용탕 회전력 생성장치의 설계에 관한 연구

이준호*

(논문접수일 2011. 08. 21, 수정일 2011. 11. 17, 심사완료일 2011. 12. 29)

A Study on the Design of a Rotational Force Generator for Molten Metal

Jun-Ho Lee*

Abstract

A rotational force generator for molten metal is developed using a linear motor design technology. Also, the developed device is applied to reproduce aluminum scraps and easy to control the rotate, stop, and forward and reverse rotation of molten metal. In addition, the developed device improves the melting speed and reproduction rate about 250 (%) and 96-99 (%), respectively, compared to the conventional handmade methods. Because it generates almost no dusts, it can improve working environments in a factory. Also, it has no losses in energy because it directly melts scraps. The device generates small amounts of the loss in refractory materials and aluminum caused by its oxidation because the molten metal is continuously rotated in which the loss and oxidized aluminum are the problems in the conventional melting and holding furnaces. Thus, it is possible to extend the life of furnaces and to produce high quality aluminum products.

Key Words : Molten metal(용탕), Linear motor(리니어 모터), Aluminum scraps(알루미늄 스크랩), Handmade methods(수작업 방식), Melting and holding furnaces(용해 보온로)

1. 서론

알루미늄은 자동차 반도체 건설 전자 전기 등 현대 산업사회의 각 분야에 영향을 미치는 고부가 소재산업으로 그 중요성은 지속적으로 높아가고 있다. 알루미늄은 지각을 구성하는 원소 가운데 산소 규소 다음으로 다량 존재하고 금속으로 추출하여 활용하기 시작한 것은 19세기 초이다⁽¹⁾. 오늘날 알루미늄 용재는 대형 승용차 휠이나 기타 여러 방면을 거쳐 그 사용량이 늘어나고 있다^(2,3). 사용 증가에 따라 가공과정에서 발생하는 알루미늄 폐자재인 스크랩의 양도 늘고 있다. 우리나라 한해에 소요되는 알루미늄이 100만 톤인 것에 비하여 스크랩은 약 7만 톤 정도 발생하는 것으로 보고되고 있다. 이 스크랩을 그냥 폐

기하는 것이 아니라 효율적으로 재생하는 것이 세계적으로 중요한 과제로 대두되고 있다^(4,5). 스크랩을 재생하는 것과 원석에서 알루미늄을 제조하는 것을 금액으로 상호 비교하면 재생하는 것이 원석으로 제조하는 것의 3(%)의 비용만으로 생산이 가능한 것으로 알려져 있다^(5,6). 알루미늄 스크랩을 재생해야 하는 것은 생산 에너지 소요 금액을 볼 때 상당히 수익성이 높은 산업인 것을 알 수 있다⁽⁷⁾. 일반적으로 알루미늄 스크랩을 재생하기 위해서 용해로를 사용하고 있다⁽⁸⁻¹¹⁾. 그러나 알루미늄 스크랩을 용해로에 투입해 보면 여러 가지 문제가 발생하고 있다. 가루에 가까운 스크랩이 섭씨 700(°C)의 용탕 위로 투입하면 용탕 열기에 녹아 내부로 빨려 들어가면서 자연스레 용해될 것으로 생각하지만 실체는 그렇지 않다. 투입된 스크랩이

* 한국폴리텍I대학 서울정수캠퍼스 LCD반도체시스템과 (leeyj@chol.com)
주소: 140-823 서울 용산구 보광동 238

몽쳐서 시커멓게 타거나, 위에 똥똥 뜨고 적체된다. 이렇게 되면 스크랩이 표면에 잔류하게 되어 산화 정도를 높하게 되므로 재료의 회수율은 급격하게 저하된다^(12,13). 스크랩이 너무 미세하면 용탕 내부로 혼합되기 전에 용탕 위에서 시커멓게 산화되어 엉켜버리는 문제도 있다. 스크랩 재생업체가 이 문제를 해결하기 위해서 작업자가 투입되는 스크랩을 쇠 파이프 같은 도구를 사용하여 휘저어 준다. 조금 개선된 방법으로 지게차에 간이로 만든 기계 장치를 장착하여 스크랩을 강제로 밀어 넣고, 흔들어 용해한다. 작업자가 용탕 내부를 휘젓는 방법은 산화 비율을 낮추지 못하고, 작업과정에 용탕이 튀어나와 인명에 대한 산업재해를 유발하고 있다. 쇠파이프 같이 휘젓는 도구가 조금씩 녹아 들어가기 때문에 용탕 품질도 저하된다. 지게차를 응용하는 간이 기계 장치는 신뢰성도 떨어지고, 주기적인 유지 보수 때문에 엉뚱한 비용 문제가 발생하게 된다. 국내에 산재한 스크랩 재생 전문 기업은 대부분 영세하므로 기존의 작업 방식을 고수하고 있다. 회수율은 55~75(%) 정도에 불과하며 절삭유를 회수하지 못하므로 환경오염 문제도 있다. 따라서 이 문제를 해결할 수 있는 획기적인 기술 개발이 필요하다⁽¹⁴⁾.

