

차량의 서스펜션 댐퍼의 내압 및 동특성 관련 연구

이준영¹, 김규남²¹성균관대학교, 기계공학과 학부생²성균관대학교 기계공학과 교수

tony1205@g.skku.edu, kyunam.kim@skku.edu

A Study on the Inner Pressure and Dynamic Properties of Suspension Dampers for Vehicles

Jun-Young Lee¹, Kyunam Kim²¹School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University²School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

요 약

차량의 현가장치의 서스펜션 댐퍼의 내압 조건에서의 내구성을 고체역학적으로 판단하여 내압, 봉입압, 리바운드 힘의 계산 방법 및 적합도 확인 방법을 열역학과 유체역학적으로 구하였다. 또한, 댐퍼의 동특성과 phase angle에 대한 해석을 통하여 phase angle의 식 도출과 주파수와 댐핑 상수에 따른 추세를 확인해보았다.

1. 서론

차량의 현가장치는 프레임과 차축 사이를 연결하여 차의 중량을 지지하고, 서스펜션 댐퍼를 통해 바퀴의 진동을 흡수하여 스프링의 탄성에너지를 유체를 이용하여 열에너지로 변환시켜 차량의 운동을 최적으로 수렴하게 해주며 승차감과 주행 안정성에 도움을 주는 장치이다. 서스펜션 댐퍼는 피스톤 밸브와 바디 밸브에 있는 디스크로 유로의 흐름을 방해하여 감쇠력을 나타내는데, 이러한 서스펜션 댐퍼 내부의 내압에 따른 내구성 평가 및 내압 계산 방법 그리고 이의 동특성과 위상차를 분석하였다.

2. 차량의 서스펜션 댐퍼의 내압 분석

차량의 현가장치의 서스펜션 댐퍼의 내압은 댐퍼 내부 튜브의 내구성이나, 리바운드 힘, 봉입압 등을 계산하는 데에 고려해야 할 매우 중요한 요소이다. 내압이 주어졌을 때의 내부 튜브의 내구성 및 터짐 여부를 고체 역학적으로 판단할 수 있는데, 외부 압력에서 의뢰했던 목표 내압인 301.5bar의 내압의 터짐 여부를 판단하는 과정은 다음과 같았다. 먼저 댐퍼의 내부 튜브의 두께, 외경, 재질의 정보를 가지고 튜브에 가해지는 radial stress, axial stress, hoop stress를 구하여 이 principle stress를 통해 튜브의 von mises stress를 구하고, 이를 튜브의 재질인 SAE1015의 yield strength와 tensile strength와의

비교를 통해 튜브의 내구성을 판단하였다. 튜브의 axial과 hoop stress는 반지름/두께의 비가 10 이상일 때, 얇은 벽의 가정을 통해 근사하여 간편한 공식을 활용하여 구할 수 있는데, 이때 axial stress는 $PD/2t$ (P =압력, D =지름, t =두께)도 구할 수 있고, hoop stress는 $PD/4t$ 로 구할 수 있으며, radial stress는 내압과 같아, von mises stress는 아래의 공식에 해당 값들을 대입하여 구할 수 있다.

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}}$$

이를 통하여 구한 결과 von mises stress는 325.8MPa가 나와, 이는 yield strength 325MPa와 차이가 매우 작게 나왔으며, 더욱 정밀한 계산식이 요구되므로 근사 식이 아닌 두꺼운 벽 분석 방식을 적용해 보았다. 이때의 axial stress 공식은

$$\sigma_{ax} = \frac{pa^2}{b^2 - a^2} \quad (a=\text{inner radius, } b=\text{outer radius}),$$

$$\text{hoop stress 공식은 } \sigma_h = \frac{pa^2(\gamma^2 + b^2)}{b^2 - a^2} \text{이며, 이를}$$

통하여 구하면 von mises stress는 340.35MPa가 나왔다. 이는 yield strength보다 크고, tensile stress 385MPa보다 작아 plastic deformation이 일어날 것이며 elastic 범위를 넘었지만 Young's Modulus를 활용하여 근사하게 변위 0.03mm 정도가 나올 것이라

예상하였다. 이후 in-cad 해석 과정을 통하여 파악해 본 결과 390.2MPa의 최대인장이 발생하여 301.5bar는 안전하지 않다는 결론을 낼 수 있었다. 또, 다음으로 공기조절판의 기본 치수와 내부 체적을 받아, 이를 통해 댐퍼의 온도에 따른 봉입압, 내압, 봉입압을 열역학과 유체역학적으로 계산하고 이가 기준치에 적합한지를 판단하는 방법에 대해 고찰해보았다. 먼저 파스칼의 법칙 $P = F/A$ 를 활용하여 주입한 가스 반력을 통해 상온기준 봉입압을 구할 수 있었으며, 이에 부피의 비를 곱하여 상온기준 내압도 구할 수 있었다. 이후 위의 상온기준값들에 보

