철도차량용 전기기계식 제동시스템의 비상시 대처방안 연구

A Study on Emergency Method of the Electro-Mechanical Brake System for Railroad

최문원*, 이한민*, 김민수*†

Moon-Won Choi*, Han-Min Lee*, Min-Soo Kim*†

Abstract Today, pneumatic brake systems are mostly adopted to railroad vehicles for fail-safe function that engages autonomous emergency braking, where the brake pipe pressure is lowered. However, since there are existing performance limitations in pneumatic brake systems, existing researches are on hydraulic or electro-mechanical brakes (EMB) as an alternative. The EMB system can reduce the reaction distance and enhance the reliability. However, even in emergency, such as train detachment or black-out, a proper method is required to stop vehicles. Thus, this study demonstrates the safety method (fail-safe and redundancy plan), which can be applied to emergency situations (train detachment and black-out). By applying the safety method to function requirements, the EMB system can effectively improve the safety of the railroad.

Keywords **:** Electromechanical Brake, Uninterruptible Power Supply, Railroad Brake, BMS

초 록 철도차량에는 공압식 제동장치가 주로 사용되는데, 이는 열차 분리 등 비상 상황에서 제동관의 압력이 낮아지면 자동으로 제동이 체결되는 Fail-Safe 기능 때문이다. 하지만, 공압방식이 갖는 성능 한계로 인하여 이를 극복하기 위해 유압식 또는 전기기계식 제동장치에 대한 연구가 진행되고 있다. 이 중에서 전기기계식 제동장치는 공압식 제동장치에 비해 공주시간을 단축시킬 수 있고 신뢰성을 향상시킬 수 있는 장점이 있지만, 열차분리나 전원차단 등의 비상 시에 제동을 체결하여 열차를 안전하게 정차시키기 위한 대처방안에 대한 대책이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 비상 시 대처방안에 대한 연구를 통해 열차분리, 전원차단 등으로 인해 전원공급이 차단되는 비상상황에서도 전기기계식 제동장치가 열차를 안전하게 정차시키기 위한 대처방안(이중화 방안 및 Fail-Safe 방안 등)에 대한 연구를 수행하였으며 이를 전기기계식 제동시스템의 기능 요구사항에 반영하여 안전성을 향상시키도록 하였다.

주요어 : 전기기계식 제동장치, 무정전전원공급장치, 철도차량 제동장치, 배터리관리시스템

1. 서 론

철도차량에는 공압식 제동장치가 적용되어 열차 분리, 장치고장 등 비상 시 제동 체결이 가능한 구조로 되어 있다 [1]. 하지만 공압 방식이 갖는 성능 한계로 인하여 이를 극복하기 위해 유압식 또는 전기기계식 제동장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. 이 중 전기모터를 이용하는 전기기계식 제동장치는 공압식에 비해 공주시간이 짧고, 신뢰성이 높지만 열차 분리, 전원 차단 등 비상 시 대처방안은 아직 확립되어 있지 않은 상태이다 [2]. 따라서 본 논문에서는 제동장치 요구사항과 기존 공압식 제동장치의 비상 시 대처방안을 분석하여 전기기계식 제동장치의 구조적 특성을 고려한 Fail-Safe방안에 대해 연구하였다.

† 교신저자: 한국철도기술연구원 광역도시교통본부(ms_kim@krri.re.kr)

* 한국철도기술연구원 광역도시교통본부

2. 본 론

2.1 제동장치 요구사항 분석

본 절에서는 열차에 제동장치가 갖추어야 할 요구사항을 조사하였고 현재 적용되어 사용 중인 공압식 제동장치의 비상제동 관련 동작특성과 비상 시 대처방법을 분석하였다.

2.1.1 제동장치 요구사항

1. 제동장치는 상용제동, 비상제동, 주차제동 등의 기능을 갖추어야 한다.
2. 제동거리를 항상 일정하게 유지하고, 상용 제동 시 충격과 소음 및 진동이 최소화되어야 한다.
3. 열차분리, 전력공급 차단 등의 장애발생상황에도 기초제동으로 최고 급구배에서 열차를 최소 2시간 동안 정지 및 유지할 수 있어야 한다.
4. 서리, 혹한, 폭설, 폭염, 먼지 등에 의한 오염물질이 제동제어나 안전작동에 영향을 주지 않는 구조이어야 한다.
5. 최대하중, 평탄선로 상황의 최고 속도에서 2회 연속 비상제동을 수행할 수 있어야 한다.
6. 열차 1편성에 적용된 제동장치 중 1/3이 제동 기능이 소실되어도 2/3를 이용하여 열차의 요구제동력을 만족 할 수 있어야 한다 [3].

