

F1 서킷 극한주행시험을 통한 알루미늄 알로이 휠의 동응력/변형률 계측 및 분석

Dynamic Stress/Strain Measurement and Analysis of the Aluminum Alloy Road Wheel through F1 Circuit Ultimate Driving Test

이창수† · 이창수‡ · 박철순* · 박형배* · 정성필* · 정원선*

Lee Chang Soo, Park Cheol Soon, Park Hyung Bae, Jung Sung Pil
and Chung Won Sun

Key Words : Road wheel(로드 휠), Dynamic stress(동응력), Dynamic strain(동변형률), Lateral acceleration
(횡가속도), Longitudinal acceleration(종가속도), F1 circuit(F1 서킷)

ABSTRACT

It is generally known that the automotive road wheel involves the non-proportional multiaxial loading condition, therefore the measuring dynamic stress and strain in driving state is very important to predict an endurance characteristic of the automotive road wheel. In this study, the ultimate driving test using F1 circuit with respect to 2 kinds of velocity conditions have been carried out in order to measure dynamic stress, strain of the wheel and acceleration of a vehicle. Based on the measured results, the characteristics of dynamic stress generation have been analyzed, and factors which have effect on the dynamic stress generation have been studied.

기 호 설 명

V_S : 전원 전압
 V_O : 측정 전압
 GF : 게이지 팩터

1. 서 론

자동차용 로드 휠(Road wheel)은 차량의 하중지지, 노면진동, 구동/제동력, 충격을 흡수하는 부품이며, 타이어를 장착해 견고하게 일정한 형태를 유지하고 자동차의 허브(HUB)에 설치되어 차의 운동과 동력을 전달하는 기능을 수행한다. 실제 차량 주행

시, 휠은 차량부품 중 가장 가혹한 환경조건에 노출되어 있으며 다축 방향에서의 노면하중을 견딜 수 있는 내구성을 가지도록 설계되어야 한다⁽¹⁾.

따라서 최근 실제 차량 주행 시 휠과 노면 사이에서 작용하는 다축 하중에 의하여 휠에 발생하는 응력을 분석하기 위해 복합 다축 휠 내구 시험을 전산 해석적으로 모사하여 다양한 연구가 수행되어지고 있다⁽¹⁾⁻⁽³⁾. 복합 다축 내구 휠 시험은 기존의 일방향 단축 시험과는 달리 휠하중, 수직하중 그리고 캠버각을 고려한 다축 시험이 가능하다⁽⁴⁾.

본 연구는 실 주행조건에서 발생하는 휠의 동응력 분석을 위하여 다양한 코너조건 등의 극한주행시험이 가능한 F1 서킷(Korea International Circuit; KIC) 극한주행시험을 실시하였고, 다축 하중에 의하여 발생하는 알루미늄 알로이 휠(Aluminum alloy road wheel) 취약부의 동응력, 스트레인을 계측하였다. 또한 주행 중 발생하는 휠의 동응력 발생 주요 영향인자를 도출 및 분석하였다.

† 교신저자; 이창수, 자동차부품연구원
E-mail : cslee@katech.re.kr
Tel : 061-464-9980, Fax :061-464-9967

‡ 이창수; 자동차부품연구원

* 자동차부품연구원

Table 1 Principal dimension and Material properties of the aluminum alloy road wheel(18")

Test wheel		
Size		7.5×18
Weight [kg]		11.65
Material Properties	Elastic Modulus [MPa]	72,000
	UTS [MPa]	284.3
	YS [MPa]	204.5
	Elongation [%]	12.19



Fig. 1 Aluminum alloy road wheel(18") for the test

2. F1 서킷 극한주행시험

2.1 극한주행시험 방안 수립

(1)시험 대상 휠

본 시험에서는 일반적인 중대형 차량에 적용되는 국내 제조업체의 18" 알루미늄 알로이 주조휠을 대상으로 선정하였으며, 시험 대상 휠의 기계적 물성 및 주요 특성은 Table 1과 같다.

