고융점 금속 다공성 벌크소재 기술

이병필* · 김명균 · 최봉재^a · 김영직^a · 현승균^b

포항산업과학연구원 신금속연구본부, ^a성균관대학교 신소재공학과

^b인하대학교 신소재공학과

Porous Bulk Material for High-melting Point Metal

Byong-Pil Lee*, Myoung-Gyun Kim, Bong-Jae Choi^a, Young-Jig Kim^a, and Seung-Keun Hyun^b

New Materials Research Department, Research Institute of Industrial Science and Technology,

Pohang 790-330, Korea

^aDepartment of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

^bDepartment of Advanced Materials Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

1. 서 론

여러 형상의 기공으로 이루어진 다공성 소재는 특정 기능이 요구되는 분야에 한해 선택적으로 사용되어져 왔다. 특히, 알루미늄 다공성소재는 주조공정으로 대량생산의 발판을 마련하였으며, 현재 방음, 단열, 진동흡수능이 요구되는 단열재 및 방음소재 등에 적용되고 있다. 알루미늄 다공성소재 제조기술은 Ca와 같은 점증제 및 TiH_2 와 같은 발포제를 이용하여 제조하며, 용탕상태에서 충분한 발포능을 확보하기 위하여 적절한 점성 및 표면장력이 요구된다. 현재 Batch Type 제조공정에서 연속생산이 가능한 공정으로의 발전이 진행되고 있으며, 이러한 발포금속의 제조방법은 최근 마그네슘 합금에도 적용되어 개발되고 있는 추세이다[1-2].

그러나 알루미늄과 같은 저융점 금속의 경우에는 극한환경이나 높은 사용온도, 내식성 등이 요구되는 분야에는 적용하기가 어려워 이를 대신할 철, 니켈, 구리, 타이타늄 등 고융점 금속의 다공성 소재에 대한 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 하지만 고융점 금속 다공성 소재를 만들기 위해 기존 알루미늄과 같은 발포 공정기술을 적용하는 것은 고온 발포제, 고온의 용탕취급 및 설비 등이 동시에 개발되어야 하기 때문에 그리 쉬운 일이 아니다. 따라서 현재에는

대부분 분말야금법에 기초로 한 기술이 개발되고 있다. 그러나 분말야금법의 경우 역시 제품의 크기, 공정비용, 적용처의 한계 등의 많은 문제점을 갖고 있다[3-4].

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 고융점 금속, 특히 타이타늄을 다공성 소재로 제조하기 위하여 주조기술을 활용한 새로운 패러다임의 공정 기술에 대하여 소개하고자 한다. 본 논문에서 제안하는 공정 기술은 기존 분말야금법을 대체할 수 있으면서 적절한 용탕제어공정기술을 이용하여 고융점 다공체 제조원가의 절감을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

2. 기존 고융점 금속 다공성 소재 제조기술

기존에 알려져 있는 타이타늄 다공체를 제조하는 방법에는 크게 다섯 가지의 기술이 있으며 이는 아래 그림 1에 표시되어 있다. 각각의 공정 기술에 대한 간략한 설명은 아래와 같다[5].

1) 분말 소결법(Powder Sintering, 그림 1(a)): 다공성 소재를 얻는 가장 손쉬운 방법으로 타이타늄 분말을 부분 소결하는 하는 것으로, 분말과 분말 사이에 Necking이 발생하는 온도에서 소결하게 되면 다공성 소재를 얻을 수 있으며 가압, 플라즈마 등을 적

*Corresponding Author : [Tel : +82-54-279-6563; E-mail : bplee@rist.re.kr]

Fig. 1. Schematics of main solid-state processes to fabricate Ti foams.

용하는 경우 기계적 특성이 향상된 다공체를 얻을 수 있다. 하지만 이 기법으로는 개기공형 구조를 얻기 어려우며 구조 제어가 난해한 문제점이 있다.

