으로 개발된 니켈기 초합금에 비하여 비중이 절반 밖에 되지 않을 뿐만 아니라, 용점 부근인 1700 K까지 금속간화합물의 규칙구조를 유지하며, 높은 비강도, 우수한 내산화성 및 고온 크리프 특성을 고루 갖춘 내열경량합금이다[1]. 지난 30년간 TiAl 합금은 이러한 우수한 특성들을 바탕으로, 극한의 환경에서 사용되는 항공기 엔진의 성능을 비약적으로 발전시키기 위하여, 항공기 엔진의 터빈 블레이드로 적용하고자 하는 연구가 집중되었다[2]. 그러나, TiAl 합금은 1100 K 이상에서의 급격한 산화와 거의 세라믹과 같은 수준의 낮은 연성으로 인한 취성파괴 및 고온의 동적하중 하에서의 이상파괴 현상으로 인해서, 경제성보다는 안정성을 더 지향하는 항공기의 특성상, 고온 고압의 극한 환경을 요구하는 엔진 후반 연소부분의 터빈 블레이드가 아니라, 비교적 사용온도 및 압력이 낮은 엔진 선단의 흡입부분 블레이드 로만 실 적용 되고 있는 것이 현실이다[3].

한편, 항공기 엔진보다 동적 부하 및 사용 온도가 낮은 자

동차의 경우에는 TiAl 합금을 적용할 경우, 연비 상승과 동시에 출력의 증가까지 도모할 수 있다. 예로써, 내열강을 사용하는 배기밸브 및 과급장치인 터보차저(turbocharger)를 TiAl 합금으로 대체할 경우에는 설계변경 없이도 각각 2% 이상의 연비 상승효과가 있는 것으로 알려져 있다[4,5]. 그러나 이러한 우수한 잠재력에도 불구하고, 현재 TiAl 합금은 일부 스포츠 및 경주용 자동차에만 극히 제한적으로 적용되고 있으며, 성능 연구를 위한 시제품 정도에 사용되고 있다. 이는 TiAl 합금이, 1) 분말을 이용한 정형가공법은 복잡한 형상의 제품을 거의 100%에 가까운 생산수율로 제조할 수 있지만, 고순도의 TiAl 합금 분말 제조 자체가 힘들며, 소결 후 정수압(hot isostatic pressing, HIP) 처리 및 크기에 제한을 받으며, 2) 단조 공정은 수율이 10% 이하로 낮은 항온단조 공정을 필요로 하며, 단조 후 산소와의 반응층인 alpha-case (α -case) 제거가 요구될 뿐만 아니라 형상에 제한을 받으며, 3) TiAl 합금의 주조법은 대부분의 용융법들이 용탕의 오염을 배제할 수 있는 수냉동 도가니를 사용하므로, 충분한 용탕의 과열을 부여할 수 없으며, 이로 인해 주조가 정형가공법임에도 HIP 처리가 필요

[†]E-mail : leesh@dau.ac.kr

하며, 4) 정밀주조의 경우에는 일회용으로 사용되는 주형재료가 고가임에도 불구하고, 용탕과 주형간의 계면반응 생성물인 α -case로 인한 기계적 특성 저하 및 후가공에 따른 치수정밀도 저하와 환경오염 문제가 있고, 5) 금형을 이용하는 경우에는 반복적으로 1800 K 이상의 용탕 열충격을 견디는 경제적인 금형소재가 없다는 문제점을 가지고 있는 에너지 다소모형 소재로 경제적인 정형가공이 어렵기 때문이다. 따라서, TiAl 합금의 경제적인 실적용을 위해서는 경제적인 정형가공법을 확립하는 것이 반드시 필요하다.

