

## Matlab과 PSPICE를 이용한 동기전동기의 전기 제동 확대 시뮬레이션에 관한 연구

나 승 권\*, 구 기 준\*\*

### A study on electronic braking expansion simulation of synchronous motor applied by Matlab & PSPICE

Seung-Kwon Na\*, Gi-Jun Ku\*\*

#### 요 약

기계적 제동방식이 사용되는 전동차는 공기제동과 전기제동을 혼합한 방식으로 최근 녹색성장을 지향하면서 효율개선 및 환경문제 해결을 위한 많은 방법들이 제시되고 있다. 기계적인 제동은 분진, 소음 등의 환경문제와 함께 브레이크 슈와 라이닝 등의 소모품을 교체해야하는 경제적 문제를 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 고속 영역에서 정지에 이르는 광범위한 영역에 이르기까지의 전기제동을 필요로 하게 되었다. 본 연구는 구배에 의한 부하토크를 추정하여 전동차를 정지시키는 방법에 대해 연구되었으며 낙차에 따른 토크를 추정하여 제동하는 방법의 특성을 확인하였다.

▶ Keyword : 전기제동, 동기 전동기, 공기제동, 기계적 제동

#### Abstract

Mechanical break system used in train, that mixed air break & electronic break system. this system suggest lots of ways for modify efficiency and solution of environmental problems due to recently intend to green growth. The mechanical break system has environmental & economical problem. Environmental sides(problem) are dust and noise etc and economical sides(problem) are replaced the spare parts that are breaking shoe and lining ect. For compensate those kind of weak

• 제1저자 : 나승권 • 교신저자 : 구기준

• 투고일 : 2011. 10. 30, 심사일 : 2011. 11. 21, 게재확정일 : 2011. 12. 12.

\* 한국폴리텍대학 의용공학과(Dept. of Information Biomedical Engineering, Korea Polytechnics College)

\* 한림성심대학교 정보통신네트워크과(Dept. of Information Communication & Computer Networks, Hallym Polytechnic University)

points, we need a wide territory of electronic break which is from high speed range to stop. This research is estimated the load torque due to an incline and stop the train method also check the characteristic of stop the train to estimate a torque follow the sharp drop.

▶ Keyword : electronic break, synchronous motor, air break, mechanical break

## 1. 서론

최근 녹색성장을 지향하는 정부 및 산업사회의 동향에 따라 전동차에 사용되는 기존의 기계적 제동방식은 여러 가지 소음, 분진 등의 환경문제와 승차감의 저하와 중복된 제동영역에 따르는 효율저하의 문제점 등 전동차의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 고속영역에서 정지까지 전 영역에 전기 제동을 확대하는 많은 연구가 지속되고 있다.[1],[2],[3],[4],[7],[8].

현재 국내의 전동차는 감속할 때 전기제동과 공기제동을 병행하여 사용하고 있으며 속도가 낮아지면 공기제동만을 사용하여 정차하게 된다. 공기제동은 근본적으로 기계적 마찰을 응용한 장치이므로 발생하는 소음과 분진들은 차량의 성능을 감소시키는 원인이 되고 있다. 전동차에서 적용되는 전기제동은 발전제동과 회생제동을 들 수 있다. 발전제동은 전동차의 운동에너지를 전기에너지로 바꾼 후 제동저항기에서 열에너지로 변환하여 발산함으로써 제동력을 얻으며, 발생된 열에너지는 지하터널의 온도상승을 유발시킨다. 회생제동은 견인전동기에서 전동차의 운동에너지를 전기에너지로 변환시켜 가선으로 보냄으로써 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 수 있는 방법의 연구들도 보고되고 있다.[1],[2],[3],[4],[5],[7],[8].

