타이어 접지면의 3축방향 압력과 평면변위 측정을 위한 제어계측시스템의 설계

A Control and Measurement System Design for 3-axis Pressure and 2-axis Displacement on Tire Road Interface

임 영 철, 류 영 재, 조 규 종, 김 남 전
(Young-Cheol Lim, Young-Jae Ryoo, Gyu-Jong Cho, and Nam-Jun Kim)

Abstract : Necessarily, it is required to analyze interfacial mechanism between tire and road for understanding tire wear, vehicle tracking and breaking. Therefore, there have been some efforts to measure 3-axis pressure and 2-axis displacement on tire road interface. But it was so hard to couple precisely measuring sensor and desired point on tire tread pattern block that it was impossible to analyze the mechanism on commercial tire with tread pattern. To overcome such a problem, a on-line measurement system is proposed in this paper. And an automatic control system is designed to test the tire with similar configuration of real vehicle driving.

Keywords: tire wear, vehicle tracking, breaking, 3-axis pressure, 2-axis displacement

Ⅰ. 서론

차량 주행시 타이어의 동적 거동을 보면 타이어의 트레드 표면과 노면사이에서 매우 복잡한 역학적 작용인 점착 및 미끄럼 마찰 등이 발생되고, 이러한 현상들의 반복과정을 통하여 차량의 주행성능 및 타이어의 성능이 결정된다[1,2]. 따라서 타이어의 마모특성, 차량의 조향성능 및 제동, 구동성 등의 연구를 위해서는 회전하는 타이어의 접지면에서 나타나는 역학적 현상 규명이 필연적으로 선행되어야 할 과제이다.

접지면의 역학적 현상규명을 위해서는 회전하고 있는 타이어의 트레드 패턴블록과 노면사이에서 발생되는 3축방향 압력 및 2축방향 평면변위를 계측하는 것이 우선적으로 필요하며, 이러한 계측을 위하여 최근 특수한 센서나 시험장치를 개발하여 접지면의 역학적 현상을 규명하는데 많은 노력을 기울이고 있다[3-7]. 그러나 기존의 시험장치는 측정하는 센서와 측정하고자 하는 지점의 정확한 일치가 어려워, 측정하고자 하는 타이어 패턴블록의 위치를 명확히 정의할 수가 없었기 때문에 트레드에 패턴블록이 없는 타이어에 대해서만 시험이 가능하였고 패턴블록이 있는 타이어는 측정점의 위치설정이 어려워 패턴블록의 역학적 현상을 규명하는 것이 불가능하였다.

따라서 본 연구에서는 타이어 패턴의 초기위치를 광센서를 이용하여 인식하고 컴퓨터에 내장한 패턴블록 초기위치와 일치시키고 엔코더로 타이어 회전각을 감지하여 컴퓨터의 패턴블록을 화면상에서 동기적으로 이동시키므로써 원하는 측정점을 정확히 설정할 수 있도록 하였다. 이러한 설정과정을 자동화하고 시험장치를 온라인화하므로써 편리하게 계측할 수 있는 시스템을 설계하였다. 그리고 3축방향 압력을 측정하는 센서 12개와 2축방향 평면변위를 측정하는 센서 12개를 타이어가 접지하는 면에 설치하고 센서에 나타나는 소신호를 증폭한 60개 채널의 동적 신호를 A/D 변환을 하여 연속적으로 컴퓨터로 가져오는 시스템을 설계하였다. 이때 A/D 변화는 모든 채널이 같은 시간에 샘플링하는 동시성이 보장되도록 하였다. 또한 이러한 A/D 변환하여 계측된 데이터를 사용자의 요구에 따라 여러가지 형태로 표현하기 위해 MS-Windows를 기반으로 한 계측 소프트웨어를 개발하였다.

더불어 실제차량이 주행하는 환경과 동일한 조건을 설정해주기 위한 시험장치를 구현하였고, 이때 타이어에 인가되는 하중, 주행속도, 슬립각은 유도전동기, 공압, 유압장치에 의하여 구동된다. 이 기계적인 장치를 제어하기 위한 하드웨어 및 컴퓨터와의 인터페이스 장치를 설계하였다. 또 이러한 장치는 사용자의 시험조건 설정에 따라 수행되도록 제어 소프트웨어를 개발하였다.