이와 같은 배경으로부터 본 연구에서는 내열경량합금인 TiAl 합금의 경제적 정형가공법으로 정밀주조에 주목하였다. 그러나, TiAl 합금의 정밀주조는 용탕과 주형간의 계면반응 생성물인 α -case 형성에 기인한 기계적 특성 저하 및 후가공으로 인해서, 주조법이 대표적인 정형가공법(net shape)이지만, 근정형가공법(near-net shape) 밖에 되지 못하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 TiAl 합금과 주형간의 열적안정성 및 주형예열에 따른 유동성을 평가하여, 정밀주조를 통한 TiAl 합금의 경제적인 정형가공의 가능성을 살펴보고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 TiAl 합금 제조

단상의 γ -TiAl은 상온연성이 지극히 열악하며, 열간가공 및 열처리시에 이상결정립조대화가 발생하여 기계적 특성에 악영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 단상의 γ -TiAl의 조성이 아니라, α_2 -Ti₃Al 및 γ -TiAl이 공존하는 duplex조직을 형성하며, 상온연성, 강도, 피로특성, 주조성, 고온산화특성 및 고온크리프특성 개선을 위한 원소첨가가 가능한 Ti-47 at%Al의 조성을 선정하였다. TiAl 합금은 Ti 100.03 g 및 Al 49.97 g, 총 150 g씩 도가니 오염을 배제할 수 있는 수냉동을 이용하는 plasma arc melting (PAM)으로 제조하였다. PAM은 용융과정에서 Al의 손실을 최소화하기 위해 진공펌프를 이용하여 1.33×10^{-1} Pa까지 배기 후, Ar 가스를 1.5×10^5 Pa로 가압한 상태에서 버튼의 형태로 제조되었으며, 균일한 합금화를 위해 TiAl 합금은 3회 재용융하였다.

2.2 계면반응 및 유동성 평가를 위한 주형 제작

TiAl 합금과 주형간의 계면반응 및 유동성을 평가하기 위하여 spiral 형상의 왁스 패턴을 이용하여 주조방안대로 조립한 후에, 왁스패턴 제조시 사용한 이형제 등에 의한 불순물 및 코팅층 제거를 위해 이소프로필 알콜에 1분간 침지 후 수세하고 에탄올에서 2분간 초음파 세척하였다. 이렇게 준비된 왁스 패턴은 Table 1과 같은 조성으로 준비된 slurry에 침적하고, 조분입자로 피복시킨 뒤 항온항습기(298 K, 습도: $40 \pm 1\%$)에서 4시간 간격으로 건조시켰다. 이러한 일련의 과정을 3회 반복 후, 주형의 강도를 부여하기 위한 chamotte backup 과정 후 주형의 균열이 거의 발생하지 않고 왁스의 회수가 가능한 autoclave에서 약 423 K, 0.5 MPa의 수증기를 이용하여 탈왁스 하였으며, 주형에 강도를 부여하고, 수분 또는 탈왁스 후의 잔존 왁스 및 불필요한 성분을 제거하기 위하여 1223 K에서

Table 1. Conditions of oxides, binders and the viscosity of slurry for TiAl alloy investment casting

Oxide	Binder	Viscosity (Zahn Cup #4)
Al ₂ O ₃	Colloidal Silica	1st : 45~55 s
		2nd : 30~35 s
		3rd : 23~25 s
Chamotte	Colloidal Silica	1st : 35~40 s
		2nd : 25~30 s
		3rd : 20~23 s

2시간 소성하였다.

2.3 TiAl 합금 계면반응 평가 및 유동성 측정

TiAl 합금의 계면반응 및 유동성 평가는 용탕의 과열을 조절할 수 있는 30 kW, 35 kHz의 vacuum induction melting (VIM)로에서 실시하였다. 고순도 흑연도가니를 사용하였으며, TiAl 용탕과 반응을 최소한으로 억제하기 위하여 흑연도가니는 진공상태에서 백열연소 전처리 공정을 거쳤다. 용융시 VIM의 분위기는 산소에 의한 용탕의 오염을 제어하기 위하여, 진공배기 후 Ar을 상압보다 높은 1.5×10^5 Pa로 가압한 상태로 조절하였다. 용융을 확인한 후 충분한 과열과 균일한 용탕의 조성 제어를 위하여, 60초간 유지 후 준비된 spiral 주형에 주조하였다. 한편, spiral 주형은 VIM 내에서 할로겐 히터를 이용하여, 각각 673, 773, 873, 973 및 1073 K으로 예열하였다. 주형과 TiAl 합금간의 계면반응은 광학현미경을 사용하여 계면반응층을 관찰하였으며, Microvickers 경도기를 사용하여 하중 200 g, 유지시간 10초의 조건으로 시편의 표면부터 50 μ m 간격으로 경도값을 측정하여 조직관찰 결과와 비교하였다. 또한 계면반응에 어떠한 성분이 영향을 미치는지를 관찰하기 위하여, electron probe micro-analyzer (EPMA)를 사용하여 표면부터 내부로 선분석을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 TiAl 합금 계면반응 평가

