

CAE를 이용한 브레이크 저더 해석

김홍주*, 김 석, 강희용, 양성모

(전북대학교 기계항공시스템공학부, 자동차신기술연구소)

An automobile brake judder analysis using CAE

H. J. Kim, S. Kim, H. Y. Kang S. M. Yang

(Division of Mechanical & Aerospace System Engineering, Chonbuk National University)

ABSTRACT

Brake judder, which occurs when brakes are suddenly applied to a vehicle driving at high speed, affects the driver's safety to a great extent. It also has a low frequency that drivers can easily feel. Among these presented, none offered studies using modeling of actual brakes in computer simulation in order to recreate the brake judder phenomenon, and most of them directly applied the frequency generated by the judder. To resolve this issue, this study hopes to develop a computer model that can recreate the phenomenon of brake judder. In this paper, in order to examine the vibration problem occurring when brake is applied on the test car, the multibody dynamic analysis program ADAMS was used to develop a computer model that can recreate the actual braking mechanism while breaking away from the existing understanding of brakes. Thus the existence of the brake judder phenomenon due to DTV(Disk Thickness Variation) and wheel rotating speed was examined through the developed model.

Key Words : Brake judder(브레이크 저더), DTV(디스크 두께변동), ADAMS, CAE

1. 서 론

현대는 제품 생산 주기가 갈수록 빨라지고 있으며, 이러한 제품 주기에 맞추기 위해서는 CAE의 활용이 불가피하다. 복잡하고 다양한 실제조건을 효율적으로 재현할 수 있는 컴퓨터 모델 및 해석을 활용하여, 제품개발비용 뿐만 아니라 개발에 소요되는 시간까지 감소시킬 수 있다.

차량의 제동 장치는 가장 중요한 차량 구성요소중 하나이다. 이러한 제동장치를 해석하는데 있어서 실제 차량 주행시험 및 다이내모 실험만으로 제동장치에서 발생하는 현상을 파악하기에는 시간 및 비용 효과 측면에서 비효율적이다. 따라서 실험결과를 가장 근접하게 재현할 수 있는 컴퓨터 해석 모델은 자동차 설계에 있어서 필수과정으로 인정되고 있다.

브레이크 저더 현상은 차량이 고속 주행 시에 급속하게 제동력을 가할 경우 발생하며, 이것은 운전자의 안전에 악영향을 끼친다. 저더는 저주파로써(10 ~ 30 Hz) 운전자가 쉽게 느낄 수 있는 것이기

도 하다.¹⁾²⁾ 이러한 현상을 해석하고 설계에 반영하기 위하여 수행한 연구들 중 Shin³⁾은 브레이크 시스템을 2 자유도로 모델링하여 브레이크 노이즈의 원인이 되는 가진력을 패드와 디스크의 속도차와 마찰계수의 기울기로 정의하여 패드의 불규칙 움직임에 대해 연구하였다. Ouyang⁴⁾은 패드의 스틱-슬립 현상이 디스크의 고유진동수와 일치하게 될 때 일어나는 현상에 대해 연구하였다. 한갑수⁵⁾, 김진수⁶⁾는 소형버스의 브레이크 저더 해석에서 브레이크 시스템을 모델링하지 않고 저더 주파수를 직접 입력하여 사용하였으며, 조연호⁷⁾는 디스크 브레이크를 모델링하여 스쿼 및 저더 해석을 수행하였다.

위의 연구들은 브레이크 저더 현상을 구현하는데 있어서 컴퓨터 시뮬레이션 시에 브레이크를 모델링하여 저더 현상을 구현할 수 있는 모델에 대한 연구내용은 진행되어 있지 않다. 또한 기계섭⁸⁾, 지영춘⁹⁾은 저더 발생 주파수를 직접 입력하여 다른 구성 요소(차체, 서스펜션)들의 영향을 평가하였다.

본 논문에서는 지금까지 연구되어 왔던 CAE 모델의 단점을 보완하고 브레이크 시스템에서 발생되

는 저더 문제를 해결하기 위하여, 기존 연구에서 중요시 하지 않았던 실제 브레이크 저더의 발생원인, 즉 브레이크 시스템에서 가진이 되는 가진력을 DTV(Disk Thickness Variation)와 디스크의 회전속도로 정의하여 모델링 및 해석하고, 실제 DTV의 영향에 따른 브레이크 토크 변동이 발생할 때 브레이크 시스템을 적용한 차량에서 저더 현상을 구현할 수 있는 브레이크 저더 CAE 모델을 MSC.ADAMS 소프트웨어¹¹⁾를 사용하여 개발하였다.

