

철도차량의 충돌 시뮬레이션을 위한 유압 완충기의 특성 맵

김진성 · 최정흠* · 박영일†

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 · * (주) 케이오비에이 기술연구소
(2016. 1. 21. 접수 / 2016. 2. 15. 수정 / 2016. 2. 19. 채택)

Characteristic Map of Hydraulic Buffer for Collision Simulation of Rolling Stock

Jinseong Kim · Jeong Heum Choi* · Yeong-il Park†

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology
*R&D Center, KOBA Co., Ltd.

(Received January 21, 2016 / Revised February 15, 2016 / Accepted February 19, 2016)

Abstract : The rolling stock is composed of several cars. In order to operate in combination, it is necessary to connect the device, called coupler, between the rolling stocks. When the collision occurs between cars, couplers should be able to absorb the shock. Urban railway has used only rubber absorbers. But recently, the hydraulic buffer has been considered in general railway. In order to know the performance of the buffer it should be conducted to experiments. But whenever this combination change, we should experiments to know a lot of the dynamic behavior of each coupler. These experiments are generally replaced by the simulation, since a lot of time and cost consuming. The quasi-static map of hydraulic buffer obtained by the experiments is required for the simulation. However, the experiments for obtaining such a quasi-static map is costly and time consuming. In this paper, it proposes a method for deriving the quasi-static map of hydraulic buffer from the theoretical model.

Key Words : hydraulic buffer, collision simulation, rolling stock, dynamic model, quasi-static map, coupler

1. 서론

철도차량은 에너지 소비 및 수송 능력과 같은 면에서 자동차보다 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 편성운전을 하는 철도차량은 기본적으로 제동 및 가속 중 차량 간에 충격하중이 발생하고 운전자의 실수 및 장치의 고장으로 인해 충돌 사고가 발생할 수도 있다. 그러므로 철도 차량들을 연결해주는 연결 장치인 연결기는 이러한 충돌 에너지를 흡수하는 완충 기능을 포함하고 있다.

철도차량에 사용되는 연결기에 대한 국내의 안전 기준은 다음과 같다¹⁾.

1) 도시철도차량은 시속 5킬로미터의 속도로 주행하는 공차상태의 열차가 제동이 되어있는 유사한 형태의 열차와 연결기를 통하여 충돌하였을 때 차체에는 손상이 발생하지 않아야 한다.

2) 일반 철도차량은 10킬로미터의 속도로 충돌하였을 때 연결기와 차체에 손상이 발생하지 않아야 한다.

도시철도차량은 고무완충기를 사용하여 안전기준을 만족시킬 수 있으나 일반 철도차량은 고무완충기만으로 안전기준을 만족할 수 없어서 고무완충기에 유압완충기나 변형 튜브를 결합하여 사용한다.

이러한 안전기준을 만족하는 연결기를 설계하기 위해서는 실제 철도 차량의 충돌을 모사하는 동적 충돌 시험이나 시뮬레이션 방법을 활용하게 된다. 그러나 동적 충돌시험은 준비 단계부터 시험이 실시되는 전 과정에서 많은 시간과 비용이 소요되며 특히 편성 차량의 충돌시험은 실제로 시행하기에는 어려움이 너무 많다. 그러므로 기존에 사용되는 방법은 수차레 충돌 실험을 통해 완충기의 성능을 나타내는 특성 맵을 생성하고 편성 철도 차량의 충돌 시뮬레이션에 적용하여 연결기 구성요소의 특성을 추출한 후 이를 이용하여

† Corresponding Author : Yeong-il Park, Tel : +82-2-948-1651, E-mail : yipark@seoultech.ac.kr

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science & Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

철도차량 편성 단위의 충돌 시뮬레이션을 수행하게 된다^{2,4)}.

본 논문에서는 충돌시험을 통해 유압 완충기의 시험 기반 특성 맵을 추출하는 방법 대신 유압 완충기의 상세한 이론 모델로부터 완충기의 이론기반 특성 맵을 생성하고 이를 바탕으로 충돌 시뮬레이션 수행을 통해 이에 대한 타당성을 제시하고자 한다.