구현된 장치를 트레드 패턴이 없는 타이어와 패턴이 있는 타이어에 적용하여, 주행시 타이어의 접촉면에서 발생하는 3축방향 압력과 2축방향 평면변위를 계측하여 시간적인 변화와 공간적인 분포를 분석하므로써 타이어의 성능개선에 중요한 자료를 제공할 수 있었다.

Ⅱ. 기계적 구조

본 연구에서 개발한 시험장치의 기계적인 기본구조는 그림 1과 같이 크게 구동평판, 부하장치, 슬립각 조절부로 구성되어있다.

구동평판은 타이어와 면접촉하여 자유회전시키는 역할을 하며, 이는 차량 주행시 접지면의 환경과 동일한 조건이 된다. 구동평판은 길이 1500mm, 폭 300mm의 알루미늄 특수강으로 구성되었으며 접지면은 샌드 페이퍼(sand paper)가 접착되어 있다., 접지면을 지지하는 것은 LM 가이드로써 길이 3000mm이며 구동평판은 약 1500mm를 왕복운동할 수 있다. 구동평판의 왕복운동은 공압장치에 의하여 구동되며, 사용된 공압장치는 특수한 형태의 구조를 가진다. 즉, 일반적인 경우와 반대로 공압장치의 피스톤 축은 지지물에 의하여 고정되어 있고, 실린더가 구동평판과 결합되어 왕복운동을 하는 구조이다. 이때 피스톤 축내의 관을 통하여 공기를 주입할 수 있으며, 양쪽중 어느 쪽에 주입하느냐에 따라 실린더의 운동방향이 결정된다. 운동시 오조작에 의한 구동평판의 이탈을 방지하기 위하여 양 끝에는 완충장치가 부착되어있다.

부하장치는 타이어에 수직하중을 가할 수 있게 하며 이는 타이어의 부하에 대한 시험을 하기 위한 장치이다. 부하장치는 유도전동기에 의하여 구동이 되며, 유동전동기의 회

접수일자 : 1995. 6. 7.
1차 수정 : 1995. 8. 20., 2차수정 : 1995. 8. 30.
임영철, 류영재 : 전남대학교 공과대학 전기공학과
조규종 : 전남대학교 공과대학 기계공학과
김남전 : 금호 기술연구소

전을 왕복운동으로 변환하는 스크루 기어, 상하왕복운동을 하는 슬라이딩 블록, 이를 지지하고 안내하는 프레임으로 구성되어 있다. 이때 슬라이딩 블록은 타이어를 장착할 수 있는 허브축이 부착되어 있고, 현재의 부하를 감지하는 로드셀도 부착되어있다. 일반적인 부하시험은 440[Kg]내외에서 행하며 본 장치는 1[ton]까지 시험이 가능하다.

슬립각 조절장치는 차량 진행방향과 타이어 주행방향의 각도차인 슬립각을 임의로 가변시킬 수 있도록 하여 타이어의 코너링(cornering)특성을 시험할 수 있도록 설계하였다. 슬립각 조절장치는 유압에 의하여 구동이 된다. 즉 유압실린더가 타이어가 장착되는 허브축과 동일 수평축에 유니버설 조인트로 연결되어 피스톤 축의 왕복운동이 허브축의 각도를 변화시킴으로써 슬립각이 변화한다. 유압실린더는 축내에 potentio meter가 내장되어 있어 슬립각에 대한 위치를 감지하도록 되어있다.

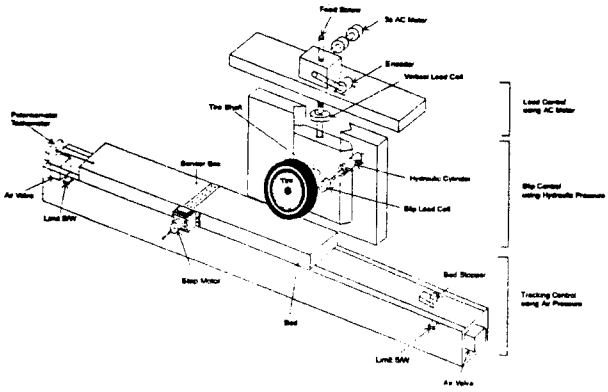


그림 1. 타이어 접지압 및 변위 측정장치의 기계적 구조.
Fig. 1. Structure of measurement system for pressure and displacement on tire road interface.

