

불규칙 하중을 받는 휠에서의 피로 파손 해석

조재웅*, 한문식⁺

(논문접수일 2010. 04. 14, 심사완료일 2010. 10. 19)

Analysis of Fatigue Damage at Wheel under Variable Load

Jaeung Cho*, Moonsik Han⁺

Abstract

The variable fatigue load is simulated in this study. The stability and the life of the material are analyzed theoretically by Ansys program. These results are successfully applied to the practical wheel to predict the prevention of fracture and the endurance. The life and the damage on the every part of the fatigue specimen can be predicted. As the available lives are compared for every loading variation, the rainflow and damage matrix results can be helpful in determining the effects of small stress cycles in any loading history. The rainflow and damage matrices illustrate the possible effects of infinite life. The safety and stability of wheel and the other practical structures according to the variable load can be estimated by using the results of this study.

Key Words : Fatigue life(피로 수명), Variable fatigue load(불규칙 피로 하중), Damage(파손), Rainflow matrix (레인플로우 매트릭스), Damage matrix(손상 매트릭스)

1. 서론

일반적으로 강도상에 있어서 충분한 여유를 가지고 설계된 기계 내지 구조물에 있어서 파손이 일어나는 경우가 많으며 항복응력보다 훨씬 낮은 저응력 하에서도 파괴가 잘 일어난다. 따라서 이를 규명하기 위한 여러 가지 연구가 광범위하게 이루어져 왔으며 이들에 대하여는 파괴역학과 통계적

인 방법을 이용한 여러 가지 연구가 발표되고 있다⁽¹⁾. 자동차나 구조물에 있어서는 피로나 파괴를 규명하기 위해서 피로 균열, 압축 잔류응력, 또한 최적화 설계 등의 연구가 활발히 진행되고 있다⁽²⁻⁴⁾. 또한 구조물 파괴의 50-90%는 피로에 의한 것으로 추정되며 그 중에서 대부분의 피로 파괴는 불규칙적으로 일어나고 있어 이론 해석에 의하지 않고서는 그 예측이 불가능한 실정이다. 상용되는 여러 가지의 피로에 대한

* 공주대학교 기계자동차공학부

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

주소: 704-701 대구시 달서구 달구벌대로 2800

해석 프로그램들이 있지만 본 연구에서는 다른 피로 해석 프로그램들에 비하여 정확하고 효율적인 해석 결과를 얻어 낼 수 있고 응력-피로수명의 해석 결과들에 대한 수렴성이 좋은 피로 설계 전용 Ansys 프로그램을 사용하였다^(5,6). 본 연구에서는 현장에서 쉽게 볼 수 있는 변동 피로하중을 받는 휠을 시뮬레이션을 하였고 그 재료의 안전성과 수명 관계를 해석하였다. 이 휠은 자동차가 달리는데 가장 중요하고, 생명과 연관이 되어서 매우 안전해야 한다. 휠이 훼손됨으로 말미암아 타이어도 찢어질 수 있는 상황이 되어 큰 사고로 이어질 수도 있기 때문에, 휠의 강도가 좋고 파손이 되지 않도록 하기 위해서는 내구성이 좋아야 한다⁽⁷⁾. 또한 휠은 타이어와 함께 자동차의 중량을 지지하고, 구동력 또는 제동력을 지면에 전달하는 역할을 한다. 따라서 휠은 스프링 아래 질량을 작게 하여 승차감을 좋게 하기 위하여 가벼울수록 좋으며, 자동차의 무게중심을 낮추고 조향 각을 크게 하기 위하여 직경이 작을수록 유리하다. 그리고 노면의 충격력과 횡력에 견딜 수 있도록 충분한 강성을 가져야 하며, 타이어에서 발생하는 열이나 제동할 때 발생하는 제동 열을 잘 흡수하여 대기 중으로 방출이 쉬운 구조로 되어야 한다. 휠은 타이어를 지지하는 림부분과 휠을 차축의 허브에 장착하기 위한 디스크 부분으로 구성된다. 그리고 휠의 림 부분에는 사이드 림을 사용하여 타이어를 유지하고 탈부착을 용이하게 할 수 있게 되어 있다. 연구 내용으로서는 피로를 받는 모델의 모든 부분에 대하여 그 수명과 손상들을 예측할 수 있었고 사용 가능한 수명들을 모든 하중의 변화들로서 비교할 수 있었다. 또한 도로면에서 반복되는 불규칙한 피로 하중을 받는 휠에서의 피로 수명과 그 손상의 가능성을 시뮬레이션 해석할 수 있었다. 물론 내구성면에서의 구조 해석을 통하여 최적화 설계를 주되게 할 수 있다. 그리고 본 연구는 주행 중 휠에서 동적인 피로 하중을 받는 경우, 그 종류별로 파손의 가능성을 해석하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 피로 파괴 해석에 주안점을 두었으며, CATIA로 휠을 직접 3D 모델링을 하였고 해석 소프트웨어로는 ANSYS로 휠의 강도해석 및 피로해석을 수행하였다. 이러한 본 연구의 결과를 종합하여 휠 등 실구조물에 응용한다면 그 파손 방지 및 내구성을 검토 및 예측하는 데에 활용이 클 것으로 사료된다.

