

알루미늄 스크랩의 재활용을 위한 전자기장 펌프의 열 유동 해석에 의한 장비 설계

최우식*, 강충길#

The Equipment Design by the Fluid and Thermal Analysis of the Electromagnetic Pump for Recycling of Aluminum Scrap

Woo-Sik Choi* and Chung-Gil Kang#

ABSTRACT

In this study, to design aluminum scrap recycling equipment, fluid flow and thermal analysis considering electromagnetic phenomenon were carried out by using ANSYS program. The magnetic flux generated by electromagnetic pump has influence on fluid velocity of Al liquid metal with molten metal motion and thermal generation. To investigate the effect of the number of phase on fluid flow and thermal generation, electromagnetic force and magnetic flux were obtained by computer simulation. In addition, the results obtained by fluid flow and thermal analysis, recycling equipment of aluminum scrap with the cooling technology of electromagnetic coil, the most suitable phase and current were proposed.

Key Words : Al scarp recycling equipment(재활용 알루미늄 장비), electromagnetic pump(전자기장 펌프), current(전류), phase(위상), fluid velocity(유속), temperature(온도)

기호설명

i	=	$C_{current}$ (A)	emf	=	Electromotive force(V)
i_a	=	Input current of coil (A)	Φ	=	Magnetic flux(Wb)
i_b	=	Input current of coil (A)	R	=	Resistivity (Ω)
w	=	Frequency of input current (Hz)	Q_c	=	Heat transfer by convection(W/m)
t	=	Time (sec)	ρ	=	Density(kg/m ³)
N	=	The number of coil turns	C	=	Specific heat(kJ/kg · °C)
A	=	Cross section of coil (m ²)	V	=	Potential(V)
π	=	3.141596	J	=	Current density(A/m ²)
			P1(30°)	=	Phase difference is 30 degree
			P2(60°)	=	Phase difference is 60 degree

접수일: 2005년 9월 27일; 게재승인일: 2006년 11월 9일

* 부산대학교 대학원 정밀 기계공학과

교신저자: 부산대학교 기계공학부

E-mail cgkang@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-1455

- P3(120°) = Phase difference is 120 degree
- T = Temperature(°C)
- k = Thermal conductivity
- μ_R = Relative permeability
- Qj = Joule heat per unit volume
- n = Number of integration points
- [ρ] = Resistivity matrix
- Re = Real component
- {Jti} = Complex total current density in the element at integration point i
- {Jti}* = Complex conjugate of {Jti}

1. 서론

전자기장 펌프를 이용한 알루미늄 스크랩의 재생방법은 직접화염으로 용해하지 않고 AI 용탕 내에서 용해되기 때문에 산화율 감소와 함께 용해온도를 낮게 하여 대용량의 집진기, 냉각장치 등 별도의 장비구입이 필요 없이 에너지 절감효과에 크게 기여한다. 알루미늄 스크랩 용해 중 강력한 대류가 발생함으로써 용탕의 온도 보상과 함께 용탕의 온도를 균일하게 유지할 수 있다. 또한, 용탕의 관리 및 용탕의 물성치 변화가 적어 제품의 품질 향상에 기여할 수 있다. 알루미늄 스크랩 재생시 다른 금속물을 첨가한 합금의 용해((Si, Cu 합금)가 용이하고 용해속도 및 자동화된 공정으로 조작이 편리하여 생산성 향상을 기대할 수 있다. 기존의 합금 공정시 주로 사용되는 로터 교반법의 단점인 설치면적, 기계장치를 최소화할 수 있고 알루미늄 스크랩 주입구에서 강력한 교반이 직접 이루어지기 때문에 주조 공장의 장비활용 공간을 효율적으로 운용할 수 있다.

현재, 전자기장펌프를 이용한 재활용장치에 관한 연구는 국내에서는 거의 진행되지 않았기 때문에 전자기장펌프에 대한 Data Base 가 전무한 상태이다. 또한, 전자기장 펌프내의 열 유동현상을 실험적인 방법으로는 그 내부의 거동을 잘 알 수가 없으므로 해석을 통하여 Data Base 확보를 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 고온의 알루미늄용액 순환장치의 동력인 전자기장 펌프의 전자석 간의 위상차가 유동과 온도에 어떤 영향을 미치는가를 해석하였다. 자기장, 열, 유동해석을 위하여 상용 유한 요소 해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 계산하였다.

