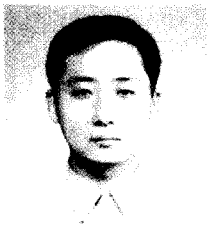
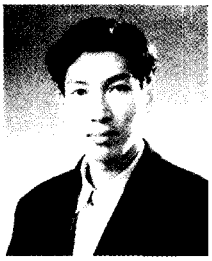
자동차, 타이어 그리고 내구성

Car, Tire and Durability of Tire



박 현 철 / Hyun Cheol Park
한국타이어 선임연구원
Hankook Tire Co., Ltd.



심 현 우 / Hyun Woo Shim
한국타이어 선임연구원
Hankook Tire Co., Ltd.

부드러운 것이 강한 것을 제압한다는 말이 있다. 이러한 사실을 잘 표현하는 것이 타이어라 할 수 있다. 타이어는 인류역사에 가장 위대한 발명품의 하나로 꼽히고 있는 바퀴의 현 산물로서, 육상교통과 수송의 급격한 발전을 가져와 인류문명의 발달에 크게 기여하였다. 이제 그 발달사와 구조등과 더불어 내구성에 대하여 알아봄으로 서두에 쓰여진 내용을 확인하여 보자.

1. 타이어의 발달사

중석기 시대에 인간은 무거운 물체를 옮길 때 그 아래에 통나무를 넣고 굴리면 쉽게 물체를 이동시킬 수 있다는 것을 알게 되었다. 이후 석기시대, 청동기시대를 거쳐 철기시대에 이르면서 바퀴의 재질이 바뀌었다. 이 시기에는 마차 바퀴에 짐승의 가죽 등을 감아 충격을 줄이는 방법을 고안해내었다. 이 후 여러 변형품이 탄생되었으며, 1490년 레오나르도 다빈치에 의해 현재 자전거 바퀴와 같은 형태인 축에 가느다란 살이 연결된 바퀴를 고안함으로써 또 한번의 획기적인 발전을 하게 된다. 산업혁명시대에 이르러 증기기관차의 발명자인 조지 스티븐슨이 증기기관차 부품 가운데 쇠바퀴 바깥테를 가장 고된 일을 하여 피곤해지는 부분, 즉 타이어(Tire)로 명명하였는데, 이것이 타이어의 어원이 되었다.

19세기 중반경 미국의 찰스 굳이어와 영국의 토머스 핸콕등의 노력에 의해 천연고무에 유황을 첨가하여 탄력을 갖는 고무를 얻어내는데 성공하였다. 이 새로운 고무제조방식을 로마신화에 나오는 '불과 대장일의 신 불가누스(Vulcan)' 의 이름을 따서 벌커니제이션(Vulcanization) 이라 이름지었다. 1846년 토머스 핸콕에 의해 탄력있는 고무 덩어리를 바퀴 둘레에 둥글게 씌운 솔리드(Solid) 타이어가 출현하였다. 솔리드 타이어는 대부분 자전거에만 이용되었는데, 지면에

서 오는 충격을 완화시키지 못했으며, 노면 마찰이 너무 심하여 새로운 구조의 타이어가 요구되었다.

이 무렵 공기와 타이어를 결합시켜 속도와 탄력에 의해 안정감을 동시에 얻고자 하는 연구가 시도 되었다. 1845년 영국의 R.W. 톰슨은 최초로 마차용 공기압 타이어를 발명하여 영국 특허를 획득하였으나, 실용적인 공기압 타이어는 1888년 J.B. 던롭에 의해 발명되었다. 이것이 바로 자전거용 공기압 타이어의 탄생이었다. 이후 공기압 타이어의 실용화에 많은 이들의 발명과 노력이 있었다. C.K. 웰치, 프랑스의 미쉐린 형제(1891년), 파이어스톤사와 굳이어사(1904년) 등의 노력에 의해 장착하기 수월하고, 수명도 상대적으로 길어 졌다. 드디어 1908년에 가서는 미국의 거의 모든 타이어 메이커가 이러한 타이어를 제조하게 되었다.

그 후 성능보강과 품질향상에 의해 자동차에서도 공기압 타이어가 우수한 성능을 보이기 시작 하였다. 20세기 초에 이르러 카본블랙과 같은 고무 첨가제, 화학약품과 천연고무 혼합공정에 필요한 반바리 믹서, 겨울용 타이어 등이 개발되었으며, 이러한 기술 등은 현재에도 이용되고 있다. 한편 영국의 기사 T. 스로퍼와 C.H. 그레이는 1913년 종래의 바이어스(Bias) 타입과는 전혀 다른 래디알(Radial) 플라이방식을 개발해 냈다. 그러나 이의 실용화는 35년 뒤인 1948년에 미쉐린사에 의해 이루어졌으며, 현재 대부분의 타이어가 이 방식으로 제작되고 있다.

