

유압식 버퍼스톱의 제동 특성에 관한 연구

A study on the braking characteristics of a hydraulic buffer stop

최정흠* 박제승** 홍석호** 한동철***
Choi, Jeong-Heum Park, Je-Seung Hong, Seok-Ho Han, Dong-Chul

ABSTRACT

The hydraulic buffer stop placed on the end of the railway brakes the train could not reduce the velocity sufficiently because of the braking system troubles or driver's mistakes. The hydraulic buffer stop is composed of 2 operating parts; hydraulic buffers and rail clamps. Hydraulic buffers brake trains non-destructively in low speed, otherwise rail clamps begin to work in higher speed. In this paper, The braking process of the hydraulic buffer stop is investigated by numerical methods. The hydraulic buffer is numerically analyzed and designed to absorb the kinematic energy of the train below 3.2km/h speed. The hydraulic buffer stop crushed by the train with 5km/h speed is analyzed by FEM package-PAM CRASH in order to obtain the stress profile in rail clamps and buffer stop frame.

1. 서론

선로 종착지점에서 제동장치의 고장이나 운전자의 부주의에 의해 발생한 사고는 인명, 차량, 화물, 및 역내 시설에 크나큰 손실을 일으키게 된다. 때문에 철도차량의 제동기능에 상관없이 차량을 정지시키거나 감속시켜 사고의 위험성을 감소시킬 외부장치로 버퍼스톱이 사용된다.

현재 주로 사용되고 있는 강체 버퍼스톱(rigid buffer stops)은 기본적으로 레일이나 지면에 강체로 고정된 프레임 또는 블록(버퍼스톱)으로 구성되어 있으며, 자갈을 버퍼스톱 전후에 깔아놓기도 한다. 이 경우 철도차량이 종착지점에서 충돌하게 되면 프레임 또는 콘크리트 블록이 파괴되고, 철도차량은 전두부에 큰 손상을 입게 된다. 이는 충돌에너지를 효과적으로 흡수하지 못하며, 상호간에 큰 반발력이 작용하기 때문이다. 특히 이러한 방식은 차량의 전복이 일어날 가능성이 높아 재운행시 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다.

이러한 단점을 극복하기 위해서 최근에는 마찰력을 이용하거나 유압식 버퍼를 사용한 버퍼스톱이 많이 사용되고 있다. 그러나 철도차량의 질량이 증가하고 허용 충돌속도가 높아짐에 따라 운동에너지가 커지므로, 이에 맞는 충분한 제동거리를 유지하는 동시에, 유압식 버퍼와 마찰요소를 설계하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 유압식 버퍼와 마찰식 버퍼가 결합된 형태를 가진 버퍼스톱의 제동특성을 분석하였다.

2. 유압식 버퍼스톱의 기본구조

사용된 유압식 버퍼스톱은 유압완충기, 제동용 마찰클램프, 리프팅 방지용 마찰클램프, 버퍼스톱 프레임, 스톱퍼로 구성되어 있으며, 각 기능은 Fig. 1과 같다. 유압완충기는 피스톤의 이동으로 인해 발생하는 유동저항에 의해 충돌에너지를 흡수하며, 충돌 속도에 따라 에너지 흡수용량이 변하는 특징을

* 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 선임연구원, 정희원

** 서울대학교 기계항공공학부 대학원, 비희원

*** 서울대학교 기계항공공학부 교수, 비희원

가지고 있다. 유압식 버퍼스톱에 장착할 경우 클램프의 미끄럼없이 충돌에너지를 흡수하는 한계속도가 존재하며, 특히 한계속도를 넘는 속도범위에서는 클램프의 마찰력과 동일한 크기의 감쇠력이 발생된다. 제동용 마찰클램프는 차량을 제동시키기 위한 마찰력을 제공하며, 저속충돌시 정지마찰력에 의해 유압완충기만으로 충돌에너지를 흡수할 수 있도록 하며, 중·고속충돌시 마찰에 의해 충돌에너지를 열에너지로 변환시켜 열차를 손상없이 정지시킨다. 프레임의 앞쪽 하단에 설치된 리프팅방지용 마찰클램프는 충돌시 발생하는 모멘트(Moment)에 의해 버퍼스톱이 상하로 들리는 현상을 방지하기 위해 다소 크게 설계된다. 버퍼스톱 프레임은 유압완충기와 클램프의 자세를 유지시킨다.

