Hyperbolic tangent 를 이용한 충격 흡수기 감쇠력 모델 연구

서정원*(KIMM), 한형석(KIMM), 노규석(KIMM), 허승진(국민대), 김기훈(자동차부품연구원)

Damping Force Modeling of Shock Absorbers Using Hyperbolic tangent

J. W. Seo* (KIMM), H. S. Han(KIMM), K. S. Rho(KIMM), S. J. Heo(Kookmin Univ.), K. H. Kim(KATECH)

ABSTRACT

The shock absorber is a part having a direct influence on the ride comfort, stability and dynamic load prediction of a vehicle. Thus, a rationally modeled shock absorber should be required in the dynamic analysis of vehicles. This thesis presents a modified model, based on Worden's hyperbolic tangent function, in order to fit experimental data on the velocity-damping force of a shock absorber. The hyperbolic tangent function correctly indicates the characteristics of a shock absorber, and has the advantage of containing physical causality. To evaluate the method, comparative evaluations of the linear model, the 5th polynomial model and Worden's model were carried out. The function presented in this paper is not only simple but also makes it possible to estimate the function coefficients easily and visually. In addition, it has the advantage of containing physical causality. Lastly, it effectively models the damping force of a shock absorber.

Key Words : Shock Absorber(충격흡수기), Empirical dynamics modeling(경험적 동역학 모델링), Hyperbolic tangent, Damping force(감쇠력)

1. 서론

자동차의 충격 흡수기는 차량의 승차감, 안정성, 동하중에 직접적으로 영향을 주는 부품이기 때문에 차량 동역학 해석에 있어서 충격 흡수기의 합리적인 모델이 요구된다. 충격 흡수기의 동적 모델 방안의 하나로 실험 데이터로부터 모델을 추정하는 경험적 동역학 모델링(Empirical dynamics modeling)이 활용되고 있다. Fig. 1 은 랜덤 가진 실험에 의하여 얻어진 전형적인 충격 흡수기의 힘-시간 곡선을 보여주고 있다. Fig.2 는 Fig. 1 의 실험데이터를 수치미분하여 생성한 힘-속도 곡선을 나타낸다. Fig. 2 에서와 같이 속도 감쇠력은 비선형 특성을 보인다. 이러한 특성을 모델하기 위하여 보편적으로 이용되는 것 중의 하나가 다항식을 이용한 적합이다.[1] Worden[2] 에 의하면 이 방법은 효과적으로 실험 데이터를 표현하나 곡선 접합에 이용된 주파수 영역에 신뢰성이 한정되고 추정된 매개변수가 물리적 의미를 내포하지 못하는 단점이 있다. Barber[3], Fash[4], Lee[5] 등은 신경망을 이용한 경험적 동역학 모델링을 연구하였는데, 실험과 모델 사이의 차이가 미미하여 좋은 결과를 보였으나 신경회로망은 적용하기에 어려운 면이 있고, 설계 변수와의 인과관계를 알기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 Worden 이 Hyperbolic tangent 함수를 이용하여 제안한 모델을 보완하여 새로운 모델을 제안한다. 제안된 방법을 평가하기 위하여 선형 모델, 5 차 다항식 모델 및 Worden 이 제안한 함수에 대하여도 비교 평가하였다. 그 결과 단순 함수로도 Fig. 2 와 같은 충격 흡수기의 특성을 잘 표현할 수 있음을 볼 수 있었고 차량 동역학 해석에 쉽게 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 단순 비선형 모델

2.1 선형 모델

가장 간단한 모델로 식(1)과 같이 표현되며 일반적으로 주요 운전 주파수에서 얻어진 힘-속도 실험 데이터를 최소자승법(least square approach)을 이용하여 감쇠계수를 추정한다.

$$\text{Model I} : f(v) = cv \tag{1}$$

여기서 f는 힘, v는 속도, c는 감쇠계수를 나타낸다. 이러한 모델은 물리적 의미를 내포하고 있으며 간단한 함수인 장점을 가지나 비선형을 표현하지 못하는 단점이 있다. 본 논문에서는 Fig. 1 의 랜덤 가진 실험데이터에 적용하기 위하여 특정한 주파수가 아닌 Fig. 2 에 대한 최소자승법으로 감쇠계수를 추정한다.

