

승용차용 디쉬 타입과 스포크 타입 휠에 대한 구조 해석과 피로 수명 예측[§]

강 성 수^{*†} · 이 종 화^{**}

* 전주대학교 기계자동차공학과, ** (주)칼링크

Evaluation of Fatigue Life and Structural Analysis for Dish-Type and Spoke-Type Automobile Wheels

Sung-Soo Kang^{*†} and Jong Hwa Lee^{**}

* Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Jeonju Univ.,

** Kalink Co.

(Received May 20, 2011 ; Revised July 25, 2011 ; Accepted July 26, 2011)

Key Words : Fatigue(피로), Wheel(휠), Structural Design(구조 설계), Finite Element Analysis(유한요소해석)

초록: 제품 생산과 실험에 앞서 설계 단계에서의 강도 평가가 이루어져야 하며, 이 단계에서 범용 프로그램인 ANSYS 의 도입 및 활용은 제품의 생산과 강도 평가에 있어서 시간과 비용의 절감 등 여러 가지 이점을 갖게 한다. 본 연구에서는 ANSYS 를 이용하여 승용차용 디쉬 타입과 스포크 타입의 휠을 3 차원 형상으로 모델링하고 구조해석과 피로해석을 수행하였다. 디쉬 타입과 스포크 타입에 대한 해석 결과를 비교해 보면, 디쉬 타입이 스포크 타입보다 변형이 적게 일어나고 최대등가응력도 작음을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고, 스포크 타입이 경량과 우수한 냉각성능으로 인해 자주 사용되고 있다. 수명에 대한 피로 해석 결과, 알루미늄 휠이 스틸 휠보다 피로 저항력이 우수함을 보였다.

Abstract: Prior to the experimental and production stages of goods, the strengths should be evaluated in the design stage. The introduction of commercial codes at the design stage gives benefits such as cost and time economies in the production and strength evaluation. In this study, structural analysis and fatigue analysis are carried out using ANSYS modeling of the 3D geometry of the wheel. In a comparison of dish-type and spoke-type wheels, it is shown that the deformation and maximum equivalent stress for the dish-type wheels are lower than those for spoke-type wheels. Nevertheless, spoke-type wheels are often used because they are light and have exhibit excellent cooling performance. Furthermore, according to the results of life analysis, aluminum wheels show improved resistance to fatigue compared to steel wheels.

1. 서론

알루미늄 휠은 스틸 휠에 비해 내식성이 우수하고 무게가 가벼우며 충격 흡수성이 우수하여 승차감이 좋은 장점이 있다. 하지만 단조와 주조에 의한 승용차용 알루미늄 휠 제품은 형상과 크기에 따라 제조 시 발생할 수 있는 여러 가지 결함을 내재하고 있으며, 이로 인해 제품에 작용하는 여

러 종류의 복합 및 반복하중에 대한 문제점을 보이고 있다. 따라서 이러한 알루미늄 휠의 취약점을 보완하기 위해, 노면으로부터 각종 하중이 전달되는 부품으로서의 알루미늄 휠에 대한 충분한 구조강도가 요구된다.^(1~4) 또한 초기 설계 시 소비자들의 요구와 호감을 충족시킬 수 있도록 설계되어야 하며, 설계 단계에서의 형상변수가 상당히 중요하므로 이를 통한 설계 개선이 필요하다.

휠의 강도평가와 관련한 종래의 연구를 살펴보면 다음과 같다. 먼저 Noh 등⁽⁵⁾은 충격시험에 대한 선형탄성해석을 수행함으로써 충격시의 응력이 집중되는 부분과 내충격성을 파악하였고, Jeong⁽⁶⁾은 자동차 디자인의 안전성과 연료절감이라는 문

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계 학술대회(2011. 5. 19.-20., 서울과기대) 발표논문임

† Corresponding Author, sskang@jj.ac.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

