

원판브레이크에서의 피로파괴연구

조재웅*, 한문식⁺

(논문접수일 2008. 12. 12, 심사완료일 2009. 3. 13)

Study on Fatigue Fracture at Disk Brake

Jae-Ung Cho*, Moon-sik Han⁺

Abstract

This study investigates fatigue life and possibility damaged at disk brake of automobile by the simulation of fatigue analysis. Among nonconstant fatigue loads, the case of 'SAE Bracket History' which is the severest at the variation of load tends to be most unstable. The case of 'Sample History' which becomes slower at the variation of load tends to be most stable. The value of maximum relative damage in case of 'SAE Bracket History' is occurred near the average stress '0' and this case can be shown to have the possibility to affect more damage than another case. As the result of this study is applied to automobile parts with non constant loads, durability can be improved during drive by preventing any damage.

Key Words : Available life(사용 가능수명), Relative damage(상대적인 손상), Rainflow matrix (레인플로우 매트릭스), Damage matrix(손상 매트릭스), Durability(내구성)

1. 서론

자동차나 구조물에 있어서 피로나 파괴를 규명하기 위해서 피로 균열, 압축 잔류응력, 또한 최적화 설계 등의 연구들이 활발히 진행되고 있다⁽¹⁻⁶⁾. 강도상에 있어서 충분한 여유를 가지고 설계된 기계 내지 구조물이라고 해도 파손이 일어나는 경우가 많으며 의외로 항복응력보다 훨씬 낮은 저응력 하에서도 파괴가 잘 일어난다. 따라서 이를 규명하기 위한

여러 가지 연구가 광범위하게 이루어져 왔으며 이들에 대하여는 피로 파괴에 대한 연구가 주류를 이루고있다⁽¹⁾. 그 중에서 대부분의 피로 파괴는 불규칙적으로 일어나고 있어 이론 해석에 의하지 않고서는 그 예측이 불가능한 실정이다. 그리고 자동차에서는 1장의 원판을 차축에 부착시키고 이것을 캘리버라고 하는 지지장치를 물려서 이 속에 넣은 1,2,4개 등의 실린더에 의해 작동한다. 또한 작은 평면상으로 된 라닝 피드로서 이 원판을 밀어 붙여서 브레이크 작용을 한다.

* 공주대학교 기계자동차공학부

⁺ 교신저자, 계명대학교 기계자동차공학부 (sheffhan@kmu.ac.kr)

주소: 대구광역시 달서구 신당동 1000번지

본 논문에서는 자동차 주행 중에 대표적으로 실제 일어날 수 있는 불규칙 상황에서의 피로 하중 양상을 본 논문의 연구 방법으로 적용하였다. 그리고 이러한 피로 하중 상황에서 자동차의 원판 브레이크 모델로서 시뮬레이션하여 해석하였다. 또한 피로수명, 파손 및 그 내구성의 해석 결과들에 대한 수렴성이 좋고 효율적인 해석 결과를 얻어 낼 수 있는 피로 설계 전용 Ansys 프로그램을 사용하였다^(7,8). 연구 내용으로서는 피로를 받는 원판 브레이크의 모든 부분에 대하여 그 수명과 손상들을 예측할 수 있었고, 파손 및 사용 가능한 수명들을 모든 하중의 변화들로서 비교할 수 있었다. 이러한 본 연구의 결과를 종합하여 불규칙 하중을 받는 자동차 부품에 응용한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토, 예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