2) 중공형/선형 분말 소결법(Hollow Powder Sintering, 그림 1(b)): 중공형 입자를 소결하는 방법으로 종전 분말소결법에서 50%의 기공률을 넘을 수 없는 한계점을 극복하여 불규칙한 형상의 분말을 소결하는 방법이다. 기공이 분말의 내부에 형성되어 있으며 입자간 부분 소결을 통하여 얻을 수 있다. 선형의 소재를 소결하는 경우 높은 기공률을 높일 수 있

으며 기공의 형태로 어느 정도 조절이 가능하다. 하지만 개기공형을 얻기 어렵고 압축 강도가 저하되는 문제점을 안고 있다.

3) 기체 팽창 또는 Space-holder를 이용한 기법(그림 1(c)): 타이타늄 분말과 희생층 소재를 혼합하여 성형한 후 저온에서 희생층 소재를 제거하고 고온에서 소결을 시행하여 다공체를 제조하는 방법이다. 희생층 소재는 저온에서 제거가 가능하면서 타이타늄 소재에 오염이 거의 없는 소재를 적용하여 제조한다. 분말 성형 시 압력을 가하기 때문에 희생층 소재가 충분한 강도가 없는 경우 변형이 발생하게 되어 붕괴되는 현상이 발생되기도 하는데 이를 제어하는 것이 핵심 기술이다. 여전히 기공구조 제어와 기공형 소재 제조에 난점이 있다.

4) Preform에 분말을 코팅하여 소결하는 방법(그림 1(d)): 타이타늄 분말을 슬러리 형태로 제조하고 고분자 소재의 Preform에 코팅한 후 고분자 소재를 저온에서 탈지하고 고온에서 소결을 시행하여 제조하는 방법이다. 고분자 소재 Preform 형태에 다양한 구조 제어가 가능하며 기공도를 90%이상 높일 수 있는 장점이 있다. 코팅을 위한 슬립 제조 기술과 소결이 핵심 기술이다.

5) 기체를 포함한 분말 치밀화 후 팽창 기공 생성 방법(그림 1(e)): 분말소결법과 대별되는 방법으로 기존에는 초기에 형성된 구조가 그대로 유지되는 반면 기체팽창법은 기공의 구조가 변화하는 방법이다. 소결공정 또한 성형을 위한 공정과 최종 소결을 위한 공정 두 가지의 제어가 용이하지 않은 방법이다. 일반적으로 HIP를 적용하여 기체가 포획된 성형체를 제조하고 소결공정 이전에 팽창하도록 하며 이후 최종 소결한다. 기공도는 50%를 상회하지만 구조제어가 어려운 단점이 있다.

3. 고융점 금속 다공성 벌크소재 기술

3.1. 제안기술

본 논문에서 다공성 소재로 주목하고 있는 타이타늄은 가볍고 강하며 우수한 내식성을 갖는 소재로 우주항공, 화학플랜트, 스포츠용품 및 의료기기 등 그 적용범위가 다양하다. 하지만 이러한 우수한 특성에도 불구하고 높은 반응성으로 용탕상태에서 취급이 용이하지 않고, 유동성이 좋지 않으며, 용점이 매우

높아 주조기술을 적용하기에는 많은 문제점을 가지고 있다. 또한, 타이타늄 주조 시 사용되는 산화물계 주형드 소재와의 반응성이 좋아 주조품질 확보가 쉽지 않다. 이러한 여러가지 어려움을 극복하기 위하여 본 논문에서는 반응성을 억제할 수 있는 주형소재의 개발과 더불어 다음과 같은 정밀주조 공정기술을 제안하고자 한다.

우선 타이타늄을 활용한 다공성소재 주조 시 타이타늄 용탕과 주형재 사이의 반응에 대한 메커니즘을 규명하여 주형재와 주물과의 반응을 억제하고자 한다. 그림 2와 같이 기존 주형재에서는 주형재의 금속 성분과 산소가 타이타늄 표면에 반응층(Alpha case)을 형성하므로 사전에 주형재에 금속분말(Ti)을 혼합하여 주형재와 주물사이의 반응층 형성을 극히 억제하는 기술을 적용한다.