완전 전기제동의 방식은 전기제동에 의해서 전동차가 정차하는 방식이다. 이 방식의 적용은 전기제동을 사용할 때 발생하는 회생전력에 대하여 가선의 전압이 상승하지 않도록 에너지 흡수 능력이 있어야 하며 이러한 조건에서 완전 전기제동을 실현할 수 있다. 완전 전기제동을 사용하면 공기제동에 필요한 취부부품의 감소로 경량화도 가능해지고 유지보수 면에서도 유리해진다. 또한 공기제동을 사용할 때 발생하는 기

계적 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 과제이다. 따라서 근래의 전동차는 차량의 성능향상을 위한 전기제동의 확대에 관하여 많은 연구가 지속되고 있다. 차량의 중량을 감소시키는 방법 등 에너지 효율 향상과 유지보수 측면 및 발생하는 소음을 저감시키는 방법들이 제안되고 있다. 전동차의 제동에 있어서 공기제동의 사용은 근본적으로 기계적 마찰을 응용한 장치이므로 발생하는 소음과 분진들은 차량의 성능을 감소시키는 원인이 되고 있다[6].

전기제동에 의한 회생전력은 에너지의 활용효과를 크게 할 수 있다. 고속영역에서 제동기술은 부족한 전기 제동력을 보충하는 공기제동을 병행하고 있으나 차량의 성능향상을 위해서는 공기제동의 사용기회를 최소화 하여야 한다. 고속영역에 대한 제동에너지는 저속영역에 비하여 매우크기 때문에 전기제동의 사용에 있어서 고속의 범위로 확대할 수 있다면 회생에너지의 활용효과를 상승시킬 수 있다. 또한 공기제동을 사용할 때보다 브레이크슈와 라이닝의 마모도 저속영역(정지부근)보다 훨씬 크기 때문에 소음과 분진의 발생감소에 상당한 효과를 기대할 수 있다[8].

전동차에서 전기제동을 사용할 때 발생하는 회생전력은 가선의 전압을 상승시키게 된다. 따라서 완전 전기제동을 실현하기 위해서는 전압이 일정한 가선의 수용성을 증대시키는 회생에너지 흡수장치 등이 설치되어 있어야 하며 전기제동에 관한 연구는 회생전력을 어떻게 활용하느냐 라는 에너지의 처리 방법이 해결되어야 한다.

전기 제동의 확대에 따르는 이점은 기계적 제동방식에서 볼 수 있는 공기제동과 전기제동이 중복되는 부분의 효율의 개선, 승차감 개선, 마모에 의한 소모품의 교체주기가 길어지게 된다. 즉 환경문제와 경제적 문제점을 쉽게 해결할 수 있다. 이러한 전기 제동 방식에는 주로 회생제동이 사용된다. 회생제동은 전동기의 에너지를 가선으로 되돌려 제동에너지를 얻는 방식이며 회생전력을 주변의 다른 전동차로 보내는 것이 가능하여 에너지의 효율적 사용이 기대된다. 하지만 고속영역에서 발생하는 큰 회생에너지는 가선의 전압을 상승시

키는 요인이 되므로 이 방법을 해결해야 한다.

본 연구는 기계적 제동방식의 문제점을 해결하기 위하여 전기 제동을 확대하는 방법에 관한 것으로 부하토크를 추정하여 정지토크를 발생시키는 기능을 구현하였고, 언덕의 낙차에 따른 조건에서 전기제동이 가능한지를 실험하였다.

## II. 전기제동 방법의 제안

### 2.1 전기 제동 제어 방법의 제안

전기제동은 주행 중인 차량의 관성에 축적된 에너지를 주전동기에 의하여 전기에너지로 변환하여 직류모션으로 회생전력을 보내는 방법이며 이 회생전력은 직류모션의 전압을 상승시키게 된다. 따라서 직류모션의 전압이 상승하지 않도록 차량내부에 에너지를 저장하는 장치를 설치하던지 또는 직류모션이 이 회생전력을 흡수하는 능력을 가져야 한다. 완전 전기제동 방법의 실현은 이와 같이 회생전력을 처리하는 설비가 우선적으로 해결되어야 한다. 직접구동방식에 적용하기 위한 정지까지 전기제동에 있어서 정지순간은 매우 낮은 극 저속의 상태이므로 회전자의 위치와 속도를 정밀하게 검출하는 센서 기술이 요구된다. 또 정지순간 승차감을 고려한 토크의 제어 기술이 필요하게 되며 본 연구에서는 축소모형 추진시스템에 적용하여 실험결과를 도출하고자 한다. 완전 전기제동은 전기제동을 주로 사용하여 공기제동의 기회를 최소화 하고자 하는 방법이며 완전 전기제동을 사용함으로써 얻어지는 효과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1). 공기제동 기회의 최소화는 제륜자 등의 제동부품의 마모를 감소시킨다.
- (2). 제동순간의 소음과 부품마모에 따르는 분진 등을 감소시킬 수 있다.
- (3). 제동장치의 유지보수 비용을 절감할 수 있다.
- (4). 회생제동의 확대로 에너지 활용을 극대화할 수 있다.

