

# PMSM의 제동력 확보에 의한 회생제동 제어에 관한연구

황락훈<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>세명대학교 전기공학과

## A Study on the Regenerative Braking Control by means of Extending Brake Power of the Permanent Magnet Synchronous Motor(PMSM)

Lark-Hoon Hwang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Electrical Engineering, Semyung University

**요 약** 본 연구는 전동차를 운전 시, 영구 자석형 동기전동기(PMSM)가 제동할 때 발생한 회생전력은 모두 활용하며, 전기제동에 대하여도 발생한 회생전력을 모두 흡수할 수 있는 능력을 가진 축소모형 전동기 시스템으로 운전함을 가정한다. 축소모형 전동기의 견인시스템은 각 전동기는 영구 자석형 동기전동기(PMSM)를 개별로 제어하는 ICIM방식으로 구축 하였다. 전동차의 승차감 향상 및 에너지의 효율적 이용 등을 위한 방법으로 벡터제어 방법을 적용하여 관성부하에 대한 시뮬레이션과 축소모형으로 실험을 하여 좋은 결과를 얻었다. 또한, 영구 자석형 동기전동기(PMSM)의 제동력 확보에 의한 회생제동 제어 확보와 전기제동으로 정지하는 극 저속에서의 속도검출과 전동기를 제어하는 방법의 알고리즘에 대하여 연구 하였다.

**Abstract** In this paper, a blind spot of motor car, and the put case that is driven the miniature model motor system, when make practical application of the permanent magnet synchronous motors(PMSM) braking and having had the ability that can all absorb regenerative power by means of electric brake which is occurred. a tow system of a miniature model motor traction system is established by ICIM methods to control individually permanent magnet synchronous motors (PMSM) of each motor. vector control method is applied in order to improve ride quality of motor car and the efficient use of energy. it was obtained excellent experiment results from the simulations as a function of momentum load and miniature model. Also, this study is investigated the regenerative braking power securities of permanent magnet synchronous motors, speed detection to stop electric brake at extremely very low speed and motor control method of algorithm.

**Key Words** : PMSM, ICIM methods, Motor control method, Miniature model motor, Motor car

### 1. 서론

현재 국내의 전동차는 감속할 때 전기제동과 공기제동을 병행하여 사용하고 있으며 속도가 낮아지면 공기제동만을 사용하여 정차하게 된다. 발전제동은 전동차의 운동 에너지를 전기에너지로 바꾼 후 제동저항기에서 열에너지로 변환하여 발산함으로써 제동력을 얻으며 발생된 열 에너지는 지하터널의 온도상승을 유발시킨다. 회생제동

은 견인전동기에서 전동차의 운동에너지를 전기에너지로 변환시켜 축소모형 전동기의 견인시스템으로 제동력을 얻는 방법이며 이 회생전력은 주위에서 운전되고 있는 다른 전동차에 보냄으로써 에너지의 효율적인 사용을 기대할 수 있다. 회생제동에 의한 회생전력은 저속보다도 고속에서 회생에너지가 크지만 근본적으로 가선의 전압이 상승하는 요인 때문에 어려운 문제를 갖고 있다. 근래에는 에너지 저장장치 등 회생전력을 안정하게 활용 할

본 논문은 세명대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었음.

\*교신저자 : 황락훈(lhhwang@semyung.ac.kr),

접수일 11년 11월 14일

수정일 (1차 12년 01월 31일, 2차 12년 02월 07일)

게재확정일 12년 02월 10일

수 있는 방법의 연구들도 보고되고 있다.[1-5]

완전 전기제동의 방식은 전기제동에 의해서 전동차가 정차하는 방식이다. 이 방식의 적용은 전기제동을 사용할 때 발생하는 회생전력에 대하여 가선이 전압이 상승하지 않도록 에너지의 흡수 능력이 있어야 하며 이러한 조건에서 완전 전기제동을 실현할 수 있다. 완전 전기제동을 사용하면 공기제동에 필요한 부품의 감소로 경량화도 가능해지고 유지보수 면에서도 유리해진다. 또한 공기제동을 사용할 때 발생하는 기계적 마모나 이로 인한 소음이 경감되어 승차감을 향상시키고 분진 등이 발생하지 않는 장점을 갖고 있다. 따라서 공기제동의 기회를 최소화하는 방법은 효율적인 에너지의 사용과 차량의 성능향상 및 환경적인 측면에서 개발되어야 할 과제 이다. 따라서 근래의 전동차는 차량의 성능향상을 위한 전기제동의 확대에 관하여 많은 연구가 지속되고 있다[1-5]. 전동차의 제동에 있어서 공기제동의 사용은 근본적으로 기계적 마찰을 응용한 장치이므로 발생하는 소음과 분진들은 차량의 성능을 감소시키는 원인이 되고 있다[6-8].

본 연구에서는 축소형의 견인시스템은 각 전동기를 개별로 제어하는 ICIM방식으로 구축하며 영구 자석형 동기전동기를 사용하고 관성부하에 대한 실험방식으로 한다. 또 벡터제어방법을 적용하고 전동차의 승차감 향상 및 에너지의 효율적 이용 등을 위한 방법으로 전기제동으로 정지하는 알고리즘에 대하여 극 저속의 속도검출과 전동기를 제어와 제동력 확보에 의한 회생제동 방법에 대하여 연구하였다[9-15].

## 2. 전기제동의 확대

### 2.1 PMSM의 제어

벡터제어를 적용할 때 사용되어지는 전동기의 변수들은 전압과 전류 및 자속들로 모두 벡터로 취급된다. 이 방법은 전압과 전류의 순시값의 제어를 유효하게 하고 고성능의 제어를 가능하게 한다. 3상의 고정자 순시전류를  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  라고 하면 식 (1)과 같이 된다.

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (1)$$

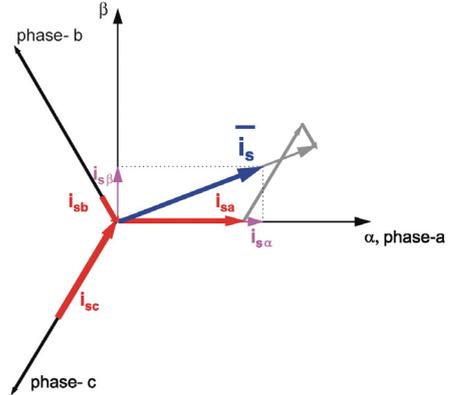
고정자 전류의 벡터는 식 (2)와 같이 된다.

$$\vec{i} = k(i_{sa} + a i_{sb} + a^2 i_{sc}) \quad (2)$$

여기에서  $k = \frac{2}{3}$ ,  $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ ,  $a^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}}$  이다.

3상의 고정자 전류는 그림 1과 같고 식 (2)의 고정자 전류벡터를 나타내었다. 전류벡터는 식 (3)과 같이  $\alpha$  와  $\beta$  로 된 두 축 성분으로 분해될 수 있다.

$$\vec{i} = i_{s\alpha} + j i_{s\beta} \quad (3)$$



[그림 1] 고정자 전류 벡터도  
[Fig. 1] Stator current vector diagram

따라서 그림 1과 식 (3)의 관계에 의하여 3상 교류전동기의 고정자 전류벡터는 두 축 성분으로 나타낸 2상으로 변환하여 표현할 수 있으며 전류벡터는 다음 식 (4)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

여기서  $k = \frac{2}{3}$  이다.

