

〈 논문 〉

타이어의 벨트 부착력과 내구성능 간의 상관성 연구

이 호 근[†] · 홍 승 준^{*}

(2004년 8월 3일 접수, 2005년 4월 8일 심사완료)

Correlation Study on Tire Belt Adhesion Properties and Durability Performance

Hoguen Lee and Seungjun Hong

Key Words : Tire(타이어), Belt(벨트), Adhesion(부착력), Durability(내구성)

Abstract

A pneumatic tire is made up of many flexible filaments of high modulus cord of natural textile, synthetic polymer, glass fiber, or fine hard drawn steel embedded in and bonded to a matrix of low modulus polymeric material. Adhesion property of these materials is very important in tire durability safety because belt-leaving-belt tread separation reduces the ability of a driver to control a vehicle, whether or not the separation is accompanied by a loss of air. In this study adhesion test of carcass-belt-tread is conducted on material properties of 5 PCR tire model, which are on sale in domestic market and analyzed adhesion properties. For those tire models FMVSS 109 indoor high speed durability test is conducted to analyze the correlation between adhesion force and high speed performance of tires and found the correlation between the two test results.

1. 서 론

1.1 연구배경

타이어는 자동차를 구성하는 수만 개의 부품 중 하나지만 최종적으로 자동차가 지면에 닿아 주행하는 역할을 하기 때문에 자동차의 성능과 밀접한 관계가 있으며 실제로 교통사고로 목숨을 잃는 경우에는 엔진이나 변속기 고장보다는 펑크 등 타이어 이상으로 사고가 나는 경우가 훨씬 많은 것으로 알려져 있다. 타이어의 사고 중에서 가장 일반적으로 발생하는 형태는 타이어의 벨트 부위가 분리되는 사고로서 벨트부 분리는 운전자의 올바른 주행능력을 감소시킬 뿐만 아니라 자동차가 전복되는 원인을 제공할 수 있다.⁽¹⁾

실제로 2000년에 발생되었던 피어스턴 타이어의 대규모 리콜도 벨트분리 사고로 인한 수많은

인명피해가 주 원인이었다. 이 사건과 관련하여 많은 사고역학적 조사가 이루어졌고 결과적으로는 타이어의 내구성능을 강화하는 새로운 타이어 안전기준이 만들어지는 계기가 되었다.⁽²⁾

Dickerson, et al.⁽³⁾은 실험적으로 타이어의 벨트 분리 현상이 차량 거동에 미치는 영향에 대해서 분석하였다. 벨트 분리 현상은 차량의 안정성에 상당히 큰 영향을 주며, 특히 후륜 타이어에서 발생하면 안정성에 더 문제가 됨을 실험적으로 규명하였다. 또한 Daws⁽⁴⁾는 타이어의 트래드 이탈에 따른 차량의 안정성 변화를 타이어 코너링 힘의 특성 변화 관점에서 연구하였다.

본 연구에서는 위와 같이 차량의 안정성에 큰 문제를 유발시킬 수 있는 타이어의 벨트 분리 현상 발생의 메커니즘을 벨트부위의 부착력과 연계하여 실험적으로 규명하였다. 우선 타이어를 구성하고 있는 재료들의 물리적 특성 중에서 벨트 분리사고와 관계가 있을 것으로 판단되는 벨트 부위에 대한 부착력 특성을 평가하고 이 특성이 타이어의 고속 내구성과 어떠한 상관관계를 갖고 있는지를 실험적으로 규명하였다.

† 책임저자, 회원, 대덕대학 자동차제일

E-mail : leehg@ddc.ac.kr

TEL : (042)866-0356 FAX : (042)866-0249

* 삼성교통안전문화연구소

1.2 연구내용

본 연구에서는 타이어가 고속주행을 하는 경우 가장 일반적으로 발생하는 사고 형태인 벨트분리 사고에 대한 발생 메커니즘을 조사하고 현재 국내에서 판매되고 있는 5종의 승용차용 타이어들에 대하여 타이어의 벨트 부위에 대한 부착력 시험과 실내 고속내구 주행시험을 통하여 타이어의 벨트부 부착력 특성과 고속 내구성의 상관관계를 규명하였다. 부착력 시험은 ASTM D 413-98 에서 규정하고 있는 방법에 따라 실시하였으며 평가부위는 타이어의 트레드-벨트-카카스 층에 대하여 실시하였다.⁽⁶⁾ 내구성 시험은 대표적으로 타이어의 벨트부위 내구성을 평가하는 시험 조건인 타이어안전규정 FMVSS 109 규정에 따라 실시하였다.^(6,7)