제를 해결하기 위해 경량화 합금 휠에 관한 디자인 방안을 제시하였으며, Kim^(7,8)은 주파수 응답함수법을 이용한 실험적인 방법으로 알루미늄 휠과 스틸 휠의 진동 특성을 파악하였다. 또한 다른 Kim⁽⁹⁾은 자동차용 알루미늄 휠의 내구 신뢰성을 확보하기 위해, 유한요소법과 유원체를 이용한 동역학적 해석 기법을 이용하여 응력해석과 내구해석을 실시하였으며, Cho 등⁽¹⁰⁾은 타이어의 압력과 코너링의 하중 등의 불규칙한 피로 하중을 받는 휠에 대한 피로 수명과 손상 가능성을 예측하였다. 나아가, Sherwood 등⁽¹¹⁾은 항공기용 타이어와 휠의 접촉 압력 분포를 계산하는 방법에 대하여 연구하였고, Kalyanasundaram 등⁽¹²⁾은 휠의 무게와 강성, 관성모멘트 등을 고려한 유한요소해석과 최적화를 통하여 휠체어용 휠에 대한 재설계를 실시하였다.

현재 생산되고 있는 휠은 충격시험 평가를 통하여 적합 여부를 결정하고 있지만, 이러한 과정은 제품 생산의 마지막 단계에서 이루어지는 실정으로 부적합한 시제품에 대해서는 재설계해야 하는 불편이 따르고 있다. 따라서 제품 생산과 실험적인 강도평가에 앞서 설계 단계에서의 강도평가가 이루어져야 하며, 이 단계에서 범용 프로그램인 ANSYS의 도입 및 활용은 제품의 생산과 강도평가에 있어서 시간과 비용의 절감 등 여러 가지 이점을 갖게 한다.^(13,14) 본 연구에서는 ANSYS를 이용하여 승용차용 디쉬 타입과 스포크 타입의 휠을 3차원 형상으로 모델링하고 구조해석과 피로해석을 수행하고자 한다. 이에 필요한 구속조건과 충격하중 조건을 통하여, 응력이 집중되는 부분을 예상하며, 그 정도를 파악함으로써 구조적인 강도평가와 피로해석 및 수명 예측을 실시하고 알루미늄과 구조용 강 등의 휠 재질에 따른 영향을 분석해 보고자 한다.

2. 휠의 구조 및 형상 모델링

2.1 휠의 구조

휠은 타이어와 함께 차량의 무게를 지지하고 주행과 제동, 구동 시에 발생하는 토크와 충격 및 다양한 하중 등에 견딜 수 있어야 한다. 승용차용 알루미늄 휠은 허브의 홈을 통해 차축에 볼트로 체결되며, 차량의 회전력을 타이어에 전달하고, 차량 운행 시 노면에서 발생하는 여러 종류의 하중을 타이어를 통해 이차적으로 흡수하는 부품이다. 이러한 승용차용 휠의 구조는 일반적으로 림(Rim) 부분과 디스크(Disk)부분으로 크게 나눌 수 있으

며, 세부적으로는 Fig. 1과 같이 옵셋(Offset), 허브(Hub), PCD(Pitch center diameter), 플랜지(Flange)로 구성된다.⁽¹⁵⁾

먼저, 림 부위는 타이어와 밀착되어 공기압을 유지시켜 주는 부위이며, 림 폭은 타이어의 편평비와 밀접한 관계가 있으며, 림 폭이 작은 경우는 사이드 월 부분이 지나치게 노출되어 위험이 따르고, 림 폭이 지나치게 큰 경우에는 연비가 증가되며 차체와의 간섭 등의 원인이 되기도 한다. 또한 디스크 부분은 휠의 디자인이 구사되어 있는 전면 부위를 말하며 차체와 체결하여 주는 허브 축 볼트 구멍 등이 포함되어 있다. 옵셋은 림의 중심선에서 디스크 장착면까지의 거리를 의미하며, 승용차의 경우 포지티브 옵셋, 지프차의 경우 네거티브 옵셋이라고 한다. 옵셋이 틀린 경우 차량 간섭 현상 발생의 원인이 된다. 또한 허브는 휠의 중앙 부분에 있는 구멍으로 차축과 체결되는 부분으로, 차축의 지름과 반드시 일치해야 된다. PCD는 휠이 차에 지탱할 목적으로 뚫은 볼트 구멍의 각 중심선을 연결한 원의 지름을 의미하며, PCD가 틀리면 차에 장착할 수 없게 된다. 승용차의 경우 그 구멍수가 4개이며 수입차등 고급차종은 5개가 보통이다. 플랜지는 타이어의 비드(Bead) 부분을

