

단통형 댐퍼의 비선형 특성을 고려한 차량 동적 응답 분석

이수명 · 민승재

한양대학교 미래자동차공학과

Analysis of Dynamic Response in Vehicle considering Nonlinear Characteristics of Mono-tube Damper

Sumyeong Lee · Seungjae Min

Department of Future Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

Abstract : This paper presents a modeling of mono-type damper with considering its nonlinear characteristics. In the current paper the model parameters are extracted from experimental data for the “sport” setting of a prototype front shock absorber for a vehicle in the luxury class. We validate the model by comparing the data which is simulated with this model to conventional experimental data for sinusoidal excitation. Also quarter car models which are including non-linear damper or linear damper are validated with output characteristics while running the special terrain. Consequently, by changing the design parameter values, we confirm the degree of the maximum displacement and the influence of the design parameters.

Key words : Mono-type Damper(댐퍼), Hysteresis(이력현상), Non-linear Characteristics(비선형 특성), Design parameter(설계 인자), Dynamic Response(동적 응답)

1. 서론

단통형 댐퍼의 경우 복통형 댐퍼에 비해 가볍고, 유지 보수 및 가격 측면에 유리하기 때문에 저가형 차량에 주로 사용된다. 이러한 단통형 댐퍼의 특성은 이론적 분석이 어려워 현재까지는 주로 실험 결과를 기반으로 분석 되어 왔다. 그러나 실험을 기반으로 분석을 하면 개념 설계 단계에서 댐퍼 특성 반영이 어려우며, 시간과 비용이 많이 소요 된다는 단점이 있다. 또한 댐퍼의 경우 작은 특성 변화에도 높은 차량의 응답 변화를 불러 올 수 있기 때문에 보다 더 상세한 모델링이 요구된다¹⁾.

본 논문에서는 단통형 댐퍼의 이론적 특성을 바탕으로 상세 모델링을 수행한다. 피스톤 로드에서 변위 입력이 인가되었을 때 기존의 실험을 통한 데이터 값과 비교하여 댐퍼 모델의 타당성을 확인한다. 또한 비선형성을 고려하여 모델링한 댐퍼를 1/4 차량(Quarter Car)모델에 적용하여, 선형 댐퍼를 적용한 경우와 차량 동적 응답 특성 차이를 확인한다. 마지막으로 댐퍼를 구성하는 여러 설계

인자 중에서 댐퍼 특성에 영향도가 높은 인자를 선정하여, 설계인자 값의 변화에 따른 차량의 응답 특성을 통해 설계인자 영향도 분석을 수행한다.

2. 단통형 댐퍼 구성도

단통형 댐퍼는 리바운드 챔버(rebound chamber)와 압축 챔버(compression chamber)로 구성되어 있다. 또한 압력 튜브의 끝에는 20-30 Bar 의 높은 압력의 질소 가스로 이루어진 공간이 있다. 이 가스의 팽창과 압축으로 인해 리바운드 행정(rebound stroke)에서 발생하는 다양한 부피 변화를 보완한다. 피스톤에는 여러 개의 밸브가 존재하는데, 그 밸브 유로 구조는 Fig. 1과 같다. 댐퍼 내 로드가 느린 속도로 움직일 경우 blow-off 밸브는 초기에 있던 것과 같이 닫혀 있는 상태를 유지한다. 하지만 이처럼 blow-off 밸브가 닫힌 상태를 유지하면 속도변화에 따른 댐퍼 하중이 크게 변하게 된다. 따라서 로드의 속도가 빨라지게 될 때 blow-off 밸브가 점진적으로 열리게 되어 속도변

*초록색 글씨 부분은 그대로 두시면 됩니다.

화에 따른 댐퍼 하중의 변화폭을 감소 시켜주는 역할을 한다.

