

# 자기부상열차 추진용 LIM의 운전 효율 향상을 위한 가변 슬립주파수 제어

## Variable Slip Frequency Control of LIM for Magnetically Levitated Train

박 승 찬\*  
 (Seung-Chan Park)

**Abstract** - Constant slip frequency control has been conventionally used in thrust control of the linear induction motor(LIM) for magnetically levitated train. However in this paper variable slip frequency control method is presented to increase LIM efficiency according to change of driving notch. Thrust, attractive force, input power to inverter, regenerative power of the LIM are analyzed by finite element method when the train runs according to the presented control method. As a result it is proved experimentally that the electrical energy to inverter is reduced than the conventional method.

**Key Words** : Linear Induction Motor(LIM), Slip Frequency, Efficiency, Thrust Control, Finite Element Method(FEM)

### 1. 서 론

인천공항 자기부상철도 또는 한국기계연구원 내의 상전도 흡인식 자기부상열차의 추진 전동기는 선형유도전동기(Linear Induction Motor : LIM)를 채택하고 있다[1]. 자기부상열차용 LIM의 공극은 회전형 유도전동기에 비하여 훨씬 크므로 공극의 자계에너지 저장에 필요한 무효전력 또한 크게 증가한다. LIM은 이와 같은 구조적인 특성상 회전에 비하여 상대적으로 역률과 효율이 저하되는 특성을 가지고 있다. 자기부상열차 운전시 LIM의 슬립 주파수를 작게 하면 효율이 상승하지만 흡인력 또한 증가하여 부상용 전자석에 부담을 주고 전자석의 소비전력을 증대시킬 수 있다. 일반적으로 자기부상열차용 LIM의 슬립주파수는 추력, 흡인력, 효율 특성을 고려하여 결정되고, 추력 및 제동력을 제어하는 동안 운전단(노치)에 상관없이 슬립 주파수를 일정하게 유지하는 방법을 이용하고 있다[2, 3].

본 논문에서는 자기부상열차 추진용 LIM의 인버터 제어시 운전단(노치)에 따라 추가적으로 효율을 향상시킬 수 있는 가변 슬립주파수 제어 알고리즘을 제시하고 역행 및 제동시 추력, 흡인력, 제동력, 회생전력 특성 등을 유한요소법을 이용하여 계산한다[4]. 또한, 실제의 자기부상열차에 제안한 알고리즘을 적용하여 실험한 결과를 제시한다.

### 2. 추력 및 제동력 제어

#### 2.1 자기부상열차용 LIM의 배치 및 제원

인천공항 자기부상철도 또는 한국기계연구원내의 자기부상열

차는 차량 1대당 총 8대의 LIM이 그림 1과 같이 4S-2P(4-직렬, 2-병렬)구조로 배치되어 운전된다. 따라서, 인버터 1대의 출력단에는 2개의 병렬회로가 구성된다. LIM의 주요 제원은 표 1에 나타내었다.

#### 2.2 LIM 추력식

그림 2는 LIM의 1상당 등가회로를 나타내며, LIM이 갖는 고

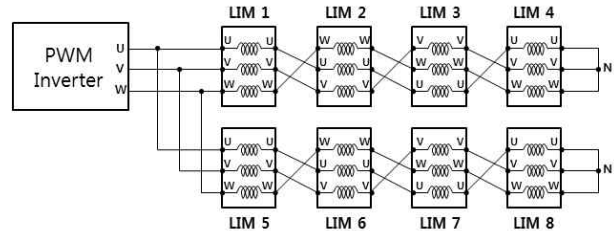


그림 1 자기부상열차의 LIM 배치도(4S2P)

Fig. 1 LIM configuration of magnetically levitated train (4S2P)

