

버너의 위치에 따른 알루미늄 용해로내의 유동 및 열전달

김진호[†]·강덕홍^{*}·김기홍^{**}

Flow and Heat Transfer along Burner Positions in Aluminium Pool Furnace

Jin-Ho S. Kim[†], Deok-Hong Kang^{*} and Ki Hong Kim^{**}

Key Words: Aluminium Pool Furnace(알루미늄 용해로), Regenerative Burner(축열식 버너)

Abstract

For the design of Aluminium pool furnace, position of burner and pool depth effects on flow and temperature field in Aluminium pool furnace are examined by the commercial computational code, CFD-ACE+. From the results, position of burner which is on the same face in side wall is better to distribute the flow field in Al furnace. That yields temperature to distribute more uniformly. And the burner position is on upper wall, fire frame reach pool surface. Customer must consider that, because it make Aluminium to oxidize.

기호설명

Greeks

h : 엔탈피
 I : 복사 intensity
 k : 난류에너지, 열전도계수
 C_{e1}, C_{e2} : 난류 상수
 p : 압력
 P : 생성항
 r : 위치
 S : 생성항
 t : 시간
 T : 온도
 \vec{V} : 속도벡터
 \vec{x} : 방향벡터

ε : 난류에너지소산율, emmissivity
 κ : absorption coefficient
 μ : 점성계수
 μ_t : 난류 점성계수
 σ : 스캐터링 상수
 σ_t : 난류 Prandtl수
 Ω : 복사빔의 방향

1. 서 론

알루미늄 합금은 용융점이 낮기 때문에 용해하기가 쉬워 용해로의 중요성을 간과하기 쉽다. 그러나 주물의 품질이 더욱 요구되고, 생산가격면에서 국제적 경쟁이 심화되고 있는 요즘 알루미늄 생산비를 줄이기 위한 용해로의 유지비 감소가 절실히 필요하다. 특히 우리나라와 같이 유류와 가스의 부존자원이 없는 국가일수록 에너지 절감대책은 더욱 필요하다.

또한 단위무게를 기준으로 할 때 알루미늄은 용융점이 낮음에도 불구하고, 주철과 비슷한 많

† : 정회원, (주)경원테크 R/S Team

E-mail : steeve@mail.kw-tech.co.kr

TEL : (031)706-2886 FAX : (031)706-2887

* : 정회원, 포항산업과학연구원 에너지연구팀

** : 비회원, 포항산업과학연구원 에너지연구팀

은 에너지가 용해에 필요하다. 특히, Si가 첨가될 경우 Al-Si합금의 용해에 필요한 에너지는 더욱 커지게 되어 열효율이 높은 용해로를 사용함으로써 연료비를 절감할 수 있다.

알루미늄 용해로의 설계시에 고려해야 할 사항으로는 용해속도, 합금의 종류 및 변경 빈도, 용해조업시간 및 휴무일, 장입재료의 청정도 및 품질요구도 그리고 필요로 하는 용탕처리의 종류 및 빈도 등을 들 수 있다. 그렇지만, 우리나라의 경우 전기가격이 비싸기 때문에 서양에서 많이 사용하는 전기로는 기피되고 있으며, 축열식 버너(regenerative burner)를 이용한 도가니로가 주로 사용되고 있는 실정이다.

알루미늄 용해로의 연료비를 절감하기 위해서는 용해로 내부의 온도장을 균일하게 성층화하는 것이 필요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 용해로 내부의 유동장과 온도장을 균일화하기 위하여 축열식 버너의 위치를 세가지 바꾸어 가며 용해로 내부의 유동장과 온도장을 상용프로그램인 CFD-ACE+를 이용하여 살펴보았다.

2. 모델의 선정

본 연구에서 다루고자 하는 알루미늄 용해로 내부의 유동 및 열전달 현상을 고찰하기 위한 해석모델을 Fig. 1에 나타내었다. 그림에서 알루미늄 용해로는 알루미늄괴가 인입될 육면체 부분과 버너가 설치되어 주로 용해되고 저장되는 용탕이 있는 실린더 부분 그리고, 슬러지를 제거하기 위한 출구부분의 세부분으로 나눌 수 있다. Table 1

