

주석과 황동 용탕 드롭렛을 이용한 디스크형 응고체 제조

송정호¹, 이태경², 리광훈², 송오성^{1*}

¹서울시립대학교 신소재공학과, ²서울시립대학교 기계정보공학과

Fabrication of Metal Discs Using Molten Tin and Brass Droplets

Jeongho Song¹, Tae-Kyeong Lee², Gwang-Hoon Rhee², Ohsung Song^{1*}

¹Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul

²Department of Mechanical and Information Engineering, University of Seoul

요약 유가금속이 혼합된 비철합금의 습식 제련의 용이성을 위해서, 주석과 황동 용탕으로부터 표면적이 넓은 평판형 응고체를 제조하는 공정을 제안하였다. 금속 용탕을 그래파이트 도가니의 노즐로부터 드롭렛(droplet) 형상으로 떨어뜨릴 수 있도록 STAR-CCM+ 프로그램을 이용하여 노즐의 직경을 0.5, 1.0, 2.0 mm로 변화시키며 시뮬레이션을 진행하였다. 주석과 황동 모두 0.5 mm 노즐에서는 용액이 흐르지 않았으며, 2.0 mm에서는 연속적인 분사가 진행되었고, 1.0 mm에서는 목적인 드롭렛이 형성되었다. 시뮬레이션 결과를 바탕으로 목적인 드롭렛이 형성되는 1.0 mm 노즐을 이용하여 용융된 주석, 황동 용탕 드롭렛을 40°의 경사를 가진 티타늄 충격판에 충돌시켜 표면적이 증가된 디스크형 응고체를 10분 내에 성공적으로 제조하였다. 평면 응고체의 무게, 평균두께, 표면적은 주석의 경우 각각 0.15 g, 107.8 μm , 3.71 cm^2 이었으며, 황동의 경우 1.16 g, 129.15 μm , 23.98 cm^2 로 확인되었다. 형성된 응고체의 표면적은 드롭렛에 대비하여 각각 8.2, 17.6배로 증가되었다. 제안된 공정을 이용하여 다른 유가금속 합금의 표면적 향상 공정에도 비용과 시간 절감이 기대되었다.

Abstract This paper proposes a simple process to fabricate tin and brass metal discs with a large surface area from molten droplets for the wet-refining process of nonferrous metals by assuming they have precious metal elements. To optimize the droplet condition in a graphite crucible, the appropriate nozzle size was determined using a simulation program (STAR-CCM+) by varying the diameters (0.5, 1.0, and 2.0 mm). The simulation results showed that both tin and brass do not fall out with a 0.5 mm diameter nozzle but they do fall out in continuous ribbon mode with a 2.0 mm nozzle. Only the 1.0mm nozzle was expected to fabricate droplets. Finally, solidified metal discs were fabricated successfully with the 1.0 mm nozzle within 10 minutes by impacting the droplets with a cooling water flowing over a Ti plate placed at the 40° falling direction. The weight, average thickness, and surface area of the tin discs were 0.15 g, 107.8 μm , and 3.71 cm^2 , respectively. The brass discs were 1.16 g, 129.15 μm , and 23.98 cm^2 , respectively. The surface area of the tin and brass disc were 8.2 and 17.6 times the size of the tin and brass droplets, respectively. This process for precious metal extraction is expected to save cost and time.

Keywords : brass, computer simulation, droplet, molten metal, surface area, tin

1. 서론

최근 귀금속 및 유가금속의 가치가 지속적으로 상승함에 따라 반도체, 배터리 등과 같은 제품의 스크랩으로

부터 이들을 회수하는 공정의 중요성이 커지고 있다.[1,2] 귀금속 및 유가금속 중 특히 금의 경우 화폐적 가치가 가장 높고 반도체, 주얼리 분야 등 사용처가 많기 때문에 이에 대한 회수가 중요하다.[3]

본 성과물은 중소기업청에서 지원하는 2016년도 산학연협력 기술개발사업(C0261970)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Ohsung Song(Univ. of Seoul.)

Tel: +82-2-6490-5780 email: songos@uos.ac.kr

Received May 27, 2016

Accepted August 11, 2016

Revised June 24, 2016

Published August 31, 2016

통상적으로 금은 장신구나 반도체 등과 같은 전자재료 분야에서 기타 금속과 합금하여 사용되며, 이 때 최종 제품의 금함량이 미달되지 않기 위해 투입되는 금원재료의 경우 99.9% 이상의 고순도 순금이 필요하다. 이러한 산업적 용도의 고순도의 금을 고급으로부터 회수하기 위해서는 주로 습식정련 방법을 사용한다.

일반적인 고급의 습식정련은 통상 금합금 스크랩의 비표면적을 증가시킨 후 왕수에 투입하여 모두 산화시키고 환원제를 넣어 순수한 금만을 회수하는 공정이 채택된다.[4] 그러나 습식정련은 기본적으로 산화, 환원의 화학반응을 이용하므로 효과적인 반응 속도를 위해서 목적하는 유가금속 소재의 비표면적을 증가시켜야 한다.

