

국내최초 단선 경전철 차량의 운용 효율을 높이기 위한 제동 제어 설계 Braking Control Design to Improve the Efficiency of Train Operation in the First Single line for K-AGT

이성찬^{*†}, 박주원^{*}, 윤형철^{*}, 임태욱^{*},

박정훈^{**}, 배성진^{**}, 서대한^{**}

S.C Lee^{*†}, J.W Park^{*}, H.C Yoon^{*}, T.W.Lim^{*}, J.H Park^{**}, S.J Hae^{**}, D.H Seo^{**}

초 록 양산선은 부산 노포동과 양산 북정동까지 7개 역사와 차량기지로 구성된 국내최초 경전철 단선노선이다. 운전취급규정에 따라 제동력 상실 및 고장 등으로 승객하차, 회송 등이 필요할 경우 승객불편 애기와 경중에 따라 전 구간 운영 장애로 영업의 막대한 지장을 초래한다. 따라서, 양산선에 투입되는 경전철 차량은 편성단위, 칸단위가 아닌 대차단위의 제동제어를 통하여 제동장치 고장에 따른 이용불편을 최소화하도록 설계되었다. 양산선 차량은 2칸 1개 편성, 1칸은 M-대차와 T-대차로 구성되고 각 대차마다 ECU가 설치되어 1개 편성 기준 4개의 대차로 구성된다. M-대차 ECU에서는 TCU와 통신하며 전기제동을 제어하는데 만약 M-대차 ECU가 고장 등으로 기능을 상실하면 T-대차 ECU가 TCU와 통신하여 전기제동에 대하여 Back-Up 될 수 있는 시스템을 구성하여 제동력 상실에 따른 운영상 영향을 최소화하도록 설계된 K-AGT차량이 양산선 차량이다.

주요어 : 경전철, 대차, 제동, K-AGT, 단선

1. 서 론

양산선은 국내 최초 단선으로 건설되는 도시철도 노선이다. 부산시 노포동에서 양산시 북정동까지 총 7개 역을 지나는 노선이다. 노선에 적용되는 전동차는 K-AGT를 적용하고 단선의 특징에 따라 교행으로 운행된다. 양산선 전동차는 부산교통공사에 위탁되어 제작됨에 따라 부산교통공사의 운전취급규정 등 바탕으로 전동차 운행조건을 계획한다. 이 규정은 부산도시철도 1~4호선에 공통적으로 적용되는 내용이며, 열차 고장 시 제동축수에 따른 운전조건, 합병운전 시 제동력에 따른 운전속도 규정 조건이 기술되었다.

양산선은 1개 편성이 총2칸으로 제동축수는 4축으로 구성된다. 따라서 양산선 차량의 경우 부산교통공사 운전취급규정 조건을 만족하기 위한 단일노선 특징을 반영한 개선된 설계안이 적용되었다.

2. 노선조건 분석

2.1 단선운행 조건

양산선은 총 7개 역, 2개 신호장, 1개 차량기지를 포함하고 있으며, 11.49km의 단선 노선이다. 따라서 1개 선로를 이용하여 상·하선 운용을 위한 교행운행이 필수적으로 이루어져야 한다. 교행운행을 위하여 7개 역과 2개의 신호장을 활용하고, 교행운행에 따라 최대 50초 정도의 지연정차가 필요하다.

양산선 열차운행계획은 출퇴근 시간 배차간격 6분으로 총 8개 편성을 투입하고, 잔여 1개 편성은 정비 또는 예비차로 운용된다.

† 교신저자(www.eercom@humetro.busan.kr)

* 부산교통공사

** 주식회사 우진산전

2.2 열차사고 발생 대응 계획

단선으로 운용되는 특징에 따라 열차고장은 전체노선에 영향을 준다. 특히 이 논문에서 중점적으로 고려하는 부분은 제동력 확보를 통한 운행장애 최소화이다. 부산교통공사 운전취급 규정에 따르면 표1과 같이 제동축수에 따라 운행 조건을 구분하고 있다.