2. 문제점 해결을 위한 제안

이미 일본의 M사가 일본 굴지의 전기전자 전문 회사인 F사와 합작하여 알루미늄 스크랩을 효과적으로 재생할 수 있는 장치를 개발 완료하였다⁽¹⁵⁾. 국내 C시에 자동차 휠을 생산하는 회사는 Fig. 1의 개발 장비를 수입하여 운영하고 있다. 이 회사에서 이 장비를 사용한 결과 문제가 없는 것으로 알려지고 있으나 단가가 고가라는 단점이 있다. 장비를 개발하기 위하여 검토한 결과 여러 가지 어려움이 예상된다. 이 장비에 대한 개발결과를 일본 신문에 짧게 소개되어 있을 뿐 개발 방법이나 사양을

공개하지 않고 있다⁽¹⁵⁾. 또 다른 문제는 이 장비를 운영하는 자동차 휠 생산 회사는 외부 사람의 접근을 통제하고 있다. 일본 M사 장비운영 매뉴얼 외 개발을 위한 참고 자료는 거의 없다. 용탕을 자동으로 휘젓기 위해서 도체인 용탕을 회전시키는 것이 필요하다. 용탕을 회전시키기 위해서 용탕 투입구 외부는 고정자로 감싸고 용탕은 회전자가 되어야 한다. 용탕을 회전시키기 위한 용탕 회전력 생성장치와 보온로를 개발하여 접목해야 한다. 개발하는 용탕 회전력 생성 장치는 전자계의 상호 작용을 적용한다. 알루미늄 스크랩 재생 작업을 자동화 된 생산체제로 전환할 수 있다. 국내의 알루미늄 로 생산 전문 회사의 축적된 기술과 전기전자 제어기술을 융합하면 유사한 기능을 가진 자동화된 용탕 회전력 생성장치를 개발 할 수 있다⁽¹⁵⁻¹⁸⁾.

3. 용탕 회전력 생성장치 설계

용탕 회전력 생성장치가 포함된 알루미늄 스크랩 재생 시스템은 Fig. 1과 같이 구성한다⁽¹⁵⁻¹⁸⁾. 알루미늄 스크랩을 운반하는 컨베이어와 스크랩의 저장과 철분을 제거하는 호퍼, 원심 분리기 등의 장치는 기존의 제품을 구입하면 된다. 기존의 용해 보온로는 용해한 스크랩용탕을 순환할 수 있는 구조가 아니다. 용탕 회전력 생성장치와 상시 부착이 가능한 보온로를 개발해야 한다. Fig. 2에서 가장 기술적인 개발이 필요한 요소는 용탕 회전력 생성장치임을 알 수 있다. 용탕 회전력 생성장치의 구조에서 용탕 회전에 필요한 전자기력을 인가하기 위해서 기존의 회전형 모터의 형태로 부착하는 것은 불가능하다. Fig. 1을 보면 마치 4극 모터에서 2극을 떼어낸 이상한 형태로 되어있다. 이 구조로 제한이 되는 이유는 보온로 내부의 출구에서 용탕이 용탕투입구로 나오면, 스크랩이 용탕으로 녹아 들어가면서 보온로로 들어간다. 용해로 용탕이 차게 되면 지게차로 출탕구를