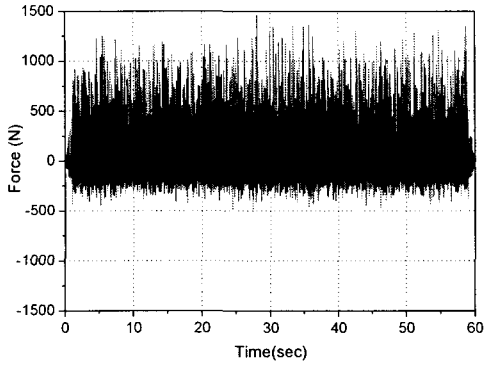

Fig. 1 Force-time curve from experimentation

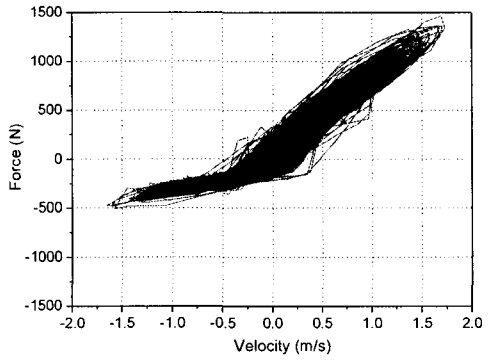

Fig. 2 Force-velocity curve from experimentation

2.2 다항식 모델

이 모델은 현재 널리 이용되는 모델로 식(2)와 같이 표현된다.

$$\text{Model 2}: f(v) = \sum_{i=1}^{N} c_i v^i + c_0 \tag{2}$$

식(2)의 차수는 적합 정도의 시각적 판단 또는 오차의 크기로 결정할 수 있다. 본 논문에서는 시각적 판단에 의하여 차수를 결정하였으며 계수 추정은 MATLAB 의 polyfit( )함수를 이용한다.

2.3 Hyperbolic tangent 함수 모델

Worden 이 제안한 모델로 식(3)으로 정의된다.

$$\text{Model 3}: f(v) = cv + \alpha[\tanh(\beta v + \gamma) - \tanh(\gamma)] \tag{3}$$

식(3)에서의 계수 α, β, γ 는 Hyperbolic tangent 함수의 크기(scaling), 병진(translation), 회전(rotating) 변환의 의미를 갖는다. 식(3)의 계수를 추정하는 방법으로 Worden 은 Gradient descent[6] 와 같은 최적화 기법을 도입하였다. 본 논문에서는 Worden 이 이용한 방법을 도입하여 적용하였으나 수렴하지 못하는 결과를 보여 최적화 기법을 사용하지 못하였다. 수치적으로 만들어진 데이터는 수렴하였으나 Fig. 2 의 실측 데이터에는 수렴하지 못하는 어려움이 있었기 때문이다. 수렴하지 못한 이유로는 속도가 실험데이터로부터 수치적 미분에 의하여 만들어졌기 때문에 노이즈의 효과적인 제거가 이루어지지 않았기 때문으로 판단되며, 최적값에 가까운 초기값 추정이 요구된다고 할 수 있다. 본 논문에서는 시각적 판단에 의하여 시행 오차법으로 계수들을 추정하였다. 여기서 각 계수는 독립적으로 함수의 형상에 영향을 미치기 때문에 계수 추정에 어려움은 없다.

2.4 보완된 Hyperbolic tangent 함수 모델

본 논문에서는 2.3 절에서와 같이 Worden 이 제안한 모델의 단점을 보완하여 식(4)와 같은 형태를 제안 한다.

$$\text{Model 4}: f(v) = cv + \alpha[\tanh(\beta v + \gamma) - \tanh(\gamma)] + \delta \min(0, v) \tag{4}$$

식(4)에서 마지막 항(δ)을 추가한 이유는 식(3)을 Fig. 2 의 실험데이터에 적용하였을 때 음의 속도 영역에서 오차가 상대적으로 크게 나타났기 때문이다. 식(4)의 계수 추정은 2.3 절에서 언급한 동일한 문제가 발생하여 시각적으로 추정한다. 전 절에서 언급한 것과 같이 각 계수가 독립적인 영향을 미치기 때문에 계수 추정에 어려움은 없다.

3. 모델링 결과 및 검증

3.1 추정

Table 1 은 각 모델에 대하여 추정된 계수를 보여주고 있다. 당초 실험에서는 Fig. 1 과 같이 시간-변위, 시간-힘 값을 측정한다. 이로부터 Fig. 2 의 힘-속도 곡선이 수치적 미분에 의하여 계산되었다. 수치적으로 미분된 힘-속도 곡선에 최소자승법을 적용하여 Model 1 에 대한 계수를 추정하였다. Model 2 의 차수는 Fig. 2 의 적합성에 대한 시각적 판단으로 결정하였고, 그 결과 5 차를 선택하고 계

