

## 용해로용 선형 유도 전동기의 전자기적 특성 해석

김미용\*, 하태욱, 김규탁  
 창원대학교 전기 공학과

### Electro-magnetical Characteristic Analysis of Linear Induction Motor for Melting Furnace

Mi-Yong Kim\*, Tae-Wook Ha, Gyu-Tak Kim

Department of Electrical Engineering, Changwon National University

**Abstract** - A aluminum recycling industry is one of new application of Linear Induction Motor(LIM). As the example, a melting furnace, which is using LIM, to melt conductor which is chipped and scrapped is supposed for the aluminum recycling industry. So, in this paper, the LIM for melting furnace are designed. And a electro-magnetical characteristic of designed model is analyzed by 2D-FEM.

#### 1. 서 론

리니어 모터의 새로운 응용분야 가운데 하나로서 알루미늄등의 리사이클 사업을 볼 수 있다. 알루미늄등의 리사이클 사업은 성에너지화등의 관점에서 국가에서 주도적으로 진행하고 있는 사업으로, 선진국의 경우 알루미늄 음료 캔등의 회수율은 70(%)를 초과하고 있는 실정이다.

알루미늄의 재 용해법은 크게 나누면 반사로로 대표되는 연료로에 의한 용해와 전기를 사용한 저항로 및 유도 로로 나눌 수 있다. 알루미늄은 용해 온도가 낮으므로 가스, 증유 등으로도 충분히 가능하므로 알루미늄 덩어리를 대규모로 용해시키기 위해서는 연료 단가가 낮은 반사소에 의한 용해가 일반적이다. 한편, 전기를 이용한 저항로는 다이캐스트등과 같은 과정에 일반적으로 많이 이용되고 있으며 유도로는 분말, 박막의 슬립재 등의 용해에 많이 이용되고 있다.

그러나, 위에서 설명한바와 같이 분말 용해로에서는 알루미늄의 회수율이 매우 중요하나 현재의 제품들은 회수율이 80(%)미만으로 다소 저조하다. 이는 종래의 메탈 접촉 용해 방식에서는 비중이 가벼운 스크랩재는 용해로 속으로 신속하게 침투하지 못하고 표면에서 쉽게 산화하는 현상이 발생하기 때문이다. 이에 따라 선진 외국에서는 회수율을 90(%)이상으로 높이기 위하여 LIM을 이용한 분말 도체용 용해로를 제안 하였다.

이에 따라, 본 논문에서는 알루미늄 용해로용 LIM을 설계하였고, 이 설계된 모델에 대해 2차원 유한 요소 해석을 수행하여 전자기적 특성을 계산하였고 알루미늄 도체등과 같은 용해로에 LIM의 적용가능성을 확인하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 LIM을 이용한 용해로의 구조 및 특징

LIM을 이용한 알루미늄 분말 용해로는 기존 반사로 용해로에 비해 다음과 같은 장점이 있다.

- 1) 반사소에서 용해가 되지 않았던 칩, 분말, 박막등과 같은 분말 재질에 매우 효율적이다.
- 2) 용해속도가 빨라 용해 시 시간 단축이 되어 경제적

이다.

- 3) 전자력으로 회전력을 발생 시키므로 용해물질의 회전력을 발생 시키기 위한 메커니즘이 없어 보수, 유지가 간단하여 파손 및 교환 부품등이 불필요 하다.
- 4) 용해로내의 용해온도가 균일하여 용융성분이 균일화된다.

그림 1, 2는 LIM을 이용한 용해로의 개략도를 나타낸다.

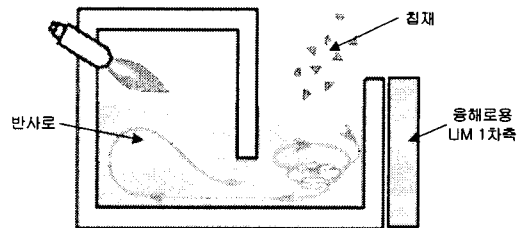


그림 1. LIM을 이용한 용해로의 구조(측면도)

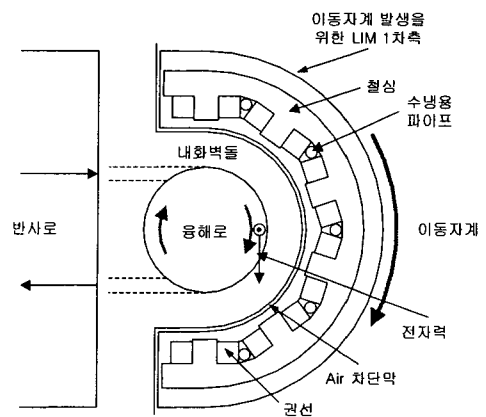


그림 2. LIM을 이용한 용해로의 구조(평면도)