2. 타이어의 수명과 구조

타이어는 1948년 미쉐린사에 의해 래디알 타이어가 실용화된 이래 현재까지 그 구조를 유지하고 있다. 래디알 타이어는 과거의 바이어스 타이어에 비해 조정안정성과 마모성의 향상을 가져왔다. 자동차와 함께 타이어도 급속히 발전하였는데, 특히 편평비와 최고주행속도에서는 가히 눈부신 성장을 하였다. 거의 원형에 가깝던 타이어의 편평비는 30%이하에 이르렀으며, 최고 속도 역시 300km/h 이상의 주행이 가능한 ZR급 단계까지 이르렀다. 이와 더불어 타이어의 수명이라고 할 수 있는 주행거리 역시 수십 배 이상 늘어났다.

그러나 펑크가 나는 공기압타이어의 취약성은 여전히 문제로 남아 있다. 펑크는 타이어의 수명과 직결되며, 이는 타이어의 내구성을 의미한다. 펑크의 유형은 다음과 같이 3가지로 분류할 수 있다. 첫째는 지면과의 마찰에 의해 극히 적은 양으로 마모가 발생하고, 시간이 지남에 따라 마모량이 증가하여 파손된다. 두번째의 경우는 강렬한 충격이나 예리한 이물질 등에 의해 파손이 발생한다(Burst). 마지막으로는 타이어 구조상 취약부위에서의 파손이다(Separation, 박리현상). 타이어는 회전에 의한 반복변형으로 인하여 내부의 온도가 상승한다. 온도 상승은 구성 재료의 물성을 저하시키며, 구조상 취약 부위에서는 매우 위험하다.

완전마모를 타이어로써 대부분의 수명을 완수했다고 말할 수 있다면, 이물질 등에 의한 파손은 사고사라 생각할 수 있고, 박리현상은 질병사에 비유될 수 있다. 따라서 타이어의 수명 연장을 위해서는 질병에 대한 예방책이 필요하다. 병을 예방하기 위해서는 건강 상태, 병의 유형, 병에 대한 적응력 등의 정보가 필요하다.

본 글에서는 완전 마모와 이물질에 의한 파손은 정상적인 사용으로 보고 박리현상에 의한 파손에 대하여 논의하기로 한다. 박리현상에 대한 예방을 위해서는 타이어의 구조, 운행 조건, 운행시 타이어 내부에서의 힘 및 온도 분포에 대한 정보가 필요하다.

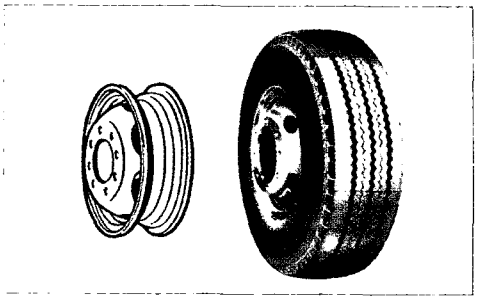
내구 문제가 중요시 되고 있는 TBR(트럭/버스용 래디알) 타이어에 대하여 살펴보자. TBR의 경우 열악한 환경에서 사용되므로 내구성 향상에 대한 요구가

크다. TBR 타이어의 전체 형상과 차량 장착시 필요한 림을 〈그림 1〉에 나타내었다. 타이어는 원주상 같은 단면 형상을 하고 있으므로, 단면이 전체 타이어의 구조를 대표한다. 따라서 TBR 타이어에 대한 단면의 구조를 〈그림 2〉에 나타내었으며, 〈그림 2〉의 각 부위에 대한 역할은 〈표 1〉에 표시하였다.

