

하드 패킹의 마찰력을 고려한 실리콘 검을 이용한 고용량 충격완충기의 성능해석

Performance Simulation of High Capacity Hydrostatic Buffer with Silicone Gum Considering the Friction of Hard Packing

최정흠*, 길형균*[†]

Jeong Heum Choi ^{*†}, Hyung Gyeun Gil ^{*}

Abstract Hydrostatic buffer for railway should absorb higher capacity crash energy than that of general industrial buffer. And maximum buffer force on crash is less and initial preload is higher. So we need more accurate estimate the performance before we develop the buffer. , this paper suggests a mathematical model and compare analysis results and test results. Like previous study, we apply a continuity equation, dynamic equation and the relation of pressure and flow rate of the non-Newtonian fluid which has shear-thinning characteristics in the gap between the piston and the cylinder body. Also We add the friction of the hard packing to simulate the dynamic buffer force of hydrostatic gum buffer.

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

초 록 철도 차량용 충격완충기는 산업용 충격완충기보다 고용량의 에너지를 흡수해야 할 뿐만 아니라, 충돌시 발생하는 최대 완충력에 대한 제한 조건이 까다롭고, 요구되는 초기 예하중이 크다는 특징을 가지고 있다. 그러므로 철도 차량용 충격완충기의 개발시 좀더 정확한 성능 예측이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 실리콘 검 충격완충기의 충돌시의 거동을 해석하기 위한 수학적 모델을 제시하고, 시험 결과와 비교하였다. 기존의 선행 연구에서와 마찬가지로 피스톤 양단 사이의 연속방정식과 충돌에 의한 운동방정식, 피스톤과 실린더 사이의 환형 틈새에 대한 shear-thinning 특성을 갖는 비뉴턴유체의 압력-유량 층류 관계식을 적용하였으며, 해석의 정확도 향상을 위해 hard packing에 작용하는 고압으로 인해 발생하는 마찰력을 고려하였다.

주요어 : 충격완충기, 비뉴턴 유체, 실리콘 검, 전단 감소 유체

1. 서 론

연결기용으로 사용되고 있는 철도 차량용 충격완충기는 산업용 충격완충기보다 고용량의 에너지를 흡수해야 할 뿐만 아니라, 충돌시 발생하는 최대 완충력에 대한 제한 조건이 까다롭고, 요구되는 초기 예하중이 크다는 특징을 가지고 있다. 또한 충격 완충기의 인증시 해석결과와 실험결과가 최대 10% 이내의 오차가 요구되고 있다. 그러므로 철도 차량용 충격완충기의 개발시 좀더 정확한 성능 예측이 요구되고 있다.

[†] 교신저자: (주)케이오비에이 기술연구소, (develop5@koba.co.kr)

* (주)케이오비에이 기술연구소, (develop1@koba.co.kr)

기존 연구에서는 해석결과와 실험결과가 최대 20% 오차가 발생하였는데, 최대 오차를 10% 이내로 줄이기 위해 본 연구에서는 밀봉을 위한 하드 패킹에서의 마찰력을 추가로 고려하였다.

2. 이론 해석

2.1 실리콘 겔을 이용한 충격완충기의 구조

2.1.1 충격완충기의 구조 및 작동원리

실리콘 겔 충격완충기의 구조는 Fig. 1과 같이 간단한 구조로 되어 있으며, 피스톤 로드 에 작용하는 힘을 감소시키기 위해 가이드 원통이 실린더 바디에 대해 슬라이딩이 될 수 있도록 구성되어 있다. 실리콘 겔은 바디와 피스톤 헤드 사이에 채워지며, 가압된 상태로 충전되므로 초기 상태에서는 면적차에 의해 신장되는 방향으로 예하중이 작용한다.

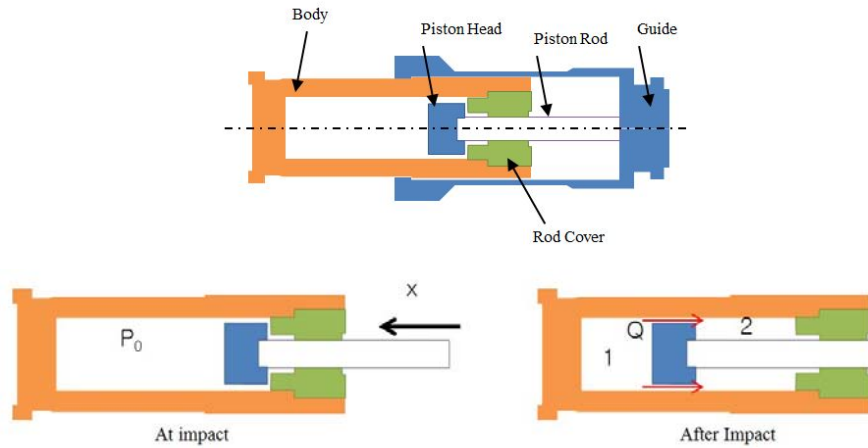


Fig. 1. Structure of Hydrostatic Buffer with Silicone Gum

2.1.2 실리콘 겔의 물성치

실리콘 겔은 shear-thinning 특성을 갖는 대표적인 비뉴턴 유체로 Fig. 2와 같이 전단율이 증가함에 따라 점도가 감소하는 특성이 있다. 본 연구에 사용된 실리콘 겔은 전문업체와 공동으로 개발하였으며, rheometer를 이용하여 전단율과 점도의 관계를 측정하였으며, 근사적으로 $\mu = 51174\dot{\gamma}^{-0.912} [Pa \cdot s]$ 를 사용하였다.

