

차량동역학해석을 위한 실험적 부상모델 개발

손정현[†] · 강태호* · 백운경** · 박동운*** · 유완석****

Empirical Bushing Model For Vehicle Dynamic Analysis

Jeong-Hyun Sohn, Tae-Ho Kang, Woon-Kyung Baek,
Dong-Woon Park and Wan-Suk Yoo

Key Words: Vehicle Dynamics(차량동역학), Computer Simulation(컴퓨터 시뮬레이션), Bushing(부싱), Artificial Neural Network(인공신경망)

Abstract

In this paper, a blackbox approach is carried out to model the nonlinear dynamic bushing model. One-axis durability test is performed to describe the mechanical behavior of typical vehicle elastomeric components. The results of the tests are used to develop an empirical bushing model with an artificial neural network. The back propagation algorithm is used to obtain the weighting factor of the neural network. Since the output for a dynamic system depends on the histories of inputs and outputs, Narendra's algorithm of 'NARMAX' form is employed in the neural network bushing module. A numerical example is carried out to verify the developed bushing model.

전방향에 대해 선형조합으로 표현하고 있다.

1. 서론

고무부싱은 변위와 주파수에 대해서 모두 비선형 특성을 보인다. 또한 주기적인 가진에 대해 히스테리시스(hysteresis) 현상을 나타낸다. 현재 일반적으로 사용하고 있는 부상모델은 켈빈-보이트(Kelvin-Voight) 모형으로써 부싱을 세 방향의 선형 스프링-댐퍼와 세 방향의 회전스프링-댐퍼의 선형조합으로 표현하고 있다¹⁾. 다물체 동역학 해석 프로그램인 DADS²⁾나 ADAMS³⁾에서는 부싱을 힘요소로 제공하고 있으며, 선형강성요소와 선형 점성요소로 세 방향의 병진방향과 세 방향의 회

그러나, 이러한 부상모델에서는 부싱이 가지는 히스테리시스를 재현할 수가 없다. Lee⁴⁾는 부싱의 재료역학적 측면에서 접근하여 리아니스(Lianis)식으로부터 피핀-라저스(Pipkin-Rogers) 모델을 구성하였고 실험으로부터 모델링에 필요한 계수를 추정하였다. 축방향 모드, 비틀림 모드, 반경방향 모드별로 결과를 실험과 비교하고 있으며 어느 정도 믿을만한 결과를 보여주지만, 실제적인 3축이 동시에 가진되어 커플(couple) 될 때의 결과는 보여주지 못했다. 이 방법은 수식전개가 복잡하기도 하지만, 실험 또한 어렵기 때문이다.

최근에 차량동역학에서도 신경망 알고리즘을 적극 도입하여 해석에 응용하고 있다. Fash⁵⁾는 인공신경망을 구성하여 속 업소바(shock absorber)의 거동을 모델링하였고, Kim⁶⁾은 신경망을 이용하여 현가 시스템을 모델링하였다. Barber⁷⁾는 신경망을 이용하여 부싱 및 속 업소바의 비선형 특성을 반

† 부경대학교 기계공학부

E-mail : jhsohn@pknu.ac.kr

TEL : (051)620-1539 FAX : (051)620-1405

* 부경대 대학원

** 부경대 기계공학부

*** 부산대 대학원

****부산대 기계공학부

영할 수 있음을 보이고, 다물체 동역학 해석 프로그램에 동적 부상모델로 구현할 수 있음을 시사하였지만 구체적인 예는 보여주지 않았다. Sohn⁸⁾은 DADS의 사용자 정의 서브루틴을 이용하여 신경망 부상모델을 구현하였다.

