

## 선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성해석

(Characteristics Analysis of Electromagnetic Pump using Linear Induction Motor)

김창엽\*

(Chang-Eob Kim)

### 요 약

본 논문에서는 선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성 해석에 대하여 제안한다. 전자기 펌프용으로 설계된 선형유도전동기의 특성을 해석하고 이를 실험에 의하여 증명하였다. 선형유도전동기의 특성은 단부효과를 고려한 등가회로법에 의해서 해석하였다. 해석 방법의 증명을 위해서 선형유도전동기의 구속 시험과 용융 주석에 의한 부하 시험에 의한 실험 결과를 시뮬레이션과 비교하였다. 용융 주석을 대상으로 한 실험에서는 공극 30[mm]에서 약 0.24[m/s]의 만족할 만한 속도를 얻었다.

### Abstract

This paper presents the characteristics analysis of electromagnetic pump using linear induction motors. The electromagnetic pump is designed to transfer the molten metals by the electromagnetic force of linear induction motors. The characteristics of a linear induction motor are analysed by the equivalent circuit method considering the end effects. For the verification of the analysis method, the locked test and load test with molten tin were made. The test results of locked test were compared with the simulations, and the velocity of the load test with molten zinc showed 0.24[m/s] with air gap 30[mm] which is sufficient for transferring molten tin.

### 1. 서 론

전자기펌프는 용융 금속을 비접촉으로 이동할 수 있는 특징에 착안하여 폭발성 용융금속을 밀폐해서 이송시키는 원자로의 냉각 매체용 순환 펌프, 제철소 주조 공장에서의 주철, 알루미늄 및 동합금의 주탕 장치로 이용되고 있다[1-4]. 본 연구는 전자 펌프의 일종으로 제철소에서 철의 아연 도금 과정에서 생기는 아연재가 철에 부착하여 철의 품질을 떨어 뜨리는 것을 방지하

기 위하여 선형유도전동기(Linear Induction Motor : 이하 LIM이라 함)의 전자력을 이용하여 용융 아연통의 표면에 떠 있는 아연재(Ash)를 제거하기 위한 것이다. 여기서 용융 금속은 LIM의 2차측으로 작용하며 1차측의 이동자속 방향으로 전자력이 작용하여 힘의 방향으로 용융금속이 흐르도록 고안하였다. 해석 방법으로는 LIM의 2차측이 도체와 자성체(Back-iron)로 구성되었을 경우에 사용된 등가회로법을 도체 부분을 용융 금속으로 대체하여 사용하였다. 용융 금속의 종류, 도체의 깊이 및 이동 속도 등의 변수에 대하여 4극 및 6극 LIM의 특성을 검토하였으며, 구속 실험 및 용융점이 비교적 낮은 용융 주석을 2차측으로 한 부하 시험을 실시하여 시뮬레이션과 비교 검토하였다.

\* 정회원 : 호서대학교 전기공학부  
전기공학전공 조교수  
접수일자 : 1999년 12월 15일

## 2. 선형유도전동기 특성 해석

### 2.1 용융금속 이송 구조

그림 1은 철이 아연 도금되는 과정이다. 용융 금속 통의 온도는 400[°C] 이상, LIM 주변의 온도는 200 [°C] 이상의 고온으로 용융금속 표면과 LIM 사이의 공극이 일반적인 경우보다 충분히 커야 된다. 또한 용융 아연의 도전을 및 투자율이 낮아 2차측 전류와 공극의 자속밀도가 매우 낮으리라 예상된다. 또한 금속 용융통의 깊이가 상대적으로 커서 일반적인 LIM의 자성체(Back-iron) 역할을 기대하기 어렵다.