3. 단통형 댐퍼 모델링

3.1 밸브에서의 압력/흐름 특성

댐퍼 내에 존재하는 밸브에서의 port, leak 압력, 부피 변화율은 아래와 같이 간단한 지수함수로 표현할 수 있다. 이 공식은 Reybrouck에 의해 제안 되었으며²⁾, 다양한 종류의 댐퍼 밸브에 대해 실험과 유사한 결과를 보임을 확인하였다.

$$\Delta P_{port} = K_{port} \nu^{1/4} Q_{port}^{7/4} \quad (1)$$

$$\Delta P_{leak} = K_{leak} \nu^{1/4} Q_{leak}^{7/4} \quad (2)$$

Blow-off 밸브의 압력/유량 특성은 다음과 같이 ΔP_0 와 K_{spring} 2개의 독립적인 매개변수를 이용한 함수로 표현 할 수 있다³⁾.

$$K_{spring} Q_{blow-off} = (\Delta p_{blow-off} - \Delta p_0) \sqrt{\Delta p_{blow-off}} \quad (3)$$

여기서 ΔP_0 는 밸브의 초기 하중을 견딜 때 밸브의 압력이고, K_{spring} 는 밸브의 강성이다. 전체 밸브 압력 변화는 개별 밸브 압력 변화의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_{leak} + \Delta p_{port} \quad (4)$$

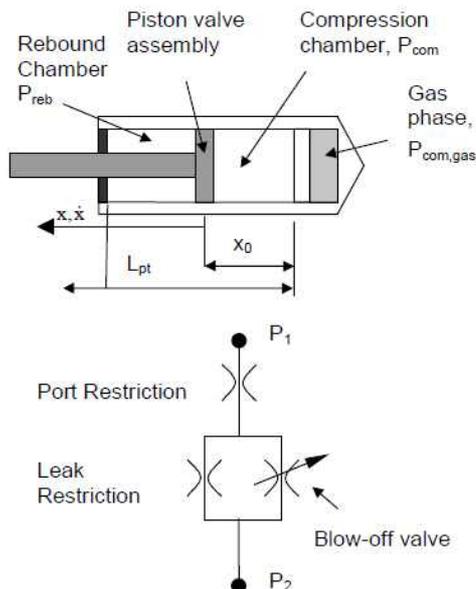


Fig. 1 Mono-tube layout and flow path architecture

3.1.1 blow-off 밸브가 닫혀 있을 때

식 (4)의 port의 압력 변화에 식 (1)을 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta P_{tot} = K_{port} \nu^{1/4} Q_{port}^{7/4} + \Delta P_{leak} \quad (5)$$

port에서의 유량은 leak와 blow-off에 의한 유량의 합으로 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_{tot} = K_{port} \nu^{1/4} (Q_{leak} + Q_{blow-off})^{7/4} + \Delta P_{leak} \quad (6)$$

Blow-off 밸브가 닫혀 있기 때문에 leak에 의한 유량은 전체 유량과 같게 된다. 따라서 식 (2)를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta P_{leak|closed} = K_{leak} \nu^{1/4} Q_{tot|closed}^{7/4} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 결과적으로 Blow-off 밸브가 닫혀 있을 때 전체 압력 변화는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_{tot|closed} = (K_{port} + K_{leak}) \nu^{1/4} Q_{tot|closed}^{7/4} \quad (8)$$

3.1.2 blow-off 밸브가 열려 있을 때

Blow-off 밸브가 열려 있기 때문에 전체 유량은 다음과 같이 표현된다.

$$Q_{tot} = Q_{leak} + Q_{blow-off} \quad (9)$$

식 (9)에서 계산된 $Q_{blow-off}$ 을 식 (3)에 대입하면 다음과 같이 표현된다.

$$K_{spring} (Q_{tot|open} - Q_{leak|open}) = (\Delta p_{blow-off} - \Delta p_0) \sqrt{\Delta p_{blow-off}} \quad (10)$$

식 (10)을 $Q_{tot|open}$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$Q_{tot|open} = Q_{leak|open} + \frac{(K_{leak} v^{1/4} Q_{leak|open}^{7/4} - \Delta p_0) \sqrt{K_{leak} v^{1/4} Q_{leak|open}^{7/4}}}{K_{spring}} \quad (11)$$