2. 철도 차량용 유압 완충기 모델

철도차량 충돌용으로 사용되는 유압 완충기는 대략적으로 Fig. 1과 같은 형태로 되어 있다.

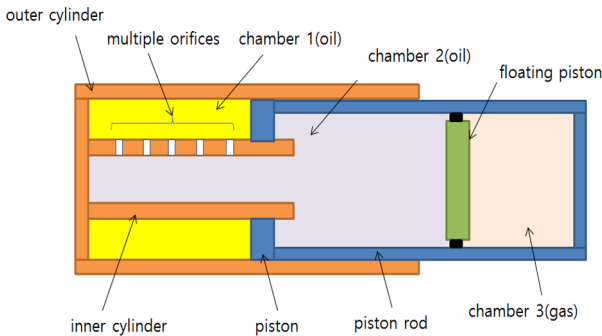


Fig. 1. Configuration of hydraulic buffer.

유압식 충격흡수장치는 Fig. 1과 같이 유체가 채워져 있는 외부 실린더와 내부 실린더 사이의 챔버 1과 부유 피스톤과 내부 실린더 사이의 챔버 2, 부유 피스톤에 의해 격리된 상태로 질소 가스가 채워져 있는 챔버 3으로 구성되어 있다.

2.1 유압 완충기의 작동 방식

충돌이 발생하여 피스톤 로드가 좌측으로 움직이면 챔버 1의 압력이 증가하게 된다. 챔버 1의 압력이 증가하면 내부 실린더의 다중 오리피스로 유동이 발생한다. 이러한 유동에 의해 챔버 2의 체적이 증가하게 되고, 챔버 2의 오일압력과 챔버 3의 가스압력이 평형을 이루며 부유피스톤이 우측으로 이동하여 가스가 압축된다. 챔버 3의 압축가스는 대략 3~5[bar] 정도의 초기압력을 가지며, 충돌시 챔버 2의 압력이 대기압 이하로 떨어지는 것을 방지하고, 충돌후 복원력을 발생시키나, 가스에 의한 반력과 복원력은 댐핑력과 비교시 무시할 수 있을 정도로 작다.

유압식 충격흡수장치의 완충 특성은 피스톤이 이동하면서 오일이 흐를 수 있는 다중 오리피스의 면적 변화에 의해 결정된다.

2.2 유량 평형식

압력과 유량의 관계를 구하기 위해 앞서 이론적 계산 모델을 설정하기 위한 가정을 다음과 같이 세운다.

- 1) 두 챔버와 저장실 내의 압력 분포는 각각 균일하다.
- 2) 압력의 변화로 생기는 실린더의 팽창이나 수축은 무시한다.
- 3) 저장실의 기체는 단열과정의 입력-부피 관계를 갖는다.
- 4) 오일은 압력을 받으면 수축하게 되는데, 이때 압력과 수축률은 체적 탄성계수 β_e 로 비례한다.

$$\beta_e = -V \frac{dP}{dV} = \rho \frac{dP}{d\rho} \quad (1)$$

이 가정을 바탕으로 두 챔버와 가스 저장실을 각각 검사체적으로 잡아 유량과 부피의 관계식을 세울 수 있다.

$$\rho_i Q_i - \rho_o Q_o = \frac{d}{dt}(\rho V) \quad (2)$$

여기서 소첨자 i 는 검사체적으로 들어가는 유량이며, 소첨자 o 는 검사체적으로부터 나오는 유량을 뜻한다.

밀도가 일정한 경우, $\rho_i = \rho_o = \rho$ 이므로 식(2)는 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} Q_i - Q_o &= \frac{1}{\rho} \frac{d}{dt}(\rho V) \\ &= \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)을 식 (3)에 대입하면

$$Q_i - Q_o = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta_e} \frac{dP}{dt} \quad (4)$$

가 된다. 여기서, $\frac{dV}{dt}$ 는 경계의 변형이고 $\frac{V}{\beta_e}$ 는 유체 압축성에 의한 성분이다.

