

# 자동안전 차량의 정위치 정차율 향상을 위한 시스템 기능 개선 및 시험 방안에 관한 연구

## Study for improve the tracing stopping ratio of ATO train through test procedure and system integration

이경복\*                      이희선\*\*                      차준일\*                      김규중\*  
Lee, Kyoung-Bok              Lee, Heui-Seon              Cha, Joon-il              Kim, Kyu-Joong

---

### ABSTRACT

This paper describes the method of how to improve the probability of the tracing stopping ratio which is the most important factor in Automatic Train Operation (ATO). Aspects of improving the performance of automatic driving, the followings are investigated and studied : the interface between the signal system and the vehicle, the need to improve braking system, test method of blending brakes, how to minimize the delay of commands for real-time control.

In this study, we applied this method to prove the effectiveness in DAEJEON LINE1

key word : ATO, Stopping ratio, Blending control, Interface, Set value test

---

### 1. 서 론

전 세계적으로 자동안전과 무인운전 차량의 공급이 증가하고 기존 수동운전 차량에 대한 자동안전 (ATO : Automatic Train Operation) 시스템으로의 변경이 늘어남에 따라 정해진 위치에 정확히 정차하는 정차점 추적을 위한 차량 시스템의 성능 개선 연구와 시험 방법이 활발히 진행되고 있다. 이러한 정차점 추적을 위하여 신호장치가 지령하는 제동 추진명령에 대한 정확하고도 신속한 차량 시스템의 반응 및 유지보수가 중요한 요소로 대두되고 있다.

따라서, ATO 장치의 기본적인 기능을 유지하며, 정위치 정차율을 높이기 위해서는 차, 지상 신호 장치와 차량 시스템에 대한 인터페이스 및 제동 명령에 대한 실시간 제어 등이 중요한 요소로 작용하게 된다.

본 논문에서는 자동 운전 시 차상신호(ATC:Auto Train Control) 장치의 속도 프로파일에 의해서 수행되어지는 제동 지령에 실시간으로 추종하는 차량 시스템의 최적화를 위하여 개선되어야 할 차량의 제동시스템 성능 확인 방안, 차량의 전기제동 및 공기제동의 블렌딩 제어방법 및 시험, SET VALUE TEST 방식, 저크제어 방식 개선, ATO 장치의 제동력 지령 프로세서에 대해서 기술하였다. 또한, 차량의 주요 장치와 ATC 장치의 종합적인 인터페이스를 통하여 정확하고 신속한 정차점 추적 기능이 향상되고 이를 통해 정위치 정차율을 향상시킬 수 있음을 차량에 적용하여 입증하였다.

---

† 책임저자 : 정희원, 대전도시철도공사  
E-mail : bjhlkb@hanmail.net  
TBL : (042)539-3666 FAX : (042)539-3559  
\* 비회원, 대전도시철도공사

## 2. 차량 제동 시스템 분석

### 2.1 제동 시스템의 구성

본 논문에서 적용한 제동력 특성 모델링을 위한 TCMS (Train Control Monitoring System) 차량의 기본적인 시스템 구성 및 제동장치 시스템의 주요 사항은 아래와 같다.

- 제동방식 : 전기제동 및 공기제동
- 가선전압 : DC 1000V ~ 1800V (1500V정격)
- 감속도 : 상용시 - 3.5km/h (+5%, -10%)  
비상시 - 4.5km/h (+5%, -10%)

그림1. 압력제어 블록 다이어그램은 차량 공기 제동 시스템의 공기 제동에 대한 압력 제어 과정을 전기적인 흐름과 기계적인 흐름으로 나타낸 그림이다.