전동차의 제동은 공기제동과 전기제동을 병행하여 사용하며 M차에서는 전기제동을 기준으로 하여 부족한 제동력을 공기제동으로 충당하고 있다. 고속영역(정 출력운전영역)에서는 전기제동력이 적으므로 공기제동을 함께 사용한 블렌딩 제동으로 감속하며 정토크 영역에서는 전기제동만으로 감속한다. 차량의 정지는 속도가 6~7[km/H]부근에서 공기제동으로 전환 하여 정차시키며 그림 1의 (b)와 같은 방법을 사용하고 있다.

전기제동으로 정차시킬 때 제안된 방법의 이상적인 제동은

그림 1의 (a)에 나타내었다. 고속영역에서는 블렌딩 제동을 사용하고 정토크 제어영역에서 정지까지 전기제동을 하는 방법으로 정지의 순간까지 정토크의 제동력을 사용하는 방법이다. 그림 1의 (a)에서 토크가 정 토크에서 0으로 변하는 정지 순간에 있어서 검출속도의 오차는 진동을 수반할 수 있고 이 진동은 승차감에 상당한 영향을 주게 된다. 따라서 정지순간에서 승차감을 고려한 토크의 제어가 필요하게 된다.

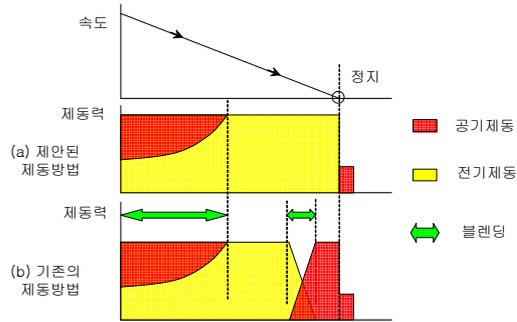


그림 1. 정지까지의 전기제동  
Fig. 1. When until the electric braking of stopping.

그림 2는 그림 1에서 정지부근을 확대한 그림이다. 그림 2에서 (2)구간은 정지하는 순간으로 매우 짧은 시간이며 토크를 감소하는 기율기의 조절에 의하여 변하게 된다. 또한 본 연구에서 이루고자 하는 전기제동의 방법으로써 정지순간의 극 저속의 속도검지기술과 토크를 제어하는 방법을 필요로 한다.

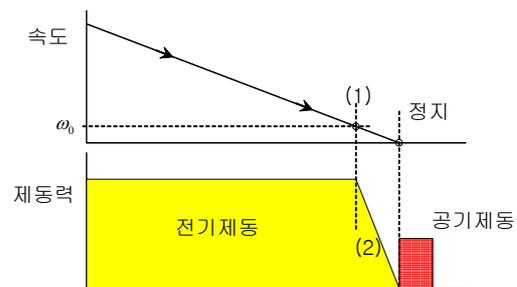


그림 2. 정지순간의 토크 제어  
Fig. 2. Torque control of stop moment.

정차는 그림 2와 같이 정토크의 제동력으로 차량을 감속하여 정지 직전의 극 저속에서 승차감을 고려하여 정지의 순

간에 토오크를 감소시키는 방법이며 전기적으로 정차시킨 후 최소의 공기제동을 사용하는 방법이다.