Table 1 Comparison of characteristics for aluminum alloy and structural steel

	Impact resistance	Fatigue resistance	Lighter weight	Precision
Aluminum alloy	Excellent	Excellent	Good	Excellent
Structural steel	Good	Good	Common	Common

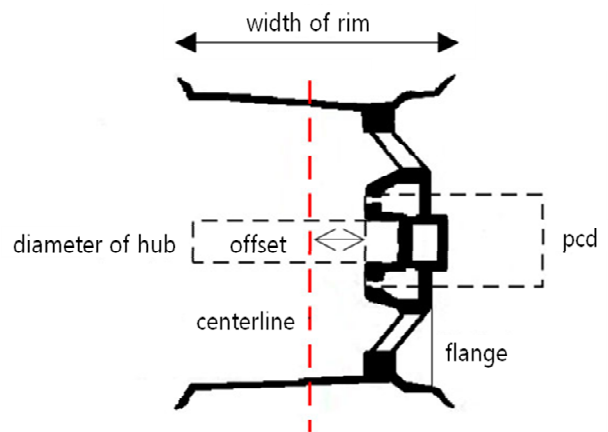
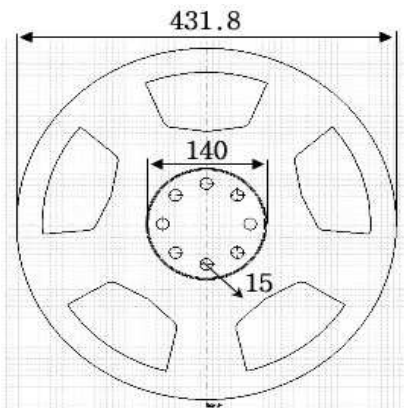
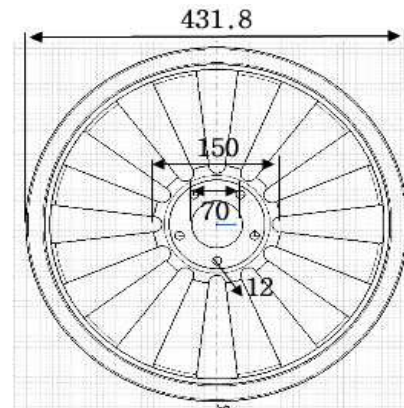


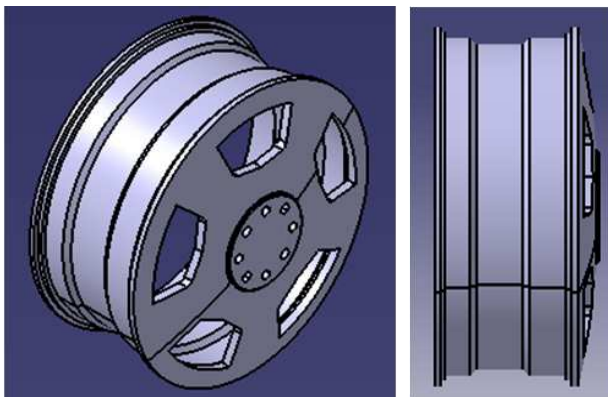
Fig. 1 Schematic view of wheel



(a) Dimensional drawing[mm]

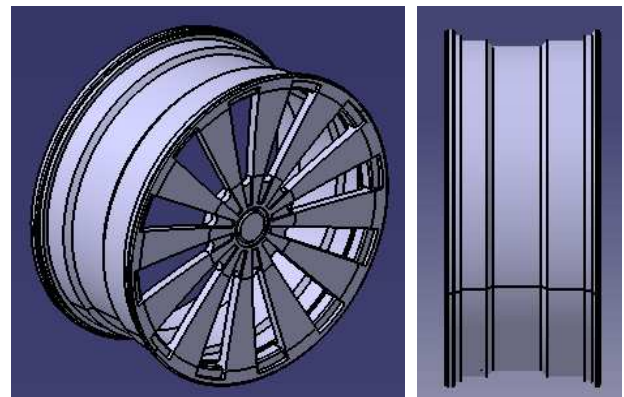


(a) Dimensional drawing[mm]



(b) CATIA CAD model

Fig. 2 Dish type wheel



(b) CATIA CAD model

Fig. 3 Spoke type wheel

지탱시켜 주는 부분으로 일반적으로 J 형(클립식 납 사용)과 JJ 형(부착식 납 사용)의 밸런스 납을 부착시켜주는 부위이다.