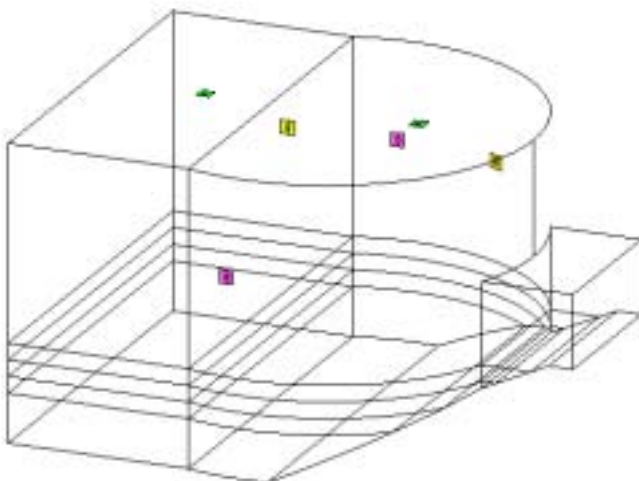


Fig. 1 Schematic of the present study.

Table 1 Physical dimensions and properties of present model at reference condition.

Furnace	Box	Length	1.4 m
		Width	2.4 m
		Height	1.8 m
	Cylinder	Diameter	2.5 m
		Height	1.8 m
	Outlet	Length	0.5 m
Width		1.0 m	
Height		0.45 m	
Pool		Height	0.5 m
Burner position		Upper, side, face	

에는 용해로의 크기와 용탕의 깊이 그리고, 버너의 위치를 나타내었다. 버너는 윗부분에 설치되는 경우, 측면의 동일면에 설치되는 경우, 그리고, 측면의 마주보는면에 설치되는 경우를 고려하였으며, 용탕의 깊이는 0.3, 0.4, 0.5 및 0.6 m를 고려하였다. 기준조건은 고딕체로 표시하였다.

3. 지배방정식 및 경계조건

3.1 지배방정식

본 연구의 물리적 모델을 해석하기 위하여 다음의 가정을 사용하였으며, 이 가정을 통하여 단순화된 지배방정식을 아래에 나열하였다.

- ① 용해로 내부유동은 정상난류유동이다.
- ② 작동유체의 물성치는 일정하게 유지된다.
- ③ 복사열전달 계수는 온도에 무관하게 일정하다.
- ④ 자연대류 효과를 고려하였다.
- ⑤ 버너의 연료는 CH₄의 단일성분으로 하였다.

연속방정식

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \tag{1}$$

운동량 방정식

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) + S_M \tag{2}$$

난류에너지 방정식

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla k \right) + \rho P - \rho \epsilon \quad (3)$$

난류에너지소산율 방정식

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \epsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \nabla \epsilon \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\rho P \epsilon}{k} - C_{\epsilon 2} \frac{\rho \epsilon^2}{k} \quad (4)$$

에너지 방정식

$$\frac{\partial \rho h_0}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h_0) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_h \quad (5)$$

복사에너지방정식

$$(\Omega \cdot \nabla) I(r, \Omega) = -(\kappa + \sigma) I(r, \Omega) + \frac{\sigma}{4\pi} \int_{4\pi} I(r, \Omega') \Phi(\Omega' - \Omega) d\Omega' \quad (6)$$

여기서, t, r, \vec{x} 와 \vec{V} 는 시간, 위치, 방향벡터와 속도벡터이고, $C_{\epsilon 1}$ 와 $C_{\epsilon 2}$ 는 난류에너지소산율 방정식에 사용되는 상수이고, p, k, ϵ 은 각각 압력, 난류운동량 및 난류에너지소산율이다. S_M, S_h 및 P 는 모두 생성항이고, T, h_0, I, I_b 는 각각 온도, 엔탈피, 복사 Intensity 및 흑체의 복사 intensity이다. ρ, μ, μ_t 및 σ_t 는 각각 밀도, 점성계수, 난류점성계수 및 난류 Prandtl수이다. Ω, κ 및 σ 는 각각 복사빔의 진행방향, 흡수율 및 스캐터링율이다.