표 1 LIM의 주요 제원

Table 1 Specifications of LIM

항목	단위	특성
정격출력	kW	47.2
정격전압	V	275
정격주파수	Hz	43.6
1차축 철심 직경길이	mm	230
1차축 철심 높이	mm	45
극수	개	8
매극매상 슬롯수	개	2
극간격	mm	201
2차축 도체판 두께	mm	5

\* Corresponding Author : Dept. of Railroad Drive and Control, Dongyang University, Korea.  
 E-mail : scpark@dyu.ac.kr

Received : December 1, 2017; Accepted : December 22, 2017

유한 특성인 단부효과(end effect)는 무시한다. 그림 2의 등가회로로부터 추력식을 유도하면 식 (1)과 같다.

$$F = \frac{3\pi}{\tau} \frac{2\pi f_s I_m^2 R_2}{R_2^2 + [2\pi f_s (L_2 + L_m)]^2} I_1^2 \quad [M] \quad (1)$$

여기서,  $\tau$ 는 극간격,  $f_s$ 는 슬립주파수[Hz],  $R_2$ 는 LIM의 T형 등가회로에서 2차측 저항[Ω],  $L_2$ 는 2차측 누설인덕턴스[H],  $L_m$ 은 상호인덕턴스[H]이며, 표 1의 LIM의 등가회로 해석 결과  $R_2 = 0.131346 \Omega$ ,  $L_2 = 0.25998 \text{ mH}$ ,  $L_m = 2.185 \text{ mH}$ 을 얻었다.

### 2.3 노치별 가변 슬립주파수 제어 알고리즘

그림 3은 역행 및 제동시 운전 노치(notch)별로 슬립주파수를 가변하여 추력 및 제동력을 제어하는 알고리즘을 나타낸다. 역행시 추력지령 또는 회생제동시 제동력 지령  $F^*$ 이 주어지면, 이에 대응한 전류 지령  $I^*$ 는 식 (1)로부터 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$I^* = \sqrt{\frac{\tau R_2^2 + [2\pi f_s (L_2 + L_m)]^2}{3\pi \cdot 2\pi f_s L_m^2 R_2}} F^* \quad [A] \quad (2)$$

식 (2)에서 추력(또는 제동력)지령은 식 (3)과 같이 주어진다.

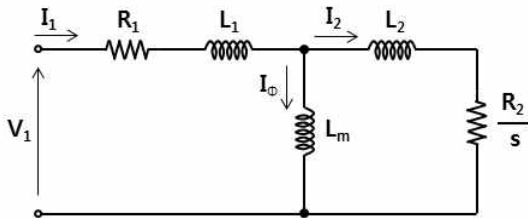


그림 2 LIM의 1상당 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of LIM

$$F^* = \text{만차시 요구 추력(또는 제동력)} \times \text{Notch 값} \quad [M] \quad (3)$$

여기서 Notch 값은 0~100%(0~1.0)이다.

그림 4과 그림 5에 운전 노치별 LIM 1대당 발생하여야 할 추

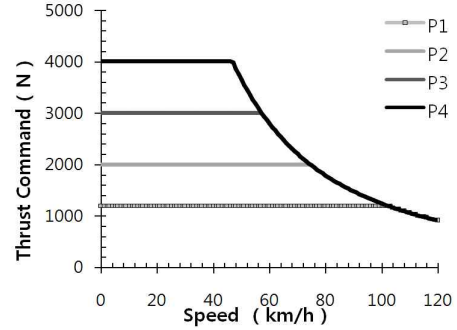


그림 4 역행시 노치별(P1~P4) 추력 명령  
Fig. 4 Thrust command according to powering notch (P1~P4)