Ⅲ. 제어장치

위와 같은 기계장치를 구동하고 제어하기 위하여 공압제어, 유압제어, 유도전동기 제어장치를 구성하였다.

공압에 의해 구동되는 구동평판은 실린더의 양측에서 압축공기를 인가하는 밸브의 조작에 따라 전진과 후진이 결정된다. 또한 인가하는 압축공기의 유입량을 비례제어밸브에 의하여 조절하므로써 주행속도를 변화시킬 수 있다. 이때 구동평판의 위치와 속도는 구동평판에 연결되어 있는 potentio meter와 tacho meter에 의하여 측정되며 A/D 변환기를 통하여 컴퓨터로 입력된다.

타이어 시험과정 중 구동평판의 위치제어는 다음과 같이 수행한다. 사용자가 임의의 위치를 컴퓨터에 입력하면 A/D 변환기로부터 읽은 현재의 위치와 비교하여 오차를 계산한다. 이 오차에 의하여 전진 또는 후진의 방향을 결정하는 밸브와 속도를 결정하는 비례제어밸브의 제어량을 계산한다. 컴퓨터는 이 값을 디지털 출력과 D/A 변환기를 통하여 밸브 구동용 증폭기에 전달되고 이에 의하여 공압실린더는 구동된다. 이때 공기압은 비선형성을 가지고 있으므로 일반적인 선형제어의 사용이 불가하여 구간에 따라 제어규칙을 변경하는 방법을 이용하였다.

부하장치는 농형 3상 유도전동기에 의하여 feed screw를 연직방향으로 하강시키므로써 하중을 인가하고, 상승시키므로써 하중을 제거한다. 이때 하중은 2[ton]까지 측정이 가능한 로드셀(load cell)에 의하여 계측된다. 타이어에 인가되는 하중은 주행시 변화하지 않으므로 초기에 하중을 결정하고 시험 중에는 고정시킨다. 사용자가 임의의 하중을 컴퓨터에 입력하고 시험을 시작하면 디지털 출력에 의하여 유도전동기의 회전방향을 결정하고 하중을 인가한다. 인가되는 하중이 지정한 값에 도달하면 유도전동기의 회전을 정지시켜 하중을 고정한다. 이때 유동전동기에는 브레이크가 내장되어 있어 정지시 농형 유도전동기를 정확하게 제동한다.

슬립각의 조절은 유압장치로 구동되고 실린더의 위치를 제어하므로써 슬립각을 조절한다. 사용자가 컴퓨터에 원하는 각도를 입력하면 D/A 변환기를 통하여 아날로그 PID제어기에 전달된다. PID제어기에 의하여 유압실린더에 인가되는 유압량과 방향이 결정되어 실린더를 조작한다. 이때 실린더에 내장되어있는 potentio meter로 위치를 감지하여 PID제어기에 피드백되어 정확한 위치제어를 수행한다. 한편 핸들을 좌우로 흔드는 특수한 시험을 위하여 타이어의 슬립각을 최대 ±6°, 1[Hz]로 동작시키는 기능도 자동으로 수행하도록 하였다.

Ⅳ. 계측 장치

계측장치는 그림 2와 같이 신호를 디지털화하기 위한 고속, 고정밀도를 갖는 A/D 변환기 그리고 데이터를 실시간 입력하고 분석하기 위한 소프트웨어로 구성되어 있다.

타이어 주행시 접지면의 3축방향 압력과 2축방향의 평면변위를 측정하는 스트레인게이지형 센서 각각 12개를 주행방향에 대해 직각방향으로 배열하였으며 이 센서박스를 구동평판의 중앙단면부에 설치하였다. 이때 사용된 센서는 타이어 공학계에서 권위있는 Samuel K. Clark에 의하여 개발된 타이어 측정 전용센서이다.[8] 3축방향의 압력센서는 지름 3.8mm, 길이 20mm정도의 원통형 핀의 각 축에 대하여 스트레인게이지가 부착되어있는 형태이며, 특히 수직방향 압력은 상단 원판의 하단에 미소한 스트레인게이지가 부착되어있다. 또한 2축방향 평면변위센서는 지름 2m, 길이 20mm정도의 원통 침 형태로 각 축에 대하여 스트레인게이지가 부착되어있다. 타이어가 센서박스를 지나칠 때 축방향으로 배열된 12개의 센서는 동시에 데이터를 획득하므로 12회의 반복동작시험을 1회에 가능하도록 한다.