한편 용탕 유동성이 현저하게 떨어지는 타이타늄의 문제점을 보완하기 위해서 현재 적용하고 있는 원심주조법을 대신하여 감압과 가압의 압력차를 이용하는 압력제어 주조기술을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 압력제어 주조기술은 타이타늄의 용해와 주조 공정을 이중챔버를 활용하여 각각 분리함으로써 먼저 타이타늄의 용해 시에는 불활성분위기하의 가

압상태에서 용해를 하고, 이를 주조 시에는 감압상태로 유지하여 압력차를 최대화하고, 그 구동력으로 주조 시 용탕의 유동성 확보 및 오염 방지가 가능하도록 하였다. 아울러 압력차외에도 주형의 예열온도 및 진동인가 등의 공정변수를 제어하여 용탕의 주입 구동력의 추가적인 향상을 도모하였다.

3.2. 산화물 주형의 반응성 평가 및 열역학적 고찰

타이타늄 주조 시 반응층 형성을 최대한 억제하는 정밀주조 주형재 개발을 위해서 표준상태에서 타이타늄의 산화물 표준생성자유에너지(ΔG_0)보다 낮은 ΔG_0 를 가지는 Al_2O_3 , $ZrSiO_4$, CaO stb. ZrO_2 및 Y_2O_3 stb. ZrO_2 산화물을 적용하였으며, 이를 Lost wax법을 활용하여 주형으로 제작하였다. 제작된 주형과 타이타늄 용탕과의 반응성 평가를 위하여, 내화물 도가니와 달리 용탕의 오염을 배제할 수 있는 수

● No reacted layer : Ceramic + Ti mixed powder
Fig. 2. Interfacial reaction layer control.

Fig. 3. Metal/mold reactions of Cp Ti with: (a) Fused Al_2O_3 , (b) CaO stb. ZrO_2 (Unitech), (c) CaO stb. ZrO_2 (Mirae), (d) Y_2O_3 stb. ZrO_2 (Mirae) and (e) Vickers Microhardness Profiles.

냉동 도가니를 사용하는 PAM(Plasma Arc Melting)을 활용하여 Drop casting하였다. 그리고 정밀주조품의 계면 반응층을 분석하기 위하여 주조품 표면부터 내부로의 조직사진 관찰 및 경도값 변화 측정을 실시하였다. 그림 3에는 본 연구에서 적용한 Al_2O_3 , ZrSiO_4 , CaO stb. ZrO_2 및 Y_2O_3 stb. ZrO_2 주형과 타이타늄과의 계면반응 후 계면조직사진과 계면으로부터 주조품 내부로의 경도값 변화를 나타내었다.

그림 3의 미세조직사진에서 육안으로 관찰되는 계면반응층은 $150\ \mu\text{m}$ 정도임을 알 수 있는 반면, 경도값 변화에서는 Al_2O_3 산화물 주형의 경우, $500\ \mu\text{m}$ 정도까지 경도가 상승하였고, ZrSiO_4 , CaO stb. ZrO_2 및 Y_2O_3 stb. ZrO_2 산화물 주형은 약 $200\sim 300\ \mu\text{m}$ 의 경도상승층을 관찰할 수 있었다. 아래 그림 4는 Ti6Al4V 합금과 주형과의 계면반응 조직사진과 경도값 변화를 나타내고 있다. Ti6Al4V 합금은 cp 타이타늄과는 달리 육안으로 계면 반응층을 판단하기 어려웠고, 경도값 변화를 통하여 확인할 수 있었다. 따라서, cp 타이타늄의 경우와 유사하게 Ti6Al4V 합금의 경우에는 미세조직과 경도값 변화를 통하여 경도상승층이 존재함을 확인할 수 있었다. 이처럼 육안으로 관찰되는 계면 반응층과 더불어 경도상승 영역을 산소화산에 의한 산소부화영역이라고 하며, 일반적으로 타이타늄 경도 상승에 발생하는 α -case는 이러한 산소부화영역을 포함하여 불리고 있다[6].

Fig. 4. Metal/mold reactions of Ti6Al4V with (a) Fused Al_2O_3 , (b) CaO stb. ZrO_2 (Unitech), (c) CaO stb. ZrO_2 (Mirae), (d) Y_2O_3 stb. ZrO_2 (Mirae) and (e) Vickers Microhardness Profiles.