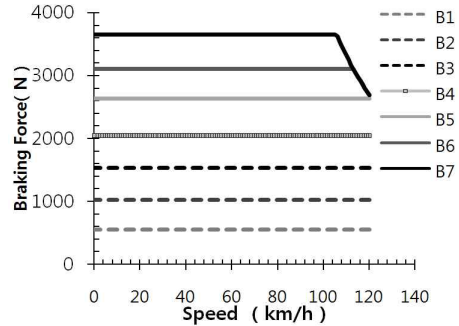
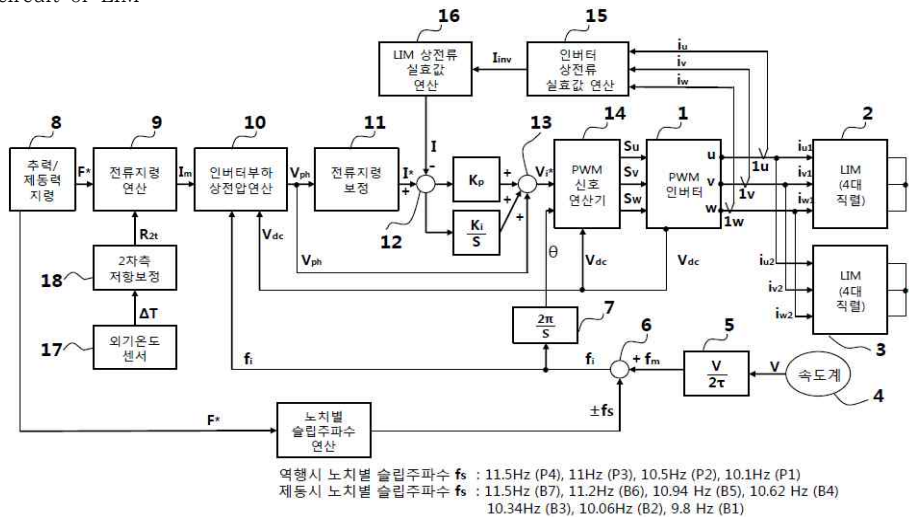


그림 5 제동시 노치별(B1~B7) 제동력 명령  
Fig. 5 Braking force command according to braking notch (B1~B7)



역행시 노치별 슬립주파수  $f_s$  : 11.5Hz (P4), 11Hz (P3), 10.5Hz (P2), 10.1Hz (P1)  
제동시 노치별 슬립주파수  $f_s$  : 11.5Hz (B7), 11.2Hz (B6), 10.94 Hz (B5), 10.62 Hz (B4), 10.34Hz (B3), 10.06Hz (B2), 9.8 Hz (B1)

그림 3 추력 및 제동력 제어 알고리즘  
Fig. 3 Thrust and braking force control algorithm

력 명령 및 제동 명령 그래프를 속도에 따라 나타내었다. 그림 4에서 노치값은 P1 : 30%, P2 : 50%, P3 : 75%, P4 : 100% 이며, 그림 5에서 노치값은 B1 : 15%, B2 : 28%, B3 : 42%, B4 : 56%, B5 : 72%, B6 : 85%, B7 : 100%이다.

역행시 P4를 제외한 P3~P1 노치의 경우와 회생제동 제동시 B7을 제외한 B6~B1 노치의 경우에는 LIM이 발생하는 흡인력에 다소 여유분이 있으므로 슬립주파수 지령값을 감소시켜 운전 효율을 향상시킬 필요가 있다. 논문에서는 이를 고려하여 역행 및 회생제동시 노치별 슬립주파수 패턴을 다음과 같이 결정하였다.

**표 2** 역행시 노치별 슬립주파수 패턴

**Table 2** Slip frequency patterns according to powering notch

역행 노치	요구추력[%]	슬립주파수 $f_s$ [Hz]
P4	100	11.5
P3	75	11
P2	50	10.5
P1	30	10.1

**표 3** 제동시 노치별 슬립주파수 패턴

**Table 3** Slip frequency patterns according to braking notch

제동 노치	요구제동력[%]	슬립주파수 $f_s$ [Hz]
B7	100	11.5
B6	85	11.2
B5	72	10.94
B4	56	10.62
B3	42	10.34
B2	28	10.06
B1	15	9.8

