

# 도시철도 전차의 정위치 정차 제어에 관한 연구

A Study on the precious stopping control for the automatic electric rail cars

박문규\* · 김규식\*\*

Mun-Gyu Park · Gyu-Sik Kim

**Abstract** - While trains perform a complete precision stopping control at stop point, it is essential to keep better commuters comfort in prompt. Because a train's brake force tends to increase a brake effort in a low speed and a low brake effort, a brake force in motor cars must be increased to keep better passenger comfort, to control the special braking qualities and to prevent the impact of the automatic coupler rather than trailer's. Rail cars must have a special braking process for the train stopping control. In the train stop mode, the train stopping control is designed to start at 20km/h. It starts by Dynamic brake blending, and then finally stops by only the friction. If these process are not exactly activated, the train may fail a complete precision stop. In this report, it studied the electric and friction brake processing during the precious stopping control. To achieve exact test results, the speed reference has to be reduced the calculated difference. In the precision stopping control, the ways of the keeping brake force in motor car was analyzed and some solutions of controlling air pressure was brought up by means of direct test in main line. This study was based on line 5 in Seoul Metropolitan subway

**Key Words** : Precision stopping control, Dynamic brake blending, Brake force, Reference speed, Brake effort

## 1. 서 론

1974년 1호선 개통한 이래 지금까지 지속적으로 도시철도가 확충되어 서울 등 지방 6개 도시에서 운행되고 있다. 이러한 양적팽창과 더불어 도시철도 전차시스템 기술 역시 급격하게 발전되었다. 도시철도는 자동운전시스템으로 발전되어 종래 수동운행방식에 비해 고밀도 운행이 가능하게 되었고 전체 편성에 대한 차량수가 줄게 되었으며 더욱 신속 안전하고 효율적인 운전이 가능하게 되었다. 도시철도의 자동운전에서 정차에 대한 이례적인 상황이 발생하는 경우 시스템 자체에 의한 실시간 대처가 곤란하므로 정확한 제어가 요구된다. 따라서 본 연구는 전차가 안정된 승차감을 유지하면서 신속 정확한 정위치 정차 기능에 대하여 전차의 정위치 제어과정의 연구를 통해 정위치 정차율을 향상하여 정차의 신뢰성 확보하고자 하였다. 이 연구의 시험은 자동으로 운행되는 5호선 전차를 대상으로 하였다.

## 2. 자동운전 제어장치

### 2.1 자동운전 제어장치

자동운전제어장치는 크게 신호제어장치와 전차제어장치로 구분된다. 신호제어장치는 전차의 운행조건을 제시하여 전차의 진행 가부 및 위험의 유무 등을 제시하는 장치로 전차의 안전운행을 확보하고, 정확성과 신속성을 증가시킨다. 이는 신호종합제어장치, 연동장치 및 궤도회로장치 등으로 구성되어 있다. 전차제어장치는 전차종합제어장치(TCMS), 전차자동제어장치(ATC) 및 자동운전장치(ATO)로 되어있다. TCMS장치는 반도체, 소프트웨어

기술과 데이터 통신 기술을 이용한 중앙집중식 컴퓨터장치로 전차의 각 장치를 중앙 집중식으로 제어하고 감시한다. ATC 장치는 지상에 설치된 신호제어장치의 서브장치와 함께 동작하는 병렬 이중계 장치로 각 궤도회로의 속도코드를 수신하여 전차가 선로조건에 적합하게 운행되도록 하고, 전차가 제한속도 초과여부를 실시간 상시 감시하여 전차가 안전한 속도로 운행되도록 제어한다. ATO장치는 일반적으로 운전자에 의해 수행되는 운전 기능을 자동으로 제어하는 장치로 신호 조건에 의해 전차를 출발, 가속 및 정위치 정차제어 등을 자동으로 하는 장치이다. 이는 TCMS장치에 의해 제어되고, 전차의 운행위치 및 속도에 따라 트랙미터, 역 및 지상정보를 이용하여 출발제어, 목표속도제어 및 정위치 정차제어 등을 자동으로 제어한다. 전차의 정위치 정차 허용오차는 일반적으로  $\pm 35\text{cm}$  이내의 범위이다.