알루미늄 휠의 가격이 스틸 휠에 비해 비싸다는 단점이 있으나, Table 1 에서 보는 바와 같이 대체로 우수하다고 할 수 있다. 이러한 알루미늄 휠은 비철금속에 대한 꾸준한 연구개발을 통하여 다양한 제품으로 이어지고 있다.

2.2 형상 모델링

본 연구에서의 응력 해석에 사용된 휠의 형상은 다음과 같다. 먼저 디쉬 타입은 Fig. 2 와 같이, 디스크 부분이 접시 모양을 기본으로 한 형태로 강도 확보가 용이한 반면, 통기성이 떨어져 냉각성이 저하되는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 디스크 부분에 홀을 내기도 하고, 핀을 조합한 디자인 제품이 양산되고 있다. 반면, Fig. 3 에서 보는 바와 같이, 스포크 타입은 마차의 수레 바퀴를 기본으로 발전된 휠의 형태로서, 십자형으로부터 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 개 정도의 스포크를 갖는 경우를 스포크 타입이라고 하고 그 이상

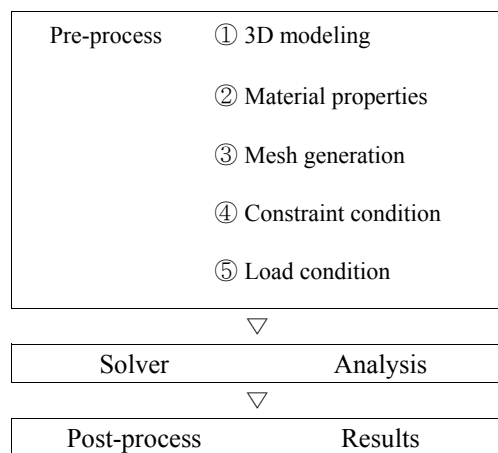


Fig. 4 Flow chart for structural analysis

을 핀 타입이라고 칭한다. 스포크 타입 휠은 강도 확보 및 경량화가 용이하고 냉각성에도 우수한 특징을 갖고 있다. 실제 휠의 충격시험은 2 기압으로 조절된 타이어를 휠에 장착시킨 상태에서 응력을 받도록 하고 있다. 하지만 기술적으로 매우 어려운 실험이므로 본 해석에서는 타이어를 고려한 경

계 조건은 생략하였으며 휠 만을 고려하여 모델링 하였다.

3. 휠의 구조해석

범용 구조해석 프로그램인 ANSYS Workbench 를 이용하여 수행한 승용차용 디쉬 타입과 스포크 타

입의 휠에 대한 구조해석 과정은 Fig. 4 와 같이 간략하게 정리할 수 있다.

3.1 유한요소 분할

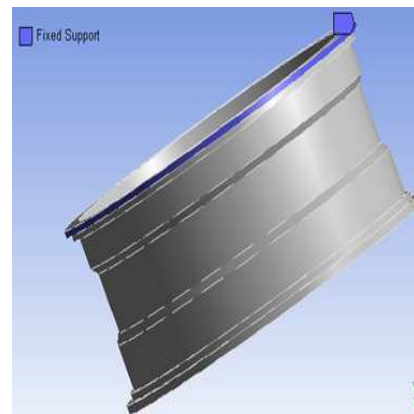
Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)는 각각 디쉬 타입과 스포크 타입의 휠 모델을 해석하기 위해 생성한 유한요소 분할도이며, 본 연구에서는 4 절점 사면체 요소를 사용하였다. 해석 모델에 사용된 알루미늄 합금과