그림 3의 10항에서 인버터 부하상전압 연산은 SVPWM 인버터의 기준 부하 상전압 발생을 위한 것으로서 인버터 출력단에 LIM이 4직렬-2병렬 형태로 연결되어 있으므로 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$V_{ph} = 4대 \times LIM \text{ 1대의 상전압 피크값} = 4\sqrt{2} Z_{ph} I_m \quad (4)$$

여기서  $Z_{ph}$ 는 LIM 1대의 1상당 임피던스이며,  $I_m$ 은 식 (2)로부터 구한 전류 지령 값에 해당한다. 또한,  $V_{ph}$ 는 6-step 제어시 부하상 전압의 피크 값인  $\frac{2}{\pi} V_{DC}$  보다 클수 없으므로,  $V_{ph} \geq \frac{2}{\pi} V_{DC}$  이면  $V_{ph} = \frac{2}{\pi} V_{DC}$  로 고정시킨다. 이는 전차선 전압 변동으로 인하여 인버터 DC link 전압  $V_{DC}$ 의 변동을 고려하기 위한 것이다.

LIM 1대의 1상당 임피던스는 운전모드에 따라 그림 2의 등가 회로로부터 식 (5) 및 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

(역행 및 역상제동시)

$$Z_{ph} = \sqrt{R_1^2 + 2R_1 A f_i + (A^2 + B^2 + 4\pi^2 L_1^2 + 4\pi B L_1) f_i^2} \quad [\Omega] \quad (5)$$

(회생제동시)

$$Z_{ph} = \sqrt{R_1^2 - 2R_1 A f_i + (A^2 + B^2 + 4\pi^2 L_1^2 + 4\pi B L_1) f_i^2} \quad [\Omega] \quad (6)$$

여기서  $f_i$ 는 인버터 출력 주파수로서 역행시에는  $f_i = f_m + f_s$ , 제동시에는  $f_i = |f_m - f_s|$ 로 주어진다. 단,  $f_m$ 은 차량주파수로서  $f_m = \frac{\text{차량속도}[m/s]}{2 \times \text{극간격}} = \frac{V}{2\tau}$  [Hz]이다. 또한 A, B는 각각 식 (7) 및 식 (8)과 같이 계산된다.

$$A = \frac{f_s 4\pi^2 L_m^2 R_2}{R_2^2 + 4\pi^2 f_s^2 (L_m + L_2)^2} \quad (7)$$

$$B = \frac{f_s^2 8\pi^3 L_m^2 L_2 + 4\pi^2 f_s^2 L_m L_2^2 + 2\pi L_m R_2^2}{R_2^2 + 4\pi^2 f_s^2 (L_m + L_2)^2} \quad (8)$$

그림 3의 11항에 있는 전류지령 보정과정은 인버터 DC link 전압 변동을 고려한 것이며, 연산된 기준 부하상전압인  $V_{ph}$  값이  $\frac{2}{\pi} V_{DC}$  보다 작을 경우 전류지령  $I^*$ 은 식 (2)와 같으나,  $V_{ph} \geq \frac{2}{\pi} V_{DC}$  인 경우는  $I^* = \frac{(2/\pi)V_{DC}}{4\sqrt{2}Z_{ph}}$ 로 제한된다. 즉 DC link 전압변동을 고려한 전류지령의 보정 과정은 식 (9) 및 식 (10)과 같다.

$$I^* = I_m = \sqrt{\frac{\tau R_2^2 + [2\pi f_s (L_2 + L_m)]^2}{3\pi 2\pi f_s^2 L_m^2 R_2}} F^* \quad (V_{ph} < \frac{2}{\pi} V_{DC} \text{ 일 때}) \quad (9)$$

$$I^* = \frac{V_{ph}}{4\sqrt{2}Z_{ph}} = \frac{(2/\pi)V_{DC}}{4\sqrt{2}Z_{ph}} \quad (V_{ph} \geq \frac{2}{\pi} V_{DC} \text{ 일 때}) \quad (10)$$