일반적으로 Ti 및 Ti6Al4V 합금은 용탕상태에서의 활성화로 인하여 정밀주조시, 육안으로 관찰되는 반응층과 경도상승층으로 이루어진 α -case를 형성한다. 특히 본 연구에서 주형재료로 선택한 Al₂O₃ 주형의 경우에는 약 500~600 μ m 이상의 α -case를 형성한다[6]. 그러나 TiAl 합금의 경우에는 Fig. 1에 나타난 계면반응 조직에서 기존의 Ti 및 Ti6Al4V 합금 등의 계면반응에서 육안으로 관찰할 수 있었던 계면반응이 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 계면사진의 결과는 Fig. 2에 나타난 경도값 변화와도 일치하고 있다.

Ti 합금과 주형간의 계면반응 생성물인 α -case는 산소, 질소 및 탄소 등의 침입형 원자, 특히 주형재료에서 분해되어 Ti에 33 at%까지 고용이 가능한 산소의 확산에 의한 TiO₂ 반응층인 것으로 알려져 왔다[7]. 이를 바탕으로 Ti 및 그 합금의 정밀주조 주형재료는, 주형에서 분해된 산소에 의한 α -case를 최소화하기 위하여, 표준상태에서 Ti의 산화물 표준생성자유에너지 (ΔG_0)보다 낮은 ΔG_0 를 가지는 Al₂O₃, ZrO₂, CaO 및 Y₂O₃

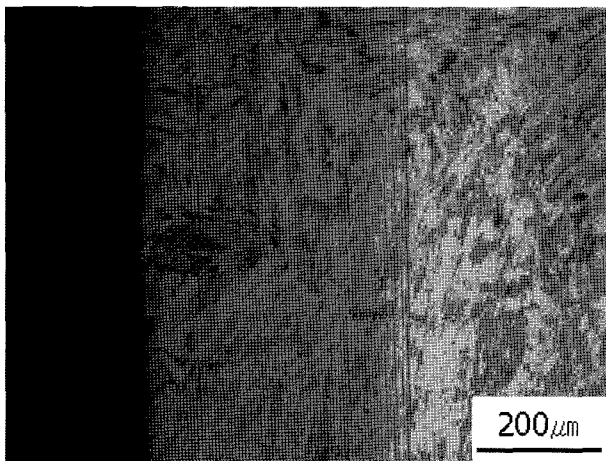


Fig. 1. Microstructure of the metal-mold reaction interface between TiAl alloy and Al₂O₃ mold.

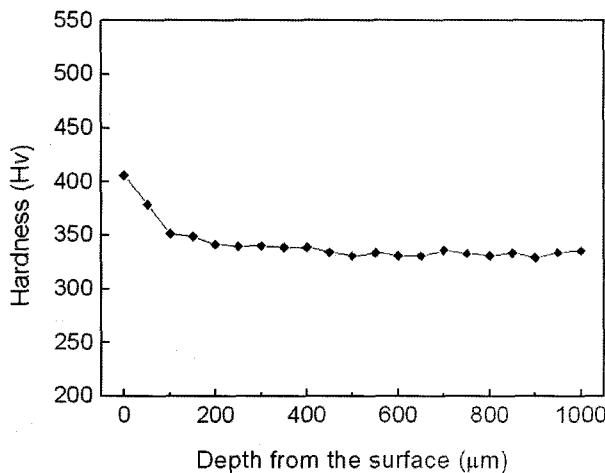


Fig. 2. Hardness profile of the TiAl alloy castings poured into Al₂O₃ mold.

등 열역학적으로 안정할 것으로 예측되는 내화물을 중심으로 연구되었으나, 이러한 열역학적 접근에도 불구하고, 여전히 Ti 합금에서는 α-case 문제가 남아 있다. Sung 등은 선행연구에서 계면반응 생성물에 대한 정확한 분석과 열역학적 고찰을 바탕으로, α-case가 단순히 산소에 의한 것만이 아니라, 주형에서 분해된 금속성분은 치환형으로 산소는 침입형으로 α-case를 형성하며, 이러한 반응은 열역학적으로 자발적인 과정임을 증명하였다[8]. 즉, 순Ti 용탕을 Al₂O₃ 주형에 주입할 경우에, α-case는 단순히 주형에서 분해된 산소에 의한 TiO₂만을 형성하는 것이 아니라, 주형에서 분해된 금속성분인 Al이 TiAl 및 Ti₃Al 금속간 화합물을 형성하게 된다.