2. 해석 모델 및 절차

본 연구에서의 해석모델로서 원판 디스크의 유한요소분할 모양과 치수(단위:mm)는 Fig. 1 및 Fig. 2와 같다. Solid 187

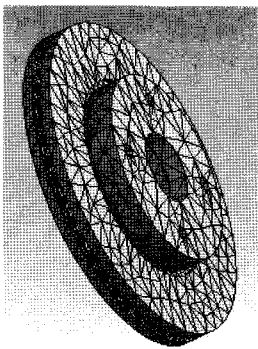


Fig. 1 Mesh of Specimen

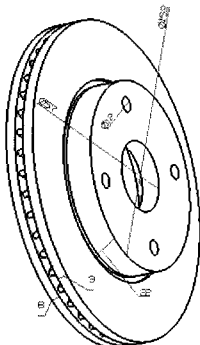


Fig. 2 Dimensions of Specimen (Unit : mm)

의 요소로, 절점들과 요소들의 개수는 각각 27244 및 13732이다. 이 모델에 대한 해석값의 수렴오차 허용도는 10^{-8} 의 수치로 되어 있어 해석 결과의 상호 비교에는 지장이 없다고 사료된다. 시험편의 재료로는 구조용 강으로서 그 특성은 Table 1에 나타나 있다. Fig. 3과 같이 디스크의 한 쪽면을 구속하고 그 반대편 면에 하중으로서 6000N에 의해서 가해지고 있다. 본 논문의 해석에 있어서는 피로 곡선에 대한 실험 데이터로서 구조용 강의 자료를 사용하였다. 피로 파괴를 발생하는 응력 진폭과 반복수 사이에는 상관성이 있으며 응력의 감소에 따라서 반복수는 증대한다. 응력-반복수 곡선(S-N 선도)이라고 한다. 혹은 시간 강도(Fatigue Strength at Given Endurance), 특정의 응력에 대응하는 반복수(Fatigue Life)이라고도 하여 피로 강도 혹은 피로 수명을 고려한 설계의 기준이 된다. S-N 곡선이하의 응력은 무한회의 반복수에 견디는 재료의 피로 한도(Fatigue Limit) 혹은 내구 한도(Endurance Limit)라고 불리운다. 따라서 Fig. 4 는 구조용 강의 피로 물성 데이터로서 고유한 S-N선도이고, 피로 해석 모델에 대한 데이터를 보여 주는 그림으로서 x축상에서는 사이클 수이고 y축상에서는 진폭응력 값을 나타낸 그림들이

Table 1 Material Properties

Structural Properties	
Young's Modulus	2×10^5 MPa
Poisson's Ratio	0.3
Mass Density	7.85×10^{-6} kg/mm ³
Stress Limits	
Yield Strength	250MPa
Ultimate Strength	460MPa

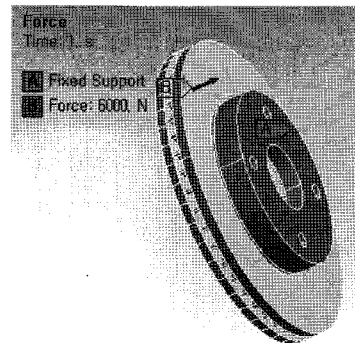


Fig. 3 Constraints of Specimen

다. 또한 피로 Tool로서 평균 응력과 여러 가지 하중의 형태들을 정의하여 그 하중 조건들을 설명할 수 있다. 피로 Tool로서는 시간에 따라 임의의 한 부분에 대하여 하중을 변화시킬 수 있는데, Fig. 5와 같이 주행하는 실제 차량이 노면으로부터 받을 수 있는 불규칙 진폭하중들인 ‘SAE Bracket History’, ‘SAE Transmission’, ‘Sample History’와 같이 진폭하중에 대한 배율들의 목록을 나타내고 있다. 본 해석은 하나의 축방향 응력에 대하여 정적 응력의 안전성을 구하는 Tool들과는 달리, 어떤 한 점에서 응력이 시간에 따라 변하는 경우에 대하여 한 것이다. 또한 본 연구에 있어서는 불규칙 진폭하중의 방법을 채택하고 기본 하중에 대하여는 배율을 적용할 수 있다. 진폭 응력이 S-N 곡선의 범위를 벗어난다면 무한 수명 값이 사용되어지는데, 본 연구에 있어서는 설계 수명인 무한 수명으로서 10^9 사이클로 정하고 있다.