(2)주행 환경 조건 정의

본 연구를 위하여 전라남도 영암에 위치한 F1 서킷(KIC)을 시험로로 사용하였다. 영암 F1 서킷의 총 주행거리는 5.615km에 달하며 직선코스(1,160m)와 18개의 코너(우회전 7곳, 좌회전 11곳)로 구성되어 있다. Fig. 2에 각 속도에 따른 직선코스 및 코너를 나타내었다.

계측위치(좌/우륜)와 주행속도 범위(고속/저속)의 구분에 따라 총 4가지 주행조건으로 시험을 진행하였다. 주행속도 범위의 구분은 Table 2와 같다.

Table 2 F1 circuit driving test condition

	Low Speed	High Speed
Max. Speed [km/h]	100	140
Low Speed Corner [km/h]	40	55
Medium/High Speed Corner [km/h]	60 - 80	80 - 100
Avg. Speed [km/h]	75 - 78	86 - 90
Lap Time [Min.:Sec.]	4:20 - 4:30	3:45 - 3:55

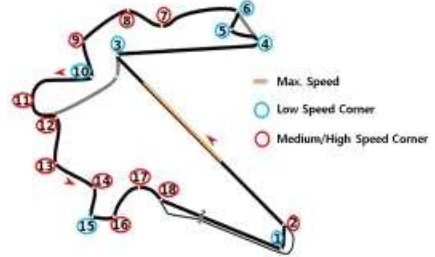


Fig. 2 Definition of corner and straight sections with respect to the speed

(3)휠 센서화 및 계측 시스템 구성

FEA(Finite Element Analysis) 해석결과를 바탕으로, 휠의 핵심 주요 취약부(허브에 근접한 스포크部)를 확인하였고, 취약부의 스트레스 방향이 비교적 명확함을 확인할 수 있다. 로제트의 1축 방향이 주방향과 일치하도록 스트레인 게이지를 부착하였으며, 단축 게이지는 형상 특성상 로제트 부착이 어려운 곳에 응력의 방향을 고려하여 부착하였다. 시험 대상 휠의 해석결과와 스트레인 게이지 부착 위치는 Fig. 3과 같다.

휠의 동응력 및 동스트레인 측정을 위하여 로제트 게이지(2ea), 단축 게이지(2ea)의 총 8개 채널을 구성하였으며 부착된 각 스트레인 게이지별 채널(Ch.)은 Fig. 4와 같다. 또한 휠이 외부에 노출되어 있으므로 스트레인 게이지 및 와이어링 작업이 완료된 후에는 게이지 보호용 실리콘을 도포하여 휠을 센서화 하였다.

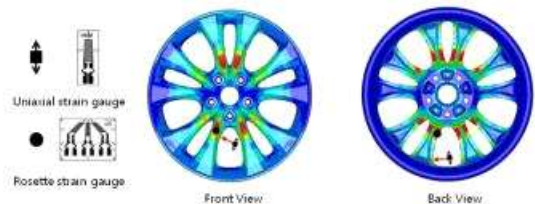


Fig. 3 Determination of the strain gauge locations based on FEA results



(a) Front view (b) Back view

Fig. 4 Definition of the channels(1~8) for data acquisition



Fig. 5 data and signal measurement system



Fig. 6 Ultimate driving test in F1 circuit

휠은 고속으로 회전하는 부품이므로 직접적으로 신호를 수신하기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 SMAT eDAQ(HBM社)과 텔레메트리 시스템(RTM社) 간의 무선통신을 통하여 신호를 취득하였다. 그 외에는 자이로스코프 센서, GPS 센서, 네트워크 카메라 등을 시험에 활용하였다.

2.2 극한주행시험을 통한 알루미늄 알로이 휠의 동응력 및 스트레인 분석

(1) 임계 평면에서의 동응력 및 스트레인

휠의 동응력 및 스트레인 분포 분석을 위해 다양한 좌, 우 코너 및 고속직선 구간 환경 조건을 보유한 F1 서킷에서 주행시험을 실시하였다.