비표면적을 증가시키기 위한 가장 일반적인 공정으로는 합금 전체를 용해하여 막대형으로 응고시킨 뒤 반복적인 압연작업을 진행하고 이를 커팅기로 절단하여 표면적을 늘리는 방법이 사용되고 있다. 그러나 이 공정은 압연 시간이 오래 걸리고 기계적 커팅에 따른 공정비용이 증가하기 때문에 개선이 필요하다.

이 외에 비표면적을 손쉽게 증가시키기 위한 공정으로는 멜트스피닝(melt spinning) 방법이 가능하다. 멜트스피닝 방법은 용융된 금속이나 폴리머를 매우 빠르게 냉각시켜 얇은 막 또는 매우 긴 리본을 만들어 내는 공정이다.[5] 멜트스피닝은 유도코일(induction coil)을 이용한 고주파 가열로 금속을 용융시키고 노즐을 통해 연속하여 빠른 속도로 회전하는 스피닝 드럼으로 떨어뜨려 리본형태의 얇은 막을 제조하는 공정으로 압연 과정 없이 표면적 증가가 가능하다. 멜트스피닝의 경우 표면적을 극단적으로 증가시킬 수 있는 장점이 있으나, 단순히 표면적을 증가시키기 위해서는 값비싼 회전냉각 드럼이 필요하므로, 장비를 구비하는데 경제성 문제가 발생하고, 최종 결과물이 연속된 리본체이므로 다시 적절한 크기로 절단하는 추가 작업이 필요한 문제가 있었다.

본 연구에서는 기존의 멜트스피닝 방법을 변형하여 경제적이고 단순한 공정을 확보하고자 하였으며, 특히 상대적으로 비용이 많이 드는 불연속적인 드롭렛을 만드는 용해 설비를 제작하기 위해 먼저 시뮬레이션을 통해 불연속적인 금속 용탕의 드롭렛을 형성할 수 있는 노즐 조건을 확보하고자 하였다.

Zhong 등[6]은 전자제품, 히트 파이프 등에 사용될 수 있는 구리 드롭렛(copper droplet) 생성을 목적으로 도가니 내 인가되는 가압조건을 60~120 kPa로 달리하

여 이에 따른 드롭렛 직경의 크기를 실험과 수치해석을 이용하여 성공적으로 예측하고 최종적으로 650~950 μm 크기의 구리 드롭렛을 제조하였다고 보고한 바 있다. Luo 등[7]은 전자패키징용 솔더볼에 사용될 수 있는 일정한 크기의 40 wt%-Sn/60 wt%-Pb 드롭렛 생성을 위해 노즐의 직경과 인가압력의 차이에 따른 수치해석의 모델링 방법론을 성공적으로 제시하고 약 400~800 μm 크기의 실측치를 얻어 수치해석과의 일치치를 보고한 바 있다. 또한 Davidson 등[8]은 잉크젯프린팅, 바이오산업 등에 사용될 수 있는 전단변형(shear-thinning)에 의한 액체 드롭렛 형성에 대해 노즐 내부 사이즈 및 입구 내 경계조건을 달리하여 그 크기를 성공적으로 예측한 바 있다.

본 연구에서는 유가금속을 정련하는 전처리 공정으로 손쉽게 표면적을 늘리기 위해 기존 멜트스피닝 방법을 변형하여 주석(Sn)과 황동(brass, 70 wt%-Cu/30 wt%-Zn)에 대해 용탕의 노즐부에서 불연속적으로 용액이 낙하하도록 노즐부 시뮬레이션을 통하여 설계하고, 낙하하는 용융방울이 하부 냉각수가 흐르는 평면 경사판에 충돌하여 퍼짐에 따라 표면적이 극대화된 형태로 응고되고, 이후 자동으로 경사면 하부에 쌓여 효과적으로 표면적이 증가된 금속체를 만드는 공정의 가능성을 확인하고자 하였다.

주석의 경우 저융점의 순금속재로 실험이 용이한 장점이 있으며, 황동의 경우 Cu계 모합금 제작용으로 용융치가 높고 실제 금합금을 회수할 때 가장 많이 포함되어 있는 금속재로서 실제 금합금의 정련 전처리 공정에서 물성치를 대변할 수 있으므로 채택하였다.

2. 실험방법

Fig. 1에는 용탕을 확보하기 위해 사용된 흑연 도가니의 모식도를 나타내었다. 직경, 높이, 두께는 각각 145×100×17 mm로써, 금의 경우 최대 8 kg을 녹일 수 있는 용량을 고려하였다. 하부에는 용탕이 흘러 낙하할 수 있도록 노즐을 탑재하여 설계하였다. 노즐부의 경우 자체 중량에 의해 도가니 내 용탕이 모두 배출될 수 있도록 직경이 좁아지는 상부 5 mm, 하부 최종 노즐부에 대해 각각 117°의 각도의 역원뿔형의 형상부를 가지고 있다.