Fig. 1 Aluminum scrap reproduction system

열이 용탕을 빼내야 한다. 보온로의 구조가 일반적으로 알려져 있는 사각 형상이 되면 안된다. Fig. 2와 같이 돌출된 둥근 형태의 스크랩투입구를 포함한 형상이 되어야 한다. 용탕 회전력 생성장치는 용탕투입구를 감싸는 형식이 되어야 한다. 회전형 모터를 원주방향으로 1/2 토막 낸 구조가 된다. 용탕투입구와 용탕 회전력 생성장치를 회전형 모터처럼 일체형으로 할 수 없다. 분리형으로 되는 이유는 컨베이어를 통하여 투입되는 스크랩이 바람이나 미세한 진동으로 인하여 보온로와 용탕 회전력 생성장치 사이에 켜질 수 있다. 용탕 회전력 생성장치의 냉각 배관에 대한 주기적인 점검도 필요하다. 스크랩 투입구에서 발산되는 열이 용탕 회전력 생성장치에 전도되는 것을 차단하기 위해 에어 커튼 설비가 필요하다. 따라서 이 설비들에 대한 점검이 주기적으로 필요하므로 분리형으로 구성한다. 이 점을 고려할 때 가장 효과적으로 알루미늄 용탕에 전하력을 인가할 수 있는 방법은 리니어 유도모터 방식으로 판단된다. 리니어 유도모터로 알루미늄 용탕에 전하력의 상호 작용을 이용한 전하력을 인가할 경우 전계 세기와 자장 세기 및 스크랩 크기와 같은 여러 가지 변수에 따라 양상이 다르게 나타난다. 전계와 자계가 수직으로 교차하는 영역에 수평으로 고여 있는 알루미늄 용탕을 강제로 회전시키기 위해서 전기회로와 자기회로의 결합 정도를 고려해야 한다. 이 결합 정도는 Laithwaithe가 제안한 Goodness factor로 리니어 유도 모터의 성능 정도를 표현하는 양으로 식 (1)과 같이 정의된다⁽¹⁴⁾.

$$G = \frac{X_m}{R_2} = \frac{2\mu_o f \tau^2 \sigma_e d}{\pi g_e} \quad (1)$$

여기서, μ_o : 공기의 투자율 (H/m),
 f : 전원주파수 (Hz),
 τ : 극 간격(m),
 σ_e : 등가 전기전도도 [$\varnothing/m$],
 d : 2차 도체 판의 두께 (m)

식 (1)의 G값은 리니어 모터의 주요 설계 파라미터로 기본설계 할 때 적용한다. 식 (1)에서 s를 슬립이라고 할 때 최대 추력

은 sG가 1일 때 발생한다. 슬립이 1.0 ~ 0.5 범위의 저속 리니어 모터는 G는 1 ~ 2의 범위이며 슬립이 0.5 ~ 0인 고속 리니어 모터는 G>3으로 설정한다. 발생 추력과 G와의 관계는 G가 0.2 ~ 1의 범위에서 추력과 속도특성이 수하특성이 있다. 전압 제어성이 양호하므로 반송장치와 같은 저속의 리니어 모터에 적합하다. G가 2 ~ 5의 범위는 도시 경량화 전철과 자기부상열차 등 비교적 고속 리니어 모터에 적합하다. 본 연구에서는 등가 2차 전기전도 σ_e 가 G값 설정에 주요한 변수가 된다. 스크랩 알루미늄 입자인 Al_2O_3 와 알루미늄 용탕의 특성을 Table 1과 같이 분석한다^(2,3).

스크랩을 투입하는 알루미늄 용탕은 700($^{\circ}C$)로 유지되며 밀도는 2,370(kg/cm^2)인 것으로 알려져 있다. 고상에서 밀도는 2,370(kg/cm^2)이지만 온도가 증가함에 따라 용융상태로 되면서 밀도가 감소한다. 전기전도는 고상 알루미늄에서 3.82×10^7 ($\varnothing/m$)이지만 액상에서는 온도가 증가함에 따라 밀도가 감소하여 4.02×10^6 ($\varnothing/m$)가 된다. 점도는 융점에서 급격히 감소하여 700($^{\circ}C$)에서 0.00149(P_{a-s})로 된다. 알루미늄 입자는 융점이 높기 때문에 700($^{\circ}C$)에서 고상을 유지하므로 쉽게 용해되지 않는다. 밀도는 3,970(kg/cm^2)이며 전기전도는 알루미늄 용탕에 비하여 극히 작으므로 본 연구에서는 0으로 한다⁽¹⁶⁾.