용해로용 LIM의 기존 LIM과는 달리 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 그림 2에서 보는 바와 같이 용해로용 LIM은 2차축이 내화벽돌, 알루미늄등과 같은 비 자성체로만 구성되므로 공극 자속밀도가 기존의 LIM보다 매우 낮다.
- 2) 역률 및 효율이 낮다.
- 3) 1차축 권선은 집중권으로 시행된다.
- 4) 2차 도체가 알루미늄판과 같은 고체가 아니고 용해

물로서 액체와 고체가 공존하는 상태이다.

- 5) 알루미늄 분말등의 용해에 사용되므로 2차측 재질이 매우 경량이다.
- 6) 따라서 알루미늄등의 2차측에 회전력을 발생시키기 위한 LIM 1차측의 입력 전원의 주파수가 매우 낮으면서도 높은 전압을 사용한다.
- 7) 용해로용 LIM은 2차측이 모두 알루미늄등과 같은 비철금속으로 구성되므로 권선의 구조가 변압기처럼 폭이 좁고 높이가 높은 구조로 할 수 없으며 오히려 반대로 폭이 넓고 높이가 낮은 구조로 하여야 한다. 따라서 용해로와의 거리가 짧아져 용해로의 열이 쉽게 전달 되므로 권선의 냉각을 위해 그림 2에서와 같이 수냉용 파이프를 설치한다.

## 2.2 용해로용 LIM의 설계

본 논문의 모델은 효율기가 아니고 알루미늄 회수율을 중요시하는 능률기이다. 따라서 설계 시 효율이나 역율은 낮게 산정될 수 밖에 없다.

용해로용 LIM은 용해물내의 회전력을 얼마나 확보할 수 있는가가 설계 시의 관건이다. 이 회전력은 자속 밀도의 제곱에 비례하므로 용해물내의 자속을 어떻게 확보할 것인가가 설계 시 포인트가 된다. 따라서 LIM 1차측과 용해물의 간격이 가까울수록 좋지만 용해물의 열이 LIM의 1차측에 전달되므로 이 또한 한계가 있어 이를 고려하여 설계가 이루어 져야 한다.

본 논문에서는 장하 분배법에 의해 용해로용 LIM을 설계하였다. 전기장하(electric loading)와 자기장하(magnetic loading)의 적절한 분배가 기기의 성능을 좌우하므로 LIM의 장하 통계와 장하 분배정수를 토대로 설계하였다.

일반 LIM의 경우 공극 자속을 0.2~0.5(T)정도로 설계하는 반면 본 논문의 용해로용 LIM은 2차측이 비자성체로 이루어지므로 0.052(T)로 기존 LIM의 1/4에서 1/10정도로 설계하게 된다. 용해로용 LIM은 일반 LIM보다 전기장하가 매우 커야하므로 슬롯 단면적을 크게 설계하게된다. 따라서, 용해로용 LIM은 1차측 권선을 집중권으로 시행하였다.

또한, 용해로용 LIM은 2차측이 모두 알루미늄등과 같은 비자성체로 구성되므로 권선의 구조가 변압기처럼 폭이 좁고 높이가 높은 구조로 할 수 없으며 폭이 넓고 높이가 낮은 구조로 하여야 한다. 권선 전류 밀도는 수냉식이 적용되므로 이에따른 냉각 효과가 있으므로 일반 변압기 보다 다소 높은 6(A/mm<sup>2</sup>)로 설계하였다.

용해로용 LIM의 직경은 용해로용 로의 직경과 내화벽돌 및 Air 차단막의 설치 공간을 고려하여 설계하였다. 사용 주파수는 5(Hz)로 설계하였다. 그 이유는 주파수가 높아질수록 회전속도는 빨라지지만 너무 빨라지면 용해물이 원심력의 영향에 의해 이탈할 가능성이 있기 때문이다.

표 1은 60(kw)급으로 설계된 용해로용 LIM 모델의 주요 치수 및 제원을 나타낸다.

표 1. 설계된 모델의 주요 치수 및 제원

항 목	값[단위]	항 목	값[단위]
상전압	440[V]	고정자내경	1120[mm]
상전류	98.4[A]	용해실 내경	640[mm]
주파수	5[Hz]	코일 높이	112[mm]
극수 및 상수	2극 3상	코일 폭	112[mm]
축방향 길이	370[mm]	치 폭	127[mm]

## 2.3 특성 해석 및 고찰

설계된 모델에 대해 2차원 유한 요소 해석 특성해석

을 수행 하였다.