본 연구에서는 GlyphWorks v.10.0을 활용하여 eDAQ을 통하여 저장된 데이터 프로세싱을 수행하였다.

시험 중 브레이크 모듈에서 발생하는 열로 인하여 스트레인 게이지에서 출력되는 전압이 offset 또는 drift될 수 있으므로 이 영향을 제거할 필요성이

있다. 전압 신호의 비선형 드리프트(nonlinear drift)를 제거하기 위해서는 연속 평균치(running mean) 데이터를 생성하고 이것을 원래 신호에서 감하면 오프셋(offset)과 드리프트(drift)를 제거할 수 있다⁽⁵⁾.

eDAQ에서는 mV 단위의 전압의 형태로 최초 수신되기 때문에 이를 μm 단위의 스트레인으로 변환하였다. 본 시험에서 활용된 텔레메트리는 하프브릿지(half bridge)를 지원하므로 더미 저항을 활용하여 쿼터 브리지(quarter bridge) 개념으로 전압 데이터를 측정하였다. 사용된 게이지 팩터는 2.15이며, V_0 와 ϵ 의 환산 관계식은 식(1)과 같다⁽⁶⁾.

$$V_0 = \frac{V_s \cdot GF \cdot \epsilon}{4} \Rightarrow V_0 = 2.6875 \cdot \epsilon \quad (1)$$

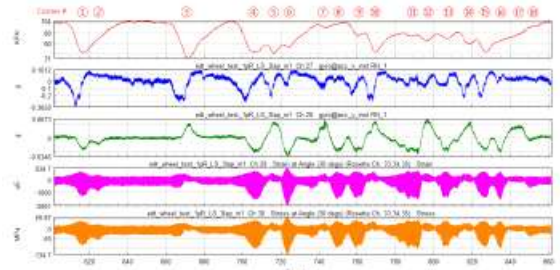
차량 주행 시, 대부분의 부품들은 스트레스와 스트레인이 비비례(non-proportional)하게 다축 방향으로 발생하게 된다. 이러한 경우 다축피로를 분석하고자 할 때 표면에서의 응력을 계산하기 위하여 여러 방향($0^\circ \sim 180^\circ$)의 평면에 대하여 발생하는 스트레인 결과에 대하여 레인플로우 계산(rain flow count)을 하고 각 평면에서의 피로 손상도를 계산한다. 임계 평면(critical plane)은 최대의 손상도를 갖는 평면이 된다⁽⁷⁾. 휠에 작용하는 스트레인 분석결과 비비례함을 확인할 수 있고 주응력 방위각(principal angle)과 Biaxial ratio가 시간에 따라 변화하고 있으므로 임계 평면법(critical plane method)를 고려하고 최대 손상도를 갖는 평면에 작용하는 응력과 변형률을 분석하는 것이 바람직하다.

Table 3 Damage according to the plane angle (High speed - Left wheel Case (Rosette Ch. 1,2,3))

Plane Angle	Total Damage
0°	4.79E-07
10°	1.77E-05
20°	9.54E-05
30°	1.68E-04
40°	1.15E-04
50°	2.70E-05
60°	1.15E-06
70~100°	0
110°	3.23E-07
120°	1.31E-06
130°	5.85E-07
140~170°	0

휠 전면부 로제트(Ch. 1,2,3)에서 30° 방향의 평면에서 데미지가 가장 크게 발생하며, 고속-좌측 휠 케이스의 평면 각도에 따른 데미지 산출 및 임계평면 방향을 Table 3에 대표 예시로 나타내었다.

(2) 횡/종 가속도 및 속도에 따른 휠의 동응력 분석
 영암 F1 서킷은 근본적으로 레이스 경주를 목적이기 때문에, 코너링에 의한 횡가속도의 영향을 시험 분석하기에는 최적의 장소이다. F1 서킷은 코너는 다양한 회전 반경으로 좌측 코너 11개, 우측 코너 7개로 구성되어 있다(Fig. 2). 주행 케이스에서 얻어진 각 코너 위치 및 코너링 시 최대 손상도를 갖는 평면(휠 전면부 로제트 30° 방향)에 작용하는 동응력 및 변형률, 속도, 횡/종 가속도는 Fig. 7과 같다.

