

전동차 안전을 위한 제동장치의 기술기준에 관한 연구

이우동
한국철도기술연구원

A Study on the Technical Regulation of Brake System for Electrical Multiple Unit Safety

Lee Woo-Dong
Korea Railroad Research Institute

Abstract - Safety of breaking facility is very important in subway safety. especially in case of subway that many people used, breaking capability is connected directly with safety and capability of vehicle. Recently, direction of subway technical development is established as passenger's convenience and agreeableness. owever, we are known importance of safety in subway through Dae-gu subway incendiary case. Subway accident not happen only fire. vehicle collisions or passenger's fall to the track can happen. In this case, safety standard of breaking facilities is very important. so this paper define safety of breaking facilities and take proper that standard.

한 사항에 포함되지 않는 사항으로 안전과 관련이 있는 것이다. 안전기준이 포함해야 할 항목은 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

표 1 안전기준에 포함되어야 할 항목

구분	안전기준항목
설계 및 제작에 관한 사항	차량의 설계, 제작단계에서 고려
보수유지에 관한 사항	출고전검사, 일상검사, 월간검사, 연간검수와 관련된 사항
운영에 관련된 사항	차량운행시 기관사가 지켜야 할 사항
기타 사항	위의 항목에 포함되지 않는 안전에 관한 사항

1. 서 론

지하철 안전운행에 있어서 제동장치의 안전은 매우 중요하다. 특히 많은 승객을 수송하는 지하철의 경우에는 제동장치의 성능이 전동차의 성능 및 안전과 직결되어 있다. 최근에 지하철은 기술개발 방향이 승객의 편리성과 쾌적성을 추구하는 방향으로 설정되어 왔다. 그러나 최근에 대구지하철 방화사고를 계기로 지하철에 있어서 안전이 얼마나 중요한가를 알게 되었다. 지하철사고는 화재에서만 발생하는 것이 아니다. 열차의 충돌이나 승객의 선로추락등과 같은 곳에서도 발생할 수가 있는 것이다. 이런 경우에 제동장치의 안전기준은 중요하다고 할수 있다. 따라서 본 연구에서는 지하철에 있어서 제동장치에 안전은 무엇이고 그 기준을 어떻게 설정해야 하는 지에 대하여 연구해 보았다.

2. 본 론

2.1 제동안전 설정기준

안전기준은 차량의 안전운행을 확보하는데 그 목적이 있으므로 언제나 어느 곳에서나 이 기준의 적합여부를 확인할 수 있게 제정되는 것이 바람직하다. 특수한 항목에 대해서는 월간, 중간검사 및 전반검사에서 안전기준의 적합성 여부를 판단해야 하지만 가능한 한 차량이 운행을 시작하기 전에 시행하는 출고검사나 일상검사를 통하여 확인할 수 있도록 작성되어야 한다. 따라서 안전기준의 일부는 표준사양, 성능시험기준, 정밀진단기준 및 검사규정과 관계가 있다. 차량의 모든 부품은 직접적으로 혹은 간접적으로 차량의 안전운행에 영향을 끼치지만 안전기준은 차량의 운행과 직접적인 관련이 있는 규정으로 설계 및 제작에 관한 사항, 보수유지에 관한 사항, 운영에 관한 사항 그리고 기타사항으로 나눌 수 있다. 설계 및 제작에 관한 사항은 설계 및 제작단계에서 안전운행을 고려하여 재질의 선택, 성능수준 등을 결정하여야 하는 것을 말하고, 보수유지에 관한 안전기준은 보수유지 작업시 안전운행에 필요한 기준을 만족하도록 하는 것이며, 운영에 관한 안전기준은 차량운행중 기관사가 지켜야 할 기준이며 기타사항에 관한 기준은 위에 열거

