불규칙 하중을 받는 자전거 브레이크의 피로 해석

조 재 웅¹⁾ · 한 문 식^{*2)}

공주대학교 기계자동차공학부¹⁾ · 계명대학교 기계자동차공학과²⁾

Fatigue Analysis of Bike Brake under Nonuniform Load

Jaeung Cho¹⁾ · Moonsik Han^{*2)}

¹⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Kongju National University, Chungnam 330-717, Korea

²⁾Department of Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea

(Received 14 November 2011 / Revised 17 January 2012 / Accepted 30 January 2012)

Abstract : This study investigates structural and fatigue analyses of bike brake. Maximum equivalent stress of the model of mountain bike is 4 times as much as the model of general bike at static analysis. In cases of mountain and general bikes, maximum damage frequency at load of 'SAE bracket history' with the severest change of load becomes as much as 16 times than the most stable load of 'Sample history' among the nonuniform fatigue loads. In case of mountain bike, the possibility of maximum damage becomes 3% at the load of 'Sample history' with the average stress of 0 to -3×10^4 MPa and the amplitude stress of 0 to 10^4 MPa. In case of general bike, the possibility of maximum damage becomes 3% at the load of 'Sample history' with the average stress of 0 to -0.8×10^4 MPa and the amplitude stress of 0 to 0.2×10^4 MPa. This stress state can be shown as 5 to 6 times more than the damage possibility of 'SAE bracket history' or 'SAE transmission'. The analysis result of this study can be effectively utilized for the safe design of bike brake.

Key words : Bike brake(자전거 브레이크), Mountain bike(산악형 자전거), General bike(일반형 자전거), Nonuniform fatigue loads(불규칙 피로 하중들), Fatigue life(피로수명), Fatigue damage(피로 손상), Damage frequency(손상 빈도수)

1. 서 론

본 연구는 우리 일상생활에서 가장 흔히 접할 수 있는 이동수단인 자전거의 브레이크에 대한 피로 해석을 하였다. 최근의 자전거는 빠르고 적은 힘으로 보다 멀리 갈 수 있는 하이브리드 형식의 자전거를 개발 하고 또한 그 스피드에 맞춰 정지할 수 있는 힘을 접목시키는 노력을 많이 하고 있다. 이에 자전거의 브레이크^{1,2)}는 매우 중요한 제동장치로서 운동하고 있는 기계의 속도를 감속하거나 정지시키는 장치이기 때문에 절대 없어서는 안 되는 요소이다. 따라서 자전거에 유효하게 작동되는 브레이크의 개

발이 필요하다. 자전거에 작용하는 하중은 도로 주행 시 일정하지 않은 도로조건과 외적요인으로 인한 랜덤하중이 발생한다. 또한 자전거의 주행 중 반복하중으로 인한 부품의 피로파손에 대비한 설계³⁻⁵⁾의 필요성이 증대되고 있다. 보통의 자전거 브레이크는 림의 안쪽 또는 옆쪽에서 브레이크 블록이 림을 압착하는 방식의 림브레이크를 사용하고 있다. 브레이크레버는 사용되는 조향핸들에 따라 그 형상이 달라지는데, 본 연구에서는 산악에서 사용되는 MTB 자전거 브레이크 및 일반 자전거 브레이크의 3D모델에 대한 구조 해석 및 불규칙 피로 하중을 가하여 피로 해석함으로써 자전거 브레이크의 구조 안전성 및 내구성 향상을 제시할 수 있다.⁶⁻⁸⁾

*Corresponding author, E-mail: sheffhan@kmu.ac.kr

2. 모델 및 해석

2.1 연구 모델

Photo. 1은 대표적으로 일반 자전거에서의 브레이크가 장착된 사진이다.

Photo. 1 Brake of general bike

본 연구에서는 자전거 브레이크를 모델링 하여 Fig. 1 및 2와 같이 산악형(MTB) 및 일반형의 2가지의 형식으로 해석을 실시하였다. MTB 자전거 및 일반 자전거 브레이크에 대한 메쉬 모양과 이에 대한 정적 구속 및 피로 해석 시 평균 하중에 대한 구속 조건은 각각 Fig. 1 및 2와 같다. Fig. 1(b)의 구속 조건으로서는 위쪽 가운데에서 내면 A에서 원통형으로 고정이 되어 있고 오른쪽 끝 부분 B에서 베어링 하중으로 50N이 가해지고 있다. 또한 Fig. 2(b)의 구속 조건으로서는 왼쪽 끝 부분의 내면 B에서 원통형으로 고정이 되어 있고 오른쪽 끝 부분 A에서 베어링 하중이 50N이 가해지고 있다. 이에 대하여 Table 1에 산악형(MTB) 및 일반형에 대한 구속 조건들을 표기하였다.

