

# 회전하는 타이어 내부공기의 유동특성에 관한 실험적 연구 - 무부하 회전구동 타이어 -

## An Experimental Study on the Characteristics of Air Flow Velocity Distributions Inside a Rolling Tire - Unloaded Rolling Tire -

김 윤 제\*, 조 정 현\*\*  
Younjea Kim, Junghyun Cho

### ABSTRACT

In order to elucidate the characteristic of velocity distribution of the cavity air, exploratory tests were conducted on an unloaded rolling radial tire operated at various speeds and inflation pressures. A hot-wire anemometer, rotating with the tire, was used to measure the flow velocity inside the tire cavity. Two different types of experiments were performed; one for the effects of rolling speed with constant inflation pressure, the other for the various cavity pressures with constant rolling speed. Experimental results are given as plots of the mean velocity distributions versus the distance from the rim. It is observed that the magnitude of mean velocity in the cavity air shows increasing natures with the increasing of the inflation pressures and rolling speeds.

주요기술용어 : Unloaded rolling tire(무부하 회전구동 타이어), Velocity distribution(속도 분포), Hot wire anemometer(열선 유속계), Velocity boundary layer(속도 경계층), Minute inertia force(미소 관성력)

### Nomenclature

$a$  : coefficient defined in equation (4)  
 $b$  : coefficient defined in equation (4)  
 $D$  : cross-sectional equivalent diameter of tire cavity  
 $n$  : coefficient defined in equation (4)

$P_{cal}$ : surrounding pressure at calibration  
 $P_r$  : actual pressure  
 $R$  : turning radius of tire  
 $Re$  : Reynolds number  
 $Re_\omega$ : rotational Reynolds number  
 $\bar{u}$  : mean velocity of contained air  
 $V$  : tire speed  
 $V_i$  : indicated velocity

\*정회원, 성균관대학교 기계공학부

\*\*정회원, 성균관대학교 대학원 기계공학과

$V_r$  : actual velocity

### Greek letters

$\omega$  : angular velocity of tire

$\nu$  : kinematic viscosity of air  
( $= 14.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )

## 1. 서 론

최근 자동차 수요의 증가와 항공기와 같은 수송수단의 발달로 인하여 많은 수의 타이어 및 그 구성품에 대한 지속적인 수요증대를 가져오고 있다. 또한 자동차 산업계에서는 자동차의 연비 향상을 위하여 타이어의 구동손실을 줄이는 데 많은 관심을 갖게 되었는데, 이는 자동차가 갖는 전체 소비에너지 중 약 6%이상이 타이어의 구동저항에 의하여 손실되기 때문이다. 특히 타이어는 수송수단으로 이용되는 승용차나 항공기가 지면과 최초로 회전 접촉하는 부분으로 지면으로부터의 모든 충격을 흡수하며 승차감 향상에 큰 영향을 미치는 부품이라고 할 수 있다.

회전하는 타이어 내부 공기는 지면과 접촉하는 부분과의 상대운동에 따라 일정한 내부 운동을 갖게 된다. 이러한 내부 공기 유속은 타이어 벽면으로부터 내부 또는 외부 공기와의 열전달률에 상당한 영향을 끼친다고 추정할 수 있다.(1),(2) 그리고 회전하는 타이어의 온도분포나 열전달률은 타이어 내·외부의 열적 경계조건에 크게 영향을 받지만 아직까지도 타이어 내·외부의 열전달계수에 관한 상세한 상관관계식은 정립되어 있지 않는 상태이다. 이러한 내부공기의 유동이나 열전달 특성을 이해한다는 것은 타이어의 구동저항 및 내부 공기의 온도상승에 의한 열적 특성을 파악하는데 매우 중요하다.(3)-(6) 지금까지 국내에서 수행된 대다수 연구는 트레드의 홈(groove)형상, 카카스(carcass) 등의 구조형상 및 재질, 그리고 정지된 타이어를 모델로 한 고유진동수 측정등에 중점적으로 연구를 수행해왔다. 하지만 선진국에서는 수송수단이 발달함에 따라