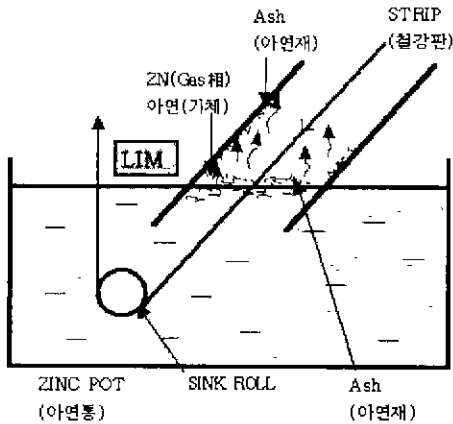


그림 1. 아연 도금 과정  
Fig. 1. Zinc plating process

본 논문에서는 전자기 펌프의 변수인 공극, 용융 금속의 도전을, 용융 금속의 깊이들에 대한 LIM의 특성을 검토하였다. 용융 금속 이송을 위한 LIM의 특성을 고찰하는 데는 등가회로법을 사용하여, 기본적인 특성을 구하였으며 유한요소 프로그램을 사용하여 자속 패턴등을 확인하였다.

### 2.2 등가회로법에 의한 특성해석

그림 2는 전자기 펌프용 LIM의 해석모델이다. 본 해석 모델에서는 1차측 길이와 폭에 비해 2차측인 용융 금속통의 치수가 매우 큰 특징을 가진다. 특성해석은 편축식 LIM의 등가회로법에 의한 해석방법을 사용하였다[5,6]. d1 영역은 자로를 형성하기 위한 자성체며, d2 영역은 일반적으로 알미늄판으로 된 2차측 반작용 평판이지만, 본 해석 모델에서는 용융 금속에

해당한다. 1차측은 성층 철심으로 해석의 간략화를 위하여 투자율은 무한대, 철심내의 철손은 무시하여  $\sigma = 0$  으로 가정하였다.

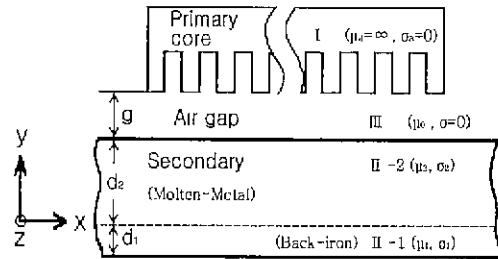


그림 2. 선형유도전동기의 해석모델  
Fig. 2. Analysis model of linear induction motor

#### 가. 표면전류밀도

그림 2의 영역 I에서 전류는 1차 표면전류로 가정하고 z축 방향으로만 흐르며 그 크기는 x축 방향으로 정현적으로 변화하면서 동기속도  $V_s$ 로 이동한다면, 표면전류밀도  $j_l$ [A/m]는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[6,7].

$$j_l = J_m \exp\{j(\pi/\tau)(V_s t - x)\} = J_m \exp\{j(\omega t - (\pi/\tau)x)\} \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 극간격,  $\omega$ 는 각속도,  $J_m$ 은 표면전류 밀도의 최대치로 다음과 같다.

$$J_m = 2\sqrt{2}m \frac{k_w N_{ph}}{p\tau} I_1 \quad (2)$$

$m$ 은 상수,  $\Pi$ 은 상전류의 실효치,  $k_w$ 는 권선계수, 그리고  $N_{ph}$ 는 1상의 직렬 턴수이다.

#### 나. 2차원 해석에 의한 계산

그림 2의 해석모델에 대해 2차측이 슬립  $s$ 로 움직이고 있을 때의 속도  $V_2$ [m/sec]로 주행하는 등방성 도체중의 전자계의 방정식을 벡터 포텐셜  $A$ 를 이용하여 표현하면, 맥스웰의 전자 방정식으로부터 식(3)과 같은 지배방정식이 구해진다[4].

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = \sigma \mu \left( \frac{\partial A_z}{\partial t} + V_2 \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \quad (3)$$

선형유도전동기를 이용한 전자기 펌프의 특성해석

여기서,  $\sigma$ : 도전율,  $\mu'$ : 투자율이고  $A_z$ 는 자기 벡터 포텐셜의 z축 성분으로 2차원 해석에서는 전류 밀도 j1이 z축 방향 성분만을 갖는다고 가정하면 식 (4)와 같이 주어진다.

$$A_z = A_z(y) \exp\{j(\omega t - \pi x/\tau)\} \quad (4)$$

식(3)과 (4)로부터,

$$\frac{d^2 A_z(y)}{dy^2} = A_z \left( \frac{\pi}{\tau} \lambda \right)^2 \quad (5)$$

여기서,  $\lambda = \sqrt{1 + j\sigma\mu_s V_s \tau / \pi}$  이다.