고정자의 전압방정식은 각 상에 대하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} v_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \Psi_{sa} \\ v_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \Psi_{sb} \\ v_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \Psi_{sc} \end{cases} \quad (5)$$

여기에서  $R_s$ 는 고정자 각 상의 권선저항이다.  $v_{sa}$ ,  $v_{sb}$ ,  $v_{sc}$ 는 고정자의 순시전압,  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$ 는 고정자의 순시전류이며  $\Psi_{sa}$ ,  $\Psi_{sb}$ ,  $\Psi_{sc}$ 는 고정자권선의 순시 쇠교자속으로 각 상의 성분을 나타내었다. 3상으로 표현된 식 (5)에 대하여 그림 3에서 소개된 2축에 의한 성분

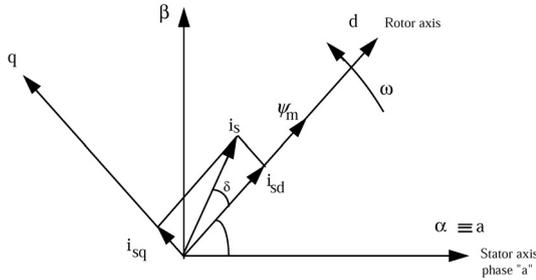
으로 변환하면 식 (6)과 같이 된다.

$$\begin{cases} v_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Psi_{s\alpha} \\ v_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta} \end{cases} \quad (6)$$

고정자권선의 쇠교자속은 누설자속과 회전자자속의 합이므로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} \Psi_{s\alpha} = L_s i_{s\alpha} + \Psi_M \cos(\theta_r) \\ \Psi_{s\beta} = L_s i_{s\beta} + \Psi_M \sin(\theta_r) \end{cases} \quad (7)$$

여기에서  $L_s$ 는 고정자 각 상의 누설 인덕턴스,  $\Psi_M$ 은 회전자 자속이며  $\theta_r$ 은  $\alpha-\beta$ 좌표로 나타낸 회전자의 위치이다. 회전 토크는 전류와 자속의 곱이므로 식 (8)과 같이 나타 낼 수 있다.



[그림 2] PMSM의 벡터도  
[Fig. 2] Vector diagram of PMSM

$$T = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (8)$$

그림 2에서  $\alpha-\beta$ 좌표로 나타낸 전류벡터를  $d-q$ 좌표로 변환하면 다음 식 (9)와 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \sin\theta_r \\ -\sin\theta_r & \cos\theta_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

식 (6)과 식 (7)에 의한 전압방정식도  $d-q$ 좌표로 변환하면 식 (10)이 된다.

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Psi_{sd} - \omega \Psi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Psi_{sq} + \omega \Psi_{sd} \end{cases} \quad (10)$$

전기자권선의 쇠교자속은 식 (11)과 같이 되므로 식 (10)은 다시 쓰면 식 (12)와 같이 된다.

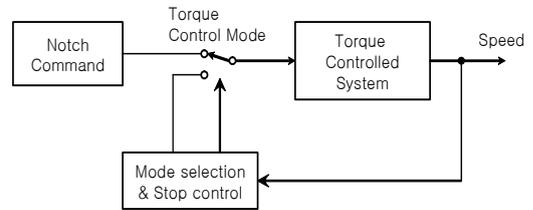
$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_s i_{sd} + \Psi_M \\ \Psi_{sq} = L_s i_{sq} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_s i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L_s i_{sd} + \omega \Psi_M \end{cases} \quad (12)$$

## 2.2 정지까지의 전기제동

### 2.2.1 정지순간의 제어

전동차는 정차를 시키기 위해서 정 토크의 전기제동으로 감속하며 정지의 순간에는 제동 토크를 감소시켜야 한다. 따라서 그림 3과 같이 감속구간과 정지의 순간은 토크 제어의 방법이 다르게 되므로 제어모드를 전환하는 방법을 사용하게 된다. 또 운전 중 가속도의 변화는 승차감에 영향을 주므로 모드의 전환은 극 저속에서 이루어진다.



[그림 3] 제어모드의 전환  
[Fig. 3] Transfer of control mode

그림 3에서 제어모드가 전환되었을 때 전기제동으로 정지하기 위하여 전동기의 가속도를 식 (13)과 같이 속도에 비례하는 제동력을 갖도록 토크를 제어한다. 전동기는 식 (13)과 같이 발생 토크와 부하 토크의 차에 의하여 가속 혹은 감속을 한다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T - T_L}{J} \quad (13)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T - T_L}{J} = \frac{-k\omega}{J} \quad (14)$$

식 (14)에서 전동기의 정지는 부하 토크를 알아야 하며 부하 토크의 추정이 가능하다면 토크를 식 (15)와 같이 나타낸다.

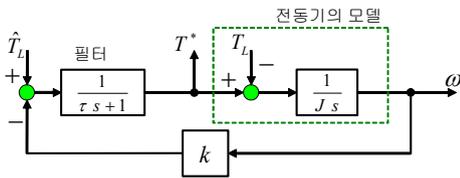
$$T^* = \hat{T}_L - k\omega \quad (15)$$

식 (15)와 같이 설정하여 전동기를 제어함으로써 전동기를 정지시킬 수 있다. 식 (14)와 식 (15)의 관계로 토크의 설정값과 실제의 부하 토크 및 추정한 부하 토크는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T^* - T_L = \hat{T}_L - k\omega - T_L \quad (16)$$

극 저속에서 속도의 검출과 부하 토크의 추정에 오차와 노이즈 등을 고려하여 1차 지연필터를 사용하면 식 (16)은 식 (17)과 같이 되고 식 (17)은 그림 4의 블록도와 같이 된다.

$$J_s \omega = (\hat{T}_L - k\omega) \left( \frac{1}{\tau_s + 1} \right) - T_L \quad (17)$$

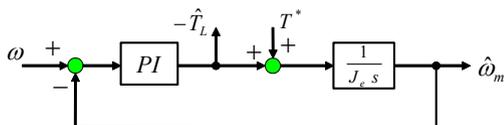


[그림 4] 정지제어  
[Fig. 4] Stop control

### 2.2.2 부하 토크의 추정

구배는 전동기의 부하 토크로 작용하게 되므로 부하 토크를 추정한다. 전동차는 관성이 매우 크기 때문에 가속도의 변화가 매우 적으며 부하 토크는 가속도를 추정 과정에서 얻어질 수 있다. 부하 토크의 추정에 있어서 계산과정의 전동기 토크 오차는 가장 큰 영향을 주게 되며 부하관성의 변화 등 관측기의 제정수의 변화도 고려할 사항이 된다. 전동기의 토크는 그림 4의 출력으로 전동기를 구동하게 된다. 속도검출기에 의하여 측정된 속도에 의하여 가속도를 추정할 때 시스템의 관성 등 제정수의 오차의 영향을 받지 않도록 식 (18)과 그림 5와 같이 PI 제어기에 의하여 추정하는 방법을 사용한다.