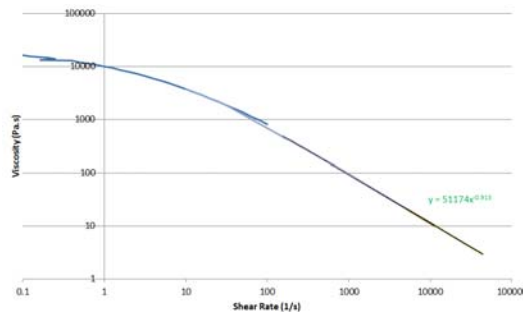


Fig. 2. Characteristics of Shear-thinning Silicone Gum

2.2 수학 모델

2.2.1 연속 방정식

Fig. 1과 같은 충격완충기의 챔버 1과 챔버 2 사이의 연속방정식을 구하면 다음과 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

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

$$\frac{dP_2}{dt} = \frac{Q - (a_p - a_r) \frac{dx}{dt}}{\frac{1}{\beta_2}[V_{20} + (a_p - a_r)x]}, \quad P_2(0) = P_0 \quad (2)$$

여기서 a_p 는 피스톤 헤드의 단면적, a_r 은 피스톤 로드의 단면적, V_{10} 은 챔버 1의 초기 체적, V_{20} 은 챔버 2의 초기 체적, x 는 행정거리, dx/dt 는 피스톤의 속도, P_0 는 초기 압력, P_1 은 챔버 1의 압력, P_2 는 챔버 2의 압력을 나타낸다.

2.2.2 운동방정식

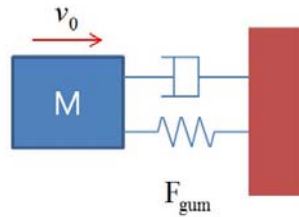


Fig. 3. Structure of Hydrostatic Buffer with Silicone Gum

Fig. 4에 보여지는 바와 같이 질량 M 인 열차가 강체벽에 설치된 충격완충기에 속도 v_0 로 충돌할 때의 운동방정식은 다음과 같다. 여기서 F_{gum} 은 식 (8)에 의해 얻어진다.

$$m\ddot{x} + F_{gum}(x, \dot{x}) = 0, \quad x(0) = 0, \dot{x}(0) = v_0 \quad (3)$$

$$F_{gum}(x, \dot{x}) = a_p P_1(x, \dot{x}) - (a_p - a_r) P_2(x, \dot{x}) + F_{fric} \quad (4)$$

위 식을 수치해석을 위해 다음과 같이 다시 정리하였다[1].

$$\dot{x} = v, \quad x(0) = 0 \quad (5)$$

$$\ddot{x} = \dot{v} = -\frac{F_{gum}(x, \dot{x})}{m}, \quad \dot{x}(0) = v_0 \quad (6)$$

식 (1), (2), (5), (6)의 연립 미분방정식의 해는 Runge-Kutta 수치적분법을 사용하여 얻을 수 있다.

2.2.3 Power-Law 모델

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

$$\mu = K\dot{\gamma}^{n-1}, \quad \tau = K\dot{\gamma}^n \quad (7)$$

여기서 K는 fluid consistency coefficient이고, n은 flow behaviour index라고 부르며 K는 전단율이 1일 때의 점도를 의미하고, n은 점도 변화율을 나타내며 일반적으로 1/4과 1/2 사이의 값을 갖는다.

본 연구에서는 환형 틸새가 피스톤 직경에 비해 상대적으로 매우 작으므로, 평행판 사이의 비뉴턴 유체의 층류 유동식을 이용하였다[2].

$$Q = \frac{\pi DC}{2} \left(\frac{n}{2n+1} \right) \left[\frac{1}{2K} \left(-\frac{\Delta P}{L} \right) \right]^{\frac{1}{n}} C^{1+\frac{1}{n}} \quad (8)$$

2.2.4 실험 결과

해석에 적용된 모델의 대표적인 입력값은 다음과 같다.

2.2.5 해석 결과

해석에 적용된 모델의 대표적인 입력값은 다음과 같다.

열차 질량 80ton, 160ton, 실린더 직경 105mm, 행정거리 150mm, 피스톤 직경 104.1mm
피스톤 유효 환형틈새 길이 70mm, K=51174, n=0.087, 초기압력 1000

충돌 속도가 커짐에 따라 충돌 에너지의 증가와 함께 작동 스트로크가 커지는 것을 알 수 있으며, 또한 초기 완충력 값과 stoke-Force의 기울기도 커짐을 알 수 있다. 질량 160ton, 충돌속도 5.5km/h의 경우 충돌 에너지가 186.7 kJ로 충격 완충기의 용량 130kJ을 초과함에 따라 앞서의 특성 곡선과 조금 다른 양상을 보이고 있으며, 해석 결과 완충종료후에도 0.824 m/s(=2.97km/h)의 속도를 갖는 것으로 나타났다.