식(5)로부터 자기벡터포텐셜의 해를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$A_z(y) = C \cdot \exp\{(\pi/\tau)y\lambda\} + D \cdot \exp\{-(\pi/\tau)y\lambda\} \quad (6)$$

여기서 식(6)의 계수 C, D는 해석 영역별로 경계조건을 주어서 풀 수 있다.

y=0인 경계에서  $A_z(y)=0$  라고 가정하면 각 영역에서의 해는

(영역 II-1)

$$A_z^{II-1}(y) = 2C_1 \sinh\{(\pi/\tau)y\lambda_1\} \quad (7)$$

(영역 II-2)

$$A_z^{II-2}(y) = C_2 \exp\{(\pi/\tau)y\lambda_2\} + D_2 \exp\{-(\pi/\tau)y\lambda_2\} \quad (8)$$

(영역 III) (도전율  $\sigma=0$ )

$$A_z^{III}(y) = C_3 \exp\{(\pi/\tau)y\} + D_3 \exp\{-(\pi/\tau)y\} \quad (9)$$

$$\text{여기서, } \lambda_1 = \sqrt{1 + j\sigma_{1e}\mu_1 S V_s \frac{\tau}{\pi}},$$

$$\lambda_2 = \sqrt{1 + j\sigma_{2e}\mu_2 S V_s \frac{\tau}{\pi}} \text{ 이다.}$$

표 1은 해석모델의 영역별 경계조건이다.

표 1. 해석 영역별 경계 조건  
Table 1. Boundary conditions of analysis region

경 계	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$ 의 경계조건
y=d1	$A_z^{II-1} = A_z^{II-2}$
y=d1+d2	$A_z^{II-2} = A_z^{III}$
y=d1+d2+g	
경 계	$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}$ 의 경계조건
y=d1	$\frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_z^{II-1}}{\partial y} = \frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A_z^{II-2}}{\partial y}$
y=d1+d2	$\frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A_z^{II-2}}{\partial y} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z^{III}}{\partial y}$
y=d1+d2+g	$\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial A_z^{III}}{\partial y} = J_m$

#### 다. 등가회로 정수

표 1의 경계 조건으로부터 공극에서의 자속밀도는 영역 III에서의 자기벡터 포텐셜로부터 구할 수 있고, Maxwell 방정식으로부터 유품기전력과 등가 회로의 임피던스를 구할 수 있다[6-8]. 그림 3은 단부효과를 고려한 1상 등가회로이다. 여기서,  $x_{2e}'$  및  $r_{2e}'$ 은 단부효과를 고려한 등가 2차 리액턴스 및 등가 2차 저항이다.

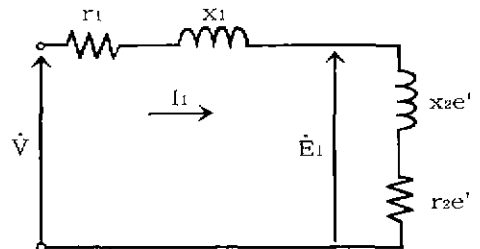


그림 3. 단부효과를 고려한 1상 등가회로  
Fig. 3. Per phase equivalent circuit considering end effects

라. 특성계산식

등가회로에 있어서 1차 단자에서의 전 임피던스  $Z_1[\Omega]$ 은 식(10)과 같이 표현된다.

$$Z_1 = \sqrt{(r_1 + r_{2e}')^2 + (x_1 + x_{2e}')^2} \quad (10)$$

1차 단자 전압  $V_1$ 에 대한 LIM의 특성은 다음과 같이 구할 수 있다.