2.1.2 공압식 제동장치의 비상제동 관련 동작특성

비상제동은 운행 중 긴급한 정지가 요구된 상황에서 사용하기 위해 고려된 공기제동으로 자동 및 수동조작으로 체결가능하며 규정된 비상제동 감속도 기준으로 제동거리와 제동시간이 가장 짧다. 또한 Fail-Safe 기능으로 비상제동제어 계통의 어느 부분이라도 차단되거나 문제 발생 시 자동으로 제동이 체결될 수 있도록 작동되며 비상제동을 위한 제동공급공기통은 열차를 완전히 정지시키기 위해 3회 연속의 비상제동작용이 가능하도록 공기통 용량을 고려해야 한다. 다음 Table 1은 기존 공압식 제동장치의 비상제동 체결 조건을 나타내었다.

Table 1. The Conditions for the Emergency Braking

	Conditions
1	Emergency Location of the Master Controller
2	Operation of the Emergency Switch
3	Signal of the ATP Emergency Braking
4	Lack of the main air pressure
5	Train Separation
6	Sensing Deficiency of the Full Service Brake
7	Power Supply Failure of the Emergency Braking Control Circuit

2.1.3 공압식 제동장치의 비상 시 (전원차단, 장치고장 등) 대처 방안

비상 시 (전원 차단, 차량 분리, 주공기 압력저하)에는 안전루트로 형성된 비상제동 인통선이 오픈 되어 차량 전체에 비상제동이 체결된다. 또한 비상제동이 체결된 차량은 임의로 해제하지 않는 한 제동공기통으로 공급된 제동압력이 배기되지 않아 제동상태를 유지하므로 차량을 정지상태로 유지할 수 있다. 또한 제동장치의 공기누설이나 제어장치의 고장으로 요구하지

않는 압력이 공급되어 제동을 체결되는 경우도 발생하는데 이것을 제동불완해 상태라고 한다. 이 때 열차는 정상적인 제동명령이 아닌 상황에서 제동이 체결되었기 때문에 제동장치는 압력센서를 통하여 제동압력 상태를 확인하여 제동불완해상태를 열차로 전송하여 제동장치의 상태를 표시한다. 이 때 수동운전차량의 경우 제동불완해를 해소하기 위하여 강제완해스위치를 조작하고, 무인운전 차량인 경우 제동장치가 자동으로 강제완해를 수행하기도 한다. 만일, 강제완해스위치를 취급하여도 완해가 되지 않으면 제어기 차단 및 제동장치의 주공기를 차단하여 대차의 제동을 차단한 상태로 이동하여야 한다 [3,4].

2.2 전기기계식 제동장치를 위한 비상시 대처방안

2.2.1 전기기계식 제동장치 구조

전기기계식 제동장치는 전기모터의 회전운동을 직선운동으로 변환하여 캘리퍼를 밀어 브레이크패드를 디스크에 압착시켜 제동력을 얻는 장치로 전기모터, 전기모터의 회전력 증폭과 동력전달을 위한 기어박스, 캘리퍼, 브레이크패드와 디스크로 구성되어있다 [3,5]. 제동 엑츄에이터는 각각의 전기모터마다 모터제어기가 장착되어있으며, 모터제어기는 ECU에 명령에 따라 전기모터의 동작과 회전방향, 회전수, 토크를 제어한다 [6]. Fig. 1에는 전기기계식 제동장치의 기계적 구성을 나타내었다 [3,5,7].

