

스틸 휠 굽힘 모멘트 내구시험의 내구신뢰성 개선에 대한 연구

- 스틸 휠 접촉면의 프렛팅 제거 -

정수식[†] · 정원욱^{*} · 유연상^{*} · 강우종^{**} · 김대성^{**} · 권일기^{***}

A Study for Improvement of Cornering Fatigue Test by Eliminating a Fretting Effect on Steel Wheel to enhance Durability and Reliability

Chung, Soo Sik[†] Jung, Won Wook^{*} Yoo, Yeon Sang^{*} Kang, Woo Jong^{**}

Kim, Dae Sung^{**} Kwon, iL Ki^{***}

Key Words : Steel Wheel(스틸휠), C.F.T, Cornering Fatigue Test(굽힘모멘트내구시험)
Fretting(프렛팅), Durability(내구성), Reliability(신뢰성)

ABSTRACT

The failure mode of steel road wheels in a vehicle is cracks from ventilation hole through to contact plane on steel wheel's disc plate. But a number of cracks of Cornering Fatigue Limit Test is on contact plane near to wheel nut mounting area, even though it's satisfied with specified cycles. So this paper searches out causes to improve durability and reliability of C.F.T by uni-axial bending moment test. The verified cause is a "fretting" on contact area of steel wheel. In result, this paper suggests a solution to prevent a fretting by inserting a damping shim, 0.7mm between steel wheel contact areas. Therefore this paper makes it possible to move crack position of C.F.T in steel wheel from contact plane to vehicle's failure mode.

1. 서 론

차량 스틸 휠의 내구성은 휠 규격 및 형상을 결정하는 주요치수가 정해지면 3 차원 솔리드 모델링을 하고, 각 부위를 메쉬하여 굽힘 모멘트 내구(C.F.T Cornering Fatigue Test) 및 반경방향 내구(R.F.T Radial Fatigue Test) 해석을 실시하여 내구지수 1.0 이상이 되도록 형상을 결정한 후 도면을 완성, 부품제작을 한다.

부품이 제작되면 해석과 동일한 2 가지 시험법으로 단품 JIG 시험을 하여 각각 목표회수 이상을 만족해야 하며 P·G 및 플리트(FLEET) 실차내구시험으로 최종 내구성능 검증을 하게 된다.

그러나 일부 실차 내구시험에서 문제되었던 스틸 휠의 크랙위치는 모두 휠 디스크의 벤틸레이션홀 부였으나 굽힘 모멘트 내구시험의 한계내구 시험결과와 스틸 휠의 접촉 기준면에서 발생한 크랙으로 차량 문제현상과 일치하지 않는다는 것을 발견하였다.

따라서 본 논문에서는 실차 고장모드와 C.F.T 결과와의 상이점을 검토, 원인을 분석하고 해석적 및 시험적 개선안을 마련하여 실제 차량의 문제현상과 보다 근접한 C.F.T 시험법을 개선하여 C.F.T의 내구신뢰성을 향상시키고자 하였다.

2. 본 론

2.1 실차 문제 현상

실차 내구시험 중 차량이음(“찌그덕”)으로 발견하게 되는 스틸 휠 크랙은 대부분 벤트홀 부에서 시작하여 기준면으로 전파되는 것으로 내구 해석의 경우에도 최대응력이 발생한 부위는 벤트홀 부 또는 스틸 휠 디스크 굴곡부인 HAT 부이다.