Table 1 Constraint conditions of MTB & general brake model

Model	MTB brake model	General brake model
Constraint condition		
Cylindrical support	Omm (A)	Omm (B)
Bearing load	50N (B)	50N (A)

(a) Mesh configuration

(b) Constraint condition

Fig. 1 Mesh configuration and constraint condition at MTB brake model

(a) Mesh configuration

Cylindrical Support
Time: 1, s

A Bearing Load: 50, N
B Cylindrical Support: 0, mm

(b) Constraint condition

Fig. 2 Mesh configuration and constraint condition at general brake model

또한 Table 2와 같이 MTB 자전거 및 일반 자전거 브레이크는 구조용 강철의 물성치를 부여하였다.

Table 2 Material property

Young's modulus	$2 \times 10^5 \text{ MPa}$
Poisson's ratio	0.3
Density	$7.85 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$
Tensile yield strength	250MPa
Compressive yield strength	250MPa
Tensile ultimate strength	460MPa

2.2 해석 결과 및 고찰

자전거 브레이크는 자전거의 림을 잡아주는 역할을 할 때에 응력이 작용한다. Fig. 3 및 4는 산악형(MTB) 모델에서 정적 구조해석에서의 모델의 등가 응력과 전변형량을 각각 나타낸 것이다.

Fig. 3(a)의 경우에서의 산악형(MTB) 모델에서의 최대 등가응력은 76.675MPa로서 중앙의 핀 구멍 부위에서 나타났다. Fig. 3(b)에서의 일반형 브레이크의 경우인 18.487MPa의 크기보다 4배 이상 크게 받은 것을 알 수 있었다.

Fig. 3 Equivalent stresses at static analyses on MTB and general bikes

Fig. 4(a)의 경우에서의 산악형(MTB) 모델에서의 최대 전변형량은 0.06879mm로서 Fig. 4(b)에서의 일반형 브레이크의 경우인 0.052267mm로서 약간 더 받음을 알 수 있었다. 그리고 자전거 브레이크가 받는 피로 하중에 의한 피로수명과 파손에 대해서 해석하였다. 두 모델의 경계조건은 Fig. 1(b)와 Fig. 2(b)와 같다. Fig. 5는 불규칙 진폭 피로 하중조건들의 종류들을 나타낸 그림들로서 SAE bracket history, SAE transmission 및 Sample history의 경우를 각각 (a), (b) 및 (c)에 경과 사이클들에 대하여 응력 진폭의 배율들을 나타내고 있다. 그리고 일정한 평균 응력의 내역은 (d)와 같이 나타낸다. 그림에서도 볼 수 있는 바와 같이 국내 도로의 경우에, 'SAE bracket history'의 경우 (a)는 아주 가혹한 산악 지형에서의 도로에 적용할 수 있는 피로 하중조건이고 그 다음으로 'SAE transmission'의 경우 (b)는 대체로 비포장 도로의 경우로 적용될 수 있다. 그리고 아스팔트로 잘 포장된 도로의 경우는 'Sample history' (c)를 적용할 수 있다. 피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, Rainflow 매트릭스 및 Damage 매트릭스

Fig. 4 Total deformations at static analyses on MTB and general bikes

Fig. 5 Load histories at nonuniform fatigue load

들을 포함하고 있다. 각각의 출력들은 불규칙 진폭 하중들인 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’, ‘Sample history’의 하중들⁸⁾로서 서로 비교될 수 있다.