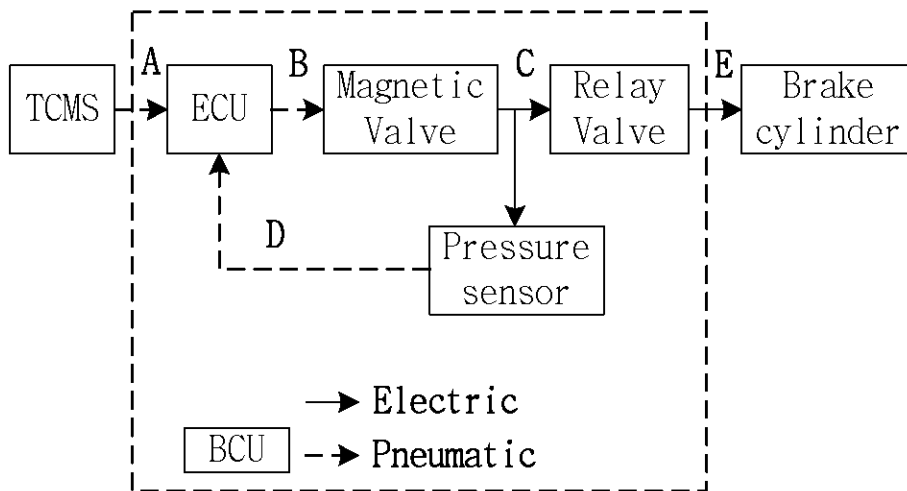


그림 1 압력제어 블록 다이어그램

TCMS에서 지령한 제동명령(A)은 제동 전자 유니트(ECU)에 수신되어 요구된 공기 제동 토크를 압력으로 환산하여 계산되며, ECU는 AC (AC : Application Control )압력에 의존하는 전류신호로(B) 전자밸브의 위치를 유지 또는 변경시키며 제동 지령을 전송한다.

AC 압력은 제동전자 유니트(ECU)에 의해  $\pm 10\text{kPa}$  내의 압력 범위에서 제어가 이루어지며, Magnetic Valve에서의 AC 압력(C)은 유량을 증폭시키는 중계밸브의 안내실로 유입되고, ECU는 이 압력을 모니터링(D)하여 실제 작동하는 AC 압력을 알 수 있다.

AC 압력은 제동통(Brake Cylinder)로 유입되어 차량의 감속도를 제어하는 중계 밸브의 출력 압력(BC 압력)으로 동작한다. 이와 같은 과정을 통하여 차량이 마지막 정차할 순간에 사용되어지는 저속 영역에서의 대부분 제동은 공기제동이 사용되기 때문에 공기제동 장치의 지연시간, 응답특성, 작동 원리 등이 정확히 분석되어야 한다.

그림 2. 제동장치의 스텝별 공기압력 그래프는 B1 ~ B7까지의 공기 압력에 대한 그래프로 기준값 범위 내(+10%, -10%)에서 일정한 공기 제동압으로 유지되어야 함을 나타내 주고 있다.

