

## 실리콘 검을 이용한 고용량 충격완충기의 성능해석

## Performance Simulation of High Capacity Hydrostatic Buffer with Silicone Gum

최정흠\*

Jeong Heum Choi \*

**Abstract** For reversible railway buffers, gas-hydraulic buffers are mostly used. However, due to increasing demand in energy absorption capacity and in order to satisfy requirements of EN 15551 in static performances, development of hydrostatic buffers using silicone gum is gaining in important.

Silicone gum offers compressible characteristics which can be used as spring, whereas it can also provide a damping ability due to its high viscosity laminar flow characteristics. Therefore, silicone gum buffers have high advantage such as simple design and easy maintenance.

In order to analyze the dynamic characteristics of silicone gum buffers, this paper suggests a mathematical model applying a continuity equation, dynamic equation and the relation of pressure and flow rate of the non-Newtonian fluid which has shear-thinning characteristics of the gap between the piston and the cylinder body. Also We simulate the dynamic buffer force of hydrostatic gum buffer.

**Keywords :** Hydrostatic Buffer, Non-Newtonian Fluid, Silicone Gum shear-thinning

**초 록** 재사용이 가능한 철도차량용 충격완충기는 가스-유압식 완충기가 널리 사용되어져 왔으나, 요구되는 에너지 흡수용량이 증가하고 EN15551에서 요구하는 정적 성능사양을 만족시키기 위해 실리콘 검을 이용한 충격완충기 개발이 요구되고 있다. 실리콘 검 (silicone gum) 충격완충기는 압축성(compressibility) 특성에 의한 스프링 기능과 고점도 층유 유동에 의한 댐핑 기능을 동시에 제공하므로 구조가 단순하고 유지보수가 용이한 장점이 있다. 충돌특성을 해석하기 위해 피스톤 양단 사이의 연속방정식과 충돌에 의한 운동방정식, 피스톤과 실린더 사이의 환형 틈새에 대한 shear-thinning 특성을 갖는 비뉴턴 유체의 압력-유량 층류 관계식을 적용한 수학적 모델과 수치해석적 방법을 제시한다.

**주요어 :** 충격완충기, 비뉴턴 유체, 실리콘 검, shear-thinning

## 1. 서 론

고용량의 에너지 흡수 능력과 EN15551에서 요구하는 정적 성능사양을 동시에 만족시키기 위해 스프링 특성과 댐핑 특성을 동시에 제공할 수 있는 실리콘 검을 이용한 충격완충기 개발이 요구되고 있다.

본 연구에서는 실리콘 검을 이용한 충격완충기의 동적 성능을 해석하기 위해 피스톤 양단 사이의 연속방정식과 충돌시의 운동방정식, shear-thinning 특성을 갖는 비뉴턴 유체의 피스톤과 실린더 사이의 환형 틈새에서의 압력-유량 층류 관계식을 적용하여 수학적 모델을 제시하고, 철도차량에서 요구하는 충돌조건에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

\* (주)케이오비에이 기술연구소

## 2. 이론 해석

### 2.1 실리콘 검을 이용한 충격완충기의 구조

#### 2.1.1 충격완충기의 구조 및 작동원리

실리콘 검 충격완충기의 구조는 Fig. 1과 같이 간단한 구조로 이루어져 있다. 실리콘 검이 챔버 1, 2에 가압된 상태로 충전이 되어 있어 초기 상태에서는 예하중을 줄 수 있도록 되어 있다. 피스톤 로드와 철도차량이 충돌하면 피스톤과 피스톤 로드는 챔버 1을 압축하게 되며, 피스톤과 실린더 바디 사이의 환형 틈새로 유동이 발생하게 된다.

실리콘 검 충격완충기의 경우 피스톤 로드의 삽입에 따른 체적 보상을 위한 장치가 없으므로, 피스톤 로드의 삽입으로 인한 체적 감소만큼 내부의 압력이 증가하는 스프링 기능과 환형 틈새의 유동 저항에 따른 챔버 1과 챔버 2 사이의 압력차가 증가하는 댐핑 기능을 동시에 제공한다.