이러한 흑연 도가니를 대상으로 액상 용탕으로부터 2차원의 디스크 형태의 표면적이 증가된 형상을 구현하기

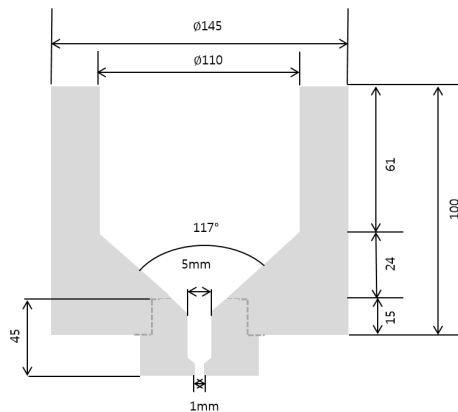


Fig. 1. Illustration of graphite crucible

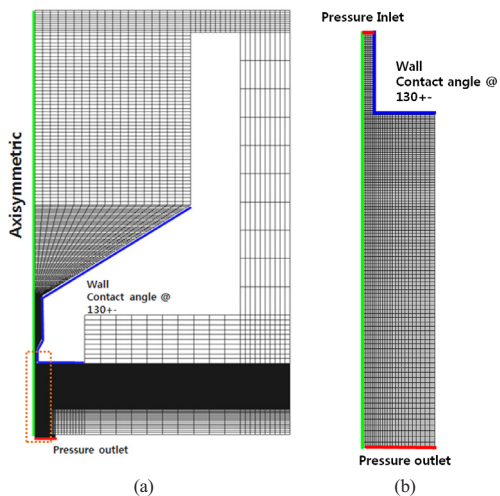


Fig. 2. Mesh and boundary condition of (a) simulation for prior analysis, and (b) main analysis section from dot box part of (a)

위해 불연속의 드롭렛 형태로 낙하시킬 수 있는 최종 노즐 직경의 결정이 필요함에 따라 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 위해 Fig. 2와 같은 중심부를 반으로 나눈 매쉬 요소를 고려하였으며, 이때 홀의 사이즈는 각각 0.5, 1.0, 2.0 mm로 변화시킨 3가지 조건으로 진행하였다.

수치해석의 solver로써 엔지니어링 시뮬레이션 소프트웨어(CD-adapco사, star-CCM + 10.02.12ver.모델)를 사용하였으며, 도가니의 유체 영역을 모델링 후 경계조건 및 초기조건 등을 입력하였다. 격자는 2개의 상 사이의 경계(interface) 구현을 위해 의존성 테스트를 거쳐 27,500개의 격자를 사용하였으며, 5.0E-6의 시간간격을

두었다. 최종적으로 총 200 ms까지 해석을 진행하여 불연속 드롭렛의 형태로 배출되는 홀의 사이즈를 확인하였다.

본 연구에서 사용한 비정상상태의 유체에 관한 연속 방정식과 운동량보존방정식은 각각 식(1), 식(2)와 같다. 원통형 좌표계에서 $\vec{V} = (u_r, u_\theta, u_z)$ 는 속도벡터, $\nabla \vec{p}$ 는 압력, μ 는 동점성계수, ρ 는 밀도, $\vec{g}$ 는 중력가속도를 나타낸다. 공기의 밀도와 동점성 계수는 상온(20℃)에서의 물성치를 사용하였으며, 용융금속에 대한 물성치는 Table 1과 같다.[9]

$$\text{Continuity: } \text{div } \vec{V} = 0 \quad (1)$$

$$\text{momentum: } \rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla \vec{p} + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

Table 1. Properties of molten tin and brass for simulation

input properties	Tin	Brass
melting point(℃)	231.9	915
density(kg/m ³)	6978	7540.7
dynamic viscosity(Pa-s)	0.00186	0.00341
surface tension(N/m)	0.55	1.181
contact angle w/ graphite(deg)	132	139.1

이상유동 계산을 위하여 VOF(volume of fluid) 방법을 이용하였다.[10] 대류항의 경우 2차 upwind scheme, 압력항은 SIMPLE(semi-implicit method for pressure linked equations) 알고리즘을 이용하여 처리하였다.

수치해석은 선행해석과 본 해석의 2가지 단계로 진행하였다. 모든 해석은 원통형상을 갖기 때문에 2D axis-symmetric 조건으로 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 두 단계의 해석의 조건 및 격자를 나타낸 그림이다. (a)는 선행해석의 경계조건 및 격자를 나타낸 것으로, 도가니의 형상을 제외한 나머지 영역에 대하여 정렬사각격자로 구성하였다. 도가니 벽면에는 no-slip 벽조건을 적용하였으며, 노즐부와 용융금속간의 접촉각(contact angle)에 대해서는 벽면에서 일정한 값을 갖는 static contact angle method로 가정하였다.[11] 도가니와 용융금속 사이의 접촉각은 Eustathopoulos 등[12]의 보고를 참고하였다. 하부엔 pressure outlet 조건을 주었고, 전체 해석영역의 초기조건으로 도가니 내부에는 용융금