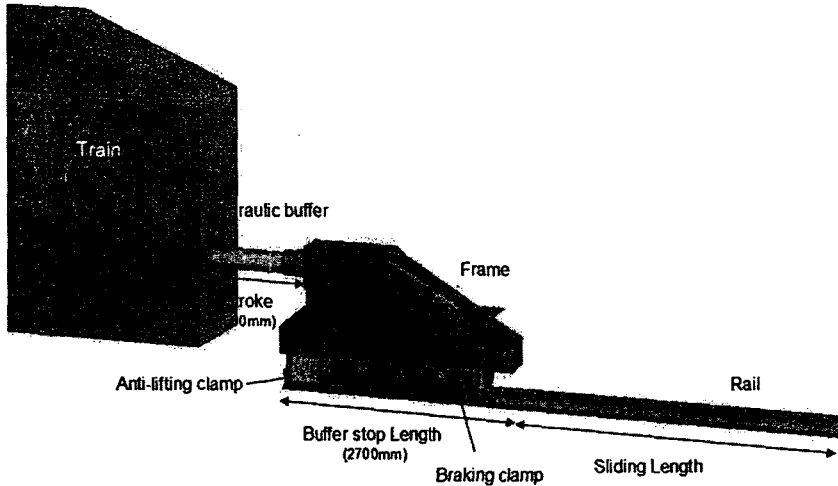


Fig.1 유압식 버퍼스톱의 개요도

□ 유압완충기 용량

기본모델에 사용될 유압완충기 TM130x600의 실제용량은 전체 행정거리(Stroke)가 600mm이고 평균 완충력이 435kN이다. 평균 완충력은 유압완충기가 에너지를 가장 많이 흡수하는 경우에 대해서 얻어진 값이므로, 실제 현장에 적용할 경우에는 대략 80%의 효율(η)을 가진다고 가정한다. 그러므로 유압완충기에서 흡수하는 충돌에너지(E_{hyd})는 대략 200kJ을 가진다.

저속 충돌시 유압완충기에 발생하는 완충력은 마찰클램프의 최대정지마찰력에 비해 낮은 값을 갖게 된다. 그러므로 유압완충기만 작동되는 최대 충돌속도 이하에서는 유압완충기가 작동하더라도 전체 버퍼스톱의 프레임과 마찰클램프는 정지한 상태를 유지하게 된다. 이때의 유압완충기만으로 충돌에너지를 흡수할 수 있는 한계속도를 얻을 수 있다. 국철의 경우 충돌하중을 1000ton으로 하였을 때, 한계속도는 3.22km/h가 얻어진다.

□ 마찰클램프의 용량

마찰 클램프에 의한 제동력은 볼트에 의해 발생된 수직항력에 의해 결정된다. 클램프 마찰에서 흡수되는 에너지 E_{fr} 는 동마찰력 F_{fr} 에 미끄럼 거리 S 를 곱한 값과 같다. 본 연구에 사용된 마찰클램프의 수직항력은 400kN으로 설계되었다.

$$F_{fr} = \mu Q \quad (\mu : \text{마찰계수}, Q : \text{수직항력}) \tag{1}$$

$$E_{fr} = F_{fr} \cdot S \quad (S : \text{미끄럼 거리}) \tag{2}$$

□ 유압식 버퍼스톱의 설계용량

유압식 버퍼스톱의 제동 용량은 항상 차량의 최대 중량과 충돌시의 최대 속도에 의해 결정된다. 왜냐하면, 식 (3)과 같이 역학적 에너지 보존 법칙에 의해 유압식 버퍼스톱에 작용하는 동적 에너지인

충돌에너지와 유압식 버퍼스톱에서 흡수되는 에너지가 같아야 하기 때문이다. Fig.1에 그려진 바와 같이, 유압완충기에 의해 에너지가 흡수되는 행정거리는 600mm이며, 마찰클램프에 의해 에너지가 흡수되는 거리는 허용 미끄럼길이가 표시한다. 일반적으로 유압완충기는 충돌 질량과 충돌 속도에 따라 에너지 흡수특성이 달라지며, 마찰클램프의 경우에는 충돌 속도에 관계없이 일정한 값을 유지하므로 충돌질량과 충돌 속도가 높아짐에 따라 허용 미끄럼길이가 커짐을 쉽게 예측할 수 있다.

