

충돌 댐퍼를 이용한 자동차의 진동 저감 연구

양 원 석*

한국교통대학교 자동차공학전공

Research on a Reduction of Automotive Vibration using Impact Dampers

Wonseok Yang*

Department of Automotive Engineering, Korea National University of Transportation,
50, Daehak-ro, Daesowon-myeon, Chungju, 27469, South Korea

(Received 2019.10.30 / Accepted 2019.11.22)

Abstract : This research presents an development of impact damper for reduction of vehicle vibration from road excitation. The structural vibrations are transferred through the vehicle body. The impact damper for reducing structural vibration from road excitation were designed and derived by using simplified numerical model. To analyze the characteristics of the impact damper, the vibration of simplified beam attached to impact damper was simulated. The damping ratios for different mass ratios of the impact dampers were calculated. The numerical results can be utilized to reduce the radiated noise from the electric vehicle.

Key words : vehicle vibration(차량 진동), structural vibration(구조 진동), impact damper(충돌 댐퍼), damping ratio(감쇠율), numerical analysis(수치해석)

Nomenclature

- m_1 : primary mass, kg
- c_1 : damping coefficient of primary system, Ns/m
- k_1 : spring coefficient of primary system, N/m
- x_1 : displacement of primary system, m
- L : clearance of primary system and impact damper, m
- l : length of impact damper mass, m
- m_2 : impact damper mass, kg
- x_2 : displacement of impact damper, m
- e : coefficient of restitution
- E : Young's modulus, GPa
- I : cross-sectional area moment of inertia, m⁴
- ρ : density of vehicle frame, kg/m³
- A : cross-sectional area, m²

w : displacement of vehicle frame, m

f : point force from road excitation, N

1. 서론

자동차 생산 및 소비가 증가하면서 차량 탑승자의 승차감 및 안락함에 대하여 많은 관심을 가지게 되었다. 특히 자동차 분야에서는 차량 소음, 진동 및 불쾌감(NVH : noise, vibration, and harshness)을 저감시키기 위해 소음의 원인파악과 감쇠 기술들을 개발하고 있다. 차량 소음의 원인으로는 엔진 운용에 의한 진동, 노면 상태에 의한 진동, 운행 속도에 따른 공력소음 등이 있다. 이 중 노면 상태에 의한 진동은 차체 프레임을 가진하여 탑승자의 청각과 촉각을 자극하여 피로도를 상승시키는 것으로 알려져 있다.

구조 진동을 효과적으로 줄이기 위한 방법으로 충돌댐퍼의 연구가 진행되고 있다.¹⁻⁴⁾ 충돌댐퍼는 두 물

*Corresponding author, E-mail: wsyang@ut.ac.kr

체의 비탄성 충돌을 이용하여 진동에너지를 소산시키는 방법으로 구조 진동을 줄이는데 뛰어난 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 노면 상태에 의한 진동을 차단하기 위해 충돌댐퍼를 개발하였다. 단순 시스템을 통해 충돌댐퍼를 모델링하였고, 진동 저감 인자를 도출하였다. 또한, 차량 프레임에 모사하여 충돌댐퍼의 진동 감쇠 효과를 확인하였다.

2. 1자유도 시스템의 충돌댐퍼 성능 검증

2.1 수치해석 모델

충돌댐퍼의 성능을 검증하기 위해서 Fig. 1과 같이 질량-감쇠-강성을 포함하는 1자유도 시스템을 이용하였고, 식은 다음과 같다.⁵⁾

$$m_1 \ddot{x}_1 + c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 = 0 \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = 0 \quad (2)$$

1자유도 시스템의 주진동계와 충돌댐퍼가 충돌하는 시점은 충돌댐퍼를 기준으로 왼편($x_1 > x_2$)과 오른편($x_1 + L < x_2 + l$)일 때 발생한다. 이 때, 주진동계와 충돌댐퍼는 비탄성 충돌에 의해 반발계수 이론이 적용되며, 운동량 보존법칙과 연립하여 충돌 전, 후의 속도를 다음과 같이 모델링하였다.

$$\begin{cases} \dot{x}_1^+ \\ \dot{x}_2^+ \end{cases} = \frac{1}{m_1 + m_2} \begin{bmatrix} m_1 - m_2 e & m_2 (1+e) \\ m_1 (1+e) & m_2 - m_1 e \end{bmatrix} \begin{cases} \dot{x}_1^- \\ \dot{x}_2^- \end{cases} \quad (3)$$

여기서 -는 충돌 전의 주진동계와 충돌댐퍼의 상태를 말하며, +는 충돌 후의 상태를 말한다. 식 (1), (2)를 시간해석하기 위해서 4계 Runge-Kutta법을 사용하