2. 타이어의 사고 메커니즘

2.1 타이어의 사고

주행하는 타이어에서 발생하는 사고는 주행조건에 따라 다양한 형태로 나타나며 타이어의 사고 부위도 Fig. 1의 타이어 구조에 나타낸 바와 같이 트레드, 사이드월, 비드 등에서 주로 발생된다.^(8,9) 지난 2000년 일본의 타이어 제조 회사인 브리지 스톤의 미국 법인인 파이어 스톤사가 650만개의 타이어를 리콜하여 자동차 업계에서 중요한 문제로 다루어진 적이 있는데 이때 발생한 타이어의 사고는 대부분이 타이어의 벨트부가 분리되고 이로 인한 타이어의 파열 및 자동차의 전복 사고로 이어지는 대표적인 타이어의 벨트분리 사고 형태였다.

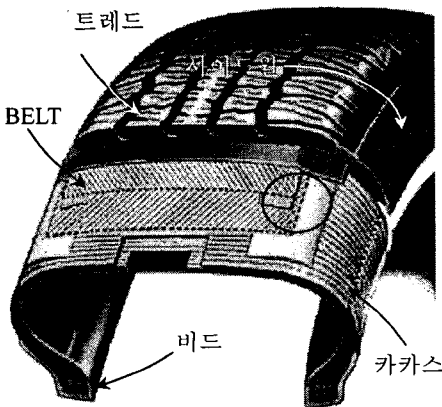


Fig. 1 Tire structure

타이어에서 발생하는 벨트분리사고는 주로 고속주행 시에 발생하며 또 다른 대표적인 사고 형태인 비드부 사고는 고하중 조건에서 주로 발생된다. 사용조건 측면에서 볼 때 고속주행이 많은 승용차의 경우가 벨트분리사고의 위험성이 높으며 화물을 운반하는 트럭의 경우가 고하중에 의한 비드부사고 위험성이 높다. 또한 기후 및 도로조건과 같은 사용환경에 의해서도 타이어의 사고형태가 다양한 형태로 나타난다.

2.2 벨트분리사고 발생 메커니즘

Fig. 2는 벨트 분리 현상에 의한 사고 타이어의 단면 사진을 나타낸 것이다. 벨트분리현상은 본질적으로 타이어에 가해지는 스트레스에 대한 낮은

저항력이 원인이다. 타이어에서의 스트레스는 차량 하중, 주행속도, 노면조건, 그리고 타이어의 공기압에 따라 달라질 수 있다. 특히 고속으로 주행하는 타이어는 고온의 열을 발생시키고 열은 고무의 물성값을 약화시켜 결과적으로 부착력이 감소하게 된다.

Fig. 3은 벨트분리 현상의 발생 메커니즘을 순차적으로 나타낸 것이다. 타이어에서 벨트분리현상은 벨트의 양 끝단에서 발생되기 시작한다. 타이어 구조에서 벨트의 양 끝단은 스틸코드에서

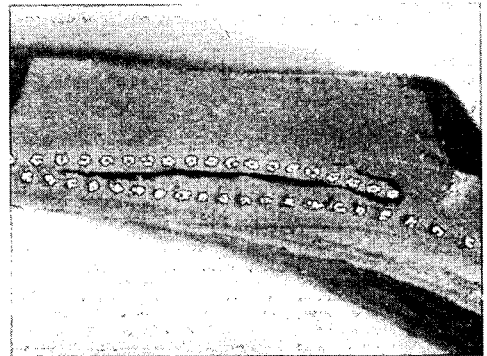


Fig. 2 Cut section of a belt separation tire

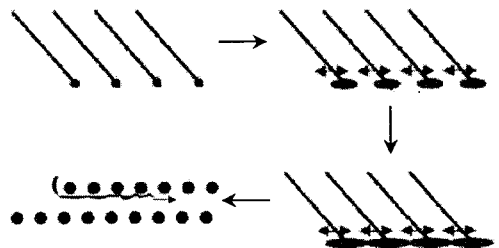


Fig. 3 Mechanism of belt separation

고무로 이어지는 부위로서 모듈러스(Modulus)의 급격한 불연속성이 존재하여 응력집중이 가장 심하고 또한 벨트의 양 끝단 절단면은 일반적으로 코팅 처리가 되어 있지 않기 때문에 고무의 부착력이 약해 작은 틈이 존재한다. 타이어가 주행하게 되면 벨트코드의 변형 및 거동에 의해 이 틈새가 커지게 되고 이렇게 성장된 일종의 크랙은 근접해 있는 다른 코드의 크랙과 연결되어 분리층을 형성하게 된다. 이렇게 형성된 분리층은 타이어가 주행하면서 벨트층의 전단변형에 의해 벨트층 사이로 성장하여 벨트층의 분리현상으로 이어지게 된다. 특히 고속으로 주행하는 타이어의 벨트 양 끝단 부분은 반복적인 변형으로 인해 고온의 발열이 발생되고 이러한 조건은 고무재료의 물성값을 급격히 약화시켜 크랙 성장을 촉진하게 된다.