해석 결과는 추후에 최적의 자기력의 도출, 코일 냉각형태 및 냉각수 온도 결정에 활용될 것이다.

2. 전자기장 펌프의 구성 및 해석 모델

2.1 전자기장 펌프의 작동 구성

알루미늄 스크랩 용해 장치는 Fig. 1 에 나타낸 바와 같다. 펌프 제어 장치에서는 전자기장 펌프를 작동시키기 위한 전류를 제어하고, Charge Well 은 고체상태의 알루미늄 스크랩이 투입 되는 곳이며, 전자기장 펌프부분에서는 용해 알루미늄에 전자기력이 발생하여 유동과 온도¹에 영향을 준다.

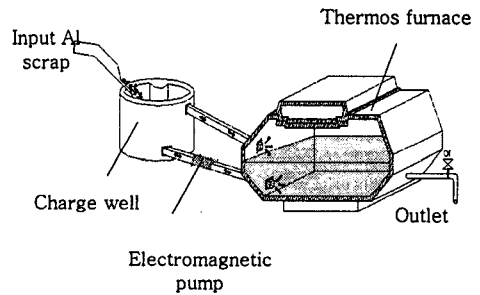


Fig. 1 The diagram of recycling equipment system with electromagnetic pump

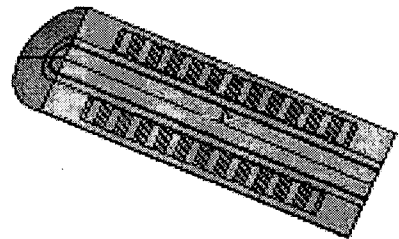


Fig. 2 Three dimensional model of electromagnetic pump(1/2 model)

Fig. 2 는 전자기장 펌프의 3 차원 모델이며, Fig. 3 은 Fig. 2 의 2 차원 단면으로 각 부분의 명칭과 치수를 나타내고 있다. Fig. 3 (a)는 전자석 부분으로 코일(코일 단면적 $A=6.5e-4 \text{ m}^2$)을 감은 코어로 구성되어 있다.

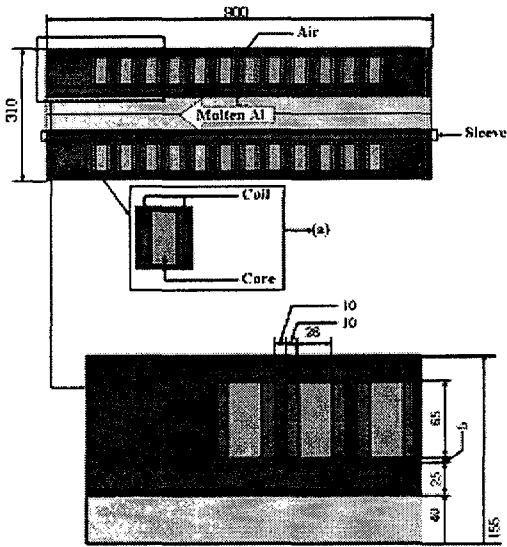


Fig. 3 Two dimensional model of electromagnetic pump(unit : mm)

전자기장 펌프의 작동원리는 코일 부분에 교류 전류가 입력되어 Fig. 4 부분의 그림으로 부터 전류에 의해 자기장이 오른 나사의 법칙²에 의해 발생하게 된다. 발생된 자기장은 로렌츠의 힘³에 의해 유동의 측면(Fig. 5 의 타원 부분)을 자극하여 유동이 발생하게 된다.