다음과 같은 가정을 두어 식 (1)과 같은 유도전동기 유한 요소 해석을 위한 2차원 지배 방정식을 유도할 수 있다.

가. 재질은 등방성이다.

나. 전류 밀도  $\vec{J}_0$ 와 자기벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 는 z축 방향 성분만을 가진다.

다. 변위 전류는 무시할 수 있다.

라.  $\nabla \Phi = 0$  ( $\Phi$ : 전기 스칼라 포텐셜)

$$-\frac{1}{\mu} \left( \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial y^2} \right) + \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} - \vec{J}_0 = 0 \quad (1)$$

여기서  $\mu$ 는 투자율,  $\sigma$ 는 도전율,  $\vec{J}_0$ 는 외부의 입력 전류 밀도를 각각 나타낸다. 식 (1)은 미지수의 개수가 방정식의 개수보다 많으므로, 해를 독립적으로 결정 할 수 없고, 방정식을 풀어 자기벡터 포텐셜과 전류 값을 결정하기 위해서는 여자 전원의 전압 방정식이 보조적으로 필요하다. 키르히 호프 제 2법칙을 이용하여, 권선의 한 상에 대한 회로 방정식은 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$V = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_m \quad (2)$$

여기서,  $R_m$ 은 유한요소 해석영역의 내부저항과 외부 저항의 합성저항,  $L_m$ 은 권선에서 코일 단부의 누설 인덕턴스,  $E_m$ 은 권선에 유기된 유기 기전력을 각각 나타낸다.

식(1)과 식(2)를 결합하여 정리하면 시간 미분항이 포함된 선형 연립 방정식을 얻을 수 있다. 여기에 경계 조건을 적용하여 해석하였다. 시간 미분항을 처리하는 방법은 시간 차분법과 복소 처리법이 있는데 본 논문에서는 시간 차분법을 사용하였다.

### 2.3.1 알루미늄 표면 자속 밀도

다음은 슬립이 0.1 일 때 유한 요소 해석을 통해 얻어진 해석 결과이다.

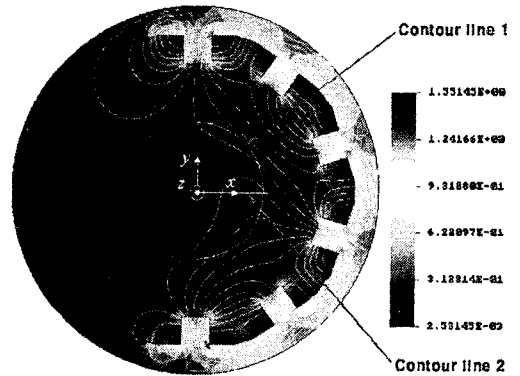
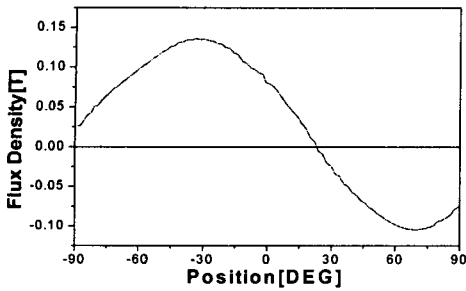


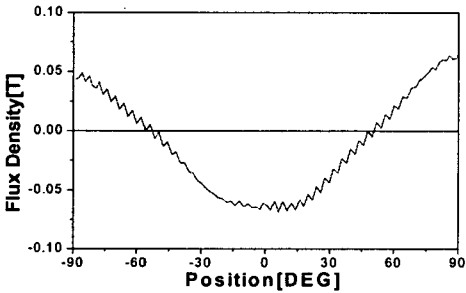
그림 3. 등 포텐셜 라인 및 자속밀도 분포

그림 3은 해석 모델의 등 포텐셜 라인 및 자속밀도를 나타내고 있다. 그림의 결과로부터 2극이 생성된 것을 확인할 수 있고 알루미늄 용해물이 존재하는 영역의 자속 밀도가 낮은 것을 확인할 수 있다.

또한 그림과 같이 슬롯 누설이나 단부에 의한 누설자속이 많이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 이는 일반 LIM과는 달리 용해로용 LIM은 2차측이 순수 비자성체로만 이루어져 있기 때문이다.



