

임펠러攪拌에 의한 輕量金屬 스크랩 鎔解爐에서의 혼합 및 脫 가스 舉動

韓晶煥 · 李周翰* · 金碩範* · 卞智永** · 沈載東**

인하대학교 공과대학 금속공학과, *경기대학교 공과대학 재료공학과,
**한국과학기술원 금속연구부

Mixing and Gas Removal Behavior in Scrap Remelt of Light Metal by Impeller Agitation

Jeong Whan Han, Joo Han Lee*, Seuk Buom Kim*,
Ji Young Byun** and Jae Dong Shim**

Department of Metallurgical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea,

**Department of Materials Science and Engineering, Kyonggi University, Suwon 442-760, Korea*

***Division of Metals, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea*

요 약

알루미늄이나 마그네슘과 같은 경량금속은 스크랩 용해과정에서 수분과의 반응으로 수소농도가 증가하게 되며, 재활용을 위해서는 추가적인 합금성분의 첨가 및 탈 수소 공정이 필요하다. 본 연구에서는 경량금속 스크랩 용해공정에 사용되는 정련로에 대하여 배플의 유무 및 임펠러를 사용한 기계적 교반이 탈 가스 거동에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 수 모델 실험을 통해 유동현상의 관찰, 균일 혼합시간 및 탈 가스 속도를 측정하였고, 반응용기 내 난류 유동장에 대한 수치해석을 통해 기계적 교반을 실시하는 정련로에 대한 혼합 및 탈가스 거동을 정량화 하였다.

주제어: 경량금속, 재활용, 탈 가스, 수모델, 기계적 교반, 유동, 수치해석

ABSTRACT

Hydrogen in atmosphere can easily dissolve in melt of light metal alloys. Increasing demand for recycling of light metal alloys has, therefore, focused attention on the removal of hydrogen gas, and alloy addition in melt has become an important refining process. For this purpose, behaviors of mixing and hydrogen degassing in impeller agitated refining vessel with/without baffles were investigated. Flow patterns, mixing time behavior and kinetics of degassing in various agitating conditions were analysed in water model experiments. And, numerical analysis on turbulent flow pattern in impeller agitated vessels was performed.

Key words: Light metal, recycling, degassing, water model, impeller agitation, fluid flow, numerical analysis.

1. 서 론

알루미늄이나 마그네슘 등과 같은 경량금속합금의 경우, 우수한 비강도, 주조성 및 기계가공성 등의 장점으로 그 수

요가 급격히 증가하고 있다. 대부분 다이캐스팅법으로 제조되는 마그네슘 합금은 자동차 및 항공기, 카메라 등의 부품으로 사용되는데, 통상 40% 정도의 건전 스크랩이 공정특성상 발생되는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 마그네슘 스크랩은 단순 제철에 과정에서 표면에 부착된 수분이나 대기 중의 수분과의 반응으로 용탕 내 수소농도가 증가하기 때문에 별

*1998년 6월 10일 접수, 7월 27일 수리

*E-mail: jwhan@dragon.inha.ac.kr

도의 장치를 이용하여 탈가스 및 합금성분의 첨가등 재용해/정련 공정을 거친 후, 사용되어야 한다.²⁾ 정련공정으로는 임펠러에 의한 기계적인 교반 및 가스교반을 혼합한 상용화된 ALPur 공정이 알루미늄에 적용되고 있다.³⁾ 이 공정은 불활성가스 취입에 관점을 둔 공정으로 정련로의 주된 형태 변화인 배플의 설치는 고려하지 않았다.

일반적인 금속의 정련 및 재활용 처리의 공정상, 정련로의 형태가 탈 가스 및 난류혼합거동이 관련된 물질이동에 미치는 영향에 대한 정량적인 이해는 중요하다. 난류혼합특성으로는 교반조건에 대한 정량적인 파라미터로서 균일혼합시간이 사용되며, 이것이 주된 물질이동의 근본이 된다. 일반적으로 정련로 내에서는 금속을 용접이상에서 처리하는 특성으로 용융 금속 내의 화학반응속도는 충분히 빠른 속도로 일어난다고 볼 수 있기 때문에, 탈 가스 거동 측면에서 탈 가스 영역으로의 물질이동이 율속단계가 될 수 있다.⁴⁾ 따라서 합금성분의 첨가 및 탈 가스 과정의 이해를 위해 가스취입 및 기계적 교반의 경우, 용융 금속 내에서의 난류혼합거동과 불활성 가스 취입시 가스버블 또는 자유표면으로의 물질이동을 정량화 하는 것이 중요하게 된다.

본 연구에서는 합금성분의 첨가와 불활성 가스취입 등에 의한 탈가스거동을 조사하기 위해 단계적인 방법으로, 물질이동이 관련된 난류혼합거동과 이에 영향을 미치는 정련로의 특성을 이해하기 위해, 기계적인 교반효과만 실시하는 경우를 우선 검토해 보고자 한다.

이 경우, 정련로 내에서의 물질이동에는 난류에디 및 대류에 의한 혼합거동과 자유표면근처 경계층에서의 가스확산이 관련된다. 따라서 스크랩 재처리용 정련로를 대상으로 배플이 설치유무가 임펠러 교반에 의한 난류혼합거동과 함께 가스제 불순물의 탈가스 거동에 미치는 영향을 정량적으로 이해하기 위해 수모델 실험 및 수치해석을 실시하였다.