2. 시뮬레이션 방법

2.1 2자유도 모델

Fig. 1 은 기존 연구 논문에서 사용한 브레이크 시스템의 2자유도 모델을 ADAMS에서 표현한 것이다. 시스템의 가진력은 패드와 디스크 사이의 마찰 계수가 정지마찰에서 동마찰로 변할 때의 기율기 그리고 패드와 디스크의 속도차에 의해 정의된다.

m_1, m_2 는 각각 패드와 디스크의 질량이며, F_f 는 가진력으로 작용하는 힘이다. 시스템에 작용하게 되는 가진력 F_f 는 N (브레이크력), α (정지마찰에서 동마찰계수로 변할 때의 기율기)와 v_d (패드와 디스크의 속도차)로 정의하고 시스템의 입력 값들은 $m_1 = 1, m_2 = 1, k_1 = 1, k_2 = 10, c_1 = 0.01, c_2 = 0.01, N = 10, \alpha = 0.001$ 를 적용하여 ADAMS에서 시뮬레이션 하였다.

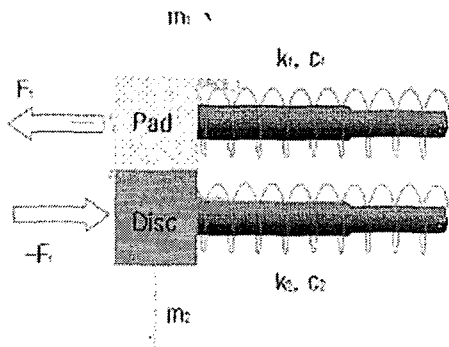


Fig. 1 ADAMS model of a simplified brake system

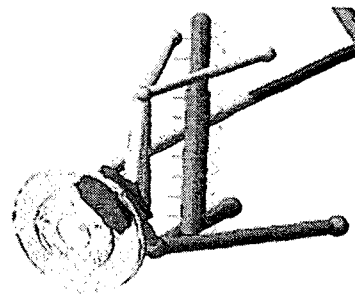
2.2 DTV를 고려한 브레이크 모델

ADAMS에서 브레이크 시스템을 모델링하기 위해 브레이크 구성요소인 패드와 디스크의 CAD 데이터를 파라솔리드 형식으로 변환하여 불러들였다. 일반적으로 ADAMS에서는 CAD 데이터의 형상에 따라 질량과, 관성값은 그대로 유지하게 된다. ADAMS에서 브레이크의 마찰을 구현하기 위해 ADAMS에서 제공하는 컨택요소를 적용하였으며, 브레이크 유압 요소는 모델링 시 제외하였다. 컨택요소를 적용하기

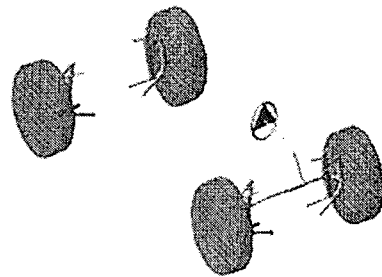
위하여 사용된 강성 k , 댐핑 c 의 값과 마찰계수의 값은 일반적으로 사용되는 값을 적용하였으며, 마찰의 경우에 정지마찰계수와 동마찰 계수를 쿨롱 마찰, 즉 두 물체의 상대 속도로 정의하여, ADAMS에서 스틱-슬립의 현상을 구현하였다.⁷⁾

Fig. 2. (a)는 ADAMS에서 브레이크 모델을 구성한 것이다. ADAMS 시뮬레이션에 사용된 차량 모델은 Fig. 2. (b)와 같은 모델이며, 총 18 자유도를 갖는 차량모델이다. 서스펜션은 더블 위시본 타입을 사용하였으며, 축입쇼버의 스프링 상수와 댐핑계수는 $k = 10,000 \text{ N/m}, c = 1250 \text{ N-s/m}$ 의 선형값을 사용하였다.

일반적인 브레이크 저더 현상을 구현하기 위하여 차량속도 120 km/h ~ 60 km/h의 구간에서 데이터를 측정한다. 즉 차량속도가 120 km/h에 도달했을 때 브레이크력을 입력하며, 제동감속도는 0.3g, 브레이크력 배분은 6:4의 전후 배분력을 고려한다. 브레이크 디스크를 정상적으로 모델링 하였을 경우는 주파수가 발생하지 않았으므로 브레이크 저더 현상을 발생시키기 위하여 DTV를 73 μm 로 가정¹⁰⁾하여 해석을 수행하였다. 차량속도와 브레이크력, DTV를 변화시켜 가면서 시뮬레이션하여 결과를 도출하였다.