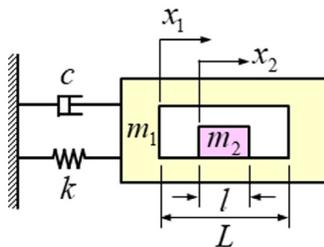


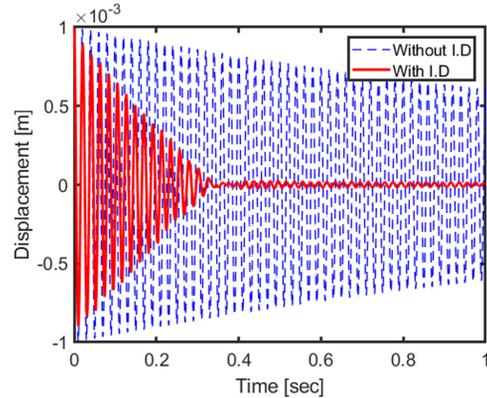
Fig. 1 Displacement of (a) primary mass, (b) impact damper

였으며, 충돌이 일어난 시점에서는 충돌 전후의 속도 조건이 변경되도록 해석을 수행하였다.

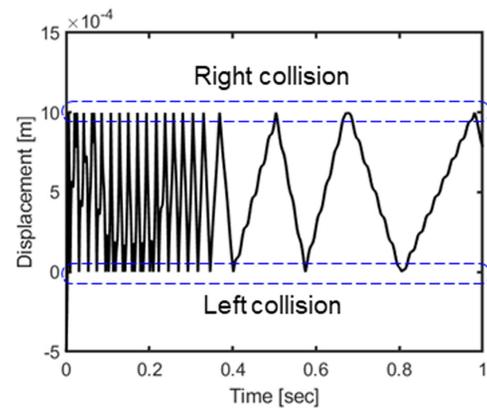
2.2 수치해석 결과

주진동계의 질량 m_1 은 1 kg, 감쇠 c_1 는 1 Ns/m, 강성 k_1 는 98.7 kN/m이고, 충돌댐퍼의 질량 m_2 은 0.1 kg, 반발계수 e 는 0.7로 가정하였다. 주진동계의 틸 L 은 1 mm, 충돌댐퍼의 길이는 0.5mm로 결정하였다. 해석은 주진동계의 초기 변위 $x_1(0)$ 를 1 mm로 주어 자유진동의 변위를 계산하였다.

Fig. 2와 같이 충돌댐퍼가 없는 경우, 감쇠 c_1 에 의하여 진동이 감소되지만, 충돌댐퍼를 장착한 경우에는 비탄성 충돌에 의해서 빠르게 감쇠되는 것을 알 수 있었다. 또한, 약 0.4초 미만에서는 충돌횟수의 빈도수가



(a)



(b)

Fig. 2 Displacement of (a) primary mass, (b) impact damper

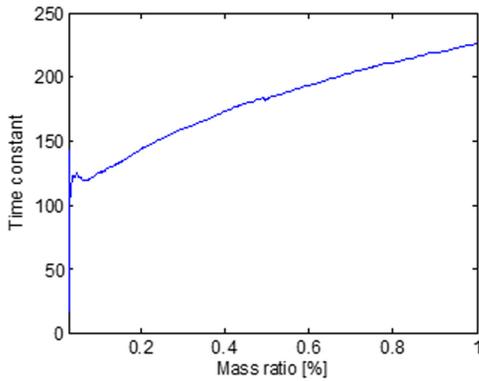


Fig. 3 Time constant for displacement of primary mass along mass ratio

많을수록 감쇠율이 향상되는 것을 알 수 있었다. Fig. 3와 같이 충돌댐퍼와 주진동계의 질량비에 따라 시간 감쇠율을 계산한 결과, 질량비가 증가할수록 충돌댐퍼의 감쇠율이 증가하는 것을 확인하였다.

3. 차체 시스템의 충돌댐퍼 성능 검증

3.1 수치해석 모델

Fig. 4과 같이 차체 프레임을 모델링하기 위해서 오일러-베르누이 보로 가정하여 파동방정식을 계산하였다. 파동방정식은 다음과 같다.

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = f(x, t) \quad (4)$$

위의 파동방정식을 풀기 위해서는 갤러킨 방법을 통해 요소 강성행렬과 질량행렬을 유도하였다.^{6,7)} 요소 행렬들을 조합하여 전체 강성과 질량 행렬을 통해 파동방정식을 다음과 같이 유도하였다.

$$[M] \{\ddot{d}\} + [K] \{d\} = \{f\} \quad (5)$$

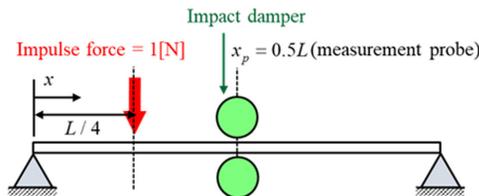


Fig. 4 Schematic diagram of model for vehicle frame attached by impact damper

여기서 $[M]$ 은 전체 질량행렬이고, $[K]$ 는 전체 강성행렬, $\{d\}$ 는 각 노드에 해당하는 변위행렬, $\{f\}$ 는 노면에서 전달되는 가진행렬을 말한다. 식 (5)을 시간에 대한 4계 Runge-Kutta법으로 노면 가진에 대한 차체 프레임의 변위를 계산하였다.