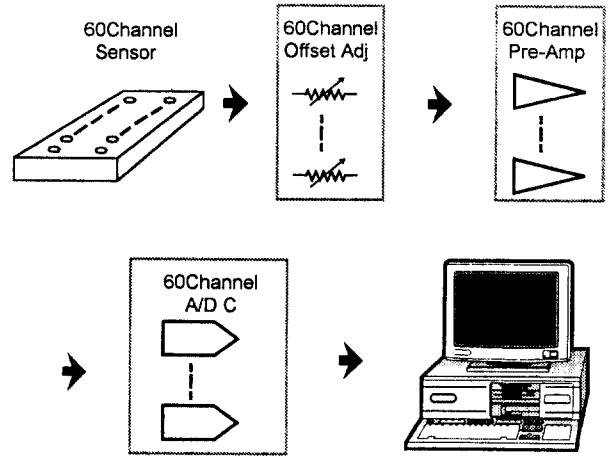


그림 2. 계측장치의 구조.
Fig. 2. Configuration of measurement system.

타이어와 접촉에 의해 발생되는 신호는 각 채널의 옵셋 조절단을 거쳐 초기화시키고 전치증폭기(pre-amp)에 의해 미세한 신호를 증폭시킨다. 증폭된 60개 채널의 동적 신호를 12비트의 분해능과 8.33[μsec]의 변환속도로 A/D 변환하여 컴퓨터로 가져오며 이때 각 채널은 시간적 동시성을 보장한다.

입력된 센서의 데이터는 계측 소프트웨어에 의하여 실시간으로 그림 3과 같이 표현되고 사용자 선택에 의해 디스크

에 저장되어 데이터 분석자료로 사용된다. 이러한 소프트웨어는 컴퓨터의 기종과 주변 입출력장치와의 호환성을 위하여 MS-Windows를 기반으로 개발되었다.

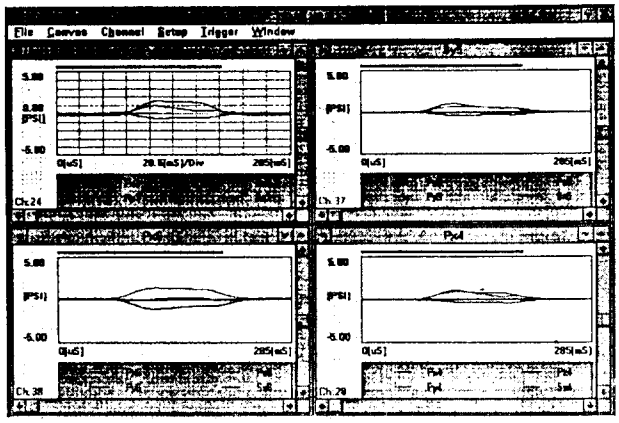


그림 3. 계측결과의 예.
Fig. 3. Example of measurement.

V. 측정점 위치설정의 온라인 및 자동화

측정하는 센서와 측정하고자 하는 지점의 정확한 일치를 위하여 광섬유를 이용하여 초기위치를 설정하고 엔코더로 현재위치를 검출하므로써 정확히 측정점을 설정할 수 있도록 하였다. 즉 패턴 초기위치를 타이어 측면에 수 mm의 흰색으로 표시하고 이를 반사형 광센서로 검출하므로써 패턴블록구조의 초기위치를 컴퓨터에서 인식한다. 이때 컴퓨터에는 시험하는 타이어 패턴블록 구조가 저장되어있으므로 패턴블록구조의 초기위치를 맞추고 동기모드로 변환시킨다. 이 동기 모드에서는 타이어 축에 연결된 엔코더에 의하여 화면상에 접지된 패턴블록이 나타나도록 되어있다. 한편 주행방향에 대해 측방향으로 움직이는 센서판은 스텝모터에 의해 구동되며 인가된 펄스 수에 의하여 센서의 위치를 인식한다. 따라서 측정하고자 하는 타이어의 트레드 패턴과 센서판의 위치를 그림 4와 같이 컴퓨터에서 일치시키므로써 센서판의 위치를 이동시키는 스텝모터와 타이어 초기점을 인식하는 광센서 그리고 타이어의 위치를 검출하는 엔코더에 의해 자동으로 측정점을 맞추도록 시스템을 온라인화 하였다.