## 2.2 전차의 정위치 정차 제어

### 2.2.1 ATO장치의 정차 제어

ATO장치는 매 순간마다 연산된 기준속도에 따라 정확하게 감속 및 정위치 정차를 제어한다. 이는 속도코드와 정차지점에 대한 기준과 선로에 대한 데이터베이스 기준의 2가지 기준에 의한다. ATO장치는 운행을 시작하면 정차지점의 오차범위 안에 정차하기 위해 위치에 따라 제동력을 제어한다. 위치는 PSM에 의해 확인한다. 기준속도는 속도제한을 위한 거리-속도 프로파일 및 정차를 위한 거리-속도 프로파일 중에서 결정하고 최대속도는 곡선, 구배, 전철분기, Platform 등에 의해 결정된다. ATO장치는 데이터베이스에서 선로에 대한 속도정보를 얻어 속도제한이 시작되기 전에 지정된 속도가 되도록 제동프로파일을 제어하고 전차속도와 정차거리에 따라 위치제어를 하여 정확한 위치에 정차하도록 지속적으로 속도에 따른 제동파일을 적용한다. ATO장치는 정차 허용범위는 적으나 신속하고 안정된 정차를 위하여 2단계 정차제어를 한다. 먼저 전차가 기준속도에

저자 소개

\* 박문규 : 서울특별시 도시철도공사

\*\* 김규식 : 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 교수

따라 남아있는 정차지점에 따라 제어하고 다음으로 제동력의 1/2제동에 대하여 승차감을 유지하기 위해 낮은 감속비율로 제어한다. 이 같은 고정제동을 제어는 거리에 대비하여 전차를 속도 파일에 의해 제어하기 위함이다. 아래 식은 정차모드에서 제동에 따른 기준속도( $V_{ref}$ )를 연산하는 식이다.

$$V_{ref} = \sqrt{V^2 - 2as} \quad (\text{km/h}) \quad (1)$$

- $V$ : 제동시작하기 전의 전차속도
- $a$ : 전차 감속도
- $s$ : 정지점까지의 거리

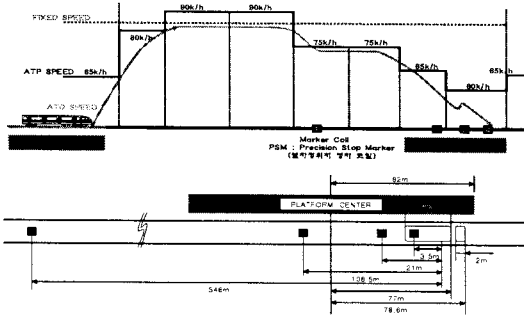


Fig. 2.1 ATO장치 제어 운행 정차제어 패턴

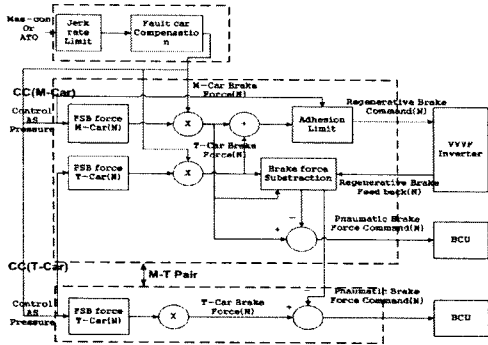


Fig. 2.2 전차의 제동시스템 제어 다이어그램

### 2.2.1. TCMS장치에 의한 정차 제어

전차제동은 전차컴퓨터(TC)와 차량컴퓨터(CC)에 의해 제어되는데 최우선적으로 전기제동을 제어하고 제동력이 부족한 경우 부수차, 동력차의 순으로 공기제동을 추가로 제어하는 일괄교차 제어방식의 혼합제동 제어를 한다. 이때 제동력은 차량의 하중과 속도에 따라 제어된다. 정차모드에서 제동은 단위차량별(동력차-부수차)로 제동제어가 되는데 낮은 제동율과 저속도에서는 동력차에 대한 제동율을 증가시켜야 한다. 이는 전기제동과 공기제동의 원활한 제어와 제동차이에 따른 충격을 방지하기 위함이다. 이런 제동특성에 만족하고 자동운전의 정차모드에서 전기제동에 대한 공기제동의 응답을 높여 제동의 신뢰성을 증가시키기 위해 동시 혼합제동제어가 필요한데 이때 동력차에 대한 전기제동력의 일부를 공기제동으로 전환할 필요가 있다. 또한 전기제동의 효율이 낮

아지는 경우에도 동력차의 제동력을 효율적으로 충족시키기 위하여 제동력 제어 순서와 관계없이 공기제동력은 사전에 확보되어야 한다. 이러한 기능은 자동운전에서 승차감을 유지하기 위해 필수적이며 이때 공기제동 제어는 제동효율과 전기제동 비율을 감안하여 제어되어야 한다.