자동차 및 항공기에 장착하는 타이어의 내부 및 외부유동에 관한 많은 연구가 수치적, 실험적으로 수행되고 있다. 미국의 항공우주국에서는 항공기에 장착되고 있는 타이어의 재질 및 구조적인 측면뿐만 아니라 열전달 등의 특성 파악을 통한 마찰 및 구동저항 절감을 위한 실험도 있는 연구가 수행되었다.(7),(8) 특히, Taulbee 등(9)은 수치적으로 타이어 내부유동을 층류유동이라 가정하여 3차원적으로 해석하였으며, Rae는 자전거 타이어를 모델로 하여 타이어 내부 공기를 연동펌핑(peristaltic pumping) 유동으로 가정하여 실험적, 해석적으로 연구하였으며(2), 최근에는 Rayleigh 유동의 전제조건하에 내부유동 해석 결과를 발표한 바 있다.(10) 특히, Rayleigh 유동고찰에서 그는 주유동(primary flow)이 원심력과 Coriolis 가속력을 유발시켜 타이어 단면에 이차유동(secondary flow)을 생성시킨다는 연구결과를 발표하였다. 국내에서는 김병삼 등(11)이 하중을 받고 회전하는 승용차 타이어의 반경방향 고유진동수 변화를 실험적으로 측정하였으며, 또한, 본 연구자가 하중을 받고 회전하는 타이어 내부유동을 Poiseuille유동의 제한조건 아래 해석적인 연구결과를 발표하였다.(12)

하중을 받고 구동하는 타이어는 신축적인 재질의 비선형적인 특성에 기인하여 많은 변형을 받게 되기 때문에 타이어로부터의 열전달 현상을 직접적으로 측정한다는 것은 매우 어려운 일이다. 물론 기술적으로 효율적인 실험기법을 개발하여 측정할 수 있지만 매우 고난도의 작업을 수행해야만 한다. 따라서, 본 연구의 주된 목적은 향후 온도분포 및 타이어의 고무재료로부터 림(rim)으로 전달되는 에너지에 의한 열전달 메카니즘을 파악하기 위한 기초자료를 구하기 위하여 하중을 받지 않으며 회전구동하는 타이어내부의 기본적인 유동양상을 실험적으로 규명하는데 있다.

본 연구에서 이용한 실험장치 및 실험방법은 2장에 설명하였고, 무부하 상태로 회전구동하는 타이어 내부의 평균유속 측정에 대한 실험결과에

대해서는 3장에서 고찰하였다. 그리고 결론 및 향후 연구과제에 대하여 마지막 장에 기술하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 무부하 상태에서 회전하는 실험장치를 제작하였다. 내진동 강성을 확보하기 위하여 전체 지지구조는 C-자 형강을 이용하여 제작하였다. 림(rim)의 중앙부분에서 프로브 지지대(probe support)를 삽입하기 위하여 모터에 연결되는 축은 림의 허브 체결부에 직접 연결하였고, 그 반대쪽 슬립링(slip ring)과 연결되는 축은 Fig. 1에서와 같이 Y-형 스포크(spoke)를 제작하여 림 주위에 직접 연결하였다. 그리고, 슬립링과 연결되는 축은 신호선이 통과할 수 있도록 중공축(hollow axis)으로 제작하였다.