2. 이론적 배경

기계적 교반에 의한 탈가스 처리시, 용탕내 물질이동 경로는 대류/확산과 용탕측 경계층을 통한 물질전달이 순차적으로 일어난다고 볼 수 있다. 이 경우, Fig. 1과 같이 용탕 내에서의 난류에디 및 대류에 의해 수소원자가 용탕 자유표면 기/액 계면의 액상측 경계층으로 이동 후, 경계층 내에서 확산에 의해 자유표면으로 이동하여 수소분자로 합체되어 탈 수소되는 과정을 거치게 된다.²⁾

기/액 이상계면에서의 이동현상은 계면특성상 정련시 불순원소의 이동은 난류에디나, 대류에 의한 것이 아니라, 계

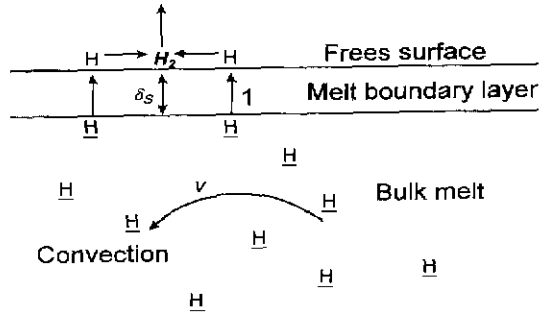


Fig. 1. Schematic route of gas removal in mechanically agitated melt.

면과 평행한 방향으로 존재하는 계면부근의 경계층 내에서의 확산기구로 설명할 수 있다. 용융금속 내의 용존 수소가 균일 혼합조건이라면, 자유표면에 존재하는 용탕측 경계층에서의 확산속도가 탈가스 속도를 지배하게 되며, Pehlke⁵⁾ 등은 다음의 식으로서 탈가스 속도를 나타내고 있다.⁶⁾

$$C_H = C_H^0 e^{-\frac{D_1 A_s t}{V_m}} \quad (1)$$

여기서 A_s 는 용융금속 표면적, δ 는 액상 경계층의 두께, 그리고 D_1 및 V_m 은 각각 액상의 표면적 및 부피이다. 그러나 액상 경계층 두께는 측정 또는 이론적으로 계산하기가 용이하지 않으며, 따라서 정확한 탈 가스량을 예측하는 것은 쉽지 않다. 다만, 균일 혼합조건하에서 실험적으로 물질이동계수 $k(=D_1/\delta)$ 의 측정을 통해 어느 정도 추정이 가능하다. Pehlke⁵⁾ 등은 정지상태의 알루미늄 용탕에서 단순히 자유표면으로부터의 탈수소속도로서 물질이동계수 k 를 측정 한 결과, 0.0016 cm/sec를 제시하였다. 반면, Mikuchi⁶⁾ 등은 AZ91 마그네슘 합금용해시 배플이 존재하지 않는 불활 성분위기의 정련로에서 rotor를 이용한 1800 rpm 이상의 강력한 기계적 교반조건 하에서 탈 수소에 따른 물질이동 계수를 실험적으로 측정 한 결과, 0.005 cm/sec의 값을 제시 하였다.

그러나 정련로의 배플이 이러한 값들에 미치는 변화에 대한 정량적인 해석이 필요하다.

3. 실험방법

고온의 용융금속에서 유동현상을 직접적으로 관찰하거나, 측정하기는 어려우며, 이를 위해 다루기 쉬운 수모델 실험을 통한 접근이 필요하다. 수 모델 실험에서는 Fig. 2(a)와 같이 고온 모델에 사용된 크기의 마그네슘 스크랩 정련

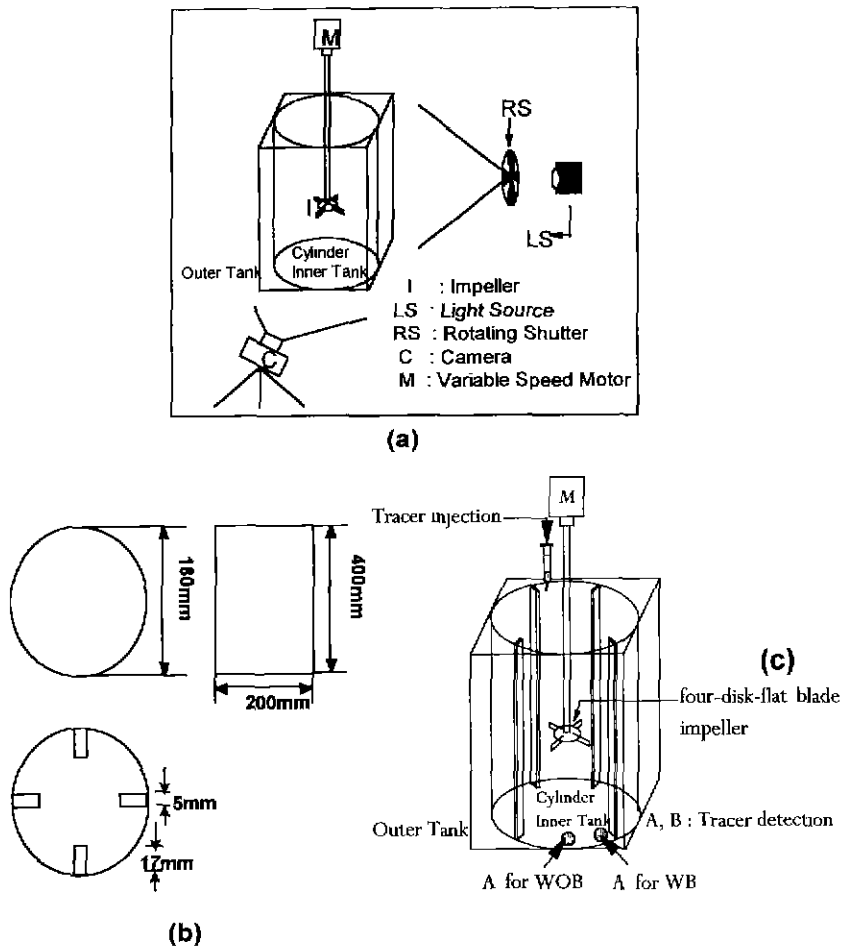


Fig. 2. Schematic diagram of water model experiment.