2. 본 연구에서의 모델 및 해석절차

본 연구에서는 알루미늄 휠에 타이어의 압력과 코너링의 모멘트 하중을 걸리게 한다. 이 때 등가 응력과 전변형량을 확인하고, 피로 해석을 수행하여 수명을 예측한다. 해석모델

로서는 직경이 22cm이고 높이가 44cm인 휠의 유한요소분할 모양은 Fig. 1과 같다. Solid 187의 요소로, 절점들과 요소들의 개수는 각각 41870 및 21193 이다. 모델은 보편적인 알루미늄 합금으로서 그 물성치가 Table 1에 나타나 있다. 그러나 휠에 대한 정확한 물성 데이터를 찾아서 시뮬레이션을 한다면 실제치에 근접할 수 있다. 타이어 공기압에 의하여 휠에 하중이 가해지는데 적절한 타이어의 실제 공기압을 0.24MPa로 보았다. 따라서 Fig. 2(a)와 같이 휠의 외곽 끝면을 구속하고 Fig. 2(b)와 같이 타이어가 닿는 면 B에 수직방향 압력으로서 0.24MPa가 가해지고 Fig. 2(c)와 같이 휠의 안쪽면에 모멘트로서 2948.9Nm 가 가해지고 있다. 본 논문의 해석에 있어서는 피로 곡선에 대한 실험 데이터로서 알루미늄 합금의 자료를 사용하였다. Fig. 3은 피로 해석 모델에 대한 데이터를 보여 주는 그림⁽⁸⁾으로서 x축상에서는 사이클 수이고 y축상에서는 진폭응력 값을 나타낸 그림들이다. 또한 피로 Tool로서 평균 응력과 여러 가지 하중의 형태들을 정의하여 그 하중 조건들을 설명할 수 있다.

본 해석에서는 시간에 따라 임의의 한 부분에 대하여 하중을 변화시킬 수 있는데, Fig. 4와 같이 주행하는 실제 차량이

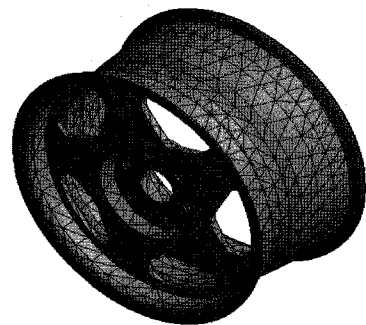


Fig. 1 Mesh of wheel

Table 1 Material property

Young's Modulus	193000MPa
Poisson's Ratio	0.31
Tensile Yield Strength	207MPa
Compressive Yield Strength	207MPa
Tensile Ultimate Strength	586MPa
Compressive Ultimate Strength	0Pa
Density	7750Kg/m ³