본 연구에서 TiAl 합금이 기존의 Ti 합금에 비하여 무시할 수 있을 정도로 α-case를 형성하지 않는 것은, 치환형 및 침입형 α-case 형성기구를 바탕으로 설명할 수 있다. 먼저, TiAl은, Ti 및 Ti 합금 용탕이 주형재료인 Al₂O₃와 반응하여 형성될 수 있는 계면반응 생성물 중에 하나이다. 또한, TiAl은

용탕상태에서 Raoult의 법칙에서 부편차를 가지는 합금으로 Ti와 Al이 서로 합금화 되면서 상호간의 결합력이 증가하게 되어 TiAl 합금 용탕의 활동도는 Ti 용탕에 비하여 10분의 1 이하 수준으로 낮아지게 된다. 따라서 TiAl 합금은 일반적인 Ti 및 Ti 합금과 달리 Al₂O₃ 주형과의 반응에서 치환형 α-case를 형성할 확률이 낮아지게 된다. 한편, TiAl 합금은, 산소를 33 at%까지 고용할 수 있는 Ti와 달리 산소의 고용한이 거의 없는 합금이다. 즉, 주형에서 분해된 산소에 의한 침입형 α-case형성도 순 Ti에 비하여 훨씬 어렵게 된다. 따라서 TiAl 합금은 주조시 치환형 및 침입형 α-case 모두 형성되기 어렵기 때문에, 경제적이면서 성형성과 작업효율성을 모두 갖추고 있음에도 불구하고 α-case으로 인하여 기존의 Ti 및 Ti6Al4V 합금에는 사용할 수 없었던 Al₂O₃를 주형재료로 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

3.2 주형예열에 따른 영향 고찰

건전한 주조품을 얻기 위해서는 청정한 용탕을 필요 최저한의 과열온도에서 신속히 주입하여, 압탕으로 지향성 응고가 이루어지도록 탕구계의 최적화가 이루어져야 한다. 그러나, TiAl 합금은 용점이 1700 K 이상으로 높을 뿐만 아니라 용탕의 온도측정 및 과열정도를 원하는 상태로 제어하기 어려운 합금으로 탕구방안 수립에 많은 어려움이 따른다. 이와같이 용탕에 충분한 과열을 원하는 대로 조절 할 수 없는 경우에는 유동성 향상을 위한 방법으로 주형을 예열하거나 원심력을 부여하여 용탕의 충전성을 향상시키는 방법이 적용될 수 있다. 이 중에서 원심주조는 30배 정도의 중력배수가 필요하여 주형은 큰 원심력에 견딜 수 있는 강도를 요구하며, 실질적인 생산수율이 10% 이하이며, 고속 원심회전으로 용탕 충전시 난류에 의한 기포 혼입을 피할 수 없다. 따라서 원심주조라는 특수 공정을 이용하면서도 건전성 확보를 위해 HIP 처리가 필요한 문제점이 있다. 또한 주형예열로 유동성 개선을 위한 노력은 현재까지는 Nb 및 Ta 등의 금형에서만 시도가 되었을 뿐, 내화물 주형의 경우에는 용탕과 주형과의 심각한 반응을 우려하여 주형예열을 금기시 하고 있다[10]. 그러나, TiAl 합금은 기존의 Ti 합금과 달리 Al₂O₃ 주형과 치환형 및 침입형 α-case 모두를 형성하기 어렵고, TiAl 합금 자체가 계면반응 생성물이므로, 주형의 예열이 계면반응에 미치는 영향을 고찰하고자 하였다. Fig. 3에 나타난 계면의 조직사진에서 알 수 있듯이, 주형의 예열 온도가 1073 K까지 상승하더라도, Al₂O₃ 주형과 TiAl 합금은 기존의 Ti 및 Ti6Al4V에서 관찰되는 뚜렷한 계면반응층은 거의 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이러한 계면 조직 사진의 결과는 Fig. 4의 주형예열 온도에 따른 경도값 변화에서도 동일한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있다. 그러나 주형의 예열온도가 높아짐에 따라서 미세조직이 조대해지는 일반적인 주조조직의 경우와 달리, TiAl 합금은 주형의 예열온도가 올라감에 따라서 조직이 미세해지고 있음을 주조 시편의 외부 조직사진 그림 3과, 중심부 조직사진 Fig. 5에서 확인할 수 있다. 이러한 주형예열의 온도 상승에 따른 조직의 미세화 원인을 조사하기 위하여, TiAl 합금 주조품의 표면에서부터 내부로 EPMA 선분석을 실시하였으며, Fig. 6에 그 결과