4. 용탕 회전력 생성을 위한 리니어 모터 설계

전기장하(electric loading)와 자기장하(magnetic loading)의 적절한 배분이 성능을 좌우한다. 전기장하인 AC와 자기장하 ϕ 은 식 (2)과 식 (3)으로 표현된다.

$$AC = AC_o \left(\frac{S}{F} \right)^{1/(1+\gamma)} \quad (2)$$

$$\phi = \phi_o \left(\frac{S}{F} \right)^{\gamma/(1+\gamma)} \quad (3)$$

여기서, S는 각 극 p의 용량 kVA/p , γ 는 장하분배정수, F는 100Hz의 주파수 $f/100$ 이다. AC_o 와 ϕ_o 는 각각 S/F 가 1일 때 장하이다. 이 값은 기준 전기장하와 자기장하로 장하분배의 기초가 되는 중요한 값이다. 리니어 유도 모터의 전기장하와 자기장하의 관계를 다음 Fig. 2를 이용하여 구하면 식 (4), (5)와 같다.

$$AC = 3.7 \left(\frac{S}{F} \right)^{0.44} \quad (4)$$

$$\phi = 0.127 \left(\frac{S}{F} \right)^{0.56} \quad (5)$$

Table 1 Physical characteristics of aluminum molten metal and alumina

Item	Density (kg/cm^2)	Electric Conductivity ($\varnothing/m$)	Viscosity (P_{a-s})
Aluminum Molten Metal (700 $^{\circ}C$)	2,370	4.02×10^6	0.00149
Alumina Particle (Al_2O_3)	3,970	0	-

장하분배법에 근거하여 리니어 유도 모터의 기본설계를 할 때 주어지는 기본적 사양은 출력 P_{out} (KW), 극수 p , 전압 v_L (v), 주파수 f (Hz), 동기속도 v_s (m/sec)이다. 주파수와 동기속도 및 정격속도는 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$v_s = 2\tau f \quad (6)$$

$$v_n = (1 - s_n)2\tau f \quad (7)$$

여기서, s_n 은 정격슬립, τ 는 극 간격이며 정격주파수는 정격슬립과 동기속도로 설정하므로 식 (6), 식 (7)과 같이 구한다.

$$f = \frac{v_n}{(1 - s_n)2\tau} \quad (8)$$

리니어 유도모터의 효율 η 과 역률 $\cos\phi$ 의 $\eta\cos\phi$ 을 대입하면 입력용량 kVA , 선 전류 I , 각 극 용량 S , 비용량 C 을 계산할 수 있다.

$$kVA = \frac{P_{out}}{\eta\cos\phi} \text{ (kVA)} \quad (9)$$

$$I = \frac{kVA}{\sqrt{3} \times V_L} \text{ (A)} \quad (10)$$

$$S = \frac{kVA}{p} \text{ (kVA)} \quad (11)$$

$$C = \frac{S}{f \times 10^{-2}} \quad (12)$$

각 극당 자속 ϕ 는 식 (5)로 부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = 0.127 \left(\frac{S}{F} \right)^{0.56} \times 10^{-2} \text{ (Wb)} \quad (13)$$

1차 철심의 슬롯에 분포되어 있는 각 극당 장하 AC 는 식 (4)를 이용하여 식 (14)과 같이 된다. 이 식에서 임의의 상인 m 상에 대한 직렬 턴 수 N_{ph} 을 구하면 식 (15)과 같이 된다.

$$AC = 3.7 \left(\frac{S}{F} \right)^{0.44} \times 10^3 \text{ (A)} \quad (14)$$

$$N_{ph} = \frac{pAC}{2mI} \text{ (turns)} \quad (15)$$

각 극에 대한 매상의 슬롯수를 q 로 할 때 1개의 슬롯 당 턴수 N 은 식 (16)과 같이 된다.

$$N = \frac{N_{ph}}{pq} \quad (16)$$

자기비장하 B_{gm} 와 1차측 주요 치수를 결정하기 하기 위하여 공극의 이동자계 분포를 정현적이라고 가정한다. 자기비장하를 고려한 각 극당 자속 ϕ 는 식 (17)과 같다. 극 간격과 1차 철심의 유효 폭 h_i 의 τh_i 는 식 (18)과 같다.

$$\phi = \frac{2}{\pi} \tau h_i B_{gm} \times 10^{-4} \text{ (wb)} \quad (17)$$

$$\tau h_i = \frac{\phi \times 10^4}{\frac{2}{\pi} \times B_{gm}} \text{ (cm}^2\text{)} \quad (18)$$

따라서 1차 철심의 유효 폭 h_i 는 식 (19)과 같다.

$$h_i = \frac{\tau h_i}{\tau} \text{ (cm)} \quad (19)$$

(a) Electric loading

(b) Magnetic loading

Fig. 2 Loading distribution in a linear induction motor

슬롯 내 도체의 전류밀도 J_1 (A/mm^2)을 일반적으로 3~5 (A/mm^2) 정도의 범위로 두면 도체의 단면적 Δ_c 는 식 (20)과 같이 된다.