본 논문에서는 부상의 히스테리시스를 잘 반영하고 주파수 및 변위의 비선형성을 모두 고려할 수 있는 인공신경망 부상모델을 현재 차량동역학 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 프로그램인 ADAMS에서 사용가능하도록 개발하였다. MATLAB⁹⁾을 이용하여 신경망 알고리즘을 구성하고 학습시켰으며, Simulink를 이용하여 ADAMS와 연결시켰다. 신경망 학습을 위해 오류 역전파 알고리즘을 이용하고, 나렌드라 알고리즘(Narendra algorithm)¹⁰⁾을 도입하였다. MTS 장비를 이용하여 진폭과 주파수에 따른 부상력을 측정하였고, 랜덤(random) 입력에 대한 부상의 전달력 또한 측정하였다. 시험결과를 본 연구에서 개발한 신경망 프로그램을 통해 학습시켰으며, 학습된 가중치를 이용하여 차량동역학 해석 시에 동적 부상모델이 될 수 있도록 차량동역학 해석 모듈로 구현하였다. 2장에 부상의 특성시험 장치 및 시험 결과를 도시하였고, 3장에 신경망을 이용한 부상의 모델링에 대해 기술하였으며, 4장에 수치예제 및 차량예제를 보였고, 결론을 5장에 나타내었다.

2. 인공신경망 부상모델링

2.1 신경망 구성

신경망 알고리즘은 블랙박스 모델링 기법으로써 시스템의 입출력관계만을 고려하여 모델링 하게 된다. 일반적으로 신경망은 입력을 받아들이는 입력층과 결과를 내보내는 출력층 그리고 신경망의 학습 능력을 향상시키기 위한 은닉층으로 구성된다. 신경망을 학습시키기 위한 여러 알고리즘들이 개발되어져 있으며, 본 연구에서는 오차 역전파 알고리즘(error back propagation algorithm)을 이용하였다. 부상은 동적 시스템으로써 과거의 시스템 상태변수가 현재의 출력에 영향을 미치게 된다. 이러한 시스템의 입출력은 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$y^t = f(u^t, u^{t-1}, \dots, u^{t-m}, y^{t-1}, \dots, y^{t-n}) \quad (1)$$

따라서 과거의 입력과 출력을 신경망의 입력층에 포함시켰다. 신경망 입력층 노드수는 현재의 변위와 과거의 변위 및 출력을 고려하여 21개로 선정하였다. 신경망의 은닉층은 2개의 층으로 구성하여 첫 번째 은닉층 노드수는 10개, 두 번째 은닉층 노드수는 9개로 선정하였으며, 신경망 출력층 노드수는 1개로, 부상력을 의미한다. 이는 여러 번의 테스트 결과 가장 우수한 결과를 보이는 개수로 선정한 것이다. 본 연구에서는 은닉층 뉴런의 비선형 활성화 함수(activation function)로 식(2)와 같이 표현되는 하이퍼볼릭 탄젠트 시그모이드 함수(hyperbolic tangent sigmoid function)를 사용하였다. 출력층 활성화 함수는 선형함수(linear function)를 사용하였다.

$$y = \tanh ax \quad (2)$$

부상의 변형량과 부상력을 실제 크기의 입력으로 줄 경우, 값의 크기(scale)차이로 인해 활성화 함수의 포화영역에서 작동할 가능성이 높아진다. 따라서, 입력 값과 출력 값을 정규화(normalizing)시켜주어야 한다. 본 연구에서는 부상의 변위 및 부상력을 최대 값(maximum value)으로 나누어 준 후 데이터들을 하이퍼볼릭 탄젠트 시그모이드 함수를 통과시켜서 정규화를 해 주었다. Fig.1에 본 연구에서 사용한 신경망의 구성도를 도시하였다.

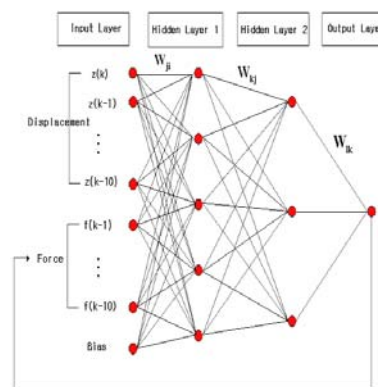


Fig.1 Structure of the neural network

2.2 신경망 학습

신경망을 구성하고 학습시키기 위해 DADS용 user subroutine과 ADAMS용 m-file을 작성하였다. Fig.2는 랜덤 가진 했을 때의 부상력이다. Fig.3은 부상변위에 대한 부상력을 도시한 것이다.