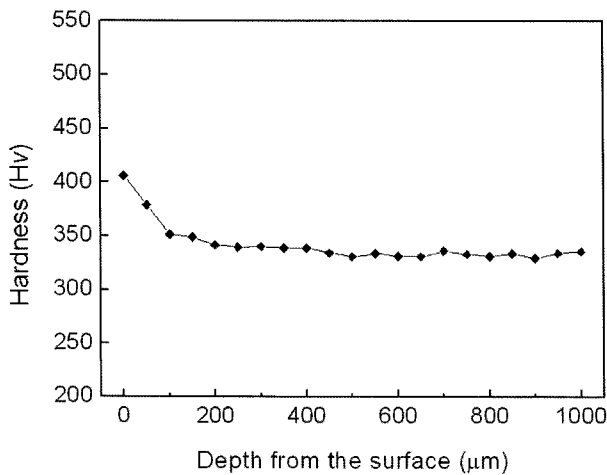


Fig. 3. Microstructures of the metal-mold reaction interface between TiAl alloy and Al_2O_3 mold with various mold preheating temperatures ; (a) no preheating, (b) 673 K, (c) 873 K and (d) 1073 K.

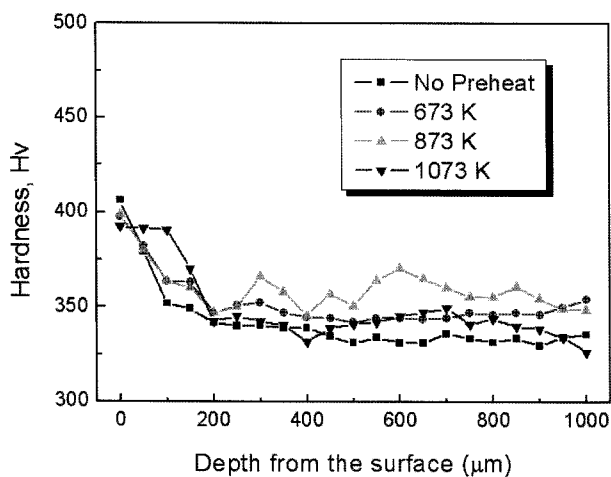


Fig. 4. Hardness profiles of the TiAl alloy castings poured into Al_2O_3 mold with various mold preheating temperatures.

를 나타내었다. 그 결과 주형의 예열온도가 상승함에 따라 주형에서 분해된 산소, 금속성분 및 점결제의 주성분인 실리콘이 주조품의 내부에서 검출되고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 TiAl 합금 용탕과 예열된 주형 사이에서 분해된 금속성분, 산소 및 점결제 성분이 응고시 이질핵생성을 야기한 결과라고 판단되며, 향후 이질핵의 존재 및 조성의 규명과 관련된 심도 있는 후속 연구가 필요하다고 생각된다.

3.3 TiAl 합금 유동성 평가

금속에 있어서 용탕의 유동성은 표준주형 내에서 용탕이 응고 전에 최대한 흐를 수 있는 길이로 정의된다. 이러한 표준주형에는 계단형 주형과 서로 다른 크기의 직경을 가지는 주형 및 박육화 가능여부를 시험하는 aero-foil 주형 등이 일반적으로 사용된다[12]. 그러나 이러한 표준주형을 정밀주조 주형