그림 3의 15)항의 인버터 상전류의 실효값  $I_{inv}$ 는 같이 u상 및 v상 순시치 전류  $i_u, i_v$ 를 계측하여 식 (11)과 같이 연산된다.

$$I_{inv} = \sqrt{\frac{2}{3}(i_u^2 + i_v^2 + i_w^2)} \quad [A] \quad (11)$$

따라서, LIM 1대에 흐르는 상전류 실효값은 2개의 병렬회로를 고려하여 식 (12)와 같이 구할 수 있으며, 이 전류는 전류지령치와 비교하여 지령치를 추종하도록 PI제어된다.

$$I = \frac{1}{2} I_{inv} \quad (12)$$

한편, 외기온도의 변화로부터 LIM의 2차측 도체판 저항값을 보정하면 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$R_{2t} = R_2 (1 + \alpha \Delta T) \quad [\Omega] \quad (13)$$

여기서,  $\Delta T = T_2 - 20$ ,  $\alpha$  : LIM의 2차측 도체판의 온도계수 ( $3.7 \times 10^{-3}$ ),  $T_2$  : 외기온도이다.

### 3. 제역시 특성

#### 3.1 역행시 특성 해석

그림 6~그림 8은 각각 그림 3에서 제시한 추력 및 제동력 제어 알고리즘에 따른 슬립주파수와 전류지령값 조건하에서 유한요

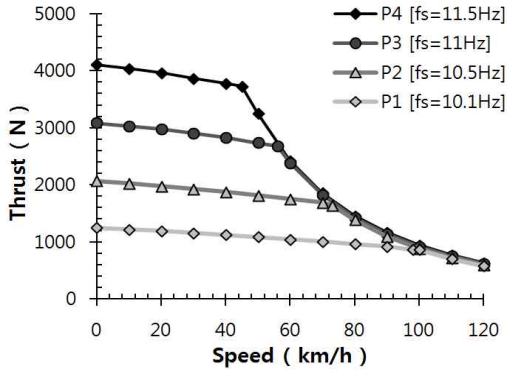


그림 6 역행시 노치별 속도-추력 특성  
Fig. 6 Thrust characteristics at powering

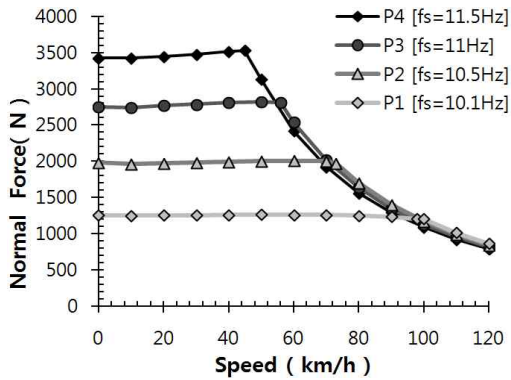


그림 7 역행시 노치별 속도-흡인력 특성  
Fig. 7 Attractive force characteristics at powering

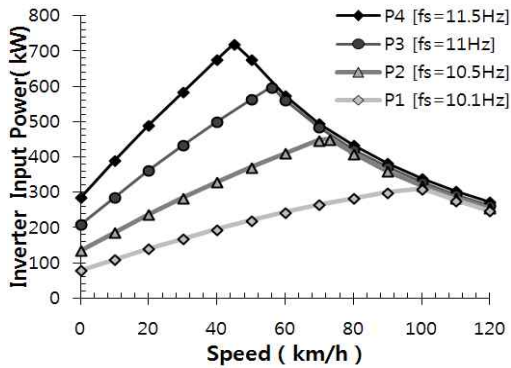


그림 8 역행시 노치별 속도-인버터 입력전력 특성  
Fig. 8 Inverter input power characteristics at powering