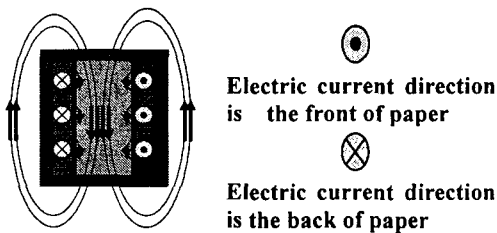


Fig. 4 The diagram of magnetic flux line generated by input current

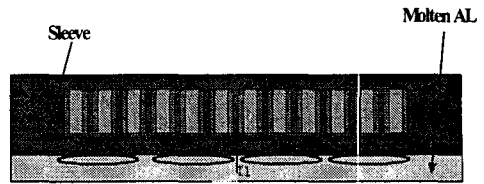


Fig. 5 The portion stirred by magnetic flux line

열 발생은 알루미늄 용탕 내의 시간에 따른 자기력의 변화는 기전력을 일으켜 전류를 발생 시킴으로 용탕의 온도가 증가하게 된다. 다음의 패러데이 법칙⁴(1)과 발열량 방정식(2)으로부터 고려될 수 있다.

$$-\frac{d\phi}{dt} = emf = V = iR \quad (1)$$

$$i^2 R = Q_c + \rho C \frac{dT}{dt} \quad (2)$$



Fig. 6 Mesh model for magnetic field

Fig. 6 은 전자기장 해석에 사용될 부분을 ANSYS 프로그램으로 메쉬 모델을 한 것이다.

전자기장 해석에서 경계조건은 소재, 코일, 슬리브의 구조적 특징을 이용하여 2 차원 축 대칭으로 하였다. 코일 부분에 입력되는 교류 전류는 Table 1 의 세가지 위상조건으로 하였을 때, 교류 전류 100A~250A 사이의 값을 코일 부분에 입력하여 출구부의 속도가 현 알루미늄 리사이클링 장치 내에서의 용탕 최고 이송 속도 4m/s 가 되는 전류 값 P1(30°):110A, P2(60°):160A, P3(120°): 240A 를 ANSYS 의 해석결과로부터 얻었다.

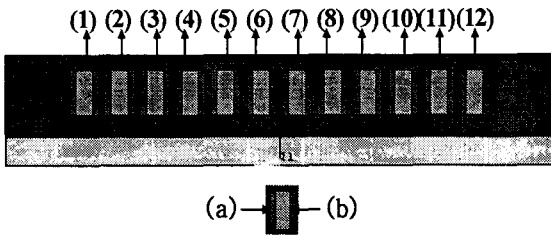


Fig. 7 Two dimension model of electromagnetic pump

Table 1 Phase value of the current (unit: °)

D(m)	P1(30°)	P2(60°)	P3(120°)
D(1)	0	0	0
D(2)	30	60	120
D(3)	60	120	240
D(4)	90	180	0
D(5)	120	240	120
D(6)	150	300	240
D(7)	180	0	0
D(8)	210	60	120
D(9)	240	120	240
D(10)	270	180	0
D(11)	300	240	120
D(12)	330	300	240

Fig. 7 은 각각의 전자석을 (번호)로 나타낸 것이다. (번호)는 Table 1 의 D(m)의 (m)부분을 표시 한다.

Table 1 은 전자기장 해석을 위한 초기 조건으로 Fig. 7 의 각 전자석에 입력되는 위상각³을 나타내 었다. P1(30°)은 Fig. 7 의 전자석 12 개가 한조 ((1)~(12))가 되어 360° 를 형성하여 각 전자석의 위상차가 1×360° /12=30° 가 된다. P2(60)는 Fig.7 의 6 개씩 2 조((1)~(6), (7)~(12))가 되어 각각 360° 를 형성하여 전자석의 위상차가 2×360° /12=60° 가 된다. 또한, P3(120)는 Fig. 7 의 전자석이 3 개씩 4 조((1)~(3), (4)~(6), (7)~(8), (9)~(12))를 이루어 한조 가 되어 각각 360° 를 형성하여 위상차가 4×360° /12=120° 된다.

Fig.7 에서 보여주는 각 전자석 부분에 대응하 는 (a), (b)부분의 입력식은 다음과 같다.

Fig. 7 (a)부분

$$i_a = i \sin(\omega t + \frac{\pi D(m)}{180}) \times \frac{1}{6.5e-4} \times N \quad (3)$$

Fig. 7 (b)부분

$$i_b = -i_a \quad (4)$$

D(m)의 m 은 Table 1 에서 보여주는 의 1~12 의 값을 나타낸 것이다.

2.2 열 유동 해석을 위한 모델과 경계 조건

Fig. 8 은 고온의 액체 알루미늄의 유동 해석을 위하여 B 부분을 다시 디자인 하여 메쉬 모델을 한 것이다. 사용된 노드 수는 1808 개, 요소 수는 1680 개이다.