Port에서의 압력 변화는 (1) 식과 같지만 Port에서의 유량이 전체 유량과 같기 때문에 다음과 같이 식을 쓸 수 있다.

$$\Delta P_{port} = K_{port} v^{1/4} Q_{tot|open}^{7/4}$$

결과적으로 밸브가 열렸을 때의 전체 압력 감소 ($\Delta P_{tot|open}$)은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta P_{tot|open} = v^{1/4} (K_{leak} Q_{leak|open}^{7/4} + K_{port} Q_{tot|open}^{7/4}) \quad (12)$$

3.1.3 평활화 방법을 통한 Blow-off 특성

3.1.1, 3.1.2절을 통해 Blow-off 밸브가 개폐 되는 지점에서 댐퍼의 비선형성이 나타남을 확인하였다. 그러나 실제 현상에서는 Blow-off가 열리는 조건을 충족시키기 전부터 Blow-off가 점진적으로 열리기 때문에 비선형성이 나타나는 구간에서 급격한 변화가 아닌 부드럽게 변화가 일어나게 된다. 따라서 실제 현상과 유사하도록 댐퍼 특성을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta P_{smooth} = \frac{\Delta P_{tot|open} \times \Delta P_{tot|closed}}{\sqrt[3]{|\Delta P_{tot|open}|^3 + |\Delta P_{tot|closed}|^3}} \quad (13)$$

3.2 댐퍼 하중

상기 언급한 내용을 통해 압력 튜브 끝에 존재하는 가스로 인해 로드가 정지하고 있을 때도 정적인 힘이 다음과 같이 존재하게 된다.

$$F_{static} = -A_{rod} P_{gas,static} \quad (14)$$

또한 댐퍼에 작용하는 힘은 rebound와 compression 상태 일 때 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{rebound} &= F_{static} + \Delta P(A_{pt} - A_{rod}) + F_{friction} sgn \dot{x} \\ F_{compression} &= F_{static} - \Delta P(A_{pt} - A_{rod}) + F_{friction} sgn \dot{x} \end{aligned} \quad (15)$$

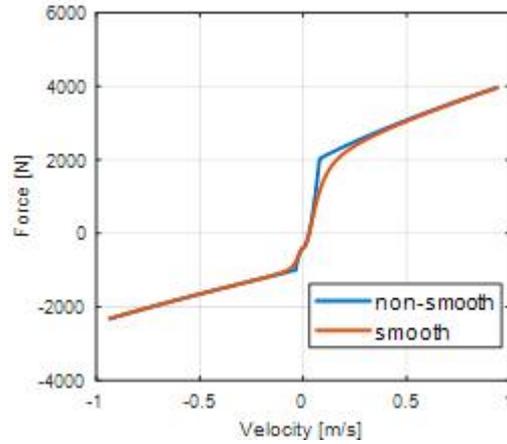


Fig. 2 Smooth, Non-smooth 곡선 비교 그래프

여기서 ΔP 는 속도에 따라 변하는 값이므로 속도의 변화에 따라 댐퍼 하중도 변하게 된다.

3.3 MATLAB을 이용한 모델링

상기 언급한 이론적 특성을 바탕으로 MATLAB⁴⁾을 통해서 비선형성을 고려한 단통형 댐퍼를 모델링하였다. 실제 현상을 고려해서 평활화 방법을 적용한 댐퍼 특성과 적용하지 않은 댐퍼 특성을 비교한다. Fig. 2에서 청색 선은 Smoothed 효과를 적용하기 전이다. 따라서 Blow-off가 열리는 지점에서 매끄럽지 않게 전이 발생하고 있다는 것을 확인 할 수 있다. 반면 적색 선은 Smoothed 효과를 적용하여 매끄러운 전이가 일어나는 것을 보아 실제 현상과 보다 더 가까운 모델링에 성공했다는 것을 알 수 있다.