$$\text{충돌에너지} = \frac{1}{2} mv^2 \quad \text{흡수에너지} = E_{hyd} + E_{fr}$$

$$\text{역학적 에너지 보존법칙} \quad E = \frac{1}{2} mv^2 = E_{hyd} + E_{fr} \quad (3)$$

충돌 하중	버퍼 수량	버퍼당 충돌충량	충돌속도	충돌에너지	유압완충기 흡수에너지	클램프 흡수에너지	클램프 미끄럼 길이
1000 Ton	2 ea	500 Ton	5.0 km/h	482.3 kJ	200kJ	282.3 kJ	706 mm
			10.0 km/h	1929.0 kJ	200kJ	1729.0 kJ	4323 mm

표 1 유압식 버퍼스톱의 에너지흡수용량 및 최소허용 미끄럼길이

3. 유압 완충기의 구조와 작동원리

유압완충기는 실린더내에 있는 피스톤이 움직일 경우 오일이 오리피스스를 통과해서 흐르면서 발생하는 유동 저항에 의해 작동한다. Fig.2에 나타낸 바와 같이 다공식 유압완충기는 내·외부 실린더, 피스톤과 피스톤로드, 어큐뮬레이터(accumulator) 등으로 구성되어 있으며, 내부 실린더 상에 불연속적으로 오리피스 구멍이 뚫려있어 피스톤이 전진함에 따라 챔버 1에서 챔버 2로의 유동이 발생하는 유로의 개수를 줄어든 채 함으로써 물체에 작용하는 반발력을 일정하게 유지하도록 설계되어져 있다. 유압완충기의 완충력을 계산하기 위해서는 아래의 식과 같은 미분방정식이 얻어지며, Runge-Kutta Method를 사용하여 수치 해석적으로 결과를 구해내었다.

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{a_p \frac{dx}{dt} - q}{\frac{1}{\beta_e} \{ V_{10} - a_p x \}} \quad : \text{연속방정식}$$

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{q - (a_p - a_c) \frac{dx}{dt}}{\frac{1}{n} V_{30} p_2^{1/n} p_2^{-[(1/n)+1]} + \frac{1}{\beta_e} \left\{ V_{20} + (a_p - a_c)x + V_{30} \left[1 - \left(\frac{p_{30}}{p_2} \right)^{1/n} \right] \right\}} \quad (4)$$

$$\text{유압 완충기의 완충력} : \quad f_d = a_p p_1 + (a_c - a_p) p_2 \quad (5)$$

$$\text{오리피스 방정식} : \quad q = C_d a(x) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (6)$$

$$\text{운동방정식} : \quad m_e \ddot{x} + f_d(x, \dot{x}) + kx = 0, \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = v_0 \quad (7)$$

$a(x)$: 유출되는데 사용된 전체 오리피스의 면적
 x_1, x_2 : 고정피스톤과 이동피스톤의 이동 거리
 a_p, a_c : 압력을 받는 피스톤의 면적과 이동피스톤의 면적

이동피스톤의 뒤쪽에는 질소가스가 밀봉되어 있고, 초기조건은 이상기체식으로부터 얻었으며, 압축 과정은 단열과정으로 모델링하였다. 질소의 경우 $n=1.4$ 이다. Fig.3은 유압완충기의 한계속도인 3.22km/h와 충돌속도가 한계속도보다 큰 경우 유압완충기를 고정벽에 설치하여 단독으로 충돌했을 때의 특성곡선을 나타낸다. 속도가 1.55배 증가한 경우 최대완충력은 2.4배 증가하는 것을 알 수 있다.

그러나 실제로는 유압완충기 내부의 챔버에서의 압력도 증가함에 따라 밀봉장치가 파괴되어 유압완충기의 기능이 상실된다.