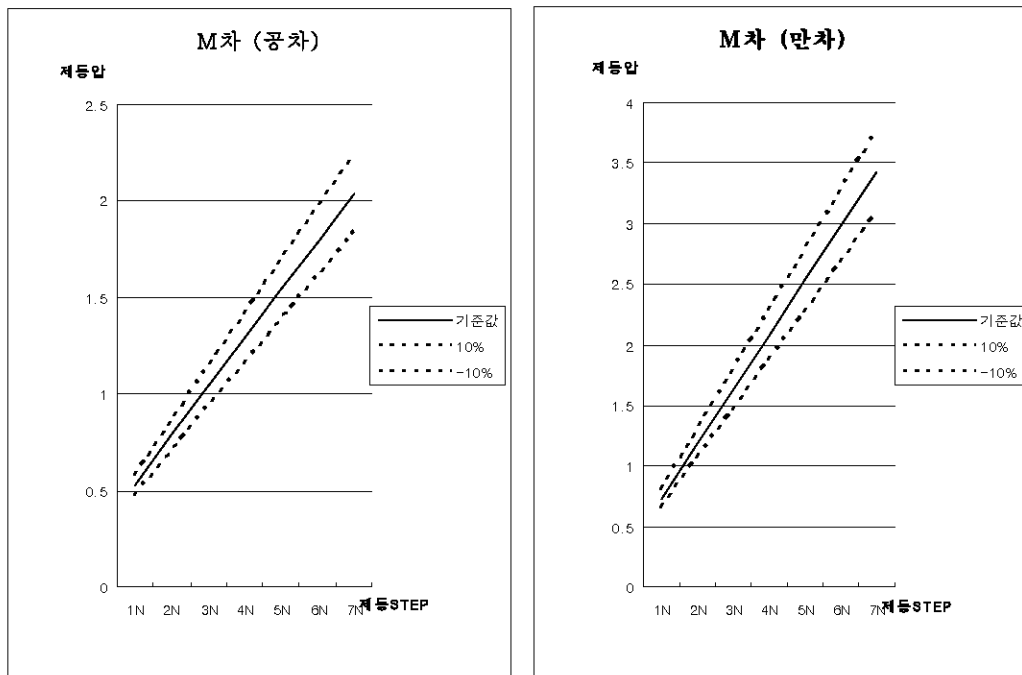


그림 2. 제동장치의 스텝별 공기압력 그래프(공차,만차)

ATO 장치는 차량의 공기제동압력이 그림 2. 제동장치의 스텝별 공기압력 그래프와 같이 일차원적인 직선 형태의 제동압력에 대한 성능 범위를 고려하여 남은 거리에 대한 ATO 제동지령을 계산하고 있다. 따라서, 자동 운전 차량의 정위치 정착율 향상을 위해서는 제동장치의 공기 압력이 정해진 사양에 맞도록 동작이 일정하고 기준 범위 내에서 동작하는 신뢰성을 지니고 있어야 한다. 이를 위해 차량의 유지 보수 시 제동장치의 제동압에 대한 선형성을 확인하고 이를 관리하는 것은 정위치정차를 위한 기본적인 사항으로 대두되고 있다.

차량의 정기적인 유지 보수 시 각 제동 스텝별 공기 제동압을 확인하고 조정 제어해야 한다. 그러나 현실적으로 낮은 부분의 제동압력을 사양에 맞게 관리하기에는 기계적인 요소로 인하여 많은 제약이 따르게 된다.

본 논문에서는 수많은 시험과 ATO 제동 지령의 패턴을 분석하여 저속도 영역에서 이루어지는 정위치 정착의 제동에 많이 사용되는 35% 이상의 제동압력에 대하여 정기적이고 정밀한 제동압력 관리를 제안한다.

## 2.2 제동 명령 시간 특성 해석

ATO 장치의 속도제어 방식은 DTG(Distance To Go) 방식으로 열차가 현재의 운행 위치를 인식하고, 정지점까지의 남은 거리를 계산하며 속도를 제어하는 방식으로 열차가 각각의 궤도회로 진입 시 차상, 지상 신호 장치간의 거리동기화를 실시하여 남은 거리를 연산한다.

거리 동기화는 열차가 궤도회로 경계를 인식하는 과정을 말하며, 차상의 ATO 장치는 차량에 장착된 Odometer를 통해서 열차의 운행거리 및 속도를 계산하여 제어를 실시하게 된다. 열차의 운행거리는 거리 동기화로부터 Partial distance의 합으로 결정되며 거리(Spartial\_distance)는 식 (1)과 같다.

$$S_{partial\_distance} = FR * \pi * dr * WI / W \quad (1)$$

-FR : 회전방향(+,-)

-dr : 차축지름

-WI : 200msec 동안의 Odometer 펄스 수

-W : 차축 1회전당 펄스 수

측정주기를 200[msec]로 하여, 계산된 Spartial\_distance를 200[msec]로 나누어 200[msec] 시간 동안의 평균속도를 산출하고 n번의 Spartial\_distance에 대한 평균 속도를 계산 하여 제어에 사용하게 된다. 이를 수식으로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\text{속도} : V(t_k) = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} S_{\text{partial\_distance}}(t_{k-i})}{n * dt} \quad (2)$$

- $t_k$ :속도측정 순간(moments of averaging)
- $S_{\text{partial\_distance}}(t_i)$ :  $t_i$ 에서 계산된 Partial distance
- $dt$ :측정주기(200msec)

그림3. 차량 시스템의 제동 지연시간 분석과 같이 ATO 장치는 차상신호장치의 속도센서를 통해 실시간으로 차량의 속도를 수신하고 이를 자신의 속도 프로파일과 비교 분석하여 차량의 종합제어장치(TCMS)에 추진(P) 및 제동(B) 명령을 아날로그 신호로 실시간 지령한다. 이 제동명령을 TCMS TC는 Train Bus를 통하여 각 량에 위치한 CC(Car computer)에 Torque의 수치로 전송하고 공기제동만을 수행하는 TC CAR와 공기 및 전기제동을 수행하는 M CAR에 전송한다.