Table 2 Material properties

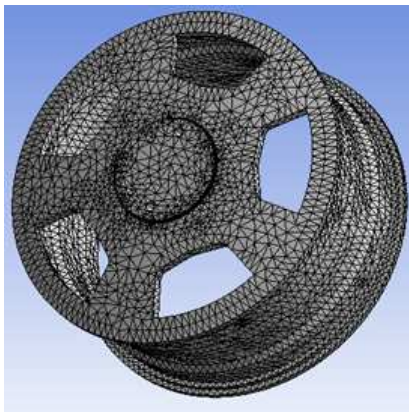
	Young's Modulus	Poisson's ratio
Aluminum alloy	71 GPa	0.33
Structural steel	200 GPa	0.32

Table 3 Number of elements and nodes

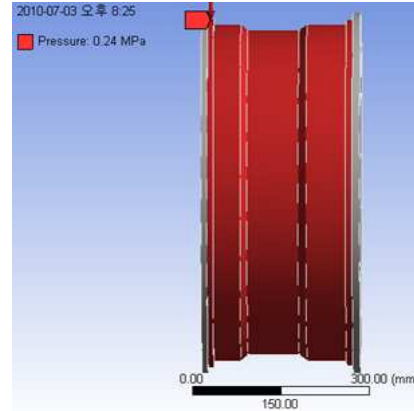
	Elements	Nodes
Dish type	41389	92346
Spoke type	58707	107799



(a) Boundary condition



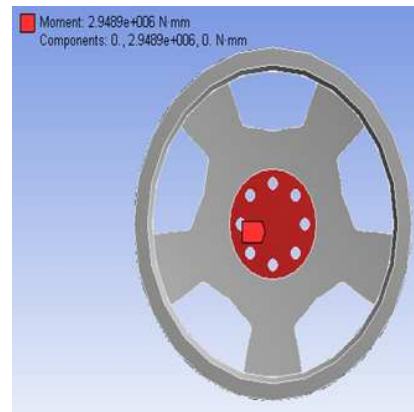
(a) Dish type



(b) Load condition



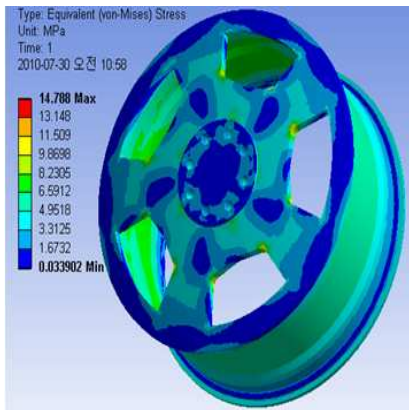
(b) Spoke type



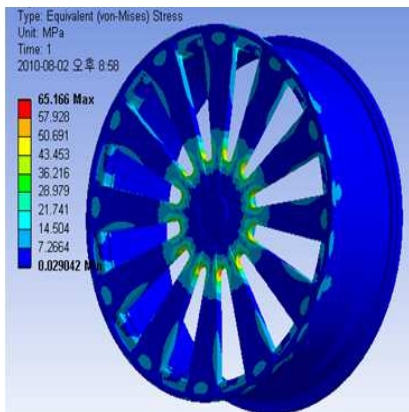
(c) Moment condition

Fig. 5 Finite element meshes

Fig. 6 Constraint conditions



(a) Dish type



(b) Spoke type

Fig. 7 Equivalent stress distribution

구조용 강에 대한 재료 물성치는 각각 Table 2 와 같고, 디쉬 타입과 스포크 타입 유한요소 모델에 대한 요소 수와 절점 수는 각각 Table 3 과 같다.

3.2 경계조건

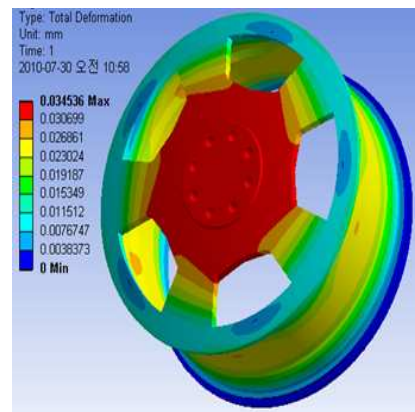
모델에 대한 경계조건을 부여하기 위해, 먼저 Fig. 6(a)와 같이 휠의 끝 면을 선택하여 고정시킨다. 또한 정적인 상태에서의 휠에 대한 응력 분포를 확인하기 위해, Fig. 6(b)와 같이 타이어와 접하는 면을 선택하여 수직방향으로 0.24MPa의 압력을 적용하였다. 회전에 대한 모멘트를 고려하기 위해, Fig. 6(c)와 같이 휠의 안쪽인 브레이크와 연결되는 면을 선택한 뒤 하중의 방향을 전역 직교 좌표틀 기준으로 2948.9kN·mm를 가하였다.