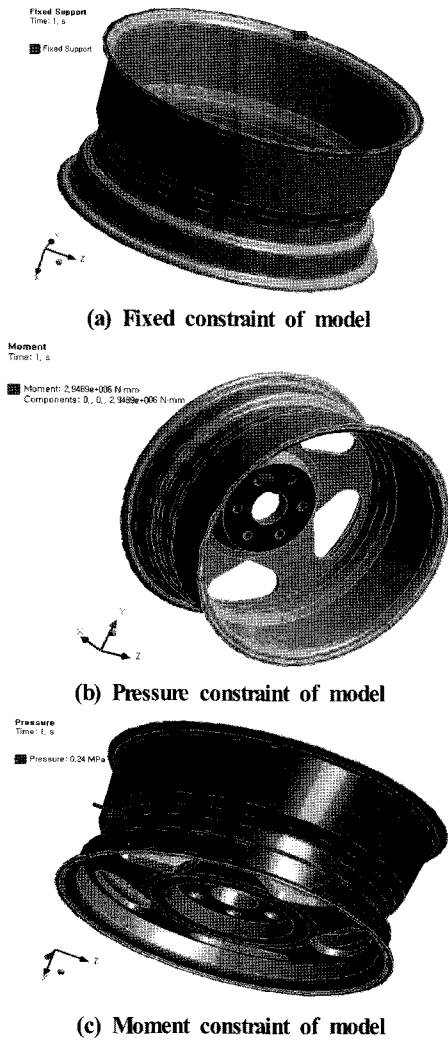


Fig. 2 Constraint conditions of model

받을 수 있는 불규칙 진폭하중들인 'SAE Bracket History', 'SAE Transmission', 'Sample History'와 같이 진폭하중에 대한 배율들의 목록을 나타내고 있다. 본 해석은 하나의 축 방향 응력에 대하여 정적 응력의 안전성을 구하는 해석들과는 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.

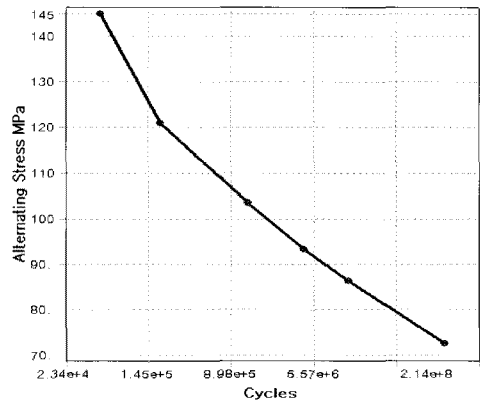


Fig. 3 S-N Curve in fatigue

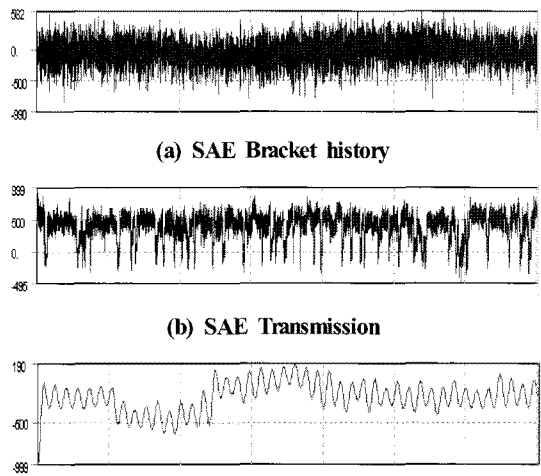


Fig. 4 Loading history

3. 해석 결과

평균 하중에 대한 최대 von-Mises 응력, 전단 응력 및 전 변형량에 대한 등고선들을 Fig. 5와 같이 보여 주고 있는데, 최대 von Mises 등가 응력과 전단 응력은 휠의 중심 부분에서 145.5MPa과 75.591MPa로서 각각 크게 나타났다. 또한 전변형량 역시 휠의 중심 부분에서 0.7355mm로 크게 나타나고 있다.