소법을 이용하여 역행시 노치별 추력, 흡인력, 인버터 입력 전력을 해석한 결과이다. 전차선 전압은 DC 1,500V로 하였으며, 필터 리액터에 의한 전압강하가 5.5% 있는 것으로 가정하였다. 역행시 P4~P1 각 노치 노치별 슬립주파수 지령은 표 2에 제시된 것과 같다. 그림 4의 추력지령에 따른 전류제어를 실시할 경우 실제의 발생추력 추력은 단부효과(end effect)에 의하여 속도가 증가함에 따라 다소 감소되고 있음을 그림 6의 추력제어 특성에서 알 수 있다.

#### 3.2 제동시 특성해석

그림 9는 B7 노치(100% 제동력,  $f_s = 11.5 Hz$ )로 제동을 하였을 경우 LIM의 제동력, 흡인력, 전류, 전압 특성을 유한요소법을 이용하여 계산한 것이며, 전차선 전압은 DC 1,650 [V]로 가정하

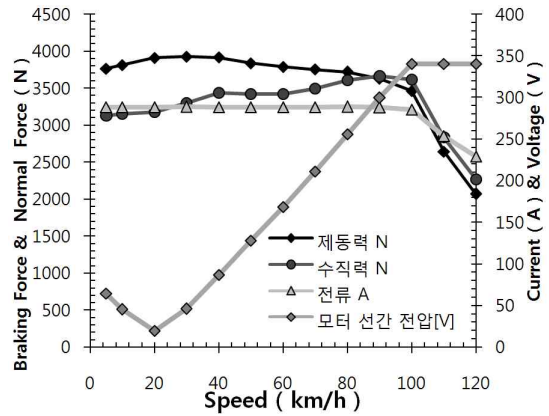


그림 9 제동단 B7일 때의 제동력, 흡인력, 전류, 전압특성 ( $f_s = 11.5 Hz$ )

Fig. 9 Braking force, attractive force, current, phase voltage characteristics at braking notch B7( $f_s = 11.5 Hz$ )

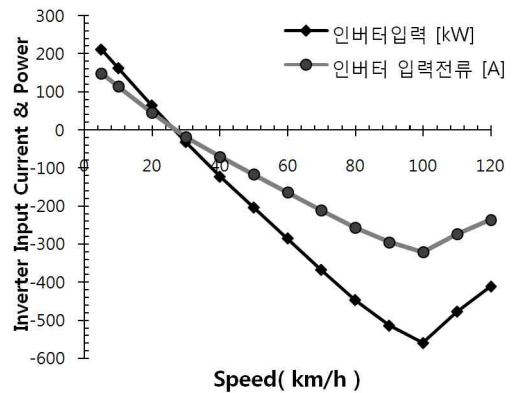


그림 10 제동단 B7일 때의 인버터 입력전력 및 전류 ( $f_s = 11.5 Hz$ )

Fig. 10 Inverter input power and current characteristics at braking notch B7( $f_s = 11.5 Hz$ )

었다. 차량의 속도가 약 20km/h 이하부터는 회생제동에서 역상 제동으로 전환됨을 알 수 있다. 그림 10은 이때의 인버터 입력전류 및 입력전력 특성을 보여주며, 음의 부분은 회생전력 및 전류를 나타낸다. 차량속도가 약 25km/h 이하로 되면 회생전력이 실효됨을 알 수 있다.

그림 11은 B6 노치(85% 제동력,  $f_s = 11.2 Hz$ )로 제동을 하였을 경우 LIM 제동력, 흡인력, 전류, 전압특성을 나타낸다. 그림 12는 이때의 인버터 입력전류 및 입력전력 특성을 보여준다.