Fig. 2에 다공식 유압완충기를 개략적으로 도시하였다. 이때 오리피스에 의한 체적은 챔버의 체적에 비해 무시할 정도로 작으며, x_1, x_2 는 절대좌표계에서의 고정피스톤과 이동피스톤의 이동 거리이다. A_p, A_c 는 각각 압력을 받는 피스톤의 면적과 이동피스톤의 면적을 의미한다.

$$A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2, \quad A_t = \frac{\pi}{4} d_t^2, \quad A_c = \frac{\pi}{4} d_c^2 \quad (5)$$

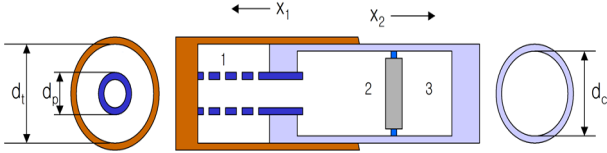


Fig. 2. Configuration of hydraulic buffer.

각 챔버에 대해 식 (4)를 적용하면 다음과 같은 두 식을 얻을 수 있다.

$$Q = (A_t - A_p) \frac{dx_1}{dt} - \frac{V_{10} - (A_t - A_p)x_1}{\beta_c} \frac{dP_1}{dt} \quad (6)$$

$$Q = (A_c - A_p) \frac{dx_1}{dt} + A_c \frac{dx_2}{dt} + \frac{V_{20} + (A_c - A_p)x_1 + A_c x_2}{\beta_c} \frac{dP_2}{dt} \quad (7)$$

여기서 β 와 V_{i0} 은 유체의 체적 탄성계수(1.38×10^9 [N/m²])와 챔버 i 의 초기 체적을 나타낸다.

2.3 가스 상태식

한편, 이동피스톤의 뒤쪽에는 질소가스가 밀봉되어 있으며, 초기 조건은 이상기체식으로부터 얻을 수 있고, 이동피스톤의 관성 효과를 무시할 경우 $P_2 = P_3$ 가 성립한다.

$$P_{10} = P_{20} = P_{30} = P_0 = \frac{mRT_0}{V_{30}} \quad (8)$$

가스의 압축과정은 단열과정을 가정하여 모델링하였다.

$$P_0 V_{30}^n = P_2 V_3^n \quad (\text{질소의 경우 } n=1.4) \quad (9)$$

단열과정식을 미분하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dV_3}{dt} = -\frac{1}{n} V_{30} P_0^{1/n} P_2^{-[(1/n)+1]} \frac{dP_2}{dt} \quad (10)$$

여기서 $\frac{dV_3}{dt}$ 는 $\frac{dP_2}{dt}$ 에 의해 정의됨을 알 수 있다.

한편, $V_3 = V_{30} - A_c(x_1 + x_2)$ 이므로,

$$A_c x_2 = V_{30} - V_3 - A_c x_1 = V_{30} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_2} \right)^{1/n} \right] - A_c x_1 \quad (11)$$

식 (11)를 미분하면 다음 식이 성립한다.

$$A_c \frac{dx_2}{dt} = -A_c \frac{dx_1}{dt} + \frac{1}{n} V_{30} P_0^{1/n} P_2^{-[(1/n)+1]} \frac{dP_2}{dt} \quad (12)$$

그러므로 식 (11), (12)을 식 (7)에 대입하여 정리하면

$$Q = -A_p \frac{dx_1}{dt} + \frac{1}{n} V_{30} P_0^{1/n} P_2^{-[(1/n)+1]} \frac{dP_2}{dt} + \frac{V_{20} - A_p x_1 + V_{30} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P_2} \right)^{1/n} \right]}{\beta_c} \frac{dP_2}{dt} \quad (13)$$

식 (6)과 (13)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{\beta_c}{V_{10} - (A_t - A_p)x_1} \left[(A_t - A_p) \frac{dx_1}{dt} - Q \right]$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{Q + A_p \frac{dx_1}{dt}}{\frac{1}{n} V_{30} P_0^{1/n} P_2^{-[(1/n)+1]} + \frac{1}{\beta_c} \left[V_{20} - A_p x_1 + V_{30} \left\{ 1 - \left(\frac{P_0}{P_2} \right)^{1/n} \right\} \right]} \quad (14)$$

2.4 오리피스 방정식

오리피스를 통하여 나가는 유체의 유량 Q 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Q = C_d a(x) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (15)$$

여기서 $a(x)$ 는 유출되는데 사용된 전체 오리피스의 면적이다.