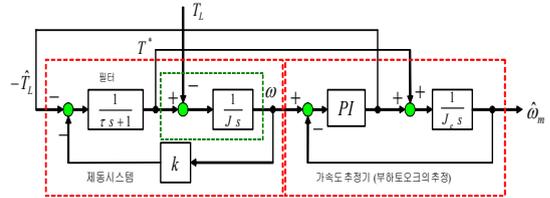
$$\begin{cases} J_e \frac{d\hat{\omega}}{dt} = T^* - \hat{T}_L \\ -\hat{T}_L = \left( \frac{k_i}{s} + k_p \right) (\omega - \hat{\omega}) \end{cases} \quad (18)$$



[그림 5] 부하 토크 추정  
[Fig. 5] Load torque estimate

그림 4와 그림 5에 의하여 그림 6과 같은 부하 토크의 추정에 의한 제동제어 시스템이 완성된다. 전동기의 모델은 인버터와 동기전동기로 대체되어 실험하게 되며, 정 토크의 제동으로 감속되는 동안 제어모드의 전환은 제동 토크와 식 (15)의 토크와 비교하며 식 (19)와 같은 조건으로 전환하게 된다.

$$T \geq \hat{T}_L - k\omega \quad (19)$$



[그림 6] 부하 토크의 추정과 제동제어  
[Fig. 6] Braking control and estimation of load torque

### 2.2.3 추정기의 이득조정

그림 5에 의하여 추정기는 실험 장치와 등가가 되어야 하므로 실험에 의한 방법으로 추정기와 정지제어기의 이득을 조정한다.

- (1) 가속도 추정기의 적분상수 : 부하용 전동기를 구동하지 않은 상태(구배가 없는 조건)에서 가, 감속 실험에 의하여 적분상수를 정한다.
- (2) PI제어기의 게인 : 감속 중에 부하용 전동기를 구동하여 응답을 관찰하여 정한다.
- (3) 필터계수와 속도 귀환량 : 가속도의 변화는 실제 차량에서 좋지 않은 승차감을 유발할 것이므로 극 저속에서 짧은 시간에 정지하도록 추정기의 이득을 선택한다. 전차세대 전동차의 개발에 있어서 고속영역에서 제동기술은 부족한 전기 제동력을 보충하는 공기제동을 병행하고 있다. 환경 친화적이고 차량의 성능향상을 위해서는 공기제동의 사용 기회를 최소화 하여야 하며 고속영역에 대하여 전기제동을 확대하여 공기제동의 사용기회를 최대한으로 축소하는 방법의 개발이 요구된다.

제동할 때 발생한 회생전력은 모두 활용되고 있으며 전기제동의 사용영역확대에 대하여도 발생하는 회생전력을 모두 흡수할 수 있는 능력을 가진 축소모형 전동기의 견인시스템이라고 가정하였다. 실험과 시뮬레이션에 사용된 축소 견인시스템의 제원은 다음 표 1과 같다.

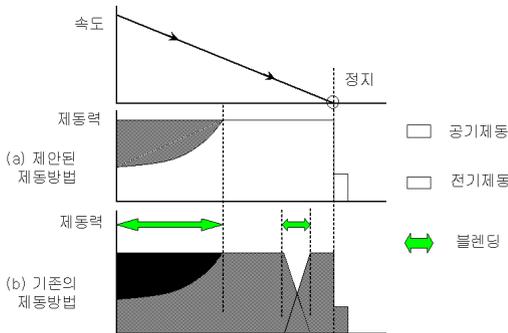
[표 1] 축소 견인시스템

[Table 1] Downsized tow system

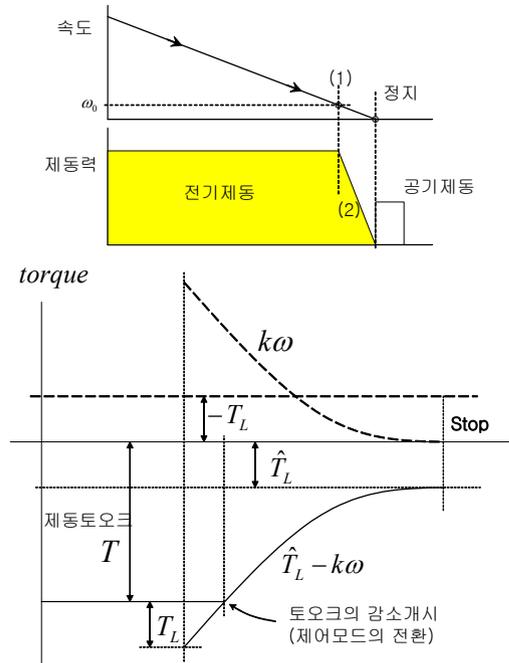
| 구분      | 종류       | 정격                         | 비고           |
|---------|----------|----------------------------|--------------|
| 구동전동기   | PMSM     | 5[kW]                      | 서보 전동기       |
| 관성체     | 직결방식     | 7.2[Nms <sup>2</sup> /rad] |              |
| 부하용 전동기 | PMSM     | 5[kW]                      | 서보 전동기       |
| 속도검출기   | 레졸바      |                            | tamagawa     |
| 운전범위    |          | 824[rpm]                   | 최대 1200[rpm] |
| 인버터     | 병렬 FET   | 350[A]                     | 전류제어형PWM     |
| 제어기     | 16비트 DSP | 56F8345                    |              |

2.3 제동력의 확보방안

견인전동기는 넓은 가변속도의 운전범위를 가져야 하며 고속영역에 대하여 견인전동기의 단자전압은 인버터의 최대전압으로 제한되므로 자속제어를 하는 특성운전을 하게 된다. 견인전동기의 운전영역은 정 토크 운전영역, 정 출력 운전영역, 특성 운전영역의 3개의 영역으로 구분된다. 견인전동기의 운전영역에서 중속과 고속영역인 정 출력운전영역과 특성운전영역에서 제동력을 확대하려면 정토크운전영역과 정 출력운전의 범위를 확대하여야 하며 가선의 전압강하 때문에 회생제동의 경우 축소모형 전동기의 견인시스템의 단자전압 상승으로 인한 제동력의 증대에 대하여도 보고하고 있다. 그림 7과 그림 8은 정지 시 전기 제동과 정지순간의 토크 제어를 각각 나타내었다.