본 연구의 모델에 대하여 사용 가능 수명에 대한 등고선 그림들이 Fig. 6에 나타나 있다. 이 결과는 모델 전체에 걸쳐서 계산 될 수 있는데 불규칙 진폭 하중으로 본 모델에 작용됨으로써 이 결과의 등고선 그림들은 주어진 피로 분석에 대하여 사용 가능한 수명을 보여 주고 있다. 두 모델 모두 다 같은 피로 하중을 받고 있고 ‘SAE bracket history’, ‘SAE trans-

mission’ 및 ‘Sample history’를 받은 경우들에서의 피로 수명의 등고선을 Fig. 6에서와 같이 나타내었다. 두 모델 다 같은 양상을 나타내고 있고, 그림들에서 볼 수 있듯이 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’가 그 최대 수명이 3.3693×10^5 Cycle로 그 수명이 가장 작음을 알 수 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 그 수명이 2×10^7 Cycle 정도로 가장 긴 것을 알 수 있었다. 두 모델 공히, ‘Sample history’의 경우는 피로 수명은 ‘SAE bracket history’의 경우보다 약 60배 정도 수명이 길고 ‘SAE transmission’의 경우는 ‘SAE bracket history’의 경우보다 3.5배 정도 수명이 길어짐을 알 수 있었다. 두 가지 형태의 자전거 브레이크의 경우를 비교하면, MTB 브레이크의 자전거의 경우는 모델의 반 이상이 최대 수명을 유지하나 일반형 브레이크의 경우는 거의 수명을 유지하지를 못했다.

Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이, 등고선으로 된 피로 손상은 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나눈 것이다. 피로 손상이 아주 적은 상태의 부분으로서, 3가지 경우들을 공히 비교할 수 있다. Fig. 7에서 보면 두 모델 모두 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’에서 손상이 2968로 가장 많은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우는 그 손상이 50정도로 가장 적은 것을 알 수 있었다. 따라서 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다. 피로 수명에서 값으로 제시한 2968과 같은 숫자는 1사이클의 하중을 가하는 횟수들을 의미 한다.⁸⁾ 두 가지 형태의 자전거 브레이크의 경우를 비교하면, MTB 브레이크의 자전거의 경우는 모델의 반 이상이 최저의 파손을 유지하나 일반형 브레이크의 경우는 거의 최대의 파손을 나타내고 있었다.

Fig. 8은 임계 위치에 대한 Rainflow 매트릭스들에 대한 그림들로서 ‘SAE bracket history’, ‘SAE transmission’, ‘Sample history’들의 3가지 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용된다. 그리고 Fig. 8은 본 해석에 가해지는 하중 내역의 구성으로서 진폭 응력

(a) SAE bracket histories on MTB and general bikes

(b) SAE transmission on MTB and general bikes

(c) Sample histories on MTB and general bikes

Fig. 6 Contour plots of fatigue lives

과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데, z 축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된다. 여기서 진폭응력은 피로 사이클에서의 최대 응력과 최저 응력의 차이를 나타낸다. Fig. 8에서 보면, 두 모델 모두 거의 같은 피로 현상을 보였으며, 두 모델 모두 ‘SAE bracket history’의 경우가 상대적인 손상은 평균응력이 0부근의 상태에서 최대의 빈도수가 80정도로서 상대적인 손상을 많이 일으켜 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었다. 또한 ‘Sample history’

의 경우는 이 상태에서 최대의 빈도수가 5정도로서 손상을 가장 적게 일으켜 그 파손의 가능성이 가장 적음을 알 수 있었다. 따라서 MTB 및 일반 자전거 브레이크의 경우 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘SAE bracket history’의 경우가 가장 안정된 ‘Sample history’의 경우보다 그 최대 빈도수가 약 16배가량 더 많음을 알 수 있었다.

Fig. 9는 본 연구 모델에서 파손에 대한 임계 위치에서의 Damage 매트릭스들에 대한 그림들로서 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용되는데 10^9 사이클의

(a) SAE bracket histories on MTB and general bikes

(b) SAE transmission on MTB and general bikes

(c) Sample histories on MTB and general bikes

Fig. 7 Contour plots of fatigue damages

무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. Fig. 9의 두 모델의 경우들을 보면 ‘Sample history’의 경우가 다소 안정된 경향을 보이고 있으나 MTB 자전거 브레이크의 경우에는 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다. 그리고 ‘Sample history’의 경우가 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0부터 $-3 \times 10^4 \text{MPa}$ 이고,

응력 진폭 0부터 10^4MPa 에 있어서 최대 약 3% 정도의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 ‘SAE bracket history’나 ‘SAE transmission’의 경우보다 5내지 6배의 파손의 가능성이 많다고 예측할 수 있었다. 또한 일반 자전거 브레이크의 경우에는 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 ‘SAE bracket history’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample history’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다. 그리고 ‘Sample history’의 경우가