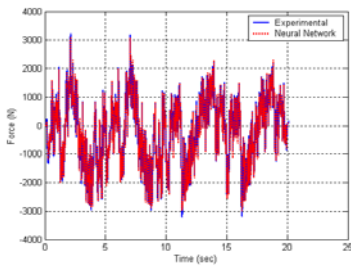


Fig.2 Bushing forces

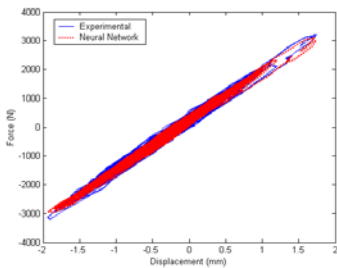


Fig.3 Displacement vs Bushing forces

3. 부상시험

3.1 시험장치

Fig.4에 부상의 반경방향 특성을 시험하기 위해 제작한 지그를 나타내었다.



Fig.4 Radial JIG for a bushing test

3.2 시험결과

부상의 히스테리시스 특성을 관찰하기 위하여 조화가진 시험을 시행하였다. 가진은 식(3)과 같은 함수로 주었으며, Kuo¹¹⁾가 시행한 시험방법을 참고하여 실시하였다.

$$\delta(t) = \delta_0 \sin 2\pi f t \quad (3)$$

식(3)에서 주파수(f)를 2, 5, 10, 15, 20 Hz의 5

종류로 바꾸면서 실험하였으며, 반경 방향 가진 진폭은 0.35, 0.7, 1.0, 1.35, 1.7, 2.0, 2.5, 3.0 mm의 8종류로 바꾸면서 실험하였다. 10Hz 가진을 주었을 때 가진 진폭에 따른 반경방향 힘을 Fig.5에 도시하였고, 4mm 가진 진폭에 주파수에 따른 반경방향 힘을 Fig.6에 각각 도시하였다. Fig.5에서 진폭이 커질수록 부상강성의 비선형성이 커짐을 알 수 있다. 또한, Fig.6에서와 같이 주파수가 증가할수록 비선형성이 증가함을 볼 수 있다.

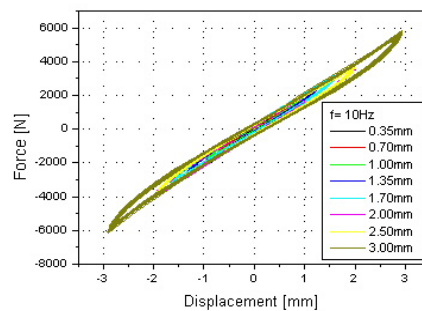


Fig.5 Radial forces due to amplitude changes

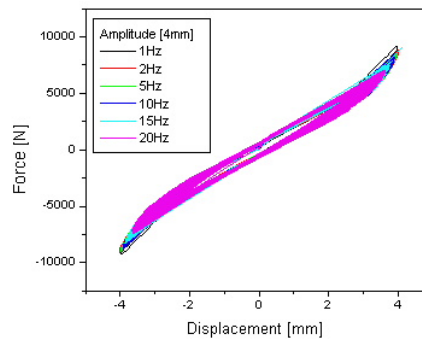


Fig.6 Radial forces due to frequency changes

4. 수치 예제

4.1 DADS용 부상모델

신경망을 이용한 실험적 부상모델을 검증하기 위해 실험과 똑같은 동적 모델을 범용 다물체 동역학 해석 프로그램인 DADS를 이용하여 구성하였다. DADS에서의 실험적 부상모델은 프로그램 내의 사용자 정의 루틴(user written subroutine)을 이용하여 구현하였다. 동역학 해석 프로그램에서 사용할 수 있는 부상 모델을 만들기 위해 인터페이스 모듈을 구성하였다. 동역학 해석 프로그램

에서 신경망을 이용한 부상력을 계산하는 절차는 아래와 같다.