피로에 대한 해석 결과의 출력들은 피로 수명, 파손, Rainflow 매트릭스 및 Damage 매트릭스들을 포함하고 있

다. 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. 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. Fig. 7에서 보면 (a)의 경우의 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket’의 경우가 사용 가능 수명이 1.28×10^5 Cycle 정도로 가장 짧은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample History’의 경우가 그 수명이 1.35×10^7 Cycle 정도로 가장 긴 것을 알 수 있었다.

Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 등고선으로 된 피로 손상은 설계 수명을 사용 가능 수명으로 나누는 것으로 정의된다. 피로 손상이 아주 적은 부분으로서 3가지 경우들을 공히 비교할 수 있다. Fig. 7에서 보면 (a)의 경우인 하중의 변화가 극심한 ‘SAE Bracket’의 경우가 손상이 7817로 가장 많은 것을 볼 수가 있고 하중의 변화가 완만한 ‘Sample History’의 경우가 그 손상이 73.87 정도로 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. 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 응력과 평균 응력에 대한 그 빈도수들로서 그려지는데, z축은 주어진 진폭 응력과 평균 응력에 대한 빈도수에 해당된다. Fig. 8에서 보면 ‘SAE Bracket History’의 경우가 상대적인 손상은 평균응력이 0 부근의 상태에서 최대의 빈도수가 80 정도로서 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. 9는 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. 9에서 보면 ‘Sample History’의 경우가 다소 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0Pa부터 -105MPa이고 응력 진폭 0MPa부터 105

MPa에 있어서 최대 3.2%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있

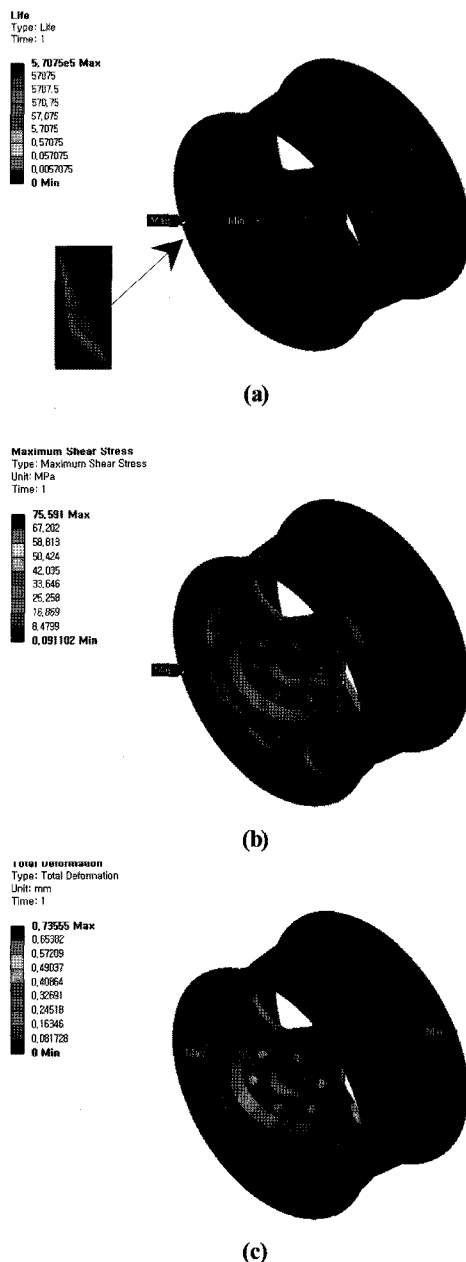


Fig. 5 Maximum von-Mises equivalent stress, shear stress and total deformation of model