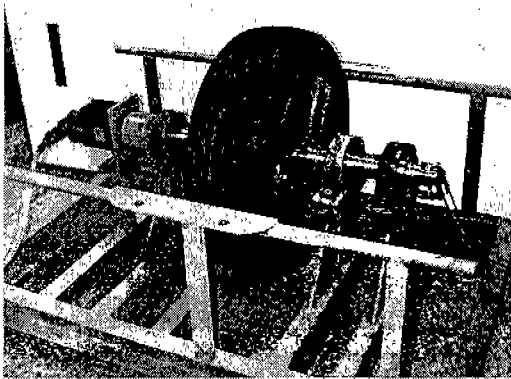


Fig. 1 Experimental apparatus of a rolling tire

동력원으로는 정밀한 회전속도 제어를 위하여 AC 서보모터(DAEWOO, 500W) 및 서보 드라이버(DAEWOO, DASD-C08SPC)를 사용하였고, 모터와 축의 연결부분에는 가공 및 조립공차의 영향을 최소화하기 위하여 체인 커플링(chain coupling)을 사용하였다. 본 실험에서 장착한 타

이어는 국내 K사의 P195/60R14 tubeless 타이어를 사용하였다.

타이어 내부의 공기가 갖는 평균속도를 측정하기 위하여 열선유속계(hot wire anemometer)를 사용하였다. 실험에 사용한 single-normal(SN 또는 I-type) 프로브(TSI, 1210-T1.5)의 열선직경은  $3.8\mu\text{m}$ 이고 직경에 대한 중횡비는 330이다. 타이어 내부공기의 누설을 방지하기 위하여 Fig. 2와 같이 제작된 콘넥터를 림에 부착하고, 이것을 관통하여 프로브 지지대를 타이어 내부로 삽입시켰다. 너트를 조이면 실링콘(sealing corn)이 프로브 지지대를 압착하여 공기의 누설을 방지하는 구조로 되어있다.

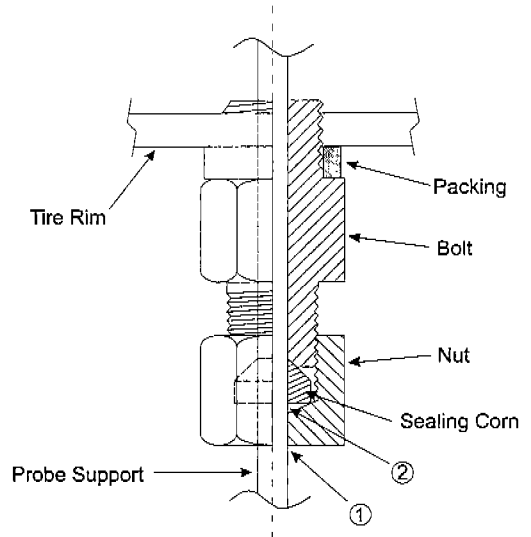


Fig. 2 Configuration of a male connector

Fig. 3은 전체 측정시스템의 개략도를 나타내고 있다. 프로브에서 나온 신호는 슬립링 어셈블리를 통하여 정온유속계(constant temperature anemometry, TSI, IFA-300)를 거쳐 PC에서 TermalPro(TSI, Ver. 2.01)를 이용하여 연산처리하였다. 또한, 잡음(noise)에 의한 오차를 최소화 하기 위하여 오실로스코프(LeCroy, 9314M)를 이용한 이중계측을 수행하였으며, 디지털 필터 방식으로 프로그램상에서 저역 통과 여과기

(low-pass filter)를 거친 후 A/D변환기를 통하여 컴퓨터로 전송시킨 후 실시간(real time) 처리하여 잡음제거에 정확성을 기하였다.

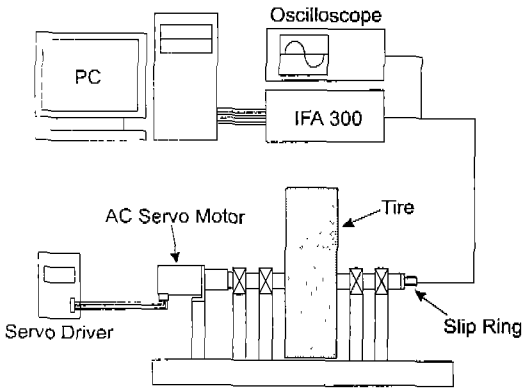


Fig. 3 Schematic diagram of measuring and data acquisition system

## 2.2. 실험방법

타이어 내부 유속측정에 앞서서 열선 프로브의 보정(calibration)과 내부 공기의 누설시험(leaking test)이 선행되었다.