속, 외부에는 공기가 존재한다고 가정하였다. 선행 해석은 도가니 외부까지 해석영역을 확장하여 중력에 의한 힘이 표면장력을 이기고, 노즐 끝단부를 통해 용융금속의 배출 여부를 확인하였다. 먼저 이론적으로 700 g의 용융금속이 있다는 가정하에 표면장력이 노즐 내부로 끌어당기는 힘($F = 2\pi r\gamma$)과, 용융금속이 작용하는 무게에 의한 힘의 차($F_h = (\rho_{liquid} - \rho_{air})gh$)를 통해 용융금속이 나올 수 있는지 여부에 대해 계산하였다. 이때의 계산은 2개의 힘만 고려하였고, dynamic effect(dynamic viscosity, dynamic contact angle)은 고려하지 않았다. 이후 선행해석으로 용융된 주석과 황동 2종류에 대해, 3개의 노즐 크기(0.5, 1.0, 2.0 mm)에 대해 진행하였다. 총 해석시간은 150 ms이며, 격자는 의존성을 거쳐 27,500개의 격자를 사용하였다. 시간간격(time step)은 courant number를 1보다 작게 하고자 5.0E-6 s로 선정하였으며, 중력(gravity)은 9.81 m/s²을 적용하였다.

(b)는 본 해석의 경계조건 및 격자를 나타낸 그림으로, (a)의 점선 박스 표시부에 해당하는 부분이다. 선행 해석과 같은 벽조건을 도가니에도 적용하였고, 입구와 출구엔 pressure inlet/outlet 조건을 적용하였다. 이때 드롭렛의 크기 및 무게가 크지 않기 때문에 일정한 입구의 압력 조건을 적용하였다.

선행해석을 통해 얻은 압력데이터를 바탕으로, 노즐을 통해 용융금속이 나오는 경우에 대해서, Luo 등[7]이 사용한 경계조건과 유사한 방식으로 드롭렛의 크기, 무게 등을 구하기 위한 본 해석을 진행하였다. 본 해석에 사용된 격자는 약 11,000개이며, 시간 간격은 선행해석과 동일한 값을 사용했다. 해석의 안정성과 신뢰성을 위하여 평형상태 도달 여부를 확인한 이후의 데이터를 수집하였다. 본 해석에 앞서서 드롭렛의 크기와 무게를 예측하기 위해 방울의 무게와 표면장력에 의한 힘이 평형이 되는 식(3)을 고려한 드롭렛의 무게를 나타내는 식(4)을 이용하여 이론적으로 계산하였다. 이 때 m 은 노즐 끝단에 방울진 드롭렛의 무게, g 는 중력가속도를 나타내며, 이는 드롭렛의 무게에 의한 힘을 의미한다. 우항의 $2\pi r$ 은 드롭렛의 표면적, γ 는 표면장력, α 는 도가니와 액체금속 사이의 접촉각을 나타낸다.

$$mg = 2\pi r\gamma \sin \alpha \quad (3)$$

$$m = \frac{2\pi r\gamma \sin \alpha}{g} \quad (4)$$

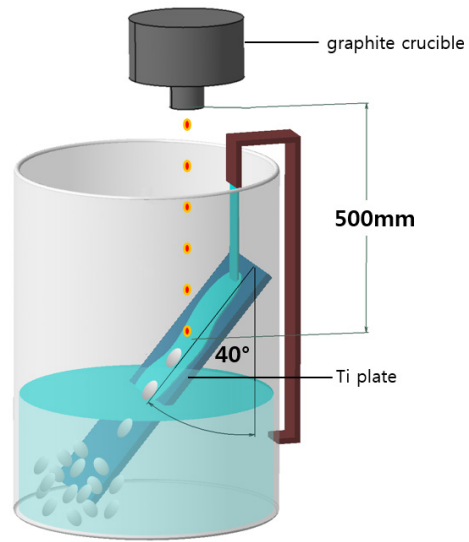


Fig. 3. Illustration of equipment for molten droplets and slide solidification plate

Fig. 3은 용탕 낙하실험을 위한 설비의 모식도를 나타내었다. 금속 드롭렛으로부터 티타늄 금속판에 충격시켜 비표면적이 향상된 금속체 제작을 위한 설비는 10 kg 이상의 구리를 기준으로 용접에서 상온까지 냉각시킬 때의 필요한 물의 양을 고려하여 최종적으로 직경, 높이가 각각 450×600 mm 크기로 제작하였다. 또한 노즐부와 냉각판의 거리가 500 mm가 되도록 배치하였다. 이때 냉각기 하부로부터 냉각수를 끌어와 상부에 분사시킬 수 있는 호스, 펌프 및 두 개의 드레인과 도가니를 고정시킬 수 있는 탈착형 지지대로 구성되어 있다. 이 때 금속용액의 드롭렛을 이용하여 비표면적이 증가된 금속체 제조를 위해 응고기 중앙부에 210×297×1 mm 크기의 티타늄으로 제작된 냉각판을 용탕과 40°로 기울여 고정시킨 후 이에 냉각수를 연속적으로 흘려주었다.