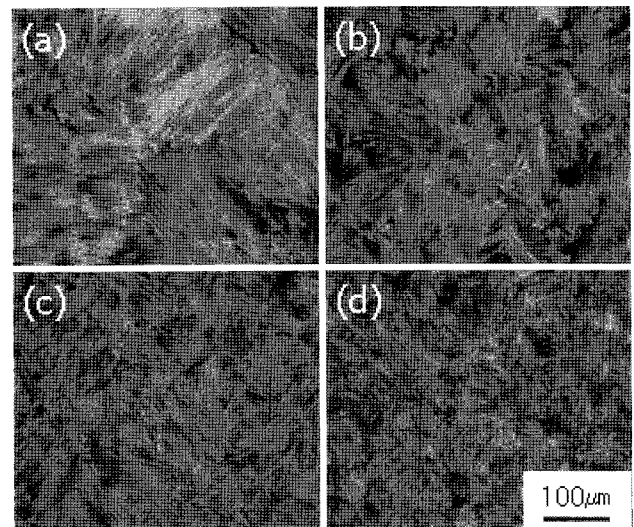


Fig. 5. Microstructures of the center area of TiAl alloy castings with various mold preheating temperatures ; (a) no preheating, (b) 673 K, (c) 873 K and (d) 1073 K.

으로 제작시 주형의 수평을 제어하기가 힘든 단점이 있으며, 표면장력과 modulus(체적/냉각면적)의 관계에 의해서 합금에 따라서 실제의 유동성과 다른 거동을 보일 수 있는 문제점을 가지고 있다. 따라서 나선형으로 일정한 곡률을 가지면서, 계속 반복되는 구조를 가지기 때문에 수평여부에 크게 영향을 받지 않고, 2 mm 이상 17 mm 이하의 단면적일 경우 주입시 back-pressure만 제어할 수 있는 air-vent가 있으면 표면장력 및 modulus에 크게 영향을 받지 않고 유동성을 평가할 수 있는 spiral의 주형을 선택하였다[11].

유동성의 물리학적 정의는 점도의 역수이다. 그러나 주조에 있어서 유동성은 일정한 표준주형 내에서 용탕이 응고 전에 최대한 흐를 수 있는 길이(L_f)로 정의되며, 용탕의 유동성 제어는 건전한 주조품을 얻기 위해 필수불가결한 과정이다. 용탕의 유동성은 크게 응고의 형태, 과열, 기하학적 형상에 기인한 표면장력 및 modulus, 주형의 예열온도 등이 주요한 변수로 작용하게 된다. 용탕의 유동성을 나타내는 L_f 는 Flemings 등에 의해서 제안된 식 (1)을 기초로 해서 출발한다[11,12].

$$L_f = Vt_f \quad (1)$$

여기서 V 는 용탕의 일정한 속도이며, t_f 는 응고시간이다. 응고의 형태는 크게 고액공존구간이 없이 응고되는 순금속 및 공정반응 조성의 합금과 응고구간을 가지는 합금으로 나뉘며, 응고구간의 존재 여부에 따라서 같은 응고시간 t_f 를 가지더라도, L_f 는 부분적인 응고에 의한 고상끼리의 network 형성으로 인해 줄어들게 되어 합금계마다 보통 $t_f/5$ 에서 $t_f/2$ 로 응고시간이 줄어드는 효과가 나타나게 된다. TiAl 합금은 주어진 조성에서 약 70 K 정도의 고액공존 영역을 가지며, 순금속의 Ti 및 Al 보다 유동성이 좋지 않을 것으로 예상된다.

Fig. 7의 주형 예열온도에 따른 유동성 결과에서 TiAl 합금은 주형의 예열온도가 올라감에 따라 유동성이 개선됨을 알 수 있다. 주형의 예열온도가 1073 K일 때는 최대의 spiral 길