3. 부착력 평가

3.1 시험 조건

부착력 시험은 *Adhesion Test* 또는 *Peeling Test* 라고 하며 측정대상이 되는 두 재료 층에 대하여 서로 이탈될 때의 힘을 측정하는 재료시험으로 본 연구에서는 대상 타이어에서 시편을 채취하여 ASTM D 413-98 에서 규정하는 시험절차로 평가하였으며 평가기준은 층간 이탈력(Peeling Force)의 평균값[kgf]으로 설정하였고 측정위치는 카카스와 1 벨트, 1 벨트와 2 벨트, 2 벨트와 트레드에 대하여 측정을 수행하였다.

3.2 평가 타이어

평가 타이어들은 현재 국내의 교체시장에서 판매되고 있는 5 종의 승용차용 래디알 타이어들에 대하여 실시하였으며 타이어의 규격은 승용차에 일반적으로 사용되는 205/65R15 로 선정하였다. 시험시편은 타이어로부터 직접 절단작업을 통해 제작을 하였으며 동일한 조건을 적용하기 위해 트레드의 중앙부위에 대해 시편을 제작하였다.

3.3 평가 결과

Table 1 은 세 개 측정 위치의 부착력 측정 결과를 나타낸 것이다. 평가 결과는 측정위치에 따라 경향이 일정하지 않았으며 벨트 상호간의 전단변형이 가장 심하게 발생되어 벨트분리사고와 가장 밀접한 관계가 있을 것으로 판단되는 1 벨트와 2 벨트 층 사이의 부착력이 큰 순서로 Fig. 4 와 같이 타이어를 나열하여 A,B,C,D,E 로 분류하였다.

부착력이 가장 큰 A 타이어와 비교하여 부착

Table 1 Adhesion test results

측정위치*	타이어 별 부착력[kgf]				
	A	B	C	D	E
카카스-1 벨트	26.1	21.9	17.7	18.2	21.3
1 벨트-2 벨트	26.9	24.3	21.5	18.4	17.3
2 벨트-트레드	43.0	48.8	16.4	18.5	27.3

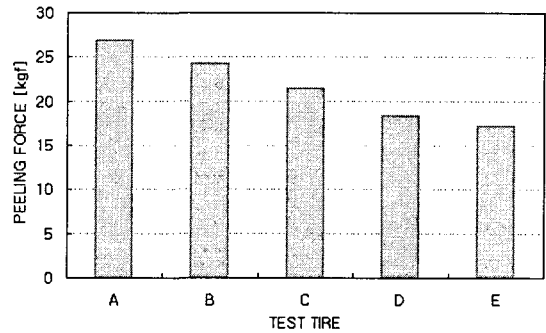


Fig. 4 No.1~No.2 belt adhesion force

력이 가장 약한 E 타이어는 약 55% 수준의 부착력을 갖고 있는 것으로 나타났다.

4. 고속내구 성능 평가

4.1 고속내구 시험조건

본 연구에서 타이어의 고속내구 성능을 평가하기 위한 시험방법으로 Fgi. 5 와 같이 1.7m 드럼에서 일정하중을 부하한 상태에서 속도를 증가시키면서 타이어의 내구성을 평가하는 FMVSS 109 고속내구 시험조건을 사용하였으며, 규정을 연장하여 사고가 발생하는 시간까지 시험을 진행하였다. FMVSS 109 고속내구 시험조건은 급격한 타이어의 발열로 인한 사고를 방지하기 위해 저속에서 2 시간의 워밍업 조건을 포함하고 있으며 하중조건은 타이어 옆면에 표기된 최대값의 88%를 적용한다. 평가 타이어들의 최대 하중값들이 약간씩의 차이를 갖고 있기 때문에, 본 평가에서는 가장 큰 하중값을 기준으로 선정하여 시험을 실시하였다.

4.2 고속내구성능 결과

Table 2 는 각 타이어에 대한 고속내구 시험 결과를 나타낸 것이다. 고속내구 시험은 타이어 모델별로 2 개의 샘플타이어로 평가를 수행하였으며 평균 주행시간으로 고속내구 성능수준을 비교

하였다. 시험결과는 Fig. 6 과 같이 부착력 시험 결과에서 분류된 A~E 순으로 고속내구성능이 평가되었으며 평가된 시험 타이어들의 사고형태는 모두 벨트분리로 인한 사고로 확인되었다.