2.2 세부안전기준

현재 운행되고 있는 열차의 안전시스템을 분석하고 안전기준을 정하여 차량제작에 반영하거나 운용의 방법으로 채택하는 것은 대형사고를 미연에 방지하기 위하여 필수적이다. 기술분야에 따라 접근방법이 다르겠지만 열차 제동은 주행과 더불어 안전하게 정차하고 비상상황에서 긴급정차를 유도하는 보안시스템이 필요하다. 제동시스템과 관련된 안전기준 항목은 표 2~4와 같다. 설계 및 제작에 관한 사항, 보수유지에 관한 사항, 운영에 관한 사항 및 기타사항 각각에 대하여 공기공급장치, 기조제동장치, 공기제동장치 등으로 세분하여 설정하였다.

표 2 설계 및 제작단계의 안전기준 항목

구분	항목	세부항목
설계 및 제작단계	공기공급장치	주공기압축기 -차량소비 공기량
	기조제동장치	담면제동, 디스크제동 -제동압부력, 마찰계수 -제동레바의 굽힘강도
	공기제동장치	BOU, 상용제동, 비상제동, 주차제동, 정차제동, 제동통, 제동관, 공기탱크 -제동관 및 제동통 지시압력 -제동통의 기밀 -공기탱크의 기밀

표 3 보수유지와 관련한 안전기준 항목

구분	항목	세부항목
보수유지에 관한 사항	공기공급장치	주공기압축기 -주공기압축기 지시압력 -안전밸브 동작상태
	기조제동장치	담면제동, 디스크제동 -제동레바의 굽힘상태 -마찰재의 마모한도, 크랙
	공기제동장치	BOU, 상용제동, 비상제동, 주차제동, 정차제동, 제동통, 제동관, 공기탱크 -제동관 및 제동통 지시압력 -제동통의 기밀 -공기탱크의 기밀

표 4 운행에 관한사항 및 기타 안전기준 항목

구분	항목	세부항목
운행에 관한사항	공기공급 장치	주공기압축기 -주공기 지시압력
	기초제동 장치	담면제동, 디스크제동 -마찰계의 마모한도 -제동량 -제동레바 및 헛트
	공기제동 장치	BOU, 상용제동, 비상제동, 주차제동, 정차제동, 제동통, 제동판, 공기탱크 -제동판 지시압력 -제동통 지시압력 -공기누설 압력
	정상운전	과속운행 주차제동
운전	장애물 발견	긴급정차 비상제동거리
	사고발생	구원운전

전동차용 제동관련 안전기준(안) 작성의 기초자료로는 국내 차량제작사의 보유자료, 철도청, 서울시도시철도공사, 서울시지하철공사 등의 관계 법규, 제동부품제작사의 보유자료 등과 같은 국내자료와 일본의 JIS, 유럽의 UIC, 영국의 'Railway safety principles and guidance' 기타 외국의 철도운영기관에서 사용하고 있는 관련 법규를 참고로 하였다.

2.3 주요 기술기준 설정근거

2.3.1 저크한계 및 승차감 기준

1) 기술기준

상용제동시 저크한계는 0.8m/s³ 이하여야 하며 승차감을 향상하고 충격발생, 소음 및 진동은 최소화되도록 하여야 한다.

2) 설정근거

저크율이란 감속도의 시간에 대한 변화율로서 승차감 및 승객의 안전과 관계가 있어 최근의 차량제작에서는 이 값을 일정수준 이하로 제한하는 것이 일반적이다. 감속도가 일정한 경우 일정한 힘이 작용하므로 승객은 감속도에 저항하는 일정한 힘으로 반응하나 감속도가 갑자기 변화하면 작용하는 힘이 갑자기 변화하므로 사람의 신체는 이 급격한 변화에 적응하지 못하므로 불쾌감을 느끼거나 서있는 승객은 넘어지게 되므로 저크를 일정값 이하로 제한하는 것이 최근의 경향이다. 표준전동차와 유사하며 최신의 전동차 제작사양서를 살펴보면 반영된 서울시 5, 6, 7, 8호선 부산시 1, 2호선, 대구시 1호선, 인천시 1호선등 저크한계를 0.8m/s³로 설정하였다. 따라서 UIC, JIS등의 규정에는 특별히 정해진 저크치는 없으므로 전동차의 저크한계를 0.8m/s³로 하여야 한다.