1차 전류 :  $I_1 = V_1 / Z_1 [A]$

역률 :  $\cos \phi = (r_1 + r_{2e}') / Z_1$

동기과트 :  $P_{el} = m V_1^2 r_{2e}' / Z_1^2 [W]$

추력 :  $F_x = m V_1^2 r_{2e}' / V_s Z_1^2 [N]$

출력 :  $P_0 = (1-s)m V_1^2 r_{2e}' / Z_1^2 [W]$

1차 입력 :  $P_1 = m V_1^2 (r_1 + r_{2e}') / Z_1^2 [W]$

1차 동손 :  $P_{cl} = m V_1^2 r_1 / Z_1^2 [W]$

2차 동손 :  $P_{cl} = sm V_1^2 r_{2e}' / Z_1^2 [W]$

2.3 선형유도전동기 특성 해석

본 연구에 적용된 LIM의 사양은 표 1과 같다.

표 2. 해석 모델의 정격 및 재원  
Table 2. Rating and specifications of analysis model

	4극LIM	6극LIM
선간전압[V]	220	220
주파수[Hz]	60	60
극수	4	6
극간격[mm]	108	72
1차철심적층폭[mm]	80	100
슬롯폭[mm]	8.8	8.8
치폭[mm]	3.2	3.2
슬롯깊이[mm]	47	47
1상당 적철 턴수	480	480
반코일의길이[mm]	206	190
1차 저항[ $\Omega$ ]	3.3575	3.0967
1차누설리액턴스[ $\Omega$ ]	8.1145	8.524
1차축길이[mm]	507	500
선전류[A]	8.6	7.2

그림 4는 슬립 1일 때 2차측이 용융 아연이고 공극이 20[mm]일 때의 6극 LIM의 자속분포도이고, 그림 5는 이때의 공극 자속 밀도의 y성분이다.

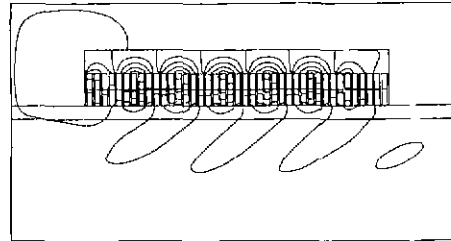


그림 4. 자속 분포  
Fig. 4. Flux distribution

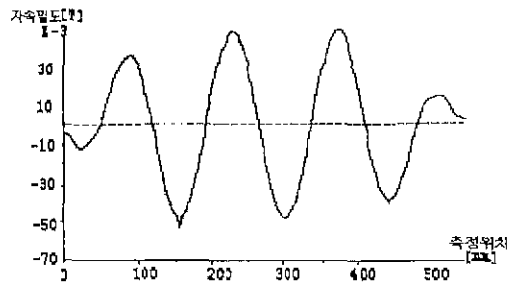


그림 5. 공극 중앙에서의 자속밀도 (y 성분)  
Fig. 5. Magnetic flux density at air gap (y component)

그림 4에서 2차측의 자속 왜형으로부터 2차측의 와전류에 의한 영향을 알 수 있으며 그림 5에서는 공극 자속밀도가 500[Gauss]이하로 일반적인 선형유도전동기에 비해 매우 작음을 알 수 있다. 그림 6은 공극에 따라 2차측 금속의 도전율과 공극에 따른 추력 특성을 나타낸다.

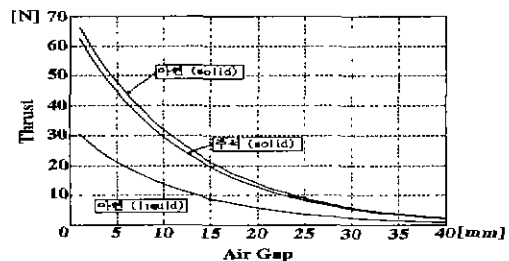


그림 6. 공극에 따른 추력  
Fig. 6. Thrust vs. air gap

해석에 사용된 2차측 도전율은 다음과 같다.

용융 아연의 도전율:  $2.7 \times 10^6 [S/m]$ , 용융 주석의 도전율:  $2.2 \times 10^6 [S/m]$ , 고체 아연의 도전율:  $1.7 \times 10^7 [S/m]$ , 고체 주석의 도전율:  $9.9 \times 10^6 [S/m]$  이다.

해석 결과 2차측의 도전율과 공극이 클수록 추력값이 작아짐을 알 수 있다.

그림 7은 Back-iron을 20[mm]로 일정하게 두고 2차측의 도전율과 2차측의 길이의 변화에 따른 추력특성을 해석한 것이다.