Fig. 8 Mesh model for fluid flow

열 유동 해석을 위한 조건으로 첫째, 경계조건 으로는 2 차원 축 대칭, 슬리브에 의해 주위로 열 전달이 없으므로 단열조건으로 하였다. 둘째, 전자기장에 의해 발생된 유동의 흐름³은 복잡하고 불안정하며 외부 벽 쪽에 흐름이 치중되어있다. 따라서 유동의 흐름은 난류로 하였다. 셋째, 초기 온도는 709℃로 하였고 총 계산 시간은 30sec 로 하였다. 그리고 각 조건에서의 열 발생량은 식(5)에 의해 ANSYS 에서 계산하였다. 그리고 중력가속도 (9.8m/s)를 고려를 하였으며, 알루미늄 용탕의 높이는 동일한 것으로 하였다.

$$Q' = \text{Re}(\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [\rho] \{j_u\} \{j_u\}^*) \quad (5)$$

Table 2, Table 3 은 해석에 사용한 재료의 물성치로서 온도에 따라 변화가 없는 것으로 하였다.

Table 2 The thermal and electromagnetic property of A356 alloy

Property	Unit	
Temperature (T)	°C	709
Density (ρ)	Kg/m ³	2360
Thermal Conductivity (K)	W/mK	69
Specific Heat (Cp)	J /gK	1149
Viscosity (μ)	N.s/m ²	4.5 × 10 ⁻⁹
Relative Permeability (μ _R)		84
Resistivity (R)	Ω	21 × 10 ⁻⁹

Table 3 Relative permeability in electromagnetic analysis

Sleeve	1
Coil	1
Core	1
Air	1

3. 해석 결과

ANSYS MULTIPHYSICS 를 이용 하여 전자기장 해석을 한 후 열 유동해석을 하였다.

Table 4 Input value of each case

Phase difference	Current i(A)	Number of coil turns (N)	Frequency w(Hz)
P1(30°)	110	2000	60
P2(60°)	160	2000	60
P3(120°)	240	2000	60

Table 4 는 전자기장 해석을 위한 교류전류의 입력조건을 나타내고 있다. 그리고 열 유동해석에서

는 초기 온도 709℃, 초기 속도 0 m/s 로 각 위상차 조건에 모두 동일하게 온도와 초기 속도를 대입하였다.

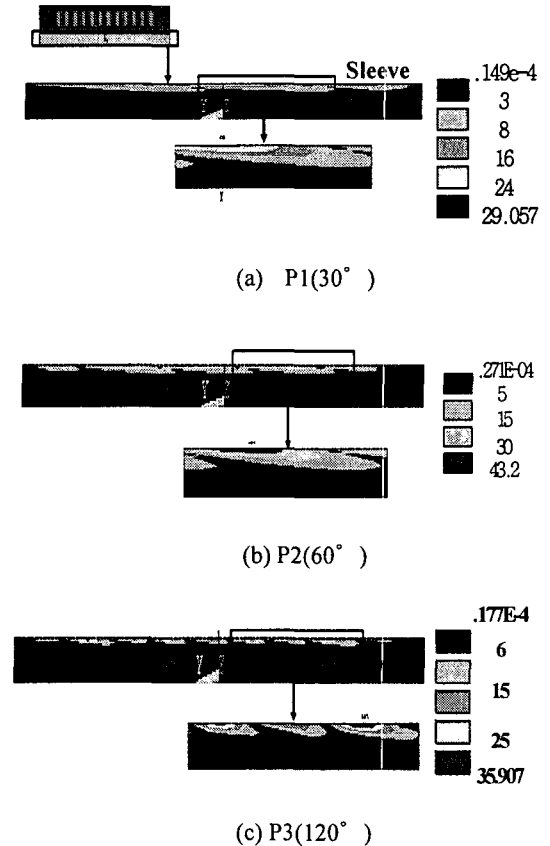


Fig. 9 Magnetic flux density(Wb/m²)

Fig. 9 는 각 조건에 따른 전자기장 해석을 한 것으로 용탕 부분만을 나타내고 있다. 각 조건에서 자속 밀도의 최대값은 (a) 29.067 Wb/m², (b) 43.2 Wb/m², (c) 35.907 Wb/m² 이고 자속 밀도를 관찰해보면 슬리브 부근에만 자속 밀도가 집중됨을 관찰할 수 있었다. 자속 밀도가 슬리브 부근에 집중되는 이유는 액체 알루미늄의 상대 투자율은 87 이고 슬리브의 상대 투자율은 1 이다. 즉, 물성치의 급격한 변화가 자기장의 투과에 영향을 주었다고 사료된다.