3.3 구조해석

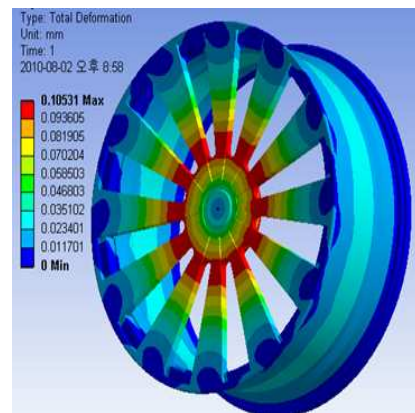
알루미늄 합금에 대한 디쉬 타입과 스포크 타입 휠에 대한 구조해석을 실시한 결과, Fig. 7 과 같이 디쉬 타입에 대한 최대등가응력은 14.79MPa 이었으며, 스포크 타입에 대한 최대등가응력은 65.17MPa 이었다. 또한 디쉬 타입과 스포크 타입

Table 4 Analytic results for structural steel

	Dish type	Spoke type
Maximum deformation	0.012 mm	0.037 mm
Maximum equivalent stress	14.78 MPa	65.43 MPa



(a) Dish type



(b) Spoke type

Fig. 8 Total deformation

휠에 대한 변형량을 조사한 결과, Fig. 8 과 같이 디쉬 타입에 대한 최대변형량은 0.035mm 이었으며, 스포크 타입에 대한 최대변형량은 0.105mm 이었다. 또한 구조용 강 재질에 대한 디쉬 타입과 스포크 타입 휠에 대한 구조해석을 실시한 결과, Table 4 와 같이 디쉬 타입과 스포크 타입에 대한 최대등가응력은 각각 14.78MPa 과 65.43MPa 이었으며, 디쉬 타입과 스포크 타입에 대한 최대변형량은 각각 0.012mm 와 0.037 mm 를 나타내었다. 즉 최대변형량은 타입에 상관없이 알루미늄 합금의 경우가 구조용 강에 비해 3 배 정도 컸음을 알 수 있었다. 이는 Table 2 에서 보인 바와 같이, 알