Fig. 5. Elemental mapping images of Ti castings into mold and BEI image by EPMA: (a) Al_2O_3 Mold and (b) ZrSiO_4 Mold.

더불어 산화물 주형과 타이타늄 간의 계면 반응층에 대한 성분분석을 위하여 EPMA 분석을 실시한 결과, 그림 5(a)의 Al_2O_3 산화물 주형의 경우, 주요한 계면 반응층으로 알려진 침입형 α -case의 주성분인 O는 거의 찾을 수 없으며, O 성분은 200 μm 정도에 걸쳐서 미량으로 존재함을 알 수 있다. 반면, 알루미늄 함량이 전혀 없는 cp 타이타늄임에도 불구하고 Al이 30 μm 정도의 층으로 균일하게 분포하여 계면반응에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 그림 5(b)의 ZrSiO_4 산화물 주형의 경우, Al_2O_3 산화물 주형과 유사하게, 타이타늄 주조품 계면에 산화물의 금속 성분인 Zr 및 Si 성분이 각각 30 μm 및 20 μm 으로 계면에 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다.

타이타늄은 정밀주조 시 활성이 강한 용탕과 산화물 주형 간에 형성되는 α -case 반응층은 산소, 질소 및 탄소 등의 침입형 원자, 특히 주형재료에서 분해되어 타이타늄에 33at%까지 고용이 가능한 산소의 확산에 의한 TiO_2 반응층이 주된 것으로 알려져 있다. 이를 바탕으로 타이타늄 정밀주조용 주형재료로, 주형에서 분해된 산소에 의한 α -case를 최소화하기 위하여, 표준상태에서 타이타늄의 산화물 표준생성자유에너지(ΔG_0)보다 낮은 ΔG_0 를 가지는 Al_2O_3 , ZrSiO_4 , 안정화 ZrO_2 등 열역학적으로 안정할 것으로 예측되는 재료들을 적용해본 결과, 주조품 표면에 산소 성분 뿐만 아니라 Al, Zr 및 Si와 같은 금속 성분이 계면에 검출되는 것을 확인할 수 있었다.

한편 타이타늄과 주형사이의 계면반응층 분석과 더불어, 실제 계면반응 생성물 형성의 열역학적인 안정성 여부를 고찰하기 위하여 FactSage software를 활용하여 열역학적인 계산을 수행하였다. 그림 6은 본 계산에서 활동도 1의, 즉 실제 생성 가능한 물질을 중심으로 계산 결과를 나타내었으며, HCP구조의 Al-Ti 합금과, M_2O_3 Corundum 구조의 알루미늄, Al_2O_3 - Ti_2O_3 고용체가 생성된다. 각 생성물에 대한 구성성분의 화학양론비 및 생성량을 알 수 있으며, Al-Ti 합금의 경우 Ti-40 mol%의 조성으로 약 1몰이 형성된다. 알루미늄의 경우 0.5몰이 형성되며, Al_2O_3 - Ti_2O_3 고용체의 경우 Ti_2O_3 가 약 40 mol% 함유된 것으로 계산되었다. 계산 결과를 종합하면, Al-Ti 합금- Al_2O_3 - Ti_2O_3 의 세 개의 상이 평형관계에 있는 것을 의미하며, 타이타늄 용탕을 알루미늄 몰드에 응고시킬 경우 반응층은 Al-Ti 합금- Al_2O_3 -(Al_2O_3 - Ti_2O_3)이

Fig. 6. Thermodynamic calculation of Al_2O_3 -Ti system by FactSage.

되는 것을 의미한다.