를 대상으로 하였다. 하나는 배플(baffle)이 없는 원통형 수조로서 크기가 내경 180 mm, 높이 400 mm의 투명아크릴로 제작하여 사용하였다. 또 다른 하나는 배플을 가진 원통형 수조이며 크기는 배플이 없는 수조와 동일하고, 너비 17 mm의 아크릴판을 수조 내부 측벽에 설치하였다. 기계적 교반을 위해서는 난류혼합특성이 양호하다고 알려진 four disk-flat blade 임펠러를 사용하였다.⁷⁾ 임펠러는 용기 높이의 1/4에 위치하도록 하였다.

표면유동현상 관찰을 위해 임펠러 회전속도를 달리하여 표면의 vortex 현상을 관찰하였다. 또한, 내부 유동현상 관찰을 위해, 트레이서로서 비중 1.04정도의 물과 비중이 비슷한 polystyrene을 사용하였다. 유체의 속도는 Fig. 2(b)와 같이 알고자하는 용기 내의 2차원 면을 2차원 슬릿을 가진 광원으로 일정 주기로 비추게 되면, 사진상 트레이서는 광

원의 회전주기에 따라 점의 열로써 나타나며, 각 점에서의 순간 이동거리로 부터 면상의 2차원적인 유체속도를 측정할 수 있다.⁸⁾

균일혼합시간의 측정은 임펠러 교반 시, 합금성분의 첨가 등 적정 조건을 추정하는데 중요하게 작용한다. 본 실험에서는 균일혼합시간을 pH의 변화로 측정하였으며, pH 변화를 측정하기 위해 트레이서로서 NaOH 수용액[4N]을 용기 내에 6 ml를 주입하여 교반조건에 따라 균일하게 혼합되는 시간을 측정하였다. 균일혼합시간은 완전한 균일혼합이 되었다고 가정된 농도를 기준으로 $\pm 2\%$ 의 편차영역내에 들어오게 되는 시간을 균일혼합시간으로 가정하였다. 트레이서 첨가방법에 따라 혼합시간은 크게 영향을 받으므로 일정 위치에 고정하여 동일한 방법으로 첨가하였는데, 회전유동 성분이 강하여 가장 트레이서 분산이 빠를 것으로 추정

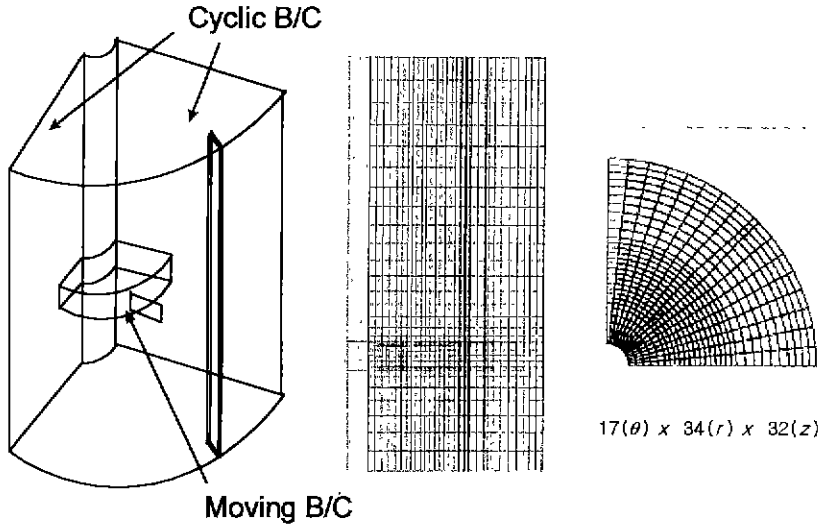


Fig. 3. Computational domain and mesh generations.

되는 벽측 상부에 투입하였다. 측정 위치는 측정의 정확성을 위해 용기내 위치상 서로 가장 멀리 떨어진 대각선상에 위치하게 하였으며, Fig. 2(c)에 보듯이, 배플이 없는 용기에서는 내부 유동이 가장 느린 반응용기의 하단 벽측 코너부분에 설치하였고, 배플이 있는 경우, 배플 측벽 구석에 설치하여 pH의 변화를 측정하였다.

탈가스 과정을 모사하기 위해 물/산소 시스템을 사용하여 교반조건에 따른 용존산소의 변화를 측정하는 탈가스 실험을 실시하였다. 이를 위해 원통형 수조에 산소를 강제 포화시킨 후, 임펠러 회전속도를 달리하여 시간에 따른 용존산소농도를 용존산소측정기(D/O meter, ISTEK社)를 사용하여 측정하였다. 용존산소 측정위치는 pH측정 위치와 동일한 하단 벽측 코너부분에 설치하였으며, pH 센서의 반대 위치에 두었다.

4. 수치해석

유체는 거시적으로 볼 때, 연속 방정식, 운동량 전달 방정식, 에너지 방정식의 지배를 받으며 거동을 하게 된다. 용탕을 비압축성 유체로 가정하고, 정상상태를 고려할 경우, 지배 방정식을 텐서형으로 표현하면 다음과 같다.⁹⁾

연속 방정식 :

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k) = 0 \tag{2}$$

운동량 전달 방정식 :

$$\rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\mu \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_j} \right) \right] + F_j \tag{3}$$

ρ 는 유체의 밀도, μ 는 유체의 점성, F_j 는 유체에 작용하는 체력(body force)으로서 일반적으로 중력(ρg)이 이에 해당한다 또한 유동의 지배 방정식에서 점성 계수를 층류점도 μ 와 난류점도 μ_t 의 합인 유효 점도 $\mu_{eff}(\mu + \mu_t)$ 로 대체하고, 난류 점도를 구하기 위해 k- ϵ 난류 방정식을 지배방정식과 병행해서 계산함으로써 난류가 유동에 미치는 영향을 고려할 수 있다.¹⁰⁾

본 연구에서는 용기의 형태가 외관상 간단한 실린더형이나, 내부에 사용되는 교반장치인 임펠러가 복잡한 형상을 가지고 있기 때문에 불규칙적인 경계를 해석할 수 있는 경계밀착좌표계(BFC: Body-fitted coordinate system)를 사용한 유한차분법으로 해석하였다. 유체의 유동을 모사하는 수치해석을 위해 Fig. 3과 같은 원통형 수조의 1/4를 대칭성의 계산영역으로 택하였다. 임펠러회전을 해석하기 위해 임펠러는 이동경계조건을 1/4 대칭면은 순환 경계조건을 사용하였다.¹⁰⁾ 사용된 그리드수는 예비 계산결과로부터 17(axial)×34(radial)×32(tangential)로 결정하였다.