4. 단통형 댐퍼 모델 타당성 확인

4.1 댐퍼 단품 시험 결과 비교

모델링한 댐퍼를 독립적으로 타당성을 확인해 보기 위하여 댐퍼 단품 시험 결과를 참고하였다. 시험 방법은 모델링 한 댐퍼의 로드를 진폭 0.05 주파수 1Hz의 sine wave 입력을 가했을 때의 응답 특성을 확인 한다. 그리고 시뮬레이션 데이터를 실제 차량을 이용한 실험 데이터와 비교를 통해 제안한 댐퍼 모델링의 타당성을 Fig. 3 과 4와 같이 확인하였다.

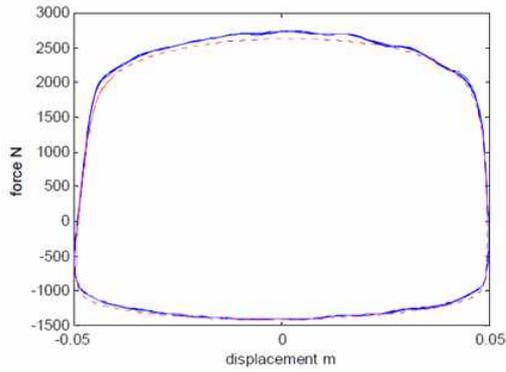


Fig. 3 실험을 통한 변위-힘 그래프

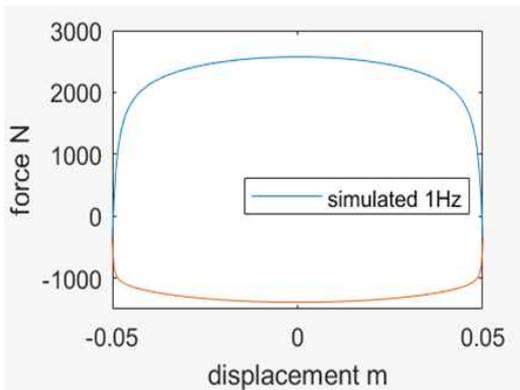


Fig. 4 시뮬레이션을 통한 변위-힘 그래프

비교 결과 제안한 댐퍼 모델이 실험 결과와 유사함을 확인 할 수 있다.

4.2 Quarter Car 시뮬레이션

독립적으로 댐퍼만을 이용한 응답 특성을 확인 하는 것이 아니라 모델링한 댐퍼를 차량에 적용 하고, 특정 노면을 통과 시 차량의 동적 응답 특성을 확인해 보았다. 또한 선형성의 댐퍼를 장착한 차량의 동적 응답과 비교해 보고 단통형 댐퍼를 비선형성으로 설계해야 하는 타당성을 확인한다. 차량의 동적 응답 분석을 위해 MATLAB/Simulink⁴⁾를 이용하여 Fig. 5와 같은 Quarter Car 모델을 통해 응답 특성을 분석하였다.

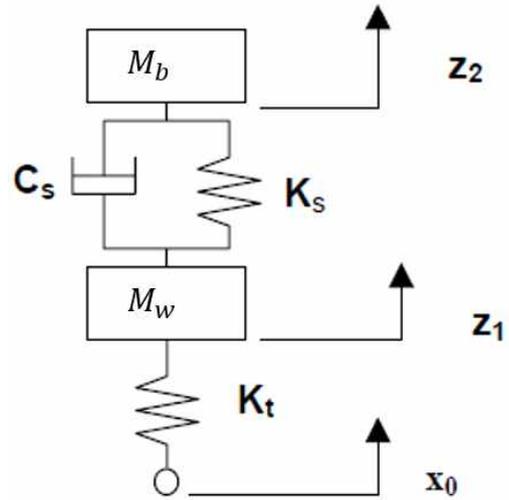


Fig. 5 Quarter Car 모델

Quarter Car 모델에 사용 된 파라미터 값들은 Table 1과 같다.