Fig. 4와 같이 차체 프레임의 한 가운데에 충돌댐퍼를 장착하였으며, 노면가진은 프레임의 1/4 지점으로 가정하였다. 보의 양 끝단은 pinned 조건을 주었고, 충돌에 대한 지배방정식은 1자유도 시스템과 동일하며, 식 (3)을 이용하여 충돌 전후의 속도를 예측하면서 시간해석을 수행하였다. 또한, 충돌댐퍼의 감쇠성능을 더욱 향상시키기 위해 프레임의 1/4 지점과 3/4지점에 댐퍼를 추가하여 댐퍼 개수 증가에 따른 감쇠효과를 확인하였다.

3.2 수치해석 결과

차체 프레임의 재질은 알루미늄으로 가정하였으며, 이에 따른 영률 E 는 75 GPa, 밀도 ρ 는 2,800 kg/m³이다. 보의 단면적 A 는 100 mm², I 는 208.33 mm⁴, 보의 길이는 2 m이다. 충돌댐퍼의 질량은 0.3 kg이며, 댐퍼의 유격은 0.02 mm로 주었으며, 노면에 의한 힘은 1 N의 충격으로 주어 보의 자유진동 상태를 해석하였다.

수치해석 결과, 충돌댐퍼와 차체 프레임의 비탄성 충돌로 인해 감쇠효과가 일어났으며, Fig. 5와 같이 댐퍼의 개수가 증가할수록 감쇠 성능이 향상되었다. 또한, 차체 프레임의 변위가 가장 높은 부분인 안티 노드 부근(프레임의 1/4, 1/2, 3/4 지점)에 충돌댐퍼를 설치할 경우, 감쇠효과가 더욱 뛰어난 것을 확인하였다.

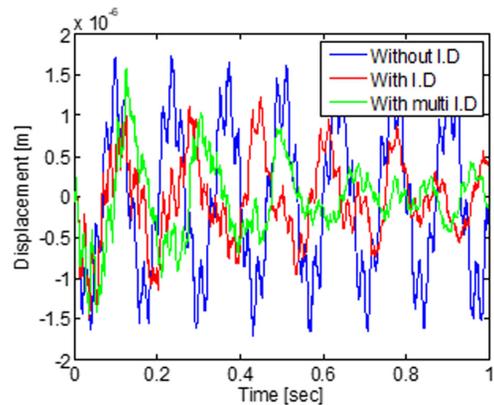


Fig. 5 Displacement of vehicle frame at the middle of simplified beams

4. 결 론

본 연구에서는 차체 프레임의 진동 저감용 충돌댐퍼를 개발하기 위해 수치해석 모델을 제시하였다. 충돌댐퍼의 성능을 검증하기 위해 1자유도 시스템을 모델링하여 반발계수와 운동량 보존법칙을 이용한 충돌 감쇠를 모사하였다. 충돌댐퍼가 없는 1자유도 시스템은 자체 감쇠를 통해 진동이 저감되지만, 충돌댐퍼를 장착한 경우에는 비탄성 충돌로 인해 진동이 빠르게 저감되는 것을 알 수 있었다. 또한, 충돌댐퍼의 질량비가 증가하면서 댐퍼의 감쇠성능이 향상되는 점을 확인하였다. 실제 차량 프레임을 모사하기 위해서 오일러-베르누이 보의 파동방정식을 사용하였고, 갤러킨 방법을 통해 노드별 질량 및 강성행렬을 계산하였다. 차체 프레임과 충돌댐퍼의 충돌 메커니즘에 의해 충돌 전후의 속도 변화를 고려하여 시간해석을 수행하였다. 모델링된 비탄성 충돌로 인해 진동 감쇠효과를 확인하였으며, 댐퍼의 수가 증가할수록 감쇠율이 상승하였다. 이를 통해 충돌댐퍼의 질량비, 개수에 따라 댐퍼 감쇠율의 최적설계가 가능하고, 효과적으로 차량의 진동을 줄일 수 있으며, 구조 기인 소음을 차단시킬 수 있다.

Acknowledgement

본 연구는 2019년 한국교통대학교 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- 1) C. Bapat and S. Sankar, "Single unit impact dampers in free and forced vibration", *J Sound Vib* 99, p.85-94, 1985.
- 2) F. Collette, "A combined tuned absorber and pendulum impact damper under random excitation", *J Sound Vib* 216, p. 199-213, 1998.
- 3) C. Cheng and J. Wang, "Free vibration analysis of a resilient impact damper", *Inte J Mech Sci.* 45, p.589-604, 2003.
- 4) L. Bonanomi, G. Theocharis, and C. Daraio, "Wave propagation in granular chains with local resonances", *Phy Rev. E* 91, 033208, 2015.
- 5) D.J. Inman, "Engineering vibrations", Pearson, Virginia, 1994.
- 6) R.D. Cook, "Concepts and applications of finite element analysis", John Wiley & Sons, New York, 2007.
- 7) D.L. Logan, "A First Course in the Finite Element Method", Thomson, Platteville, 2011.