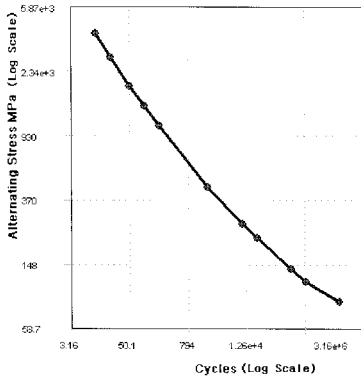


Fig. 4 S-N Curves in Fatigue

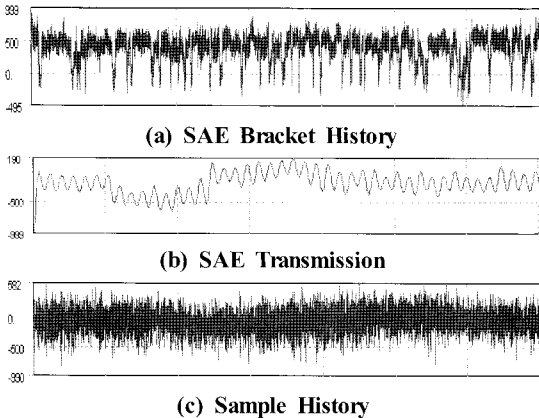
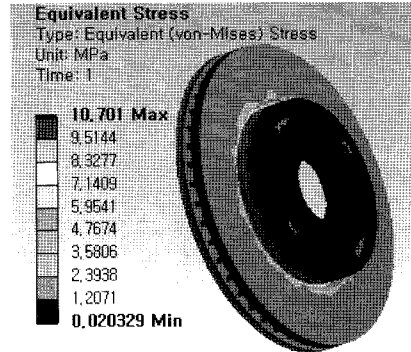


Fig. 5 Loading history

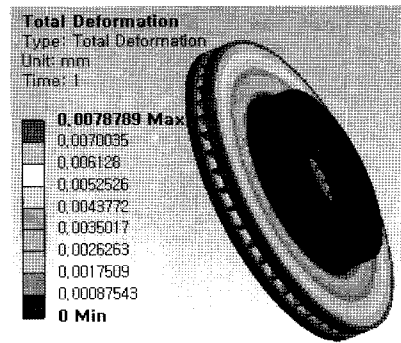
3. 해석 결과

평균 하중에 대한 von-mises 응력 및 전변형량에 대한 등고선들을 Fig. 6과 같이 보여 주고 있는데, von Mises 등가 응력은 디스크의 중앙 부분의 가장자리의 모서리에서 10.7MPa로 가장 크게 나타나고, 전변형량은 디스크의 최외곽의 가장자리에서 0.008mm로 나타나고 있다.

피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, Rainflow 매트릭스 및 Damage 매트릭스들을 포함하고 있다. 각각의 출력들은 불규칙 진폭하중들인 ‘SAE Bracket History’, ‘SAE Transmission’, ‘Sample History’들의 하중들로서 서로 비교 될 수 있다. 본 연구의 모델에 대하여 사용 가능 수명에 대한 등고선 그림들이 Fig. 7에 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



(a) von-Mises Equivalent Stress



(b) Total Deformation

Fig. 6 von-Mises Equivalent Stress(a) and Total Deformation(b) of Model

보여 주고 있다. Fig. 7에서 보면 (a)의 경우의 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket’의 경우가 사용 가능 수명이 3.37×10^5 Cycle 정도로 가장 짧은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample History’의 경우가 그 수명이 2×10^7 Cycle 정도로 가장 긴 것을 알 수 있었다.

Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피로 손상은 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나누는 것으로 정의된다. 3가지 경우들을 비교할 수 있다. 부분적으로 표면이 사용 가능한 수명이 ‘0’가 되어서 수명은 없는 것으로 계산되어 있으나 손상은 설계 수명을 사용 가능한 수명으로 나누는 식이 된다. 따라서 컴퓨터 상에서 계산한 것은 일반적으로 3차원 요소에 있는 값으로 나누어서 계산한 것이다. 따라서 이에 대하여서는 손상을 기준으로 생각해야 되고, 특이점인 ‘0’값은 고려하지 않았다고 사료된다.

Fig. 8에서 보면 (a)의 경우인 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket’의 경우가 손상이 6194로 가장 많은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample History’의 경우가 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.

Fig. 9는 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 응력과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데, z축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈

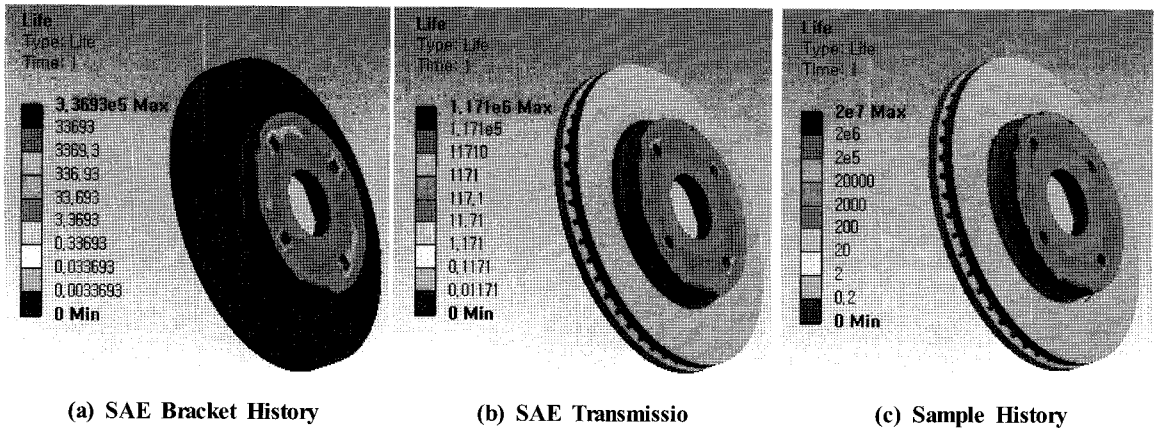


Fig. 7 Contour Plots of Available Lives

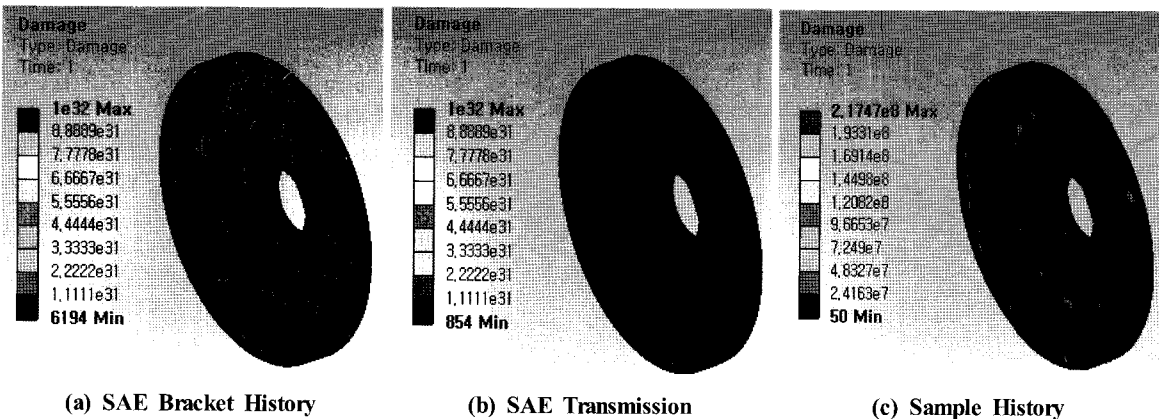


Fig. 8 Contour Plots of Fatigue Damages

도수에 해당된다. Fig. 9에서 보면 ‘SAE Bracket History’의 경우가 상대적인 손상은 평균응력이 0 부근의 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 작음을 알 수 있었다.