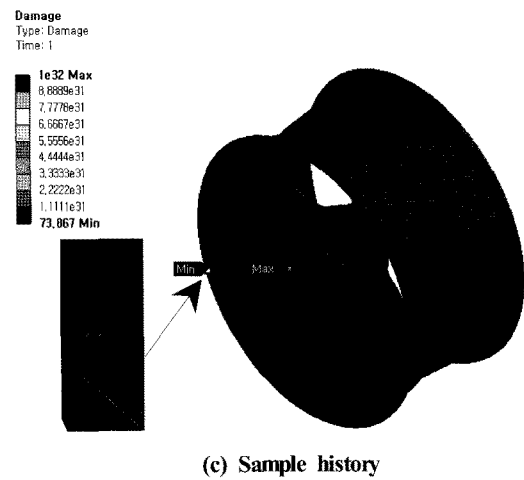
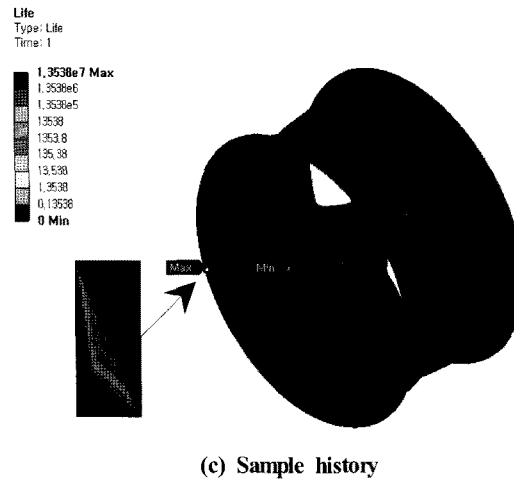
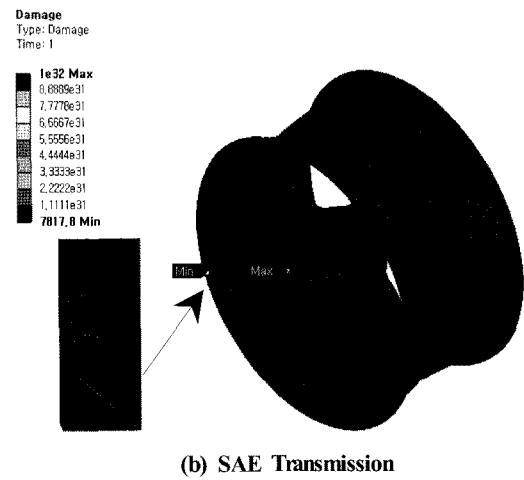
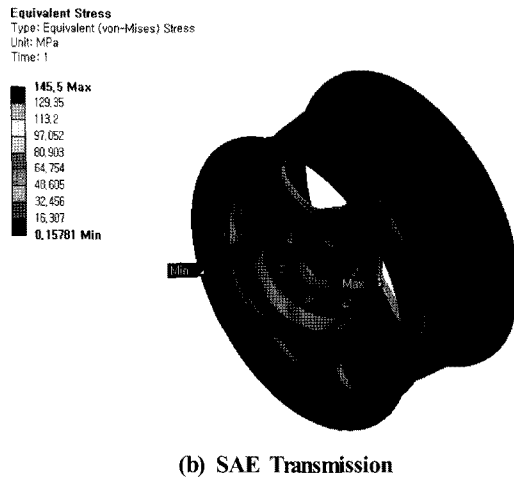