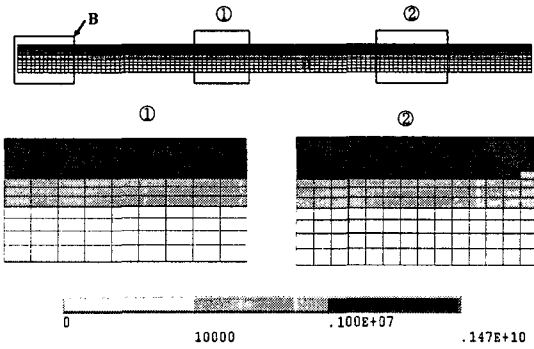


Fig. 10 Heat generation by phase difference 30 degree(W/m^3)

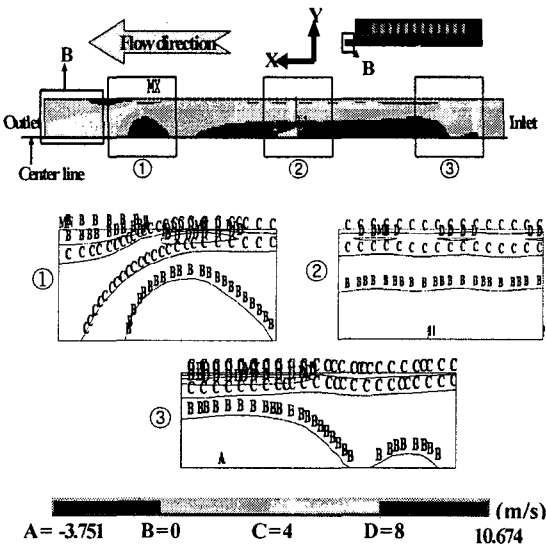


Fig. 11 Velocity distribution of x direction with phase difference 30 degree ($t=30sec$)

Fig. 10 은 전자기장 해석을 통해 얻은 펌프 내의 열 발생량으로 최대 값 $1.47 \times 10^9 W/m^3$ 의 값을 가지며, 열 발생량이 $10^6 W/m^3$ 이상이 되는 영역이 슬리브(자속 밀도(Fig. 9(a))의 집중 되는 영역)부근 입을 확인 할 수 있다. (Fig. 10 의 B 영역은 Fig. 8 의 B 영역을 의미 한다.)

Fig.11 은 30sec 일때 속도(V_x)를 나타낸 그림이다. 최고 속도는 $10.674m/s$ 로 자기장(Fig. 9(a))이 집중 되는 슬리브 근처이다. - 값은 역류가 발생함을

나타내고 역류의 최대값은 $-3.751m/s$ 이다. 역류의 발생이유는 교류 전류와 위상차에 의해 발생된 자기장의 방향의 변화 때문이라고 사료된다.

Fig. 12 는 온도 분포를 나타낸 것으로 입구부 ($709^{\circ}C$)에서 출구부($740^{\circ}C$)로 갈수록 온도가 증가함을 관찰 할 수 있다. 출구부로 갈 수록 온도가 증가 하는 이유는 슬리브 근처의 자기장 집중부분에서 발생한 열(Fig. 10)이 유동(Fig. 11)에 의해 출구부로 이동 하기 때문이다.