각 오리피스의 유량계수 C_d 값은 레이놀즈 수 Re 의 함수로서 오리피스의 형상, 동점도, 유출되는 유체의 속도에 따라 변한다. 본 논문에서 사용된 유압완충기의 유량계수는 동점도 및 오리피스 형상이 설계에 의해 결정되어지므로 피스톤의 위치에 따라 유체의 속도의 함수로 통계적인 값으로 얻어질 수 있다. 그러나 본 논문에서는 레이놀즈 수가 매우 크고, 나이프 엣지 형상의 오리피스로 제작하였으므로 대략 0.611의 값을 사용하였다.

2.5 충돌해석 운동방정식

질량 M 인 물체가 유압완충기에 속도 v_0 로 충돌할 때 운동방정식은 다음과 같다.

$$M\ddot{x} + F_d(x, \dot{x}) = 0, \quad x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = v_0 \quad (16)$$

유압 완충기의 완충력 $F_d(x, \dot{x})$ 은 다음과 같다.

$$F_d = (A_t - A_p)P_1 + A_p P_2 \quad (17)$$

상태방정식으로 바꾸면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v & x(0) &= 0 \\ \ddot{x} &= \dot{v} = -\frac{F_d(x, v)}{m} & \dot{x}(0) &= v_0 \end{aligned} \quad (18)$$

식 (14), (18)을 Runge-Kutta 알고리즘을 사용하여 적분하면 시간 t에 대해 유압완충기의 완충력을 구한다.

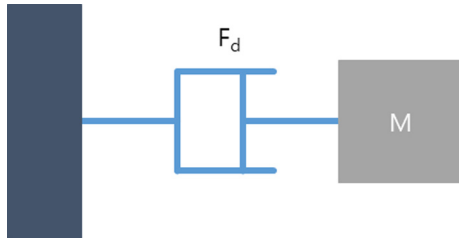


Fig. 3. Collision simulation model.

2.6 시뮬레이션 기반의 특성 맵

앞서 소개된 충돌 모델에서 압축 속도를 0.1[m/s] 부터 2.6[m/s]까지 0.1[m/s]씩 증가 시키면서 등속으로 압축되도록 총 26번의 시뮬레이션을 수행하였다.

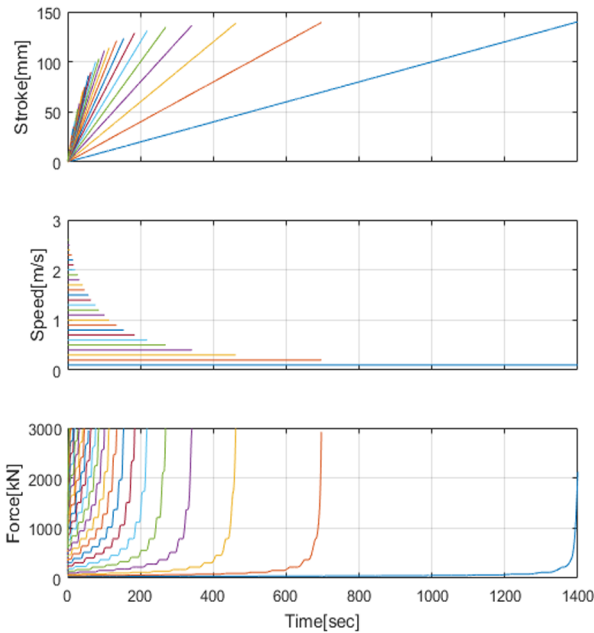


Fig. 4. Simulation results.

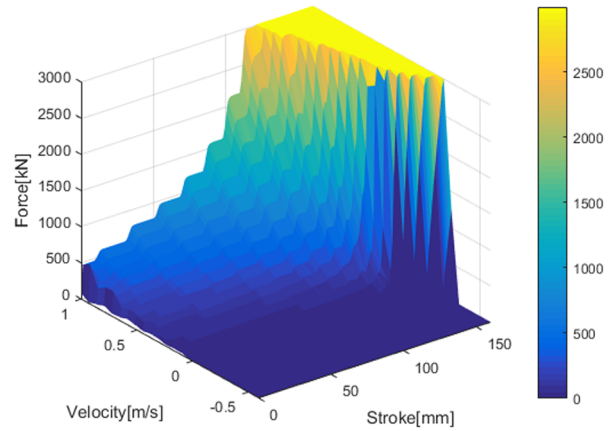


Fig. 5. Theoretical characteristic map of hydraulic buffer.