### 3.3 실제 차량 시험 결과

한국기계연구원내 도시형 자기부상열차 시험선로의 자기부상 열차(2량 1편성)에 대하여 그림 3에 제시된 알고리즘을 이용하여

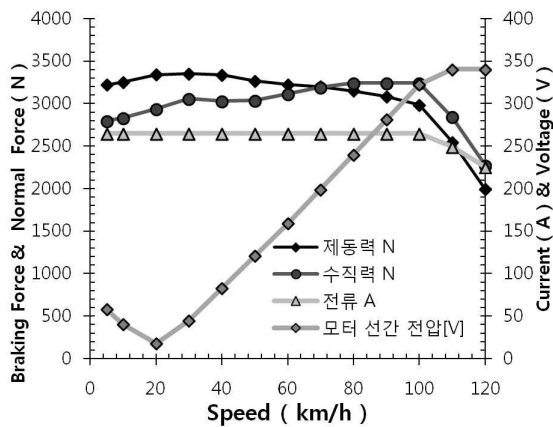


그림 11 제동단 B6일 때의 제동력, 흡인력, 전류, 전압특성 ( $f_s = 11.2 Hz$ )

Fig. 11 Braking force, attractive force, current, phase voltage characteristics at braking notch B6 ( $f_s = 11.2 Hz$ )

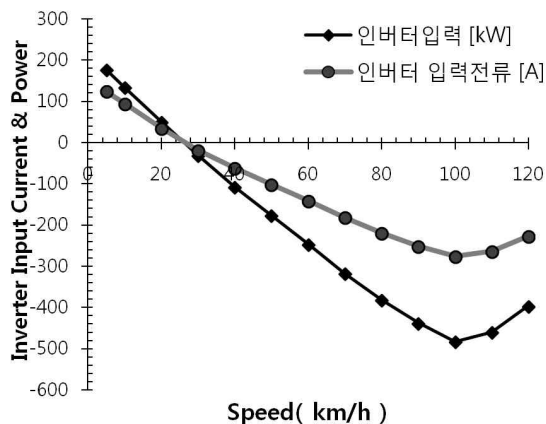


그림 12 제동단 B6일 때의 제동력, 흡인력, 전류, 전압특성 ( $f_s = 11.2 Hz$ )

Fig. 12 Inverter input power and current characteristics at braking notch B6 ( $f_s = 11.2 Hz$ )

추력 및 제동력 제어 시험을 실시하였다. 동일거리에 대하여 1) 역행노치 P3-제동노치 B5, 2) 역행노치 P1- 제동노치 B2의 2가지 운행 패턴으로 각각 실험하여 상전류 파형, 전류지령, 전류연산, 추력지령, 추력연산, 차량속도, 인버터의 소비에너지 등을 측정하였다. 그림 13은 P3-B5로 운전하였을 경우의 시험 결과이며 추력지령  $F^*$ 에 따른 전류지령  $I^*$ 에 대하여 실제전류가 잘 추종함을 알 수 있으며 회생제동이후 차량속도가 약 17km/h 이하로 되면 역상제동으로 전환되고 있다. 그림 3의 알고리즘에서 외기 온도는 20도로 가정하여 외기온도변화에 따른 LIM의 2차측 저항 보정은 생략하였다.

표 4는 자기부상열차 주행시 차량당 인버터 입력 에너지를 측

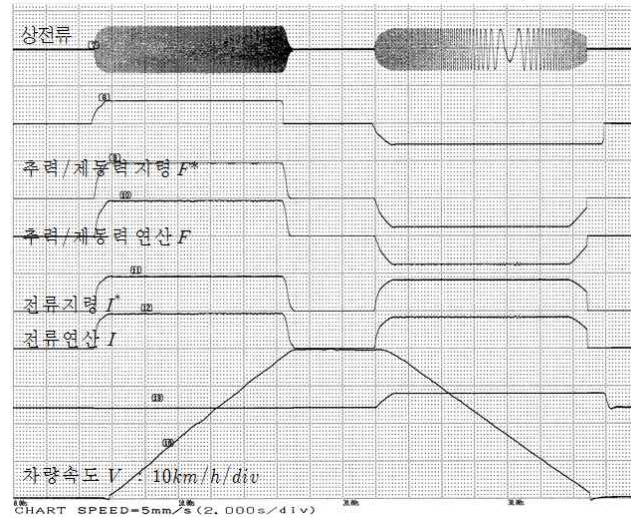


그림 13 자기부상열차 추력 및 제동력 시험결과(P3-B5)

