

실험적 방법에 의한 Tire 변형 특성 연구

강수철* · 구본희**

Experimental study on the deformation property of pneumatic tires - strain gauge method

S. C. Kang, B. H. Ku

Key Words: Pneumatic Tire(공기입 타이어), Sidewall(사이드월), Carcass(카카스), Bead(비드), Bead Filler(비드 필러), Strain Amplitude(스트레인 진폭), Rim Check Line(림 체크 라인)

Abstract

The present study describes the experimental method to measure the strain of tire. In this study, the strain distributions of tire with air pressure and vertical load were measured at the bead filler edge region and on the carcass cord using strain gauges and the results were compared with indoor bead durability test results. The strain amplitude of carcass cord near the rim check line of tire is one of the main factors that affects bead durability characteristic.

1. 서론

공기입 타이어(pneumatic tire)는 차량에 취부되어 차량 및 승객, 화물 등의 하중을 지지하고 구동력과 제동력을 지면에 전달해주는 역할을 하는 등, 차량측면에서 볼 때 지면과 맞닿는 유일한 부분으로서 차량의 전반적인 성능과 안정성을 대변할 수 있는 매우 중요한 역할을 수행하는 부분이다. 차량에 취부되어 사용되는 타이어는 차량의 주행에 의해 하중을 지지하며 타이어 1 회전마다 원주상의 모든 부분은 접지면을 통과하게 된다. 따라서 매 회전마다 타이어의 모든 부분은 접지면을 중심으로 굴곡변형이 발생하게 되고 이로 인하여 카카스(carcass)와 벨트(belts)등 각각의

코드층은 장력의 변동이 발생하게 되며, 코드 플라이(ply)간의 고무 층에는 전단응력(shear stress)이 반복하여 발생된다. 따라서 이와 같이 주행에 의해 타이어 각 부분은 응력과 변형율의 변동에 의해 내구성이 저하되기 때문에 이들에 대한 응력과 변형의 측정은 타이어를 구성하고 있는 각 구조 재료의 효율적 사용, 주행성능 향상 및 타이어 코드의 피로 현상과 관련된 타이어 구조설계 즉, 내구성과 관련된 개선방향을 제시할 수 있기에 타이어 연구에 있어 중요한 과제라 할 수 있다.

타이어의 구조에 관한 연구는 1970년대 유한요소법이 타이어 해석 연구에 응용되면서 많은 발전을 가져왔다. 그러나 타이어의 연구에 있어서 이론적인 해석을 타이어에 실제 적용했을 때 정확한 값을 알아내는데는 많은 한계가 있기 때문에 타이어의 해석에는 실험적인 방법에 의한 검증이 필요하게 되므로 많은 실험적 연구가 병행

* 한국 타이어 중앙연구소

** 한국 타이어 중앙연구소

되고 있다. 그 중에서도 타이어의 변형 측정에 관련되어서는 20세기 중반이후 특히 많은 연구가 진행되어지고 있다.

일반적으로 타이어에서 구조적으로 취약한 부분으로 평가되는 곳은 스틸 코드(steel cord) 및 섬유 코드가 겹치는 부분으로서 주로 벨트의 양쪽 끝단 부와 카카스(carcass)가 겹치는 사이드월(sidewall)부 이다. 이들 부위에서는 앞에서 언급한바와 같이 타이어가 주행 중 발생하는 응력 및 변형율의 집중으로 인해 구조적인 임의 변형을 가져와 응력의 집중 및 분균일이 발생하는 대표적인 부분으로서 타이어 사고의 주된 원인을 제공하게 된다. 따라서 이들 부위에서의 변형 특성을 정확히 파악하여 구조적인 결함을 보완하는 것은 매우 중요한 일이라 할 수 있다.

이와 같이 구조적으로 취약한 부분에 대한 변형특성을 평가하기 위한 실험적 방법으로는 스트레인 게이지(strain gauge)를 이용한 측정방법이 가장 적절한 방법이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 앞에서 언급하였던 타이어의 구조적 취약부분 중 비드(bead) 사고와 관련이 깊은 사이드월부의 변형특성을 실험적 방법으로 측정하였으며 이 결과와 실내에서 주행드럼을 이용한 타이어의 비드 내구 시험결과와 비교하였다.