(a) Brake system model



(b) Test vehicle model

Fig. 2 Brake system and test vehicle model using ADAMS

3. 시뮬레이션 결과

3.1 2자유도 모델

Fig. 3은 시스템의 가진력이 되는 F_f 의 변화를 나타낸 것이다. F_f 가 시간이 지나면서 안정화되지만 발산이 되다가 다시 안정화되고 또다시 발산하게 되는 불규칙적인 변화를 보인다. 브레이크력 N 및 기울기 α 의 증감에 의하여 시스템의 안정성 및 불안정성이 결정되게 된다. Fig. 4는 패드의 속도 변화를 나타낸 것이다. 패드의 속도가 양에서 음으로 변할아가면서 변하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 곧 브레이크 시스템의 가진원인이 된다. Fig. 2, Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 가진력 F_f 를 어떻게 적용하는냐에 따라서 시스템의 이상 유무를 판단할 수 있다.

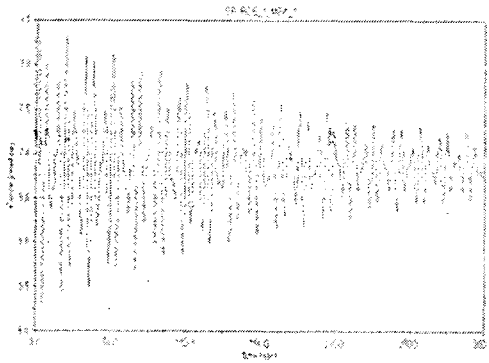


Fig. 3 Exciting force F_f in a simplified model

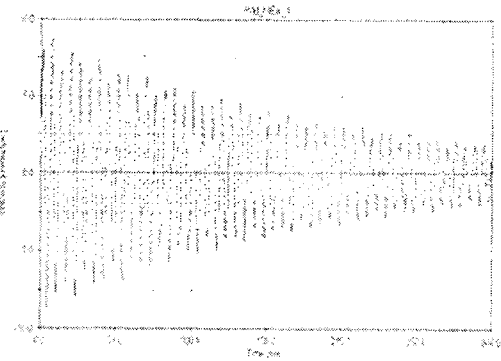


Fig. 4 Velocity of a pad in a simplified model

3.2 브레이크 저더 ADAMS 모델

차량 모델에서 스티어링 휠의 가속도와 타이어 휠에서의 BTV(Brake torque variation)를 측정하여 워터폴 그래프로 표현하였다. 일반적으로 측정된 변위, 속도, 가속도 및 각속도, 힘 등 이러한 값들은 특정 진동수가 생기면, 어떤 값들을 측정하더라도 측정된 값 속의 주파수 특성은 동일하다. DTV에 의하여 발생된 BTV에서 나타나는 주파수 특성이 시스템의 가

진원인이 된다.

Fig. 5. (a)는 각각 앞에서 제시한 DTV를 입력으로 사용했을 때 발생하는 토크변동을 측정하여 워터폴 그래프로 나타낸 것이며, (b)는 이때의 스티어링 휠에서 발생하는 가속도 변화를 워터폴 그래프로 표시한 것이다.

타이어 휠 회전수의 3차 조화성분이 차량속도가 감소함에 따라서 주파수가 증가 하였다가 사라지는 것을 볼 수 있다. 이것은 시뮬레이션 시에 DTV의 발생 위치를 전륜 1바퀴에 가했으므로 제동시점에서 동일한 제동력을 가지고 작동하는 것이 아니므로 DTV가 발생된 타이어의 휠 회전수와 정상적으로 제동력이 걸린 타이어의 휠 회전수 사이에서 차이가 발생하기 때문에 일어나는 현상으로 판단된다.

휠 회전수의 1차 성분(13.5Hz)이 주 특성으로 나타났으며, 이것은 일반적인 저더 주파수 10 ~ 30 Hz의 범위 내에 있으며 따라서 디스크 브레이크 저더 모델링 및 해석결과가 저더특성을 나타내고 있다고 판단할 수 있다.

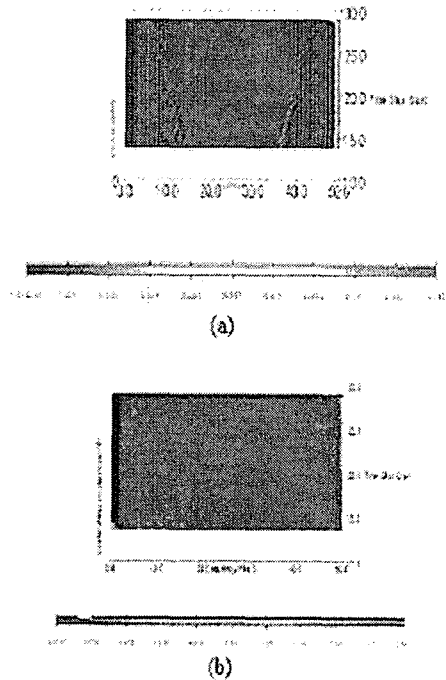


Fig. 5 Waterfall graph of BTV and steering wheel in the test vehicle

3.3 입력 파라미터들의 변화에 의한 결과

브레이크 저더 주파수를 발생시키는 주된 원인인 차량속도와 브레이크력, DTV를 입력값으로 사용하여 Table. 1과 같은 조건하에서 저더 주파수 발생 시 시뮬레이션을 하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