$$\Delta_c = I_1 / J_1 \quad (mm^2) \quad (20)$$

상품화된 규격도체에 따라 식 (20)의 면적은 약간 변경될 수 있다. 도체가 슬롯 내부에서 차지하는 면적을 나타내는 점적비율 S_f 은 도선의 종류와 전압에 따라 변화가 크다. 도체를 수용하기 위한 슬롯면적 A_s 는 식 (21)과 같다.

$$A_s = A_o / S_f \quad (mm^2) \quad (21)$$

슬롯 면적이 구해지면 슬롯 폭과 슬롯 깊이를 결정하기 위하여 슬롯 피치에 대한 슬롯 폭 비율 k_t 을 식 (22)과 같이 결정한다.

$$k_t = \frac{W_s}{t_s} \quad (22)$$

k_t 는 자기 비장하와 최대 자속 밀도 값에 따라 결정한다. 일반적으로 0.6~0.75 사이에 설정한다. 슬롯 폭 W_s 는 식 (23)으로 결정한다.

$$W_s = \frac{k_t \times \tau}{mq} \quad (mm) \quad (23)$$

슬롯깊이 d_s 는 식 (23)을 이용하여 식 (24)과 같이 구한다.

$$d_s = A_s / W_s \quad (mm) \quad (24)$$

코어-백 부분의 두께 d_c 는 1차 철심의 유효 폭 h_i 관계를 이용하여 식 (25), (26)와 같이 구한다.

$$d_c h_i = \frac{\phi/2}{l_m \times B_c} \quad (25)$$

$$d_c = \frac{d_c h_i}{h_i} \quad (26)$$

여기서, l_m 은 철심의 적층비율이며, B_c (T)는 코어 내부의 자속밀도이다. 공극의 길이 g 는 기계적인 조건이 허용하는 한도 범위에서 작을수록 좋다⁽¹⁶⁾. 일반적으로 소형 리니어 유도 모터의 경우 $1.5mm < g < 3mm$, 차량추진용일 경우 $5mm < g < 15mm$ 이다⁽¹⁴⁾. 단부효과 영향을 경감하기 위한 모터길이 L 은

식 (27)으로 결정할 수 있다.

$$L = (0.017 \sim 0.024)v_n + 1.0 \quad (m) \quad (27)$$

여기서, v_n 은 정격속도로 단위는 (km/h)이다. 모터길이는 모터 장착방법에 따라 제약을 받는다. 모터길이에 직접 관계가 되는 극수 p 는 소형 리니어 모터는 4이고, 차량 추진용은 $6 \leq p \leq 12$ 로 알려져 있다⁽¹⁴⁾.

5. 제안한 시스템의 제작 및 실험

5.1 용해로용 리니어 유도 모터의 제작

알루미늄 용탕을 회전하기 위한 용해로용 리니어 유도 모터는 일반 리니어 유도 모터와 다르다. 2차측이 알루미늄 용탕으로 된 도체로 구성되어 있다. 자기 비장하인 각 극 자속밀도를 일반 리니어 유도 모터처럼 크게 할 수 없다. 각 극 자속밀도를 매우 낮게 설정해야 한다. 2차측을 일반 리니어 모터처럼 크게 할 수 없으므로 기존의 유도 전동기 고정자를 이용하여 설계한다. 리니어 유도모터의 효율 η 과 역률 $\cos\phi$ 에 대한 $\eta\cos\phi$ 은 차량 추진용의 경우 0.4, 소형 반송용은 0.2이하이다⁽¹⁴⁾. 본 연구에서 $\eta\cos\phi$ 을 계산한 결과 0.25532922가 도출되어 반송용에 가까운 값으로 설정한다⁽¹⁶⁾. 이 값을 식 (9), 식 (10)에 대입하여 계산한 결과 용량은 61.2(KW), 입력전류는 교류 170 (A)이다. 주파수는 인버터를 이용하여 1~5(Hz)의 범위로 가변한다. 식 (11), (12)을 이용하여 각 극 용량 S 와 비용량 C 에 관한 값들을 구한다. 용해로용 리니어 모터가 최적의 조건으로 알루미늄 용탕을 회전하기 위하여 식 (9)과 식 (10)에서 구한 전압, 전류와 주파수를 가변한다. 용탕의 회전 방향도 변경할 수 있는 인버터는 다음 Fig. 3과 같이 운영한다.

