(주조아카데미)

알루미늄 용탕 탈가스 처리에 대한 이해 및 공정 최적화 방안

김민수1)*

한국생산기술연구원 전북본부

1.서 론

알루미늄 주조에 있어 용탕 탈가스 처리는 매우 중요한 공 정이다. 알루미늄 용탕의 탈가스 처리가 제대로 수행되지 않은 경우 주물 내 기포 결함을 야기하게 되며, 특히 제품 두께가 얇거나 기밀성이 중요한 주물의 경우 이러한 기포 결함은 치 명적이다. 이러한 관점에서 최근 주목받고 있는 대형 박육 알 루미늄 차체 부품이나 내부 유로를 포함하고 있는 전기차 부 품용 알루미늄 하우징 주조에 있어, 충분한 알루미늄 용탕 탈 가스 조업이 필수적으로 요구되고 있다. 한편 대부분의 주조 현장에서는 그림 1 [1]과 같은 GBF (Gas Bubbling Filtration) 혹은 Rotary degassing 장비를 활용하여 알루미늄 용탕 탈가 스 처리를 수행하고 있다. 레들 단위로 용탕이 이송 및 공급 되는 주조 현장의 경우, 출탕된 용탕을 담은 레들 상부에 탈 가스 유닛이 설치된 후 임펠러 회전과 불활성 가스 주입을 통 해 탈가스 처리를 진행하게 되는데, 이때 탈가스 공정 효율이 낮아 탈가스 처리 시간이 길어지게 되면 용탕 열손실 증가에 따른 보온로 에너지 소모량 증가, 임펠러 등 탈가스 소모품의 수명 단축에 따른 잦은 유지보수 및 공정 비용 상승 등 여러 가지 문제점이 발생하게 된다. 본 고에서는 불활성 가스 주입 을 통한 알루미늄 용탕 탈가스 처리의 메커니즘을 설명하고,

그림 1. GBF 방식의 알루미늄 용탕 탈가스 장비 [1].

¹⁾E-mail: mskim85@kitech.re.kr

이를 바탕으로 GBF 방식의 알루미늄 용탕 탈가스 공정 효율 에 영향을 미치는 주요 인자, 그리고 GBF 방식의 탈가스 공 정 최적화 방안에 대해 기술하고자 한다.

2.본 론

2.1. 알루미늄 용탕 탈가스 처리 필요성 : 용탕 내 수소 함량 증가

일반적으로 탈가스 공정이라고 이야기하지만, 알루미늄 용탕 으로 용해되는 가스성 원소는 수소가 유일 [2]한 것으로 알려 져 있으므로, 엄밀히 이야기하면 알루미늄 용탕 탈가스 처리는 알루미늄 용탕으로 흡수 (absorption)된 수소 함량을 낮추기 위한 탈수소 공정이다. 알루미늄 용탕 내 수소 함량이 증가하 는 현상은 아래 반응식과 같이 대기 중 수분의 분해 반응 혹 은 수분과 알루미늄 용탕 간 반응을 통해 발생 [3]한다고 알 려져 있다.

 $\begin{array}{l} 2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2 \\ 2\underline{Al} + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 3H_2 \\ H_2 \rightarrow 2\underline{H} \end{array}$

알루미늄 용탕, 그리고 응고된 알루미늄 합금 내 수소가 얼 마나 용해될 수 있는지를 확인해보기 위해 열역학 계산 소프 트웨어인 FactSage[®]를 활용, 몇몇 알루미늄 주조합금의 수소 용해도를 계산하여 그림 2에 나타내었다. 각 합금의 융점 (수 소 용해도가 급격히 하락하는 온도)을 기준으로, 3종의 알루미 늄 합금 모두 액상의 수소 용해도와 고상의 수소 용해도 간 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 용탕이 장시간 대기와 반응하 여 용탕 내 수소 함량이 높아진 상태에서 탈가스 처리 과정 없이 응고가 진행되게 되면, 고상 합금 내 존재할 수 있는 최대 수소 함량을 초과하는 수소 성분은 기체 형태로 주물 내 석출되어 기포 결함을 발생시킬 수 있음을 의미한다. 한편 Si 함량이 7wt% 수준으로 첨가된 A356 합금의 경우, 순수 알루 미늄 대비 액상 상태의 수소 용해도가 낮아지는 것을 확인할



그림 2. 알루미늄 주조 합금의 수소 용해도.