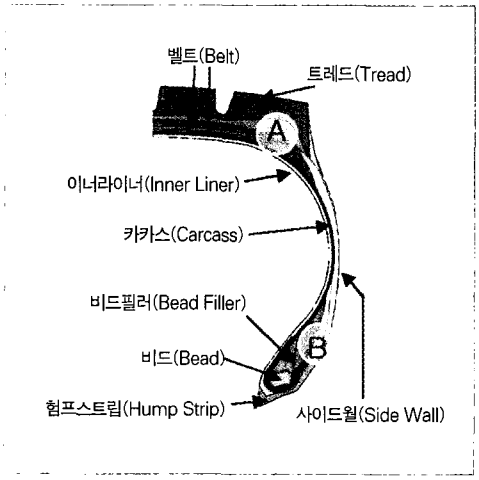
〈그림 2〉에서 보는 바와 같이, 강성이 강한 벨트부위, 비드부위와 함께 내압을 지지하며 벨트부와 비드부를 연결하는 카카스가 타이어의 뼈대를 이룬다. 그 이외의 부분은 다양한 컴파운드 (Compound 혹은 합성고무)로 채워져 있다. 이러한 구조를 갖는 타이어의 경우, 벨트부의 끝단 〈그림 2의 A〉과 비드 부위〈그림 2의 B〉에서 힘의 집중이 발생된다. 따라서 이 부분이 파손 에 가장 취약한 부위이다.

단면 구조만으로 예측되었던 취약 부위에 대한 검증을 위하여 FEM을 이용한 시뮬레이션 결과와 비교하였다. 응력 해석의 결과는 〈그림 3〉, 열 해석의 결과는 〈그림 4〉에 표시하였다. 이 때 붉은 색으로 표시된 부분이 힘의 집중이나 온도가 높은 부분으로 파손 발생 확률이 높다. 이 부위는 구조만으로 예측한 부위와 같다.

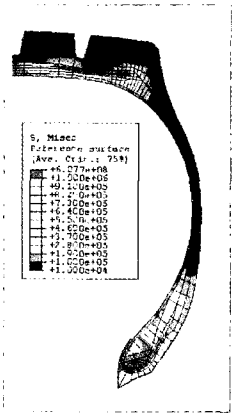
또한 현장에서의 타이어 내구 관련 문제점을 보면 벨트 부와 비드 부에 관련된 문제가 대부분을 차지하고 있다. 이러한 현상은 현재와 같은 타이어의 구조가 계속되는 한 소멸되지 않는 문제이다. 이 두 부위는 서로 상보적인 관계를 갖고 있기 때문에 비드부를 강화하면 벨트부가 약해지며, 벨트부를 강화하면 비드부가 약해진다. 따라서 타이어의 내구 관련 연구자들은 기존의 성능과 경량화의 요구 조건을 만족하면서 어느 한 부위가 취약하여 사고가 나지 않도록 즉, 비드, 벨트 두 부위의 사고에 대한 기대수명이 같게 하려고 한다. 이를 위하여 구조 변경, 재료 개발, 제조 과정 개선 등을 통하여 내구 성능 개선에 대한 연구가 진행되고 있다.



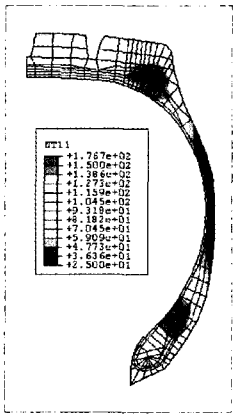
〈그림 1〉 림과 TBR 타이어



〈그림 2〉 TBR 타이어 단면도



〈그림 3〉 타이어 단면에서의 응력분포



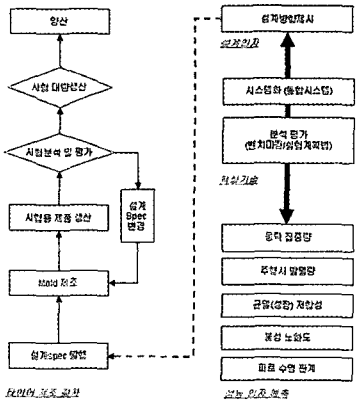
〈그림 4〉 타이어 단면에서의 온도분포

〈표 1〉 TBR 타이어의 각 부위별 기능

각 부위	역할
벨트	타이어 단면 및 주 강성 방향을 보강함으로 접지력을 향상함
비드	타이어를 림에 고정하며 구동, 제동, 조향력을 전달함
카카스	내압지지 역할을 하며 이로 인하여 타이어의 운동성능을 발현시킴
이너라이너	내부의 공기 누출 방지 및 내부로 공기 및 수분 침투 방지
사이드월	변형에너지 흡수하는 역할
트레드	외부 충격에 대한 내부 구조 보호, 구동력, 견인력 전달
험프스트립	타이어와 림사이의 접촉부로 마멸방지가 그 목적임
비드 필러	비드와 카카스를 고정하며 에너지를 흡수하는 기능을 함