일·샤를의 법칙 $\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$, 열팽창 공식

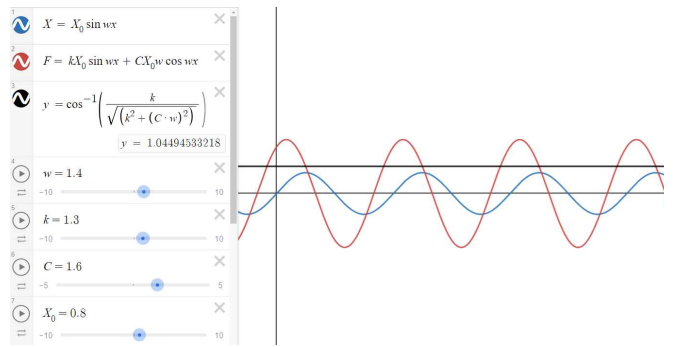
$\Delta V = \alpha V \Delta T$ (α = oil의 열팽창 계수 = 0.008)과 가스 용해율을 고려하여 다른 온도 기준에서의 봉입압과 내압도 계산할 수 있었고, 해당 내압에 rod의 단면적을 곱하여 리바운드 힘도 구할 수가 있었다. 이외에도 오일의 열팽창에 의해 해당 부피가 댐퍼 내부 최대 부피를 초과하여 뚫고 위험해질 수 있는 puncture 온도도 구할 수가 있었고, 이의 내압, puncture 온도가 기준치의 적합한지를 해당 과정을 통해 평가할 수 있었다.

3. 서스펜션 댐퍼의 동특성과 phase angle 분석

일반적인 서스펜션 댐퍼 시험 방식인 피스톤의 속도에 따른 감쇠력을 측정하며 이가 목표값에 도달하는지의 실험도 많이 진행되었지만, 외부 업체에서 의뢰해 이례적으로 댐퍼의 속도가 일정한 상황에서 변위에 변화를 주어 주파수에 따른 감쇠력 측정 실험을 진행해 보았다. 이는 0~5Hz의 차량의 방향 제어나 브레이크와 같은 큰 움직임에서 나타나는 낮은 주파수와 5~30Hz까지의 도로 노면이나 차량의 진동에 따른 높은 주파수에서의 감쇠력이 어떻게 나타나는지를 확인해보고자 함이었다. 이후 시험 의뢰와 함께 주어진 공식들을 분석해보며, 용수철과 댐퍼의 영향에 따른 변위와 힘의 식과 phase angle을 알아 보며 이가 기존 생각에는 속도가 최대, 즉 변위의 미분 값이 최대일 때 감쇠력이 최대로 일어나 이의 phase angle이 90도로 나타나는 것이 일반적이라고 생각하였으나 결과값이 그렇지 않은 이유에 대해서도 여러 논문을 찾아보며 분석해보았다. 기존 연구에서는[1] phase angle이 고정된 값이 아니라, 주파수별 또는 댐핑 계수나 용수철 상수에 따라 계속 변화되는 값을 지니는 것을 확인하였으며, 이를 기존

주어진 공식들과 함께 생각하였을 때 이의 원인을 이해할 수 있었다. 댐핑의 변위가 $X = X_0 \sin \omega t$ 로 주어졌을 때, $F = kx + C\dot{x} = kX_0 \sin \omega t + kX_0 \omega \cos \omega t$, 이므로 둘의 위상차는 C, k, w의 값에 따라 계속 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 이때 둘의 위상차를 식으로 표현하면, 이는 두 그래프의 최댓값일 때의 x의 값의 차이므로 이는 $\delta = \cos^{-1}\left(\frac{k}{\sqrt{k^2 + C^2 \omega^2}}\right)$

로 표현되며 기존 연구결과[2]와 시험결과에서 확인된 댐핑 상수와 주파수가 커짐에 따른 phase angle의 증가하는 추세를 확인할 수 있었다.



(그림 1) 주파수, 댐핑 상수, 용수철 상수에 따른 변위(파랑), 힘(빨강)과 위상차(검정)

4. 결론

이로써 차량의 서스펜션 댐퍼의 내구성, 내압이 기준치에 적합한지를 판단하는 방법과 동적인 특성 및 그의 위상차를 식으로 표현하여 주파수나 댐핑 상수에 따른 추세를 확인해보았다. 이는 서스펜션 댐퍼에 대한 이해를 넓히고 댐퍼의 안전도 검사와 평가 및 해석 과정에서도 매우 중요하게 활용될 수 있을 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(교육부-산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0022098, 2023년 미래형자동차 기술융합 혁신인재양성사업)

참고문헌

[1] Gardulski, J. . “Testing Methods for Vehicle Shock Absorbers” Journal of KONES Powertrain and Transport, 15. (2008)
 [2] Guzek M. & Zdanowicz P. “Effects of using various methods for car shock absorbers diagnostic tests” The Archives of Automotive Engineering - Archiwum Motoryzacji, 88(2), (2020)