또한 타이어의 시험시 같은 과정을 반복하여 수행해야하므로 사용자는 대단히 피로하게 된다. 따라서 사용자가 시험에 필요한 시험조건인 속도, 하중, 슬립각 등을 컴퓨터에 입력한 후 시험 시작을 시키면 전 과정을 반복하도록 자동화하였다.

VI. 결과 및 고찰

승용차용 타이어 중 가장 일반적인 규격인 175/70R13을 대상으로 시험하고 그 결과를 고찰하여 보았다. 이 타이어의 100% 규정하중은 440[Kgf]이고 시험 주행 속도는 1[m/sec]이다. 이와같은 시험조건을 트레드 패턴이 없는 타이어에 적용하여 접지면에서 발생하는 3축방향의 압력과 2축방향의 변위를 측정하였다. 이때 동적 시험 데이터는 주행속도에 관계없이 동일한 경향을 갖는다고 이미 밝혀졌으므로 1[m/sec]의 속도에서 시험하였다[5].

그림 5부터 그림 7은 3축방향의 압력분포를 나타내었다. 그림에서 타이어 접지면의 공간적 위치를 나타내기 위하여 접지면의 앞쪽부터 뒤쪽을 66개로, 접지면의 좌측부터 우측을 31개로 분할하였다. 이때 0은 접지면의 앞쪽인 타이어 toe, 66은 접지면의 뒤쪽인 타이어 hill을 나타낸다. 또한 S1은 접지면의 좌측, S31은 접지면의 우측을 나타낸다.

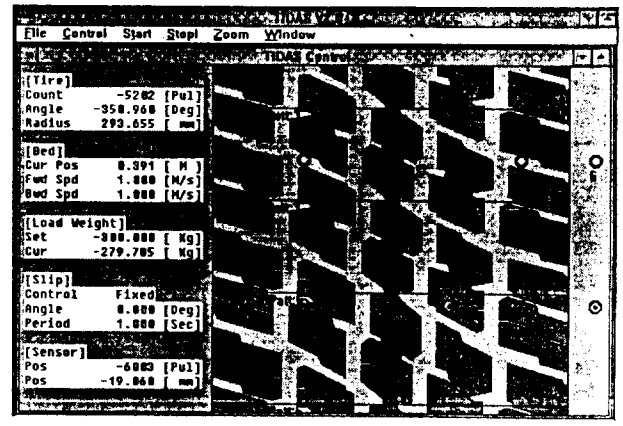


그림 4. 측정점 설정의 온라인화.
Fig. 4. Setup of measured point.

그림 5의 수직압력분포 특징을 살펴보면 접지 중앙부와 숄더부에서 높게 분포함을 알 수 있다. 특히 접지 가장자리는 수직압력이 집중적으로 높게 작용하고 있다.

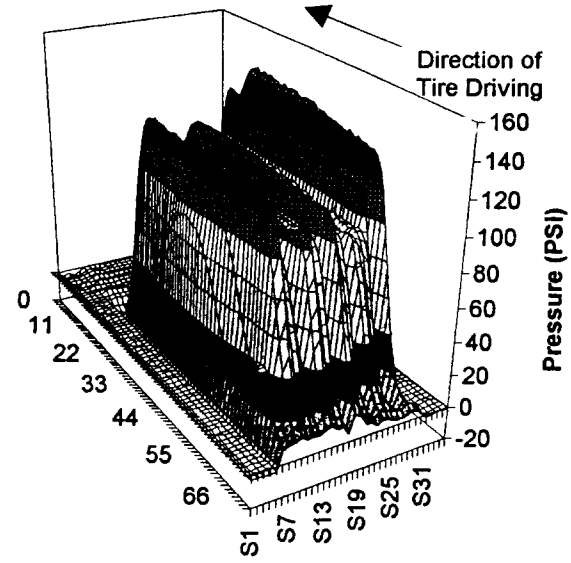


그림 5. 트레드 패턴이 없는 타이어의 수직압력 분포.
Fig. 5. Normal pressure distribution of no-tread pattern tire.