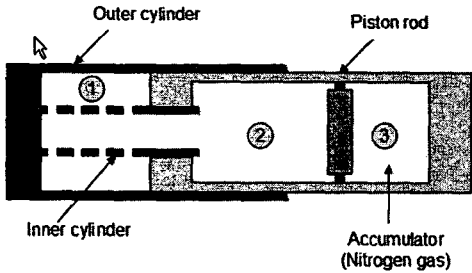


Fig.2 유압완충기의 개략도

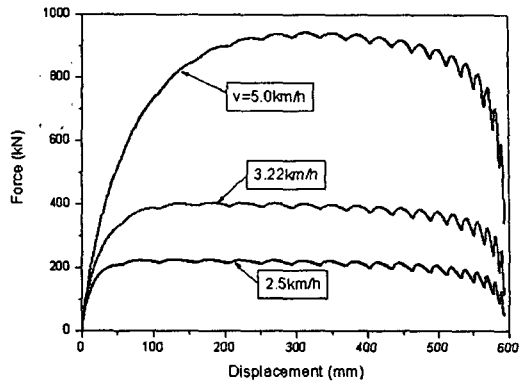


Fig.3 충돌속도별 유압완충기의 특성곡선

4. 마찰클램프의 기본원리

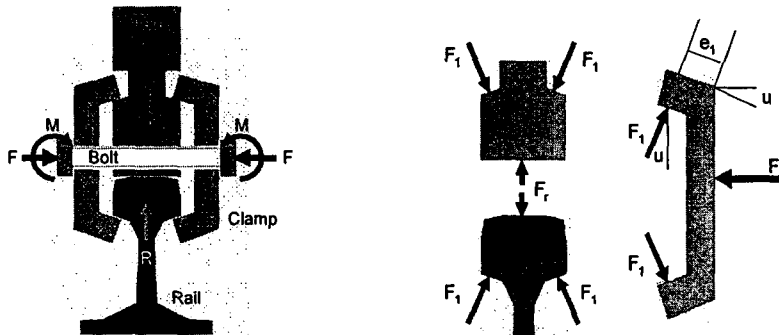


Fig.4 마찰클램프의 구조 및 자유물체도

볼트에 예하중을 가해주면 늘림판이 수평방향으로 압착되며, 이러한 작용은 늘림판과 상부지지대, 늘림판과 레일사이의 경사면을 눌러 수직항력을 발생시킨다. 여기서 레일을 제외한 나머지 요소는 유압식 버퍼스톱과 함께 움직이며, 레일은 노면에 고정된다. 그러므로 마찰면은 상부 지지대와 레일 사이, 레일의 하부와 늘림판의 하부 사이에 위치한다. 늘림판의 상·하부에 일정한 각도의 경사각을 주는 이유는 동일한 볼트 예하중에 대해 수직항력을 증대시키기 위한 것이다.

x 방향 힘의 평형방정식 $\sum F_x = 0 ; F = 2F_1 \sin \theta$ (8)

y 방향 힘의 평형방정식 $\sum F_y = 0 ; F_r = 2F_1 \cos \theta$ (9)

수직항력 : $F_r = F / \tan \theta$ (10)

위 식으로부터 경사각이 작을수록 작은 예하중에 대해 높은 수직항력을 가짐을 알 수 있으며, 본 연구에서는 20도의 경사각을 적용하였다. 증대시키는 효과는 이론적으로 8.6배 정도가 된다. 이러한 관계로부터 볼트 1개당 작용해야하는 예하중을 계산할 수 있으나, 늘림판 등의 변형을 고려하여 볼트 1개당 작용해야하는 예하중(작용하중)이 33.3kN이 되도록 설계하였다.

5. 유압식 버퍼스톱 모델링

유압식 버퍼스톱의 전체 시스템에 대한 구조 및 성능해석은 일반적으로 자동차, 철도차량 등의 충돌해석에 널리 사용되는 상용 비선형 유한요소해석 소프트웨어인 PAM-CRASH를 사용하였다. 유압

완충기는 유압특성을 구현하기 위해 비선형 댐퍼를 사용하였으며, 버퍼스톱 프레임은 셸(shell), 상부 지지대와 마찰클램프는 솔리드(solid)로 각각 모델링 하였다.

전체 시스템에 사용된 총 요소(element)는 71,542개, 노드(node)는 61310개이며, 국철이 시속 5km/h로 유압식 버퍼스톱에 충돌할 때의 거동에 대해 해석하였다. 해석결과로 버퍼스톱 프레임과 상부지지대에서의 응력은 구조적 안전도에 문제되지 않을 정도로 작은 54MPa 값이 나왔다.