또한 전기장하인 AC 와 자기장하 ϕ 을 구하기 위하여 장하분배정수는 반송용 리니어 유도모터에 가깝게 γ 을 1.27로 설정하여 식 (4), 식 (5)로 구한다. 공극자속밀도의 최대값인 자기비장하는 일본 M사와 같이 0.052(T)로 설정하여 극당 면적을 구한다. 극 간격과 축 방향 길이를 결정하기 위하여 고정자 지

Fig. 3 Molten metal rotation variable inverter for voltage, current, and frequency

름과 축 방향 길이의 비율을 조사했다. 그 결과 고정자 내경과 축 방향의 비율은 3, 5, 10, 15, 20 이다. 유도기의 경우 각각 1.69, 1.44, 1.4, 1.2, 1.03으로 조사되었다. 본 연구에서는 평균 값에 해당하는 1.35를 선택하여 극 간격 τ 와 축 방향 길이를 계산한다. 리니어 유도모터의 기계적 공극에 대한 극 간격 비율인 τ/g 는 20~25의 범위를 두고 설계한다. 기계적 공극 기준이 설정되면 단부 효과를 경감하기 위한 모터의 길이와 극수를 고려하여 극 간격을 산정한다. 차량 추진용 리니어 유도 모터는 효율이 높아야 하므로 정격슬립을 0.15~0.3의 범위에 둔다⁽¹⁶⁾. 용해로용 리니어 유도 모터는 슬립이 작아지면 자기적 흡인력이 급격하게 증가하여 알루미늄 용탕의 등가중량이 늘어난다. 단부효과로 추력이 급격하게 감소할 수 있으므로 정격슬립을 부하 특성에 따라 적절히 선정해야 한다. 개발하는 용해로용 리니어 유도 모터가 수리 또는 점검 후 원래 위치로 복귀가 되지 않으면 심각한 문제가 발생할 수 있다. 기구적인 클램퍼 장치를 사용하여 항상 동일한 위치에 고정될 수 있도록 제작한다. 리니어 모터의 권선 전류밀도는 알려진 3~5(A/mm²) 값에서 그 중간 값을 선택한다. 도체 1개당 피크 전압 값 42.38(V), 소요전력 5.1(KW)인 점을 고려하여 식 (20)과 같이 계산한 소수점 단위까지 적용하는 것은 문제가 있다. 본 연구를 위하여 별도 제작 할 경우 상승되는 가격 부담 때문에 시중 제품을 선택한다⁽¹⁶⁾. 가장 가까운 시중 제품인 코일 내부 폭은 11(mm), 코일 두께는 10(mm)으로 선택한다. 절연레벨을 H종으로 절

연체 두께는 0.018(mm)로 하여 다음 Fig. 4, 5와 같이 권선 작업을 한다.

이 값을 근거로 도체의 총 단면적을 계산하면 2.08×10^4 (cm²)가 된다. 리니어 유도모터의 슬롯 단면적은 도체의 점적 비율을 0.5로 설정하여 제작한다.

조립을 고려하여 각 소요 조립품은 레이저로 가공한다. 조립품에 붙은 가공 찌꺼기는 줄 작업으로 제거한다. 또한 용해로용 리니어 유도 모터는 공차를 최소화 하기 위하여 수작업으로 조립한다. 이 과정을 거쳐 완성한 용해로용 리니어 모터의 외관은 다음 Fig. 6과 같다.

개발한 보온로 본체는 구조용 강판 SS41과 구조용 형강으로 제작하여 열응력에 견딜 수 있게 한다. 절단과 절곡 부위를 최소화 하여 용접 작업을 적게 한다. 입구 덮개와 가스 배출구를 포함한 전체 높이는 1,800(mm)이며 스틸 플레이트는 SS41으로 47.5톤, 앵글은 50×50×5t, 찬넬은 100×50×5t가 소요되었다. 완성품은 다음 Fig. 7과 같다.

투입되는 스크랩을 용해하는 가장 효과적인 방법을 찾아야 한다. 회전하는 용탕이 용탕투입구 돌출 부분에서 솟구쳐 올라 스크랩을 덮어 버리고, 관성의 힘으로 회전하는 것이 가장 이상적인 방법이다. 용탕투입구의 돌출 형상은 이미 다양한 특허기술로 등록되어 있다⁽¹⁶⁾.