† 현대자동차

E-mail : bigchung@hyundai-motor.com

TEL: (031)368-8767 FAX: (031)368-8183

* 현대자동차

** 자동차부품연구원

*** 코리아 휠

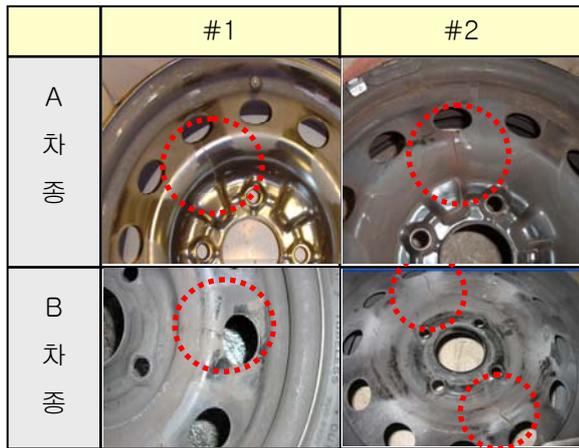


Fig.1 Crack Locations of Steel Road Wheel

2.2 단품 내구시험법

스틸 휠의 단품 내구시험은 전술한 바와 같이 차량 선회시 횡력을 모사한 굽힘모멘트 내구시험(C.F.T)과 직진 주행시 차량 상하력에 의한 반경 방향 부하 내구시험(R.F.T) 2 가지인데 C.F.T 는 타이어가 없이 휠 만으로 시험을 하나(Fig.2) R.F.T 는 노면주행 조건을 반영하기 위해 타이어가 장착된 상태에서 시험을 한다.

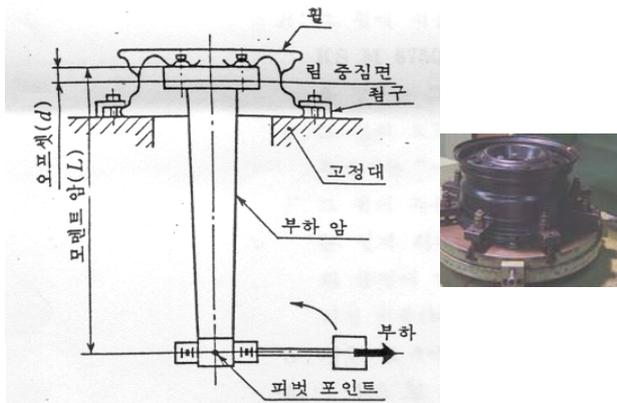


Fig. 2 C.F.T Test

2.3 해석 및 C.F.T 시험결과 비교

실차 내구시험에서 스틸 휠 크랙이 발생한 2 개 차량의 단품내구해석 및 C.F.T 시험결과는 Fig. 3 과 같이 목표 내구횟수를 만족하고 있으나 해석은 휠 HAT 부에서 최대 응력이 발생하고, 시험은 스틸 휠의 접촉 기준면에 크랙이 발생하여 상호 신뢰성이 부족함을 보였다.

C.F.T 시험은 JASO C 614 와 JIS D4103 에 규

정된 시험방법을 오래 전부터 사용하고 있으며 시험기를 보유하고 있는 스틸 휠 제조 업체에서 시험을 실시하고 있는데 단품 C.F.T 한계시험결과는 K사의 A, B 차종의 뿐만 아니라 M 사의 9 개 차종을 각각 3 회씩 C.F.T 시험한 결과 크랙 발생위치는 기준면 31%, HAT 부 42%, 벤트홀부 27% 이었다.

	해석 결과	C.F.T 시험결과
A 차종	<p>HAT부 최대응력 : 280MPa 지수 1.11 [44만회]</p>	<p>28만</p>
B 차종	<p>HAT부 최대응력 : 330MPa 지수 1.08 [38만회]</p>	<p>40만</p>

Fig. 3 Results of Analysis and Bench Test

2.4 스틸 휠 위치별 응력수준 확인

실차 주행시 스틸 휠 각 부위 변형율에 따른 응력수준을 확인하고자 Fig. 4 와 같이 실제 차량 주행시와 동일하게 수직하중과 횡력이 타이어에 작용하도록 시험조건을 설정하여 변형율을 측정 하였다.

측정 게이지는 스틸 휠 전면부인 벤트홀 및 기준면 각각에 단축 스트레인 게이지 24 개와 3 축 6 개를 부착하고, 후면부 림 용접부에는 3 축 6 개의 스트레인 게이지를 부착하여 1 개 휠에 총 60 개 채널을 이용 하였다.