이후 노즐이 장착된 도가니 내에 각각 700 g의 주석과 황동을 투입하고, 이를 LPG-산소 토치를 이용하여 용해시킨 후 하부 냉각판재로 낙하시켜 금속체를 제조하였다. 이러한 용융작업으로부터 최종 응고체를 얻는 작업시간은 모두 10분 내에 가능하였다.

제조된 표면적 증가 금속체의 형상을 확인하기 위해 디지털 카메라(Samsung사, Galaxy A-800모델)를 이용하여 각 금속응고체의 이미지를 촬영하였다.

또한 응고된 금속체의 수직단면 두께를 확인하기 위해 에폭시를 이용하여 마운팅 후 #500~#4000까지 폴리

싱한 시료에 대해 광학현미경(Carl Zeiss사, Axio-A1 모델)을 이용하여 200 배율로 확대 후 관찰하였다. 이 때 임의의 7 포인트의 두께를 측정 후 최대, 최소값을 제외한 5 포인트의 평균값을 이용하여 각 금속체의 평균 두께를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 노즐부 홀의 사이즈에 따른 시뮬레이션 결과

Table 2에는 선행해석에 앞서 주석과 황동의 경우, 노즐크기가 변화하면서 용탕이 자중력에 의해 배출될 수 있는지에 대한 여부를 확인하기 위해 (hydrostatic pressure force)-(surface tension force)으로 이론적 계산을 진행한 결과를 나타냈다. 결과치가 음수인 경우 표면장력의 힘이 커 용탕이 노즐안에 머무름을 의미하고 양수는 배출되는 의미이다. 표에서 나타난 바와 같이 주석과 황동 모두 노즐이 1.0, 2.0 mm 조건에서만 배출되고 0.5 mm 노즐에서는 배출되지 않을 것이 예상되어 적어도 주석과 황동 모두 1.0 mm 이상의 노즐을 채택해야 함을 나타내고 있다.

Table 2. (hydrostatic pressure force)-(surface tension force)[mN] on each nozzle diameter for 700 g molten metal

nozzle diameter(mm)	Tin	Brass
0.5	-0.019 mN	-0.889 mN
1.0	1.619 mN	0.023 mN
2.0	9.996 mN	7.250 mN

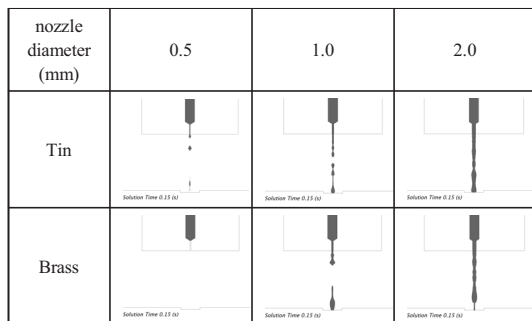


Fig. 4. Results of prior analysis for tin and brass

Fig. 4에는 선행해석의 결과를 시각화하여 노즐과 금속 별로 나타낸 것이다.

주석의 경우, 모든 직경의 노즐에서 용융금속이 배출되는 것을 확인하였다. 0.5 mm 노즐의 경우 Table 2의 결과와 달리 선행 해석에서는 유동성, 접촉각에 의한 변화 및 용융금속의 모멘텀에 의해 불연속 드롭렛 형태로 낙하할 것으로 보이고 있다. 이는 드롭렛의 dynamic viscosity, dynamic contact angle에 의한 영향이 이론적으로 수행한 계산에 적용되지 않아 발생한 것으로 판단된다. 반면 황동의 경우, 노즐의 지름이 0.5 mm일 때 표면장력의 힘이 크기 때문에 노즐 위로 용융금속이 올라오는 현상을 볼 수 있다. 따라서 선행해석을 통해 주석, 황동 모두 1.0 mm 직경의 노즐에서 드롭렛을 형성하여 배출될 가능성을 확인하였다.