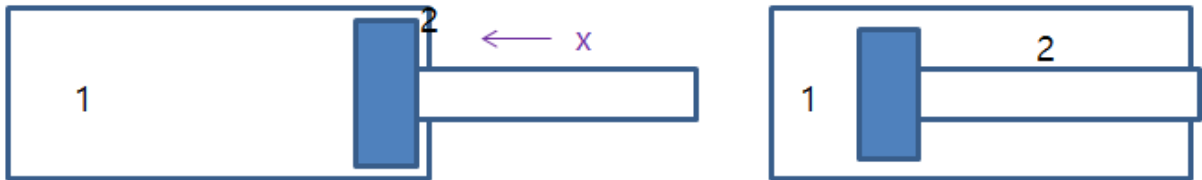


Fig. 1 Structure of Hydrostatic Buffer with Silicone Gum

#### 2.1.2 실리콘 검의 물성치

실리콘 검은 비뉴턴 유체중에서 대표적인 shear-thinning 특성을 가지고 있는 유체이다. 스프링 정적 특성을 해석하기 위해서는 실리콘 검의 bulk modulus가 요구되며, 이는 압축시의 체적비와 압력의 관계로부터 얻어진다.

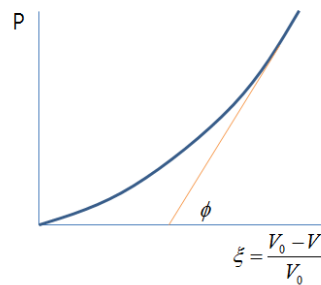


Fig. 2 Volume rate versus Pressure of Silicone Gum

$$\beta = \frac{V}{V_0} \tan \phi = -V \frac{dP}{dV} \quad (1)$$

실리콘 검은 shear-thinning 특성을 갖는 대표적인 비뉴턴 유체이며, Fig. 3과 같이 전단율일 증가함에 따라 점도가 감소하는 특성이 있다.

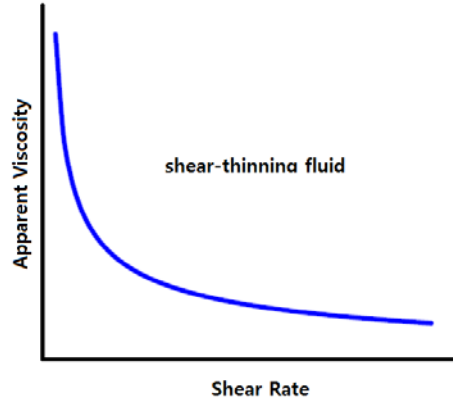


Fig. 3 Characteristics of Shear-thinning Silicone Gum

## 2.2 수학 모델

### 2.2.1 연속 방정식

위 식 (1)을 이용하여 챔버 1과 챔버 2 사이의 연속방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{dP_1}{dt} = \frac{a_p \frac{dx}{dt} - Q}{\frac{1}{\beta_1} (V_{10} - a_p x)}, \quad P_1(0) = P_0 \quad (2)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{Q - (a_p - a_r) \frac{dx}{dt}}{\frac{1}{\beta_2} [V_{20} + (a_p - a_r)x]}, \quad P_2(0) = P_0 \quad (3)$$

### 2.2.2 운동방정식

Fig. 4에 보여지는 바와 같이 질량 M인 열차가 강체벽에 설치된 충격완충기에 속도  $v_0$ 로 충돌하는 때의 운동방정식은 다음과 같다,

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

위식을 수치해석을 위해 다음과 같이 다시 정리하였다.

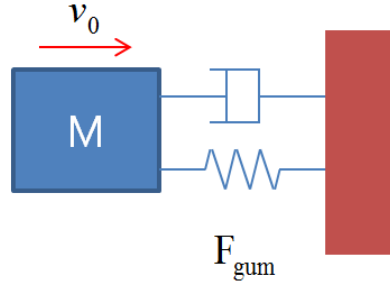


Fig. 4 Characteristics of Shear-thinning Silicone Gum

$$\dot{x} = v, \quad x(0) = 0 \quad (2)$$

$$\ddot{x} = \dot{v} = -\frac{F_d(x, \dot{x})}{m}, \quad \dot{x}(0) = v_0 \quad (3)$$

변수는  $x, \frac{dx}{dt}, P_1, P_2$  이며, Runge-Kutta 수치적분법을 사용하여 구해진다.

### 2.2.3 Power-Law 모델

비뉴턴 유체인 실리콘 검의 shear-thinning 특성을 해석하기 위해 power-law 모델을 이용하였다.