시험결과는 원주방향에 따라 응력분포가 평균응력을 기준으로 주기함수 특성을 보이기 때문에 응력진폭과 평균응력으로 구분하여 Table 1 에 표시하였는데 3,000N 의 수직하중과 횡력을 가하면 스틸 휠의 벤트홀 부가 기준면 보다는 더 큰 변형율을 보여 응력수준이 높은 것을 알 수 있으며 실차내구시의 벤트홀부 크랙 현상을 잘 설명해주고 있다.

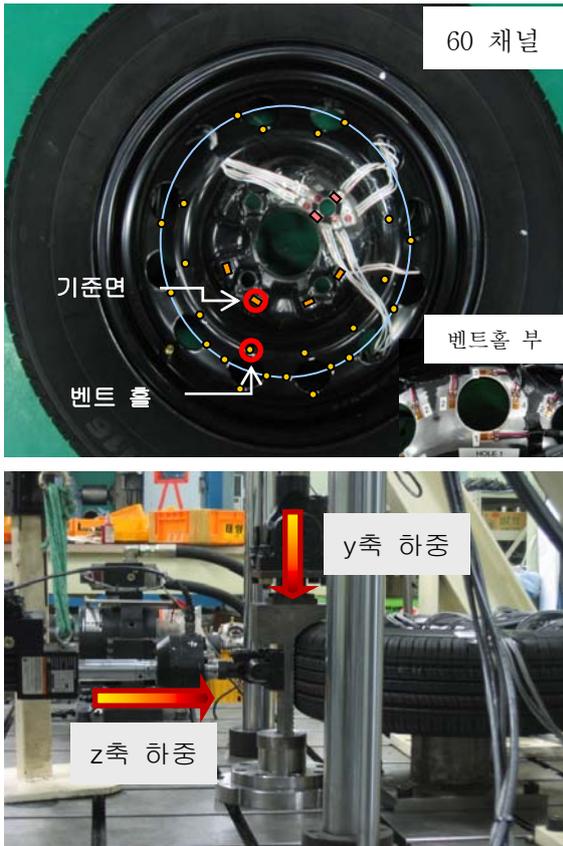


Fig.4 Stress Distribution Test on Steel Wheel

Table 1. Result of Stress Distribution Test on Steel Wheel

	Fy (3,000N)		Fz (3,000N)	
	Sa (MPa)	Sm (MPa)	Sa (MPa)	Sm (MPa)
벤트홀	252	56	76	13
기준면	189	44	25	6
용접부	18.9	6	38	6

2.4 스틸 휠 기준면의 크랙 발생 원인조사

스틸 휠 위치별 발생응력 시험결과(Table 1) 및 실차 내구시험시 발생한 문제현황(Fig.1)에 의하면 크랙이 발생해야 하는 위치는 스틸 휠 벤트홀 부이어야 하나 단품 내구시험인 C.F.T 시험결과 크랙은 스틸 휠의 기준면 부위였으므로 이에 대한 상세 원인 조사 및 분석을 다음과 같이 실시하였다.

첫째, 현재 실시되고 있는 단축 C.F.T 시험장비 및 시험조건을 실제 차량의 조건과 비교하였고, 둘째 C.F.T 시험 후 크랙이 발생한 고품들을 분석하였다.

Fig. 5 은 실제 차량조건과 C.F.T 시험조건을 비교, 파손부위가 전이되는 현상을 표시하였는데

실차는 서스펜션 또는 타이어에서 큰 충격이나 변위를 흡수해주는 댐핑 부품이 있으나 C.F.T 시험의 경계조건은 다수의 금속 클램프로 휠 플랜지부를 고정, 회전시키면서 모멘트 압으로 힘을 가해 어느 부분도 댐핑해 주는 부분이 없다. 따라서 시험경계 조건상 스틸 휠이 접촉하는 기준면에 프랫팅이 발생, 크랙부위가 실차와 달리 벤트홀에서 기준면으로 전이됨을 알 수 있다.