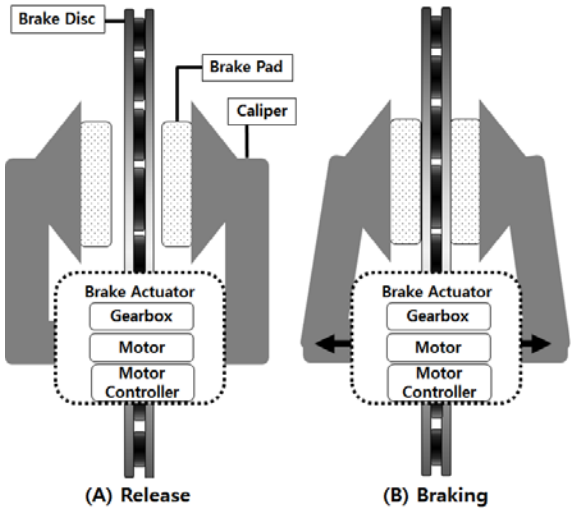

Fig. 1 The Architecture of Electro-Mechanical Brake

2.2.2 전기기계식 제동장치의 비상 시 (전원차단, 장치고장 등) 대처 방안

공압식 제동장치의 경우 비상 상황 시 발생하는 전원차단 또는 제동 장치고장 등의 문제에 대처할 수 있도록 주공기통에 비상 제동을 3회 체결할 수 있는 공기가 충전되어 있으며, 열차분리와 같은 제동관의 분리로 인한 압력저하 시 자동으로 비상제동이 체결되는 구조로 Fail-Safe 기능을 제공한다. 이와 같이 전기기계식 제동장치도 전원 차단 상황에서 3회 비상제동을 체결할 수 있으며, 열차 분리 등으로 인한 명령 전달 단절 상황을 인지하여 자동으로 제동을 체결 할 수 있어야 한다.

전기기계식 제동장치는 전기모터를 동작시켜 제동을 체결하는 장치로 비상 상황에서도 안정적인 전원공급이 필요하다. 이를 위해 비상 시 안정적인 전원공급을 위해 무정전전원장치를 구성하고 전원 차단 상황을 인지하여 자동으로 전원을 전기기계식 제동장치로 공급하여 비상

시 대처방법으로 적용할 수 있도록 설계하였다.

무정전전원장치는 정상 운행 중에는 열차 전원을 공급받아 자동으로 충전하고, 전원 차단 상황 발생 시 내부 스위치를 작동시켜 무정전전원장치의 배터리가 전원을 공급한다. 무정전전원장치를 구성하기 위해 제동에너지를 계산하고 무정전전원장치의 시스템 구성을 다음과 내용과 같다.

1. 비상 시 제동을 위한 제동 에너지 계산(서울 2호선 10량 1편성, 중량전철 기준)

(1) 총 제동력(F_B) 계산 (최대감속도 4.5km/h/s 기준)

총 제동력(F_B)= k × 감속도 × (공차중량 × 관성질량보상계수 + 승객하중)

F_B = 28.32 × 4.5 × (357.2×1.1+200) = 75561.72[kgf] = 741[kN]

(2) 차량당 제동력(F_{BM}) 및 제동 엑츄에이터 별 제동력(F_{BMA})계산

서울 2호선은 10량 1편성이고 각 량당 제동 엑츄에이터 16개로 구성되어 있다.

차량당 제동력(F_{BM}) = 총 제동력[kN] / 10량

F_{BM} = 741[kN] / 10 = 74.1[kN]

(3) 제동 에너지 계산

차량당 제동에너지(E_{Train}) = 차량당 제동력(kN) × 제동거리(m) = kJ

(제동거리는 최대하구배 35‰를 적용한 거리이다.)

E_{Train} = (74.1[kN] × 330m) = 24453[kJ] (100km/h에서의 차량 운동에너지 값과 같다)

(4) 철도차량에 적합한 배터리 종류 선정

배터리는 충방전이 가능한 2차전지를 사용하고, 납축, 니켈-카드뮴, 니켈-수소, 리튬-이온 전지 중 에너지 밀도가 높고, 무게가 가벼우며 충방전 사이클이 긴 리튬-이온 계열 전지로 선택하였다. 아래 Table 2와 같이 리튬-이온 전지를 비교하여 그 중 높은 효율과 안전한 리튬인산철배터리(LiFePO4)를 선정하였다.

Table 2. The Comparison of Battery Types

Type	Li-ion	Li-Polymer	LiFePO4	Pb
Nominal Voltage[V]	3.7	3.7	3.2	12
Nominal Capacity[Ah]	32	32	20~90	120
Safety	X	O	O	O
Economics	expensive	expensive	inexpensive	more inexpensive
Life cycle(cycle)	2000	2000	4000	500

(5) 배터리 시스템 구성

배터리는 열차의 전압환경에 따라 상용품 중 48[VDC]를 선정하였고 배터리시스템은 열차의 전원 100[VDC]를 입력 받아 충전기를 통해 48[VDC]로 충전하고 전원 차단 발생 시 DC-DC컨버터를 통해 승압하여 제동 엑츄에이터로 공급한다. 그 구조는 아래 Fig. 2와 같다.