Fig. 10은 본 연구 모델에서 파손에 대한 임계 위치에서의 Damage 매트릭스들에 대한 그림들로서 불규칙 진폭하중에 대해서만 적용되는데 10^9 사이클의 무한 수명에 대한 상대적 손상 가능성을 나타내고 있다. Fig. 10에서 보면 ‘Sample History’의 경우가 다소 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 $-0.5 \times 10^4 \text{Pa}$ 이고 응력 진폭 5000Pa부터 9000Pa에

있어서 최대 40%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다. 그러나 ‘SAE Bracket History’의 경우가 1.2% 정도의 파손 가능성을 보여 어떤 다른 경우들보다는 그 파손의 가능성이 가장 작음을 알 수 있었다.

4. 결론

불규칙한 피로 하중을 받는 원판 브레이크에서의 피로 수명과 그 손상의 가능성을 Simulation 해석 할 수 있었는데, 본 연구를 통하여 얻은 주요한 결론은 다음과 같다.

- (1) 불규칙 피로 하중들 중에서는 하중의 변화가 극심한

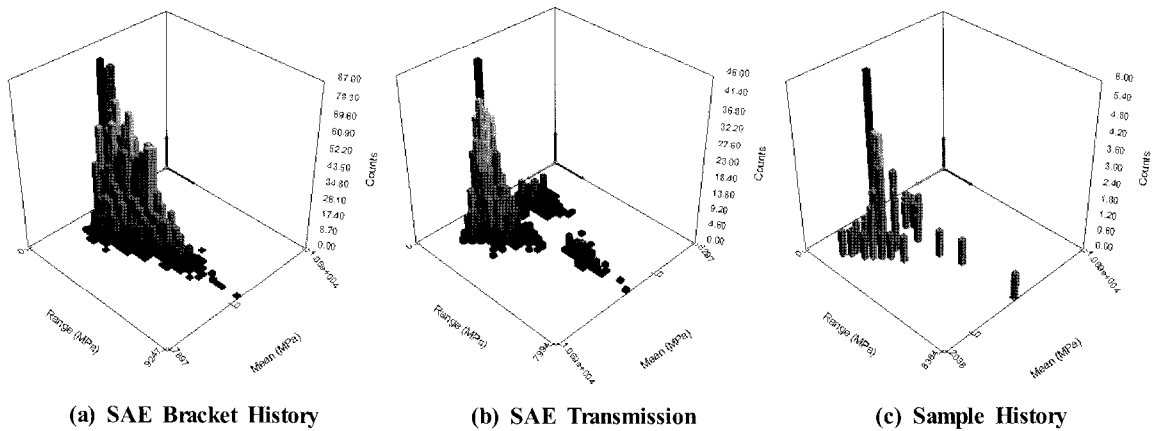


Fig. 9 Plots of Rainflow Matrices

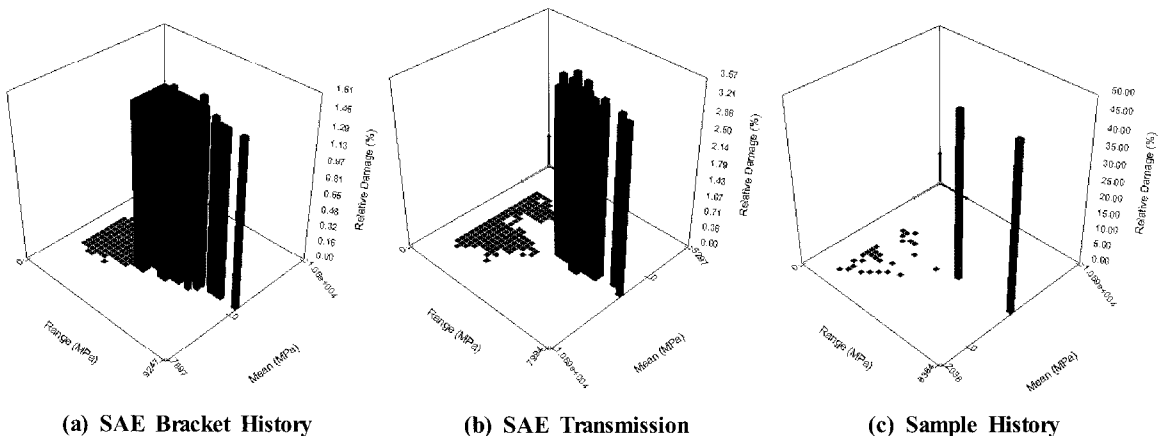


Fig. 10 Plots of Damage Matrices

- ‘SAE Bracket History’의 경우가 대체적으로 가장 불안정한 경향을 보이고 있고, 비교적 하중의 변화가 완만한 ‘Sample History’의 경우가 가장 안정함을 보이고 있다.
- (2) ‘SAE Bracket History’의 경우가 상대적 손상은 평균응력이 0 부근의 상태에서 최대의 상대적 손상의 빈도수 '80'을 일으켜 어떤 다른 경우들보다는 더 파손의 가능성이 더 일어남을 알 수 있었고 ‘Sample History’의 경우가 그 최대 빈도수가 ‘5’정도로서 가장 안정함을 보이고 있다.
- (3) ‘Sample History’의 경우가 손상의 빈도수가 가장 작아서 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 -0.5×10^4 Pa이고 응력 진폭 5000Pa부터 9000Pa에 있어서 최대 40%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다.
- (4) 이러한 본 연구의 결과를 종합하여 불규칙 하중을 받는 자동차 부품에 응용한다면 운행 중에 파손 방지 및 내구성을 검토, 예측하는데 활용이 클 것으로 사료된다.

참고 문헌