2.3.2 감속도기준

1) 기술기준

상용제동시 평균감속도는 3.5km/h/s 이상, 비상제동시 평균감속도는 4.5 km/h/s 이상을 유지하여야 한다.

2) 설정근거

열차의 평균감속도는 열차의 제동거리와 밀접한 관련이 있으므로 안전과도 직결된다. JIS E 6004에서 정의하는 열차의 감속도를 평가하는 방법은 총제동시간에 의한 방법과 공주시간 및 비상제동거리를 이용하여 구하는 방법이 있다. 제동시간을 기준으로 한 감속도 β₁과, 제동거리를 기준으로 한 실행평균감속도 β₂는 아래 식 (1) 및 (2)로 정의된다

여기서 V₀(km/h/s)는 제동초속도, V₁(km/h/s)는 종속도, S(m)는 제동거리, t₀(s)는 공주시간, t₁(s)는 총제동소요시간이다.

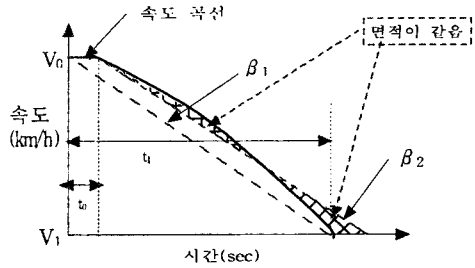


그림 1 실행평균감속도의 개념

$$\beta_1 = \frac{V_0 - V_1}{t_1} \text{ (km/h/s)} \quad (1)$$

$$\beta_2 = \frac{V_0^2 - V_1^2}{7.2(S - \frac{V_0 \cdot t_0}{3.6})} \text{ (km/h/s)} \quad (2)$$

제동시간을 기준으로 한 감속도 β₁는 공주시간을 포함한 산술적인 평균감속도이다. 반면에 제동거리를 기준으로 한 감속도 β₂는 공주시간을 제외한 실행평균감속도로서 잘 알려진 뉴턴의 운동법칙에 근거한 것이다. 그림 1에서 속도곡선의 아래부분의 면적이 제동거리가 되도록 속도곡선의 안쪽 면적과 바깥쪽 면적이 같게 평균감속도를 구한 것이다.

제동거리 측면에서 볼 때 단순히 제동시간을 이용한 것 보다 논리적이 있기 때문에 본 규정에서는 제동거리를 기준으로 한 감속도를 감속도 산정의 식으로 적용한다. β₁의 계산에는 공주시간 t₀를 정의하여야 한다. 이 공주시간은 법규상으로 정의된 것은 찾아보기 어려우나 시간과 속도곡선(그림 1)에서 제동초속도선과 속도곡선의 접선이 만나는 점으로 정의된다.

일본 동경의 영단지하철의 상용제동과 비상제동시의 평균감속도는 표 4.1.1과 같다. 상용제동의 평균감속도는 3.5~4.0 km/h/s 범위이고 비상제동거리의 평균감속도의 범위는 4~5 km/h/s이다. 서울시 7, 8호선의 경우는 상용제동에서 3.5 km/h/s, 비상제동에서 4.5 km/h/s이다.

따라서 국내의 기술수준과 조사된 자료들을 근거로 하여 제동감속도를 상용제동시 3.5 km/h/s, 비상제동시 4.5 km/h/s 이상으로 하도록 하여야 한다.

2.3.3 비상제동거리기준

1) 기술기준

환경조건, 레일조건, 공주시간, 활주등의 조건에 관계없이 편성열차의 비상제동거리는 600m이내[2]이어야 한다.