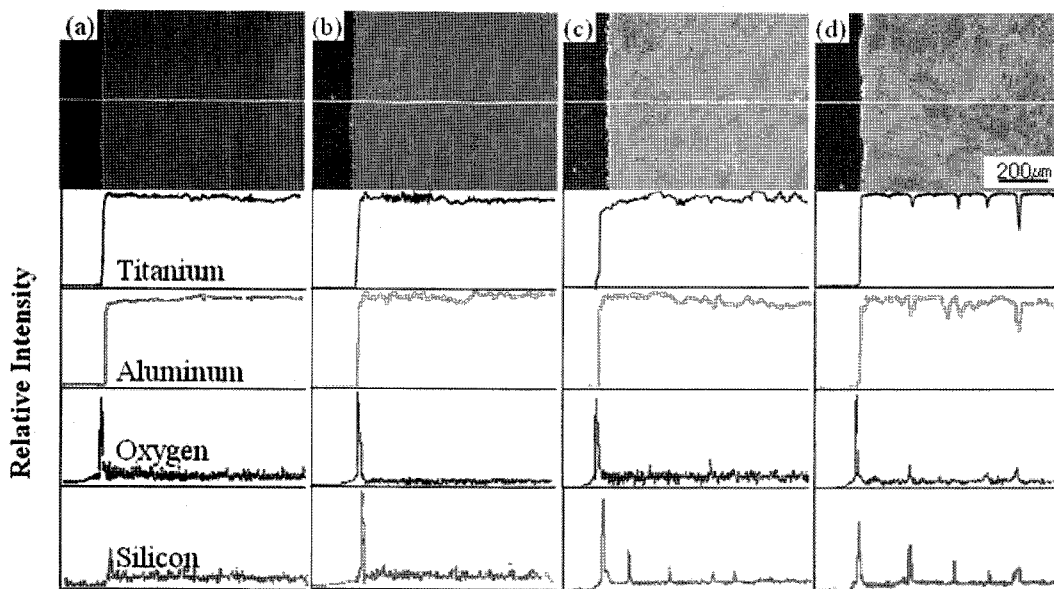


Fig. 6. EPMA line profiles of TiAl alloy castings poured into Al₂O₃ mold with various mold preheating temperature; (a) no preheating, (b) 673 K, (c) 873 K and (d) 1073 K.

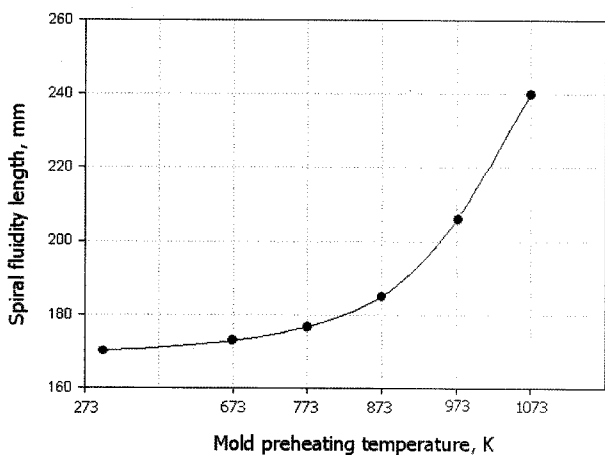


Fig. 7. Variation of spiral fluidity length of TiAl alloys with preheating temperatures of the Al₂O₃ mold.

이가 240 mm까지 증가하여, 50 K 정도 과열을 한 순 Al의 spiral 길이 300 mm의 80% 정도의 유동성을 나타내고 있다. 이렇게 주형의 예열온도에 따라 유동성이 개선되는 이유는 응고 시간 증가와 응고시 조직전개 양상으로 설명할 수 있다. 주형의 예열온도가 상승하면, 고액 공존구간 및 액상에서의 열구배가 작아지므로 응고시간이 길어지면서 고액공존 구간이 넓어지게 되며, 유동의 저항이 거의 없는 액상영역 또한 넓은 구간을 유지할 수 있다. 한편, 넓어진 고액공존영역에서의 고상의 비율이 조금만 증가해도 서로 network를 형성하는 가지가 많은 수지상이 형성되면, 고액공존영역이 넓어지면서 오히려 유동성이 감소할 수 있다. 그러나, TiAl 합금은 포정반응을 하는 합금계이다. 포정반응은 포정반응을 지나면서 응고시 생성된 초정을 둘러싸면서 응고하기 때문에 늘어난 고액공존영역이 유동성 개선에 유효할 것으로 판단된다. 따라서 주형의 예열에

의해서 열구배의 감소로 인해 TiAl 합금의 유동성은 증가하게 된다.