수 있는데, 이는 액상 알루미늄 내에서 Si은 수소의 활동도 계수를 증가 [4] 시키기 때문이다. 한편 순 알루미늄 대비 Mg 함량이 5wt% 이상 함유된 Rheinfelden사의 Magsimal[®]-59 합금의 경우 오히려 액상 내 수소 용해도가 증가한 것을 확인할 수 있는데, Mg의 경우 액상 알루미늄 내에서 수소의 활동도계수를 감소 [4] 시키기 때문이다. 이러한 열역학적인 이유로 인해 3종의 알루미늄 합금 중 액상-고상 수소 용해도 차이가 가장 큰 합금 또한 Al-Mg계 합금인 Magsimal[®]-59 합금이 된다. 이렇게 알루미늄 합금 내 첨가원소의 종류 및 그 함량에 따라서 액상 및 고상 알루미늄 합금 내 수소 용해 도가 변하게 되므로, 액상 내 수소 용해도가 상대적으로 높은 알루미늄 합금의 경우 그렇지 않은 합금 대비 용탕 내 수소 함량이 쉽게 증가할 수 있다는 점을 고려하여 더욱 세심한 탈 가스 처리를 진행할 필요가 있다.

2.2. 불활성 가스 주입을 통한 알루미늄 용탕 탈가스 처 리 메커니즘

가장 대중적인 알루미늄 용탕 탈가스 처리 기법은 알루미 늄 용탕에 용해되지 않는 불활성 가스 (Ar 혹은 N₂)를 주입 하여 가스 버블을 형성시킨 후, 용탕 내 수소 성분을 가스 버블 내로 흡수시켜 제거하는 것이다. 이러한 불활성 가스 주 입을 통한 알루미늄 용탕 탈가스 반응은 그 단계별로 아래와 같이 정리 [5]할 수 있으며, 이를 그림으로 도식화하면 그림 3과 같다.

 용탕 내 분포되어 있던 수소 성분이 가스 버블 근처로 이동

② 가스 버블 근처 용탕 내 수소 성분이 용탕-가스 계면으로 이동



그림 3. 알루미늄 용탕 내 가스 버블에 의한 탈수소 반응 모식도.