2) 설정근거

우선 제동거리의 평가방법에 대하여 이하에 서술한다. 제동시험에 있어서는 제동초속도 또는 구배가 목표치와 약간 차이가 있는 것도 있다. 이때 목표로 한 제동초속도 및 구배에 대응한 제동거리를 구하는 데는 다음과 같은 두가지 방법이 있다.

첫째로 제동초속도가 목표치와 차이가 있고 그 차이가 작은 경우는 목표치에 따른 값에 제동거리를 보정해서 평가할 행한다.

둘째로 제동초속도의 측정치가 팽범위하게 다수 분포하는 경우는 제동초속도와 제동거리와의 관계를 최소자승법을 사용하여 평가한다. 두가지 방법중 어느 방법을 사용하는 경우에 있어서도 그 전단계로서 다음 사항을 행할 필요가 있다.

○ 차륜활주 유무의 확인

제동거리를 측정하고 있는 차륜이 활주하고 있지 않은 것을 확인한다. 활주가 발생한 경우는 속도곡선을 이용해서 활주에 의한 제동의 손실을 면적계산으로 산출해서 제동거리를 보정한다.

○ 구배의 보정

시험지점의 구배가 목표로 한 구배와 차이가 있는 경

우에는 시험에 따라서 얻어진 제동거리를 목표로 한 구배의 수치에 보정한다. 보정식의 예를 식 (3)에 나타내었다. 보정전의 구배와 보정후의 구배의 차이는 5%를 넘지 않는 값을 목표로 한다.

$$s = \frac{v_0 t_0}{3.6} + \frac{v_0^2}{\frac{v_0^2}{s' - s_0} \pm 0.254i} \quad (3)$$

여기서 s : 구배보정후의 제동거리(m),
 s' : 구배보정전의 제동거리(m),
 v₀ : 제동초속도(km/h),
 t₀ : 공주시간,
 i : 시험지점의 구배와 보정후 구배의 차이(%),
 ± 기호는 구배증가시는 +, 구배감소시는 -,
 예를 들면 -8%구배에서 시험을 행하지 않고
 -10%구배에서 보정한 경우는 -부호를 취한다.

○ 제동초속도를 목표치로 보정해서 제동거리를 평가하는 방법

목표로 한 제동초속도에 대하여 시험을 행한 제동초속도의 차이가 근소한 경우는 목표로 한 제동초속도에 대응한 값에 제동거리를 보정해서 평가한다. 제동거리의 보정식을 식 (4)에 나타낸다.

$$s = s_{01} + (s' - s_{02}) \frac{v^2}{v_0^2} \quad (4)$$

또한, s₀₁ = vt₀/3.6, s₀₂ = v₀t₀/3.6, 또는 s = 제동거리(m) s' = 보정전 제동거리(m), v = 제동초속도의 목표치(km/h), t₀ = 공주시간(s)이다.

비상제동거리는 최대치에서 평가하고 보조적인 자료로서 평균값, 표준편차를 이용한다.

○ 최소자승법에 의한 2차 회귀곡선을 이용한 평가방법
 제동초속도와 제동거리의 관계를 최소자승법을 이용해서 2차 회귀곡선을 구하여 목표로 한 제동초속도와 교점을 구한다. 이 교점이 목표로 한 제동초속도에 있어서 제동거리의 평균치를 나타낸다. 비상제동거리의 평가는 이 평균치 및 목표제동초속도 부근의 비상제동거리를 식 (4)를 이용 보정하여 평가한다.

제동거리는 3회 반복 측정하여 그 평균값으로 한다. 필요시 위에서 설명한 보정방법을 활용한다. 실제로 전동차의 경우 비상제동거리를 측정해본 결과 표 5와 같이 나타났다.