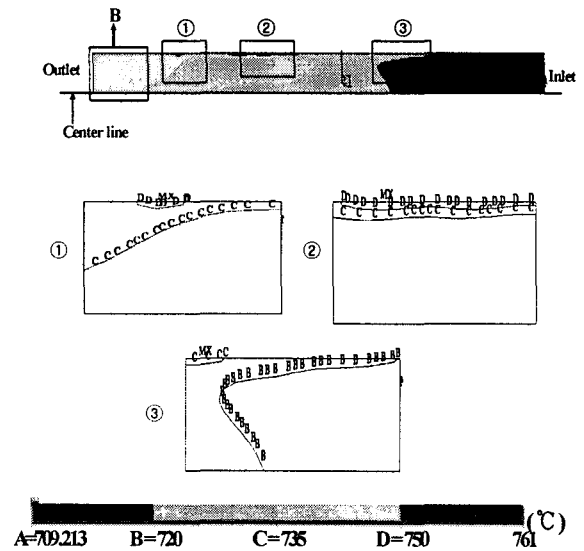


Fig. 12 Temperature of phase difference 30 degree ($t=30sec$)

Fig. 13 은 시간에 따른 온도와 속도의 변화를 알아 보기 위해 입구부 3(1, 2, 3)개지점 출구부 3(4, 5, 6)개지점을 선정하였다.

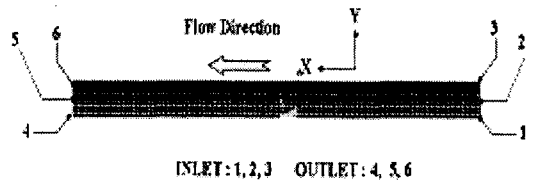


Fig. 13 The selected node to compare inlet nodes' temperature and velocity and outlet nodes' temperature and velocity

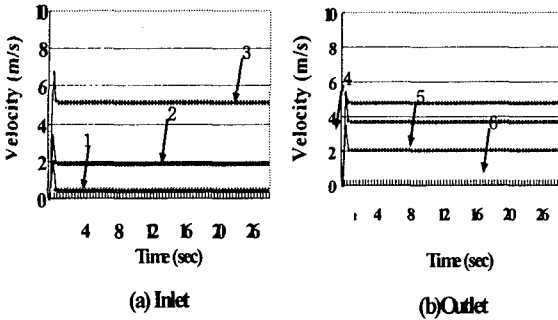


Fig. 14 Variation of x direction velocity according to time

Fig. 14는 Fig. 13의 6개의 지점들을 시간에 따른 속도 변화를 나타낸 그림으로 입구부의 속도는 전자기장 펌프 내 중심부의 역류로 인한 영향으로 유동의 흐름이 원활하지 않은 1(0.2m/s)지점, 2(2m/s)지점, 중심부의 역류와 전자기장의 측면 자극에 의한 영향으로 전자기장 펌프 내의 +x 방향으로 유입되는 부분의 감소로 유입속도의 측면 지점(3(5m/s)지점)이 최대 속도가 나타난다. 출구부는 펌프 내 중심부분의 역류에 의한 공간 감소(역류가 발생 하는 부분)에 의한 영향을 받는 알루미늄 용탕(+x 방향으로 흐르는 유동)이 다시 공간의 확대(역류가 발생 하지 않는 부분)에 의한 영향으로 출구부 4(4.9m/s, 중심부)지점이 최대 속도를 가지게 되며 6(2m/s, 슬리브 근접 부분)지점은 슬리브에 의한 영향으로 출구부 속도가 최소가 된다.

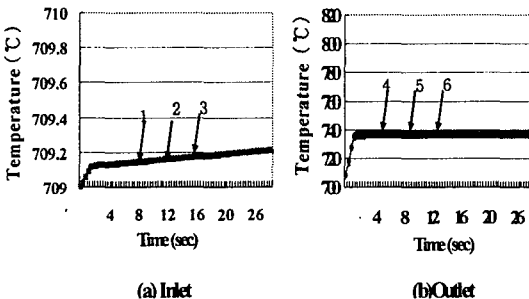


Fig. 15 Variation of temperature according to time

Fig. 15는 Fig. 13의 6개의 지점들을 시간에 따른 온도 변화 그래프로 나타낸 것이다. 입구부의 온도는 위치에 따라 온도차이가 거의 나지 않으며

초기 온도(709° C)로부터 시간에 따라 거의 변화가 없었다. 출구부에서는 위치에 따라서 온도변화가 거의 없고 초기 온도(709° C)로부터 약 31° C 정도 상승하였다.