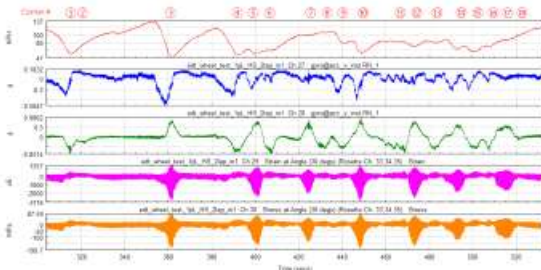


(d) Low speed - Right wheel Case

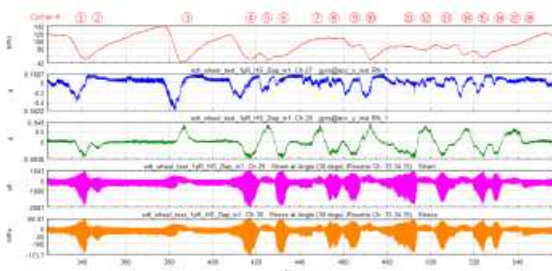
Fig. 7 Dynamic stress, strain, speed, longitudinal/lateral acceleration

고속/저속 모드에서 각 코너에 따른 좌/우측 휠의 동응력 크기를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 차량 선회 시 우측 휠은 좌코너에서 응력이 크게 발생하며, 좌측 휠은 우코너에서 응력이 크게 발생함을 확인할 수 있다. 이는 차량이 선회시 원심력에 의해 선회하는 바깥쪽 바퀴에 하중이 증가하기 때문이며, 횡가속도가 휠의 응력집중에 크게 영향을 미치는 것으로 예상할 수 있다.

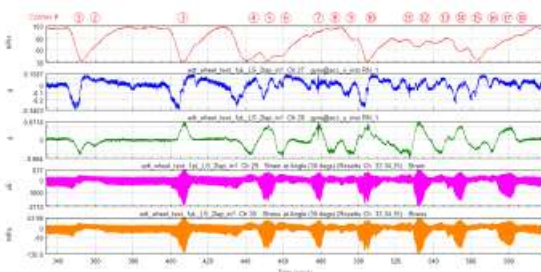
고속모드-좌측 휠 Case의 취득 데이터를 바탕으로 속도, 횡/종가속도와 스트레스와의 상관관계 특성을 분석하였다. Fig. 9에서는 좀 더 명확한 상관관계 및 경향을 분석하기 위해 각 코너에서의 횡, 종가속도, 속도와 스트레스를 각각의 최대값으로 나누어 정규화(normalization)하여 관찰하였다. 각 코너에서의 속도와 종가속도(x-acceleration)는 횡가속도(y-acceleration)에 비해 뚜렷한 경향이 관찰되지 않았다.