표 5 호선별 비상제동거리

구분	서울시 5호선	KNR 1호선 (구로3복선)
공 차	207.0 m	264.0 m
만 차	247.5 m	250.5 m

제동거리에 평가하는방법외에 제동거리에 관한 법령 또는 규정을 살펴보면 다음과 같다.

도시철도운전규칙(1995.7.27 건설교통부령 제23호)[3] 제 29조에는 '열차의 비상제동거리는 600m이하로 하여야 한다' 라고 규정되어 있다. 도시철도법에서 규정하는 '도시철도'란(도시철도법 제3조) '도시교통의 원활한 소통을 위하여 도시교통권역에서 건설운영하는 철도, 모노레일 등 궤도에 의한 교통시설 및 교통수단을 말한다.' 여기서 도시교통권역이라함은 도시교통정비촉진법 제 3조의 규정에 의한 도시교통정비지역을 말한다. 이 법에 제 2 조 3항에서 정의하는 '도시교통정비지역'이라함은 다음지역을 말한다.

○ 상주인구 10만 이상의 도시(도농복합형태의 시에 있어서는 읍, 면지역을 제외한 인구가 10만 이상인 경우를 말한다) 및 그 도시와 같은 생활권에 있는 지역(이하 '교통권역'이라 한다)

○ 건설교통부장관이 도시교통 개선을 위하여 특히 필요하다고 인정하여 내무부장관과 협의한 후 중앙도시교통정책심의위원회의 심의를 거쳐 지정고시한 도시 및 그 교통권역

속도정수 사정기준규정(철도청 훈령 제5119호, 1981.2.5 제정) 제26조 '비상제동성능은 실제제동거리와 공주거리를 합한 전제동거리가 600m이내에서 정지되는 것으로 한다.(다만 110km/h까지)'라고 규정되어 있다.

일본 국유철도운전규칙 제49조에서는 「열차의 제동거리는 600m 이하로 하지 않으면 안된다」로 되어 있다.

이상과 같이 제동거리를 계산에 의한 방법, 실제 측정 한 시험결과 및 기타 국내의 규정과 일본의 규정을 종합적으로 분석한 결과 안전을 고려한 비상제동거리는 600m로 설정하는 것이 바람직하다.

2.3.4 제동관기준

1) 기술기준

제동작용은 모든 차량에 공급되어야 하고 편성열차를 관통하여 연속적이고 자동이어야 한다. 또한 모든 제동작용시 및 제동불완해시에는 전동차가 출발할 수 없도록 역행을 차단하여야 한다.

2) 설정근거

본 규정은 Railway safety principles and guidance 320 을 준용한 규정으로 전동차의 제동장치가 구비해야 할 기본사항에 관한 것으로 제동이 연속적이며 자동으로 작용해야 하는 것과 안전을 위해 제동작용중이거나 제동불완해시에는 역행이 불가능하게 하여 사고를 예방하기 위한 기술기준이다.

3. 결 론

제동장치에 대한 기술기준들은 전동차의 안전과 직결되는 사항들이다. 제동장치는 실제로 전동차의 고장의 30%이상을 차지하고 있다.

전동차의 안전을 위하여 제동장치의 기술기준들은 더 많은 부분들이 다루어져야 하고 이에 대한 기술기준들이 제시되어야 한다. 이들 기술기준들은 실제 하드웨어 개발이나 시험을 통하여 검증이 될 수도 있으나 시간적, 공간적 및 경제적인 부분 등 현실적으로 어려운 부분들이 많기 때문에 국내외 자료등을 인용하는 경우도 많다. 결론적으로 전동차의 안전은 기술기준의 합리성과 정확성에 출발한다고 할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 영국, Safety Regulation, 1993
- [2] 건설교통부, 도시철도차량 안전기준에 관한 연구보고서, 1999
- [3] 건설교통부, 도시철도 운전규칙, 1993
- [4] 철도청, 속도정수 사정기준규정, 1981.