특히, 임펠러 교반에 따라 정련로의 자유표면에 나타나는 vortex는 대기 중 수분이 용탕내로 혼입 가능성이 있으나, 본 연구에서는 자유표면형상의 변화를 고려하지 않았고, 또한 감압 또는 불활성분위기와 같이 대기 중의 가스성분이 제혼입되지 않고, 용탕표면의 슬래그 층을 무시한다는 가정

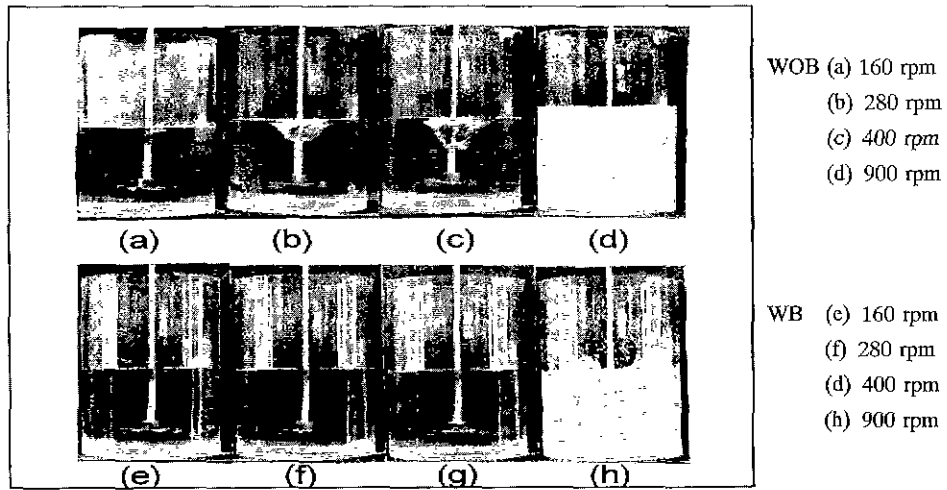


Fig. 4. Free surface shape change with agitating conditions in un baffled (a)-(d), and baffled vessels (e)-(h).

을 하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1. 유동현상 관찰

Fig. 4 에서 (a)-(d)는 배플이 설치되지 않은, (e)-(h)는 배플이 설치된 경우, 임펠러 교반속도를 증가시키면서 용기 내 자유표면에서의 vortex 발달과정을 비교한 것이다. 배플이 없는 경우, 160 rpm, (a)부터 자유표면의 회전유동에 의한 와류에 의해 vortex의 형성이 미미하게 시작하다가, 280 rpm, (b)부터 vortex의 크기가 증가하여 교반속도가 400 rpm, (c)일 때 더욱 큰 vortex를 형성하게 된다. 임펠러 교반

속도가 900 rpm, (d)에 근접하면 강한 vortex가 임펠러의 아래부분까지 발달하게 되고, 이때의 유동은 매우 불규칙하고 작은 기포들의 혼입이 나타나기 시작한다. 표면 vortex 형성에 의하여 수 모델에서 비압축성 유체인 물의 높이가 증가하게 된다.

반면에 배플이 있는 경우, 외관상 400 rpm, (g)까지도 유동형상의 변화가 거의 나타나지 않았다. 그러나 교반속도가 매우 빠른 900 rpm, (h)에서 자유표면에서의 vortex는 발달되지는 않았으나, 매우 불규칙한 표면유동현상 및 액적의 비산이 관찰되어지는데, 이 경우 실제의 교반조건에 적용하면 마그네슘의 경우, 높은 비산성으로 인하여 화제의 위험

Table 1. Measured velocities of tracer in un baffled and baffled vessel

Impeller Position	WOB (160 rpm)						WB (280 rpm)					
	1/4		2/4		3/4		1/4		2/4		3/4	
Light Posi. D(radius ratio)	2/4	3/4	1/4	3/4	1/4	2/4	2/4	3/4	1/4	3/4	1/4	2/4
1/3	-	-	22.1 20 19.3 18.6 16.85	17.73	17.7 16.4 15.51	19.95 18.6 16.85	-	17.5 14.5 13.7	21.45 15.32	-	15.04 14.4	19.74 15.04 12.22
2/3	-	-	15.5 13.8 13.3	14.19 14.18 13.74	10.64 10.64	13.7	12.8	-	14.3 (18.4)	-	14.1	14.57
3/3	12.24	-	11.5 10.2	11.08	-	10.2	-	12.8 (17.5)	-	-	-	-

* velocity : cm/sec

* () means velocity near baffle.

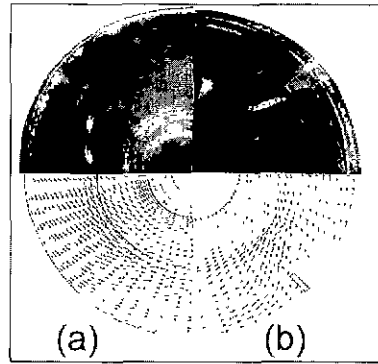
이 있다.