- (1) Tanaka, S., Ichikawa, M., and Akita, S., 1984, “A Probabilistic Investigation of Fatigue Life and Cumulative Cycle Ratio,” *Eng. Frac. Mech.*, Vol. 20, pp. 501~513.
- (2) Park, Y. C. and Lee, D. W., 2005, “Shape Optimization of the Lower Control Arm using the Characteristic Function and the Fatigue Analysis,” *Transactions of KSAE*, Vol. 13, No. 1, pp. 119~125.
- (3) Han, B. K., Cho, S. S., Chang, H., and Kim, B. K., 2004, “Fatigue Fracture of NBR-coated SUS301 Thin Plate for MLS Gasket,” *Transactions of KSAE*, Vol. 12, No. 4, pp. 207~212.
- (4) Goo, B. C. and Seo, J. W., 2003, “Probabilistic Fatigue Life Evaluation of Rolling Stock Structures,” *Transactions of KSAE*, Vol. 11, No. 5, pp. 89~94.
- (5) Jeong, E. H., Hur, B. S., Kwon, Y. K., and Oh, T. Y., 2000, “Behaviour of Fatigue Crack Propagation under Mixed Mode (I+II) with variation of Angle and Crack Length,” *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 6, pp. 73~79.
- (6) Han, K. T. and Park, J. S., 2002, “A Study on the Optimal Design of the Brake Tube-End for Automobiles,” *2002 Spring Conference Proceeding of KSMTE*, pp. 53~57
- (7) Swanson, J., 2007, *Ansys 11.0*, Ansys Inc., USA.
- (8) Hancq, D. A., Walters, A. J., and Beuth, J. L., 2000, “Development of an Object Oriented Fatigue Tool,” *Engineering with Computers*, Vol. 16, pp. 131~144.