그림 7로부터 2차측 길이가 클수록 추력값이 적어지며 깊이 100[mm] 이상에서는 2차측 길이의 변화에 대한 추력 변동이 거의 없음을 알 수 있다.

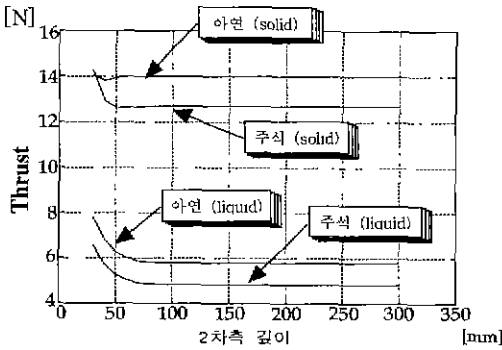


그림 7. 2차측 깊이에 따른 추력  
Fig. 7. Thrust vs. secondary depth

그림 8은 2차측의 도전율 및 슬립 변화에 대한 추력 특성을 나타낸다. 슬립이 작을수록 추력이 작아지는 수하특성을 나타내었다.

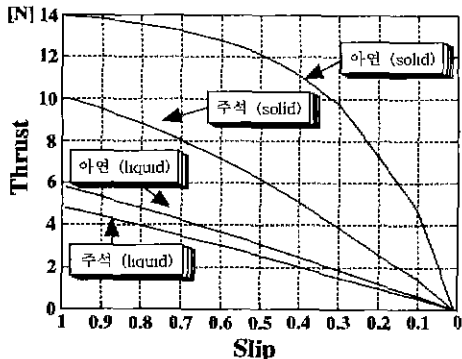


그림 8. 슬립에 따른 추력  
Fig. 8. Thrust vs. slip

### 3. 실험 및 고찰

본 연구에서는 선형유도전동기의 구속실험과 용융 금속 이송 실험을 실시하여 시뮬레이션으로 구한 값과 비교, 검토하였다.

#### 3.1 선형유도전동기 구속실험

그림 9는 LIM의 구속 실험 장치이다. AC 3상 220[V]를 슬라이더스로 전압을 서서히 LIM에 인가하며 추력, 전류 및 자속밀도를 특성치를 측정하였다. 2차측을 로드셀에 고정시키고 로드셀에 걸리는 추력을 인디케이터(Indicator)에서 표시할 수 있도록 실험장치를 구성하였다.



그림 9. LIM 구속실험 장치  
Fig. 9. Lock test apparatus of LIM

그림 10은 전압에 따른 6극 LIM의 추력 특성이다. 여기서 2차측은 철판6[mm], 알루미늄 2[mm]로 구성되어 있으며 공극은 4[mm]로 실험을 하였다. 실험결과는 시뮬레이션과 거의 일치함을 확인할 수 있었다.

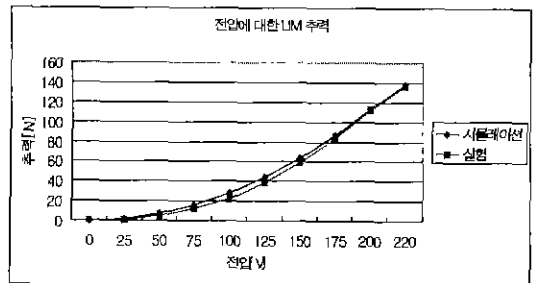


그림 10. 6극 LIM의 전압에 대한 추력(공극4[mm])  
Fig. 10. Thrust vs. voltage of 6 pole LIM at air gap 4 [mm]

그림 11은 공극 4[mm]일 때의 6극 LIM의 선전류를 측정된 값이다. 전압 220[V]에서 7.2[A]로 거의 일치함을 볼 수 있다.