3. 내구성 향상을 위하여

내구성이란 그 제품의 수명을 의미한다. 이때 가장 취약한 부위가 수명을 좌우 하므로, 취약한 부위에 대한 개선이 필연적으로 요구된다. 타이어는 내압에 의해 차체를 지지하고 있는 일종의 압력용기이다. 따라서 내압에 관계없이 타이어 단면이 일정한 형상을 유지할 때 변형이 최소화되며, 이로 인하여 힘의 집중이 완화된다. 이러한 개념으로 타이어 내부에 공기압이 작용하였을 때, 변형이 최소화 되도록 하는 단면의 형상을 평형 카카스 프로파일(Equilibrium Carcass Profile)이라 한다. 평형 카카스 프로파일을 얻기 위한 연구가 과거부터 꾸준히 진행되어 왔다. 〈표 2 참고〉 평형 카카스 프로파일을 통하여 전반적인 내구 향상을 가져왔다면, 각 취약 부분에서의 집중적인 구조해석적 연구를 통하여 국부적인 개선이 이뤄진다. 취약 부분에 대한 집중 연구는 벤치마킹, 해석 및 시험결과로부터 시작 된다. 여러가지 해석과 성능에 영향을 주는 인자에 대한 예측을 바탕으로 하여 벤치마킹 자료의 비교 분석을 통하여 개선이 이루어진다. 이러한 과정을



〈그림 5〉 내구성 향상을 위한 취약 부위 개선 절차

〈표 2〉 평형 카카스 프로파일 연구의 역사

연구자	내용
Hofferberth (1955)	Netting 이론을 이용하여 Bias 타이어의 프로파일 연구
Böhm (1967)	벨트분담률 및 벨트강성을 고려하여 Radial 타이어의 프로파일을 구하는 기초식 정립
Frank (1967)	Radial 타이어의 프로파일을 도식적으로 계산하는 방법 연구
Akasaka-Sakai (1969)	벨트와 카카스 내압 분담율과 타이어 치수관련 설계변수 이용하여 radial 타이어의 프로파일 연구
Walter (1973)	원심력에 의한 bias 타이어의 프로파일 변화 연구
Koutny (1973)	에너지법을 이용한 radial 타이어의 프로파일 연구
Kim & Akasaka (1997)	대변형이론을 통한 평형프로파일 이론의 정립

〈그림 5〉에 나타내었다.

이러한 기초 연구와 함께 재료와 제조기술의 삼 박자가 균형을 이룰 때, 비로소 타이어의 내구성 향상이 이루어 진다.

4. 향후 방향

Dunlop의 특허로부터 시작된 공기압 타이어는 1948년 미쉐린사에 의해 실용화된 래디알 방식이후 60년 이상 기본적인 원리, 외관, 구성 등이 거의 변하지 않았다. 물론 그 동안 재료, 제조법, 구조 및 형상 등은 크게 진보했다. 오늘날 자동차 보유 대수는 5.7억대이며, 연간 타이어 소모량은 11억 본 정도이다. 앞으로 공기압 타이어를 대체할 상품은 가까운 시일 내에는 출현하기 어려울 것이다.

수년 전에 있었던 포(Ford)와 파이어스(Firestone)과의 타이어 사고현상에 대한 법정공방 그리고 엄청난 액수의 배상판결에서 교훈을 얻을 수 있듯이, 공기압 타이어의 내구성능은 사람의 생명과 직결되므로 타이어 회사의 존립 그 자체를 좌우하는 중요한 성능이다.

향후 타이어 내구성능을 향상시키기 위해서는 두가지 접근이 필요할 것이다. 첫째로는 다소 보수적인 접근방법으로 앞에서 언급한 바와 같이 근본적인 구조적 취약부위의 사고발생인자를 정확히 파악하여 이를 보강하는 연구가 필요할 것이다. 또 하나는 첨단 기술을 적용하여 내구성을 혁신적으로 향상시키는 새로운 방법을 연구하는 것이다.

최근에 진행되고 있는 나노복합재료(Nano Composite)의 연구로 가까운 미래에 마모 및 균열에 대한 저항성이 매우 큰 신소재가 발견될 수도 있으며, 초 미세 소자기술로 타이어 취약부위에 이물질로 작용하지 않을 정도의 미세 감지장치(Nanoscale Sensor)를 삽입하여 사고를 사전에 예방하는 기술이 개발될 수도 있다. 또한 타이어는 그 제조 프로세스가 상당히 복잡하여 제조기술 자체가 매우 중요하므로 제조기술에 대한 적극적인 연구가 필요하다.

결론적으로 타이어 수명 연장의 꿈은 기술의 균형적인 발전으로 가능하며, 첨단 기술의 발명으로 타이어 사고가 사라지기를 기대해 본다.

(박현철 선임연구원 : hcpark@hanta.co.kr)