프로브의 보정은 0~20m/s의 속도범위에서 공기유속 보정기(air velocity calibrator, TSI, Model 1128C)를 이용하여 실시하였다.(13) 하지만, 프로브를 장착하게 될 타이어 내부압력이 보정할 때의 대기압 보다 높을 경우 압력차에 따른 측정속도의 오차가 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 TSI사에서 주어진 다음 식을 이용하여 열선 프로브의 보정값을 확보하였다.

$$V_r = V_i \times \frac{P_{cal}}{P_r} \quad (1)$$

위 식에서  $V_i$ 는 속도지시기의 값(indicated velocity)을 나타내며,  $V_r$ 과  $P_r$ 은 각각 실제 속도와 압력을, 그리고  $P_{cal}$ 은 보정시의 대기압을 나타낸다.

누설시험은 비누거품과 압력계를 이용하여 실시하였다. 일차 비누거품에 의한 시험 시 너트와

프로브 지지대가 관통하는 부분(Fig. 2의 ①)에서 경미한 누설이 발생하였으나, 너트와 실링콘 사이의 지지대에(Fig. 2의 ②) 테프론 테이프를 이용하여 누설을 방지할 수 있었다. 압력계상에서도 내부압력이 35psi에서 1시간 이상 감소하지 않음을 확인하였다.

하중을 받지 않으며 회전하는 타이어 내부의 유동특성을 측정하기 위하여 실험은 크게 두 가지로 구분하여 수행하였다.

먼저 타이어의 회전속도가 일정하다는 조건하에 타이어 내부의 공기압을 변화시키면서 내부 평균유속을 측정하였으며 이때의 공기압은 25, 30, 35psi(1.8~2.4kgf/cm<sup>2</sup>)의 값을 선택하였다.

또 다른 실험은 주행속도의 변화가 타이어의 내부 유동속도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 일정한 공기압(35psi)을 가질 때 주행속도를 20, 50, 70, 100, 120km/h(5.6~33.4m/s)로 증가시키면서 평균유속을 측정하였다. 림의 크기나 형상, 타이어 규격 등이 다른 경우에는 다음 식 (2)와 같이 정의된 회전 Reynolds 수를 이용하여 타이어의 운전조건을 무차원화 시킬 수 있다.

$$Re_w = \frac{\omega R D}{\nu} \quad (2)$$

여기서,  $\omega$ 는 타이어의 각속도(rad/s),  $R$ 은 타이어의 회전반경(바퀴 반지름),  $D$ 는 타이어 단면의 동가직경(equivalent diameter),  $\nu$ 는 공기의 동점성계수(kinematic viscosity)이다. 위 식 (2)로부터 주행속도가 20~120km/h인 경우의 회전 Reynolds 수는  $0.456 \times 10^5 \sim 2.74 \times 10^5$ 사이의 값을 갖는다. 단, 식(2)의 회전 Reynolds 수는 타이어의 크기, 형상, 회전속도 등에 관한 무차원수로, 타이어 내부의 유동특성을 직접적으로 나타내지는 않는다.

두 가지 실험 모두 내부 유동이 완전히 발달한 이후 2초간의 평균유속을 측정하였다. 유동의 완전발달 여부를 판정하기 위하여 5초 간격으로 3회 이상 반복 측정한 결과를 상호 비교하였다. 여기서 유속이란, 열선이 타이어와 동일한 속도로

회전하고 있으므로 열선과 내부공기와의 상대속도를 의미하며 특정한 방향으로의 속도성분이 아닌 전체 속도 벡터의 크기를 나타낸다.