본 연구에서의 계산의 타당성을 검토하기 위하여 기보고된 문헌과의 비교를 수행하였다. 하지만, 타이타늄의 경우 전이금속인 타이타늄의 산화수 차이 및 산소와의 높은 친화력에 기인해 그림 7와 같이 다양한 산화물을 형성하는 것으로 보고되고 있다. 이러한 이유로, 대부분의 타이타늄 산화물이 포함된 상태도는 안정한 TiO_2 를 포함하는 것이 보고되어, 타이타늄 산화물의 반응해석에 제약이 되어 직접비교가 불가하였다. Ti-Al-O 삼원계 상평형에 대한 연구는 Al_2O_3 에 타이타늄을 증착하여 제조하는 브레이징 합금에 관해 다음과 같이 일부 보고되었다. Al_2O_3 와 타이타늄 사이의 계면반응 생성물은 Ti-Aluminides가 형성되는 것은 확인하였지만, Ti_3Al 외에 TiAl 의 형성여부에 대한 정확한 규명은 아직 이루어지지 못하고 있다. Li[7] 등은 타이타늄과 Al_2O_3 사이의 계면반응 시 계면 반응 생성물에 대해 Ti_3Al , TiAl , Ti-oxides 이 아니라, Ti-Aluminides라는 실험 결과에 대한 설명이 있었으나, Ti층의 두께에 대한 생성물 차이에 대한 명확한 설명이 없었다. 이에 반해 Lee[8]에 의해 타이타늄 Al_2O_3 계면반응에 대한 열역학적 해석 및 반응속도론적 고찰에 근거한 반응해석 및

Fig. 7. Phase diagram of Ti-O system.

Fig. 8. Ti-Al-O isothermal diagram.

Ti-Al-O 평형상태도(그림 8)에 대한 보고가 있었으나, 본 연구의 실험온도보다 낮은 1100도에 대한 해석이 었다. 하지만, 문헌비교에 있어, 비교대상이 없는 관 계로 이를 기초로 전술한 FactSage 프로그램 계산 결과를 비교하였다.

그림 8은 문헌의 Ti-Al-O 평형상태도와 본 연구의 계산을 비교한 것으로 FactSage 프로그램에 의해 계 산된 결과를 평형상태도 위에 적색으로 도시하였다. 전술한 바와 같이 반응생성물이 Al-Ti합금-Al₂O₃-Ti₂O₃ 세 상으로 서로 평형관계에 있는 것으로 계산 되었으며, 이를 문헌의 상태도와 비교할 경우, 각 상 의 평형관계에 위배되는 것으로 나타났다. 이러한 이 유로는 계산에 사용된 FactSage의 데이터베이스에 산

Fig. 9. Thermodynamic calculation of ZrO₂-Ti, SiO₂-Ti system by FactSage.

소의 용해도가 제대로 고려되어 있지 않은 것을 들 수 있으며, 타이타늄의 경우 HCP 및 BCC 구조의 타이타늄 중으로의 산소 용해도가 높기 때문에 계산 결과가 Ti-Al 합금, Ti-O 합금, Al₂O₃ 산화물이 3상 평형을 이루는 것으로 판단된다. 즉, FactSage 프로 그램 내에서 Ti-O 합금 대신에 Ti₂O₃-Al₂O₃ 고용체 가 안정상으로 계산이 되므로, 향후 타이타늄 중 산

소의 고용도가 제대로 평가된 데이터베이스의 구축 및 이에 대한 실험적 근거가 보강되어야 할 것으로 판단된다.

더불어 Al_2O_3 외에 ZrO_2 및 SiO_2 주형에 대한 계산도 병행하였으며, 그 결과는 그림 9와 같다. ZrO_2 주형 내 Ti 용탕을 응고하였을 때 반응층은 BCC 구조의 Ti-Zr 합금이 mol%로 8:2 즉 Ti-20 mol%Zr 합금이 생성되며, 그 외에 Tetrahedral 구조의 ZrO_2 산화물과 beta 구조의 TiO 산화물이 평형관계에 있는 것으로 예측되었다. 반면, SiO_2 주형 내 Ti 용탕을 응고하였을 때에는 Tridymite 구조의 SiO_2 산화물과 Ti_2O_3 산화물, SiTi 합금이 평형관계에 있는 것으로 예측되었다. 각 계산 결과에 해당하는 세 상들의 평형관계는 각각 그림 10의 Ti-Zr-O와 Ti-Si-O의 삼원계 상태도 위에 도시할 수 있다.

계산된 결과의 문헌과의 비교에 있어서, ZrO_2 -Ti

Fig. 10. Phase diagram of ZrO_2 -O, SiO_2 -O system.