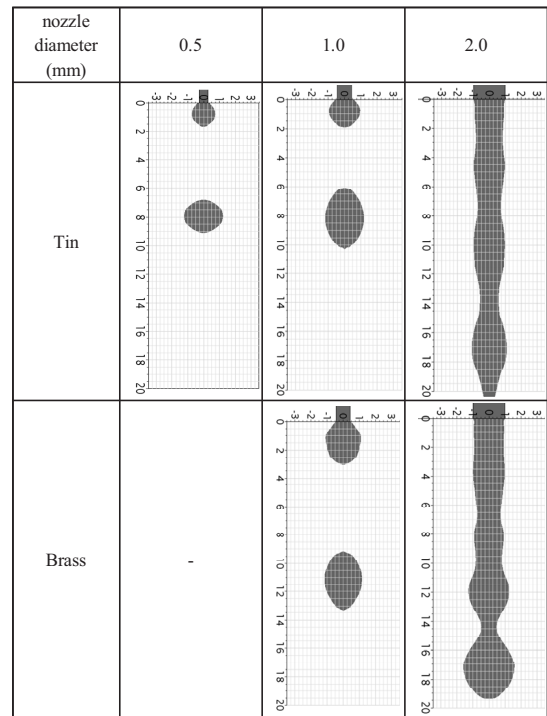


Fig. 5. Results of main analysis for tin and brass

Fig. 5에는 선행해석을 바탕으로 그 방울의 불연속성 및 크기 등을 파악하기 위해 진행한 본 해석결과를 나타내었다. 그림에 나타난 드롭렛의 크기를 통해 무게를 예상한 결과 주석의 경우 0.5, 1.0, 2.0 mm 노즐 직경에 따라 각각 0.055, 0.127 g, 연속용탕임을 보이고 황동인 경우에는 0, 0.207 g, 연속용탕임을 보이고 있다.

이러한 본 해석결과는 결국 주석과 황동에서 연속적인 드롭렛을 형성시키기 위한 적절한 노즐은 1.0 mm 직경을 의미하였으며, 이에 근거하여 실제 용융 도가니에는 1.0 mm 직경의 노즐을 탑재하였다.

3.2 노즐부 홀의 사이즈에 따른 시뮬레이션 결과

Fig. 6은 도가니로부터 실제 주석 용액이 낙하할 때의 매크로이미지이다. 주석의 경우 직경 1.0 mm의 홀로부터 약 3.8 mm의 드롭렛(무게 약 0.15 g)을 형성한 후 낙하되며, 이 때 드롭렛 간 0.343 sec의 격차를 두고 낙하하였다. 따라서 시뮬레이션에서 예측한 바와 같이 주석과 황동이 성공적으로 불연속한 드롭렛으로 낙하하는 것을 확인하였다.

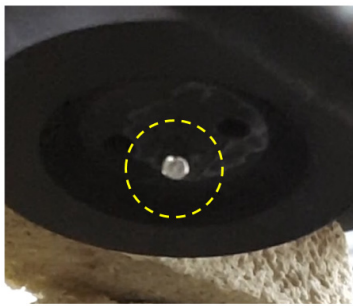


Fig. 6. Macro image of the molten Tin droplet from graphite crucible

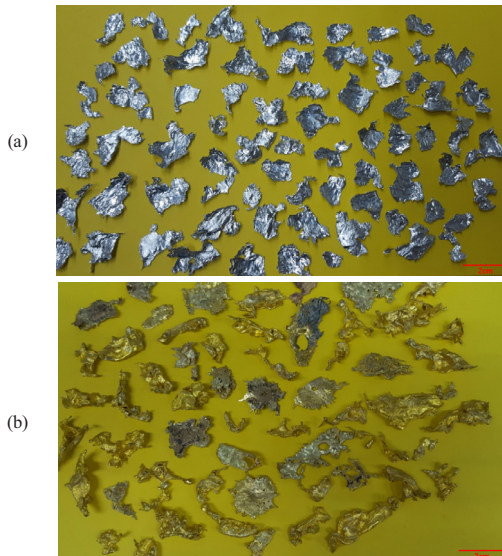


Fig. 7. Macro images of enlarged surface area samples (a) tin, and (b) brass

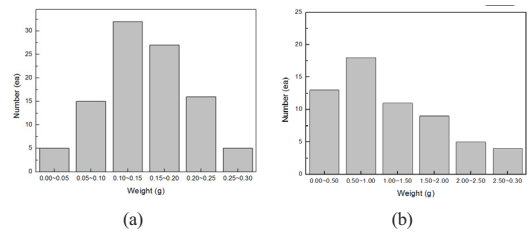


Fig. 8. Weight distribution for enlarged surface area samples (a) tin, and (b) brass

Fig. 7은 주석, 황동 용탕으로부터 낙하되어 티타늄 판재와 충돌한 표면적이 커진 상태로 응고한 평판 시료의 매크로 이미지를 나타낸 것이다.

(a)는 주석에 대한 매크로 이미지로, 불규칙한 디스크 형태로 표면적이 증가된 모습을 보이고 있다. (b)는 황동에 대한 매크로 이미지로 (a)와 마찬가지로 하부 티타늄 판재에 충돌하여 표면적이 증가된 모습을 띄고 있다. 황동의 경우는 주석보다 비교적 크기가 큰 것을 알 수 있는데, 이는 앞선 시뮬레이션에서의 예측과 마찬가지로 황동이 주석에 비해 1.6배 더 무겁게 형성됨에 따라 더 큰 표면적을 가진 디스크 형태로 형성된 것으로 판단되었다.

Fig. 8은 표면적이 증가된 시료에 대해 칭량 후 그 무게 분포를 나타낸 그래프이다. (a)의 주석의 경우 x축에 나타난 각 무게별 범위 기준으로 각각 5, 15, 32, 27, 16, 5개를 나타내었으며, 평균 약 0.15 g을 나타내었다. 이는 앞선 시뮬레이션 해석결과와 나타난 0.127 g의 무게와 비교하여 약 15 %의 오차범위를 가지는 것으로, 실제 시뮬레이션 해석 시 실제 실험에서 발생하는 많은 조건변수를 단순화시켰음에도 비교적 정확한 해석이 가능함을 의미하였다.