### 2.2 전기 제동 제어기 설계

전기 제동 제어기의 설계를 위해 정지토오크제어, 부하토오크의 추정, 그리고 추정기의 이득을 조정할 수 있도록 설계하였으며 다음과 같은 3가지 방법들로 전기제동을 적용한다. 첫 번째, 속도에 의한 제동력을 감소, 두 번째, 낙차에 의한 부하토오크를 추정하여 정지토오크 적용, 세 번째, 정차 후 전기제동 종료, 공기제동으로 인한 정차유지의 내용을 중심으로 적용한다. 국내의 전동차는 감속할 때 전기제동과 공기제동을 병행하여 사용하고 있으며 속도가 낮아지면 공기제동만으로 정차시키고 있다. 공기제동은 근본적으로 기계적 마찰을 응용한 장치이므로 이때 발생한 소음과 분진들은 차량의 성능을 저하시키는 원인이 되고 있다. 전동차에 적용되는 전기제동은 발전제동과 회생제동을 들 수 있다. 발전제동은 제동방향에서 열에너지로 변환하여 발산함으로써 제동력을 얻으며 발생한 열에너지는 지하터널의 온도상승을 유발시킨다. 회생제동은 가선으로 제동에너지를 보냄으로써 제동력을 얻으며 회생전력을 주위에서 운전하고 있는 다른 전동차에 보내지고 에너지의 효율적인 사용을 기대할 수 있다. 이렇게 고속영역에서 큰 회생에너지는 가선의 전압을 상승시키는 요인을 해소하고 전기제동의 확대에 관한 방법의 연구들이 보고되고 있다 [1],[3],[8].

전동차를 전기제동에 의하여 정차하는 방법을 사용하려면 전기제동에 따르는 회생전력이 가선전압을 상승시키지 않도록 가선이 회생전력을 흡수하는 능력이 있어야 한다. 이 조건에서 정지까지 전기제동이 가능하며 전기제동만을 사용함으로써 공기제동에 필요한 취부부품을 감소로 경량화 및 유지보수면에서도 유리해진다. 또한 공기제동을 사용할 때 발생하는 기계적 마모나 이로 인한 소음의 경감과 분진 등이 발생하지 않는 장점을 갖게 된다. 따라서 공기제동의 기회를 최소화하는 연구는 에너지 사용의 효율과 차량의 성능향상 및 환경적인 측면에 기여하게 된다. 본 연구는 전동차를 전기제동으로 정차시키는 방법에 관한 것으로 부하 토오크를 추정하여 정지 토오크의 기능을 부여하였다.

### 2.3 정지토오크 제어

전기 제동을 확대하기 위해서는 속도의 등급에 따르는 정 토오크를 적용하여 감속 해야 하며 정지할 때에는 제동토오크를 감속시켜야 한다. 그러므로 감속구간과 정지 순간에 따라 다른 토오크를 적용 시켜야 하므로 다음과 같은 제어방법으로

전환이 되어야 한다. 전동차는 정차를 시키기 위해서 정 토오크의 전기제동으로 감속하며 정지의 순간에는 제동 토오크를 감소 시켜야 한다. 따라서 그림3 과 같이 감속구간과 정지의 순간은 토오크 제어의 방법이 다르게 되므로 제어모드를 전환하는 방법을 사용하게 된다. 또 운전 중 가속도의 변화는 승차감에 영향을 주므로 모드의 전환은 극 저속에서 이루어진다.

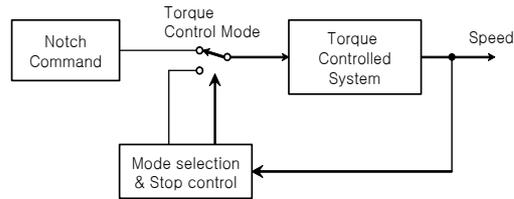


그림 3 제어 모드의 전환 방식  
Fig. 3. Transfer method of control mode.

운전 중 차량의 가속도 변환은 승차감에 영향을 주게 되므로 제어 모드의 전환은 극 저속에서 이루어진다.

### 2.4 정지 제어

전동기는 식 (1)과 같이 발생토오크와 부하토오크의 차에 의해 감속하게 되어 가속 또는 감속이 이루어진다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T - T_L}{J} \dots\dots\dots (1)$$

제어모드의 전환되었을 때 그림3과 같이 전기 제동으로 정지하기 위해 식 (2)와 같은 전동기의 가속도와 비례하는 제동력을 가지는 토오크를 발생시켜야한다.