연결축수	운전조건
100~75% 이상	60km/h 이하 운전
75 미만~50% 이상	승객하차, 45km/h 이하 운전
50% 미만	합병운전(구원)

표 1. 부산교통공사 운전취급규정

일반적으로 전동차는 6~10칸으로 구성되고 1칸에 1대의 ECU를 설치하여 제동장치 고장 시 고장차량 외 다른 차량의 제동력으로 충분한 운전조건을 유지할 수 있다. 다만, 양산선의 경우 기존 전동차의 제동시스템을 적용하게 되는 경우 1칸(대차 2대)을 1대의 ECU가 제어하게 되고, 1개 편성은 2대의 ECU로 제동시스템이 구성된다. 이렇게 운행을 하게 되면 1대의 ECU에서 제동문제가 발생하면 운전취급규정에 따라 연결축수 50%가 되어 승객 하차와 속도제한에 걸리게 되어 운행에 영향을 주게 된다.

그리고 편성제동제어를 상실한 차량을 구원하게 되는 경우 4칸을 2대의 ECU로 제동제어하게 되고, 구원운전 중 제동문제가 발생하게 된다면 1대 ECU에 제동제어를 의존하게 되는 위험한 상황을 초래할 수 있다.

3. 운용효율 제고 방안

3.1 제동제어 기본 컨셉

차량제동은 움직이는 열차를 감속 또는 정지 그리고 정지한 상태에서 열차를 유지하기 위한 조건을 반영한다. 열차의 제동 요구 신호에 따라 전기제동을 우선하여 최대한 적용하고 부족한 제동력은 공기제동으로 추가로 보충한다. 부분적으로 전기제동 실패일 경우 전기제동의 고장 수준에 따라 감속운행 또는 운행제한을 할 수

있으며, 전기제동이 실패한 차량만 공기제동으로 보충하고 나머지 차량은 정상적으로 전기제동과 상호작용한다.

전기제동에서 공기제동으로 전환은 5km/h에서 시작하고 전환하는 동안 제동충격 완화를 위하여 응답시간을 최소화 한다.

3.2 대차제어를 통한 제동력 확보

부산1호선 등에 적용되어 있는 일반적인 제동시스템은 유니트로 동력-부수차를 묶고, 유니트에 요구되는 제동값을 동력차에서 전기제동을 우선하고 부족분은 공기제동을 사용한다. 이때, 전기제동을 위한 TCU 또는 동력차의 ECU가 고장이 발생하여도 부수차에서 전기제동을 위한 Back-Up은 없다.

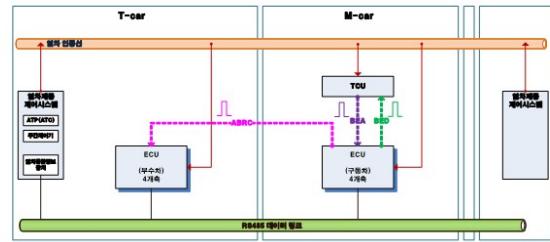


그림 1. 일반전동차 제동 제어시스템

왜냐하면 일반전동차는 여러 칸과 유니트로 구성되어 협조제어를 통하여 제동력 확보가 가능하여 전기제동력 확보를 위한 Back-Up은 불필요하다.

하지만 양산선은 2칸으로 구성된 편성으로 편성자체가 1개 유니트로 보아야 한다. 따라서 충분한 전기제동력 확보를 위하여 대차별 ECU를 설치하였다. 개별 대차제어를 통하여 M-대차의 ECU가 고장이 발생하여도 T-대차의 ECU에서 TCU와 통신하도록 Back-Up 구조를 구성하였다.

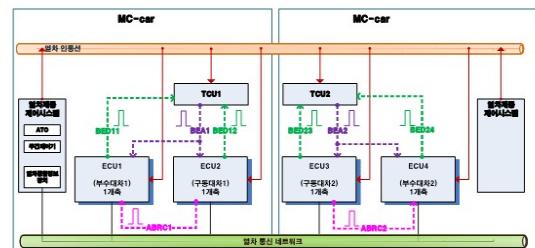


그림 2. 양산선 제동 제어시스템

M-대차의 ECU가 고장이 발생하여도

T-대차에서 전기제동과 관련된 신호를 TCU와 통신을 하여 5km/h지점 까지는 ECU의 고장에 따른 전동차 운행의 영향은 없다. 다만 5km/h이하는 공기제동이 사용되어 정위치 정차를 하게 되는데, 이미 줄어든 전동차 속도는 3대의 ECU에서 공기제동으로 제어가 충분히 가능하다.