2. 실험 방법 및 장치

2.1 실험 방법

본 연구에서는 타이어의 사이드월 및 비드부의 변형특성을 실험적으로 파악하고, 또한 이들 특성과 비드부 내구성과의 상관관계를 분석하기 위해 타이어에 작용하는 공기압 및 하중 조건에 따른 변형특성을 스트레인 게이지를 이용하여 측정하였다. 시험에 사용한 타이어는 P195/70R14 규격의 타이어로서 각각 카카스 프로파일(profile) 및 비드 필러(bead filler)의 높이 및 형상, 카카스 턴업(turn up)부의 높이가 다른 타이어를 사용하여 변형특성을 측정하였다.

본 연구에서는 앞에서 언급한바와 같이 타이어 각 부분 중 비드 내구성과 상관성이 깊은 설계인

자들의 변형특성을 파악하기 위해 각각의 설계인자를 변경한 시험용 타이어에 대해 구조적으로 취약한 부분으로 알려진 비드 필러 끝 부분, 비드 및 사이드월 부분의 카카스 등 다양한 부분에 대해 스트레인 게이지를 부착한 후 각 하중조건별 변형특성을 측정하였으며, 각 측정결과와 실내 주행 시험 결과를 상호 비교하였다. 먼저 비드 필러 끝 부분의 경우, 이 부분에 대한 두께방향 변형특성 측정을 위해 그림 1.에 도시된바와 같이 임의의 절단 작업을 통해 비드 필러 일부분을 가공하였으며, 가공된 부분에 스트레인 게이지를 부착하여 여러 가지 하중조건에 대해 변형특성을 측정하였다. 비드 필러 끝 부분에서의 스트레인 측정 방향은, 카카스 코드와 수직인 방향을 "Z", 평행한 방향을 "R" 로 표시하였으며, "Z" 또는 "R" 방향과 45° 방향을 "45°"로 구분하였다. 두번째로 카카스 코드에서의 변형 특성을 측정하기 위해서는 비드 및 사이드월의 일부분을 카카스가 표면에 드러날 수 있도록 절단작업을 통해 사이드월 일부분을 제거하였으며, 노출된 카카스 코드에 일정 간격으로 스트레인 게이지를 부착한 후 공기압 및 하중조건별 카카스 코드에서의 변형특성을 측정하였다.

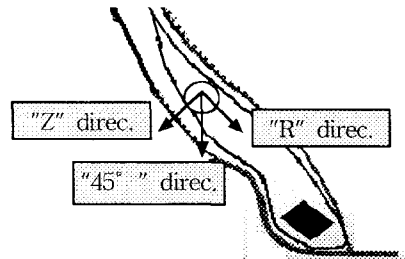


Fig. 1 Attaching location of strain gauge at bead filler.

2.2 실험 장치

그림 2 는 본 연구에서 사용된 시험장치 개략도를 나타낸 것이다. 타이어의 각 부분에 부착된 각각의 스트레인 게이지는 AD 변환기에 연결되어 공기압 및 하중변화시 게이지가 부착된 위치

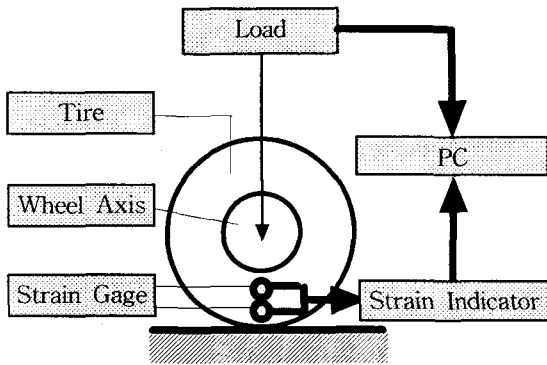


Fig. 2 A schematic diagram of test system.