③ 용탕-가스 계면에서 용탕 내 수소 성분이 가스 버블 내 수소 가스로 변하는 화학 반응

④ 용탕-가스 계면에서 생성된 수소 가스가 가스 버블 내부 로 이동

⑤ 유동 및 부력에 의해 수소 가스를 포함한 가스 버블의 용탕-대기 계면 혹은 용탕-내화재 계면으로 이동 및 수소 가 스 배출

여기서 ⑤번 단계는 용탕 내 수소 성분이 가스 버블로 이 미 제거된 후, 수소 가스를 포함한 가스 버블이 용탕으로부터 빠져나가는 과정이기 때문에, 용탕 내 용해된 수소가 제거되는 탈가스 메커니즘을 고찰함에 있어 우선 배제해도록 하자. ①번, ②번 그리고 ④번 단계는 흔히 물질전달 (mass transfer)라고 부르는 단계인데, ①번과 ④번 단계는 용해된 수소 혹은 수소 가스가 자연 대류 혹은 인가된 유동에 의해서 농도 (정확히는 활동도)가 높은 곳에서 낮은 곳으로 이동하는 단계이며, ②번 단계는 용탕 내 경계층 (Boundary layer)에 도달한 수소 성 분이 오직 확산에 의해 용탕-가스 계면으로 이동하는 단계이다. 실제 탈가스 환경은 임펠러에 의한 용탕 교반과 주입된 불활 성 가스에 의해 유동이 존재하는 상황이므로, ①번 및 ④번 단계보다 ②번 단계가 상대적으로 느리게 진행된다. 한편 ③번 단계는 순수한 수소 가스 생성 반응인데, 일반적으로 화학 반 응은 반응물 (용탕 내 수소성분)의 활동도가 높고 생성물 (가스 버블 내 수소 가스)의 활동도가 낮으면 매우 빠른 반응속도를 가진다. 결론적으로 불활성 가스에 의한 알루미늄 용탕 내 탈가 스 속도는 ②번 단계의 진행 속도에 의해 결정된다 [5].

위에서 설명한 탈가스 속도 관련하여 추가로 고려해야 할 점이 있는데, 그것은 상기 탈가스 단계는 가스 버블의 크기, 개수 및 분포는 고려하지 않았다는 점이다. 가스 버블의 크기 가 작아질수록 가스 유량 대비 반응 면적이 넓어지고, 낮은 부력으로 인해 알루미늄 용탕 내 머무는 시간이 증가하므로 탈가스 반응을 더 빠르게 그리고 더 효율적으로 진행시킬 수 있다. 가스 버블의 개수는 탈가스 반응 면적과 연관 있으며, 가스 버블이 용탕 내 균일하게 분포할수록 용탕 내 극소량 포



그림 4. 알루미늄 용탕 탈가스 거동에 대한 수모델 및 유 동 해석 연구 예시 [6].

함된 수소 성분이 주변의 가스 버블로 더욱 빠르게 이동할 수 있으므로, 가스 버블의 개수 및 분포도 매우 중요한 인자가 된다. 실제로 그림 4 [6]와 같이, 수모델 실험과 유동 해석을 통해 탈가스 조건에 따른 용탕 내 유동 및 가스 분포 예측 연구 [6]가 지금도 활발히 수행되고 있다.

2.3. 알루미늄 용탕 탈가스 공정 효율 향상에 대한 제언 알루미늄 용탕 탈가스를 수행하는 현장에서 실질적으로 필요 한 부분은 현 탈가스 조업 대비 탈가스 효율을 높일 수 있는 구체적인 방안일 것이다. 그리고 이러한 탈가스 공정 최적화의 바람직한 목표는 기존 공정 대비 동일하거나 혹은 단축된 시 간 동안 탈가스 처리를 수행하여도 더 낮은 용탕 내 수소 함 량 (혹은 DI 값)을 달성하는 것이다. 당장은 주물 내 기포성 결함 억제를 위해서 탈가스 처리를 더 오래하는 가장 간단한 해결책을 고려해 볼 수 있겠으나, 자칫하면 뚜렷한 효과를 보 지 못한 채 용탕 온도 손실이 늘어나거나 소모품 교체 주기만 단축시키는 부작용을 초래할 수 있다.

앞서 설명한 탈가스 메커니즘을 다시 한번 생각해보자, 단 위 반응의 관점에서는 용탕 경계면에서 용탕-가스 계면으로 수 소 성분이 이동하는 속도가 전체 탈가스 반응 속도를 지배한 다. 이때, 경계면의 두께는 용탕 내 유속에 의해 결정 [7]되므 로, 용탕 내 유속이 빠르면 위 물질 전달 속도도 빨라질 수 있다. 결국 단위 반응의 관점에서는 용탕 내 유동이 중요한 변수가 되며, 용탕 유동을 발생시키는 임펠러 형상, 임펠러 회 전속도, 가스 유량이 가장 쉽게 접근할 수 있는 공정 변수가 된다. 그리고 이러한 변수들은 가스 버블의 크기, 개수 및 분 포에도 영향을 미치므로 결국 위 3가지 변수가 알루미늄 용탕 탈가스 공정 최적화를 위한 핵심 변수라고 할 수 있다.

