

# 혼합제동기능을 이용한 유압제동 제어시스템 설계

## The Design of Hydraulic Brake Control System used on Blending Brake Function

이 우 동\*  
 (Woo-Dong Lee)

**Abstract** - The bogie of monorail vehicles applies rubber wheel system not steel wheel system. In addition, The structure of the bogie is very complicated because vehicle operates on the elevated road and vehicle drives with wrapping the guide way. When the monorail vehicle applies air brake system, lower device of vehicle may be complex and some devices may be limited. On the other hand, hydraulic brake equipment is compact and not weighing. Braking force is also outstanding compared with air brake so the hydraulic brake equipment is suitable for monorail vehicle. Also urban transit system such as monorail, applies mixed system both friction brake and electric brake in order to save electric energy. But application case of hydraulic brake in the country is very rare because hydraulic brake have difficulty in satisfaction of control requirement and maintenance. Therefore, this study suggests ways to design hydraulic brake system with blending brake for monorail vehicle and applies the ways to future monorail.

**Key Words** : Hydraulric brake, Blending brake, Electric-pneumatic transducer, Monorail

### 1. 서 론

최근에 모노레일시스템이 국내에 적용되고 있는 실정이나 기존 전동차에 적용되고 있는 공기제동장치는 공기배관 및 공기통 등 많은 부품들로 이루어져 있어 모노레일의 하부에 설치할 때 공간적으로 많은 제약을 받고 있고 차량중량 증가의 한 원인이 되기도 한다. 따라서 유압제동장치가 모노레일 차량에 매우 적합한 제동장치임에도 불구하고 국내에서는 철도차량에 유압제동장치가 적용된 사례는 없다. 일본 등 철도선진국에서는 유압제동장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일부 철도차량에 적용하고 있는 추세이다. 유압제동은 공기제동에 비하여 제동력이 크고 시스템의 구성이 간단하여 설치가 용이한 장점에도 불구하고 유압제동은 차량에서 요구하는 전기제동과 마찰제동의 혼합제동을 원활히 수행하는 데에 제약사항이 있다. 혼합제동이란 요구제동력에 따라 전기제동 및 마찰제동을 적절히 작용하는 제어방법으로서 전기제동력이 요구제동력을 만족하면 전기제동을 90%이상 사용하고, 전기제동이 요구제동력을 만족하지 못할 경우에는 전기제동을 우선 작용하고 나머지는 마찰제동으로 보충하는 방법을 말한다. 기존 철도차량의 경우에는 마찰제동을 공기제동으로 사용하고 있는데 모노레일에는 마찰제동을 유압제동으로 적용하는 것이 매우 효율적이다. 따라서 본 연구에서는 유압제동장치를 모노레일에 적용 및 설계하는 방법에 관하여 제안해 보고자 한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 유압제동 제어시스템 설계

모노레일 제동장치는 전동차의 제동장치와 매우 흡사하나 전동차와 다른 점은 공유압 변환장치가 설치되어 있다는 점에서 전동차와 다르다고 할 수 있다. 최근에 유압에 대한 연구에 많이 이루어져 유압제동장치가 점차 철도차량에 적용되고 있다.

표 1 제동장치 특징 비교[1]

Table 1 The comparison of feature for brake system

항목	유압제동시스템	공기제동시스템
질량 kg/량	280	790
압력제어 방식	전기신호에 의한 유압제어	전기신호에 의한 공기압력제어
압력축적 방식	accumulator	공기탱크
압력변환 밸브	전압변환밸브	전공변환밸브
기초제동 장치	유압실린더	증압/유압실린더
활주시의 압력제어	점착에 의한 압력제어	활주시에 압력차단

유압제동장치는

- 공압제동실린더에 비하여 크기가 작아 작은 공간에도 설치가 용이하다.
- 동일한 크기의 공압실린더에 비하여 제동 작용력이 매우 크다.
- 제동작용이 매우 신속히 이루어진다.

\* Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute  
 Chief Researcher

E-mail : wdlee@krii.re.kr

Received : October 23, 2013; Accepted : November 12, 2013

위와 같은 장점이 있는 반면에 다음과 같은 단점을 가지고 있어 국내에서는 아직 적용실적이 매우 적은 실정이다.

- 유지보수가 공압제동에 비하여 어렵다.
- 제어성이 공압제동에 비하여 떨어진다.
- 초기 도입비용이 매우 크다.

그림 1은 모노레일 차량에 적용할 제동장치 구성도이다. 그림 1에서 보는 바와 같이 제동장치는 제동제어기, 제동작용장치, 공기압축기, 공기압변환장치 및 공기배관 등으로 구성되어 있다. 일반적으로 차량의 제동은 2량(MC1, MC2)을 1 유니트로 하여 제동작용을 수행하는데 상용제동시에는 주간제어기 및 열차자동운전장치(ATC)에서 발생한 제동지령이 차량제어기(CC)를 통하여 제동제어기(ECU)로 전송된다. 제동제어기에서는 제동지령과 승객의 수에 따라 변하는 차량하부에 설치된 공기스프링의 응하중신호를 검지하여 필요한 요구제동력을 계산하고 인버터(Inverter)에 전기제동을 지령하면 인버터에서는 전기제동을 수행한다. 요구제동력을 전기제동이 만족하지 않으면 제동제어기는 부족분을 부속차(MC1) 및 동력차(MC2)의 마찰제동으로 보충하는 혼합제동을 수행한다.

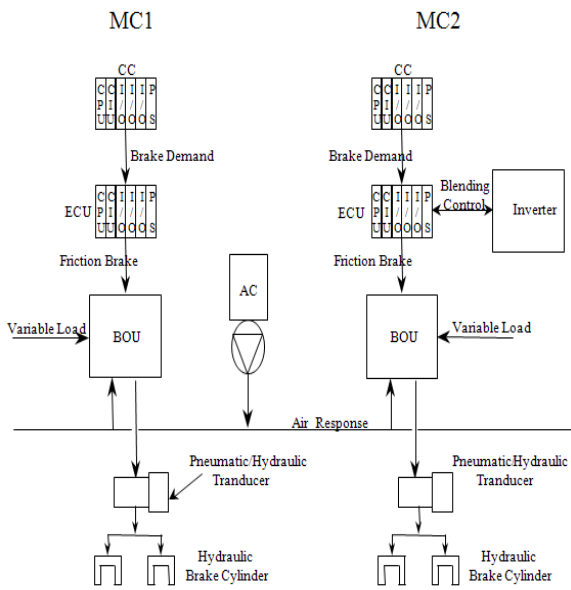


그림 1 모노레일 제동장치 구성도  
Fig. 1 The configuration of brake system for monorail

마찰제동은 ECU에서 발생한 전기신호를 제동작용장치(BOU)에서 공기신호를 변환되어 이 공기신호가 제동실린더(Brake Cylinder)를 동작시킴으로써 제동이 체결되어 차량을 정지시킨다. 마찰제동력의 크기는 BOU에서 발생하는 공기신호에 따라 결정된다. 모노레일용 제동장치를 구현하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같이 기존에 철도차량에 적용되었던 공기실린더를 유압실린더(Pneumatic/Hydraulic)로 변경하고 유압실린더를 동작시키기 위하여 제동작용장치에서 발생한 공기신호를 유압신호로 변환하기 위한 공기/유압변환기(Pneumatic/ Hydraulic Tranducer)를 설치하였다. 이러한 설계방법은 플랜트분야에서는 많이 적용하고 있으나 철

도차량분야에서는 외국의 일부 철도차량에 적용하고 있고 국내에서는 아직 적용한 사례가 없다.

## 2.2 혼합제동 제어기능 설계

2.1절에서는 모노레일 제동장치의 제동제어기, 제동작용장치, 공유압변환기, 유압실린더등 하드웨어 설계를 하였다. 모노레일에 혼합제동기능을 적용하기 위하여는 제어기능에 대한 구체적인 설계를 하여야 한다. 앞에서도 설명하였지만 혼합제동이란 MC1 및 MC2 1유니트로 하여 차량을 정지시킬 때 전기제동을 우선하여 작용하고, 전기제동이 부족하면 마찰제동을 작용시켜 차량을 정지시키는 제동을 말한다. 혼합제동시에 제동작용순위는 다음과 같다.