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T - T_L}{J} = \frac{-k\omega}{J} \dots\dots\dots (2)$$

식 (2)에서 정지를 위한 부하토오크를 알아야 하고 부하토오크의 추정이 가능하면 토오크를 식 (3)과 같이 설정하여 전동기를 정지 시킬 수 있다.

$$T^* = \hat{T}_L - k\omega \dots\dots\dots (3)$$

식 (2)와 (3)을 통해 토오크의 설정 값, 실제 부하토오크, 추정 부하토오크는 식(4)로 나타낼 수 있다.

$$J \frac{d\omega}{dt} = T^* - T_L = \hat{T}_L - k\omega - T_L \dots\dots\dots (4)$$

극 저속에서 속도의 검출 및 부하토오크의 추정 오차 및 노이즈를 고려한 지연필터를 사용하면 식 (5)를 얻을 수 있으

며 그림 4와 같은 블록선도를 얻을 수 있다.

$$Js \omega = (\hat{T}_L - k\omega) \left( \frac{1}{\tau s + 1} \right) - T_L \quad (5)$$

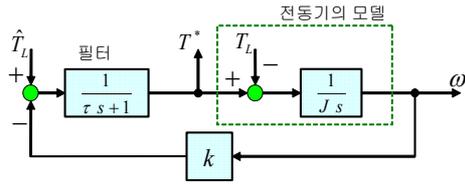


그림 4. 정지제어 블록선도  
Fig. 4. Braking control block diagram

### 2.5 부하토크의 추정

부하토크는 낙차와 차량의 관성에 의한 영향이 많으며 부하토크의 추정에 있어서 오차는 부하의 관성 변화를 고려해야 한다. 부하토크의 추정은 차량의 가속도에 의해 추정되고 관성 등의 영향을 받지 않도록 그림 5와 같은 PI제어기에 의해 추정되는 방법을 사용하여 식 (6)을 얻었다.

$$\begin{cases} J_e \frac{d\hat{\omega}}{dt} = T^* - \hat{T}_L \\ -\hat{T}_L = \left( \frac{k_i}{s} + k_p \right) (\omega - \hat{\omega}) \end{cases} \quad (6)$$

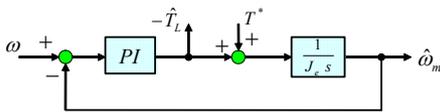


그림 5 부하토크의 추정 블록선도  
Fig. 5. Estimation block diagram load torque

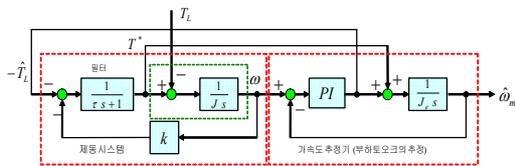


그림 6 부하토크의 추정 모델과 정지제어 블록선도  
Fig. 6. Braking control and estimation model block diagram of load torque

그림 6은 정지제어 블럭과 부하토크의 추정 블럭을 합친 제어기로 구성된 블럭선도이며 전기제동으로 전동기를 정지시킬 때 가속도 추정기에서 PI제어기의 적분기는 속도가 0으로 수렴하도록 하는 동작을 하므로 정지 토크를 갖게 된다.

### 2.6 전력 변환기와 직렬저항의 삽입과 단락

DM방식의 특성을 나타내기 위해서는 전동기의 정격을 고려하여 낮은 전압으로 구동한다. 그림 7과 같이 인버터의 구동전원회로는 48[V]의 배터리를 사용하고 가선의 전압강하의 효과를 갖도록 직류출력에 직렬저항을 가변 할 수 있도록 한다. 전동기는 회생제동을 사용하므로 배터리의 충전회로는 손실에 해당하는 전력만 공급하면 되므로 그림7과 같이 슬라이더와 정류기에 의한 간단한 회로로 구성한다.