Table 2 Test results of high speed performance

타이어 별 주행시간[hr:mm]					
TIRE	A	B	C	D	E
TIRE 1	9:20	7:38	7:14	7:11	7:12
TIRE 2	9:36	8:09	7:39	7:21	7:00
MEAN	9:28	7:53	7:26	7:16	7:06

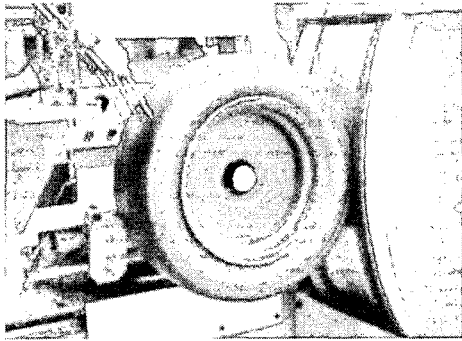
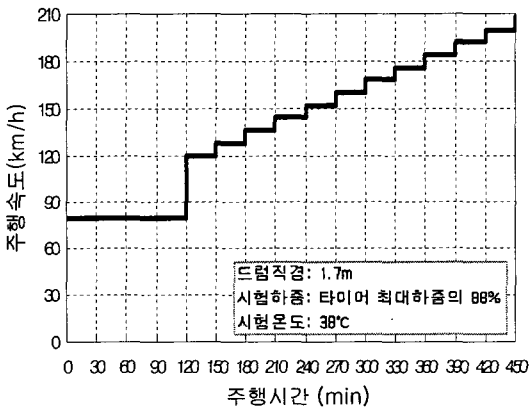


Fig. 5 Test condition and picture of high speed test

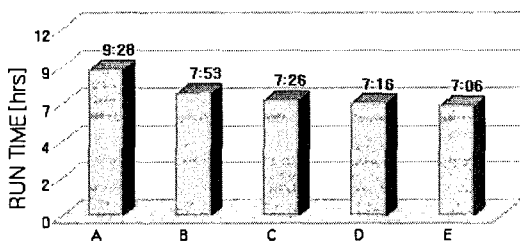


Fig. 6 Run time of high speed test

5. 상관성 분석

5.1 시험결과 분석

부착력 시험결과와 고속내구 시험결과와의 상관성을 분석하기 위해 Fig. 7 과 같이 X 축과 Y 축에 측정결과를 나타내 본 결과 선형회귀식의 결정계수 R² 값이 0.8091 을 나타내어 높은 상관성을 보여주고 있다.

5.2 분석의 한계성

타이어에서의 고속내구성능은 벨트분리 사고에 대한 저항특성으로 볼 수 있지만 벨트부의 부착력 특성만이 벨트분리 사고와 상관성이 있다고 판단하는 것에는 많은 한계가 있다. 그 이유는 벨트부의 부착력 특성은 크랙 성장에 대한 저항특성으로 볼 수 있는데 피로에 의한 파괴에서 중요하게

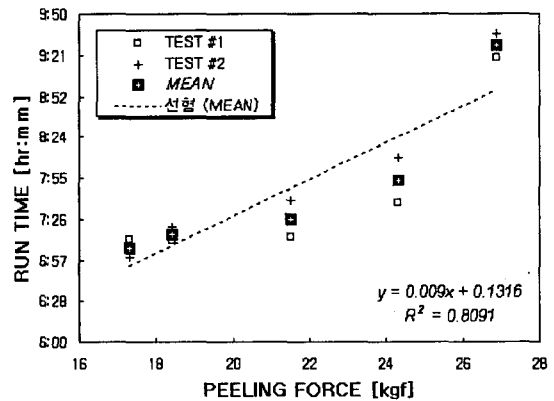
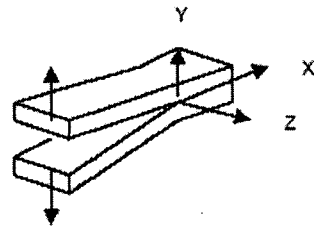
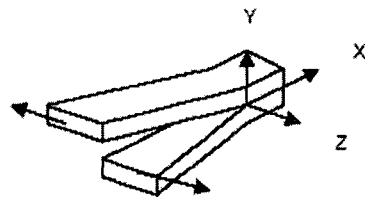