[그림 7] 정지까지의 전기제동  
[Fig. 7] Electric braking of until suspend

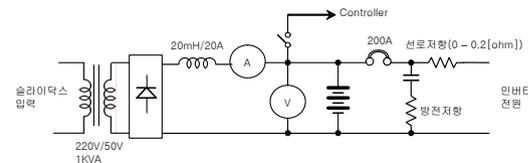


[그림 8] 정지순간의 토크 제어  
[Fig. 8] Torque control of moment suspend

2.4 실험장치

2.4.1 전력변환기

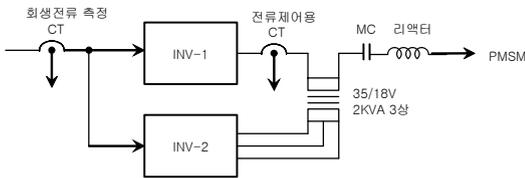
DDM방식의 특성을 나타내기 위해서는 전동기의 정격을 고려하여 낮은 전압으로 구동한다. 인버터의 구동 전원회로는 48[V]의 배터리를 사용하고 축소모형 전동기의 견인시스템이 전압강하의 효과를 갖도록 직류출력에 직렬저항을 가변 할 수 있도록 한다. 전동기는 회생제동을 사용하므로 배터리의 충전회로는 손실에 해당하는 전력만 공급하면 되므로 그림 9와 같이 슬라이더스와 정류기에 의한 간단한 회로로 구성한다.



[그림 9] 전원회로  
[Fig. 9] Source circuits

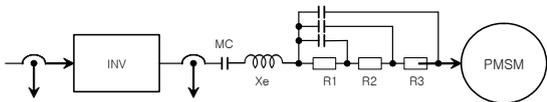
최대 운전범위까지 정 토크 운전을 하기 위하여 그림 10과 같이 2대의 인버터에 의하여 전압의 가변범위를 넓힌다. 자속제어영역을 확보하기 위하여 직렬 리액터를 연결하고 영구자석형의 동기전동기는 약 계자 영역에서 운

전할 때 게이트신호를 차단하거나 인버터를 오프(off)하면 속도에 비례하는 높은 유기기전력을 발생하므로 접촉자를 두어 인버터와 분리하도록 한다. 그림 9에서 INV-1은 전류제어를 하며 INV-2는 전압형으로 구동하도록 한다. 두 대의 인버터는 변압기에 의하여 가변전압의 범위를 넓히게 되어 최대 운전범위에서도 정 토크 운전을 가능하도록 한다. 인버터의 직류측에 회생전류를 측정하기 위한 전류검출기를 설치한다.



[그림 10] 전력변환기  
[Fig. 10] Power converter

그림 10은 제동에너지를 모두 직류전원으로 보내 회생전력을 활용할 수 있지만 실제적용하기에는 장치가 비싸고 지므로 차량에 장착하기에는 어려운 문제가 발생할 수 있다. 그러므로 그림 10은 제동영역 확장의 실험에 사용하고 그림 11과 같이 전동기와 직렬로 저항을 삽입하여 제동에너지의 일부를 저항에서 소비시키는 방법을 제안한다. 이 경우에 대한 운전은 그림 10의 INV-1만을 사용하여 운전하며 실제적용에 있어서 저항과 접촉기의 추가는 차량의 장착에 고려해볼 수 있다고 사료된다.



[그림 11] 직렬저항을 사용한 전동기회로  
[Fig. 11] Motor circuit using a series resistance

### 2.4.2 PMSM의 전류제어

PMSM의 전압방정식은 식 (20)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega L_s i_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega L_s i_{sd} + \omega \Psi_M \end{cases} \quad (20)$$

식 (20)을 고찰하면 PMSM은 전원에 대하여 저항과 리액턴스의 직렬회로에 유기기전력(속도기전력)이 연결된 구조를 하고 있다. 전동기에 흐르는 전류는 저항과 리액턴스의 양단전압을 제어하면 목적하는 크기의 전류가 되도록 할 수 있으므로 정상상태에 있어서 PMSM은 식

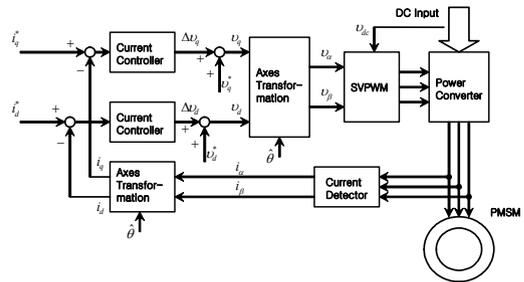
(20)에서 미분항이 없는 식 (21)과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_M \end{bmatrix} \quad (21)$$

식 (20)의 회로에 전류제어기로 PI 제어기를 사용하면 식 (22)와 같이 된다

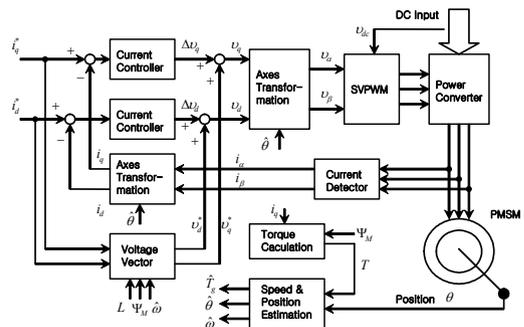
$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd}^* \\ i_{sq}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_M \end{bmatrix} + \left( \frac{k_i}{s} + k_p \right) \begin{bmatrix} i_{sd}^* - i_{sd} \\ i_{sq}^* - i_{sq} \end{bmatrix} \quad (22)$$

식 (22)에 의하여 전류제어기를 갖는 PMSM의 제어회로는 그림 12와 같이 나타 낼 수 있다.



[그림 12] PMSM의 전류제어  
[Fig. 12] Current control of PMSM

전동기의 회전자위치에 의한 좌표변환으로 전류의 검출과 전동기의 전압제어가 이루어지 제어를 완성하려면 회전자의 위치를 검출하는 기능이 추가되어야 하며, 레졸버에 의한 위치와 속도 추정기를 사용한 제어회로와 관측기를 갖는 PMSM 제어의 전체 블록도를 그림 13에 나타내었다.



[그림 13] 관측기를 갖는 PMSM 제어  
[Fig. 13] PMSM control consist of estimator

### 2.4.3 전동기의 제동과 정지

전기제동에 의하여 전동기를 정지시킬 때 극 저속에서 속도측정과 정지시점의 토크 제어는 제안된 바와 같이 극 저속에서 속도에 비례한 제동 토크를 발생하도록 제어함으로써 정지까지 전기제동을 한다. 전동기의 제동과 정지를 위해서 다음과 같은 단계를 거쳐서 전동기를 정지하는데 다음의 조건을 두는 것으로 한다.

- (1) 정지 후의 회전을 방지한다.
- (2) 제동 토크가 0이 되는 점에서 공기 브레이크가 작동된다.
- (3) 공기 브레이크 기능과 합해진 제동력으로 정지시키는 것으로 한다.