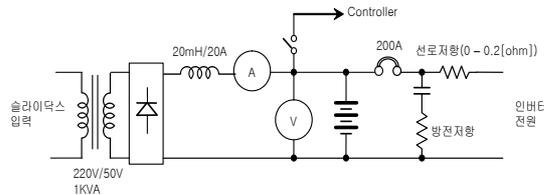


그림 7 전원회로  
Fig. 7. Source circuits

최대 운전범위까지 정 토크 운전을 하기 위하여 그림 8과 같이 2대의 인버터에 의하여 전압의 가변범위를 넓힌다. 자속제어영역을 확보하기 위하여 직렬리액터를 연결하고 영구자석형의 동기전동기는 약계자 영역에서 운전할 때 게이트 신호를 차단하거나 인버터를 off하면 속도에 비례하는 높은 유기기전력을 발생하므로 접촉자를 두어 인버터와 분리하도록 한다. INV-1은 전류제어를 하며 INV-2는 전압형으로 구동하도록 한다. 두 대의 인버터는 변압기에 의하여 가변전압의 범위를 넓히게 되어 최대 운전범위에서도 정 토크운전을 가능하도록 한다. 인버터의 직류측에 회생전류를 측정하기 위한 전류검출기를 설치한다.

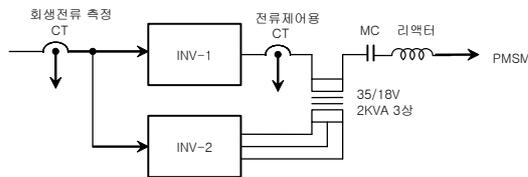


그림 8 전력변환기  
Fig. 8. Power converter

그림 8은 제동에너지를 모두 직류전원으로 보내 회생전력을 활용할 수 있지만 실제적용하기에는 장치가 비싸고 지므로 차량에 장착하기에는 어려운 문제가 발생할 수 있다. 그림 9

로 그림 8은 제동영역 확장의 실험에 사용하고 그림 9와 같이 전동기와 직렬로 저항을 삽입하여 제동에너지의 일부를 저항에서 소비시키는 방법을 제안한다. 그림 9와 같은 운전은 그림 8의 INV-1만을 사용하여 운전하며 실제 적용에 있어서 저항과 접촉기의 추가는 차량의 장착에 고려해볼 수 있다고 사료된다. 제동에너지를 회생전력으로 활용이 가능하지만 실제로 적용하기에는 차량이 비대해지는 단점이 있어 직렬 저항을 삽입하여 제동을 특성을 확인하였으며 제동에너지의 일부를 제동에너지로 소비하는 방법을 제안하였다.

직렬 저항을 사용할 경우 전력손실에 의한 효율이 감소하는 문제를 해결하기 위해 전동기의 구동상태에 따라 점차적으로 저항 값을 감소하는 방법을 사용하였다.

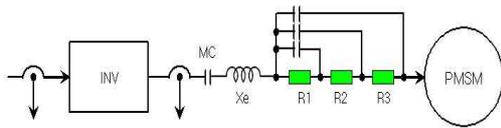


그림 9 직렬저항의 삽입과 단락을 위한 전동기 회로  
Fig. 9. Motor circuit for a insert and short of series resistance

### III. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 제어기와 직렬저항의 삽입을 통한 정지 순간의 제어와 제동특성의 실험 결과는 축소모형에 대한 반복적인 실험으로 전기제동기술을 적용하여 전 영역에 대하여 제동실험을 시뮬레이션하고, 고속영역까지 정 토크, 정 출력운전을 확대하였으며 구배의 조건에서도 정지하는 제어방법을 제시한다. 그림 10은 직렬저항과 제동을 여러 조건하에서 구동 한 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

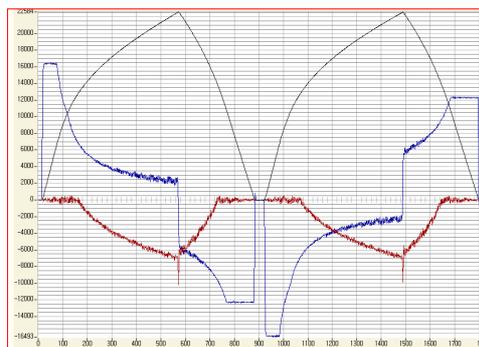


그림 10 직렬저항과 제동  
Fig. 10. Series resistance and braking

### 3.1 정지 순간의 제어

그림11과 같이 속도의 궤환 이득과 필터의 시정수는 제동 토크를 감소하는 시간에 관계된다. 필터의 시정수가 클수록 전류의 진동이 적어지며 속도의 궤환량이 클수록 토크의 감속기간이 짧아지는 것을 확인할 수 있다.