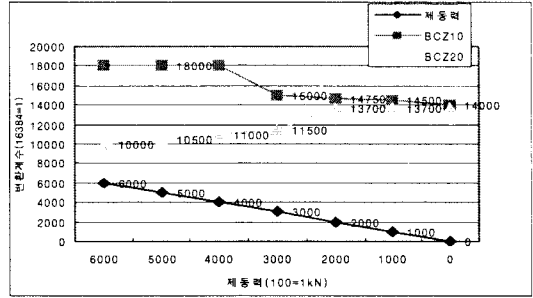


Fig. 2.3 제동력에 따른 제동압 제어

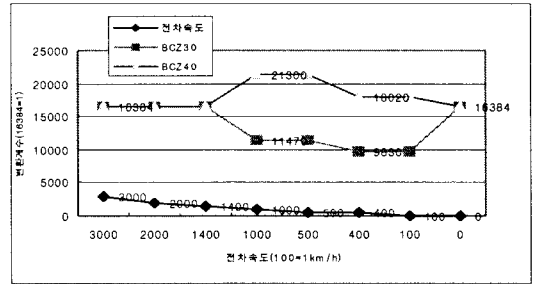


Fig. 2.4 속도에 따른 제동압 제어

### 3. 정위치 정차 시험결과

전차 시스템에 의해 연산되는 속도와 실제 운행속도의 오차에 따른 정위치 정차상태를 확인하기 위해 전차의 차량직경값을 조정하고 이에 따른 자동보정기능을 시험하였다. 또한 정차모드에서 제동제어를 확인하기 위해 전기제동에 소멸시점을 단계적으로 조정하여 제동제어 응답율과 공기제동의 제동압 변환율(10~20%)을 조정하여 정차모드에서 정차속도 및 정차를 시험하였다. ATO장치는 운행에서 역행-타행-제동-완해 정차의 과정으로 제어된다. 전차는 출발과 함께 목표속도까지 최대로 역행제어를 하고 이후 목표속도를 유지하기 위한 제어를 한다. 목표속도제어에서 첫 번째 PSM에 이르면 1차 정차거리를 보정하여 데이터베이스의 속도프로파일에 따라 제어한다. 두 번째 PSM에 이르면 2단계 정차제어의 1단계 감속도 제어를 하고 세 번째 PSM에서 2차 감속도 제어를 한다. 본선 시험의 감속제어는 PSM3에서 시행되는 경우와 PSM3제어에 대해 PSM2에서 추가로 제어되는 두 가지 제어패턴이 일반적이었다. 전차는 추가 제동력이 요구되는 경우 서행 및 정차지점 이전에 정차하는 경우가 많았는데, 이는 초과정차에 대한 우려로 제동력을 높게 요구하기 하는 것으로 분석된다. 또한 요구 제동력이 높은 경우 서행하게 되고 서행에 의한 재역행의 경우 정차지점에 구배가 있는 경우는 초과정차하는 경우가 있었다. 전기제동과 공기제동의 동시 제어에 대한 시험을 위해 전기제동력의 소멸시점을 조정하여 정차제어상태를 분석하였다. 동력차는 정

차모드에서 제동력 효율이 전차 제동의 1/2이하로 떨어지는 경우 같은 차량의 전기제동과 함께 공기제동이 제어되는데 전기제동의 소멸시점은 제동응답율에 관련되어 공기제동의 제어시점과 밀접한 관련이 있었다. 공기제동의 제어감소량을 낮추고 전기제동의 소멸시점을 지연시키는 경우 서행하는 것이 다소 줄어드는 것으로 시험되었다. 전기제동 효율은 15km/h이하에서 급격히 저하되어 11km/h정도에서 제동효율은 동력차의 제동분담율의 1/2이하로 낮아지게 된다. 제동효율이 1/2이하로 낮아지게 되면 동력차의 제동율이 감소되는 현상이 발생되어 충격 등의 현상과 함께 정차제어에 오류를 일으키므로 전기제동 소멸시점 이전에 공기제동이 보완될 수 있도록 하여야 한다. 전차의 공기제동은 요구되는 공기제동력에 대해 속도와 제동압에 따라 CC컴퓨터에서 제어하게 되는데 제동제어는 대략 전기제동의 효율과 관련하여 14km/h-6km/h-3km/h의 속도에서 3단계 제어를 하였다. 따라서 공기제동에 대한 정확한 제동제어를 확인하기 위해 제동압 감소율을 10~30%로 조정 시험하였다. 시험결과 제동압 조정비율을 낮출수록 정차속도는 향상되었고 조기정차가 감소하는 것으로 분석되었다. 하지만 이 시험에서 공기압 제어 조건은 초과정차에 대한 위험부담을 줄이기 위해서는 제동압 조정비율이 다소 높게 조정하는 것이 안정적 정차에 도움이 되는 것으로 분석되었다. 전차의 자동제어에서 정차점 이전에 정차하는 경우 제 조정이 가능하지만 정차점 오차범위 이상으로 지나치는 경우 재차 조정이 어렵기 때문이다.