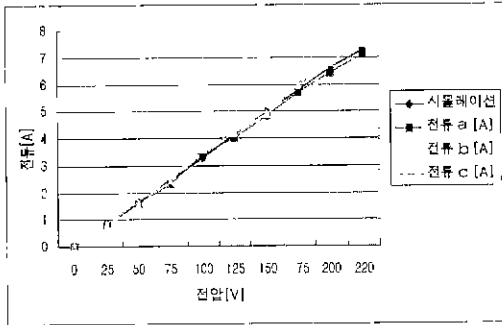


그림 11. 6극 LIM의 입력 전류 측정  
Fig. 11. Measurement of input current in 6 pole LIM

그림 12는 전압이 220[V]일 때 공극에 따른 자속밀도의 특성을 나타낸 것이다. 공극에 따른 자속밀도를 측정하였으며 공극이 작을수록 자속밀도가 증가함을 보였다. 공극이 클때보다 공극이 작아질 때 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다.

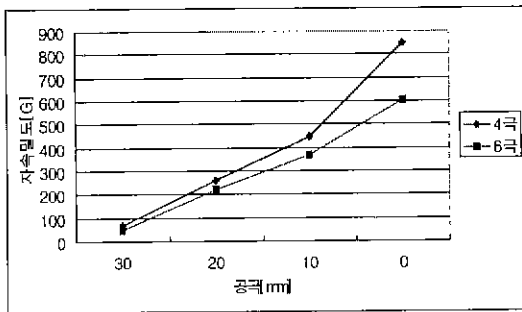


그림 12. 2차측이 없을 경우 공극에 따른 자속밀도  
Fig. 12. Flux density vs. air gap without secondary part

### 3.2 용융금속 이송실험

실험장치는 실제 공장에서 사용되는 용융금속통의 약 0.3배로 제작되었으며 LIM의 추력으로 인한 용융금속의 이송을 목적을 두고 있다. 그림 13은 금속을 녹일 수 있는 용융금속탕의 내부 온도와 LIM의 온도를 감지 할 수 있는 센서와 금속탕 위에 편축식 LIM

2대를 나란히 설치하여 용융금속 위에 일정한 공극을 유지 또는 조정 할 수 있도록 LIM을 수직방향으로 움직일 수 있게 된 장치 구성을 한 실험장치이다.

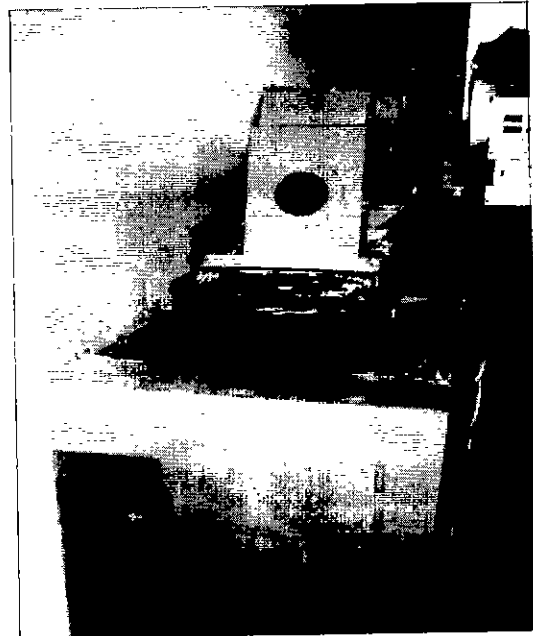
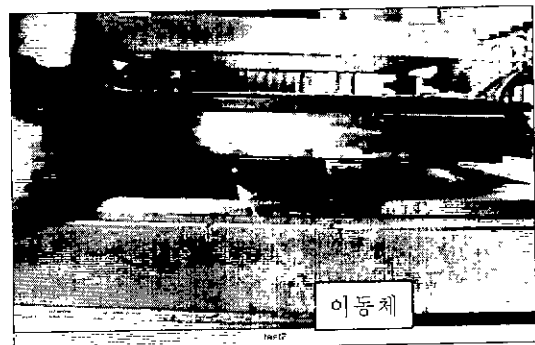
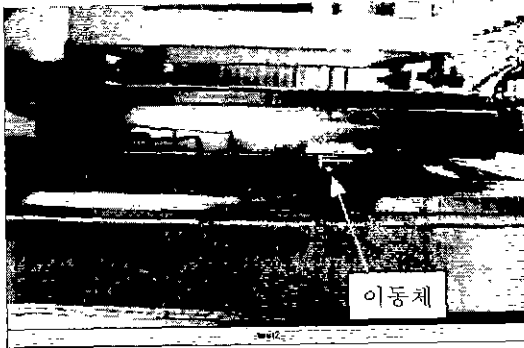