3.2 경계조건

버너는 그리드 형성의 편이상 사각으로 만들었으며, 작은 사각형에 큰 사각형이 둘러싸인 형태로 가정하였다. 작은 사각형으로는 연료가 공급되며, 큰 사각형과 작은 사각형의 중간인 사각환

으로는 고온의 공기가 공급된다. 버너가 축열식이기 때문에 한쌍의 버너가 설치되고, 한개의 버너에서 연료와 공기가 공급되면, 다른 버너는 출구의 역할을 하게 된다.

$$\left. \begin{aligned} T &= 298.15 K \\ V_n &= 30 m/s \\ k &= 30 m^2/s^2 \\ \epsilon &= 200 \end{aligned} \right\} \text{at Fuel inlet} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} T &= 1273.15 K \\ V_n &= 100 m/s \\ k &= 100 m^2/s^2 \\ \epsilon &= 5071 \end{aligned} \right\} \text{at Airl inlet} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{at Outlet} \quad (9)$$

여기서, V_n 은 normal 속도이다.

그리고, 다른 모든 벽면은 대류경계조건을 사용하였으며, 벽면의 emissivity를 0.92로 하였다.

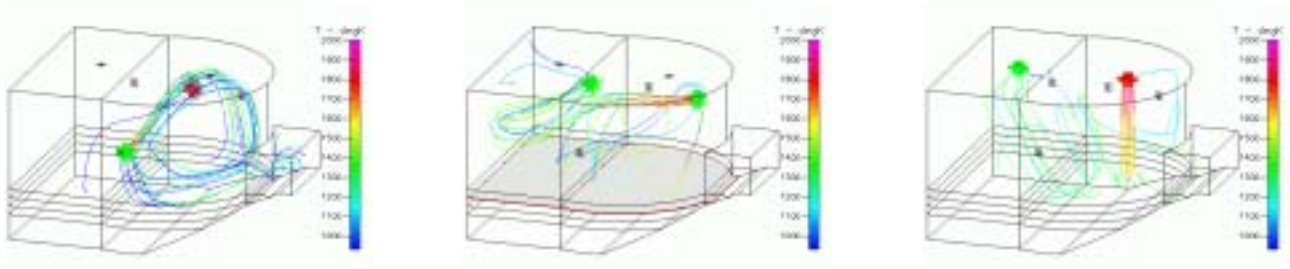
$$\left. \begin{aligned} h &= 6 W/m^2 K \\ \epsilon &= 0.92 \end{aligned} \right\} \text{at Every Wall} \quad (10)$$

4. 결과의 고찰 및 논의

4.1 버너 위치에 따른 내부 유동장의 변화

버너 위치에 따른 용해로 내부 온도장의 변화를 알아보기 위하여 버너의 위치를 3가지로 바꿔가며 계산을 수행하였다. Case 1은 양 측면에 버너가 존재하는 경우이고, Case 2는 한쪽 측면에만 버너가 존재하는 경우이다. Case 3은 상부 면에 두개의 버너가 존재하는 경우이다. 모든 경우에 있어서, 용탕의 높이는 0.5 m이다.

Fig. 2에는 버너 위치에 따라서 유선을 나타내었다. (a), (b) 및 (c)는 각각 Case 1, Case 2 및 Case 3이다. 모든 Case에서 유선은 버너 입구 측과 출구 측을



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

Fig. 2 Stream lines for each burner positions.

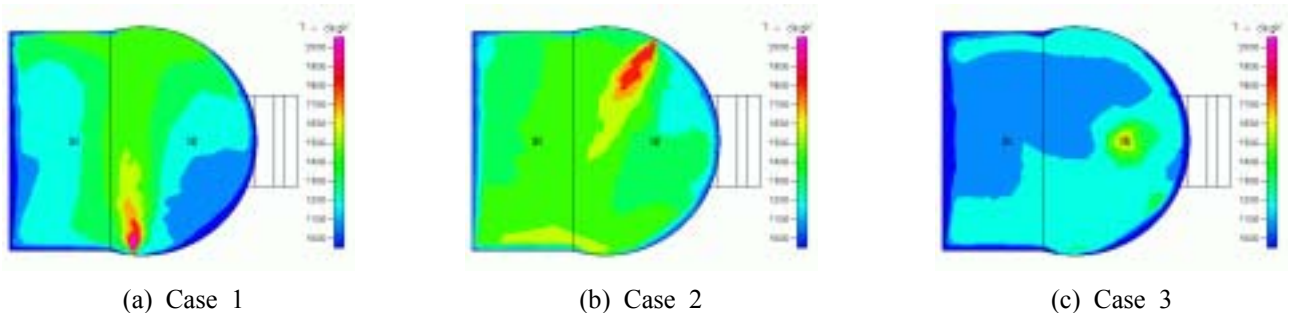


Fig. 3 Temperature contour at $z = 1.2$ m for each burner position.