3.3 제동장치 고장 발생 시 시나리오

I . TCU 1대 고장

TCU가 고장인 경우 M, T-대차와 통신이 불가하여 전기제동이 불가하다. 이때는 1칸에 요구되는 제동값을 공기제동으로 M과 T-대차의 BOU에서 제어한다.

동력(M)대차		부수(T)대차
ED>U	EP=0	EP=0
M<ED<U	EP=0	EP=U-ED
ED=0	ED=M	ED=T

표 2. 제동력 제어 구성

II . M-대차 ECU 고장

M-대차의 ECU는 전기제동을 위한 TCU와 통신과 M제동값 달성을 위한 공기제동을 제어한다. M-대차 ECU 고장 시 T-대차의 ECU에서 TCU와 통신을 수행한다. 이때 응하중 값은 T-대차에서 측정한 값으로 하고, M-대차의 공기제동은 수행하지 않으며, 필요공기 제동값은 T-대차에서 수행한다.

III . T-대차 ECU 고장

상기의 내용과 동일한 제어조건으로 T-대차에서의 공기제동은 수행하지 않고, M-대차에서 필요 공기제동을 채운다.

4. 결론

대차제어를 통하여 ECU 고장률($0 < \alpha < 1$)이 편성 2대 설치에서 4대 설치로 개선됨에 따라 제동장치의 고장은 α^2 에서 α^4 로 현저히 낮아진다. 또한 M-대차의 ECU 고장에 대한 Back-Up이 가능한 시스템 구성으로 전기제동력을 충분히 확보할 수 있어서 제동장치 고장에 따른 운행지연을 최소화하도록 설계되었다.

MC1, 2에서 모두 회생제동을 사용하지 않고 공기제동만으로 구성하는 경우 감속도 0.97m/s^2 으로 차량 성능 조건을 만족한다. 다만, 제동장치 1대 고장으로 편성의 3/4제동이 작용하면 감속도는 0.94m/s^2 로 차량 성능보다 미달된다. 하지만 이것은 확률적으로 매우 이례적인 상황이며, 일반적으로 TCU 2대가 고장인 경우를 제외한다면 ECU의 고장에 따른 제동력 상실의 영향력을 제한적이다.

차량구분	MC1		MC2		감속도 (m/s ²)
	동력	부수	동력	부수	
전기제동 (회생불가)	0	0	0	0	0
공기제동 (정상)	0.25	0.24	0.25	0.24	0.97
공기제동 (3/4제동)	0	0.31	0.32	0.31	0.94

표 3. 제동장치 고장에 따른 감속도

결론적으로 5km/h에서 제동블렌딩이 시작됨에 따라 차량에 필요한 제동력을 회생제동을 충분히 사용하게 되며, ECU의 고장에 따른 전기제동력 상실과 제동력 부족현상은 인접 ECU의 Back-Up으로 전기제동력을 충분히 확보된 상태에서 운행을 할 수 있다. 또한 ECU 1대가 고장으로 기능을 상실하여도 전기제동력을 고려한다면 3대의 공기제동력으로 충분한 제동력을 확보할 수 있어, 제동장치 고장에 따른 운행지연 및 회송 등은 현저히 줄어들 것으로 예상된다.

참고문헌

- [1] 표준전동차의 상용전제동 제어방법에 관한 연구 pp. 103-109.
- [2] 철도 운행효율성 향상을 위한 노선용량 산정 모형 개발에 관한 연구(2021)
- [3] 친환경 자동차의 회생제동 협조제어 시스템 (2013) pp. 458-459
- [4] 전동차의 전기 제동 성능 향상을 위한 연구 (2008) pp. 1054-1056