수는 MAT LAB 을 이용하여 추정하였다. Model 3, 4 의 계수 추정은 전술한 바와 같이 시각적으로 추정하였다. Fig. 3~Fig. 6 에서 실험 데이터와 추정된 각 Model 에서 얻어진 곡선을 보여주고 있다. Model 1 은 음의 속도 영역에서 오차가 크게 나타나는 것을 알 수 있으며, Model 2 는 상대적으로 적합성이 좋은 것을 알 수 있다. 그러나 측정된 데이터 범위를 벗어나면 오차가 증가할 것으로 예상된다. Model 3 은 양의 속도 영역에서는 적합이 잘 되나 음의 속도 부분에서는 차이가 큰 것을 알 수 있다. 본 논문에서 제안한 Model 4 는 Model 3 의 음의 속도 영역에서의 오차를 보정하는 항으로 인하여 전체 영역에서 적합성이 좋은 것을 알 수 있다.

Table 1 Estimated coefficients

Coefficient / Model	c	α	β	γ	δ
Model 1	614.3429				
Model 2	c_1=14.48205, c_2=776.03666, c_3=359.10066 c_4=-407.1426,c_5=-112.27201,c_6=147.53509				
Model 3	614.3429	150.0	5.0	-0.3	
Model 4	614.3429	150.0	5.0	-0.3	400

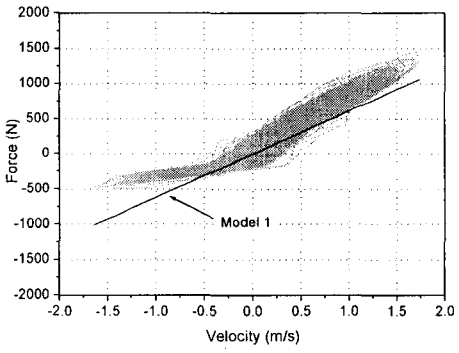

Fig. 3 Force-velocity curve from experiment compared with Model 1

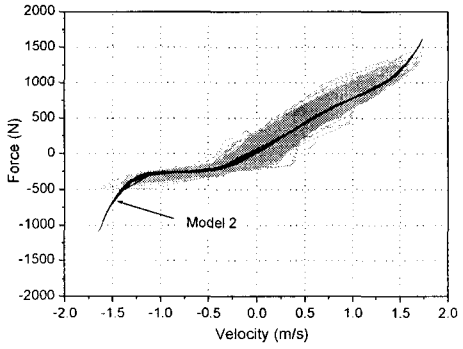

Fig. 4 Force-velocity curve from experiment compared with Model 2

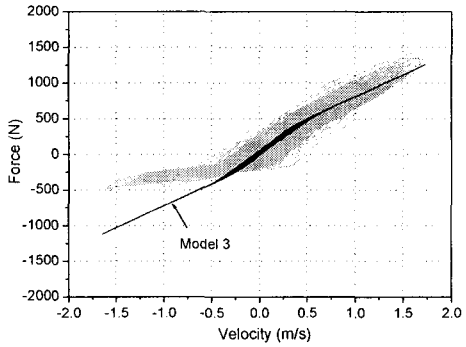

Fig. 5 Force-velocity curve from experiment compared with Model 3

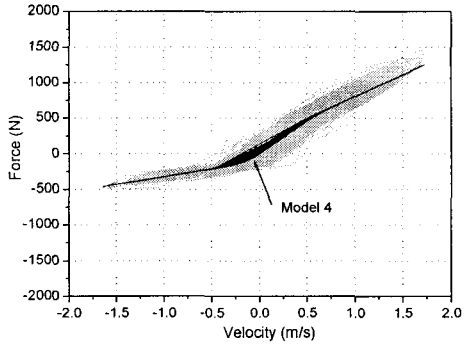

Fig. 6 Force-velocity curve from experiment compared with Model 4

3.2 평가

시간 영역에서의 검토를 위하여 각 Model 에 실험에서 얻어진 힘-시간 곡선을 대입하여 비교 하였다. Fig. 7~Fig. 10 은 각 Model 에서 얻어진 감쇠력을 실험값과 비교하여 보여주고 있다.