CC의 제동지령을 받은 제동장치 시스템과 VVVF 인버터장치는 각각 공기제동과 전기(회생)제동을 실시하여 차량을 ATO 지령에 맞게 감속하는 제동 동작을 수행하게 된다.

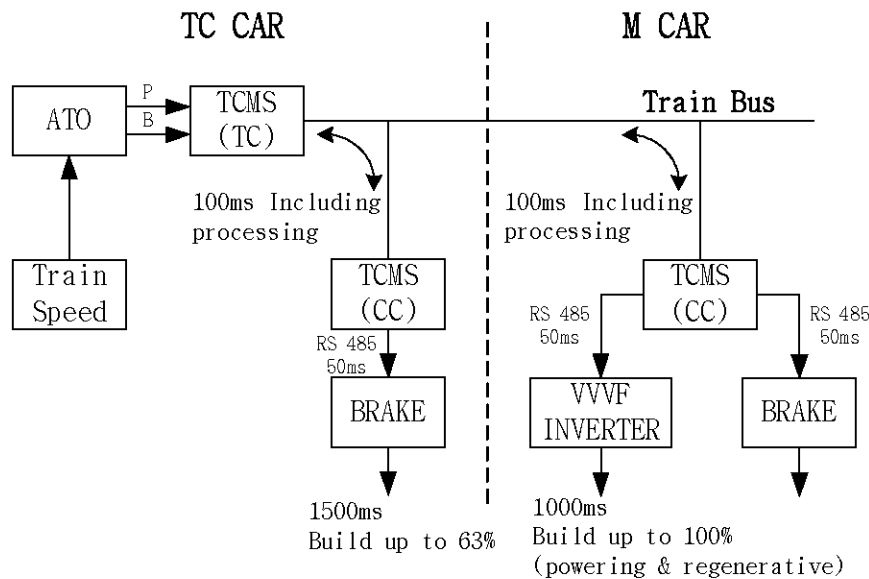


그림3. 차량 시스템의 제동 지연시간 분석

그림3. 차량 시스템의 제동 지연시간 분석과 같은 제동 명령 프로세싱 진행시에 차량이 실제적으로 물리적인 제동력을 구현하기까지는 Tc, M CAR는 각각 1.5초, 1초의 시간 지연이 발생한다. 이러한 지연 Factor를 ATO 제동 명령 지령 시 시간 지연 보상 값으로 적용하여 정차점 추적 기능을 향상하여야 한다.

차량의 제동거리는 TCMS에서 지령한 제동명령이 전송된 후 정차할 때까지의 시간동안 열차가 진행한 거리를 말하며 공주거리와 실제동거리로 나누어 생각해 볼 수 있다.

열차의 제동거리( $S$ )는 식 (3)과 같다.

$$S = S_1 + S_2$$

$$= \frac{V}{3.6} t_n + \frac{4.17 W V^2}{B + W(R_R + R_G + R_C)} \quad (3)$$

여기서,  $S_1$  : 공주거리,  $S_2$  : 실제동거리

$B$  : 제동력,  $R_R$ : 주행 저항

$R_G$ : 구배 저항,  $R_C$ : 곡선 저항

$W$  : 중량  $V$  : 속도

ATC 장치는 이러한 제동 지령에 따른 명령 지연 시간과 차량의 저항 및 제동장치의 특성상 나타나는 공주거리등을 고려한 명령 처리 프로세스를 처리하여야 한다. 즉 정지점에 대한 거리와 제동 명령의 지연에 대한 보상 루틴을 신호 장치의 제어 루틴에 포함하여 차량의 제동 명령을 수행하여야 한다.

### 3. 정위치 정차율 향상 방안

#### 3.1 블랜딩 제동 제어방법 개선

블랜딩 제동이란 차량이 정차를 위해 제동동작을 수행할 때 전동기에 의해 실시되는 전기제동을 종료(fade\_out)하고 모든 제동을 공기압력에 의해 실시하기 위해 공기제동으로 전환(fade\_in)하는 방식을 말한다. 차량이 제동동작을 수행할 때 정지점에 가까운 거리에서 실시되는 블랜딩 제동의 특성으로 인하여 전기제동과 공기제동의 갑작스런 변화를 일으키게 되며, 차량의 감속도가 변하게 된다. 이러한 차량 감속도의 변화는 정위치정차율을 하락시키는 요인으로 작용한다.