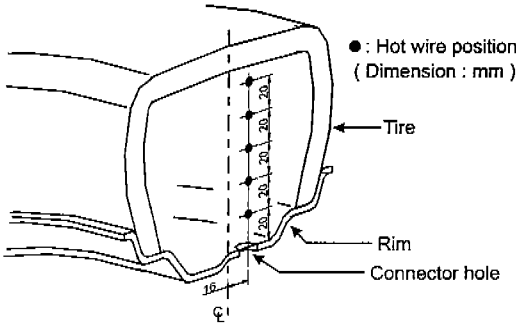


Fig. 4 Measuring points and hot wire positions

Fig. 4는 측정점과 열선의 위치를 도시하고 있다. 림의 형상에 의한 제약 때문에 열선은 타이어 단면의 중심선에서 16mm 편심된 선을 따라 삽입되었다. 열선의 방향은 타이어 회전축과 평행한 방향이 되도록 장착하였고, 공기속도의 측정점은 림으로부터 트레드까지 20mm 간격으로 5점을 선택하였다. 이는 타이어 내부의 측면보다는 지면과 접촉하는 부분으로부터 림으로 전달되는 열전달 특성을 고찰할 때 필요한 기초자료를 얻기 위해서이다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1. 공기압 변화에 따른 속도분포

Fig. 5에서 Fig. 7까지는 주행속도가 일정한 경우 타이어 내부압력의 변화가 유동속도에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 점선은 압력 변화에 의한 속도의 변화를 알아보기 쉽도록 하기 위하여 선형회귀법(linear regression method)을 이용한 주어진 압력에서의 속도를 표시한 것이다. 타이어 내부 유동의 Reynolds 수는 다음 식 (3)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$Re = \frac{\bar{u} D}{\nu} \quad (3)$$

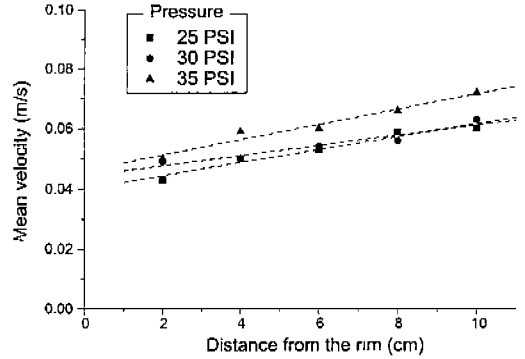


Fig. 5 Effects of inflation pressure on the mean velocity distribution at rolling speed of 20km/h (5.6m/s)

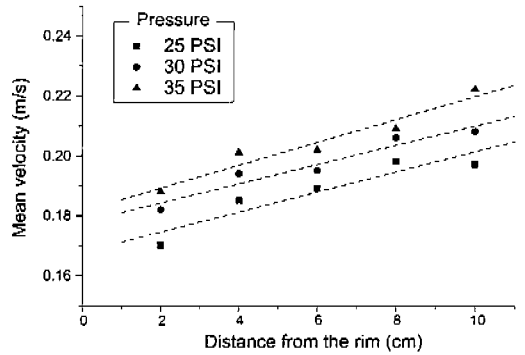


Fig. 6 Effects of inflation pressure on the mean velocity distribution at rolling speed of 70km/h (19.5m/s)

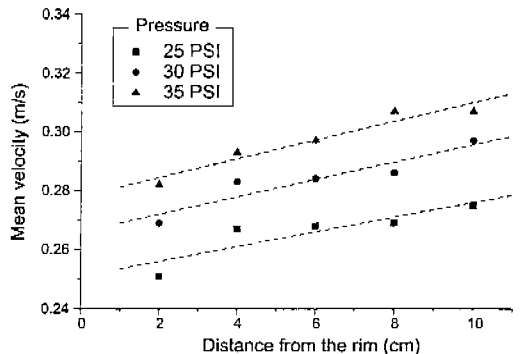


Fig. 7 Effects of inflation pressure on the mean velocity distribution at rolling speed of 120km/h (33.4m/s)