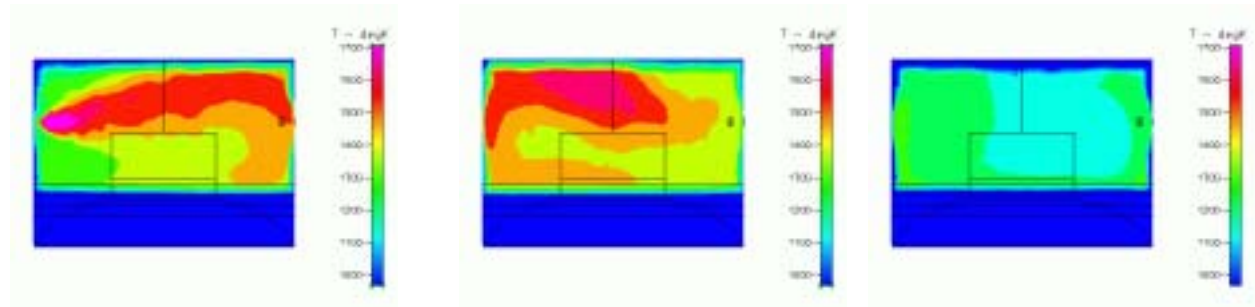
중심으로 각각 9개씩의 유선을 그렸다. Fig. 2(a)에서, 유선은 입 출구 버너를 직선으로 연결한 가상의 직선상에 대부분이 존재한다. 이것은 대부분의 유동이 용해로 내부를 충분히 유동하지 못하고 배출됨을 의미하는 것이다. 이를 자세히 살펴보면, 버너에서 연소된 가스가 출구의 우측 벽 근처로 유동하고, 노벽을 따라 1회 회전 후 대부분은 출구 쪽으로 유출되며 좌측 노안에도 유동이 거의 형성되지 못하고 있음을 볼 수 있다. 즉, 고온의 연소가스가 용해로 내부를 충분히 유동하지 못하고, 대부분이 1회 회전 후 외부로 유출됨을 볼 수 있으며, 이것으로 내부 온도가 충분히 가열되지 못할 것임을 예측할 수 있다. Fig. 2(b)에서 유선은 용해로 전체 영역에 골고루 분포함을 볼 수 있으며, 우측 버너에서 연소된 고온의 연소가스는 용해로 내부를 여러 차례 회전 유동한 후 좌측의 유출구로 배출된다. 이것으로 용해로 내부의 온도는 상승될 것을 예측할 수 있으며, Case 1에 비하여 균일화 될 것으로 예측된다. Fig. 2(c)에서 상부 우측에서 연소된 연소가스는 용탕으로 직접 분사되고 있음을 볼 수 있고, 용탕을 접촉한 유동은 우측으로 돌아흐르고 나서 용해로 내부의 중앙단면을 중심으로 유동이 형성된 후 상부면 좌측의 유출구로 유출되는 유동 형태를 보이고 있다. Case 1에 비하여 유동은 전체 영역을 골고루 운동하기 때문에 용해로 내부의 온도장이 전체적으로 가열될 것을 예측할 수 있다.

4.2 버너 위치에 따른 내부 온도장의 변화

Fig 3는 버너 위치에 따라서 $z=1.2$ m인 단면에서의 온도 분포를 보여 주고 있으며, 특히 버너 입구측 부근의 온도를 잘 나타내고 있다. $z=1.4$ m인 단면은 Case 1과 Case 2의 버너가 위치한 높이이기 때문에 화염을 관찰하기가 좋다. Fig. 3(a)에서, 버너에서 공급되는 고온 공기와 연료는 잘 섞이고, 발화되어 연소됨을 볼 수 있으며, 화염의