TiAl 합금의 주형재료에 따른 계면반응 평가, 주형 예열시 열적 안정성 및 유동성 평가를 바탕으로, TiAl 합금은 일반적인 Ti 및 그 합금과 달리 작업성, 성형성 및 경제성까지 고루 갖춘 Al₂O₃를 이용하여, 주조를 통한 경제적인 정형가공이 가능함을 확인할 수 있었다. 한편, TiAl 합금 정밀주조의 최적화를 위해서는, 주형 예열온도에 따른 유동성 평가뿐만이 아니라, 주조방안에서 탕구 및 탕도의 크기, 길이 및 형상을 결정하는 최대연속유동성 측정과 원심을 이용한 유동성 개선 및 TiAl 합금의 미세조직 제어가 유동성이 미치는 영향, 전산모사를 통한 주조방안 최적화 등에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

4. 결 론

TiAl 합금의 경제적인 정형가공 실용화를 위해서, Al₂O₃ 주형의 예열에 따른 계면반응 평가와 유동성 측정에 대한 기초 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) TiAl 합금은 Ti와 달리 정밀주조시 α-case 형성이 거의 없는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Ti가 Al과 합금화되면서 용탕의 활동도가 감소하는 Raoult의 부편차 특성을 나타내며, 타이타늄과 달리 산소를 거의 고용하지 않기 때문이라고 판단된다.

2) TiAl 합금은 Al₂O₃ 주형을 1073 K까지 예열하더라도 α-case를 거의 형성하지 않고 안정함을 확인할 수 있었다. 그러나 미세조직은 주형의 예열온도가 올라감에 따라서 주조조직이 조대해지는 일반적인 경우와 달리, 미세하게 변하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 EPMA 분석결과를 바탕으로 주형에서 분해된 금속성분, 산소 및 점결제 성분이 예열온도가 올라감에 따라 불균질핵생성을 야기한 것으로 판단된다.

3) Al_2O_3 주형의 예열온도가 상승함에 따라서, TiAl 합금 용탕의 유동성을 50 K 정도 과열한 순 Al 유동성의 80% 정도까지 효과적으로 개선할 수 있었다. 이는 TiAl 합금이 포징 반응을 하면서 응고시 생성된 초정을 둘러싸면서 응고하기 때문에 열구배 감소로 늘어난 고액공존영역이 유동성 개선에 유효했기 때문이라고 판단된다.

4) TiAl 합금과 Al_2O_3 주형의 예열에 따른 계면반응 평가와 유동성 측정 결과, 용탕 상태의 심한 활성화와 상온연성 부족 등의 요인으로 경제적인 가공이 어려운 난가공성 소재인 TiAl 합금을 정밀주조를 통하여 경제적인 정형가공이 가능함을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 2002학년도 동아대학교 학술연구비(국외단기 파견 과제)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Y. W. Kim : JOM, "Ordered intermetallic alloys, part III: Gamma titanium aluminides", 48 (1994) 30-39.
- [2] C. M. Austin : Solid State & Materials Science, "Current status of gamma Ti aluminides for aerospace applications", 4 (1999) 239-242.
- [3] A. Lasalmonie : Intermetallics, "Intermetallics: Why is it so difficult to introduce them in gas turbine engines?", xx (2006) 1-7.
- [4] D. Eylon, M. M. Keller and P. E. Jones : Intermetallic, "Development of permanent-mold cast TiAl automotive valves", 6 (1998) 703-708.
- [5] T. Tetsui : Adv. Eng. Mater., "Application of TiAl in a turbocharger for passenger vehicles", 3 (2001) 307-310.
- [6] S. Y. Sung, M. G. Kim and Y. J. Kim, J. Kor. Inst. Met. & Mater. "A study of the identification of metal/mold reaction product of Ti investment casting", 41 (2003) 557-561.
- [7] C. Leyens and M. Peters, "Titanium and Titanium Alloys", Wiley-VCH, Weinheim, 2003.
- [8] S. Y. Sung and Y. J. Kim, Mater. Sci. Eng. A, "Alpha-Case Formation Mechanism on Titanium Investment Castings", 405 (2005) 173-177.
- [9] M. Maeda, T. Kiwaka, K. Shibuya and T. Ikeda, Mater. Sci. Eng. A, "Activity of aluminium in molten Ti-Al alloys", 239-240 (1997), 276-280.
- [10] A. Choudhury and M. Blum, Vacuum, "Economical production of titanium-aluminide automotive valves using cold wall induction melting and centrifugal casting in a permanent mold", 47 (1996), 829-831.
- [11] J. Campbell, Cast Metals, "Review of fluidity concepts in casting", 7 (1995) 227-237.
- [12] M. C. Flemings, "Solidification processing", McGraw-Hill, New York, 1974.