따라서 임펠러 교반에 의한 원통형 반응용기에서 배플의 설치는 특히 자유표면에서의 회전유동이 강하게 나타나는 와류의 형성을 저지하는데 중요한 역할을 하게 되며, 이것이 균일혼합 및 탈가스 거동에 미치는 영향을 검토할 필요가 있다.

5.2. 유동장 해석

Table 1에 임펠러 교반위치와 측정부위에 따른 유동속도 측정치를 보였으며, 이를 토대로 Fig. 5에 원통형 수조에서 측정된 트레이서의 거동과 그 때 계산된 유동장을 비교한 그림을 나타내었다. Fig. 5(a)는 배플이 없는 용기에서 160 rpm으로 용기 높이의 1/2지점에서 교반될 때 용기 높이의 1/4지점에서, (b)는 용기 높이의 1/4지점에서 교반될 때 용기 높이의 3/4지점에서의 측정 및 계산 결과이다. 측정시 임펠러와 배플 부근에서 매우 가파른 속도 구배를 이루기 때문에 트레이서가 잘 분산되지 않아 소수의 트레이서만이 사진에 포착되었다. 사진 측정결과 및 유동장 해석에서 보여준 바와 같이 용기의 중심축으로 유동이 발달됨을 볼 수 있다. 또한, Fig. 5(b)에서 배플에 의해 유동이 굴절되어 용기의 중심축으로 향하는 것을 볼 수 있다. 그림에서 (a)와 (b)에서 측정된 속도는 13.2 및 17.5 cm/sec였으며, 계산에서 얻어진 속도는 각각 10.5와 14.2 cm/sec의 값을 나타내었다. 위의 측정치와 계산치는 거의 25%의 오차를 가지나 일반적인 유동패턴은 잘 부합됨을 알 수 있다.

Fig. 6의 (a)-(c)는 배플이 없는 수조에서 four-disk-flat



(a) WOB, 160 rpm at a quarter of vessel height, (b) WB, 160 rpm at three quarters of vessel height
Fig. 5. Comparisons of the measured streaklines with calculations.

blade 임펠러를 사용하여 280 rpm으로 교반하였을 때의 계산된 유동패턴을 나타낸다. 그림 중 (c)에서 임펠러를 기준으로 용기상하로 나뉘어지는 두 개의 큰 순환유동을 볼 수 있다. 이는 Komori와 Murakam⁽¹⁾ 등이 LDV를 사용하여 측정 한 유동패턴과 유사하며, 유체는 임펠러에 부딪쳐 반경방향으로 회전유동의 형태를 가지며 용기내 벽측으로 향하고, 축방향으로 두 개의 커다란 순환유동으로 분리된다. 하부에서의 재순환 유동은 용기의 벽면까지 잘 발달되어 나타난다.

Fig. 6(a)와 (b)에서 유동형상은 임펠러 축을 기준으로 유체의 속도가 매우 빠름을 볼 수 있다. (a)에서 자유표면과 용기저면에서의 유체는 회전유동을 하며 중심축으로 향하는 반면, 임펠러가 위치한 면에서는 유동이 중심축을 기준

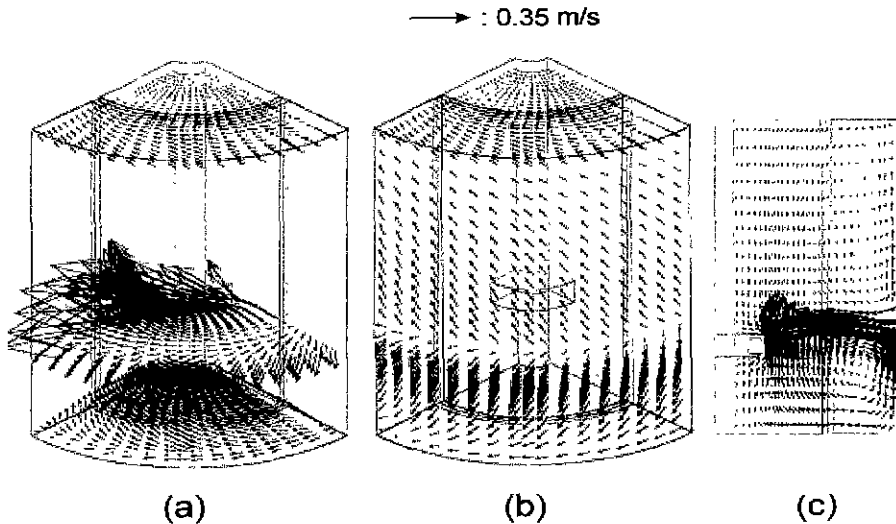


Fig. 6. Calculated flow patterns of impeller-agitated and unbaffled vessel at 280 rpm.

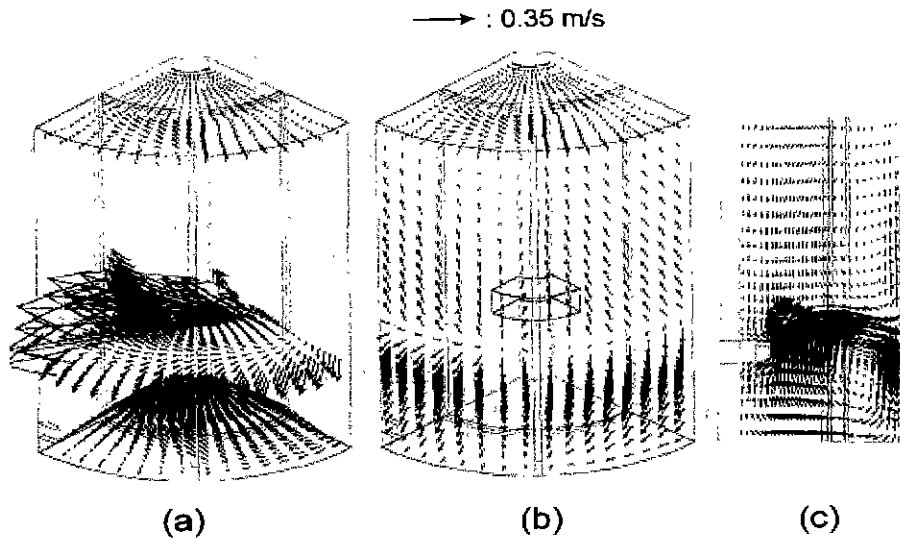


Fig. 7. Calculated flow patterns of impeller-agitated and baffled vessel at 280 rpm.