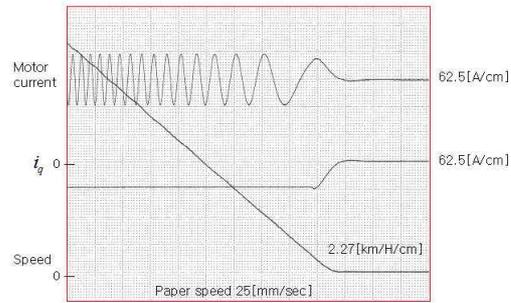


그림 11 속도 궤환량 : 150, 시정수 : 0.0788[s]  
Fig. 11. Speed feedback magnitude:150  
filter time constant :0.0788[s]

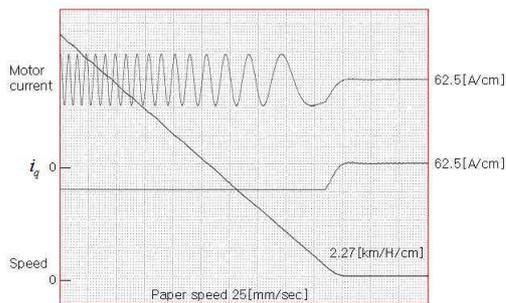
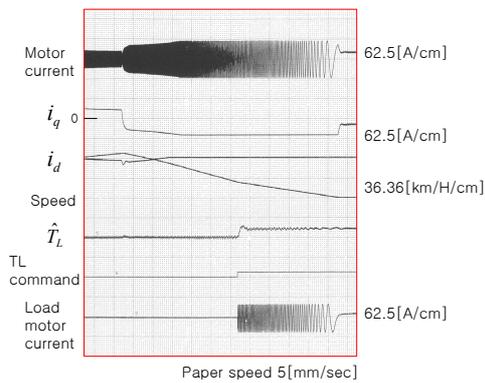


그림 12 속도 궤환량 : 150, 시정수 : 0.0384[s]  
Fig. 12. Speed feedback magnitude:150  
filter time constant :0.0384[s]

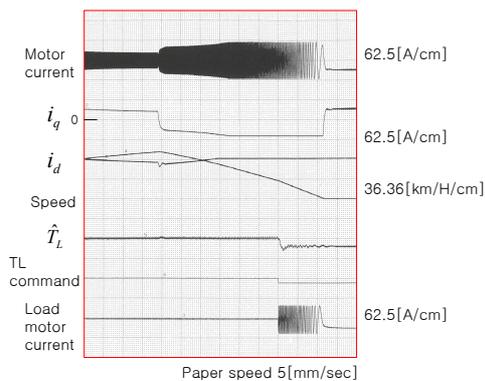
### 3.2 직렬저항을 삽입한 제동특성

전동기의 제어에 있어서 부하 토크의 추정결과는 정상시의 제어에는 사용하지 않으며 정지하는 순간에만 제어모드를 전환하여 제어를 하게 된다. 이것은 실험결과와 추정과정에서 토크성분의 전류가 감소하는 구간이며 제어모드를 전환하여 정지제어를 하는 구간이다. 그림 13 (a)와 그림 13 (b)는 속도 궤환량과 필터시정수를 그림 9의 조건에서 부하 토크 추정기 PI제어기의 이득변화에 따른 응답을 보인 것이다. 추

정기의 이득조절은 부하(구배)의 변화에 따른 추정기의 과도 상태에 관계되며 실험에 의한 조정이 요구되는 사항이다. 정지한 후에도 부하 토크를 추정하고 있으며 구배의 조건에서 정지 토크를 발생하고 있다. 따라서 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. 직렬저항이 커짐에 따라 d축 전류가 흐르는 범위가 감소하였으며 이는 직렬저항의 삽입을 통하여 제동 운전영역이 확대됨을 확인할 수 있었다.