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1}, \quad \tau = K\dot{\gamma}^n \quad (4)$$

여기서 K는 fluid consistency coefficient이고, n은 flow behaviour index라고 부르며 각각 전단율이 1일 때의 점도를 의미하고, n은 점도 변화율을 나타내며 1/3과 1/2 사이의 값을 갖는다.

본 연구에서는 틈새가 작은 경우에는 오차를 무시할 수 있으므로, 평행판 사이의 비뉴턴 유체의 층류 유동식을 근사적으로 환형 틈새에 적용하였다.

$$Q = \frac{\pi DC}{2} \left( \frac{n}{2n+1} \right) \left[ \frac{1}{2K} \left( -\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}} C^{1+\frac{1}{n}} \quad (5)$$

여기서 D는 실린더 내부 직경, C는 틈새 높이, L은 피스톤의 폭을 나타낸다.

### 2.2.4 해석 결과

해석에 적용된 모델의 대표적인 입력값은 다음과 같다.

열차 질량 30ton, 실린더 직경 105mm, 행정거리 150mm, K=9800, n=0.26

충돌 속도 5km/h, 8km/h, 10km/h

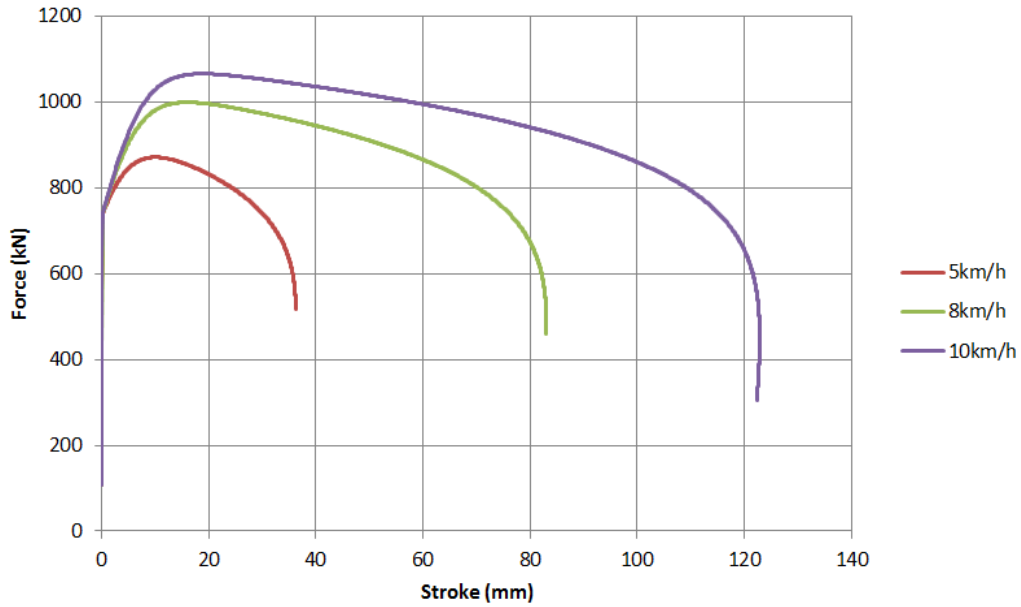


Fig. 5 Damage diagnosis results: o = PZT locations; × = true damage locations; red spots = estimated damage locations

Fig. 5는 충돌속도에 따른 행정거리 대 완충력의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