자유회전하는 타이어의 접지면에서의 전후방향 전단응력분포를 그림 6에 표시하였다. 자유회전시 타이어의 전후방향 전단응력분포의 양상은 접지가 시작되면서 (+)전단응력이 급격히 증가하여 최대에 이른 다음, 점차 감소하여 접지중앙 후반부를 넘어서면서 (-)전단응력 상태로 바뀐 다음 접지가 끝나고 있음을 알 수 있다. 이와같은 전후방향 전단응력분포는 S. A. Lippmann과 K. L. Oblizajek에 의하여 실험된 결과와 일치함을 알 수 있다[5]. 또한 이는 일본 중앙대학의 이론적 해석결과와 비슷한 성향임을 볼 수 있다[9].

자유회전 타이어의 측방향 전단응력분포를 그림 7에 표시하였다. 접지부위별 측방향 전단응력의 분포양상을 보면 접지면의 양쪽 숄더부에서 접지중앙부위로 반대방향의 전단응력이 대칭적으로 작용하고 있었으며, 횡단면상 분포를 보면 접지 중앙부위에서는 영(zero), 양쪽 숄더부에서는 최대

전단응력이 집중되는 양상이 뚜렷하였다.

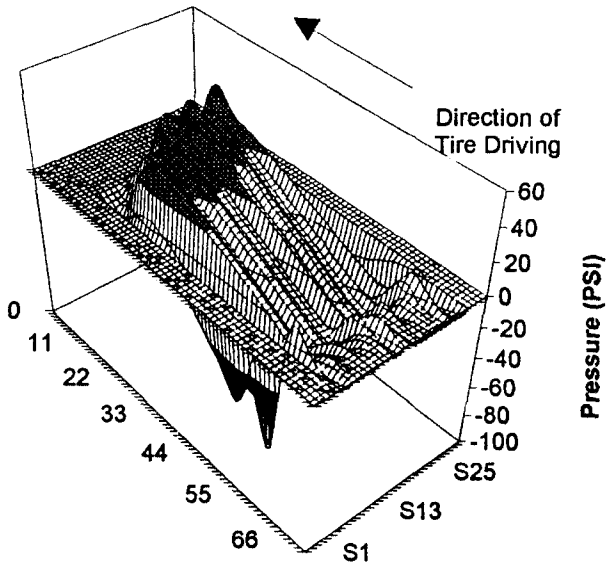


그림 6. 트레드 패턴이 없는 타이어의 전후방향 전단응력 분포.

Fig. 6. Fore aft stress distribution of no-tread pattern tire.

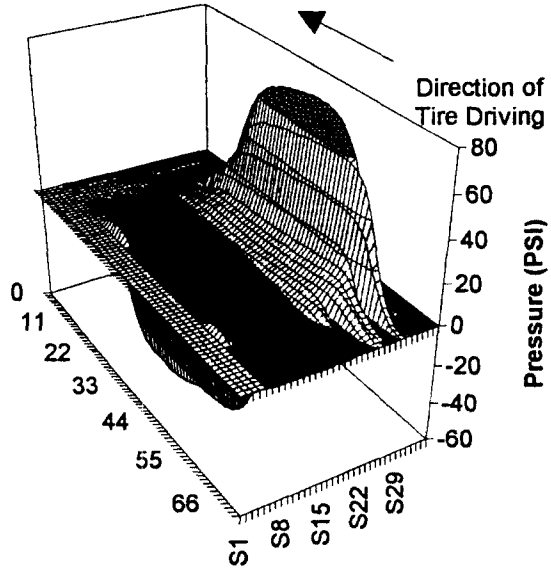


그림 7. 트레드 패턴이 없는 타이어의 측방향 전단응력 분포.

Fig. 7. Lateral stress distribution of no tread pattern tire.