따라서, 이를 방지하기 위하여 차량 제동 장치의 동작 특성에 따른 모델링 및 공기 제동압 관리를 통한 제동시스템의 신뢰를 확보하고, 차량의 저속도 영역에서 수행되는 전기제동과 공기 제동의 블랜딩 시간 및 특성에 대해 정밀 튜닝을 실시하여야 한다.

그림4.는 제동 블랜딩 특성 곡선으로 블랜딩 제동 시 공기제동 특성상 기계적으로 나타나는 지연시간을 고려하여 공기 제동압을 먼저 build up 시키면서 전기제동을 감소시키는 그림이다.

공기제동이 시작되는 시점(블랜딩 시작점)은 속도 13km/h에서 시작되어 전기제동이 완전히 Fade out 되어 블랜딩이 끝나는 시점은 5km/h로 설계되어져 있지만 운영기관의 차량의 시격 운행패턴을 고려해서 전기제동의 감소 기울기를 조정하면서 전체적으로 감속도의 변화량을 최소화 하는 방안을 적용하여야 한다. 이를 위하여 일정한 제동 명령을 ATO 장치가 지령하고 이를 통해 열차가 정지할 때의 감속도 변화량을 측정, 시험하는 방식을 사용하였다.

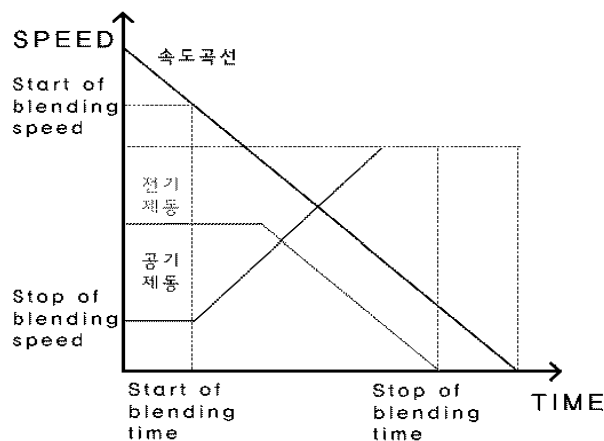


그림4. 제동 블랜딩 특성 곡선

### 3.2 SET VALUE TEST 확인

본 논문에서는 정위치 정차에 중요한 영향을 미치는 블랜딩 제동의 정확도 향상 및 감속도 특성 곡선의 신뢰도를 위하여 SET VALUE TEST 방식을 사용하였다. SET VALUE TEST는 ATO 장치의 제동명령을 일정한 값으로 고정하고 차량을 정지시키면서 전기제동과 공기제동의 블랜딩 시 나타나는 차량의 감속도 변화를 측정하여 일정한 감속도가 유지되도록 전기제동의 fade\_out시점과 공기제동의 fade\_in 시점을 조정하는 방식을 말한다.

아래 그림5.는 블랜딩 제동 개선 전 SET VALUE TEST 시험 실측 데이터이고 그림6. 은 블랜딩 제동 시 공기 제동의 기울기에 대한 개선 후 블랜딩 제동 시 감속도 변화량을 실측한 데이터이다.