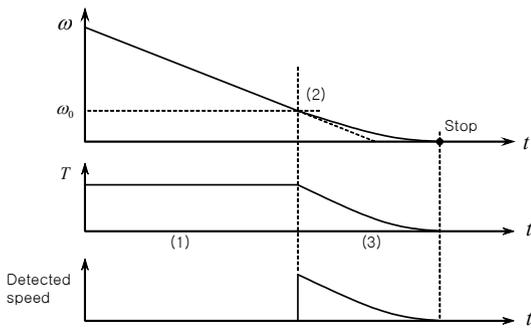
위 조건에 대하여 정지하는 순간 전동기는 속도에 비례하는 식 (23)의 제동 토크를 발생하는 식을 얻을 수 있다.

$$T = k \omega \tag{23}$$

식(23)과 그림 14의 (1)구간의 제동 토크가 같은 점인  $\omega_0$ 가 존재한다. 따라서 구간 (3)에서 감속하는 속도는 식 (24)와 같이 된다.

$$\omega = \omega_0 e^{-\frac{k}{J}t} \tag{24}$$

그림 14의 (2)점에서 토크의 제어모드를 전환하여 전동기를 제어하여야 한다. 토크 제어의 전환점은 감속을 위한 회생제동의 크기와 식 (24)에 의한 토크가 같은 점이 되므로 식 (24)의  $k$ 는 토크의 전환점을 정하는 상수가 된다.



[그림 14] 제동 시퀀스  
[Fig. 14] Braking sequence

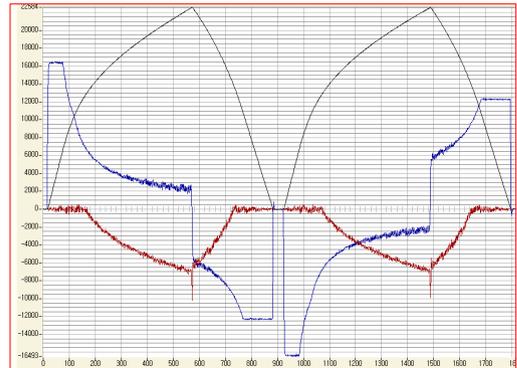
실제의 경우는 작용하는 공기 브레이크의 동작은 응답에 지연이 있기 때문에 전동차에 응용할 때 공기 브레이크의 동작은 토크를 감소하는 시점에서 공기제동을 개시시키고 제동 토크의 감소기울기의 조절에 의하여 만족하

는 승차감을 얻을 수 있는 상태를 실험적으로 찾아야 한다. 전동기는 식(24)과 같이 속도에 비례하는 토크를 발생하므로 전동기가 정지하면 더 이상의 움직임이 없으며 공기제동으로 정지력을 갖도록 하고 전력변환기의 회생을 오프(off)하면 제동이 완료된다.

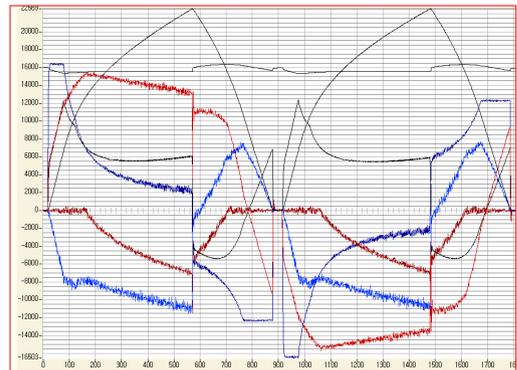
## 3. 실험결과 고찰 및 시뮬레이션

### 3.1 전동기 시뮬레이션 결과

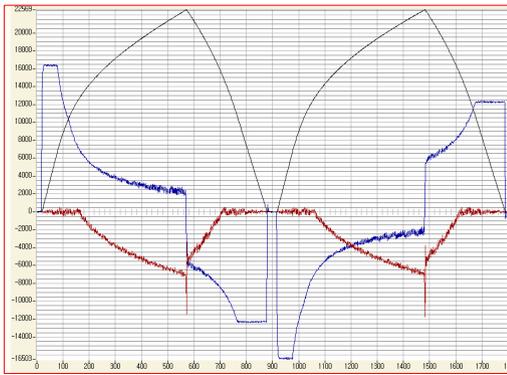
축소모형에 대한 반복적인 실험으로 전기제동기술을 적용하여 전 영역에 대하여 제동실험을 시뮬레이션하고, 고속영역까지 정토크, 정 출력운전을 확대하였으며 구배의 조건에서도 정지하는 제어방법을 제시한다. 그림 15와 그림 16 그리고 그림 17은 직렬저항과 제동을 여러 조건하에서 구동 한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.



[그림 15] 직렬저항과 제동 시뮬레이션(1)  
[Fig. 15] Series resistance and braking simulation(1)



[그림 16] 직렬저항과 제동시뮬레이션(2)  
[Fig. 16] Series resistance and braking simulation(2)



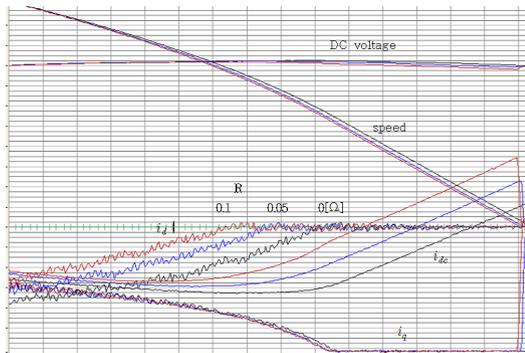
조건 : ratio : 0x3500, 전환 point : 0x2000, 직렬저항 : 0.1[Ω] (자속제어영역)

[그림 17] 직렬저항과 제동 시뮬레이션(3)

condition : ratio : 0x3500, trans point : 0x2000, series resistance : 0.1[Ω] (flux control region)

[Fig. 17] Series resistance and braking simulation

그림 18은 구동전동기를 가속한 다음 일정속도에서 제안된 방법으로 직렬저항을 사용한 제동실험을 하였다. 실험장치는 직접구동방식의 축소모형이며 회전속도가 824[rpm]일 때 전동차의 속도는 120[km/H]에 해당한다.

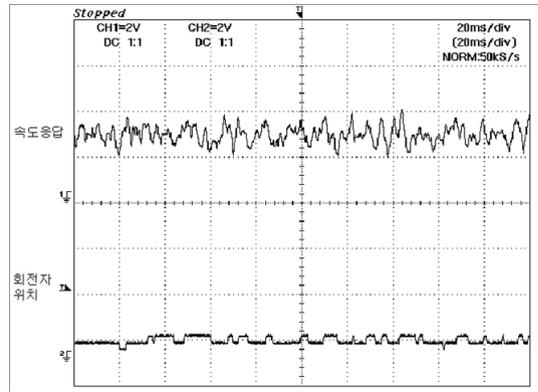


[그림 18] 직렬저항을 사용한 제동 시뮬레이션

[Fig. 18] Braking characteristics simulation using a series resistance

### 3.2 전동기 제동확보 실험측정 결과

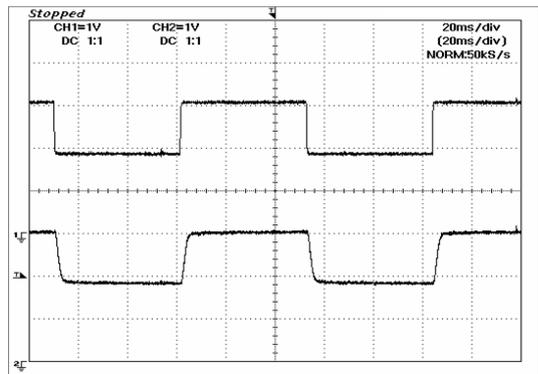
그림 19는 회전자 정지 상태에서 정밀성을 관찰한 것이며 16비트 데이터에서 속도는 하위 6비트, 위치는 하위 4비트를 측정하였다. 속도는 12비트, 회전자의 위치추정은 15비트정도의 정밀성을 보이고 있다.