그림 13. 용융 주석 실험 장치  
Fig. 13. Experimental apparatus of transferring the molten tin

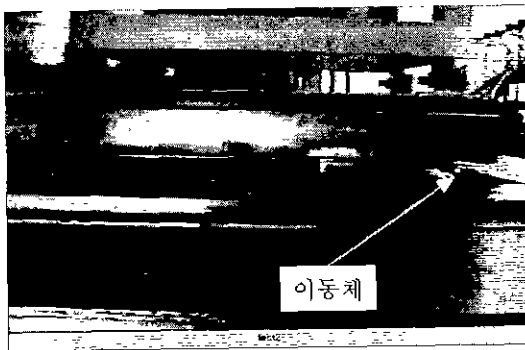
그림 14는 LIM 용융 주석이 이송되는 사진이다. 그림 (a)-(c)는 각 위치별로 이동체가 움직이고 있는 상황을 촬영한 것이다. 실험에서 용융 금속과의 공극을 30[mm]로 유지하였을 때 속도는 약 0.24[m/s]로 빠르게 움직이는 것을 볼 수 있었다.



(a)



(b)



(c)

그림 14. 용융 주석 이송 실험  
Fig. 14. Test of transferring molten tin

#### 4. 결 론

본 논문에서는 용융금속을 2차측으로 하는 선형유도전동기의 특성 해석에 대하여 검토하였다. 용융 금속의 도전율과 깊이 및 공극에 따른 선형유도전동기의 특성을 등가회로법에 의하여 해석하였다. 또한 해석 결과를 비교하기 위하여 6극 및 4극 선형유도전동기를 제작하여 구속 실험 및 부하 실험을 통하여 특성을 측정하였다. 부하 실험은 용융 주석을 2차측으로 하여 공극 30[mm]에서 용융 금속의 표면 속도가 약 0.24[m/s]로 실용적으로 이용할 수 있음을 확인하였다. 본 연구를 통하여 용융 금속이 2차측인 선형유도전동기의 경우에도 등가회로법을 이용하여 특성을 해석할 수 있음을 확인하였고, 선형유도전동기로 용융 금속 이송용으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] K.Fujisaki, J.Nakagawa, H.Misumi, "Fundamental characteristics of molten metal flow control by linear induction motor", IEEE Transactions on Magnetics, vol.30, no.6, pp.4764-4766, 1994
- [2] 정석명, 우종섭, 김형규, "원자로 냉각재 이송을 위한 평판형 리니어 유도 펌프의 설계", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp.10-12, 1998.
- [3] 김희령, 남호윤, 김용균 외 3인, "잔열제거용 40 l/min급 환단민 선형유도 전자펌프의 설계", 전기학회 추계학술대회 논문집, pp.13-15, 1998.
- [4] I. Boldea, S. A. Nasar, Linear motion electromagnetic systems, John Wiley & Sons, 1985.
- [5] 임달호, 이철직, 박승찬, "동기회로법과 SMT를 이용한 편축식 선형유도 전동기의 설계변수 최적화", 대한전기학회논문집, vol.42, no.5, pp.340-343, 1993.
- [6] S. Nonaka, T. Higuchi, "Approximate equations for calculation of characteristics of the single sided linear induction motors", vol 102, no.9, pp.1-8, 1982.
- [7] S. Nonaka, K. Yoshida, "Equivalent circuit quantities and equations for calculation of characteristics of double-sided linear motors", JIEE, vol.90, no.5, pp.128-137, 1970.
- [8] S. Nonaka, T. Higuchi, "Approximate equations for calculation of characteristics of the single sided linear induction motors", vol 102, no.9, pp.1-8, 1982.

#### ◇ 저자소개 ◇

##### 김 창 업 [金昌業]

1960년 1월 1일생. 1983년 서울대학교 전기공학부 졸업. 1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983. 2-1997. 2 (주)효성중공업 기술연구소 책임연구원 1997 3 - 현재 호서대학교 전기공학부 전기공학전공 조교수.