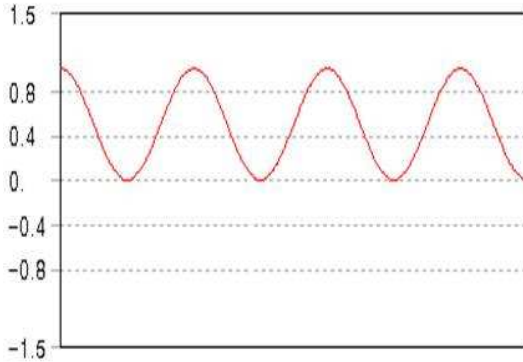


Fig. 9 Amplitude loading ratio of fatigue analysis

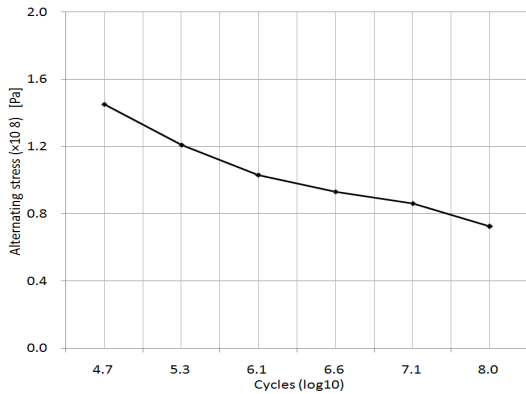


Fig. 10 S-N curve of aluminum alloy

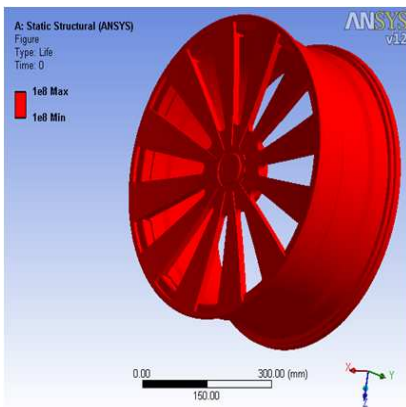
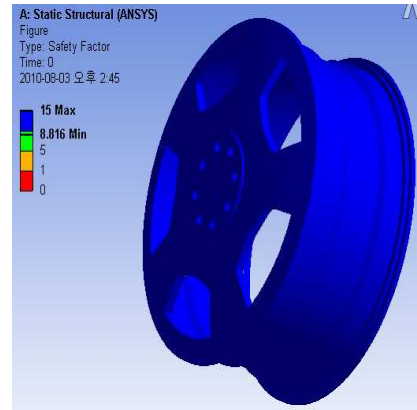


Fig. 11 Fatigue life for spoke type

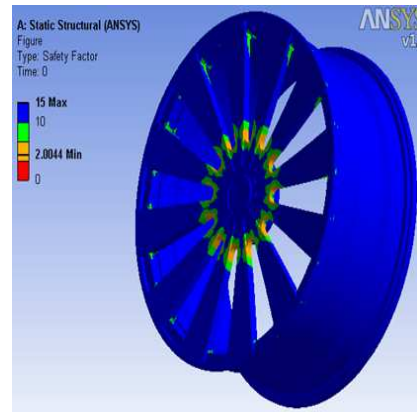
루미늄 합금의 탄성계수가 구조용 강에 비해 3 배 정도로 작기 때문이다.

3.4 피로해석

연강에 적합한 Goodman 이론⁽¹⁶⁾에 따라, Fig. 9 와 같이 인장 하중의 적용과 제거를 반복하여 피로수명 예측을 실시하였으며, Fig. 10 은 알루미늄 합금에 대한 S-N 곡선을 나타내고 있다. 일반적으



(a) Dish type



(b) Spoke type

Fig. 12 Safety factor

로 최대등가응력이 발생하는 위치에서 최소수명이 발생하게 되는데 알루미늄 강 재질의 휠에 대한 피로해석에 따른 수명 예측 결과, Fig. 11 과 같이 스포크 타입 휠에 대해 10E7 의 수명을 갖는 것으로 나타났다. 구조물의 설계에 있어서 고려해야 할 중요한 사항 중의 하나는 하중을 지지하거나 이송시키도록 설계된 물체의 부하능력을 들 수 있으며, 하중을 견뎌야 하는 구조물의 파단을 피하기 위해선 구조물이 실제로 지지할 수 있는 하중이 사용 중 견디는 데 필요한 하중보다 커야 한다.

이를 위해 구조해석에서 구한 최대등가응력과 알루미늄 합금의 인장항복강도(130MPa)를 기준으로 안전율(safety factor)을 계산한 결과, Fig. 11 과 같이 디쉬 타입의 안전율은 최소 8.816 을 나타냈고, 스포크 타입의 경우는 최소 2.0044 를 나타냈다. 또한 위치에 따른 안전율의 분포를 보면, 디쉬 타입이 스포크 타입에 비해 전반적으로 작은 차이를 보였으며, 스포크 타입은 허브와 스포크의 연결 부위에서 상대적인 안전율의 차이를 크게 나타내어 이 부분이 특히 취약함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 범용 구조해석 프로그램인 ANSYS 를 이용하여 승용차용 디쉬 타입과 스포크 타입의 휠에 대한 구조해석과 피로해석을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 디쉬 타입과 스포크 타입에 대한 해석 결과를 보면, 디쉬 타입이 스포크 타입에 비해 변형이 33% 정도로 적게 일어나고 최대등가응력도 23% 정도로 작음을 알 수 있다.

(2) 알루미늄 합금과 구조용 강철의 재질에 대한 영향을 알고자 해석한 결과, 디쉬 타입과 스포크 타입에 관계없이 최대등가응력은 거의 비슷하였으나, 최대변형량은 타입에 관계없이 모두 알루미늄 합금의 경우가 구조용 강에 비해 3 배 정도 컸음을 알 수 있다.

(3) 디쉬 타입의 최소 안전율이 스포크 타입에 비해 약 4.4 배 정도 큰 것으로 나타났고, 위치에 따른 안전율을 비교해 보면 디쉬 타입의 경우가 스포크 타입에 비해 전반적으로 작은 차이를 보였으며, 스포크 타입의 경우는 허브와 스포크의 연결 부위에서 상대적인 안전율의 차이가 크게 나타나 이 부분이 특히 취약함을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- (1) Song, J. Y., Park, J. C. and Ahn, Y. S., 2010, "Effect of Cast Microstructure on Fatigue Behaviors of A356 Aluminum Alloy for Automotive Wheel," *Trans. of the KFS*, Vol.30, No.1, pp.46~51.
- (2) Kim, M. S., Ko, K. J., Song, H. W., Yang, C. G. and Kim, K. M., 2004, "The Finite Element Analysis on 2-piece Forged Wheel for Fatigue Life Prediction," *Proc. of the KSAE, Fall Conference*, pp.691~696.
- (3) Kim, M. S., Ko, K. J., Kim, J. H., Yang, C. G. and Kim, K. M., 2004, "The Study on the Fatigue Life Prediction on Wheels Through CAE," *Trans. of the KSAE*, Vol.12, No.2, pp.117~122.
- (4) Ko, K. J., Kim, M. S., Song, H. W. and Yang, C. G., 2006, "A Study on the Stiffness of a 13degree-Type Impact Tester for Aluminum Wheels," *Trans. of the KSAE*, Vol.14, No.4, pp.12~19.
- (5) Noh, B. W., Bae, S. I. and Kim, D. K., 1997, "Structural Analysis of Aluminum Wheel for Automobiles," *Proc. of the KSPE Fall Conference*, pp.822~825.
- (6) Jeong, S. K., 2004, *Study on the Alloy Wheel Design of the Car*, Hongik University, Master's Thesis.
- (7) Kim, B. S., Chi, C. H. and Mun, S. D., 2001, "An Experimental Study on Vibration Characteristics of Al-alloy Wheel for Passenger Car," *Proc. of the KSME Fall Conference*, pp.623~628.
- (8) Kim, B. S., 2005, "An Study on Vibration Characteristics of Automobile Al-alloy Wheel," *Trans. of the KSMTE*, Vol.14, No.3, pp.122~127.
- (9) Kim, S., 2006, *Performance Analysis of Automotive Wheel Through Dynamic Simulation*, Chonbuk National University, Master's Thesis.
- (10) Cho, J. U. and Han, M. S., 2010, "Analysis of Fatigue Damage at Wheel under Variable Load," *Trans. of the KSMTE*, Vol.19, No.6, pp.717~894.
- (11) Sherwood, J. A., Ayres, J. M., Gross, T. S. and Watt, D., 1995, "An Investigation of Tire-Wheel Interface Loads Using ADINA," *Computers & Structures*, Vol.56, No.2-3, pp.377~387.
- (12) Kalyanasundaram, S., Lowe, A. and Watters, A. J., 2006, "Finite Element Analysis and Optimization of Composite Wheelchair Wheels," *Composite Structures*, Vol.75, No.1-4, pp.393~399.
- (13) Moaveni, S., 2008, *Theory and Application with ANSYS*, Pearson Education/Prentice Hall., USA.
- (14) Swanson, J., 2009, *Ansys 12.0*, Ansys Inc., USA.
- (15) Kim, K. S., Lim, H. S., Kim, D. G. and Cho, J. G., 2010, *Automotive Chassis*, Goomibook, Korea.
- (16) Song, M. J., Jung, S. Y., Hwang, B. C. and Kim, C., 2010, "A Study on Structure Analysis and Fatigue Life of the Common Rail Pipe," *Trans. of Materials Processing*, Vol.19, No.2, pp.88~94.