또한 고품 분석결과 스틸 휠이 JIG 면과 접촉하는 부분(기준면)에 “프랫팅” 현상이 발생한 것을 확인하였는데 이 프랫팅은 진동으로 인해 발생하는 미소변위로 두 재질 사이의 접촉면에서 발생하는 마모현상이며 높은 접촉압력으로 스틱슬립 반복응력이 발생하여 스틸 휠 기준면부의 내구수명을 급격하게 단축시키는 역할을 한 것이다.(프랫팅 피로파손발생은 일반적 피로에 비하여 50% 이상 수명이 감소하는 것으로 알려져 있다) 따라서 프랫팅이 실차 고장모드와 상이하게 스틸 휠의 기준면에서 크랙이 발행하는 주요원인으로 볼 수 있다.

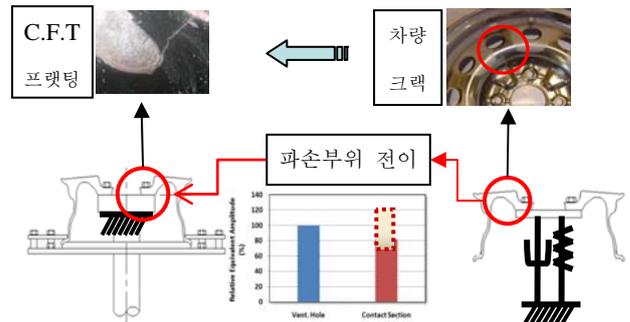


Fig.5 Translation of Steel Wheel Crack

2.5 C.F.T 신뢰성 향상 - 프랫팅 제거

스틸 휠 C.F.T 시험에서 특이하게 발생하는 기준면의 “프랫팅”은 실차와 단품 JIG 시험조건 차이에 의한 것으로 이러한 문제현상을 제거하여 단품시험에서도 실차에서 발생한 크랙위치와 동일한 시험결과를 얻을 수 있도록 개선안들을 시험, 최종결과를 도출하였다.

2.5.1 개선안 검토 - 해석

직관적인 스틸 휠 기준면 프랫팅 방지안으로 스틸 휠 접촉면 사이에 저탄성계수의 댐핑 심 삽입안을 고려하였는데 우선적으로 C.F.T 내구 해석을 실시하여 스틸 휠 각부의 응력분포특성을 파악한 결과 댐핑심 사용 전후 스틸 휠 응력분포에 의한 영향은 없는 것으로 Fig. 6 과

같이 확인하였다

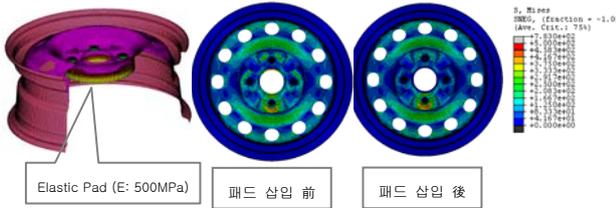


Fig.6 Stress Distribution Analysis by Inserting Damping Shim

2.5.1 항목별 검토 내용

문헌적, 경험적으로 조사된 프랫팅 제거 방안으로 (1)스틸 휠 접촉면을 정밀하게 연마한 방법 (2)초기 체결토크 준수방법 - 시험 중 체결토크 감소에 따른 스틸 휠 접촉면의 슬립을 증대 방지 (3)스틸 휠 접촉면 윤활유 도포법 - 접촉면의 마찰력 감소 (4)스틸 휠 접촉면 댐핑심 삽입 방법과 같이 4 가지로 C.F.T 시험을 각각 실시하였다.

시험결과 (1)~(3) 방법은 스틸 휠 기준면의 프랫팅 제거에 별 효과가 없었으나 (4)방법은 프랫팅 감소에 어느 정도 효과가 있었는데 0.3mm 댐핑심^{주 1)}은 두께 및 댐핑력 부족으로 기준면 프랫팅 방지에 큰 역할은 못하였으나 0.7mm

		크랙 위치	회수	프랫팅 여부
(1) 접촉면 연마			35 만	○
(2) 체결 토크 확인			30 만	○
(3) 윤활유 도포			32 만	○
(4) 댐핑 심 삽입	0.3 mm		37 만	○
	0.7 mm		40 만	X