에서의 변형율을 정량적으로 측정하였다

3. 실험결과

3.1 비드 필러 끝 부분에서의 변형 특성

그림 1.에서와 같이 타이어의 비드 필러 끝 부분에 45° 로제트(rosette) 타입의 스트레인 게이지를 부착한 후 공기압 및 하중작용 시 변형특성을 측정하였다. 그림 3.은 A 타이어에 대해 공기압을 2 kg/cm²로 고정하고 하중을 변화시킬 때 각 방향별 스트레인 변화량을 나타낸 것이다. 공기압을 일정상태로 유지한 상태에서 수직하중을 증가시킨 경우, 각 방향의 스트레인은 점차 감소하는 것을 확인할 수 있다.

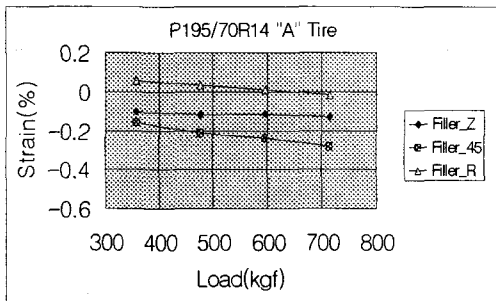


Fig. 3 Strain distribution under vertical loading.

그림 4는 공기압 및 수직하중 작용시 비드 필러 끝 부분에서 각 방향별 스트레인 진폭(strain amplitude)을 나타낸 그림이다. 즉, 100% 하중 작용시 측정된 각 방향별 스트레인 값에서 공기압만 작용시의 스트레인 값을 제외한 값을 나타낸 것이다. 45° 방향의 스트레인 진폭이 가장 큰 값을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 비드 필러 끝 부분에서는 공기압 및 하중의 변화에 의해 45° 방향의 스트레인 진폭이 가장 크게 발생함을 알 수 있다.

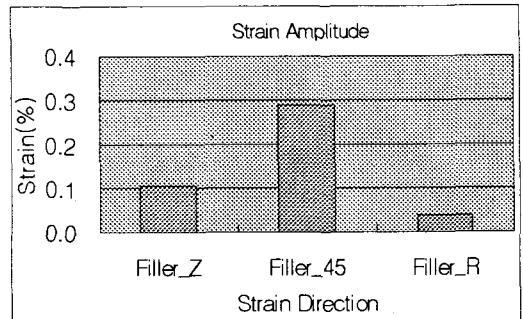


Fig. 4 Strain amplitude of "A" tire.

그림 5는 수직하중 작용 시, 본 연구에서 사용한 4 가지 시험 타이어에 대한 비드 필러 끝 부분에서의 45° 방향에 대한 스트레인변화량을

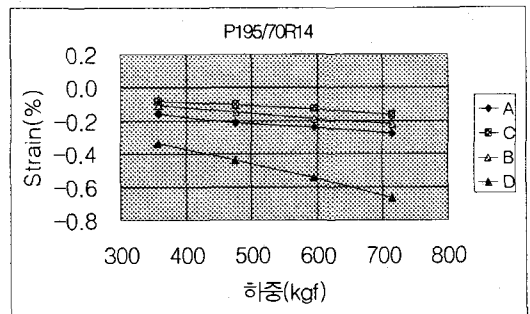


Fig. 5 Strain distribution of tires under vertical loading.

나타낸 그림이다. D 타이어의 스트레인 변화량이 가장 크게 나타나고 있다

그림 6 은 각 시험 타이어를 대상으로 앞에서 언급한바와 같이 100% 수직하중 작용시의 스트레인이에서 공기압 작용시의 스트레인 값을 뺀 스트레인 진폭을 나타낸 그림이다. A 타이어의 스트레인 진폭이 가장 작은 값을 나타내며, D 타이어의 값이 가장 큰 값을 나타내고 있다.