- 1) 신경망의 가중치 계수(weighting factors)를 저장해 둔다.
- 2) 현재의 물체 위치정보로부터 부상 변형량을 계산한다.
- 3) 현재 변형량을 신경망을 통과시켜 현재 부상력을 계산한다.
- 4) 부상력을 물체 중심에 작용하는 힘과 모멘트로 바꾸어 준다.
- 5) 현재 스텝이 수정되어진 스텝(corrector step)이면 현재의 변위와 힘을 버퍼(buffer)에 저장해 둔다.

Fig.7에 DADS로 모델링한 부상모델을 나타내었다. 지면(ground)과 가진기(excitation device) 사이를 부상으로 연결하였고, 가진기를 지면과 병진조인트로 연결하였다. 병진조인트에 랜덤 가진을 주어 가진에 따른 부상력을 Fig.8에 도시하였다. 시뮬레이션 결과는 실험결과를 잘 예측하고 있음을 보여준다.

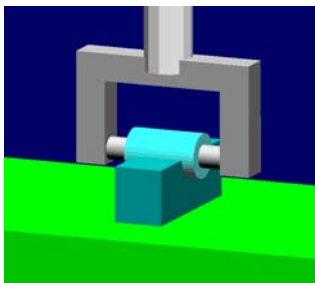


Fig.7 Dynamic model of a bushing lateral test

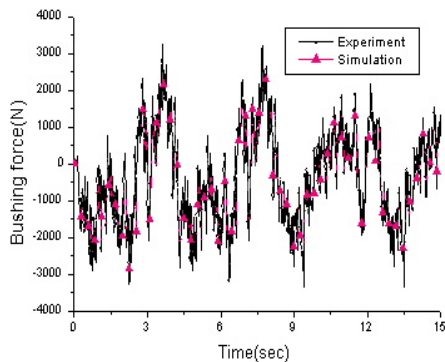


Fig.8 Bushing forces

4.2 ADAMS용 부상모델

범용 다물체 동역학 해석 프로그램인 ADAMS에서 신경망 부상모델을 사용할 수 있도록 모듈을 구성하였다. 본 연구에서는 Fig.9에서처럼 Simulink를 이용하여 ADAMS와의 인터페이스를 구현하였다. Simulink는 MATLAB의 확장자로서 동적 시스템을 시뮬레이션 하는데 있어서 그래픽을 사용할 수 있으므로 사용자가 편리하도록 만든 프로그램이다. 그래픽을 사용한 각 아이콘 블록은 실제로 제어시스템에서 블록 다이어그램을 구성할 때 각 블록과 같은 역할을 하도록 만들어졌다. 마우스를 사용해서 각 아이콘들의 모델을 집어 연결하면 자동적으로 MATLAB code를 통해 계산이 이루어진다. Fig.10에 ADAMS를 이용하여 모델링한 부상을 나타내었고, Fig.11에 부상력을 비교하였다. Fig.12에는 부상변위에 대한 부상력을 각각 비교하였다. 시뮬레이션 결과는 실험결과를 잘 예측함을 보여주고 있다.