Fig. 4는 시간에 대한 변위, 속도, 힘을 나타내는 시뮬레이션 결과이다. 여기서 완충기는 일반적으로 3000 [kN] 이내에서만 작동하므로 3000[kN] 이상의 값들은 모두 제거하였고, Fig. 5와 같이 3차원 특성 맵을 생성하였다. 차량을 포함하여 주변 질량에 의한 관성 효과를 없애고 유압 완충기만의 특성을 나타내기 위하여 등속 조건에서의 유압 완충기 특성을 이용하여 이론 기반의 특성 맵을 추출하였다.

3. 동적 충돌시험

3.1 시험 방법

완충기의 동적 충돌시험은 독일 Görlitz에 있는 Brunel GmbH Railmotive의 시험 설비를 이용하여 진행하였다. 충돌시험을 위해 고정된 벽면에는 고무 완충기와 유압 완충기를 포함한 커플링 시스템이 80톤 또는 160톤의 객차 전두부에는 고무 완충기만을 포함하여 Fig. 6과 같은 커플링 시스템이 장착하였다.

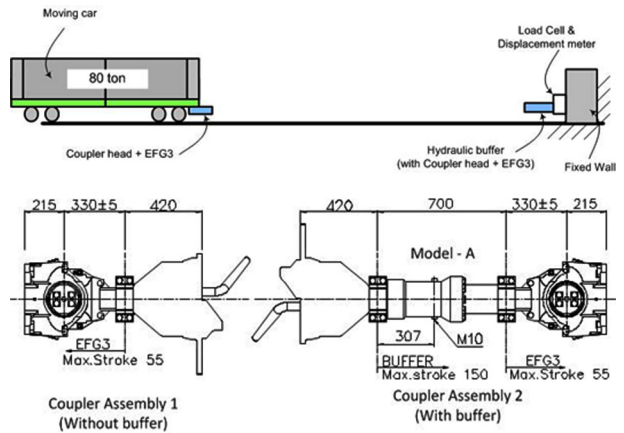


Fig. 6. Setup for collision test of coupler system.

Table 1. Collision test conditions

| Test no. | Wagon[tons] | Speed[km/h] |
|----------|-------------|-------------|
| 1 | 80 | 1.9 |
| 2 | 80 | 2.9 |
| 3 | 80 | 4.1 |
| 5 | 80 | 6.1 |
| 6 | 160 | 4.3 |
| 7 | 160 | 2.9 |

충돌시험은 Table 1과 같은 순서로 진행되었으며 완충기의 재현성을 확보하기 위해 각 충돌 실험 후에 일정한 휴식을 통해 완충기의 초기 온도를 일치시켰다.

3.2 동적 시험 기반의 특성 맵

Fig. 7, Fig. 8은 동적 실험에 의한 시간에 대한 변위, 힘 결과이다. 계측된 압축 변위의 노이즈를 제거하기

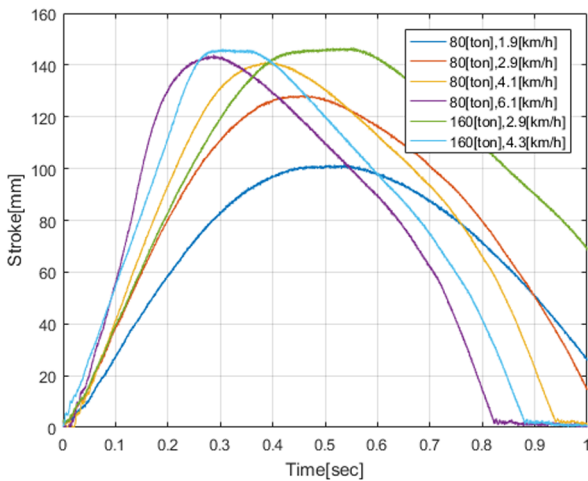


Fig. 7. Results of dynamic test for stroke.