[그림 19] 회전자가 정지했을 때 출력

[Fig. 19] When output of rotor stop

전류제어에 의하여 그림 20과 같은 추력 응답을 얻을 수 있는데, PMSM의 외부에 연결된 직렬 리액턴스는 전류의 응답을 느리게 하므로 이를 보정하기 위하여 디지털 필터를 사용하였다. 전류제어기의 이득을 조절하므로 그림 20의 응답이 되도록 하였다. 전력변환기는 최대변조율을 조절하여 전동기의 최대운전범위까지 정 토크 운전이 가능하도록 하여 임의의 운전패턴이 가능하도록 하였다.

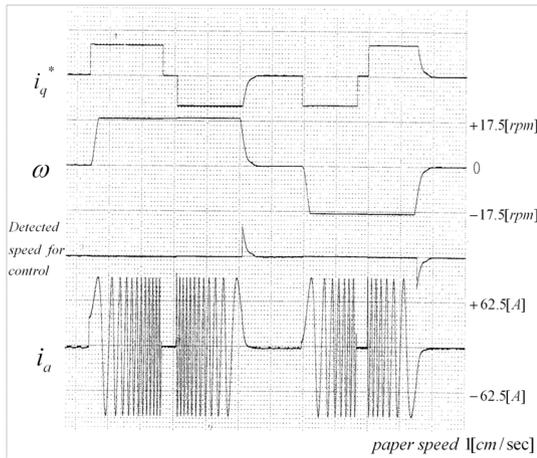


[그림 20] PMSM의 전류제어응답

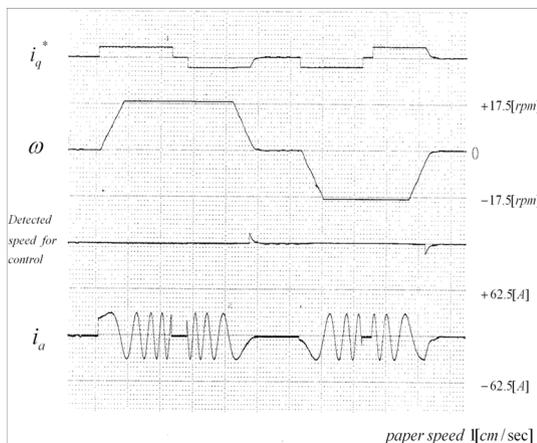
[Fig. 20] Current control response of PMSM

그림 21에서  $i_q^*$ 는 토크에 대한 전류의 설정값을 나타내고 있다.  $\omega$ 는 속도검출기에서 추정된 속도를 저속범위로 확대한 파형이며 계측을 위하여 정역방향에 대하여 17.5[rpm]으로 기록을 제한하였다. 세 번째 파형은 속도에 비례하는 토크로 제어하기 위하여 검지된 속도파형이며  $\omega$ 와 같은 배율로 측정된 것이다.  $i_a$ 는 전동기의 선전류를 측정된 것이다. 실험 장치는 기동과 제동에 있어서 토크의 설정을 스텝 가변 하도록 하였으며 회생제동

을 하면서 정지의 순간에 토크와 설정 토크가 같은 점에서 제어를 전환하도록 하였다. 그림 21에서  $i_q^*$ 를 관찰하면 전동기가 정지하는 순간에 전류의 설정값이 스텝 변화가 아님을 볼 수 있다. 제어 프로그램에 의하여 토크의 제어가 전환되었음이 확인된다. 또 정지한 후에도 전력변환기를 오프(off)시키지 않고 속도에 비례하는 토크제어로 정지 토크를 갖게 하였으며 안정된 동작을 관찰할 수 있다. 그림 21에서 속도-토크의 제어변환은 10[rpm]부근에서 전환되고 있다.



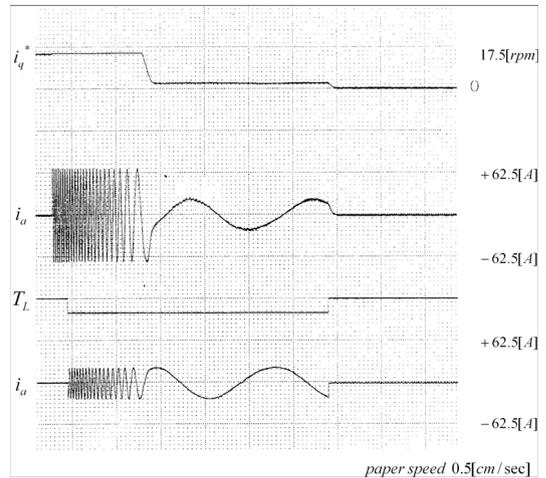
[그림 21] PMSM의 제동측정  
[Fig. 21] Braking measurement of PMSM



[그림 22] PMSM 제동력을 낮추었을 때  
[Fig. 22] When turn down to PMSM braking power

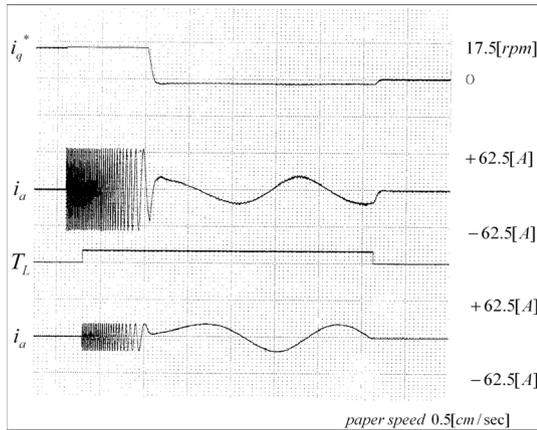
그림 22는 제동력을 낮추었을 때 측정된 것이다. 그림 22에서 제동 토크는 3[rpm]부근에서 전환되고 있으며 극저속에서의 속도 검지와 이에 의한 토크의 제어가 원활

함을 알 수 있다. 실제 차량에 적용에 있어서는 토크의 제어를 전환하는 속도는 승차감을 고려하여 실험적으로 도출하여야 할 것으로 생각되며 식 (24)에서  $k$ 를 변화시키면 된다. 전동기의 제어에 있어서 부하 토크의 추정 결과는 정상시의 제어에는 사용하지 않으며 정지하는 순간에만 제어모드를 전환하여 제어를 하게 된다. 이것은 실험결과와 측정 파형들에서 토크성분의 전류가 감소하는 구간이며 제어모드를 전환하여 정지제어를 하는 구간이다.