첫째, DTV가 73 μm 로 일정한 상태에서 제동력과 차량속도의 변화에 의하여 저더 주파수가 발생하는 지에 대해 확인하였다. 제동력이 0.3g, 0.5g일 경우에는 속도 변화에 상관없이 주파수 특성이 나타났으며, 제동력을 0.1g로 입력했을 경우에는 차량속도 30 km/h, 70 km/h에서 주파수가 발생되지 않았다. 반면 120 km/h에서 제동 입력 시에는 진폭은 낮았지만, 주파수 특성이 나타났다.

둘째, 제동력이 0.3g로 일정한 상태에서 DTV와 차량속도 변화에 의한 현상은 DTV가 73 μm , 120 μm 일 경우 속도변화에 상관없이 주파수가 발생되었으며, DTV가 40 μm 일 경우 30 km/h, 70 km/h에서는 주파수 특성이 나타나지 않았다.

셋째, 브레이크력과 DTV가 작은 경우에도 시스템의 가진력 발생은 나타났지만, 특정 주파수가 발생되기 위해서는 일정한 조건이 있어야 함을 확인하였다.

위의 결과로 볼 때 시스템에서 발생하는 가진력이 저더 주파수로 나타나기 위해서는 차량속도(휠의 회전속도)가 고속이거나, 브레이크력이 큰 경우, DTV가 큰 경우가 되어야 한다. 이것은 곧 본 논문에서 사용한 시뮬레이션 모델이 브레이크 저더 현상을 구현할 수 있는 모델을 의미한다.

Table. 1 Input parameters in the ADAMS simulation

Brake force	Vehicle velocity	DTV
0.1 g	30 km/h	40 μm
0.3 g	70 km/h	73 μm
0.5 g	120 km/h	120 μm

4. 결 론

브레이크에서 나타나는 이상 현상들 중 브레이크 저더의 가진 원인을 브레이크 디스크와 패드의 속도차와 마찰계수의 기울기로 정의하는 것은 실제 브레이크 저더의 발생원인과는 맞지 않는 경향이 있으며, 브레이크 시스템에서 가진력으로 작용하게 되는 DTV와 디스크 회전속도, 브레이크력 변화에 의한 영향이 저더 현상에 지배적인 것을 확인하였다.

또한 기존의 논문에서 저더 주파수를 다이나모 실험에서 얻어진 BTV의 주파수를 직접 입력한 경우와 달리, BTV의 원인이 되는 DTV를 모델링 하여 가진력으로 사용함으로써, 다양한 인자들의 영향을 평가

할 수 있는 브레이크 저더 해석을 위한 CAE모델을 개발 하였다.

참고문헌

- Alexander de Vries and Mark Wagner, "The Brake Judder Phenomenon," SAE 920554, 1992.
- H.G. Engel, V. Hassiotis, and R. Tiemann, "System approach to Brake Judder," SAE 945041, 1994.
- K.Shin, M.J.Brennan, J.-E. OH, and C.J Harris, "Analysis of Disc Brake Noise Using A Two-Degree-Of-Freedom Model," Journal of sound and vibration, Vol. 254, No. 5, pp. 837-848, 2002.
- H.Ouyang, J.E. Mottershead, M.P. Cartmell, and D.J. Brookfield, "Friction-induced vibration of an elastic slider on a vibrating disc," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 41, pp. 325-336, 1999.
- 한갑수, "CAE를 이용한 소형버스의 브레이크 저더 모델링 및 해석," 석사학위논문, 전북대학교, 2000.
- Jin-Soo Kim and Eun-Suk Suh, "Brake Judder Analysis for Small Size Bus," 한국정밀공학회, Vol 2, No. 2, pp. 31-37, 2001.
- 조연호, 유승환, 김영배, "다물체 동역학 모델을 이용한 디스크 브레이크의 진동해석," 한국자동차공학회, 제3권, 2호, pp. 836-841, 2002.
- 이계섭, 서권희, 국종영, 천인범, "중형버스의 브레이크 저더 현상 개선에 대한 해석적 고찰," 한국자동차공학회논문집, 제9권, 4호, pp. 148-156, 1999.
- 지영춘, 정인승, 전남일, "브레이크 저더 해석을 위한 차량동역학 모델링 및 검증," 한국자동차공학회, 제3권, 2호, 2002.
- 홍일민, 이원섭, 이종수, "실차상태에서의 제동시 이상떨림 현상에 관한 실험적 연구," 한국소음진동공학회논문집, 제12권, 5호, pp. 338-345, 2002.
- ADAMS User's manual v11.0