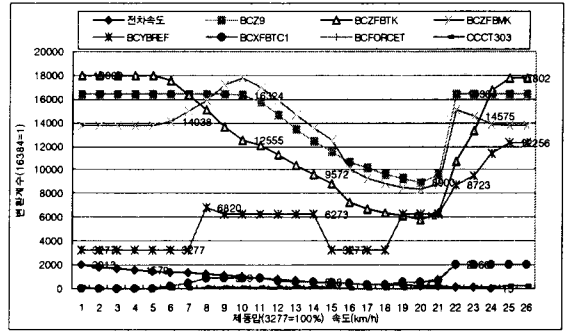


Fig. 3.3 정차모드에서 공기제동 제동압 제어과정

#### 4. 결론

본 연구에서는 도시철도 전차의 자동운전 제어에서 연산되는 기준속도와 제동제어가 정위치 정차에 미치는 영향을 연구하였다.

전차의 자동제어를 위해 연산되는 기준속도와 실제 운행속도의 오차가 적은 경우 안정적 정차제어를 하게 된다. 따라서 정확한 기준속도 연산을 위해 각 장치의 측정 오차 축소 및 정확한 차륜 관리가 필요하며 역행 장치도 기준속도에 신속하게 일치하도록 자동보정기능이 충족되어야 한다. 전차의 정차제어에서 전기제동 효율은 동력차 공기제동의 제어시점 제어를 결정하는 요소가 된다. 이는 동력차의 안정적 제동력을 유지하고 또한 ATO장치의 요구제동력에 대한 응답율을 높여 안정적 제어가 이뤄지게 한다. 따라서 전기제동과 공기제동의 제동압 제어량과 제어시점이 ATO장치의 요구제동력에 항상 일치하도록 하여야 한다. 또한 최종의 정차 혼합제동에서 공기제동으로 전환된 후 제어에서 제동력과 속도에 대한 제동압 제어가 정위치 정차제어에 많은 영향을 미치는데 요구제동율에 비해 제동량 감소율이 큰 경우 제어의 응답율이 낮아져 전차는 서행 또는 정위치 정차율이 낮아지게 된다. 또한 전차의 운행율이 높아지면서 전차의 조건이 변하게 되므로 선로나 차량조건에 따라 시험적으로 제동분배율이 적용되어야 하고, 또한 자동운전 정차제어 과정에서 발생된 이례적인 상황에 대해서 시스템에 의한 즉각적인 대처에 어려움이 있으므로 제어과정에서 정확한 제어와 안전적 제어가 되어야 한다. 이를 위해 제동압 감소율은 정차점 오차를 넘지 않는 범위 내에서 결정되어야 한다. 자동운전장치의 연산속도 및 통신속도 등은 자동제어의 속도항상에 영향을 미치므로 지속적으로 연구되어야 하고 앞으로 무인운전 시행에 대비 더욱 안정된 정차제어가 되도록 정위치 정차에 대한 연구를 지속할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] ABB Traction AB "Software diagram Train computer TC, CC" 1994.
- [2] ABB Traction AB "ATO, Automatic train operation" 1994.
- [3] 서울도시철도공사 "신호 1 II III" 1995.
- [4] KNORR BREMSE "RAIL BRAKES" 1995.

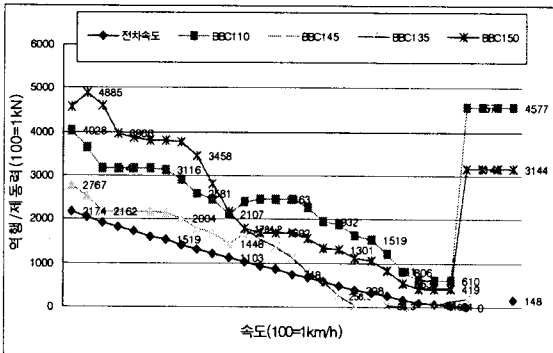


Fig. 3.1 전기제동효율 저하에 따른 공기제동제어 과정

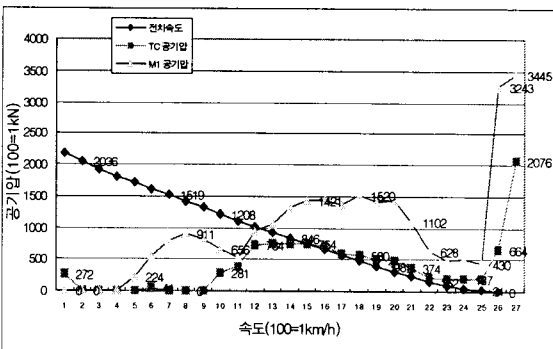


Fig. 3.2 정차모드에서 공기제동 제어 과정