및 SiO_2 -Ti 조합의 경우에도 Ti-Zr-O와 Ti-Si-O 삼원계에 대한 완성된 데이터베이스가 부존하는 관계로, 많은 경우 데이터베이스가 Ti-Zr의 금속합금계 혹은 TiO_2 - ZrO_2 의 산화물계 데이터베이스만 존재하여 제 3의 금속원소가 존재하는 경우 타이타늄 중 산소의 용해도가 제대로 고려되지 않아, Ti-Al-O 삼원계 평형의 계산 결과와 비슷한 양상을 보이게 되었다.

3.3. 압력제어주조 시스템 설계 및 제작

본 연구에서 제안한 압력차를 활용한 정밀주조설비를 설계하기 위하여 우선 Mesh 형태의 왁스패턴을 제조한 후 Lost wax법으로 제작한 주형으로 주조공정에 따른 타이타늄 다공체의 주조성 평가를 실시하였다. 우선 진공유도용해 후 중력주조 및 원심주조를 실시한 결과를 그림 11(a)와 (b)에 나타내었다. 중력주조의 경우는 그림 11(a)에서와 같이 충전성이 약 22%정도로 단순형상임에도 불구하고 패턴의 상단 일부분만 충전되어 전체적으로 미충전 되었다. 이에 반해 그림 11(b)는 원심주조를 이용한 주조성 평가 결과로 200 rpm의 원심력을 구동력으로 가하여 그림에서와 같이 단순형상 패턴이 전체적으로 95%이상 충전되어 중력주조와 비교하여 충전성이 현저하게 증가하였다. 일부 미충전된 패턴 표면은 주형재의 예열이 부족하여 고융점 금속인 타이타늄이 주입 후 완전 충전되기 전에 용탕의 냉각이 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 11. Castability test by casting method (a) Gravity, (b) Centrifugal, (c) Gravity and (d) Pressurizing.

한편, 주로 금, 은 등을 이용한 귀금속 제조에 사용되는 압력제어 주조 장치는 저진공 하에서 비교적 저용점을 갖는 귀금속을 용해하고 하부몰드의 배기를 통하여 용탕 주입하여 주조하는 방식이다. 기존 상용화된 압력제어 주조 장치의 주조성을 평가하기 위하여 기본적인 중력주조와 압력제어 주조를 실시하였으며, 그 결과는 그림 11(c)와 (d)에 나타내었다. 결과를 살펴보면, 중력주조의 경우, 주형 상부 일부만 충전되었으며, 저진공하에서의 용해와 주조로 인하여 주조품 표면에 산화물로 추정되는 반응층이 형성되었다. 2 bar의 압력차를 이용한 압력제어주조의 경우에는 용해부와 주조부의 압력차에 의하여 중력주조에 비해 충전성이 향상되었으나 중력주조와 마찬가지로 주조품 표면에 산화물로 추정되는 반응층이 형성되었고, 용탕량의 부족으로 완전 충전되지 않았다.

이와 같은 상용화된 압력 주조 설비는 귀금속 제작을 위해 사용되기 때문에 일반적으로 용점이 비교적 낮은 금속의 용융이 가능하며, 저진공 설계로 타이타늄 등의 반응성이 큰 고용점 금속의 주조 시에는 앞서 결과와 같이 반응층이 두껍게 형성되고 용해가능한 양도 적게 설계되어 있어 타이타늄의 주조에는 적합하지 않다. 더불어 과열 확보와 압력제어가 미비하여 미세한 다공성 소재 주조에도 난점을 가지고 있다. 이와 유사한 기존 설비로 일본 Daido Steel의 Levi Cast 시스템이 있다[9-10]. 이는 유도가열로 금속을 용해하면서 수냉도가니를 사용하여 전