위 3가지 변수 중 현장에서 바로 테스트하기 쉬운 변수는 임펠러 회전속도와 가스 유량이다. 위 2개 변수를 달리한 조 건에서 탈가스 처리를 진행하면서 탈가스 시간에 따른 수소 함량 혹은 밀도 (감압 시편 밀도로부터 용탕내 수소 가스 농 도를 계산할 수 있다 [8]) 변화를 측정할 수 있다면 조건 별 탈가스 속도를 비교 분석할 수 있게 되므로, 현 탈가스 설비 조건에 맞는 최적 탈가스 조건을 도출해볼 수 있다. 알루미늄 용탕 탈가스 연구를 수행한 문헌 [9]으로부터 반응 속도론에 기반한 탈가스 속도 분석 기법 (탈가스 공정 모델링)을 참고



그림 5. 알루미늄 용탕 탈가스 공정 모델 식.

할 수 있는데, 실제 활용해야 하는 주요 식들을 정리하면 그 림 5와 같다. 용탕 내 초기 수소 농도 (C₀)는 측정할 수 있 는 값이며, 용탕 내 평형 수소 농도 (C^{eq})는 열역학 계산 혹 은 실험데이터 피팅을 통해 구할 수 있고, 가장 중요한 탈수 소 반응속도 상수 (K₂)와 용탕의 수소 흡수 반응속도 상수 (K₁) 또한 데이터 피팅을 통해 도출할 수 있으므로 앞서 언급 한 조건별 탈가스 실험데이터만 있다면, 그림 6 [9]과 같이 특정 탈가스 시간 (t)에서의 용탕 내 수소 농도 (C)를 높은 정확도로 예측할 수 있다. 여기서 탈수소 반응속도 상수 (K₂) 값이 클수록 탈가스 반응이 빠르게 일어난다는 의미이므로, K₂ 값이 큰 조건이 탈가스 효율이 높은 조건이 된다. 예를 들어 가스 유량을 5, 10, 15 L/min으로 변화시키면서 측정한 실험데이터를 활용하여 K₂ 값을 구해본 결과, 5 L/min 조건에 서의 K₂ 값, 10 L/min 조건에서의 K₂ 값, 15 L/min 조건에서



그림 6. 알루미늄 용탕 탈가스 공정 모델 적용 예시 [9].

의 K₂ 값 순으로 탈수소 반응속도 상수가 유의미하게 증가한 다면 가스 유량은 탈가스 시간을 단축시킬 수 있는 중요 인자 로 볼 수 있다. 반대로 가스 유량을 증가시켜도 K₂ 값이 유 의미하게 증가하지 않는다면, 현재 탈가스 조업 환경에서는 가 스 유량이 탈가스 효율에 영향을 미치지 않는다는 의미이므로 단순히 가스 유량만 증가시켜서는 탈가스 효율 향상을 기대할 수 없다. 이러한 속도론적 분석 기법은 최소한의 현장 실험만 으로도 최적의 공정 조건을 찾을 수 있다는 장점이 있으며, 특히 용탕 내 초기 수소 농도가 실험 조건 별로 달라 탈가스 속도를 단순 비교하기 어려운 경우 더욱 유용하다.