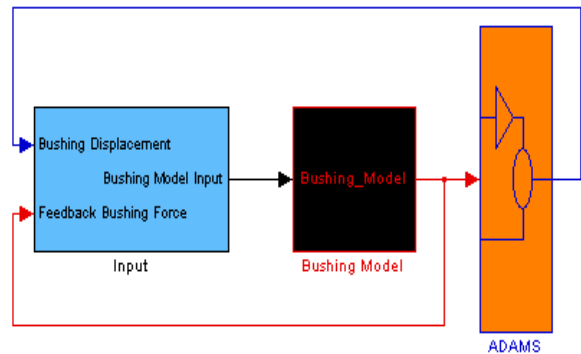


Fig. 9 Structure in the Simulink

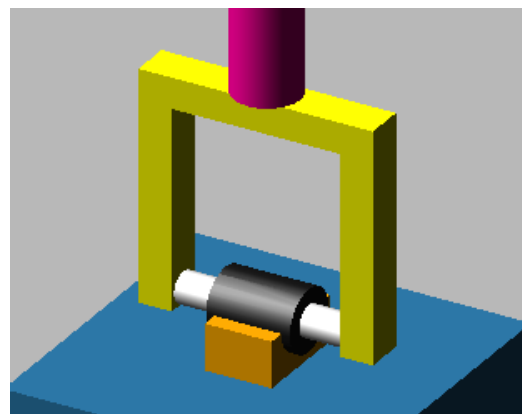


Fig.10 Dynamic model of a bushing lateral test

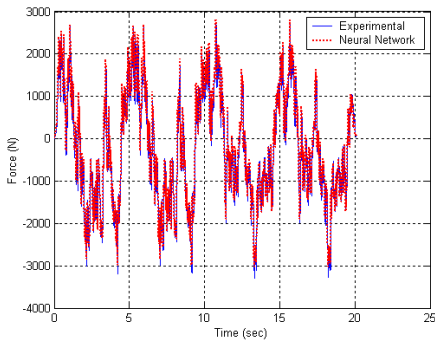


Fig.11 Bushing forces

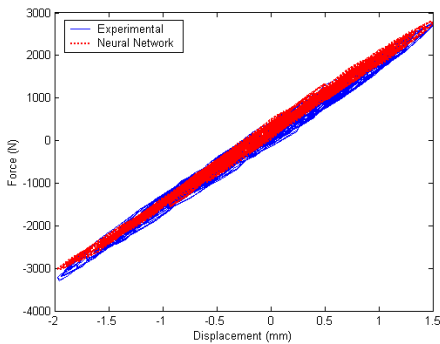


Fig.12 Displacement vs bushing forces

4.3 차량예제

본 연구에서 개발한 부싱모델을 이용하여 1/2 차량(half car) 모델에 적용하여 그 응용을 보이고자 한다. Fig.13은 본 논문에서 사용한 후륜 현가장치를 보여주고 있다. 토션빔(torsion beam)이 있는 현가장치로써 현가 댐퍼는 트레일링 암(trailing arm)과 부싱으로 연결되어 있고 차체(chassis)와는 구면조인트(spherical joint)로 연결되어 있으며, 토션빔은 트레일링 암에 용접되어 있다. 본 연구에서는 현가댐퍼가 트레일링 암과 연결되어 있는 부싱을 인공신경망을 이용하여 모델링하였다. 타이어에 수직 방향으로 양쪽 바퀴에 동일하게 랜덤 가진(random excitation)을 주어서 부싱의 변형을 일으켰으며, Fig.14는 ADAMS가 제공하는 선형 부싱요소로 모델링 하였을 때의 부싱 변위에 대한 부싱력을, Fig.15는 신경망 부싱모델을 사용하였을 때의 결과이다. 비슷한 경향을 보여주고 있으며, 좀 더 정확한 부싱모델을 사용했으므로 향후 현가장치의 설계에 보다 정확성을 기할 수 있을 것으로 사료된다.

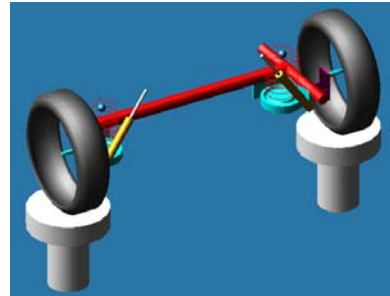


Fig.13 Half car model

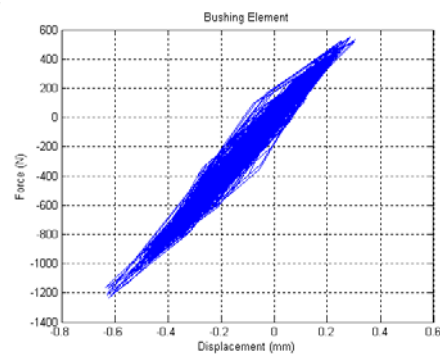


Fig.14 Displacement vs Force (Linear model)