(b)의 황동의 경우 무게별로 각각 13, 18, 11, 9, 5, 4개를 나타내었으며, 이들의 평균 무게는 약 1.16 g을 나타내었다. 황동의 경우 시뮬레이션 해석값이 0.207 g으로 주석의 경우보다 더 큰 오차율을 보였는데, 이는 황동의 수치해석 시 정확한 합금 조건에 따른 실측값이 없어 선형 보간법을 이용하여 물질값을 이용하였고, 실제 노즐부의 접촉각 등을 정수로 고려하는 등의 입력치의 문제라고 판단되었다. 그러나 본 연구에서 채택한 시뮬레이션 시도가 적어도 적절한 노즐직경을 시행착오 없이 불연속적인 드롭렛으로 낙하시키는 조건을 예측할 수 있는 유용성을 가짐을 확인하였다.

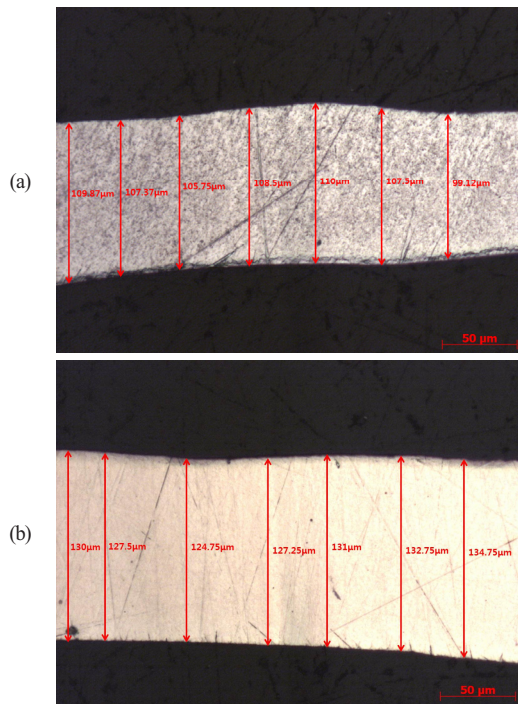


Fig. 9. Microscope images of cross section for enlarged surface area samples of (a) tin, and (b) brass

Fig. 9는 표면적이 증가된 주석, 황동 시료의 두께를 확인하기 위한 수직단면을 촬영한 광학현미경 이미지이다. 최소, 최대값을 제외한 나머지 5점의 평균 두께를 측정된 결과, 주석의 평균 두께는 $107.80\ \mu\text{m}$ 으로 나타내었으며, 황동의 경우 $129.15\ \mu\text{m}$ 임을 확인하였다.

평균 두께와 무게, 주석의 밀도를 통해 단순한 원형 디스크로 가정하고 표면적을 계산한 결과 단일 주석시료의 경우 약 $3.71\ \text{cm}^2$ 을 나타내었으며, 이는 단순한 드롭렛의 경우 약 $0.45\ \text{cm}^2$ 의 표면적을 갖는 것에 비해 약 8.2배로 표면적이 증가됨을 보였다.

한편 표면적의 증가된 황동의 경우 약 $23.98\ \text{cm}^2$ 를 나타내었으며, 이는 드롭렛 형태일 때 약 $1.36\ \text{cm}^2$ 의 표면적을 갖는 것에 비해 약 17.6배에 해당하는 표면적이 증가될 수 있음을 알 수 있었다.

이와 같이 본 연구에서 제안한 비교적 간단한 용탕 드롭렛을 경사 냉각판에 충돌시켜 표면적을 극단적으로 증가시킬 수 있으며, 이를 실제 유가금속의 습식 제련 시 반응 시간을 크게 단축시킬 수 있는 전처리 공정으로써의 응용 가능성을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 귀금속 습식회수공정 시의 공정시간, 단가를 줄이기 위한 전처리공정으로써 불연속적인 용탕 드롭렛을 만들고 경사진 냉각판에 충돌, 응고시켜 표면적을 늘리는 신공정을 제시하였다. 노즐의 사이즈에 따른 주석과 황동의 드롭렛 크기 예측을 위해 시뮬레이션을 통한 수치해석을 진행한 결과 $1.0\ \text{mm}$ 의 노즐에서 불연속적인 드롭렛이 형성되어 이 크기가 가장 적합함을 확인하였다. 직경 $1.0\ \text{mm}$ 의 홀을 가진 도가니를 채용한 표면적 증가 설비를 이용하여 경사진 냉각판에 충돌시켜 실험을 진행한 결과 주석, 황동 응고체에 대해 각각 평균 무게 $0.15, 1.16\ \text{g}$, 평균 두께 $107.80, 129.15\ \mu\text{m}$ 임을 확인하였다. 최종적으로 구형 드롭렛 대비 8.2, 17.6배 증가된 표면적을 얻었고, 이는 시뮬레이션 결과와 잘 일치하였다. 따라서 제안된 공정을 통해 신속하고 효율적인 습식 제련에 활용 가능한 용융 금속 드롭렛의 표면적 향상이 가능하였다.