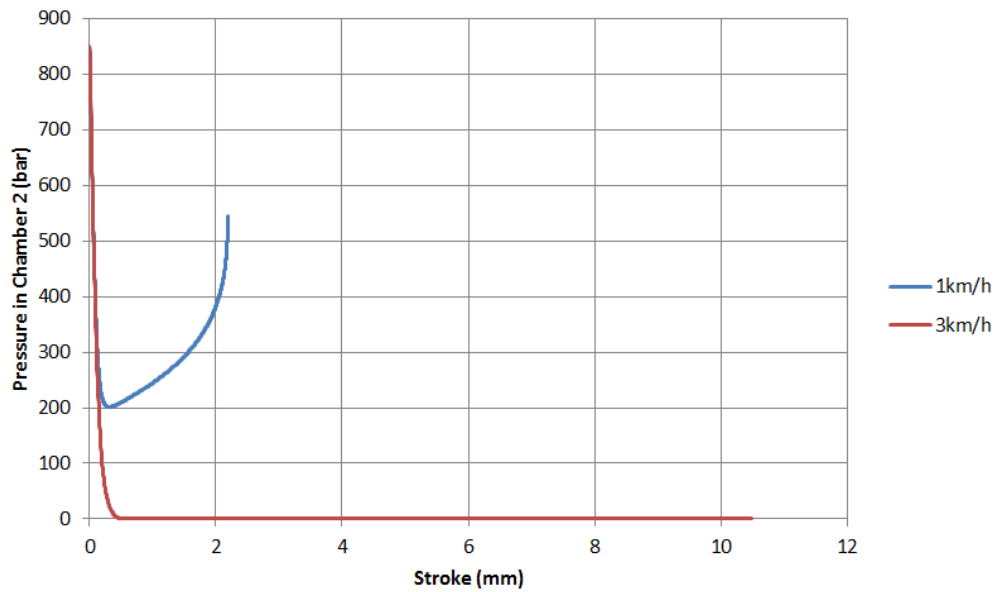


Fig. 6 Stroke Versus Pressure in Chamber 2

Fig. 6은 충돌속도 1km/h, 3km/h 일 때 챔버 2의 압력의 변화를 나타낸 것으로 속도가 높아지면 초기 예압보다 챔버 2로의 유량이 적어 챔버 2의 실리콘 검은 압축되지 않은 대기압 상태가 됨을 알 수 있다.

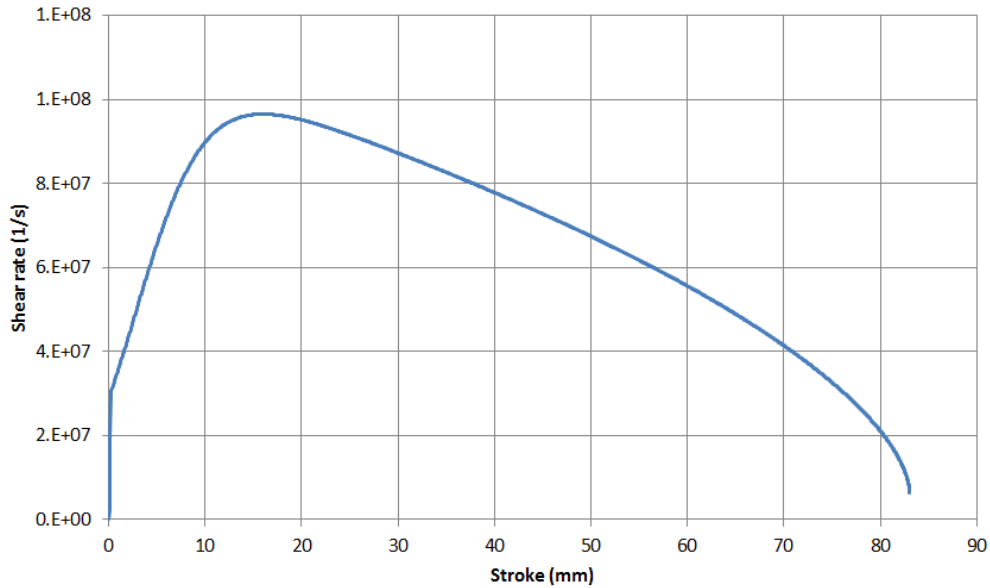


Fig. 7 Stroke Versus shear rate Pressure at impact velocity 8 km/h

Fig. 7은 충돌속도 8km/h일 때의 행정거리에 따른 전단율의 변화를 나타낸 것으로  $10^8$  까지 올라가는 것을 알 수 있다.

### 3. 결론

연속방정식, 운동방정식, shear-thinning 특성을 고려한 power-law 모델을 이용한 층류 압력-유량 관계식을 적용하여 실리콘 검을 이용한 충격완충기의 수학 모델을 세웠으며, 철도차량의 대표적인 충돌 조건에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

### 후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구개발사업으로 지원된 “대용량 에너지 흡수장치가 적용된 TSI 표준형 연결기 시스템 개발” 과제의 연구결과 중 일부입니다.

### 참고문헌

- (1) 최정흠 (2002) 직렬 연결된 유압 완충기와 사각 튜브의 충돌 특성에 관한 연구, 박사학위, 서울대학교
- (2) Chhabra, R. P. (2008) Non-Newtonian flow and applied rheology : engineering applications, Elsevier,UK