Fig. 7 Adhesion force vs. high speed performance



Mode I



Mode II

Fig. 8 Failure mode

작용하는 부분이 크랙의 초기발생과 크랙의 성장 속도로 구분해서 접근해야 하기 때문이다. 현재는 벨트 끝단에서의 크랙 발생을 억제시키기 위해 "Belt Wedge"와 같은 설계 인자들을 적용하는 기술들이 다양하게 사용되기 때문에 크랙의 초기발생시점은 타이어별로 큰 차이를 보일 수 있다. 벨트 층간에서의 크랙 성장에 대한 저항특성 평가방법은 부착력 시험과 같은 시험법으로 접근할 수 있는데, 반해 벨트 끝단에서의 크랙 발생시점을 평가하는 방법에는 많은 어려움이 있다. 또 한가지는 파괴모드가 실제 타이어에서 발생하는 경우와 부착력 시험에서 평가하는 경우가 동일하지 않다는 것이다. 즉, Fig. 8 과 같이 부착력 시험에서는 모드 I 방향으로의 이탈저항력을 평가하지만, 실제 타이어 벨트층에서는 모드 II 방향으로 거동이 발생된다는 것이다. 이러한 한계성에도 불구하고 본 연구에서 얻은 측정결과를 분석해 본 결과 부착력 특성과 고속내구성능은 높은 상관성을 보여주었다.

6. 결 론

고속으로 주행하는 타이어에서 발생하는 사고의 많은 경우가 벨트분리 사고로서 이는 자동차의 전복사고로 이어질 수 있는 확률이 높기 때문에 운전자의 안전을 생각할 때 타이어의 중요한 설계 목표치가 되어야 하는 부분이다. 본 연구에서는 ASTM D413-98 의 고무부착력 시험법을 타이어의 벨트부위에 적용하여 벨트분리사고와의 상관성을 규명하였다. 상관성 분석 결과에서는 결정계수 R^2 값이 0.8 이상으로 높은 상관성을 보여주었다.

시험결과에서는 벨트 부착력 시험결과와 고속내구성능 시험결과가 높은 상관성을 보여주고 있지만 피로파괴의 관점에서 보면 벨트부착력 특성만으로 타이어의 벨트분리사고에 대한 저항특성을 평가하기에는 충분하지 못한 요소가 있다고 판단된다. 그 이유는 벨트부착력 특성은 크랙이 이미 벨트 끝단에서 발생하여 상당부분 성장한 이후에 대한 벨트 층간의 이탈저항 특성인데 반해, 벨트 분리 사고를 평가하기 위해서는 크랙의 초기발생

시점이 고려되어야 하기 때문이다. 또 한가지 추가적인 연구가 이루어져야 할 부분은 타이어의 벨트 층간 부착력 평가를 수행할 때 파괴모드 II 방향에 대한 시험법을 통하여 실제 타이어에서 발생하는 거동을 재현할 수 있는 시험법 개발이 필요한 것으로 판단된다. 이러한 한계성에도 불구하고 본 연구를 통해 타이어 설계 시 벨트분리사고에 대한 저항특성을 향상시키기 위해서는 벨트층 간의 높은 부착력이 요구된다는 사실을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 삼성교통안전문화연구소의 교통사고 예방을 위한 연구사업의 지원으로 수행되었음

참고문헌

- (1) Grogan, R. J., 1999, "The Investigator's Guide to Tire Failures," Institute of Police Technology and Management, Florida, pp. 103~118.
- (2) NHTSA, 2001, "Engineering Analysis Report and Initial Decision Regarding Firestone Wilderness AT Tires," Safety Assurance Office of Defects Investigation, NHTSA, pp. 7~21.
- (3) Dickerson, C. P., Arndt, M. W. and Arndt, S. M., 1999, "Vehicle Handling with Tire Tread Separation", SAE 99-01-0120.
- (4) Daws, J. W., 2004, "Force Characteristics of Tire Tread Delaminations, Tire Science and Technology, TSTCA, Vol. 32, No. 1, pp. 41~53.
- (5) ASTM D413-98, 2002, "Standard Test Methods for Rubber Property-Adhesion to Flexible Substrate," ASTM International.
- (6) Samuel K. Clark, 1981, "Mechanics of Pneumatic Tires," U.S. Department of Transportation (DOT), pp. 103~202.
- (7) NHTSA, 1996, "Federal Motor Vehicle Safety Standard No. 109 New Pneumatic Tires - Passenger Cars," U.S. Department of Transportation (DOT).
- (8) Prevorsek, D. C. and Kwon, Y. D., 1981, "Role of Adhesion in Viscoelastic Properties of Rubber-Tire Cord Composites," Rubber Chem. & Tech.
- (9) Han, Y. H., 1989, "Finite Element Analysis of the Tire Contact Problem," KSME, pp. 820~830.