Table 1 Quarter Car의 파라미터

파라미터	크기	단위
M_w	55.5	kg
M_b	451.8	kg
K_t	250	kN/m
M_s	29.7	kN/m
C_s	2622	Ns/m

주어진 파라미터 값들을 Simulink로 만든 Quarter Car 모델에 적용하였다. 선형 댐퍼를 가진 Quarter Car는 댐핑 계수 C_s 가 일정한 값으로써 존재하고, 제안한 모델의 비선형 댐퍼의 댐핑 계수 C_s 는 Fig. 6 과 같이 MATLAB 에서 속도에 따른 Damper Force 데이터를 가져와 1D-Lookup table 기능을 사용하여 타당성을 확인하였다. 이때 가속도의 부호를 else if 문을 이용하여 판단한 뒤, Hysteresis 특성에 의해 나타난 두 직선을 각각 넣어 설계하였다.

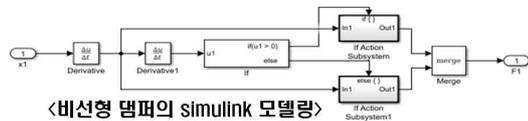


Fig. 6 Quarter Car 에 장착되는 비선형성 댐퍼

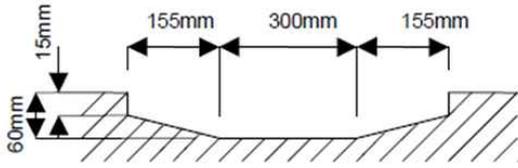


Fig. 7 노면 형태

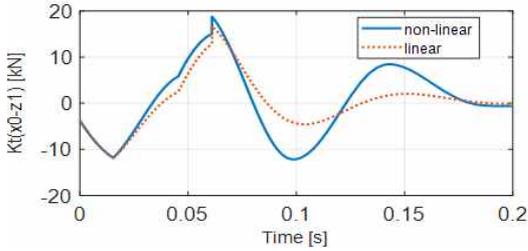


Fig. 8 모델링 Quarter Car의 타이어 하중 변화 그래프

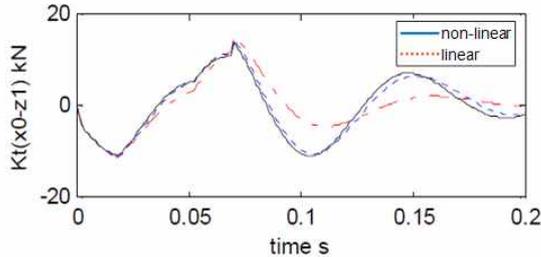


Fig. 9 참고 문헌 타이어 하중 변화 그래프

선형, 비선형 댐퍼를 적용한 Quarter Car 모델이 Fig. 7과 같은 노면 통과 시 어떤 동적 응답을 나타내는 지 확인한다. 확인해 본 차량의 동적 응답은 Fig. 8와 9과 같이 $K_t(x_0 - z_1)$ 값으로 타이어에 가해지는 하중 변화를 나타낸다. 제안한 댐퍼 모델을 적용한 Quarter Car의 동적 응답이 참고문헌의 동적 응답과 유사한 경향을 보이는 것을 확인할 수 있다.

5. 설계인자 영향도 분석

단통형 댐퍼를 설계하는 데 필요한 여러 가지 설계인자들이 각각 댐퍼의 차량 동적 응답에 어떤 영향을 미치는지 확인해 보았다. 시뮬레이션 조건은 다음과 같다. 차속 10m/s로 Fig. 7과 같은 노면 주행 시, 휠과 차체 간 상대 변위 ($z_1 - z_2$)을 확인해 보았다. 피스톤 면적과 ΔP_0 변화 시 최대 상대 변위 폭이 어떤 영향을 받는지 확인한다.