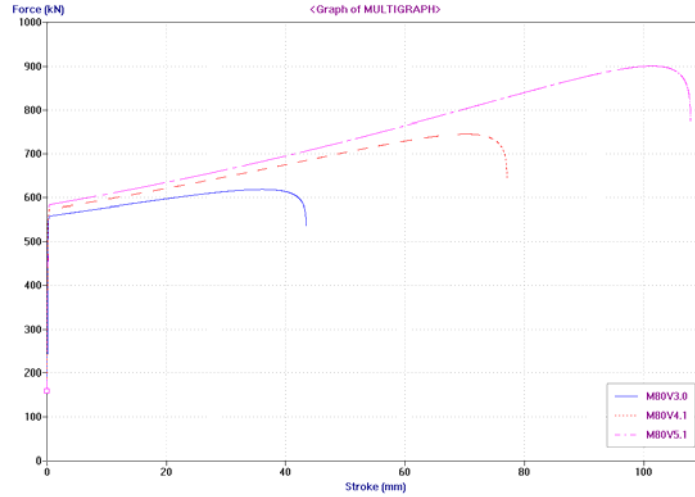


Fig. 4. Stroke Versus Buffer Force simulation at various impact velocities (80ton)

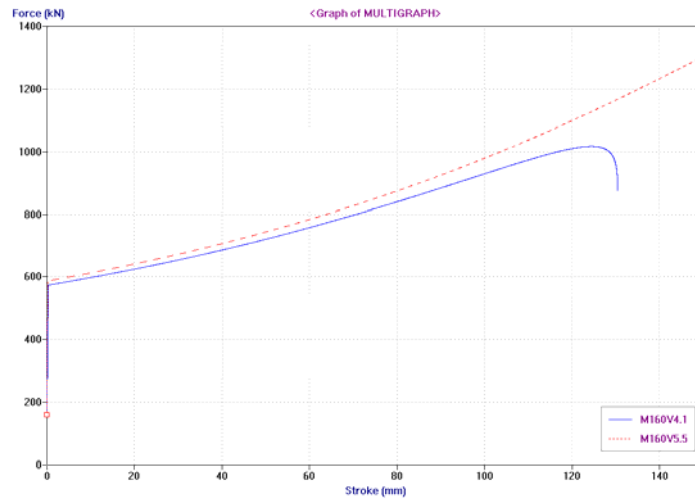


Fig. 5. Stroke Versus Buffer Force simulation at various impact velocities (160ton)

해석결과와 실험 결과를 비교한 결과, 최대 완충력은 7.0% 이내의 오차를 갖는 것으로 나타났으며, 최대 스트로크는 8.6% 이내의 오차를 갖는 것으로 나타났다.

Table. 1. Error of Max.Force & Max. Stroke Stroke at various impact velocity (80ton)

$$\text{Error (\%)} = (\text{Simulation}-\text{Experiment})/\text{Experiment} \times 100$$

		3.0 km/h	4.1 km/h	5.1 km/h
Max Force	Simulation	618.8	745.9	900.9
	Experiment	643	802	910
	Error (%)	-3.8	-7.0	-1.0
Max Stroke	Simulation	43.4	77.1	107.8
	Experiment	44	71	100
	Error (%)	-1.4	8.6	7.8

Table. 2. Error of Max.Force & Max. Stroke Stroke at various impact velocity (160ton)

$$\text{Error (\%)} = (\text{Simulation}-\text{Experiment})/\text{Experiment} \times 100$$

		4.1 km/h	5.5 km/h
Max Force	Simulation	1017.2	1305.2
	Experiment	978	1375
	Error (%)	4.0	-5.1
Max Stroke	Simulation	130.4	150.0
	Experiment	123	148
	Error (%)	6.0	1.4

3. 결 론

연속방정식, 운동방정식, shear-thinning 특성을 고려한 power-law 모델을 이용한 층류 압력-유량 관계식을 적용하여 실리콘 검을 이용한 충격완충기의 기존 수학 모델에 하드 패킹의 마찰력을 추가하여 해석을 수행하고 시험결과와 비교한 결과, 10% 이내의 오차 범위를 만족하는 것으로 나타났다.

후 기

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

참고문헌

- [1] JeongHeum Choi (2002) A Study on the crash characteristics of a hydraulic buffer and a square tube connected in series, PhD Thesis, Seoul National University. pp. 28~34
- [2] Chhabra, R. P. (2008) Non-Newtonian flow and applied rheology : engineering applications, Elsevier, UK, pp. 159~161
- [3] 최정흠 (2015) 실리콘 검을 이용한 고용량 충격완충기의 성능해석, 한국철도학회, 한국철도학회 학술발표대회논문집 , 2015.10, 1468-1473 (6 pages)