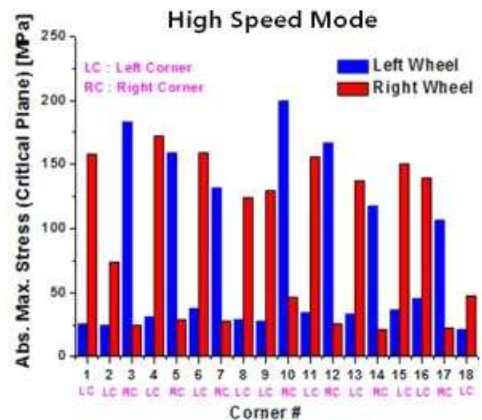
(a) High speed - Left wheel Case



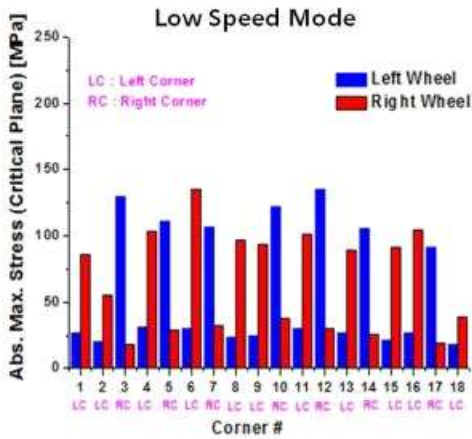
(b) High speed - Right wheel Case



(c) Low speed - Left wheel Case



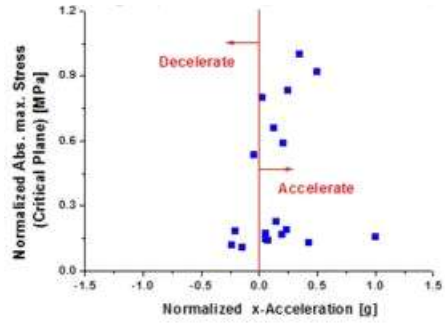
(a) High speed mode



(b) Low speed mode

Fig. 8 Comparison of Dynamic Stress in wheel between left and right wheel

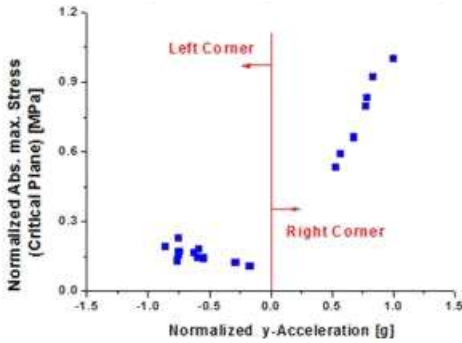
반면에 횡가속도에 대한 스트레스는 선형적인 관계가 있음을 확인하였고, 기서술한 바와 같이 좌측 휠의 경우에는 좌측 코너보다는 우측 코너에서 상대적으로 스트레스가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다.



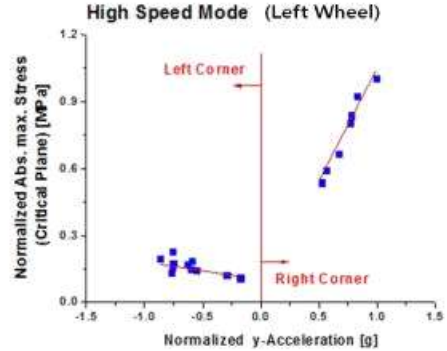
(c) x-Accel. VS Stress

Fig. 9 Correlation between velocity, x/y-acceleration and stress(High speed - Left wheel Case)

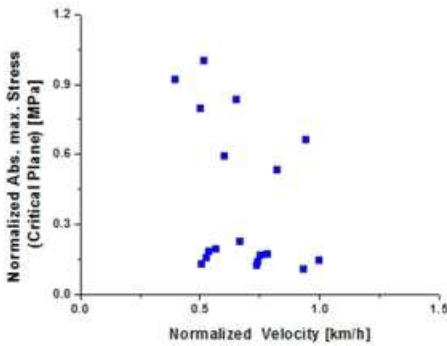
Fig. 10에서는 각 Case의 횡가속도-스트레스 상관관계 및 선형 근사 결과를 보여준다. 휠의 동응력 발생은 코너 주행 시 횡가속도와 선형적인 관계가 있음을 알 수 있으며, 각 선회 방향의 반대방향 휠에서 정규화된 횡가속도와 동응력의 선형 근사 기울기(Slope)의 범위는 약 $0.73 \leq \text{Slope} \leq 1.06$ 이며, 선회 방향의 휠에서의 기울기 범위는 약 $0.09 \leq \text{Slope} \leq 0.48$ 이다.