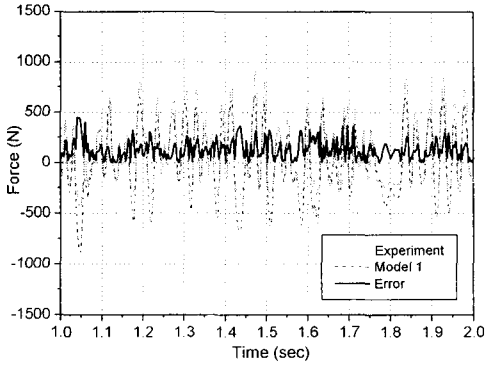

Fig. 7 Force data from experiment compared with Model 1

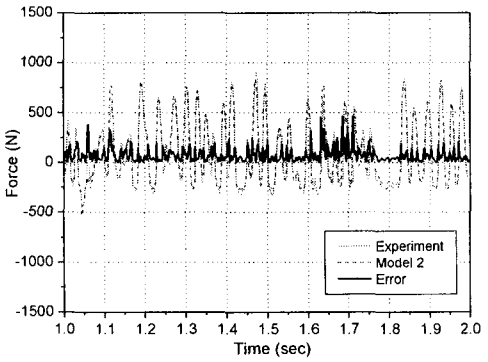

Fig. 8 Force data from experiment compared with Model 2

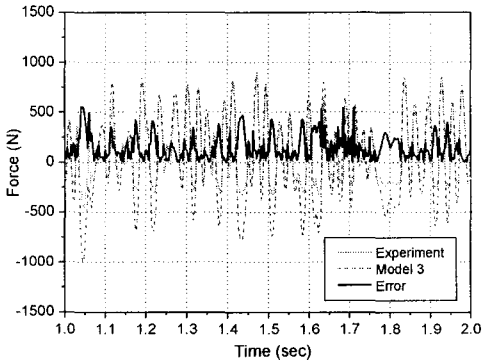

Fig. 9 Force data from experiment compared with Model 3

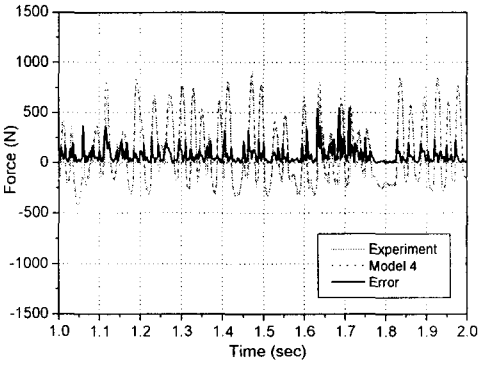

Fig.10 Force data from experiment compared with Model4

선형 모델인 Fig. 7 을 보면 음의 속도 영역에서 차이가 크고 양의 속도에서는 변곡점에서 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. Fig. 8 은 Model 2 로부터 얻어진 결과로 전반적으로 적합이 잘 이루어지는 것을 알 수 있다. Fig. 9 는 Model 3 에 대한 결과로 음의 속도 영역에서 오차가 크게 나타난다. Model 4 에 대한 결과인 Fig. 10 은 Model 1, 3 에 비해 적합성이 좋은 것으로 판단되며, Model 2 와는 유사한 것을 알 수 있다.

4. 결론

이상과 같이 4 종의 함수를 이용하여 자동차 충격흡수기의 경험적 동역학 모델링 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 논문에서 제안하는 Hyperbolic tangent 함수에 기초한 Model 4 가 자동차 충격 흡수기의 경험적 동역학 모델링으로 사용이 가능함을 알 수 있었다.

2) Model 4 의 계수는 시각적으로 쉽게 추정이 가능하고 계수는 설계인자와의 인과관계가 있어 유용한 장점을 갖는다.

3) 5 차 다항식으로 구성된 Model 2 도 경험적 동역학 모델링으로 적용하기에 적합하나, 설계인자와의 인과관계가 없는 것이 단점이라고 사료된다.

결과적으로 차량의 승차감, 안정성, 동하중 예측에 직접적으로 영향을 주는 충격흡수기의 경험적 동역학 모델링으로 본 논문에서 제안하는 간단한 함수를 적용하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Worden, K. and Tomlinson G.R., "Parametric and Nonparametric Identification of Automatic Sock Absorbers," Proceedings of the 10th International Modal Analysis Conference, San Diego, pp. 764-771, 1992.
2. Cafferty, S., Giacomin, J. and Worden, K., "Simple Nonlinear Models for Automatic Shock Absorbers," 6th International Conference on Recent Advances in Structual Dynamics ISVR, pp. 709-721, 1997.
3. Barber, A.J., "Accurate Models for Complex Vehicle Components Using Empirical Methods," SAE 2000-01-1625, pp. 1-28, 2000.
4. Fash, J. W., "Modeling of Shock Absorber Behavoir Using Artificial Neural Network," SAE 940248, pp. 1-10, 1994.
5. Lee, J. H., Park, K. H. and Heo, S. J., "A Study on Modeling and Fault Diagnosis of Suspension Systems Using Neural Network," Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 11, No. 1, pp. 95-103, 2003
6. Genta, G., Campanile, P., "An Approximated Approach to the Study of Motor Vehicle Suspensions with Nonlinear Shock Absorber," Meccanica 24, pp. 47-57, 1989.