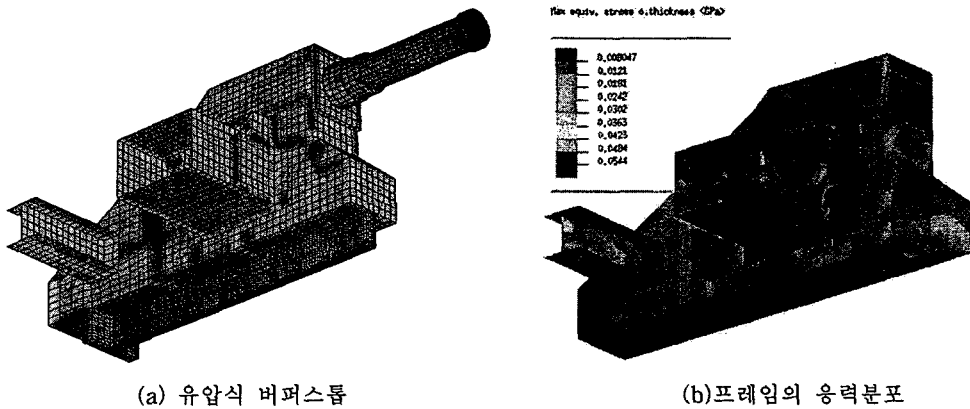


Fig.5 유압식 버퍼스톱 유한요소 모델

□ 마찰클램프의 응력분포

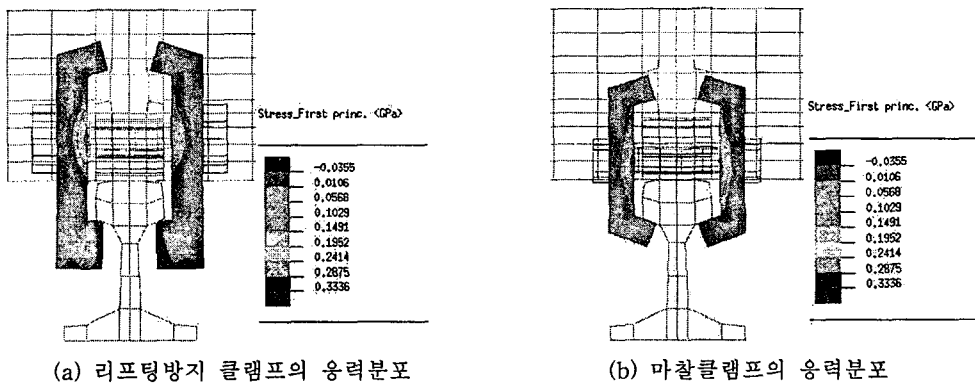


Fig.6 마찰클램프의 응력분포

리프팅 방지용 마찰클램프의 최대응력은 놀림판의 안쪽 볼트 체결부에서 발생하며 그 값은 321MPa 이다. 놀림판의 재질은 항복응력이 600Mpa보다 큰 단조 SF50, 주강 SCM을 사용하므로 구조적으로 충분히 안정함을 알 수 있다.

마찰클램프에 발생하는 최대응력값은 367.7MPa으로 항복응력이 400MPa보다 큰 단조 SF50, 주강 SCM을 사용하여 구조적 안정성을 꾀할 수 있으며, 리프팅 방지용 클램프와 마찬가지로 항복응력이 최소 600MPa 이상인 재질을 사용하는 것이 좋을 것임을 알 수 있다.

최초 철도차량과 유압완충기가 접촉이 일어날 때의 완충력은 500kN 정도이며, 시간이 진행됨에 따라 대략 475kN의 완충력을 가진다. 설계 제안된 400kN보다 큰 값을 가지는 이유는 클램프에 의해 발생하는 전체 마찰력이 475kN으로 예상 설계값보다 크게 발생되기 때문이다. 또한, 충돌 속도가 5km/h가 되더라도 유압완충기의 완충력은 950kN이 되지 않으며, 클램프의 마찰력에 의해 최대값이 475kN으로 제한되므로, 유압완충기가 파손됨이 없이 작동할 수 있음을 알 수 있다.