[그림 23] 구동방향 부하 토크  
[Fig. 23] Drive direction load torque

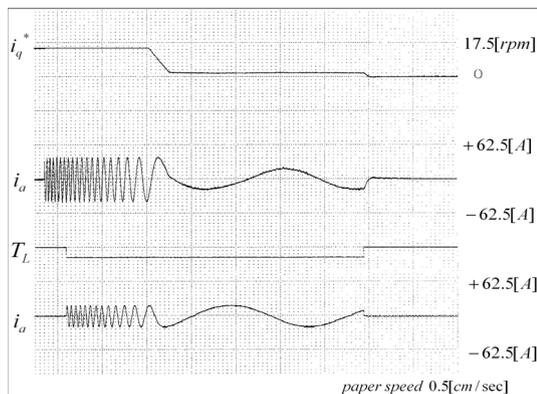
그림 23에서  $\omega$ 는 17.5[rpm]으로 표시를 제한한 속도 파형이며 두 번째 파형인  $i_a$ 는 구동용 전동기의 전류 파형이다. 세 번째 파형인  $T_L$ 은 부하 토크의 설정값이며 스텝 가변 하였다. 네 번째 파형인  $i_a$ 는 부하 토크를 발생하는 전동기의 전류를 측정된 것이다. 제동 중에 있는 전동기에 회전방향으로 부하 토크를 스텝 인가한 경우이다. 회전속도가 감소하는 상태에서 멈추지 않고 대략 2[rpm]정도의 속도로 회전하고 있다. 구동 전동기와 부하 전동기에 흐르는 전류를 비교하면 같은 크기의 전류가 흐름이 관찰되고 있다. 이것은 두 대의 전동기가 같은 토크를 발생하여 평형이 유지되는 상태로 운전됨을 알 수 있다. 부하 토크를 없애면 전동기는 앞에서 언급한 동작으로 정지하고 있으며 정지 후에는 안정을 유지하고 있음이 관찰되고 있다. 그림 24는 역 방향의 부하 토크를 스텝 인가한 경우이며 부하 토크에 의하여 반대 방향으로 회전하고 있다. 마찬가지로 부하를 없애면 정지하는 동작을 하고 있다.



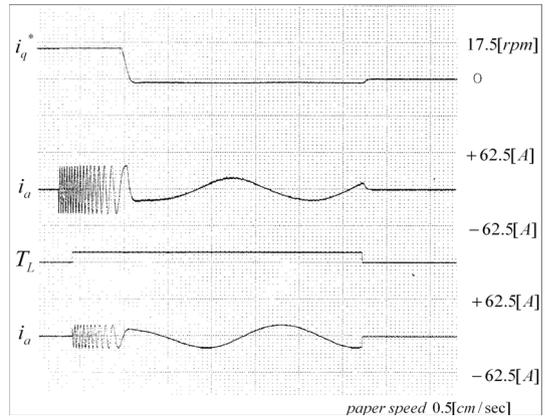
[그림 24] 역 방향 부하 토크  
[Fig. 24] Reverse load torque

그림 25와 그림 26은 제동 토크가 적은 경우에 대하여 각각 구동방향, 역방향의 부하 토크가 인가 된 경우를 측정할 것 이다. 제동 토크를 작게 한 경우며  $\omega$ 의 감속 부분을 관찰하면 감속도가 작아졌음이 확인된다, 또 속도에 비례하는 토크를 발생하는 운전 상태와 부하 토크를 없앴을 때 정지하는 상태는 그림 23과 그림 24의 경우와 같 음이 확인 된다.

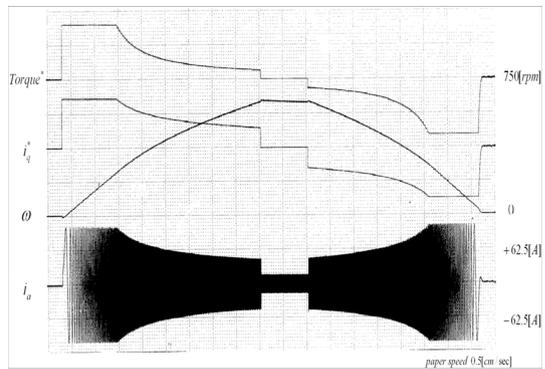
전동기를 구동하고 회생제동으로 정지하는 운전을 하였다. 그림 27에서 특성운전을 개시하는 속도는 360[rpm]으로 하여 800[rpm]부근에서 토크를 0으로 하였다. 회생 제동을 개시하고 정지의 순간에는 속도에 비례하는 토크로 제동하였다. 그림 27과 그림 28에서 토크의 설정은 앞 의 실험과 마찬가지로 스텝 변화를 주었으며 정지의 순간 은 부드럽게 운전됨이 관찰된다. 그림 28은 토크를 작 게 했을 때 측정한 것이다.



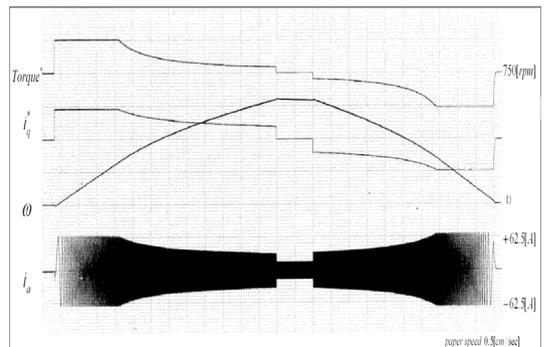
[그림 25] 제동 토크가 작을 때(구동방향의 부하 토크)  
[Fig. 25] When little to braking torque (drive direction load torque)



[그림 26] 제동 토크가 작을 때(역 방향의 부하 토크)  
[Fig. 26] When little to braking torque (reverse load torque)



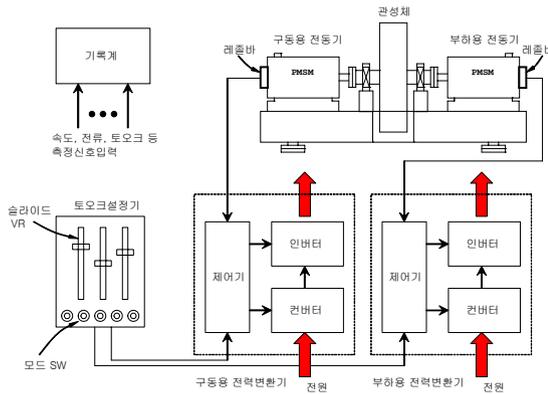
[그림 27] 관성부하에 대한 구동실험  
[Fig. 27] Driving experiment for inertia load



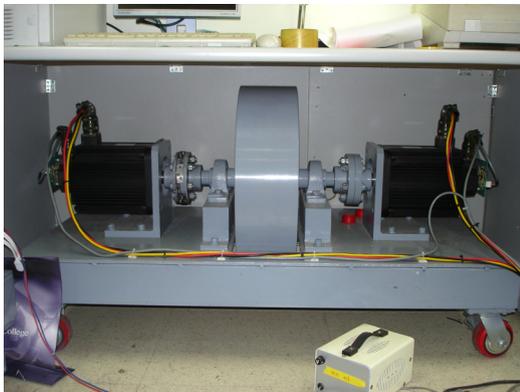
[그림 28] 관성부하에 대한 구동실험(가변 토크)  
[Fig. 28] Driving experiment for inertia load (Variable torque)

그림 29는 본 연구의 전체적인 실험 장치와 같은 축소 모형 추진시스템으로 구동하면 각각 부하 전동기의 토크가 (+) 일 때와 (-)의 에 대하여 실험한 것을 나타낸 것이

며, 그림 30은 실제 전동기 실험 장치를 나타내었다. 이와 같은 장치로 전기제동으로 정지하고 공기제동으로 정차한 후 전기제동을 없애는 방법으로써 완전 전기제동이 이루어지며 이러한 제동의 사용은 소음과 분진을 줄이는 환경적 효과와 전동차의 성능을 개선하는 장점이 얻어지게 된다.