으로 외각으로 향함을 알 수 있다. 이것은 배플이 없는 수조에서 임펠러로 교반시 관찰되는 일반적인 유동양상이다.

배플을 사용한 용기에서의 유동패턴은 Fig. 7의 (a)-(c)에서 볼 수 있듯이 배플과 자유표면 부근에서 배플이 없는 용기와 큰 차이점을 보이고 있다. 벽측의 배플 주위에서 회전 유동패턴이 오히려 자유표면으로 향하는 상승류의 경향을 나타내고 있으며, 자유표면 및 용기저면에서는 회전유동이 극도로 억제됨을 볼 수 있다. Fig. 6, 7의 (a)-(b)에서 자유표면에서의 유동패턴을 비교하면, 배플을 사용한 경우의 표면 유속이 전반적으로 낮은 상태로 나타남을 볼 수 있다. 이러한 유동형태의 결과로 자유표면에서의 vortex 형성이 쉽게 억제될 수 있음을 짐작할 수 있으며, 배플에 의해 상대적으로 유동이 상하로 바뀌어 나타남을 알 수 있다.

5.3. 균일 혼합 시간의 측정

스크랩 재처리용 야금반응용기에서의 균일혼합특성을 파악함으로써 탈 가스를 위한 정련공정을 정량적으로 이해할 수 있다.

탈가스 측면에서는, 용융금속 내부에 산재한 용존 가스성분을 탈가스 위치인 기액 계면으로 이동이 유효해지는 경우, 탈가스를 촉진시키기 위해서는 용융 금속 중 산재된 가스성분을 되도록 빠르게 기-액계면으로 이동시키는 것이 중요하며, 이때 선택적으로 가스성분을 이동시키는 것은 불가능하며, 이를 위해 가스성분의 빠른 집적을 위해서는 용탕을 적절히 교반해 주어야 하며, 결과적으로 난류균일혼합시간이 짧아야 하는 적절한 균일 혼합조건 하에서 가능하

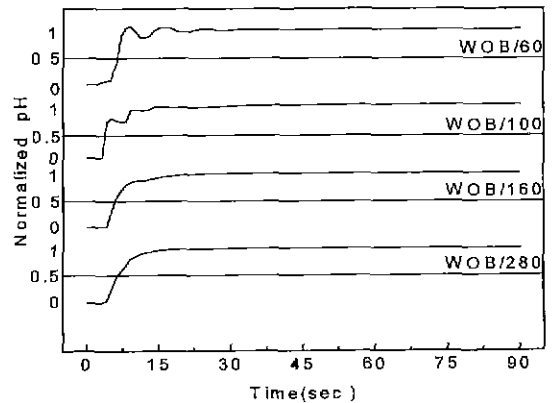


Fig. 8. Change of the normalized pH with different agitating speeds according to time in unbaffled vessel

리라 예상된다.

정련로 형태에 따른 균일 혼합시간의 변화를 교반조건인 임펠러 회전수에 따라 측정하였다. Fig. 8(a)는 배플이 없는 정련로의 경우로서 저속교반조건인 임펠러 회전속도가 60 rpm 상태에서 투입된 트레이서는 측정위치에서 감쇄진동을 하는 싸인형태의 곡선을 보이다가 일정한 값으로 수렴하는 것으로 측정되었다. 그러나 (b), (c), (d)와 같이 교반속도가 증가하면서, 그 진동현상은 축소되어. 교반속도가 160 rpm 에서는, 진동현상이 거의 소멸됨을 볼 수 있다. 이러한 진동 현상은 Fig. 4(a)의 자유표면 유동현상 관찰에서 나타났듯이 배플이 없는 반응용기를 회전에 의해 교반시키는 경우, 회전유동에 의해 유체 내의 트레이서가 혼합이 잘되지 않

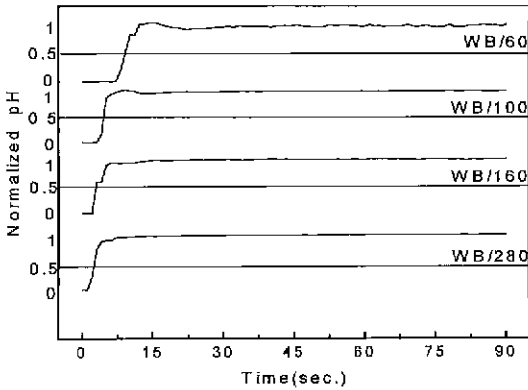


Fig. 9. Change of the normalized pH with different agitating speeds according to time in baffled vessel.

은 상태로 측정위치에서 주기적으로 유동의 순환회전에 의해 측정되는 것이다. 그러나 교반속도가 빨라지는 경우 심한 난류혼합거동에 의해 측정된 트레이서의 곡선에서 진동 현상이 나타나지 않았다.

반면에, 배플이 존재하는 반응용기인 Fig. 9에서는 배플에 의해 회전유동 부분이 크게 억제되어 측정되는 트레이서의 농도곡선이 다르게 나타나는데, 낮은 교반속도에서도 초기에 트레이서 농도가 증가하다가, 최대의 농도값을 보인 후, 감소하여 평형의 위치로 이동하는 것을 볼 수 있다. 또한 160 rpm의 교반조건에서 투입된 트레이서는 측정위치에서 평형농도점 즉 균일혼합조건인 위치로 비교적 빠르게 이동하는 것을 볼 수 있다.