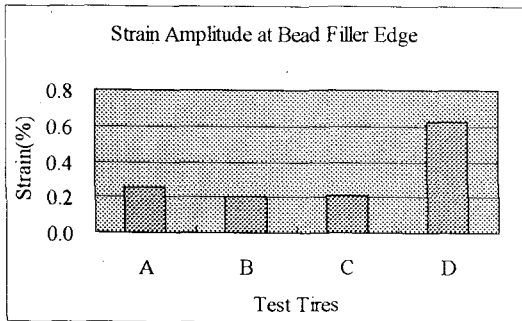


Fig. 6 Strain amplitude of tires.

3.2 카카스 코드의 변형 특성

공기압 및 하중 작용 시 타이어의 비드 및 사이드월부에서의 카카스 코드에 대한 변형 특성을 측정하기 위해 사이드월 고무를 일부 제거한 후 카카스 코드상에 일정 간격으로 스트레인 게이지를 부착하여 하중 조건별 카카스 코드에서의 변형특성을 측정하였다. 그림 7 은 공기압 및 수직 하중 작용시 각 타이어에 대한 카카스 코드에서의 스트레인 분포를 나타낸 것이다

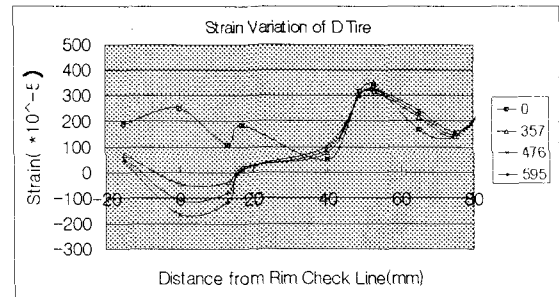
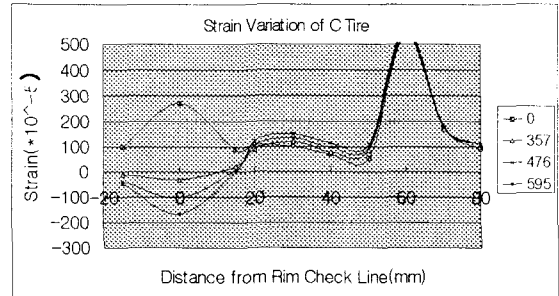
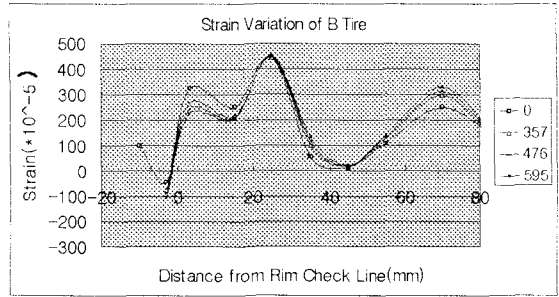
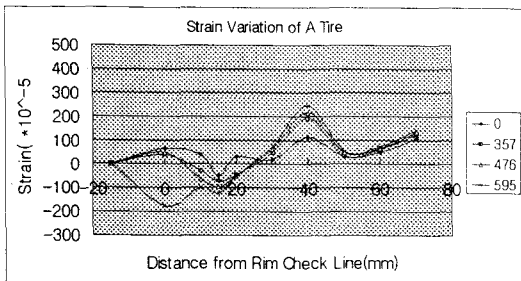


Fig. 7 Strain distribution of carcass cord under vertical loading.

앞에서 언급한바와 같이, 본 연구에서 사용한 시험 타이어는 비드 및 사이드월부가 달리 설계된 타이어로서, B 타이어를 제외한 다른 시험 타이어의 경우(A, C, D 타이어) 카카스 턴업의 위치는 림 체크 라인으로부터 40mm 전, 후에 위치하고 있다. 따라서 카카스 코드에서의 스트레인 분포는 카카스 턴업 위치가 다른 타이어와 달리 설계된 B 타이어를 제외하고는 모두 유사한 분포를 보여주고 있다. 즉, B 타이어에서와는 달리 비드 필러 끝 부분을 중심으로 아래 부분에서는

(-) 스트레인이 나타나고 있으며, 반대로 그 위쪽에서는 (+) 스트레인이 나타나고 있다.