[그림 29] 축소모형 추진시스템  
[Fig. 29] Miniature model propel system



[그림 30] 전동기의 실험장치  
[Fig. 30] Experimental of motor system

#### 4. 결론

현재 국내의 전동차는 공기제동과 전기제동을 병행하여 사용하고 있다. 전기제동에 의한 회생전력은 유효하게 사용되어 에너지의 활용효과를 높이고 있다. 고속영역에서 제동기술은 부족한 전기 제동력을 보충하는 공기제동을 병행하고 있으나 환경 친화적이고 차량의 성능향상을 위해서는 공기제동의 사용기회를 최소화 하여야 한다. 고

속영역에 대한 제동에너지는 저속영역에 비하여 매우크기 때문에 전기제동의 사용에 있어서 고속의 범위로 확대할 수 있다면 회생에너지의 활용효과를 상승시킬 수 있다. 또한 공기제동을 사용할 때 브레이크슈와 라이닝의 마모도 저속영역(정지부근)보다 훨씬 크기 때문에 소음과 분진의 발생감소에 상당한 효과를 기대할 수 있다

- (1) 전 운전영역의 전기제동이므로 완전 전기제동이 가능하게 된다.
- (2) 사용기회가 적어지는 공기제동에 관련된 부품의 감소가 가능하다면 차량의 중량감소 효과도 기대할 수 있다.
- (3) 브레이크 계통의 유지보수에 비용의 절감효과를 가져온다.
- (4) 전동차에 완전 전기제동은 승객의 쾌적한 승차감과 에너지 효율향상과 소음저감을 기대할 수 있다.

현재 국내의 전동차는 공기제동과 전기제동을 병행하여 사용하고 있다. 완전 전기제동을 하기 위해서 정지까지의 전기제동과 정지의 순간에 정지 토크를 갖도록 한다. 따라서 정지 후 공기제동에 의한 정차브레이크를 사용하도록 한다면 공기 브레이크의 사용기회를 최소화할 수 있을 것으로 사료 된다. 또한, 고속에서 전동기의 정 출력영역의 제동을 사용하게 되므로 고속의 영역에서 제동력의 부족분을 공기제동으로 보충하는 블렌딩 제동을 사용하고, 이 영역에 대해서 도 전기제동을 확대하는 연구들을 추진하여 완전 전기제동을 사용하는 전동차를 개발하기 위한 연구가 지속되어야 한다.

#### References

- [1] T. Suzuki, T. Koseki, S. Sone, "A Study on a Method of Train Automatic Stopping Control with a Pure Electric Brake", I.E.E. Japan Joint Technical Meeting on Transportation & Electric Railways and Linear Drive, TER-00-37 LD-00-64, pp. 15-18, July 2000.
- [2] L. Kovud hikulrungsri, T. Koseki, "Speed Estimation in Low-Speed Range for an Induction Motor to Realize Pure Electric Brake", I.E.E. Japan Joint Technical Meeting on Transportation & Electric Railways and Linear Drive, TER-00-38 LD-00-65, pp. 19-24, July 2000.
- [3] S. Takashi, K. Takafumi, "Simple Train Automatic Stopping Control with Constant Power Braking Pattern Supposing the Pure Electric Brake." I.E.E. Japan 2001 Japan Industry Applications Society Conference (JISAC2001), Vol. 3, pp. 1285-1288, August 2001.

- [4] T. Suzuki, T. Koseki, S. Sone, "A Study on Increasing Regeneration Rate of Electric Trains with Constant Power Brake Pattern", 2001 National Convention Record, I.E.E. Japan, Vol. 5, No. 252, pp. 2090-2091, March 2001.
- [5] H. Tabuchi, T. Suzuki, T. Koseki, "A Proposal and Study on Braking Signs for Increasing Rate of Electric Brake", 2001 National Convention Record, I.E.E. Japan, Vol. 5, No. 253, pp. 2092-2093, March 2001.
- [6] K. Matatsuok, M. Kondo, Y. Shimizu, "Totally-Enclosed Type Traction Motor Using Permanent Magnet Synchronous Motor." IEEJ Trans. IA, Vol.124, No.2 pp 175-182,2004.
- [7] K. Yoshida, "Development of Main Circuit System using Direct Drive Motor (DDM)", JR EAST Technical Review No.1-Autumn, pp.46-52,2002.
- [8] H. Tabuchi, T. Suzuki, T. Koseki, "A Proposal and Study on Braking Signs for Increasing Rate of Electric Brake", 2001 National Convention Record, I.E.E. Japan, Vol. 5, No. 253, pp. 2092-2093, March 2001.
- [9] Y. Toshiaki, S. Shigetomo "Traction Motors Aiming at High Efficiency and Low Maintenance" toshiba review Vol.58, No.9, PP 14~17. 2003
- [10] George Ellis, Jens Ohno Krah, "Observer-based Resolver Conversion in Industrial Servo Systems.", PCIM 2001, 2001.
- [11] Reza Hoseinnezhad, Peter Harding "A Novel Hybrid Angle Tracking Observer for Resolver to Digital Conversion.",44th IEEE Conference on Decision & Control, and the European Control Conference, pp7020-7025, 2005.
- [12] Texas Instruments, "TMS320F240 DSP Solution for Obtaining Resolver Angular Position and Speed.", Application Report SPRA605, February 2000.
- [13] Analog Devices, "12-Bit R/D Converter with Reference Oscillator.", Analog Devices, 2003.
- [14] S.Takashi, K. Takafumi, "Simple Train Automatic Stopping Control with Constant Power Braking Pattern Supposing the Pure Electric Brake." I.E.E. Japan 2001 Japan Industry Applications Society Conference (JISAC2001), Vol. 3, pp. 1285-1288, August 2001.
- [15] S. Takashi, K. Takafumi, "Simple Train Automatic Stopping Control with Constant Power Braking Pattern Supposing the Pure Electric Brake." I.E.E. Japan 2001 Japan Industry Applications Society Conference (JISAC2001), August 2001. JREAST Technical Review No.8-Summer,Vol.3,pp.31-42,pp. 1285-1288, 2004.

## 황 락 훈(Lark-Hoon Hwang)

[정회원]



- 1981년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학사)
- 1983년 8월 : 명지대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1989년 8월 : 명지대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1988년 3월 ~ 1991년 2월 : 충남 전문대학(현 대덕대학) 전기과 조교수
- 1991년 3월 ~ 현재 : 세명대학교 전기공학과 교수

### <관심분야>

전력전자, 전력전자 응용분야, 전동기 제어, 대체 에너지 변환, 반도체 시뮬레이션 등