또한 전후방향 변위분포와 측방향 변위분포를 측정하였다. 그림 8의 전후방향의 변위분포는 그림 6의 전후방향 전단응력과 비슷한 양상의 분포를 가짐을 볼 수 있다. 또한 측방향 변위분포도 그림 7의 측방향 전단응력분포와 비슷한 성향으로 나타났다.

패턴블록이 있는 타이어의 경우 한 피치의 패턴블록내에서 위치에 따른 전후방향 전단응력의 시간적인 분포를 보면 그림 9와 같으며 이는 타이어의 패턴블록 설계에 중요한 자료가 된다.

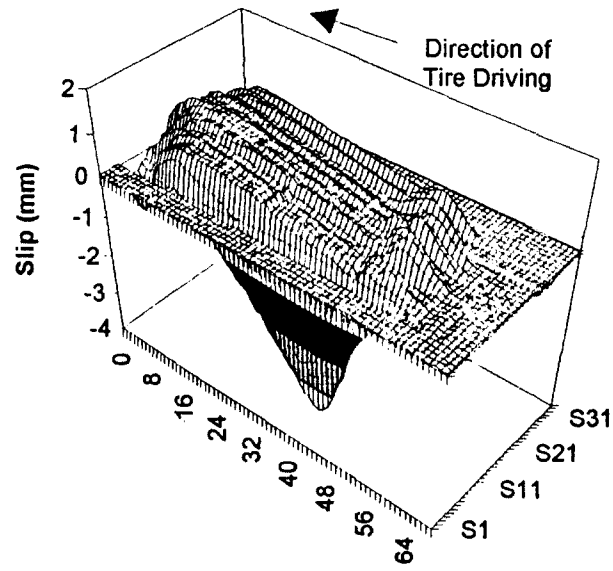


그림 8. 트레드 패턴이 없는 타이어의 전후방향 변위분포.

Fig. 8. Fore-aft displacement distribution of no-tread pattern tire.

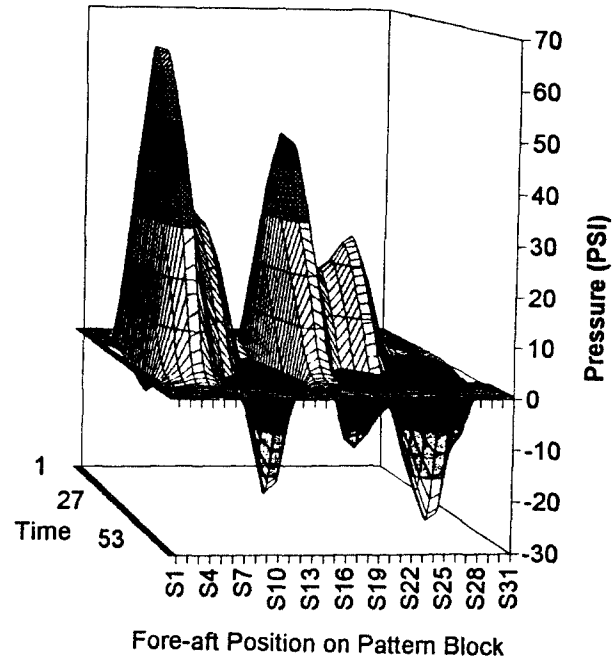


그림 9. 트레드 패턴이 있는 타이어의 패턴블럭내 위치에 따른 전후방향 전단응력의 시간적인 변화분포.

Fig. 9. Fore-aft stress distribution on pattern block of tread pattern tire.

Ⅶ. 결론

본 연구에서는 패턴블럭내 측정하고자 하는 점의 정확한 위치설정을 자동화 및 온라인화하므로써 편리하게 계측·제어할 수 있는 시스템을 설계하였다. 그리고 3축방향 압력과 2축방향 평면변위를 측정하는 60개 채널의 센서 신호를 A/D 변환하여 컴퓨터로 계측하는 시스템을 설계하였다. 또한 이러한 A/D 변환하여 계측된 데이터를 사용자의 요구에 따라 여러가지 형태로 표현할 수 있는 MS-Windows용 계측 소프트웨어를 개발하였다.