형태를 쉽게 구분할 수 있다. 내부온도를 살펴보면, 버너 입구에서는 단면의 중심에 연료의 낮은 온도가 관찰되며, 그 외부의 사각환 부분으로 고온의 공기가 유입됨을 볼 수 있으며, 버너 입구에서 약간 떨어진 부분에서 최대온도를 기록하고, 이것은 이곳에서 연소가 발생되었음을 의미한다. 이후 화염은 유동방향을 따라 길게 발생하며, 빠른 속도로 유입되는 고온의 공기 때문에 온도장이 길게 뻗은 형태로 나타난다. Fig 2(a)에서 보인 바와 같이 연소가스의 주유동은 우측으로 돌아가기 때문에 화염의 형태는 약간 우측으로 휘어져 있음을 볼 수 있다. 유동이 버너에서 유출되어 우측으로 일회 회전 후 대부분이 외부로 유출되기 때문에 온도장도 유동이 직접 용해로 벽면에 부딪히는 벽면 근처의 온도가 다른 부분에 비하여 상대적으로 높게 분포함을 볼 수 있다. Fig. 3(b)에서, Fig. 3(a)와 화염은 비슷한 형태를 띄고 있으며, Case 1에 비하여 전체적으로 균일한 온도장을 보이고 있다. Case 3은 버너가 상부면에 위치하고 있기 때문에 직접 비교가 불가능하지만, 화염이 직접 지나가고 있는 우측 중앙부근을 제외하고는 전체적으로 고온 온도를 보이고 있다. Fig. 3(a)와 (b)에서, 버너의 반대편 용해로 벽면의 온도가 대략 $1,100$ °C 근처까지 상승했음을 볼 수 있다. 이것은 화염이거나 화염이 끝난 지점에서의 고온의 연소가스일 것으로 추정된다.

Fig. 4은 각각의 경우에 $x=1.4$ m 단면에서의 온도 분포를 보인 그림이다. 각 경우에 있어서, 고체로 처리한 용탕표면과 용해로 내부의 온도가 크게 차이가 나타남을 볼 수 있다. Fig. 4(a)에서, $x=1.4$ m인 지점이 버너의 위치와 동일하기 때문에, 화염의 수직방향 형태가 보이고 있다. 좌측에서 유입되는 공기와 연료의 연소형태를 분명히 확인할 수 있으며, 연소가 발생한 이후 화염이 상부면으로 약간 올라가는



(a) Case 1

(b) Case 2

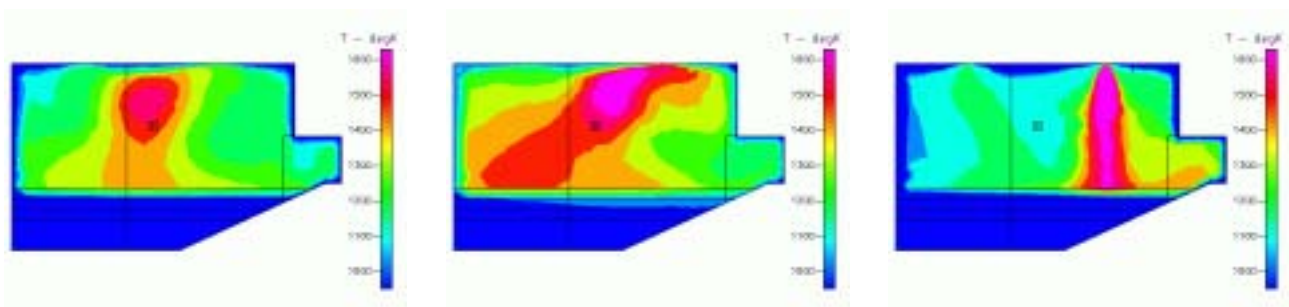
(c) Case 3

Fig. 4 Temperature contour at $x=1.4$ m for each burner position.

것은 부력의 영향이다. Fig. 4(b)에서, 유동이 그림의 좌측 상부면을 통과하기 때문에 그 부분의 온도가 다른 부분보다 높게 나타나고 있으며, 유동이 가장 적게 흐르고 있는 우하측은 낮은 온도를 보이고 있다. 그렇지만 전체적으로 노란색으로 표시되는 영역이 더 넓게 분포함을 볼 수 있다. 이것은 유동장의 설명에서 보인 바와 같이 유동이 용해로 내부로 전체적으로 운동하기 때문에 온도가 상승한 영역이 증가했기 때문이다. Fig. 4(c)에서, 용해로 내부의 온도는 전체적으로 비슷하게 나타나고 있다. Fig. 4(a)와 (b)에서, Fig. 3에서 설명한 바와 같이 버너가 설치된 반대쪽 벽면에 고온의 연소가스 때문에 벽면 근처의 온도가 $1,100$ °C까지 상승했음을 볼 수 있다. 각 그림에서 용탕내부의 온도를 살펴보면, (a)의 경우에는 우측에서 약간 온도가 상승하였고, (b)는 좌측부분의 온도가 약간 상승하였으며, (a)에 비하여 온도가 상승한 영역이 넓게 보인다. 그렇지만, (c)의 경우에는 용탕 중앙 부분의 온도가 상당히 높음을 볼 수 있고, 그 영역 또한 상당히 넓다는 것을 볼 수 있다. 이것은 화염 또는 연소가스가 직접 용탕과 접촉하기 때문으로 사료되며, 다음 그림

에서 이를 자세히 살펴볼 것이다.