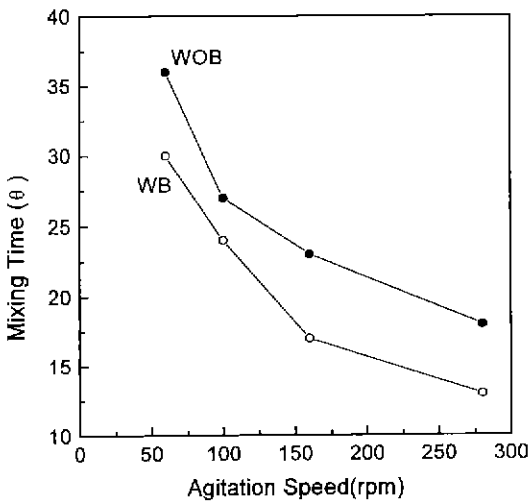


Fig. 10. Change of the mixing time with different vessel conditions in various agitating speeds (rpm).

또한 배플유무와 교반조건이 균일혼합시간에 미치는 영향을 Fig. 10에 나타내었다. 일반적인 경향으로 정련로 내 교반속도가 증가함에 따라 균일 혼합시간이 감소하는 것으로 나타나나, 배플이 존재하는 경우의 균일 혼합시간이 상대적으로 보다 짧게 나타나, 합금성분을 첨가하는 정련로 내의 균일혼합특성이 우수한 것으로 나타났다.

5.4. 탈가스 속도의 측정

임펠러를 사용한 기계적 교반조건에 따른 탈가스 속도를 측정된 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 임펠러 회전속도가 증가할수록 전반적으로 산소농도가 감소하는 것으로 측정되어, 탈가스 속도가 증가하는 것을 볼 수 있다. 그림 중 중 측은 물 중 산소농도를 무차원화하여 나타낸 것으로 실험 중 물의 온도를 10°C로 일정하게 유지토록 하였다. 이 온도에서 산소의 평형 용해도는 11.3 ppm으로 이 농도는 용존 산소의 물에서의 평형농도이다. 그림 중 closed mark는 배플이 없는 수조(without baffle, WOB)이고 open mark는 배플이 있는 수조(with baffle, WB)이다. 배플이 있는 수조와 없는 수조의 탈가스 속도 비교 시, 임펠러 교반속도 160 rpm을 기준으로 배플유무에 따라 탈가스 속도가 달리 남을 볼 수 있다.

60 rpm의 교반속도에서는 배플이 존재하는 용기에서의 탈가스 속도가 상대적으로 빠른 반면, 280 rpm 이상에서는 배플이 없는 용기에서의 탈가스 속도가 빠르게 나타났다. 교반속도가 낮은 경우, 자유표면에 vortex가 없는 상태에서

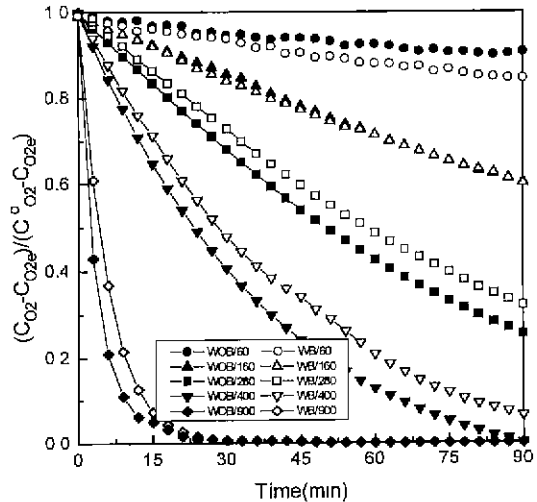


Fig. 11. Influence of agitation conditions on degassing rate (open and closed marks for baffled and unbaffled vessel, respectively).

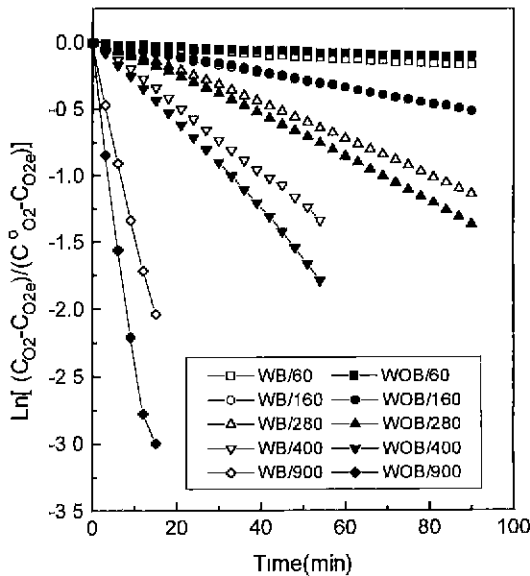


Fig. 12. Change of the degassing rate from water in differently agitated vessel.

표면적의 크기가 같은 상태에서는 상대적으로 빠른 난류혼합시간이 영향을 미쳤을 것으로 추정되며, 이는 수치해석결과에서 보듯이 배플의 존재로 배플 주위의 상승류가 탈가스를 촉진하였을 것으로 추정된다. 반면에 배플이 없는 경우, 교반속도가 증가함에 따라, 자유표면에 vortex가 형성되어 표면적이 증가하게 되어 식 (1)에서 알 수 있듯이 탈가스 속도가 가속화 됨을 추정할 수 있다.

물질이동계수를 측정하기 위해 (1)식의 양변을 자연로그를 취하여 Fig. 11로부터 Fig. 12를 나타내었다. 또한 Fig. 12에서 얻어진 각 선의 기울기로부터 물질이동계수를 측정 한 결과를 Pehlke⁵⁾ 및 Mikuchi⁶⁾의 결과와 함께 Table 2에 나타내었다. 수모델의 경우, 교반조건에 따라 0.0006~0.072 cm/sec까지 크게 변화하는 것으로 나타났으며, 알루미늄 및

마그네슘 합금의 용탕실험 결과와 비교할 만 한 값이 나왔다. 이러한 결과는 추후 용탕 실험을 통해 확인할 필요가 있다.