Table 5는 코일 감은 수와 진동수가 일정 할때, 4m/s가 되는 전류 값(전자석 간의 위상차 P1(30°): 전자석 간의 위상 차에 의해 발생하는 유속이 약 110A, P2(60°):160A, P3(120°): 240A)을 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다.

출구속도에 관해서 P1(30°)조건에서 다른 조건에 비해 작은 전류를 소모하여 4m/s(목표속도)이상의 속도를 얻을 수 있었다. 이러한 결과의 이유는 전자석들 간의 위상차가 작아서 발생하는 자기장 방향 변화로 인한 속도 방향의 변화가 작기 때문이라고 사료 된다.

출구온도에 관해서 P2(60°)조건에서 높은 온도 값이 나타난다. 이러한 결과의 이유는 온도 상승에 영향을 주는 자속 밀도 때문이며, Fig. 9의 결과로부터 (b) P2(60°) 조건의 자속 밀도가 다른 조건 보다 높다는 것을 확인 할 수 있다.

4. 결론

ANSYS MULTIPHYSICS를 이용한 전자기장, 열, 유동 해석을 통하여 알루미늄 재생 장치개발을 위한 조건 도출을 위하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 입력 전류의 위상각의 변화는 자기장을 발생시키고 자기장은 유동의 속도와 온도에 영향을 미침을 알 수 있었다.
- 2) 용탕의 속도는 자기장이 집중 되는 곳에 최고 속도가 발생하며 자기장의 방향 변화는 역류의 원인이 됨을 알 수 있었다.
- 3) 용탕의 온도는 유동의 흐름과 자기장이 집중으로 인한 열 발생에 영향을 받는다. 출구온도에서 위상차이가 60° 일 때 가장 높은 온도 값이 나타남을 알 수 있었다.
- 4) 위상차와 전류 값과의 관계에서는 목표 속도 4m/s에 근접하는 데 가장 작은 전류를 소모하는 전자석 간의 위상차이가 30° (P1(30°))임을 알 수 있었다.

Table 5 Result arrangement for each condition

Analysis results	Unit	Phase difference		
		P1(30°)	P2(60°)	P3(120°)
Input current (I)	A	110	160	240
Maximum magnetic density (B)	Wb/m ²	29.057	43.2	31.42
Maximum velocity	m/s	10.674	18.46	23.55
Maximum reverse velocity	m/s	-3.751	-11.62	-14.81
Inlet Velocity (Fig.13 location 1)	m/s	0.2	0.2	0.44
Inlet Velocity (Fig.13 location 2)	m/s	2	2	1.87
Inlet Velocity (Fig.13 location 3)	m/s	5	5.8	5.4
Outlet Velocity (Fig.13 location 4)	m/s	4.9	4.8	4.17
Outlet Velocity (Fig.13 location 5)	m/s	3.8	4	3.6
Outlet Velocity (Fig.13 location 6)	m/s,	2	2.2	2.46
Outlet Temperature(T)	°C	740	810	762

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

1. Karl, H. S., Mathias, D. and Klaus, S., "Rotational Electromagnetic Stirring in Continuous Casting of Round Strands," Metallurgical Transactions B, Vol. 17B, pp. 119-521, 1986.
2. Fawwaz, T. Ulaby, "Fundamentals of Applied Electromagnetics," Kyobo, pp145-147, 2001.
3. Choi, Dong-Hyuk and Kim, Jae-Woong, "A study on the numerical Analysis of Magnetic Flux Density by a Solenoid for MIAB Welding," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 18, No.12, pp73-81, 2001.
4. Han-Gyu, "Engineering Electromagnetics," Hee-jung-dang, pp311-325, 1990.
5. Park, Song-Bae, "New Circuit Theory," Moon-woon-dang, pp93-99, 1998.
6. Moros, A. and Hunt, J. C. R., "Recirculating flows in the cross-section of a channel induction furnace," Int. J. Heat Mass Transfer, Vol.31, No.7, pp.1500-1501, 1998.
7. Physics compilation committee of Pusan National University, "General Physics," Bando, pp.730-732, 1999.
8. Jean-Luc, M., Francis, D., Rene, R. and Charels, V., "Steady Flow of Liquid Aluminum in a Rectangular-Vertical Ingot Mold, Thermally of Electromagnetically Activated," Metallurgical Transactions B, Vol. 15B, pp471-472, 1984.