자기장의 유도원리에 의한 Pinch Effect로 용탕을 부양시켜 용탕과 도가니가 접촉하지 않기 때문에 도가니에 의한 용탕의 오염이 없는 장점을 지니고 있다. 또한, 상부에 결합된 주형은 세라믹 Shell몰드를 사용하여 주형을 저진공 상태로 유지하면서 압력차에 의한 용탕의 주입 구동력을 주었다. 그리고 하부 용해부에서는 Ar 등 비활성가스를 상압 이상으로 주입함으로써 용탕을 외부에서 가압하는 효과로 상부 주형에 주조성을 높일 수 있다. 하지만 Levi Cast의 경우, 이러한 여러 장점에도 불구하고 근본적으로 용탕이 위로 주입되는 시스템으로 주조성의 단점과 생산성 저하의 문제를 지니고 있으며 용탕과 주형의 연결부에서의 오염이 발생한다. 또한 고용점 금속은 정밀주조 시 용탕의 유동성이 충분하지 않아 미세한 구조까지 건전하게 주조되지 못하며, 표면 및 내부에 결함이 빈번하게 발생하는 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 이러한 분석을 통하여 이중챔버를 채용하면서 Tilting system을 활용하여 주조 시 용탕 주입의 구동력을 향상시켜 충전성을 높이며 표면 및 내부결함을 없애고, 생산성을 높이는 기존 상용 압력제어 주조 설비를 보완, 개선한 새로운 주조시스템을 설계, 제작하였다.

새로 제작한 압력제어 정밀주조 장치는 그림 12와 같이 고용점 금속의 용융 시에는 용해부와 주조부로 구성된 이중 챔버가 수평식으로 위치해 있다가 용탕을 공급 시 90° 회전하는 방식으로 도가니 하부에 스위치를 사용하지 않고 두 챔버를 기울여 용탕을 안

Fig. 12. Design of Pressure control Casting system.

정적으로 공급하는 한편 가압/감압을 동시에 인가함으로써 기존 중력 및 원심주조의 미충전 및 표면결함을 극복하면서 수직형의 단점인 도가니 내부의 스위치에 따른 오염 또한 줄일 수 있어 고융점 금속 주조품의 특성 향상을 기대할 수 있다. 더불어 추가적으로 고융점 금속의 유동성 확보를 위한 예열 및 진동 시스템 등을 구성하여 정밀주조가 가능하도록 하였으며, 주조품의 표면 품질 향상을 도모하였다 [11].

3.4. 압력제어 정밀주조 주조성 평가 결과

앞서 최종적으로 설계 제작한 압력제어 정밀 주조 시스템의 주조성을 평가하기 위하여 고융점 금속인 타이타늄으로 다면체 다공성 주형을 활용하여 기초 실험을 실시하였다. 기초 실험은 최적의 공정조건을 도출하기 전에 구성된 주조시스템의 효과를 확인하기 위하여 용탕의 유동성 확보를 위한 주형의 예열 및 진동 시스템의 활용 여부, 가압과 감압을 통한 압력제어를 공정 변수로 주조성 평가를 살펴보았으며,

그 결과를 그림 13에 나타내었다. 그림 13(a)는 용탕 주입 시 타이타늄 용탕의 유동성 향상을 위한 주형에 가한 진동의 인가여부에 따른 실험결과이다. 주형에 진동을 가함에 따라 전체적인 충전성이 현저히 향상되었으며, 특히 모서리 등의 미세한 부분까지의 용탕의 유동성이 확보되었음을 확인할 수 있다. 타이타늄 용탕 주입 전에 주형의 예열온도에 따른 실험 결과인 그림 13(b)에서도 주형을 높은 온도로 유지하였을 때 용탕의 유동성이 증가하여 충전성이 향상되었음을 확인할 수 있다. 그림 13(c)는 그림 13(a)와 13(b)와 마찬가지로 주형에 진동을 인가하고 높은 예열온도로 유지하면서 더불어 이중챔버 사이에 감압과 가압을 조절하여 용해부와 주조부의 압력차에 따른 주조성 평가 결과이다. 그림 13(c)에서와 같이 타이타늄 용탕이 주형의 95% 이상 충전 되었음을 확인할 수 있다. 이와 같은 기초실험 결과로 볼 때 타이타늄 등의 고융점 금속 다공체의 정밀주조에 본 연구에서 제안한 압력제어 정밀주조 시스템 및 공정변수의 제어가 충분히 적용 가능함을 확인할 수 있다.