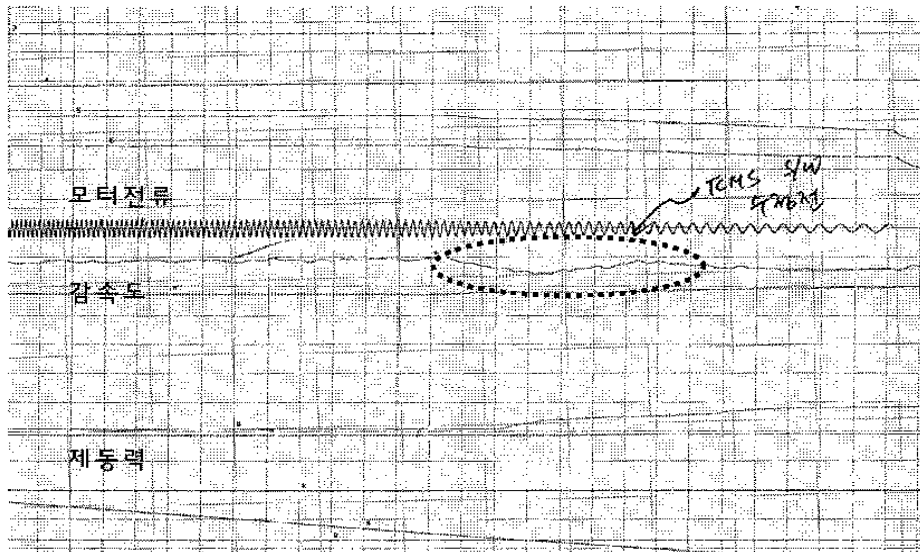


그림5. 블랜딩 제동 개선 전 시험 데이터

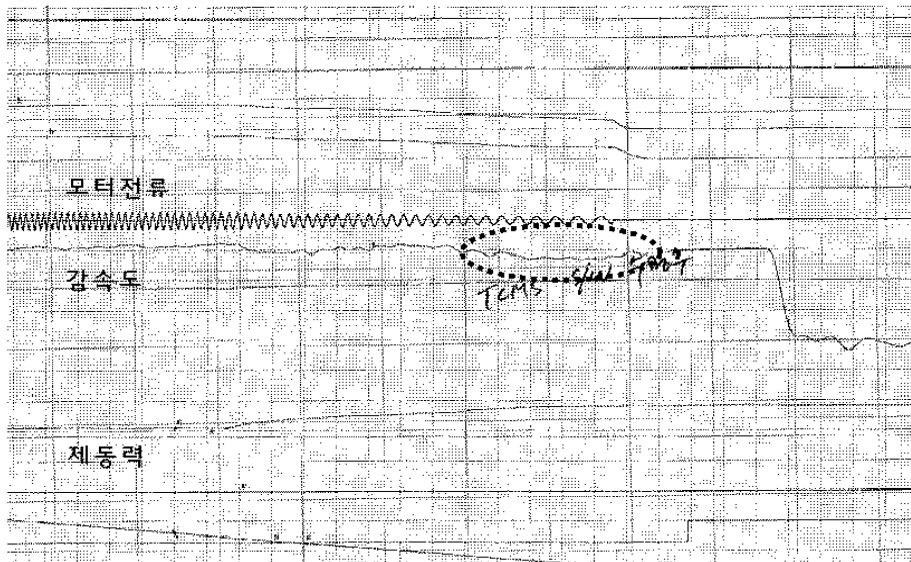


그림6. 블랜딩 제동 개선 후 시험 데이터

아래 표1. SET VALUE TEST시 블랜딩 제동 수정 전, 후 감속도 변화 데이터에서 알 수 있듯이 블랜딩 제동에 대한 정확한 특성을 이해하고, 전기제동과 공기제동의 블랜딩 시간과 기울기, 동작특성을

고려한 정밀 제어들 실시하여 감속도의 변화가 최소화 되도록 하였다.

구 분	ATO 제동 명령 (%)	기준 감속도 (km/h/s)	실속 감속도 변화율	개선 내용
개선 전	70	2.45	2.11 - 2.84 (-13.8% - +15.9%)	전기제동 fade out 시점 및 기울기 조정
개선 후	70	2.45	2.3 - 2.62 (-6.1% - +6.9%)	공기제동 fade in 조정

표 1. SET VALUE TEST시의 감속도 변화 데이터

이러한 감속도 변화의 최소화는 차량의 감속도를 모니터링하여 남은 거리들 계산하는 ATO 장치의 제동 명령에 직접적인 영향을 미쳐 정차점 추적에 대한 기능을 향상시킬 뿐만 아니라, 급제동이나 급가속 제어가 상쇄되어 승객이 느끼는 충격의 저감에도 기여하게 된다.