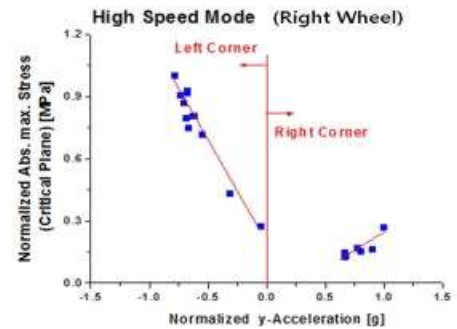
(a) y-Accel. VS Stress



(a) High Speed - Left Wheel Case



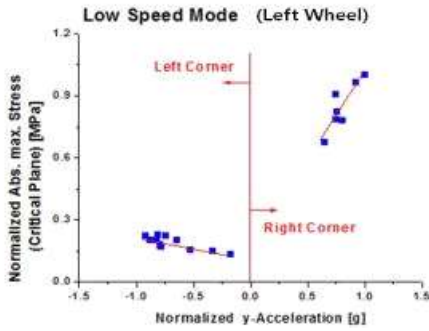
(b) Velocity VS Stress



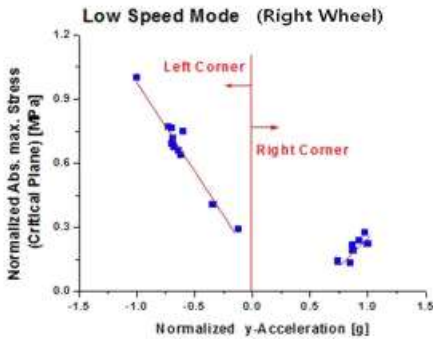
(b) High Speed - Right Wheel Case

후 기

본 연구는 산업통상자원부에서 시행한 광역경제권거점기관지원사업의 기술개발결과임을 알려드립니다.



(c) Low Speed - Left Wheel Case



(c) Low Speed - Right Wheel Case

Fig. 10 Correlation between y-acceleration and stress

3. 결 론

본 연구에서는 F1 서킷을 주행 시험로로 활용하여 다양한 코너 등의 가속한 주행 환경 하에서의 알루미늄 알로이 로드 휠의 동응력 및 스트레인을 계측 및 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) F1 서킷의 다양한 코너 주행 조건(다축 하중 상태)에서의 동응력과 스트레인을 시험을 통하여 직접적으로 계측하였다.

2) 스트레인 로제트를 활용하여 알루미늄 알로이 휠 취약부(전면 스포크부)의 최대 손상도가 발생하는 평면의 방향을 결정하고, 그 평면 내에서의 동응력과 변형률을 분석하였다.

3) 차량 선회 시 원심력에 의해 선회하는 바깥쪽 바퀴에 하중이 증가하여 우측 휠은 좌코너에서, 좌측 휠은 우코너에서 응력이 크게 발생함을 확인할 수 있다.

4) 횡/종 가속도 및 속도에 따른 휠의 동응력 분석을 분석한 결과, 휠의 동응력은 횡가속도에 선형적인 관계가 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- (1) Seung-yeol Lee, Heon Young Kim, Kyoung Taek Lee and Hotaek Kwak, 2011, Finite Element Analysis for Biaxial Wheel Fatigue Test(SAE J2562), KSAE, pp. 1585~1590.
- (2) Jae Heung Park, Tae Won Park, and Sung Pil Jung, 2012, The Study on Dynamic Analysis of Durability of a Wheel using CAE, Journal of Korea Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 12, pp. 1296~1303
- (3) G. F. Wang, H. Sun, J. Li, and R. Chai, Study on Biaxial Fatigue life test and FEA Analysis of the Steel Wheel, 2010, Third International Conference on Information and Computing.
- (4) Biaxial Wheel Fatigue Test, Revised No V2005, SAE J2562.
- (5) nCode GlyphWorks v.10.0 Manual, 2010, HBM
- (6) Karl Hoffmann, Applying the Wheatstone Bridge Circuit, HBM
- (7) A. Carpinteri, A. Spagnoli, S. Vantadori, A critical plane-based criterion for high-cycle multiaxial fatigue using averaged principal stress direction, 2008