(a) 구배를 내려갈 때



(b) 구배를 오를 때

그림 13. 부하 토크 추정기의 응답(속도궤환량 : 150, 필터시정수 :0.0384[s] (추정기의 이득  $k_i = 554.8, k_p = 98$ ))

Fig. 13. Estimator response of load torque/Speed feedback magnitude:150, filter time constant :0.0384[s] estimator gain  $k_i = 554.8, k_p = 98$ )

#### IV. 결론

전기제동에 의한 회생전력은 유효하게 사용되어 에너지의 활용효과를 높이고 있다. 고속영역에서 제동기술은 부족한 전기 제동력을 보충하는 공기제동을 병행하고 있으나 환경 친화적이고 차량의 성능향상을 위해서는 공기제동의 사용 기회를 최소화 하여야 한다. 고속영역에 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. 따라서 본 연구에서 제안된 직렬저항을 삽입하는 방법을 통하여 5[kW]급 PMSM 전동기를 이용하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 직렬저항의 삽입을 통한 넓은 영역에서 시뮬레이션 결과 제동이 가능하였다.
- (2) 삽입된 저항을 주어진 상황에 따라 단락을 통한 효율의 문제를 개선하였다.
- (3) 회생제동의 확대를 통한 에너지 활용의 극대화 할 수 있다.
- (4) 제동순간의 소음저감과 소모성 부품의 마모와 분진발생 감소한다.

현재 국내의 전동차는 공기제동과 전기제동을 병행하여 사용하고 있다. 위와 같은 시스템을 적용하여 완전 전기제동을 하기 위해서 정지까지의 전기제동과 정지의 순간에 정지 토크를 갖도록 하고, 정지 후 공기제동에 의한 정차브레이크를 사용하도록 한다면 공기브레이크의 사용기회를 최소화할 수 있을 것으로 사료 된다.

#### 참고문헌

[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 Driver, TER-00-37LD-00-64, pp. 15-18,

July 2000.

- [2] L. Kovudhikulrungsri, 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] 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.
- [5] Dong-sub Oh, Seong-eup Oh, Se-jin Seong, In-soo Kim "Study in High speed electromotor controller use to DSP" Electricity electronic Association, Electricity electronic conference in collection of dissertations
- [6] Seock-Yoon Joong, Kwang-heun Kim "Design & magnetization technology of permanent magnet synchronize electromotor" Memoir of Electricity electronic Association, Vol.7, no.5/10, 2002
- [7] Han-min Lee, Gil-dong Kim, Seh-chan Oh, Chang-mu Lee, Sung-hyuk Park "A Study on Application of Pure Electric Braking System for Urban Transit System" Dae-han Electrical Engineering, pp. 263-265, Vol.2006 No.10
- [8] Jee-ho Lee, Hyeong-cheol Lee, Jae-ho Kwak "A study for improvement performance of electric brake for electric train" Dae-han Electrical Engineering, pp. 277-277, Vol.2008 No.7

## 저자 소개



### 나 승 권

1999 : 세명대학교 공학사  
(전기공학)  
2001 : 세명대학교 공학석사  
(전기전자공학)  
2008 : 세명대학교 공학박사  
(전기전자공학)  
1981~1988 : 부산위생(한방)병원  
1988~1994 : 한국수자원공사  
1994~현재 : 한국폴리텍대학 원주캠퍼스  
의용공학과 교수  
관심분야 : 의용공학 및 에너지 변환  
전력전자  
Email : skna2@hanmail.net



### 구 기 준

1983 : 단국대학교 공학사  
(전자공학)  
1988 : 한양대학교 공학석사  
(전자공학)  
1996 : 숭실대학교 공학박사  
(전자공학)  
현재 : 한림성심대학교 정보통신네트워크과 교수  
관심분야 : 통신 및 신호처리, 의료전자  
Email : gijun@hsc.ac.kr