Fig 5는 버너 위치에 따라서 중앙 단면에서 ($y=0$ m) 온도분포를 보인 그림이다. 이 면은 용해로 중앙 단면을 나타낸다. Fig. 5(a)에서, 화염이 지나는 중앙부근의 온도가 높게 보이고, 다른 영역은 온도가 비슷하게 나타나고 있다. Fig. 5(b)에서, 단면을 통과하는 주유동은 처음엔 중앙상층부를, 두 번째는 좌하측으로 지나기 때문에 중앙 상층부의 온도가 가장 높고, 좌하측이 두 번째로 높게 나타나고 있다. Fig. 5(c)에서, 상부에서 유출되는 고온 공기와 연료가 연소되어 화염을 형성하고 있음을 볼 수 있다. 용탕표면근처의 온도를 살펴보면 약 $1,200$ °C 정도로 화염이 용탕부근까지 접근하거나 용탕에 직접 접촉할 가능성을 보이고 있다. 즉, Case 3의 경우에는 용해로 내부의 온도장은 상당히 균등한 온도분포를 보이고 있으나, 화염의 용탕으로 직접 접촉할 가능성을 내포하고 있다. 화염이 직접 용탕에 접촉하면 알루미늄 용액이 오염될 가능성이 높기 때문에 Case 3과 같이 용탕 상부면에 버너를 설치하는 경우에는 화염이 용탕에 직접 접촉하는 것을 피하기 위하여 용해로의 높이를 높이거나 용탕의



(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

Fig. 5 Temperature contour at $y=0$ m for each burner position.

깊이를 낮출 필요성이 있다. 그러나 이러한 경우에는 가열할 공기의 양이 많아지고, 용해로의 부피가 증가하여 외부 벽면을 통한 열손실이 증가할 가능성이 있으므로, 유의해야 한다.

5. 결 론

알루미늄 용해로의 설계를 위한 기초단계로서, 버너 위치, 용탕의 깊이 및 용탕의 유동이 따른 유동장과 온도장에 미치는 영향을 연구하였다. 또한 버너의 Switching효과로 인한 용해로 내부 유동장과 온도장의 변화를 살펴보았다. 모든 경우는 CFD-ACE+를 이용하여 수치적으로 계산하였다.

결과에 따르면, 버너의 위치는 마주보는 면에 위치하는 것보다 동일한 면에 위치하는 것이 용해로 내부에 유동을 고르게 분포시키는데 유리하며, 이에 따라 온도의 분포가 좀더 균일해진다. 그렇지만, 버너를 상부면에 위치시키면, 화염이 용탕에 접촉할 수 있기 때문에 설계시 유의해야 한다.

용탕의 깊이에 따른 유동장과 온도장의 변화는 그리 크지 않지만, 본 알루미늄 용해로의 경우, 용탕의 깊이가 0.5~0.6m사이인 지점에서 유동장과 온도장이 급격히 변화할 것으로 예측되었다. 이에 대한 원인은 좀더 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단과 에너지자원기술개발사업 중 에너지절약 중대형사업으로 지원되어 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) CFDRC, CFD-ACE(U) *Module Manual(V2002)*, CFD Research Corporation, 2002
- (2) J. G. Kim and K. Y. Huh, "Prediction of Transient Slab Temperature Distribution in the Re-heating Furnace of a Walking-beam Type for Rolling of Steel Slabs", *ISIJ International*, Vol. 40, No. 11, pp. 1115-1123, 2000.
- (3) B. Y. Yang, C. Y. Wu, C. J. Ho and T.-Y. Ho, "A Heat Transfer Model for Skidmark Formation on Slab in a Reheating Furnace", *J of Materials Processing & Manufacturing Science*, Vol. 3-January 1995, pp. 277-295.
- (4) David R. Lide, *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, 1997, pp. 10-298.
- (5) 이진형, "알루미늄 용해로의 이모저모", 한국주조공학회지, Vol. 6, No. 3, pp.242-245, 1986.