- 제동초기  
MC1 및 MC2 : 마찰제동
- 유니트 요구제동력 < 전기제동력  
MC1 및 MC2 : 전기제동
- MC1 요구제동력 < 전기제동력 < 유니트 요구제동력  
MC1 : 전기제동, MC2 : 전기제동 + 마찰제동
- 전기제동력 < MC1 요구제동력  
MC1 : 전기제동+마찰제동, MC2 : 마찰제동
- 전기제동력 실패시  
MC1 : 마찰제동, MC2 : 마찰제동

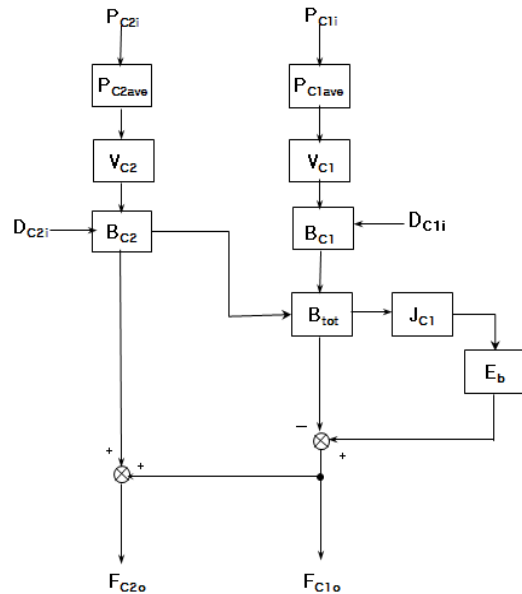


그림 2 혼합제동제어블럭선도[4]  
Fig. 2 The control block diagram of blending brake

혼합제동을 수행하려면 제동감속도 파라미터, 응하중 파라미터, 및 저크한계파라미터 등을 고려하여야 하며, 그림 2<sup>[2]</sup>는 이러한 파라미터를 고려한 혼합제동 제어개념을 도식화한 것이다. 대차의 공기스프링에 설치되어 있는 압력센서에 의해 공기압력이 검출되며 이 압력은 공전변환기에 의해 전압신호로 변환되어 제동제어장치로 입력된다. 이 신호( $P_{ci}, P_{di}$ )는 한 차량에 4개가 설치되어 있으므로 공기압을 평균하여야 한다.

부수차의 공기압력 평균값

$$P_{c2} = \frac{P_{c21} + P_{c22} + P_{c23} + P_{c24}}{4} \quad (1)$$

구동차의 공기압력 평균값

$$P_{c1} = \frac{P_{c11} + P_{c12} + P_{c13} + P_{c14}}{4} \quad (2)$$

차량의 중량을 계산하기 위하여 공기스프링의 단면적에 차량의 질량을 곱하고 여기에 회전관성질량계수를 곱하면 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$V_{c2} = \eta_{c2} \cdot P_{c2} \cdot A_{c2} = (1.06) \cdot P_t \cdot \frac{\pi \cdot d_t^2}{4} \quad (3)$$

$$V_{c1} = \eta_{c1} \cdot P_{c1} \cdot A_m = (1.14) \cdot P_{c1} \cdot \frac{\pi \cdot d_{c1}^2}{4} \quad (4)$$

차량에 설치되어 있는 열차제어감시장치에서 제동제어장치로 1~7스텝별로 0.5km/h/s~3.5km/h/s[3]의 감속도 지령(D<sub>c2i</sub>,D<sub>c1i</sub>)이 입력된다. 따라서 감속도 지령에 따라 계산되는 구동차 및 부수차의 요구제동력은 Newton의 제2법칙 F = m·a에 의해 계산된다.