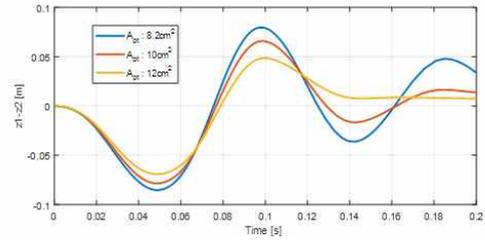


Fig. 10 피스톤 면적 변화에 따른 상대 변위

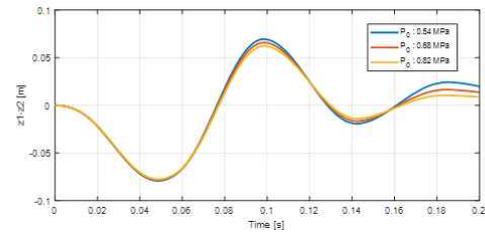


Fig. 11 ΔP_0 변화에 따른 상대 변위

Table 2 피스톤 면적 변화에 따른 변위

A_{p1} [cm^2]	8.2	10	12
최대 변위[cm]	7.96	6.58	4.86
최소 변위[cm]	-8.52	-7.85	-6.92
상대 변위 폭[cm]	16.48	14.43	11.78

Table 3 ΔP_0 변화에 따른 변위

ΔP_0 [MPa]	0.54	0.68	0.82
최대 변위[cm]	6.94	6.58	6.22
최소 변위[cm]	-7.93	-7.85	-7.77
상대 변위 폭[cm]	14.87	14.43	13.99

시뮬레이션 한 결과는 Fig. 10와 Fig. 11와 같다. 최대 변위, 최소 변위, 상대 변위 폭의 결과는 Table 2와 3과 같다. Table 2를 통해 피스톤 면적이 감소됨에 따라 댐퍼 모델의 상대 변위 폭이 기존의 댐퍼 모델보다 증가함을 확인할 수 있다. 따라서 단통형 댐퍼는 설계 인자인 피스톤 면적이 감소하면 댐핑 효과가 감소함을 알 수 있다. 같은 이유에서 피스톤 면적이 증가하면 댐핑 효과가 증가한다. 반면 Table 3의 결과를 확인해 보면 설계 인자 ΔP_0 에 대해서는 상대 변위 폭이 거의 변하지 않음을 확인할 수 있다. 그렇기 때문에 설계 인자 ΔP_0 는 차량의 동적 응답에 영향도가 작다고 볼 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 단통형 댐퍼를 비선형성을 고려하여 모델링을 한 후 시뮬레이션 결과를 실험 결과와 비교하였다. 이를 통해 제안한 댐퍼 모델의 타당성을 확인 하였다. 또한 모델링한 댐퍼를 Quarter car 모델에 적용하여 비선형성을 고려하지 않은 모델과 동적 응답 특성을 비교 해본 결과 확연히 다른 그래프 양상을 보였다. 따라서 단통형 댐퍼를 설계 할 때는 비선형성을 고려한 모델 분석이 요구된다. 또한 댐퍼 내의 설계 인자에 따른 동적 응답 영향도를 분석 해본 결과 피스톤의 면적이 댐퍼의 차량 동적 응답에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 따라서 단통형 댐퍼 설계 과정에서 동적 응답에 영향을 크게 주는 설계 인자에 대한 세부적인 검토가 필요하다.

References

- 1) Adrian, S. and David, C., "The Influence of Damper Properties on Vehicle Dynamic Behaviour", SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan, March 4-7, 2002.
- 2) Reybrouck, K. A Non Linear Parametric Model of an Automotive Shock Absorber, SAE International Congress, Detroit, Michigan, February 28- March 3, pp. 79-86, 1994.
- 3) Duym, S. Stiens, R. and Reybrouck, K. Fast Parametric and Nonparametric Identification of Shock Absorbers. Proc. 21st INT. Seminar Modal Analysis Noise and Vibration Engineering Conference. Leuven, pp. 1157-69, 18-20 Sep 1996.
- 4) <http://www.mathworks.com>