타이어에 인가되는 하중장치는 유도전동기를 이용하였고, 주행속도 제어장치는 공압장치를 사용하였으며, 슬립각은 유압장치에 의하여 구동하므로써 실제 차량이 주행하는 환경과 동일한 조건을 설정해주는 시험장치를 구현하였다. 또 컴퓨터에서 시험조건을 설정함에 따라 구동장치를 제어하기 위한 하드웨어를 설계하였으며 이러한 시험조건의 설정은 3축 압력과 2축 변위를 측정하는 작업과 통합환경내에서 수행하도록 MS-Windows 기반의 제어 소프트웨어를 개발하였다.

구현된 장치를 이용하여 트레드 패턴이 없는 타이어와 패턴이 있는 타이어에 적용한 결과 주행시 타이어의 접촉면에서 발생하는 3축방향 압력과 2축방향 평면변위를 계측하고 시간적인 변화와 공간적인 분포를 분석하였으며 타이어의 성능개선에 중요한 자료를 제공할 수 있었다.

사 사

본 연구가 이루어지도록 협조하여 주신 (주)금호기술연구소에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Samuel K. Clark, *Mechanics of Pneumatic Tires*, U.S. Department of Transportation NHTSA, U.S.Government Printing Office, 1982.

[2] Marion G. Pottiger and Thomas J. Yager, "The Tire Pavement Interface", *ASTM STP* 929, Bolti-more, MD, 1986.

[3] Howard Dugoff and B. J. Brown, "Measurement of Tire Shear Forces", *SAE Transactions*, paper 700092, pp. 316-324, 1970.

[4] J. T. Tielking, P. S. Fancher and R. E. Wild, "Mechanical Properties of Truck Tires", *SAE Transactions*, paper 730183, 1973.

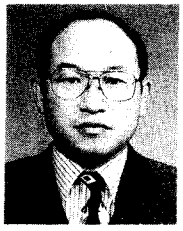
[5] S. A. Lippmann and K. L. Oblizajek, "The Distributions of Stress Between the Tread and the Road for Freely Rolling Tire", *SAE Transactions*, paper 740072, pp. 339-368, 1974.

[6] K. L. Oblizajek and S. A. Lippmann, "Predicting the Tread Wear of Nondriven Front Axle Tires from Laboratory Measurements", *SAE Transactions*, paper 740073, 1974.

[7] T. L. Ford and P. Yap, "Truck Tire/Pavement Interface", *SAE Transactions*, paper 905161, pp 333-340, 1990.

[8] Samuel K. Clark, Catalog ; Tire-Road Contact Pressure Sensors, Precision Measurement Co., 1990.

[9] 赤坂 隆, 長谷川 浩, "壓縮せん斷力によるタイヤトレッドゴムの壓力分布と浮き上がり現象", 日本ゴム協會誌, 第66卷, 第4號, pp34-39, 1993.

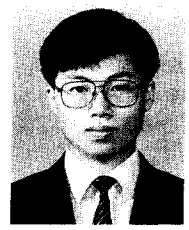


임 영 철

1975. 2. 전남대 전기공학과 졸업 (공학사). 1977. 2. 고려대 전기공학과 석사과정 졸업 (공학석사). 1990. 2. 고려대 전기공학과 박사과정 졸업 (공학박사). 현재 전남대학교 전기공학과 교수

조 규 종

1974. 2. 전남대 기계공학과 졸업 (공학사). 1976. 2. 한국과학기술원 (KAIST) 기계공학과 석사과정 졸업 (공학석사). 1987. 2. 전북대학교 대학원 기계공학과 박사과정 졸업 (공학박사). 1981. 8-1983. 8 University of Washington, Research Associate Professor. 현재 전남대학교 기계공학과 교수



류 영 재

1991. 2. 전남대 전기공학과 졸업 (공학사). 1993. 2. 전남대 전기공학과 석사과정 졸업 (공학석사). 현재 전남대 전기공학과 박사과정 재학 중.

김 남 전

1980. 2. 서울대 농공학과 졸업 (농학사). 1982. 2. 전북대 농공학과 석사과정 졸업 (농학석사). 1988. 2. 전북대 농공학과 박사과정 졸업 (농학박사). 현재 (주)금호기술연구소 전임연구원