$$B_{c2} = V_{c2} \cdot D_{c2i} \quad (5)$$

$$B_{c1} = V_{c1} \cdot D_{c1i} \quad (6)$$

열차의 제동력제어는 부수차 및 구동차를 1유니트로 하여 제어되어야 하므로 부수차 및 구동차의 요구제동력은 합산하여야 한다.

$$B_{tot} = B_{c2} + B_{c1} \quad (7)$$

합산된 총요구제동력은 혼합제동우선순위에 의하여 전기제동이 먼저 작용하도록 추진제어장치에 전기제동을 요구하게 된다. 전기제동을 요구하기 전에 차량의 승차감을 확보하기 위하여 저크제한기능을 추가하였다. 제동장치 설계기준에서 저크제한기준은 0.8m/s<sup>3</sup>[5]이므로 일정한 시간지연을 갖고 최대감속도로 도달하게 하여야 한다. 즉 1.2125초의 시간지연을 갖도록 설계하는 것이다. 이를 위하여 스텝신호로 입력되는 제동요구신호를 램프신호로 바꾸기 위해 적분제어를 추가하였다. 여기에서 이득게인을 적용하여 그림 3과 같이 저크제한기준을 만족하도록 설계하였다.

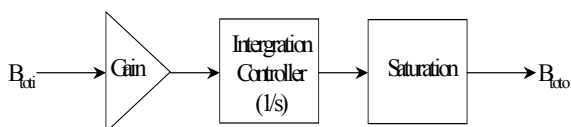


그림 3 저크제어 블록선도[2]  
Fig. 3 The control block diagram of jerk

전기제동요구신호는 PWM(Pulse Width Modulation)신호로 변환되어 추진제어장치로 전송되며 이는 제동력에 대하여 10~90%의 값을 가진다. 추진제어장치에 설치되어 있는 견인전동기의 회생특성에 따라 전기제동을 최대한 수행한 후에 달성된 신호를 다시 제동제어장치로 전송한다. 전기제동달성신호도 PWM신호로 변환되어 추진제어장치로 전송되며 이는 제동력에 대하여 10~90%의 값을 가진다.

본 시뮬레이션에서는 다음과 같은 두 가지 항목에 대하여는 일정한 값을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

- 인버터의 전기회생작용에 대하여 임의의 값(전동차 7&8호선 데이터)<sup>[3]</sup>를 적용하였다.
- 공유압변환장치에 대한 수학적 모델링이 없이 공압제동력이 유압제동력으로 변환된다고 가정하였다.

### 2.3 시스템 해석결과

2.2절에서 설명한 혼합제동 제어기능이 원활히 구현되는가를 보기 위하여 그림 2와 같이 제어블럭선도를 설계하고 이를 Matlab으로 simulink하면 그림 4와 같이 설계할 수 있다. 일반적으로 철도차량에서는 기관사가 제동핸들을 단계별(1~7단계)로 조작하면 제동핸들에서 발생한 제동지령이 유압제동장치를 동작시켜 차량을 정지시킨다. 따라서 이를 구현하기 위하여 그림 4와 같이 실제 철도차량의 하중을 고정파라미터로 하고 제동지령을 임의 파라미터로 하여 제동지령이 주어졌을 때 동력차와 부수차의 혼합제동이 설계된 제어알고리즘에 따라 원활히 동작되도록 simulink를 설계하였다. 설계된 simulink를 이용하여 제동작용을 시뮬레이션하면 그림 5와 같은 제동작용선도가 출력으로 나타난다.