Fig. 8 Test Result for Eliminating a Fretting

주 1) 등급번호 : 1005 주 2) 등급번호 ; 2010
* 본 댐핑심은 브레이크 패드 편측에 부착되어 제동 노이즈 저감용(MS-18035 STEEL N)으로 사용되며 중간은 금속판, 외부(양측)는 고무피복으로 되어 있음

댐핑심^{주 2)}은 적절한 댐핑으로 스틸 휠 좌면부에 프랫팅이 발생하지 않도록 하는 조건임을 실험적으로 입증하였다

따라서 0.7mm 댐핑심 삽입으로 스틸 휠 좌면에 프랫팅이 발생하지 않으면 크랙위치도 필드에서 발생한 벤트홀에서 발생, 재현됨을 알 수 있었다.

이는 단품 C.F.T 내구시험의 신뢰성 향상을 위해서는 스틸 휠 접촉면에 0.7mm 댐핑심 삽입이 필요함을 알 수 있다.

3. 결론

차량 전체의 내구성을 검증하는 P·G 및 플리트(FLEET) 내구시험은 개별 부품들의 내구성이 이미 확보된 상태에서 시험하는 것이므로 실차 시험 전에 단품 각각에 대한 내구성 확보가 필요하다. 현재도 스틸 휠 또한 오랜 기간 단품 JIG 시험으로 내구성을 개발하였고, 해석도 동일한 조건으로 실시하고 있다.

그러나 일부 실차 내구시험에서 발생한 스틸 휠 크랙 고장모드는 C.F.T 단품 한계시험결과와 상이한 점을 발견, 이를 개선하여 현재 실시하고 있는 단품시험의 내구신뢰성을 향상시키고자 하였고, 보다 신뢰성 있는 단품 내구시험으로 스틸 휠의 중량과 원가절감이 가능하도록 하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1)실차시험에서 발생한 스틸 휠 고품 분석결과 고장모드는 벤트홀에서 시작하여 기준면으로 전개된 크랙이며 C.F.T 해석결과 또한 최대응력이 발생하는 위치는 HAT 부 또는 벤트홀 부이다.

(2)그러나 단축 굽힘모멘트 내구시험인 C.F.T 단품 시험결과는 스틸 휠의 기준면에서 크랙이 발생하는데 이에 대한 원인은 스틸 휠 좌면에 발생하는 “프랫팅”임을 확인하였다.

(3)이러한 문제의 프랫팅을 제거하여 단품 C.F.T 시험과 필드 고장모드를 일치하게 하기 위해서 ①스틸 휠 접촉 JIG 면 연마 ② 시험 단계별 체결토크 관리 ③접촉면 윤활유 도포 보다 ④접촉 기준면에 댐핑심을 삽입하는 것이 효과가 있으며 그 중 0.7mm 댐핑심이 프랫팅

방지에 유리함을 실험적으로 입증하였다. 또한 이로 인해 스틸 휠 크랙 위치가 다른 부위로 전위되지 않고 필드 고장모드와 동일한 스틸 휠 벤트홀부에서 크랙이 발생하였다.

(4)따라서 향후 굽힘 모멘트 내구시험(C.F.T)의 내구신뢰성 향상을 위해서는 현재 실시하고 있는 시험기의 스틸 휠 접촉 좌면에 0.7mm 댐핑심 삽입이 필요함을 제안한다.

참고문헌

- (1) [ASM Handbook](#), Vol.13 "Corrosion", ASM International, 1987.
- (2) JASO C 614, Automobile Parts-Disc Wheel, 2004
- (3) JIS D 4103, Automobile parts-Disc wheels Performance requirements and marking
- (4) Richard C. Rice 外. Fatigue Design Handbook, 2nd, SAE PA 15096-0001
- (5) S. T. Rolfe and J .M. Barsom, "Fracture and Fatigue Control in Structures – Applications of Fracture Mechanics," Prentice Hall, 1977.
- (6) W. G. Clark, Jr., "Fracture Mechanics in Fatigue," Experimental Mechanics, September 1971, pp. 421~428.