검토한 결과 Fig. 8의 (b)와 (c)는 특허기술이 충돌하므로 적용할 수 없다. Fig 8의 (a) ▽ 형식은 본 연구에서 개발한 방법

Fig. 4 Coil winding

Fig. 6 Finished linear motor for a furnace

Fig. 5 Slot fabrication

Fig. 7 Finished holding furnace

이다. 용탕 회전 방향을 좌우로 사용할 수 있으며 흐름도 원활하다. 다음 Fig. 9와 같이 ∇ 형식을 채택하여 제작한다.

시운전을 위하여 설치한 현장은 경남 함안군 K사의 생산 공장이며 다음 Fig. 10은 현장에 설치가 완료된 상태이다.

경남 함안군 K사의 사용 전압이 360(V)인 관계로 인버터 사용전압인 460(V)로 맞추기 위하여 승압 변압기를 사용한다⁽¹⁶⁾.

Fig. 8 Molten metal flow for the projection inlet type

5.2 실제 생산에 적용한 결과

1.5톤의 인코트를 녹여 용탕을 만들고 다음 Fig. 11과 같이 재질이 AC~4CH 스크랩을 투입하면서 용탕을 회전시킨다.

용탕이 회전하는 형상은 다음 Fig. 12와 같다.

이 Fig. 12에서 용탕투입구의 돌출 ∇ 형상을 중심으로 용탕이 회전하는 것을 볼 수 있다. 예상했던 것처럼 용탕의 회전 방향을 정역으로 변경하더라도 용탕이 투입된 스크랩을 완전히 덮고 회전하는 것을 볼 수 있다. 시운전할 때 예상보다 회전 속도가 너무 빨라 용탕이 넘칠 우려가 있어 시운전을 중지하였다. 스크랩이 녹은 용탕은 출탕구를 통하여 조금 출탕한 다음 시운전을 계속할 수 있었다. 시운전하기 전에 용탕투입구에 불

Fig. 9 Shape of the projection inlet of molten metal

Fig. 10 Scrap melting system installed at a site

Fig. 11 AC~4CH scraps

순물이 있었다. 이것은 보온로에 제작과정에서 붙어 있던 찌꺼기가 용해된 것으로 판단된다. 용탕회전장치의 전원을 끈 상태에서 불순물을 쇠 파이프로 건져내고, 작업자가 쇠 파이프를 그대로 둔 상태에서 전원을 투입하게 되었다. 그 순간 불순물 제거용 쇠 파이프가 엄청난 속도로 회전하게 되어 대형사고로 이어질 뻔하였다. 급히 용탕회전장치의 전원을 끄고, 시운전을 정지하는 사태가 벌어졌다. 현재 이 장비는 아무런 문제없이 생산에 계속 적용하고 있다. 쇠 파이프 회전사건이 전화회복 기회가 되어 이후 주변에는 어떠한 도해도 두지 않게 되었다. 일본 M사 제품도 더 높은 회전력을 만들 수 있음에도 불구하고 안전을 고려하여 0.0300(T) 정도로 개발한 것이 아닌가 짐작해본다. Fig. 13은 보온로 내부에서 용해된 용탕이 순환하는 동영상상을 캡처한 것이다.

용탕투입구로 용탕이 흘러 들어가고, 용해된 스크랩이 용탕이 되어 회전력으로 보온로에 빠져 나오는 것이다. 동영상인 아닌 탓에 Fig만 보면 상당히 안정된 상태로 머물러 있는 것으로 생각할 수 있을 것이다. 실제로 아주 다이내믹하게 순환하고 있다. 아쉬운 점은 용탕이 너무 뜨겁고 위험하여 전압, 전류, 주파수를 가변했을 때 일반 회전모터처럼 가변속도를 정량적으로 측정할 수 없는 것이다. 이 장치를 현재까지 운영한 K사에서 는 재료 회수율이 96(%) 이상 되므로 개발금액과 전기요금은 3년 정도 지나면 완전히 회수 할 수 있을 것으로 판단하고 있다.

Fig. 12 Circulation of molten metal in a holding furnace

Fig. 13 Rotating molten metal

6. 결 론

용탕 회전력 생성장치를 이용하여 알루미늄 스크랩을 재생한 결과 수작업 방식에 비교하여 도출된 효과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 기존의 수동 방식에 비하여 용해 속도는 약 250(%) 향상되었고, 재생 비율은 96-99(%) 향상되었다.
- (2) 로 내부의 분위기 온도가 기존의 용해로에 비해 100~200(°C)정도 낮게 사용하고, 용탕이 연속 회전하므로 내화물 산화 로스와 산화알루미늄 발생이 적다.
- (3) 먼지 발생이 거의 없기 때문에 집진 설비가 불필요하고, 공장의 작업환경도 개선 할 수 있다.
- (4) 용탕에 직접 용해하기 때문에 재 용해를 위한 에너지 손실이 거의 없다.
- (5) 용탕 회전력 생성장치가 고온의 온탕과 직접 접촉하지 않으므로 부품 파손과 교환이 거의 없다.
- (6) 용탕 회전과 정지, 정역 회전 방향 변경이 용이하고, 스크랩 투입장치와 용해로의 연동 운전이 가능하다.