Fig. 13 Test results of thrust and braking control for magnetically levitated train(P3-B5)

표 4 차량당 인버터 누적 입력에너지[kWh] 측정 결과

Table 4 Inverter input energy characteristics per a car

시험조건 (노치 및 슬립주파수)	역행시 [kWh]	제동시[kWh]		계 [kWh]	에너지 감소율 [%]
		회생	역상		
기존					
P1 ( $f_s = 11.5 Hz$ ) B2 ( $f_s = 11.5 Hz$ )	0.798	0	0.231	1.028	
개선					
P1 ( $f_s = 10.1 Hz$ ) B2 ( $f_s = 10.06 Hz$ )	0.792	0	0.213	1.005	-2.24%
기존					
P3 ( $f_s = 11.5 Hz$ ) B5 ( $f_s = 11.5 Hz$ )	1.231	-0.020	0.234	1.444	
개선					
P3 ( $f_s = 11 Hz$ ) B5 ( $f_s = 10.94 Hz$ )	1.223	-0.022	0.225	1.426	-1.25%

정한 결과이며 동일한 시험을 4회 반복하여 평균하여 산출하였다. 노치별 가변 슬립 주파수 제어를 실시한 결과, 인버터 입력에너지는 기존의 방식보다 P1-B2 운전의 경우에는 2.24%, P3-B5 운전의 경우에는 1.25% 감소하여 LIM의 운전효율이 증대됨을 입증할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 자기부상열차 추진용 LIM의 운전효율 향상을 위하여 역행 및 제동시 노치별 슬립주파수를 가변시켜 추력과 제동력을 제어하는 알고리즘을 제시하였다. 유한요소법을 이용하여 슬립주파수 제어시 추력, 흡인력, 인버터 입력전력 특성 등을 해석 및 고찰하였으며, 실제의 자기부상열차에 대하여 제안한 알고리즘을 적용한 결과 기존 방식의 경우보다 차량주행시 인버터 입력에너지가 감소되어 LIM의 운전효율이 증대됨을 입증할 수 있었다.

#### 감사의 글

본 연구는 2013년도 국토교통기술 연구개발사업 (철도기술연구사업)지원에 의하여 이루어진 연구로서, 자기부상열차 시험을 위하여 도움을 주신 한국 기계연구원, (주)현대로템, 대전도시철도공사 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### References

- [1] KIEE Editorial Board, "Urban Maglev", *KIEE conference*, pp. 11~46, 2014. 7
- [2] Kinichi Nagata, Masaski Takahashi, "Linear Motor Drive System for the Normal Conductivity Maglev Vehicle HSST-05", *IEEE*, vol. 110-D, no. 1, pp.23~31, 1990
- [3] Ichiro Miyashita, Youichi Ohmori, "New Modulation Method for VVVF Inverter for HSST-05", *International conference Maglev'89*, pp. 185~190, July, 1989.
- [4] Seung-Chan Park, "Characteristic Analysis of the Adaptive Slip Frequency Controlled LIM for Urban Magnetic Levitation Train", *KIEE conference*, pp. 1659-1660, 2014. 7.

## 저 자 소 개



#### 박 승 찬 (Seung-Chan Park)

1990년 2월 한양대 전기공학과 졸업(공학사), 1992년 2월 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1996년 2월 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년 3월~2000년 2월 한양대 공학기술연구소 선임연구원, 2000년 3월~현재 동양대학교 철도운전제어학과 교수

E-mail : scpark@dyu.ac.kr