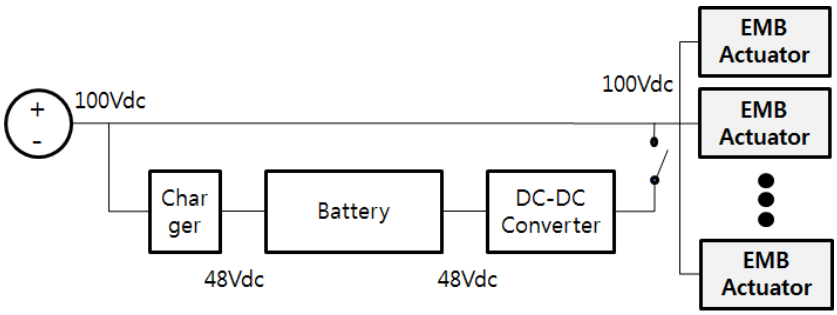

Fig. 2 The Architecture of Uninterruptible Power Supply

위 무정전전원장치은 차량당 1개 설치가 유지보수 및 경제성에서 효과적이므로 차량당 1개 설치를 가정한다. 또한 필요한 직병렬 구성은 방전심도(DOD) 80% 적용하여 계산한 용량으로 구성한다. 리튬인산철 상용품의 크기는 130×180×250㎜이다.

3. 결 론

현재 철도차량의 제동성능 향상을 위한 유압식 또는 전기기계식 제동장치의 연구가 진행되고 있다. 그 중 전기기계식 제동장치는 공주 시간의 단축과 높은 신뢰성의 보장으로 인해 자동차, 항공분야에서는 연구개발 및 상용화가 진행되었으나 철도차량의 경우에는 제동 장치 안전에 대한 요구 신뢰도 수준이 높아 전기기계식 제동장치 적용의 어려움이 있다.

본 논문에서는 철도차량의 제동장치 요구사항과 공압식 제동장치의 비상 시 대처 방안을 분석하여 비상 상황에서도 열차를 안전하게 정차시키기 위해 전기기계식 제동장치가 갖추어야 할 대처 방안을 연구 하였으며 그 대처 방안으로 전원 차단과 같은 비상 상황에서 열차의 안전한 정지 및 정차시키기 위해 전기기계식 제동장치가 제동을 체결할 수 있도록 무정전전원장치를 연구하였다.

제안하는 무정전전원장치는 열차의 안전을 위해 폭발 위험이 없는 리튬인산철(LFP) 배터리를 사용하며 충전기와 DC-DC컨버터를 구성하여 48[VDC] 배터리 전압에 맞추어 감압과 승압이 가능하고 열차의 전원 차단 시 무정전전원장치는 자동으로 전원라인을 스위칭하여 1량에 모든 전기기계식 제동장치로 전력을 공급하여 제동력을 발생 시킬 수 있도록 하였다. 제안하는 무정전전원장치는 3회 비상 제동 전력만 공급함을 가정하였으므로 전기기계식 제동장치는 제동 체결 후 전기모터가 구동되지 않아도 체결된 제동이 해제되지 않는 구조로 설계되어야 한다.

추후 디스크제동 시험을 통해 전기기계식 제동장치의 제동력 데이터를 측정하여 무정전전원장치의 용량을 산정하여 열차에 장착이 가능한 형태로 설계가 필요하다. 또한 무정전전원장치의 안전기능을 향상 시키기 위해 무정전전원장치의 고장 상황에도 대처할 수 있도록 이중화 및 백업 알고리즘에 연구가 수행 되야 할 것이다.

참고문헌

[1] G. B. Park, Railroad Vehicle Engineering, *Samsung Publishing*, 1999.

[2] M. W. Choi, H. S. Lee, M. S. Kim (2015) Study on the Applicability of EMB for Railway Vehicle Using Patent Mapping, *Korean Society Of Precision Engineering Conference*, pp. 114-115.

[3] M. S. Kim et al (2015) Development of the Core Technology for Metropolitan Train Express, *Korea Railroad Research Institute.*

[4] H. K. Park et al (2002) Development of the Brake System, *Ministry of Construction & Transportation.*

[5] Herr (2008) Braking Device Having a Wedge Mechanism, *U. S. Patent*, 20080230330.

[6] Kim (2016) Control Method of Electro-Mechanical Brake, *U. S. Patent*, 20160009260A1.

[7] Park et al (2015) Electro Mechanical Brake, *U. S. Patent*, 20150354651A1.