참 고 문 헌

- (1) Fukuda, H., Ueno, K., Kamiyama, S., and Oyama, T., 1998, "Study on Active Damper with a Magnetic Fluid," *JSME International Journal Series B*, Vol. 41, No. 4, pp. 822~829.
- (2) Okubo, M., Ishibashi, Y., Oshima, S., and Yamane, R., 1989, "Interfacial Instability of Magnetic Fluid in alternating Magnetic Field," *Transactions of the JSME B*, Vol. 55, No. 518, pp. 66~72.
- (3) Mai, J., Yamaguchi, K., Oshima, S., Yamane, R., and Nakatani, I., 1996, "The Surface Response of a Strong Magnetic Fluid to an Alternating Magnetic Field," *Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference*, pp. 1~6.
- (4) Chantrell, R. W., Bradbury, A., and Charles, S. W., 1982, "Agglomerate Formation in a Magnetic Fluid," *J. Appl. Phys.*, Vol. 53, No. 3, pp. 2742~2744.
- (5) Berkovski, B. M., and Bashtovoy, V. G., 1996, *Magnetic Fluids and Applications Handbook*, Begell House, Inc., New York, pp. 422~471.
- (6) Hughes, W. F., and Young, F. J., 1966, *The Electromagneto dynamics of Fluids*, John Wiley and Sons, New York.
- (7) Hayase, T., and Humphrey, J. A. C., and Greif, R., 1992,

- “A Consistently Formulated QUICK Scheme Fast and Stable Convergence Using Finite volume Iterative Calculation Procedures,” *J. Comput. Phys.*, Vol. 98, Issue 1, pp. 108~118.
- (8) Henoch, C. W, and Meng, J. C. S., 1991, “Magneto Hydro Dynamic Turbulent Boundary Layer Control using External Direct Current Crossed Surface Poles,” *Annual Report IR/IED, Naval Underwater System Center*, TD 800.
- (9) Karniadakis, G. E., and Triantafyllou, G. S., 1989, “Frequency Selection and Asymptotic States in Laminar Wakes,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 199, pp. 441~469.
- (10) Meng J. C. S., 1998, “Engineering Insight of Near Wall Micro Turbulence for Drag Reduction and Derivation of a Design Map for Seawater Electromagnetic Turbulence Control,” *Proc. of the International Symposium on seawater drag Reduction*, pp. 359~367.
- (11) Norbeng, C., 1994, “An Experimental Investigation of the Flow Around a Circular Cylinder : Influence of Aspect Ratio,” *Journal of Fluid Mechanic.*, Vol. 258, pp. 287~316.
- (12) Nosenchuck, D. M., and Brown, D., 1993, “Discrete Spatial Control of Wall Shear Stress in a Turbulent Boundary Layer,” *Proc. Near Wall Turbulent Flows, Elsevier.*, pp. 689~698.
- (13) Persillon, H., and Braza, M., 1998, “Physical Analysis of the Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder by Three Dimensional Navier Stooke simulation,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 365, pp. 23~88.
- (14) Kim. G. T., 2005, “Melting Furnace Designed for the Linear Induction Motor Simulation,” *Changwon National University Research Report*.
- (15) Shinjin Furnace Co., Ltd, 2009, “Aluminum Scrap Melting Torque Producing Device for Playing and Developing a Dedicated Furnace,” *The final report on the development of local industrial technologies in 2009, the Ministry of Knowledge Economy*.
- (16) Korea Polytechnic College, 2009, “Aluminum Scrap Melting Torque Producing Device for Playing and Developing a Dedicated Furnace,” *The final report on the development of local industrial technologies in 2009, the Ministry of Knowledge Economy*.
- (17) Lee. J. H., 2009, “Aluminum Scrap Melting Torque Producing Device for Playing and Developing a Dedicated Furnace,” *KSMTE spring conference*, pp. 113~117.
- (18) Lee. J. H., 2009, “Aluminum Scrap Plays to Automate Tasks,” *KSMTE Fall conference*, pp. 89~92.