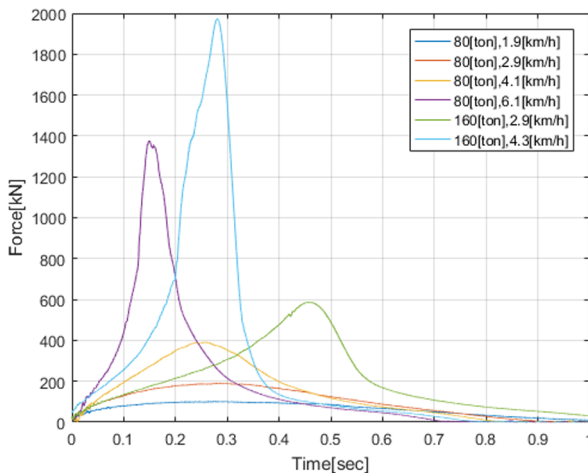


Fig. 8. Results of dynamic test for force.

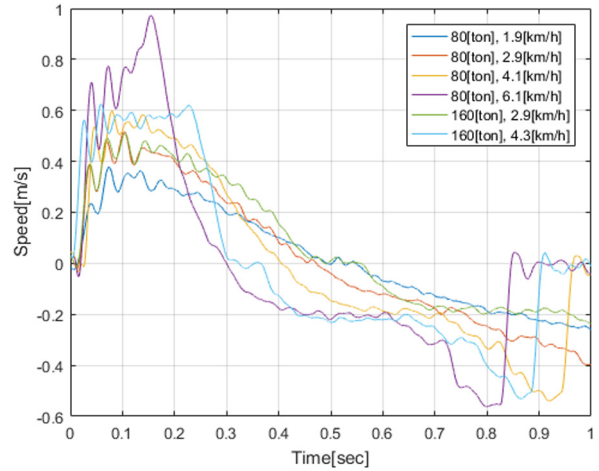


Fig. 9. Results of dynamic test for velocity.

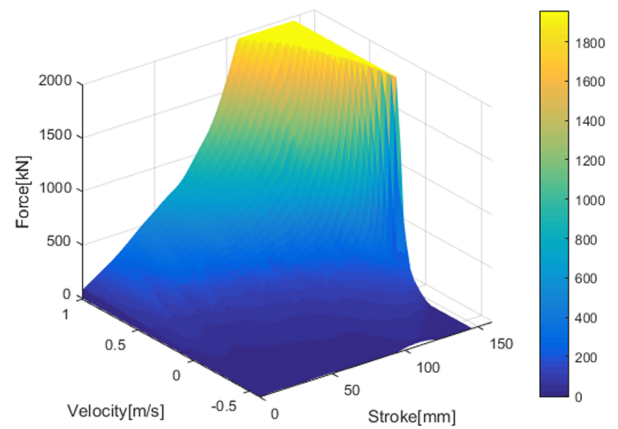


Fig. 10. Experimental characteristic map of hydraulic buffer.

위하여 저역통과 필터를 통해 힘과 변위의 노이즈 성분을 제거하고 수치 미분을 통해 Fig. 9와 같은 속도 데이터를 얻을 수 있었다.

Fig. 7~Fig. 9의 데이터를 이용하여 Fig. 10과 같이 압축 속도와 압축 변위에 대해 작용하는 힘 특성을 나타내는 유압완충기의 특성 맵을 추출하였다.

4. 이론 기반 해석과 시험 기반 해석의 비교

4.1 차량 충돌 모델

MATLAB /Simulink를 이용하여 충돌 시뮬레이션을 수행하였으며 이를 위하여 구성된 충돌 모델은 Fig. 11과 같다. 모델은 식 (16)과 같은 형태로 이루어져 있으며 1량 편성의 철도 차량이 벽에 충돌하는 시나리오를 기반으로 한다.