또한 공기압 작용 시, A 타이어를 제외한 다른 시험 타이어의 경우, 카카스 코드에서 발생하는 스트레인이 일반적으로 큰 반면, A 타이어는 상대적으로 작은 스트레인이 발생한다. 그러나 반대로 하중 작용 시 카카스 코드에서 발생하는 스트레인이 다른 타이어에 비해 상대적으로 크기 때문에 공기압 및 하중 작용시 A 타이어의 스트레인 진폭이 크게 나타나고 있다.

그림 8 은 각 타이어대해, 하중 작용시 카카스 코드 상에서 발생하는 스트레인과 공기압 작용시의 스트레인의 차이를 나타내는 스트레인 진폭을 나타낸 것이다. 림 체크 라인 부근에서 D 타이어의 스트레인 진폭이 가장 크게 발생하며, C, A, B 타이어의 순서를 보이고 있다. 특히 B 타이어의 경우, 스트레인 진폭이 카카스 코드 전 부분에 걸쳐 비교적 고르게 분포함을 확인할 수 있다.

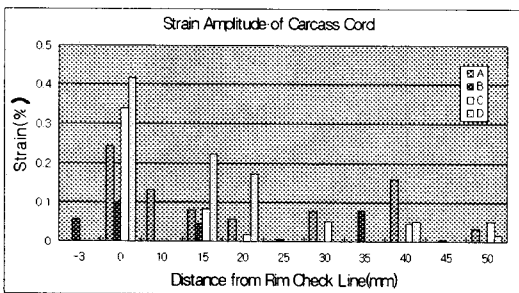


Fig. 8 Strain amplitude of tires.

3.3 실내 비드 내구 시험

타이어의 비드 및 사이드월 부 변형특성과 비드부 내구성과의 상관성을 파악하기 위해 실내에서 주행시험기를 이용한 비드 내구 주행시험을 실시하였다. 본 연구에서 실시한 주행시험은 일정시간 타이어를 드럼에서 주행한 후 비드부 단

면을 확인하여 사고 유무를 판단하는 방법을 사용하였으며 각 시험 타이어에 대한 주행시험 결과 및 사고 유형은 표 1. 에 정리하였다.

Table 1 Indoor durability test results and failure modes.

	A	B	C	D
주행시간 (%)	100	100	94	75
사고유형	Bead Crack	none	Bead Crack	Bead Crack

표 1. 에서 알 수 있는바와 같이 실내 주행시험 결과 주행시간을 만족한 타이어는 A 와 B 타이어이며, 다른 타이어의 경우는 주행시간을 만족하지 못하고 중간에 사고가 발생하였다. 또한 주행완료 후 시험 타이어의 비드부를 조사해본 결과 B 타이어를 제외하고 모두 비드부에서 크랙(crack)이 발생하였으며, 특히 비드부에서 사고가 발생한 A, C, D 타이어의 경우 정도의 차이는 있지만 모두 림 체크라인 부근의 카카스 코드 절단에 의해 비드부에 크랙이 발생하였음을 확인할 수 있었다.

3.4 유한요소 해석

비드 및 사이드월부의 변형특성 측정결과와 비교하기 위해 유한요소 해석을 실시하였다. 유한요소 해석의 경우 변형특성 측정결과에서 비드 내구성 측면에서 변형특성이 유리한 경향을 보인 B 타이어와 불리할 것으로 판단되는 D 타이어에 대해 실시하였으며, 상용 프로그램인 ABAQUS 를 이용하였다. 유한요소 해석에는 3차원 모델을 사용하였으며, 5,600 절점, 7,200 요소를 사용하여 모델링 하였고, 카카스의 경우 4 절점 멤브레인 요소를 사용하였다. 그림 9는 공기압 및 수직하중이 작용하는 경우 카카스 에서의 래디얼 방향 스트레인 분포를 나타낸 것이다.