알루미늄 용탕 탈가스 중 유동 현상과 가스 버블 거동은 레들 내부 형상, 임펠러와 레들 크기 비율, 배플의 유무 등에 영향을 받으므로, 엄밀히 따지게 되면 탈가스 공정 변수는 상 당히 많다. 그림 7 [10]과 같이, 부자재 관련 해외 선진사에 서는 이러한 설비 변수를 포함한 다양한 공정 변수를 최대한 고려하여 탈가스 속도를 예측하고, 이를 기반으로 탈가스 공정 을 제어하는 기술을 이미 상용화한 상태 [10]이다. 물론 이러 한 탈가스 모델링 기반 공정 제어 기술은 모델링된 특정 시스 템, 즉 선진사에서 제공하는 자사 제품 (레들, 임펠러 등)에 한해 그 성능이 보장되어 있다는 점을 감안해야 한다. 즉, 타 사 탈가스 설비가 이미 구축된 현장에서 상기 기술을 도입하 고자 하는 경우 기구축 설비 교체가 불가피한 상황이 발생할 수 있으므로, 전반적인 도입 비용 대비 효용성을 먼저 검토해 볼 필요가 있겠다.

3.결 론

알루미늄 용탕 탈가스 공정은 용탕 내로 유입된 수소 성분 을 제거하는 정련 공정이며, 이를 충분히 진행하지 않은 경우



SMARTT Scheme

그림 7. 탈가스 거동 예측 기반의 공정 제어 시스템 구성도 [10].

주물 내 기포성 결함을 야기할 수 있으므로 박육 대형 부품 및 복잡 형상 주물 주조에 있어 매우 중요한 공정이다. 불활 성 가스 주입을 통한 알루미늄 용당 탈가스 메커니즘과 탈가 스 공정 중 용당 유동 및 가스 버블 거동을 고려해 보았을 때, 용당 내 수소의 물질 전달을 촉진할 수 있는 용당 교반 과 충분한 가스 버블 개수, 그리고 용당 내 고른 가스 버블 분포를 통해 탈가스 속도를 향상시킬 수 있다. 이러한 탈가스 공정 최적화를 위해서 가장 간단하게는 현장 실험데이터와 속 도론에 기반한 탈가스 모델식을 활용하여 핵심 공정 변수를 직접 찾아서 최적화할 수 있다. 또한, 조업 상황에 따라 탈가 스 효율을 예측하고 실시간으로 공정 제어를 수행하는 토탈 솔루션 개념의 탈가스 기술도 상용화되어 있으므로 투입 비용 대비 기대효과를 고려하여 다양한 방법으로 탈가스 공정 최적 화를 시도해볼 수 있다.

참고문헌

 Vesuvius (2019) FDU Foundry Degassing Unit [Brochure]. https://www.vesuvius.com/content/dam/vesuvius/corporate/ Our-solutions/our-solutions-master-english/foundry/nonferrous-foundry/melt-treatment/brochures/FDUe.pdf.downloadasset.pdf

- [2] Davis, J. R., "ASM Specialty Handbook: Aluminum and Aluminum Alloys", ASM International, OH (1993) 148.
- [3] Tiryakioğlu, M., Metals, **10** (2020) 368.
- [4] Baukloh, W. and Oesterleu, F., Z. Metallkunde, 30 (1938) 386
- [5] Sigworth, G. K. and Engh, T. A., Metall. Trans. B, 13 (1982) 447.
- [6] Kuglin, K., Szucki, M., Pieprzyca, J., Genthe, S., Merder, T. and Kalisz, D., materials 15 (2022) 5273.
- [7] Munson, B. R., Young, D. F. and Okiishi, T. H. "Fundamentals of Fluid Mechanics 4th ed.", John Wiley & Sons, Inc., NY (2002) 551.
- [8] Shin, S. R., Lee, Z. H., Cho, G. S. and Lee, K. W., J. Mater. Sci., 39 (2005) 1563.
- [9] Warke, V. S., Shankar, S. and Makhlouf, M. M., J. Mat. Proc. Technol., 168 (2005) 119.
- [10] Vesuvius (2019) SMARTT [Brochure]. https://www.vesuvius. com/content/dam/vesuvius/corporate/Our-solutions/oursolutions-master-english/foundry/non-ferrous-foundry/melttreatment/SMARTT/SMARTT_brochure_en.pdf.downloadas set.pdf