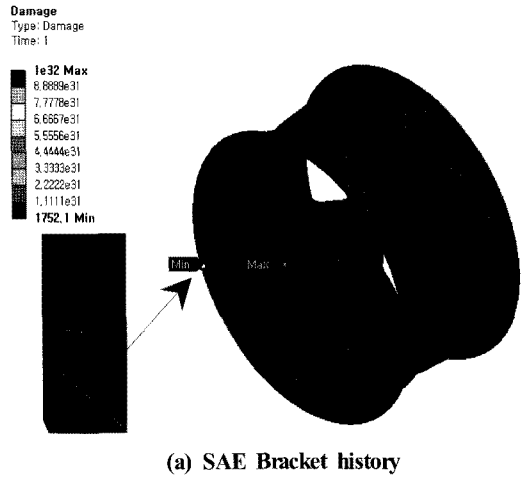
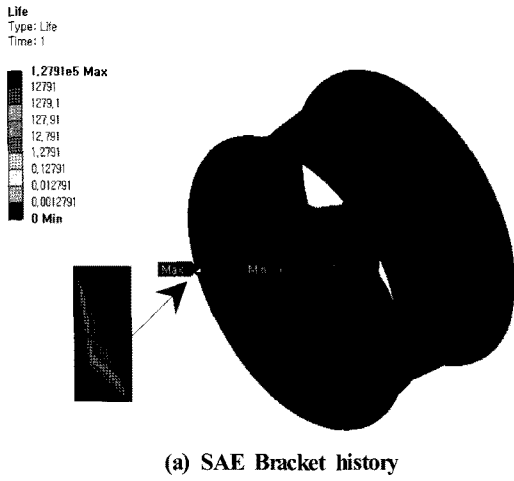
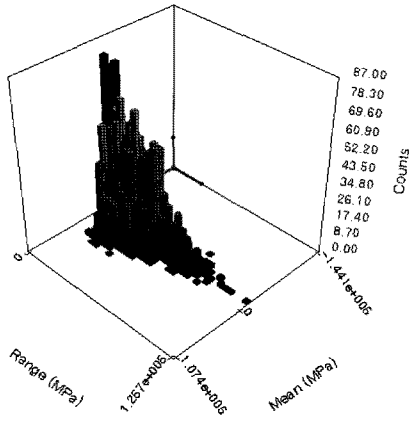
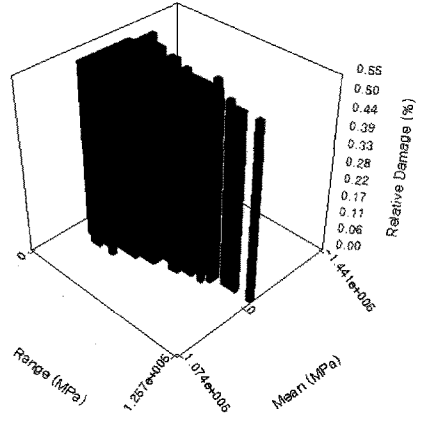