불규칙 하중을 받는 자전거 브레이크의 피로 해석

(a) SAE bracket histories on MTB and general bikes

(b) SAE transmission on MTB and general bikes

(c) Sample histories on MTB and general bikes

Fig. 8 Plots of rainflow matrices

(a) SAE bracket histories on MTB and general bikes

(b) SAE transmission on MTB and general bikes

(c) Sample histories on MTB and general bikes

Fig. 9 Plots of damage matrices

안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0부터 $-0.8 \times 10^4 \text{MPa}$ 이고, 응력 진폭 0부터 $0.2 \times 10^4 \text{MPa}$ 에 있어서 최대 약 3% 정도의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 'SAE bracket history'나 'SAE transmission'의 경우보다 5내지 6배의 파손의 가능성이 많다고 예측할 수 있었다.

3. 결론

자전거 운행 중 불규칙한 피로 하중을 받는 MTB (산악 사용) 및 일반자전거 브레이크에서의 피로 수명과 그 손상의 가능성 해석을 할 수 있었는데, 본 연구를 통하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

- 1) MTB 자전거 브레이크의 경우가 일반 자전거 브레이크의 경우보다 최대 응력이 4배 이상을 받고 있음을 알 수 있었다.
- 2) MTB 자전거 브레이크의 경우에는 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 'SAE bracket history'의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 'Sample history'의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다. 그리고 'Sample history'의 경우가 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0부터 $-3 \times 10^4 \text{MPa}$ 이고, 응력 진폭 0부터 10^4MPa 에 있어서 최대 약 3% 정도의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 'SAE bracket history'나 'SAE transmission'의 경우보다 5내지 6배의 파손의 가능성이 많다고 예측할 수 있었다.
- 3) 일반 자전거 브레이크의 경우에는 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한 'SAE bracket history'의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 'Sample history'의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다. 그리고 'Sample history'의 경우가 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0부터 $-0.8 \times 10^4 \text{MPa}$ 이고, 응력 진폭 0부터 $0.2 \times 10^4 \text{MPa}$ 에 있어서 최대 약 3% 정도의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 'SAE bracket history'나 'SAE transmission'의 경우보다 5내지 6

배의 파손의 가능성이 많다고 예측할 수 있었다.

- 4) MTB 및 일반 자전거 브레이크의 경우 비교적 하중의 변화가 심한 'SAE bracket history'의 경우가 가장 안정된 'Sample history'의 경우보다 그 최대 빈도수가 약 16배가량 더 많음을 알 수 있었다.

본 연구의 결과를 종합하여 실제 자전거 브레이크의 설계에 응용한다면 그 파손방지 및 내구성을 검토, 예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

References

- 1) W. R. Bae, D. W. Shin, B. K. Shim, B. N. Kim, S. I. Shin and Y. K. Kwon, "Development of Localization Bicycle Frame Using Al 6061," Spring Conference Proceedings, KSPE, pp. 853-854, 2010.
- 2) Y. H. Lee, S. I. Kim, M. W. Suh, H. S. Son and S. H. Kim, "Linearized Dynamic Analysis of a Four-Wheel Steering Vehicle," Transactions of KSAE, Vol.2, No.5, pp.101-109, 1994.
- 3) J. U. Cho and M. S. Han, "Analysis of Fatigue Damage at Wheel under Variable Load," Journal of the KSMTE, Vol.19, No.6, pp. 753-759, 2010.
- 4) S. H. Kim, S. W. Kang, M. H. Kim, Y. W. Jang, W. I. Ha and J. S. Park, "Structural Stress and Fatigue Testing of Edge details," Journal of the KWJS, Vol.1, pp.3-335, 2004.
- 5) T. L. Panontin and S. D. Sheppard, "Fatigue and Fracture Mechanics," ASTM, STP 1332, Vol.29, pp.1-712, 1999.
- 6) S. S. Kang and S. K. Cho, "Structural Design and Analysis for the Reinforced Frame of Vehicle," Journal of the KSMTE, Vol.19, No.4, pp.504-510, 2010.
- 7) G. B. Lee, "Stress Analysis and Technology for Vehicles by the Finite Element Method," Transactions of KSME, Vol.26, No.2, pp.91-155, 1986.
- 8) J. Swanson, ANSYS 12.0, ANSYS Inc., U.S.A., 2010.