Fig. 13. Castability test by casting condition (a) vibration, (b) preheating and (c) controlled pressure.

4. 결 론

타이타늄 등의 고융점 금속의 경우, 현재 우수한 특성에도 불구하고 여러 어려움으로 저융점 금속에 비해 다공성 소재로의 활용 측면에서 산업적으로 확대, 적용되지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 현재 고융점 금속 다공성 소재기술에 적용하고 있는 분말 야금법 및 저융점 다공성 소재 기술의 문제점을 살펴보고, 실험 및 열역학적 고찰을 통하여 주조 시 용탕과 산화물 주형재의 계면 반응층 형성 메커니즘 및 주형재에 따른 열역학 Data를 확보하여 반응층 형성을 최대한 억제하는 방안을 도출하였다. 또한 기존 상용 압력주조 시스템 등을 통한 주조성 평가 실험 결과를 바탕으로 기존 설비를 보완, 개선한 새로운 압력제어 정밀주조 시스템을 설계, 제작하여 적절한 용탕제어공정기술을 이용하는 새로운 패러다임의 주조기술을 제안하였다.

본 연구에서 새로 제안한 압력제어 정밀주조 시스템은 주형에 높은 예열온도 및 진동을 인가하여 용탕의 유동성을 확보하고 용해 및 주조 시 이중챔버를 도입하고, Tilting System을 활용하여 가압과 감압을 이용한 압력제어 주조가 가능하도록 설계되었

다. 또한, 기초실험 결과를 통하여 제안한 압력제어 정밀주조 시스템의 주조 충전성 및 용탕의 주입 구동력의 향상을 확인하였다.

향후 연구에서는 형상 및 두께 제어가 가능한 새로운 Preform 설계방안[12]의 적용 및 반응층 및 지지층 소재 개발을 지속적으로 수행하고, 예열, 진동 및 효율적인 압력제어 등의 공정변수의 최적화를 통하여 표면 및 내부 결함을 최소화하여 주조 시 품질 및 생산성의 향상을 도모할 예정이다. 더불어 고융점 다공성 벌크소재 후공정 및 특성평가를 진행하고 이와 함께 고융점 다공성 소재의 표준화 기초연구도 수행할 예정이다.

이러한 본 연구의 목표가 달성된다면 해양, 조선, 화학플랜트, 해수용 필터, 고효율인버터 등의 분야에 고융점 다공성 소재가 널리 적용되어 기존소재를 대체하거나 새로운 소재시장을 개척하여 고부가가치 소재산업의 핵심역할을 담당할 것으로 기대된다. 더불어 제조원가의 획기적인 절감이 기대되며, 해외 의존형 부품소재 산업을 국내에 육성하여 무역역조 해소에 이바지하는 등 그 파급효과 또한 클 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 소재원천기술개발사업의 연구비로 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] B. Y. Hur, S. H. Park, Y. H. Song, M. J. Jung and K. J. Kang: Trends in Met. & Mater. Eng., **20** (2007) 32. (Korean)
- [2] John Banhart: JOM, **52** (2000) 22.
- [3] Medhat Awad El-Hadek and S. Kaytbay: Int. J. Mech. Mater. Des., **4** (2008) 63.
- [4] A. Salimon, Y. BreChet, M. F. Ashby and A. L. Greer: J. Mater. Sci., **40** (2005) 5793.
- [5] David C. Dunand: Adv. Eng. Mater., **6** (2004) 369.
- [6] M. G. Kim, S. Y. Sung and Y. J. Kim: Mater. Trans. JIM, **45** (2004) 536.
- [7] X. L. Li, R. Hillel, F. Teyssandier, S. K. Choi and F. J. Van Loo: Acta Metall., **40** (1992) 3149.
- [8] B. J. Lee and N. Saunders: Z. Metallkd., **88** (1997) 152.
- [9] Daido Steel: Japan, JP 2,541,341 (1996).
- [10] Daido Steel: USA, US 5,193,607 (1993).
- [11] M. G. Kim and J. H. Kim: Korea, KR 0041070 (2010).
- [12] B. P. Lee, M. G. Kim and J. H. Kim: Korea, KR 0112607 (2010).