유한요소 해석 결과, B 타이어에 대비 D 타이어의 래디얼 방향 스트레인 값이 크게 발행함을 확인할 수 있다. 또한 각 타이어 모두 비드 코드 부분에서 가장 큰 변형율이 발생하고 있으며, 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

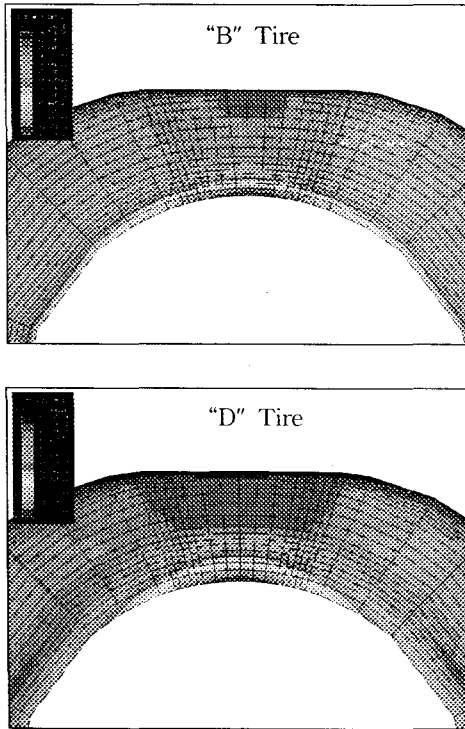


Fig. 9 Finite element analysis results.

4. 결론

본 연구는 스트레인 게이지를 이용하여 공기압 및 수직하중 작용 시 타이어의 비드 및 사이드월 부분에서의 변형특성을 실험적으로 고찰한 내용으로, 비드 내구성에 영향을 미치는 사이드월 부분의 변형특성을 파악하기 위해 이들 변형을 측정 결과와 비드부 내구성 평가를 위한 실내 주행시험 결과와 비교하였다.

먼저 스트레인 게이지를 이용한 변형특성 측정

결과를 분석해 보면, 앞에서 언급한바와 같이 각 타이어 공히 공기압 작용 시 카카스 코드 전반에 걸쳐 (+)스트레인이 발생하며, 여기에 수직하중이 더해지는 경우 B 타이어를 제외한 다른 타이어에서는 비드 필러 끝 부분을 기준으로 아랫부분은 (-)스트레인을, 윗 부분은 (+)스트레인을 나타내고 있다. 또한 공기압 및 수직하중 작용 시 립 체크 라인 부근의 카카스 코드에서 발생하는 스트레인 진폭을 비교해본 결과, D 타이어의 진폭이 가장 크게 발생하였으며 C, A, B 타이어의 순서로 나타났다.

실내 주행시험 결과의 경우, 앞에서 언급한바와 같이 타이어에서 발생한 사고 양상은 모두 타이어 립 체크 라인 부근의 카카스 코드 절단에 의한 비드부 크랙이었다. 따라서 이 부분에서의 변형특성이 비드 내구성에 많은 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다.

결론적으로, 이상의 타이어의 비드 및 사이드월 부분 변형특성과 비드부 내구성 평가를 위한 실내 주행시험 결과를 정리해 볼 때, 립 체크 라인 부분에서의 카카스 코드의 변형특성은 타이어의 비드 내구성과 비교적 상관성이 높은 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) D. O. Stalnaker, R. H. Kennedy and J.L. Ford. 1980. "Interlaminar Shear Strain in a Two-Ply Balanced Cord-Rubber Composite", Experimental Mechanics. Vol. 20, p. 87.
- (2) J. Deeskinazi and R. J. Cembrola. 1984. "A Parametric Study on Interlaminar Shear Strain in Cord-Rubber Composites", RCT, Vol. 57, p. 168.
- (3) S. K. Clark, "Mechanic of Pneumatic Tires"
- (4) 구본희, 이병립, 1997. "Cord-Rubber 복합재료의 피로 파괴 특성", 한국 자동차 공학회 춘계 학술대회 논문집, Vol. II, p.378-383