이상의 결과, 정련로에 배플의 유·무에 관계없이 임펠러 속도가 증가함에 따라 전반적으로 탈가스 속도가 빠르게 나타났다. 또한, 배플 설치에 의해 용기 내 균일혼합조건이 우수한 것으로 나타났으나, 탈가스 측면에서는 임펠러 교반 속도 160 rpm 이상에서 배플이 없는 정련로의 탈가스 속도가 빠르게 나타났다. 이는 배플이 설치되지 않은 정련로에서 자유표면에 vortex가 형성되기 때문에 표면적이 증가하여 탈가스 속도가 가속화하는 것으로 추정된다.

6. 결 론

경량합금 재활용을 위한 스크랩 재처리 용해과정에서 반응용기 형태에 따른 합금성분의 첨가 및 탈 가스 거동을 모사하기 위하여 유체 역학적인 접근으로 수모델 실험 및 수치해석을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 배플이 없는 반응용기에서 임펠러 교반속도가 160 rpm 이상에서 vortex가 나타나기 시작하였으며, 교반속도가 증가함에 따라 vortex가 더욱 발달하였다. 그러나 배플의 설치로 표면회전유동이 저지되어 vortex가 나타나지 않았다. 이는 수치해석결과, 배플의 존재는 상대적으로 회전유동이 상하유동의 형태로 발달됨을 알 수 있었다
2. 임펠러 교반속도가 증가함에 따라 전반적으로 균일혼합시간은 짧아졌으나, 배플이 있는 정련로에서 균일혼합시간이 상대적으로 짧게 나타나, 균일혼합특성이 상대적으로 우수하였다.
3. 수모델에 의한 탈가스 실험결과, 정련로에 배플의 유·무에 관계없이 임펠러 속도가 증가함에 따라 전반적으로 탈가스 속도가 빠르게 나타났다 또한, 배플 설치

Table 2. Mass transfer coefficients through the surface

Agitating Speeds (rpm)	Mass transfer coefficient in Water model (cm/sec)		Mass transfer coefficient in Aluminum (cm/sec) Pehlke ⁵⁾	Mass transfer coefficient in AZ91 (cm/sec) Mikuchi ⁶⁾
	WOB	WB		
0			1.6×10 ⁻³	5.2×10 ⁻³
60	5.7×10 ⁻⁴	6.6×10 ⁻⁴		
160	1.6×10 ⁻³	1.9×10 ⁻³		
280	4.0×10 ⁻³	3.3×10 ⁻³		
400	9.5×10 ⁻³	7.7×10 ⁻²		
900	7.3×10 ⁻²	4.5×10 ⁻²		
1800(rotor)				

에 의해 용기 내 균일혼합시간이 짧게 나타났으나, 임펠러 교반속도 160 rpm 이상에서 베플이 없는 정련로에서 vortex에 의해 탈가스 속도가 빠르게 나타났다. 이때의 물질이동계수는 교반조건에 따라 0.0006~0.072 cm/sec 까지 크게 변화하였다.

참고문헌

1. J.D Shim : "Development of Lightweight Engine Materials", Korea Institute of Science and Technology, Report BSN 1257-5509-1, 17-18 (1995).
2. P. Bakke : "Measurement and Removal of Inclusions and Hydrogen in Magnesium", Ph.D Thesis, The Norwegian Institute of Technology, 53-55 (1992).
3. Fr Patent No. 8119710.
4. T. Engh : "Principles of Metal Refining", Oxford University Press. 173-175 (1992).
5. R.D. Pehlke and A.L. Bement, Jr. : "Mass Transfer of Hydrogen between Liquid Aluminum and Bubbles of Argon Gas", Transactions of the Metallurgical Society of AIME, Vol. 224, December, 1237-1242 (1962).
6. B.A. Mikucki and J.D. Shearouse III : "The Effects and Removal of Hydrogen Gas in AZ91 Alloy", IMA, 50. 62-73 (1993).
7. R.E. Treybal : "Mass-Transfer Operations", McGRAW-HILL KOGAKUSHA, LTD, Third edition, 146-147 (1980).
8. J.W. Han, K.J. Bai and J.K. Yoon : J. Kor. Inst. Met. and Mater. Vol 25. 778 (1987).
9. R. Bird, W. Stewart and E. Lightfoot : Transport Phenomena, John Wiley & Sons. Inc. (1960).
10. D.B. Spalding : PHOENICS Reference Manual, CHAM Report (1991).
11. S. Komori and Y. Murakami : "Turbulent Mixing in Baffled Stirred Tanks with Vertical Blade Impellers", AIChE Journal, Vol. 34, No. 6, 932-937 (1988).

《광 고》 본 學會에서 發刊한 자료를 판매하오니 學會사무실로 문의 바랍니다.

- × EARTH '93 Proceeding(1993) 457쪽, 價格 : 20,000원
(International Symposium on East Asian Recycling Technology)
- * 자원리사이클링의 실제(1994) 400쪽, 價格 : 15,000원
- * 학회지 합본집 I, II, 價格 : 각 30,000원
(I : 통권 제1호~제10호, II : 통권 제11호~제20호)
- * 한·일 자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 483쪽, 價格 : 30,000원
- * 한·미 자원리사이클링공동워크샵 논문집(1996) 174쪽, 價格 : 15,000원
- * 자원리사이클링 총서 I (1997년 1월) 311쪽, 價格 : 18,000원
- * 日本의 리사이클링 産業(1998년 1월) 395쪽, 價格 : 22,000원 발행처·文知社