References

- [1] R. Sari, S. Hammoudeh, U. Soytaş, "Dynamics of oil price, precious metal prices, and exchange rate", *Energy Economics*, Vol.32, No.2 pp. 351-362, 2010.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2009.08.010>
- [2] S. M. Shin, N. H. Kim, J. S. Sohn, D. H. Yang, Y. H. Kim, "Development of a metal recovery process from Li-ion battery wastes", *Hydrometallurgy*, Vol.79, No.3 pp. 172-181, 2005.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.06.004>
- [3] E. Tully, B. M. Lucey, "A power GARCH examination of the gold market", *Research in International Business and Finance*, Vol.21, No.2 pp. 316-325, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ribaf.2006.07.001>
- [4] P. P. Sheng, T. H. Etsell, "Recovery of gold from computer circuit board scrap using aqua regia", *Waste Management & Research*, Vol.25, No.4 pp. 380-383, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0734242X07076946>
- [5] X. Tang, G. Wang, Y. Zheng, Y. Zhang, K. Peng, L. Guo, S. Wang, M. Zeng, J. Dai, G. Wang, X. Zhou, "Ultra rapid fabrication of p-type Li-doped $\text{Mg}_2\text{Si}_{0.4}\text{Sn}_{0.6}$ Synthesized by unique melt spinning method", *Scripta Materialia*, Vol.115, No.1 pp. 52-56, 2016.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2015.12.031>
- [6] S. Zhong, L. Qi, J. Luo, H. S. Zuo, X. Hou, H. Li, "Effect of process parameters on copper droplet ejecting by pneumatic drop-on-demand technology", *Journal of materials processing technology*, Vol.214, No.12 pp. 3089-3097, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.012>

- [7] J. Luo, L. H. Qi, J. M. Zhou, X. H. Hou, H. J. Li, "Modeling and characterization of metal droplets generation by using a pneumatic drop-on-demand generator", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.212, No.3 pp. 718 - 726, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.04.014>
- [8] M. R. Davidson, J. J. C. White, "Numerical prediction of shear-thinning drop formation", *Third International conference on CFD in the Minerals and Process Industries*, pp. 10-12, 2013.
- [9] White F. M. *Viscous fluid flow*, p.59, McGraw-Hill Education, 1979.
- [10] C. W. Hirt, B. D. Nichols, "Volume of fluid(VOF) Method dynamic of free boundary", *Journal of Computational Physics*, Vol.39, pp. 201-205, 1981.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5)
- [11] J. U. Brackbill, D. Kothe, C. Zemach, "A continuum method for modeling of surface tension", *Journal of Computational Physics*, Vol.100, pp. 335-354, 1992.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991\(92\)90240-Y](http://dx.doi.org/10.1016/0021-9991(92)90240-Y)
- [12] N. Eustathopoulos, "Wetting by Liquid Metals-Application in Materials Processing : The Contribution of the Grenoble Group", *Metals*, Vol.5, No.1 pp. 350-370, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/met5010350>
- [13] E. Bourasseu, A. A. Homman, O. Durand, A. Ghoufi, P. Malfret, "Calculation of the surface tension of liquid copper from atomistic Monte Carlo simulations", *The european physical journal B*, Vol.86, pp. 251-258, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2013-40226-9>
- [14] S. Sharafat, N. Ghoniem, "Summary of Thermo-Physical Properties of Sn, And Compounds of Sn-H, Sn-O, Sn-C, Sn-Li, and Sn-Si And Comparison of Properties of Sn, Sn-Li, Li, and Pb-Li", *University of California UCLA-UCMEP-00-31*, pp. 1-51, 2000.

송 정 호(Jeongho Song)

[정회원]



- 2014년 8월 : 서울시립대학교 신소재공학과 (공학석사)
- 2014년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 박사과정

<관심분야>

금속재료, 주얼리소재, 세라믹재료

이 태 경(Tea-Kyeong Lee)

[정회원]



- 2015년 2월 : 서울시립대학교 기계정보공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 기계정보공학과 석사과정

<관심분야>

전산유체(CFD), 유동제어

리 광 훈(Gwang-Hoon Rhee)

[정회원]



- 1995년 2월 : 한국과학기술원 기계공학 (공학석사)
- 2000년 8월 : 한국과학기술원 기계공학 (공학박사)
- 2001년 2월 : 한국과학기술원 위촉연구원
- 2001년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 기계정보공학과 교수

<관심분야>

전산유체(CFD), 유동제어

송 오 성(Ohsung Song)

[종신회원]



- 1987년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 서울대학교 금속공학과 (공학석사)
- 1994년 5월 : MIT 재료공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 신소재공학과 교수

<관심분야>

금속재료, 주얼리소재, 유무기태양전지