유압 완충기의 완충력 $F_d(x, \dot{x})$ 는 식 (17)이며, 시뮬레이션에 사용된 유압완충기의 특성 맵은 이론 기반의 경

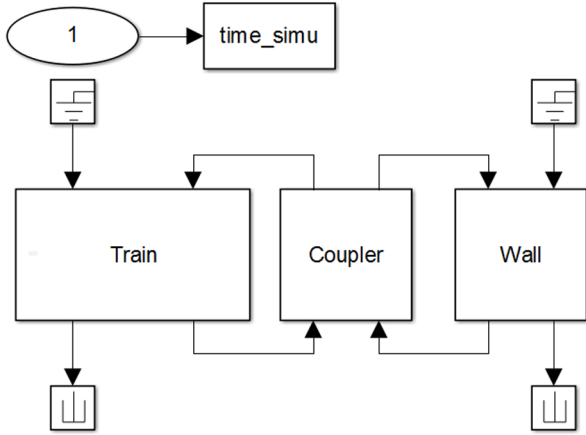


Fig. 11. Collision model for rolling stock.

우 Fig. 5와 같고 시험기반의 경우에는 Fig. 10과 같다.

4.2 이론 기반 특성 맵의 타당성 검증

이론 기반 특성 맵과 시험 기반 특성 맵을 각각 유압 완충기 모델에 입력하여 충돌 차량은 80[Ton]의 중량을 가지며 초기 속도는 4.1[km/h]로 충돌 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 12~Fig. 13은 유압 완충기의 거동을 비교한 것이다.

초기 압축시에는 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있고 이완시에 저속으로 진입하다가 속도가 음수가 되었을 때 즉 초기위치 보다 반대방향으로 더 진행을 하고 있다. 이것은 이론 모델이 시험 결과와 달리 이완되는 중에는 아무런 힘이 작용하지 않는다고 가정하였기 때문이고 실제로 이완 중에는 시험에서도 작용력은 거의 0으로 측정되어 유압 완충기에서의 출력 에너지는 무시할 수 있는 작은 값을 가지게 된다.

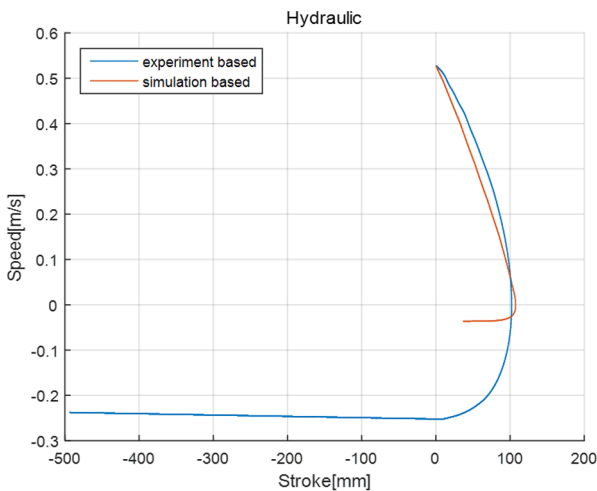


Fig. 12. Dynamic behavior of hydraulic buffer.

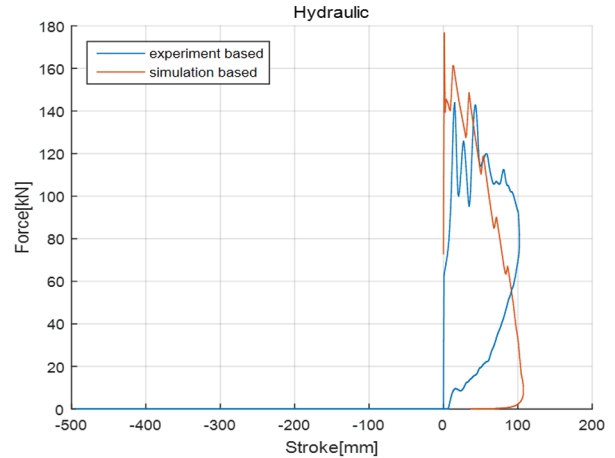


Fig. 13. Dynamic behavior of hydraulic buffer.