### 3.3 저크 제어 방식 개선

차량의 ATO 운전 중 차량을 제어하는 열차종합제어장치(TCMS)는 ATO 장치의 제동명령 수신 시 일정한 저크제어들 실시하여 제동장치의 제어기인 ECU로 제동명령을 전송한다.

그러나, 이러한 제동명령에 대한 저크 제어는 차상신호 장치인 ATO 장치에서 미리 수행되어 실시하는 과정으로 제동 명령에 대한 시간 지연을 초래하게 된다. 결과적으로 이중적인 저크 제어로 인하여 실시간으로 차량을 제어하기 위하여 지령하는 제동 명령의 시간 지연을 초래함으로써 정차점 추적의 간섭으로 작용하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 ATO로부터 받은 제동 지령으로 즉시 제동명령을 수행하도록 TCMS 장치의 저크 제어들 위한 시간지연을 최소화 하였다. 다음은 30[kN] 에 해당하는 ATO 제동명령 발생 시 TCMS CC가 ECU로 전송하는 명령을 프로그램 수정전과 수정후로 나타내었으며, 제동 명령에 대한 시간지연이 사라짐을 확인하였다.

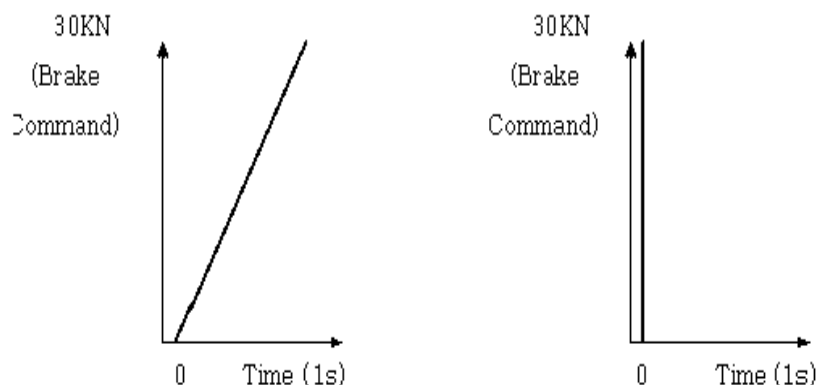


그림7. TCMS 저크 제어 수정 전, 후(30[kN] 명령)

#### 4. 결 론

본 논문에서 제안한 차량 제동 시스템 특성 분석을 통한 공기압력 관리 및 SET VALUE 시험, 차량 - ATC 장치의 제동 명령 지연 분석 및 저크 제어 방식 개선을 대전도시철도 1호선에 적용하여 정위치 정차율이 99.9% 이상으로 개선되는 결과를 얻을 수 있었다.

또한, 정위치 정차점 추적을 위한 최적의 모델링을 제시하고 그를 입증할 수 있는 시험 방안을 제시함으로써 정차점 추적에 대한 시행착오를 사전에 예방할 수 있었으며, 그 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

[1] 차량의 제동 시스템 동작 분석을 통한 제동 step에 알맞은 공기 제동의 선형성을 확보함으로써 차량 정차 시 사용되는 공기제동 특성 신뢰성을 확보하였다.

[2] 저속도 영역에서 사용되어지는 공기제동과 전기제동의 블렌딩 제동 특성을 정확히 분석하고 차량의 감속도 변화량을 측정하는 SET VALUE TEST를 통하여 정차 시 감속도의 변화가 최소화됨을 확인하였다.

[3] 차량 시스템과 ATO 장치와의 인터페이스 분석을 통하여 제동 명령의 지연시간을 최소화하고 자동운전 차량의 정위치 정차율 향상을 위해 간섭요인들을 제거함으로써 신속한 정차점 추적 기능이 향상되고 이를 통해 정위치 정차율을 향상시킬 수 있음을 차량에 적용하여 입증하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Tang Tao, Gao Chunhai, "A New Train Speed Automatic Control System For Chinese Railway" IEEE International Conference on Industrial Technology, 1996
- [2] Hisakatsu Kiwaki and Takao Goto, "Automatic Train Stop Position Control Equipment for the Site of Former Expo'70" INTERMAG CONFERENCE 1971
- [3] Kouki Yoshimoto, "A Feasibility Study of Train Automatic Stop Control Using Range Sensors" 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings