

유한요소법에 의한 3 Piece Alloy Wheel의 안전성 평가

이양창*, 이준성**, 이은철**, 이호정**

*대림대학 산학협력팀

**경기대학교 기계시스템공학과

e-mail: yclee@daelim.ac.kr

Safety Assessment for the 3 Piece Alloy Wheel by Finite Element Method

Yang-Chang Lee*, Joon-Seong Lee**, En-Chul Lee**,
Ho-Jung Lee**

*Dept. of Industry Academic Cooperation, DaeLim College

**Dept. of Mechanical System Engineering, Kyonggi University

요 약

자동차용 Alloy Wheel은 차량의 수직하중이나 가로 방향 하중, 구동, 제동토크 등 주행 시에 발생하는 여러 형태의 응력을 받으면서 사용되므로 이러한 응력을 견딜 수 있는 강성은 물론 차량 부품으로서의 요구 수명도 만족하여야 한다. 알루미늄 휠은 개발 후 규격에 준하는 내구성 평가를 위하여 반경 방향 부하 내구시험과 굽힘모멘트 내구시험과 주행 중 요철이나 벽돌 등에 의한 노면으로부터 갑작스런 하중에 대한 내충격성 평가를 위한 충격시험이 실행되고 있다. 이러한 시험은 많은 시간이 소요되고 있으며, 또한 시험 중 불합격 판정이 날 경우 또다시 처음의 공정을 모두 거쳐 다시 시험을 하게 된다. 3 Piece와 같은 알루미늄 휠은 여러 공정에 의한 생산되어지기 때문에 많은 시간적, 물질적 손실이 일어나고 있다. 따라서 자동차용 알루미늄 휠의 요구조건을 충분히 만족시키며 소비자의 요구에 맞는 품질과 시간을 충족시켜 기업경쟁력 확보는 물론 원가절감에 의한 기업 경쟁력 향상을 위하여 설계 단계서부터 시험조건을 고려한 내구성 해석에 의한 알루미늄 휠의 시험횟수를 단축하고자 한다. 본 논문에서는 3 Piece 알루미늄 휠의 축(shaft)하중에 의한 내구성 평가에 대하여 CAE시스템을 이용하여 보다 빠르고 정확한 결과를 산출함으로써 설계시간의 단축은 물론 다양한 형상의 제품들을 설계단계에서부터 생산에 이르기까지의 해석활용법을 수립하고자 하였다.

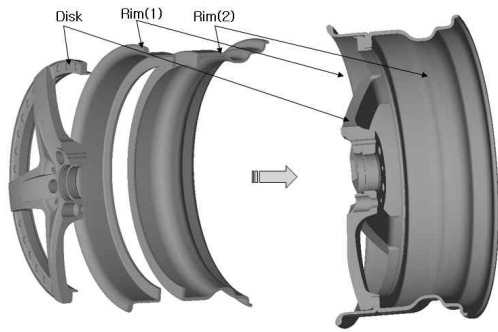
1. 서론

자동차의 이동수단인 자동차 바퀴는 처음에는 steel에 의한 구조였으며 1980년초 국내에서 알루미늄 합금을 중력 및 저압 주조 공법에 의해 생산하면서 다양한 디자인 개발과 경량화로 자동차의 연비향상은 물론 안전성 향상에 큰 발전을 가져왔다. 현재는 다양한 알루미늄 휠이 생산되어지는 가운데 자동차들의 고급화로 일반적인 주조제품이 아닌 단조, 즉 소재 생산을 단조공정[1]으로 생산하고 또한 disk부의 디자인 부분과 조립부분을 모두 주조공정에 의한 성형방법이 아닌 기계가공에 의하여 생산되어지는 경우가 많아지고 있다. 이는 개인적인 자동차의 튜닝과 또는 고급 차종들의 수요에 맞는 알루미늄 휠을 생산 형식의 시장이 날로 커져가고 있기 때문이다.

따라서 다양한 시장의 요구에 부응하기 위하여 알루미늄 휠의 설계능력은 물론 기계가공에 의한 제조 기술과 시험 장치를 갖추고 있어야 한다. 일반적인 알루미늄 휠 구조는 림(rim)과 디스크(disk)가 하나로 성형된 일체형으로 생산하였다. 그러나 그림 1과 같이 Al6061재질에 의한 3 Piece의 형태로 구조적으로 보다 안전하며 경량화된 알루미늄 휠의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 이는 주조용 알루미늄 휠에 비하여 견고함은 물론 탄성력이 뛰어나다.

Al6061은 대형 플랜트, 선박, 해상의 플랜트는 물론 자동차 차체 및 자동차 정밀 부품 등 항상 반복 하중을 받고 있는 구조물에 대하여 널리 사용되며 이용한 갖가지 신뢰성 평가 및 실험은 다양한 결과로 나타나고 있다[2]. 알루미늄 휠은 차량의 수직하중이나 가로 방향 하중, 구동, 제동토크 등 주행 시

에 발생하는 여러 형태의 응력을 받으면서 사용되므로 이러한 응력을 견딜 수 있는 강성은 물론 차량 부품으로서의 요구 수명도 만족하여야 한다. 따라서 휠이 갖추어야 할 조건으로서는 회전체에 필요한 수치의 정밀도, 정확한 균형, 타이어를 지지하는 림의 윤곽 형상, 치수가 정확하여야 하고 충분한 강성과 탄성은 물론 내피로성과 내충격성이 요구된다[3].



[그림 1] 3 Piece Wheel의 구조

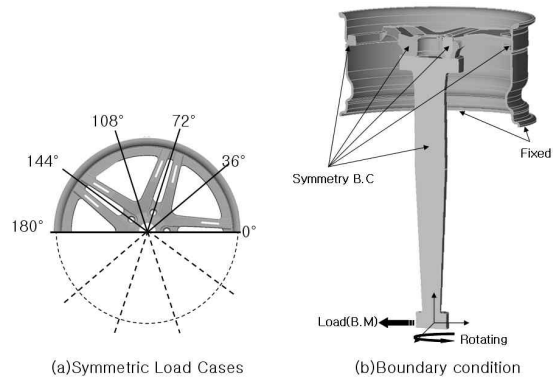
이러한 이유로 알루미늄 휠은 개발 후 규격에 준하는 내구성 평가를 하여야 한다. 자동차용 알루미늄 휠의 내구성 시험 기준은 일반적으로 KS R 4055 자동차용 디스크 휠 규격과 ISO 7141 충격 시험규격 및 시험 방법을 적용하여 시험하고 있다. 시험에 적용된 하중은 규격에서 해당되는 휠에 적용되는 지정된 계수와 사용 타이어 규격 KS M6750의 규정에 의해 산출되어지고 있다[4]. 반경방향 부하 내구시험과 굽힘모멘트 내구시험과 주행 중 요철이나 벽돌 등에 의한 노면으로부터 갑작스런 하중에 대한 내충격성 평가를 위한 충격시험이 실행되고 있다. 이러한 시험은 많은 시간이 소요되고 있으며, 또한 시험 중 불합격 판정이 날 경우 또다시 처음의 공정을 모두 거쳐 다시 시험을 하게 된다. 특히 3 Piece와 같은 알루미늄 휠은 여러 공정에 의한 생산되어지기 때문에 많은 시간적, 물질적 손실이 일어나고 있다. 따라서 자동차용 알루미늄 휠의 요구조건을 충분히 만족시키며 소비자의 요구에 맞는 품질과 시간을 충족시켜 기업경쟁력을 확보는 물론 원가절감에 의한 기업경쟁력 향상을 위하여 설계 단계서부터 시험조건을 고려한 내구성 해석에 의해 알루미늄 휠의 시험횟수를 단축하며 더 나아가 실험을 하지 않고 전산 시스템에 의한 내구성 평가로 3 Piece 알루미늄 휠 개발의 시간 단축과 이로 인한 생산 원가 절감은 물론 가격, 성능 경쟁력을 높이는 데 도움이 되고자 한다. 일반적으로 가속 시험은 굽힘 하중에 의한 피로해석

을 하고 있기 때문에 본 논문에서는 굽힘 시험법에 기준하여 해석을 수행하였다.

2. 굽힘 모멘트 해석을 위한 하중 및 경계조건

알루미늄 휠의 해석을 위해 COMSOL Multiphysics Software의 Fatigue 모듈을 이용하였고, 굽힘 하중에 의한 해석은 탄성 범위 내에 있는 타이어를 장착하지 않고 휠(wheel) 자체만으로 실험을 하기 때문에 외부에서 가해지는 하중은 이론적으로 휠(wheel)에만 적용되게 된다는 점을 고려하였으며, 그림 2와 같이 굽힘모멘트를 전달하기 위하여 디스크(disk)와 림(rim)부분의 플랜지 밑부분을 회전원판에 고정된 것과 같이 고정하였다. 또한, 허브 부분에 충분한 강성이 있는 축을 디스크 휠을 차량에 장착시킨 것과 같은 상태로 시험기에 장착하는 구조로 하여 축 끝 부분에서 굽힘모멘트를 주면서 최저 20만 회전을 가하였다. 해석 모델은 굽힘하중에 의한 해석모델과 같이 1/2 모델이며 또한 대칭 조건을 주었다. 그리고 가해지는 굽힘하중은 다음 식(1)과 같다.

$$M = Sm \times F \times (\mu \times r + a) = (\text{kgf} \cdot \text{m}) \quad (1)$$

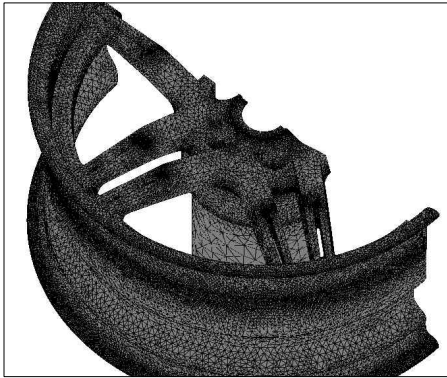


[그림 2] 대칭하중과 경계조건

그림 2에서와 같이 두 위치에서 적용된 하중에 대한 응력분포를 얻기 위해 대칭 그리고 반대칭 하중 상태의 중첩, 어떤 특정한 위치에서의 적용된 하중에 대해서 각각 대칭과 반대칭 경계조건으로 형상의 반을 이용하여 모델을 해석할 수 있다. 회전체인 축에서의 하중은 원주방향으로 30°간격으로 회전하는 것으로 추정하고, 디스크 주위에 10개의 지점에 일정하게 구분된 접촉점에 응력분포를 해석하는 것이 합리적이다. 이것은 parameter값을 통해서 매개변수

solve step으로 하여 이동하는 하중을 모델링을 할 수 있으며, 위치와 분포를 통제하는 하중 표현으로 이용할 수 있다[5].

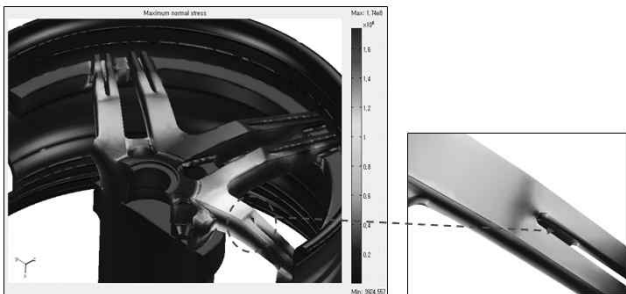
해석에 적용된 재료의 물성치는 탄성계수(E)=70GPa, 포아송비(ν)=0.33이고, parameter $f=180 \times 10^6$ 과 $k=0.30$ 에 값을 산출하여 적용할 수 있다. 해석에서 파라미터 k 는 하중의 위치를 제어하기 위해 이용된다. 해석모델은 그림 3과 같다.



[그림 3] 해석을 위해 사용된 유한요소모델(사면체요소수:480,000개)

3. 해석 결과

0°에 위치한 굽힘모멘트 하중에 대한 접촉점에 조합된 하중에 대한 평균 응력은 다음과 같다. 굽힘모멘트 하중은 축의 끝 단면에서 회전 중심축을 제외한 나머지 두 축방향의 회전을 위한 함수를 적용하였다. 해석결과 계산된 피로손상의 최대값은 0.998이다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 응력집중 부분은 스포크 안쪽 작은 홈 부분이고 스포크와 허브 안쪽 원도우 부분과 연결되는 곳이다. 이 또한 휠의 구조 특성상 높은 응력이 항상 높은 이력을 나타내는 것은 아니다. 시험하중 굽힘모멘트 하중은 357.0kgf·m을 적용하였다. 이를 Al6061 S-N 선도에 대입해보면 알 수 있듯이 피로수명은 약 23만 회전으로 시험 기준인 20만 회전을 만족하였다.



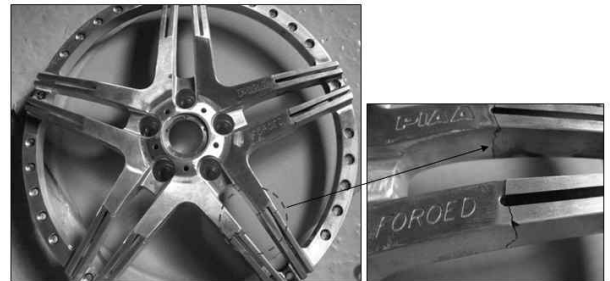
[그림 4] 0°에서 조합된 하중에 대한 평균응력 분포

4. 실험 결과

유한 요소해석을 결과의 검증은 위하여 bending moment 시험기를 이용하여 테스트 하였다. 실험은 3차에 걸쳐서 이루어졌으며 실험하중 bending moment값은 357.0kgf·m이다.

4.1 1차 실험 결과

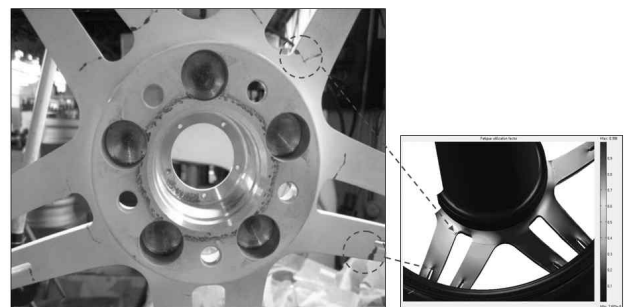
1차 실험 결과는 약 17만 회전에서 그림 5와 같이 스포크 부위의 작은 홈 부분에서 파손이 일어났다. 유한요소 해석에서 계산된 Fatigue Damage값은 최대 1.502이다. 이는 약 16만 회전에서 파손이 일어날 것으로 예측되었다. 그런데 실제적인 실험에서는 약 17만 회전에서 예측된 부분에 파손이 일어났다.



[그림 5] Disk부의 스포크 파손

4.2 2차 실험결과

2차 실험에서는 파손된 부분의 스포크 부분에 작은 홈 부분을 1/2 정도 단이 이루어지도록 수정하여 또 다시 처음 공정부터 가공하여 제작한 후에 1차 실험방법과 동일한 방법으로 실험을 하였다.



[그림 6] Disk부의 배면부 파손

유한요소 해석을 통하여 계산된 피로손상값은 최대 0.998이다. 이는 약 21만 회전의 수명을 예측할 수 있다. 그러나 실제적인 실험에서는 시험기준인 20만 회전에서 실험을 멈춘 후 실험대상을 살펴본 결과

그림 6과 같이 디스크 배면부, 윈도우 부분에 균열이 발생하였다. 이는 유한요소 해석결과와도 거의 일치하였다. 2차 실험결과에서 약 20만 회전 근접한 부분에서 균열이 발생한 것으로 판정된다. 따라서 디스크의 배면부의 두께를 약 1mm가량 두께 조절하여 처음부터 가공, 제작을 완료한 후에 1차와 동일한 방법으로 실험을 하였다. 그 결과 시험기준인 20만회전의 수명을 안전하게 통과하였다.

5. 결론

3 Piece 단조 제품의 Alloy Wheel을 설계 과정에서 필요로 하는 내구성 평가를 위해 유한요소해석을 이용한 시뮬레이션과 실제 실험을 수행하였다. 실험은 실험시간이 비교적 짧은 축(shaft) 굽힘모멘트 하중에 의한 가속시험을 실시하였다. 시험 횟수는 총 3회 걸쳐 실시하였다.

시험 결과는 유한요소 해석결과와 거의 일치함을 알 수 있었다. 실제적인 시험은 많은 시간이 소요되고 있으며, 또한 시험 중 불합격 판정이 날 경우 또 다시 처음의 공정을 모두 거쳐 다시 시험을 하게 된다. 특히나 알루미늄 휠은 여러 공정에 의해 생산되어지기 때문에 많은 시간적, 물질적 손실이 일어나고 있다. 따라서 유한요소에 의한 내구성 해석의 방법과 그 결과의 데이터들을 모든 개발제품에 적용하여도 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Oh Hyuk Kwo, Won Byong Bae, Jong Rae Cho., "Forging Effect of Al 6061 in Casting/Forging Process" Journal of the Koeran Society of Precision Engineering, Vol 22 pp. 45-50, 2005.
- [2] Seok Hean Ahn, Jin Wook Kim, Ki Woo Nam., "Influence of Stress Ratio of Elastic Waves Generated by Fatigue Crack Growth and Penetration in 6061 Aluminum Plates", 대한기계학회논문집 A권, 제29권 제6호, pp. 822-827, 2005.
- [3] Kim. M. S., Ko. K. J., Song. H. W., Yang. C. G., and Kim. K. M., "The Finite Element Analysis on 2-piece forged wheel for Fatiguer Life Prediction", KSAE Annual Fall Conferece,

Vol 2, pp. 691-696, 2004.

- [4] Disk wheels for automobiles(KS R 4055), KSA, 1996.
- [5] "Standard practices for cycle counting in fatigue analysis," ASTM international, ASTM E 1049-85, 2005.