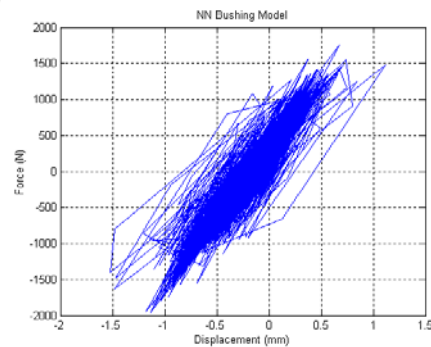


Fig.15 Displacement vs Force (NN model)

4. 결론

1) 신경망이론을 적용하여 부싱의 변위에 대한 힘을 예측할 수 있는 부싱모델을 개발하였다. 신경망을 위하여 오류 역전파 알고리즘과 나렌드라 알고리즘을 도입하여 부싱의 히스테리시스를 재현하고자 하였다.

2) 신경망 알고리즘을 위한 입력을 얻기 위해 MTS 내구시험기를 이용하여 부싱의 반경방향의 힘과 변위와의 관계를 주파수 및 진폭별로 시험하였고, 랜덤 가진에 대한 시험도 행하였다.

3) 부싱 시험결과는 신경망을 통해 학습되었으며, 학습알고리즘은 Fortran code 및 MATLAB 프로그램을 이

용하여 구성하였다. 범용 다물체동역학 해석프로그램인 DADS와 ADAMS에서 사용가능하도록 인터페이스 루틴을 개발하였고, 수치예제를 통하여 개발된 부상모듈이 랜덤 입력에 대해 잘 예측함을 확인하였다.

4) 차량 예제를 통하여 개발된 신경망 부상모듈의 유용성을 보였다.

후 기

본 논문은 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역전략산업 석박사연구인력 양성사업 및 과학기술부의 국가지정연구실 사업(M1-0203-00-001)의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, Y. C., Kim, K. S., Yoo, W. S., Kim, O. J., 1998, "Development of CAE Tools for Vehicle Suspension Design (I) - Development of a Bushing Module", *Transactions of KSAE*, Vol.6, No.6, pp.31-39.
- (2) CADSI, 1995, *DADS Revision 8.0 User's Manual*, Oakdale, IA, USA.
- (3) M.D.I, 1994, *ADAMS Version 8.0 User's Guide*, An Arbor, MI, USA.
- (4) Lee, S. B., Wineman, A., 2000, "A Model for Non-linear Viscoelastic Coupled Mode Response of an Elastomeric Bushings", *Int. J. of Non-Linear Mechanics*, Vol. 35, pp.177-199.
- (5) Fash, J. W., 1994, "Modeling of Shock Absorber Behavior using Artificial Neural Networks", *SAE 940248*.
- (6) Kim, I. Y., Chong, K. T., No, T. S., Hong, D. P., 1997, "Empirical Closed Loop Modeling of a Suspension System Using Neural Network", *KSPE*, Vol.14, No.7, pp.29-38.
- (7) Barber, A. J., 2000, "Accurate Models for Complex Vehicle Components using Empirical Methods", *SAE 2000-01-1625*.
- (8) Sohn, J. H., Yoo, W. S., Park, D. W., 2003, "Empirical Bushing Model using Artificial Neural Network", *KSAE*, Vol. 11, No. 14, pp.151-157.
- (9) Richard C, Dorf, 2003, *Control Analysis and MATLAB and Simulink Application*.
- (10) Narendra, K. S., Pathasarathy, K., 1990, "Identification and Control of Dynamic System Using Neural Networks", *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol.1, No.1, pp.4-27.
- (11) Kuo, E. Y., 1997, "Testing and Characterization of Elastomeric Bushings for Large Deflection Behavior", *SAE 970099*.