Table 2. Comparison of energy

| | Theoretical | Experimental | Error[%] |
|----------------------------|-------------|--------------|----------|
| Initial kinetic energy[kJ] | 51.88 | 51.88 | 0 |
| Absorbtion energy[kJ] | 51.72 | 47.67 | 8.5 |
| Max. stroke[mm] | 131.5 | 132.3 | 0.6 |
| Max. speed[m/s] | 1.139 | 1.139 | 0 |
| Max. force[kN] | 646.16 | 590.83 | 9.36 |

완충기 설계에서 중요한 완충 에너지와 기본 거동에 대한 충돌 시뮬레이션 결과는 Table 2와 같다. 초기 충돌 조건이 같으며 충돌이 진행되는 동안 유압 완충기로부터 흡수된 에너지는 서로 약 8.5[%]의 차이를 보이고 있고 유압 완충기의 최대 변위와 최대 속도는 거의 같으며 완충기에 가해지는 최대 하중도 9.36[%]의 오차를 보이고 있어 일반적으로 철도 완충기 설계에서 허용 오차의 범위인 10[%] 이내이므로 이론 기반의 특성 맵을 사용하는 것은 타당하다고 판단된다.

5. 결론

편성 철도차량의 충돌 시뮬레이션을 위해서는 충돌시험을 통해 유압완충기의 특성 맵을 추출하여 시뮬레이션에 적용하지만 충돌시험은 많은 시간과 비용이 소요되는 작업으로 모든 대상에 적용하기에는 무리가 있다.

본 논문에서는 유압 완충기의 이론적 해석 과정을 통해 추출된 유압 완충기의 이론 기반 특성 맵이 기존의 실험 기반 특성 맵을 대체할 수 있는 지에 대한 가능성을 판단하였다.

1. 유압완충기의 상세한 단품 모델링을 통해 유압 완충기의 특성 시뮬레이션을 수행하였고 특히 차량을

포함하여 주변 질량에 의한 관성 효과를 없애고 유압 완충기만의 특성을 나타내기 위하여 등속 조건에서의 유압 완충기 특성을 이용하여 이론 기반의 특성 맵을 추출하였다.

2. 기존의 방법에서 활용되는 동적 충돌시험 결과를 통해서 철도 차량 충돌시 유압 완충기 특성을 나타내는 시험 기반의 유압 완충기 특성 맵을 도출하였다.

3. 유압 완충기의 모델링을 통한 이론적 해석으로부터 추출된 이론 기반 특성 맵과 동적 충돌시험에서 추출한 시험기반 특성 맵은 변위 특성을 가지는 다른 완충기 요소와는 다르게 변위와 함께 속도에 따라 변화하는 특성을 보이며 변위-속도-힘 특성이 비교적 잘 일치하고 있다.

4. 유압 완충기의 이론 기반 특성 맵과 시험기반 특성 맵을 사용하여 동일한 조건에서 수행한 충돌 시뮬레이션 결과를 보면, 충돌이 진행되는 동안 유압 완충기로부터 흡수된 에너지, 최대 변위, 최대 속도 및 완충기에 가해지는 최대 하중 모두 일반적으로 철도 완충기 설계에서 허용 오차의 범위인 10[%] 이내이므로 이론 기반의 특성 맵을 사용하여도 타당할 것으로 판단된다.

감사의 글 : 본 연구는 국토교통부 철도기술연구개발사업으로 지원된 “대용량 에너지 흡수장치가 적용된 TSI 표준형 연결기 시스템 개발” 과제(15RTRP-B084184-02)의 연구결과 중 일부입니다.

References

- 1) H. S. Jung and T. S. Kwon, “Development of Pre/Post Processor for Rolling Stock Shunting Impact Analysis”, Spring Conference Proceedings of KSAE, pp.1791-1976, 2007.
- 2) N. W. Kim, H. M. Jang, K. N. Kim and Y. I. Park, “Equivalent Model of Coupling System Based on Experimental Results”, KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1061-1065, 2008.
- 3) H. M. Jang, N. W. Kim and Y. I. Park, “Comparison of Simulation Models for Train Buffer Couplings”, Transactions of KSAE, Vol. 18, No. 4, pp.107-114, 2010.
- 4) H. M. Jang, “Analysis on the Cushion Characteristics of a Rolling Stock Coupler adapted the Hydrostatic Buffer”, Seoul National University of Science and Technology, 2012.