(a) Tangential Component



(a) Normal Component

그림 4. 알루미늄 표면 자속밀도 분포

그림 4는 그림 3의 contour line 1에 대해 자속 밀도의 수평, 수직 성분을 나타내고 있다. contour line 1은 반경이 319(mm)이고 -90도에서 90도까지의 반원을 나타낸다.

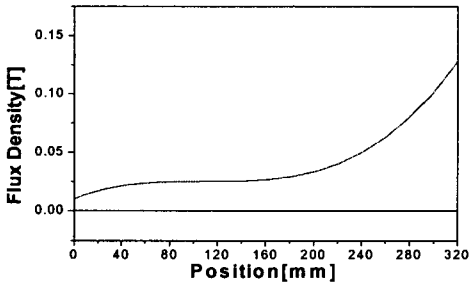


그림 5. 알루미늄 반경 방향 자속밀도 분포

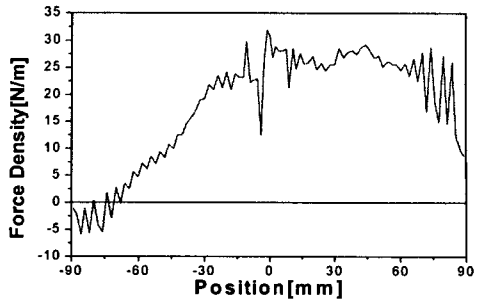
그림 5는 그림 3의 contour line 2에 대해 자속 밀도의 크기를 나타내고 있다. contour line 2는 원점 (0,0)에서 알루미늄 표면 (320,0)까지의 직선을 나타낸다.

해석 결과 설계 시 고려했던 봐와 같이 용해로용 LIM의 경우 기존 LIM에 비해 자속 밀도가 매우 낮음을 확인할 수 있다. 이는 2차측이 알루미늄등과 같은 비자성체로만 이루어져 있고 LIM의 1차측과 알루미늄 용해물과의 간격이 크기 때문이다.

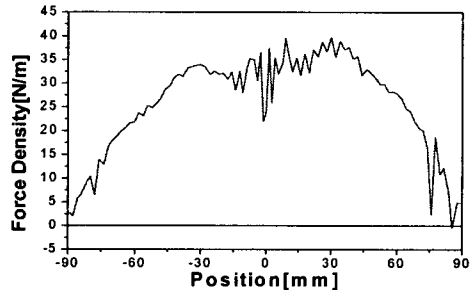
### 2.3.2 알루미늄 표면 힘 밀도

그림 6은 슬립이 0.1 일 때의 알루미늄 용해물 표면, 즉, 그림 3의 contour line 1에서의 힘 밀도 분포를 나

타내고 있다. 힘은 맥스웰 응력법으로 계산하였다.



(a) Tangential Component



(a) Normal Component

그림 6. 알루미늄 표면 힘 밀도 분포

해석 결과 용해로용 LIM의 경우 기존 LIM에 비해 힘 밀도가 매우 낮다. 하지만 본 논문의 모델에서는 이동자가 칩재나 알루미늄 분말등과 같은 경량의 물질들로 구성되므로 힘 밀도가 낮지만 운전에는 전혀 문제없다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 알루미늄 용해로용 LIM을 설계하였다. 이 설계된 모델에 대해 2차원 유한 요소 해석을 수행하여 전자기적 특성을 계산하였고 알루미늄 도체등과 같은 용해로에 LIM의 적용가능성을 확인하였다.

앞으로의 진행과제로 와류 분포가 3차원적으로 분포하는데, 즉, 2차측의 회로가 3차원적으로 구성되는데 이를 어떻게 고려할 것인가와 2차측의 온도 상승에 의해 도전율이 낮아지는 문제, 강체가 아닌 용해물이므로 위치마다 속도가 달라진다. 즉, 위치마다 슬립이 틀린데 이를 어떻게 고려할 것인가하는 문제에 대해 연구할 계획이다. 또한 열해석을 통해 용해물의 흐름, 온도해석도 수행할 계획이다. 그리고, 실제 모델을 제작하고 실험을 통해 해석치를 검증할 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] S.A.Nasar, I. Boldea, "Linear Motion Electric Machines", John Wiley & Sons, 1976
- [2] 박승찬, "유한 요소법과 신경 회로망을 이용한 직선형 유도 전동기의 설계 및 동특성 해석에 관한 연구", 박사학위논문, 한양대 대학원, 1996
- [3] Dal-Ho Im, Seung-Chan Park and Il-Ho Lee, "Inverse Design of Linear Induction Motor for Subway Using Neural Network and FEM", Proc. of LDIA, Japan, 1995.