Fig. 6 Contour plots of available life histories

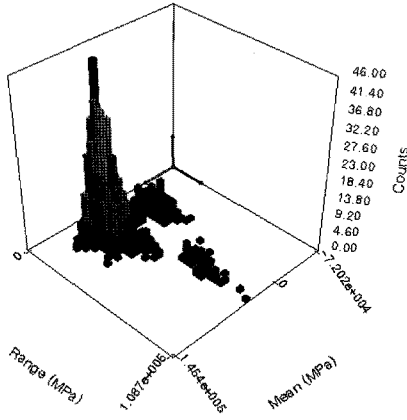
Fig. 7 Contour plots of fatigue damages



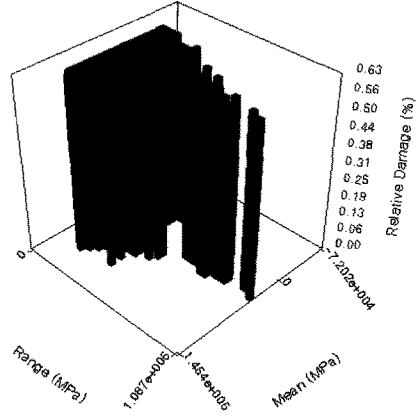
(a) SAE Bracket history



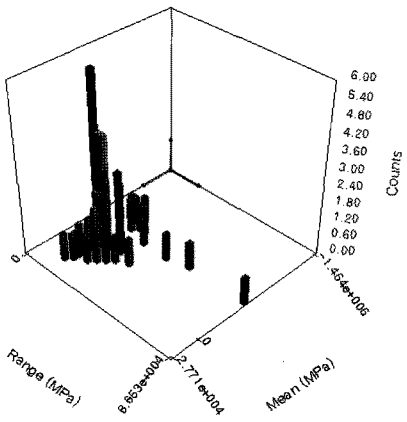
(a) SAE Bracket history



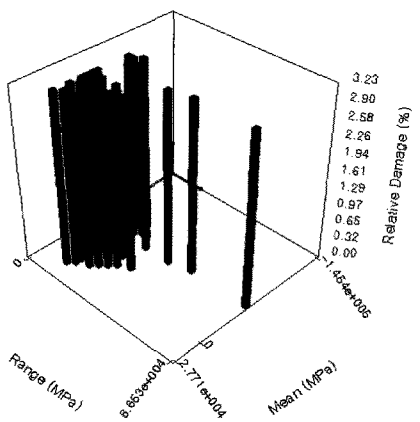
(b) SAE Transmission



(b) SAE Transmission



(c) Sample history



(c) Sample history

Fig. 8 Plots of Rainflow Matrices

Fig. 9 Plots of damage matrices

었다. 그리고 ‘Sample History’의 경우가 최대 0.7% 정도의 파손가능성을 보이는 ‘SAE Bracket History’나 ‘SAE Transmission’경우보다 7배의 파손의 가능성이 큼을 알 수 있었다.

이러한 해석 결과로서 보면, 알루미늄 휠의 물성치 및 S-N 곡선과 도로에서의 피로 하중이력만 정확히 입력하여 해석한다면, 그 해석 결과는 신뢰할 수 있다고 사료된다.

4. 결론

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

- (1) 최대 von Mises 등가 응력과 전단 응력은 휠의 중심 부분에서 145.5MPa과 75.591MPa로 나타났으며, 또한 전변형량 역시 휠의 중심 부분에서 0.7355mm로 크게 나타났다.
- (2) 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.
- (3) ‘Sample History’의 경우가 안정된 경향을 보이고 있으나 평균 응력이 0Pa부터 -105MPa이고 응력 진폭 0MPa부터105MPa에 있어서 최대 5%의 손상 가능성을 보이고 있어 이 부분의 응력 상태가 ‘SAE Bracket History’와 ‘SAE Transmission’경우보다 7배의 파손의 가능성이 많다고 예측 할 수 있었다.
- (4) 본 연구의 결과를 종합하여 휠 등 실구조물에 응용한다면 그 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, W. C., Huh, S. C., Jung, J. W., Lee, H. W., and Boo, M. H., 2003, “A Study on Fatigue Crack Behavior of Metal Matrix Composites for Automobile Engine,” *Transactions of KSAE*, Vol. 11, No. 5, pp. 140~146.
- (3) Park, K. D. and Jung, C. G., 2003, “The Effect of Compressive Residual Stresses of Two-stage Shot Peening for Fatigue life of Vehicle Spring Steel,” *Transactions of KSAE*, Vol. 11, No. 1, pp. 185~192.
- (4) Han, S. Y. and Song, S. Y., 2002, “Shape Optimization of Structures in Opening Mode,” *Transactions of KSAE*, Vol. 10, No. 2, pp. 141~149.
- (5) Swanson, J., 2008, *Ansys 11.0*, Ansys. Inc., USA.
- (6) 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.
- (7) Kim, B. S., 2005, “An Study on Vibration Characteristics of Automobile Al-alloy Wheel,” *Transactions of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No.3, pp. 122~127.
- (8) Swanson, J., 2009, *Ansys 120.0*, Ansys Inc., USA.