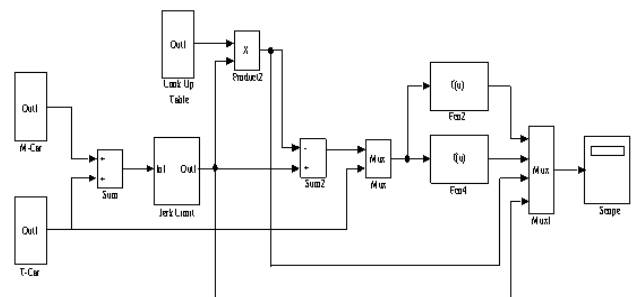


그림 4 Matlab을 이용한 제동작용 Simulink[4]  
Fig. 4 The brake operation simulink using Matlab

그림 5에서 보는 바와 같이 요구제동력에 따라 전기제동, 부수차(MC1)의 마찰제동 및 동력차(MC2)의 마찰제동이 적절히 혼합되어 작용함을 볼 수가 있다. 제동초기(속도 100km/h)에는 전기제동이 작용하지 않으므로 부수차 및 동력차의 마찰제동으로 요구제동력을 만족하다가 전기제동력이 상승하면서 이에 비례하여 부수차 및 동력차의 마찰제동력이 하강하고 전기제동력이 최대가 되면 부수차 및 동력차의 마찰제동력은 작용하지 않는다. 차량이 정지점에 들어서는 구간인 저속구간에서는 전기제동이 하강하면서 이에 비례하여 마찰제동력이 상승하게 된다. 전기제동이 작용하지 않게 되면 부수차 및 동력차의 마찰제동력이 최대로 된다. 부수차 및 동력차의 마찰제동력은 차량의 제동균형을

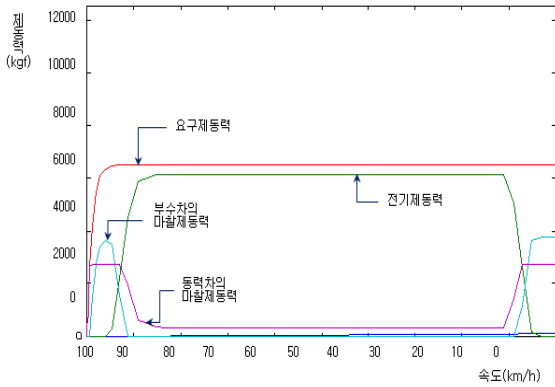


그림 5 제동작용출력선도  
 Fig. 5 The output diagram of brake operation

맞추기 위하여 동력차의 마찰제동력이 우선하여 작용하고 부족분은 부수차의 마찰제동력이 보충한다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 차량의 경량화 및 차량하부 설치가 유리한 유압제동장치를 모노레일 차량에 적용하기 위하여 유압제동 제어시스템의 설계방안을 제시하였다. 특히 에너지를 절감하기 위하여 전기제동 및 마찰제동을 병용하여 사용하는 혼합제동 제어시스템 설계하였다. 이 혼합제동 제어시스템을 시뮬레이션하여 도출된 제동작용선도를 고찰하면 요구제동력에 따라 전기제동력 및 마찰제동력이 적절히 배분되어 동작하는 것을 알 수 있다. 다만 철도차량마다 중량, 최고속도 및 감속도가 다르고, 특히 모노레일 차량의 경우에는 국내에서 설계 및 제작한 사례가 없다 따라서 본 연구에서 제시한 유압제동 제어시스템의 설계개념을 모노레일 차량에 적용하였을 경우에는 필요한 성능 및 기능을 100% 만족하기는 어렵다고 할 수 있다. 추후 본 연구에서 제시한 유압제동 제어시스템의 설계방안에 따라 유압제동장치를 제작하고 시험 및 검증 등을 통하여 성능 및 기능을 입증해 가는 과정이 필요하다고 할 수 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 2013년도 한국철도기술연구원의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

#### References

- [1] The Ministry of Construction and Transportation, The Research Report of Rolling Stock for Light Rail Vehicle(3rd year), 2001.
- [2] Bernard Friedland, Control System Design, 1996.
- [3] The Ministry of Construction and Transportation, The Research Report of Standardization Project for Urban Transit System(5th year), 2000.

- [4] D. M. Etter, Engineering Problem Solving with MATLAB, 1993.

## 저 자 소 개



#### 이 우 동 (李祐東)

1995~2006 도시철도표준화연구개발사업,  
 2007~2012 도시철도표준화2단계사업,  
 2000~2003 경량전철시스템기술개발사업