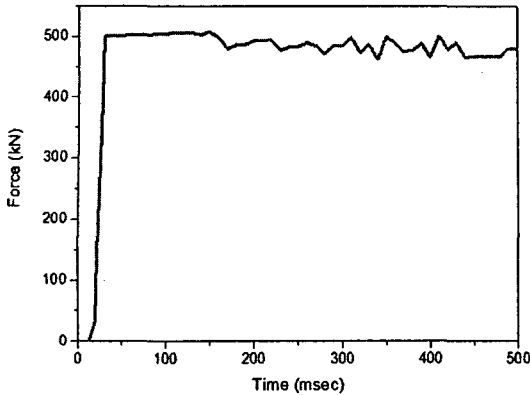


Fig. 7 유압완충기의 완충력 특성

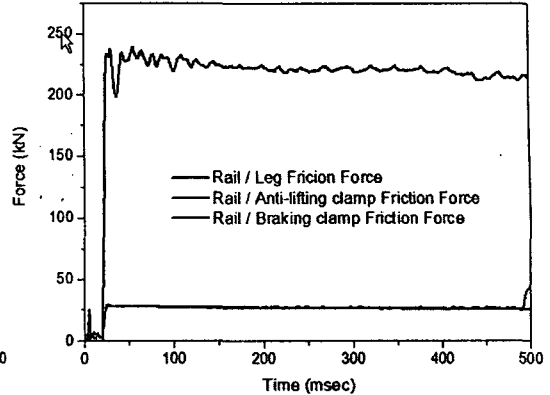


Fig. 8 접촉면에 작용하는 마찰력

□ 접촉면에서의 마찰력

상부지대와의 레일 윗면 사이에 작용하는 마찰력은 Fig. 8에서 살펴보면 대략 225kN에서 210kN으로 시간이 지남에 따라 낮아지고 있으며, 리프팅 방지 클램프와 마찰클램프에서 늘림판 하단부와 레일 하단부 사이에 작용하는 마찰력은 좌·우측 각각 25kN이 발생한다. 그러므로 전체 마찰력은 $225 \text{ kN} + 10 \times 25 \text{ kN} = 475 \text{ kN}$ 으로 설계값인 400kN 보다 약간 크게 발생하여 충분한 제동력을 가짐을 알 수 있다. 그러므로, 볼트의 예하중값을 설정할 시에 단순한 모델을 사용하여 계산한 33.3kN보다 작은 값을 가져야 하며, FEM을 통한 상세해석 또는 실험을 통해서 정확한 값을 얻어야 하는 것을 의미한다. 해석결과 제동거리는 대략 400mm이 얻어졌다.

6 결 론

본 연구에서는 유압식 버퍼스톱의 제동 작용에 대한 수치해석 및 FEM 해석을 수행하였다. 1000톤의 무게를 가진 국철이 속도 5km/h로 충돌할 경우로 가정하여 해석으로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 유압완충기는 충돌속도가 3.22km/h 이하에서는 최대완충력 400kN보다 낮으며 버퍼스톱의 미끄럼 없이 차량을 정지시킨다. 충돌속도가 3.22km/h 이상인 경우에는 버퍼스톱 마찰클램프의 미끄럼에 의해 최대완충력은 마찰력에 의해 결정되며, 해석결과에서는 475kN을 유지하므로 유압완충기의 파손이 발생하지 않음을 알 수 있었다.
- 마찰클램프의 늘림판의 상·하단부에 경사각을 20도 가량 줌으로써 마찰면에 작용하는 수직항력을 증대시키는 효과는 이론적으로 8.6배 이상이 되나, 유한요소 해석결과 늘림판의 변형에 의해 대략 4~5배의 증대효과가 나타남을 확인하였다.
- 마찰클램프의 FEM 해석결과 늘림판의 국부응력과 변형량이 중요한 설계인자이며, 발생된 최대응력값보다 큰 항복응력을 갖는 재질을 사용해야함을 알 수 있다.
- 설계목적치보다 다소 큰 값의 마찰력 475kN이 발생하며, 유압완충기에도 같은 하중이 작용한다. 이 경우 버퍼스톱은 약 400mm의 제동거리를 갖는다.

참고문헌

1. Miguel R. Burarin, Jose-Manuel Garcia Diaz-de-Villegas, "Conception of buffer stop blocks",
2. 백남욱, 장경수, 김효식, 강부병 공저, "철도차량 총서", 기전연구소, 1997
3. PAM-CRASH/SAFE version 2000 Note/Reference Manual, ESI/PSI, 2000
4. 김진영, "마찰 클램프 설계보고서", 영중산업(주), 2002