여기서,  $\bar{u}$ 는 평균유속이다. 본 연구결과로부터

타이어 내부 유동의 Reynolds 수는 350~2500 사이의 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 원형관 내부의 유동에서 임계 Reynolds 수가 약 2300이므로 타이어 내부유동은 층류유동이라고 가정할 수 있다.(14)

Fig. 5는 타이어 주행속도가 20km/h (5.6m/s)인 경우 내부 압력 변화에 따른 위치별 평균유속을 나타내고 있다. 내부압력이 증가함에 따라서 평균유속이 증가함을 보여주고 있다. 이는 타이어 내부공기의 밀도상승에 따른 압축성 효과에 의해서 분자 점성력 및 미소 관성력의 증가에 기인하는 것으로 여겨진다. 또한, 림으로부터 거리가 멀어질 수록 원심력의 증가로 인하여 유속은 증가하는 경향을 보이고 있다. 다만, 림에서 6cm 떨어진 지점에서는 속도가 다소 감소하거나 증가율이 감소하는 것을 볼 수 있다.

무부하 상태로 회전하는 타이어의 내부유동은 주로 점성력에 의해 유발된다고 할 수 있다. 타이어와 림의 면과 인접해 있는 공기의 경우 점성 경계층의 영향을 주로 받는데 반하여 중심영역(core region)으로 들어올수록 경계층의 영향보다는 상대적으로 크기가 작은 분자간의 상호 작용에 의해 유동이 생성된다고 추정할 수 있다. 따라서, 림에서 6cm 떨어진 타이어 단면의 중심영역은 벽면에 의한 경계층의 영향을 제일 적게 받는 지점이므로 속도가 감소하거나 증가량이 감소하는 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 6은 타이어의 주행속도가 70km/h (19.5m/s)인 경우 내부 압력 변화에 따른 위치별 평균유속을 도시하고 있다. 이 경우에 있어서도 Fig. 5의 경우에서와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나, Fig. 5와 Fig. 6을 비교하였을 경우 타이어 주행속도가 증가할수록 압력변화에 의한 평균유속의 변화율(점선들 사이의 간격)이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 주행속도가 120km/h(33.4m/s)인 Fig. 7과 비교하였을 경우 더욱 확실히 볼 수 있는데, 이는 타이어 내부 공기 입자들의 관성력이 공기 유동에 주요하게 작용하고 있음을 보여주고 있는 것이다.

이상과 같은 결과는 Schuring 등(1)의 실험결과와 상반되는 결과이다. Schuring 등은 타이어가 무부하 회전하는 경우, 가속단계(spin-up)에서는 타이어와 내부공기 사이에 상대속도가 존재하지만, 유동이 완전히 발달하게되면 내부공기가 타이어와 동일한 속도로 강체운동을 하기 때문에 상대속도가 전혀 존재하지 않는다는 결과를 발표하였다. 하지만, 위의 결과와 같이 타이어 내부공기와 타이어 사이에서는 작은 양의 상대속도가 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 차이는 Schuring 등이 당시 실험에서 사용하였던 열선 유속계의 감도(sensitivity) 문제에 의해서 생긴 것이라 사료된다.

또한, Schuring 등은 부하가 있는 회전타이어에 대한 실험에서 타이어 내부압력을 단지 타이어의 변형정도를 규정하는 인자로만 평가하였다. 즉, 내부압력이 낮으면 타이어의 변형이 커지게 되고 연동 펌핑작용이 크게 일어나므로 내부속도가 증가한다고 결론을 내렸다. 내부압력이 높은 경우에는 동일한 원리에 의해 내부속도는 감소한다. 하지만 위의 결과로부터 내부압력, 타이어의 변형과는 상관없이, 타이어 내부의 유동속도에 중요하게 작용하는 인자임을 알 수 있다.

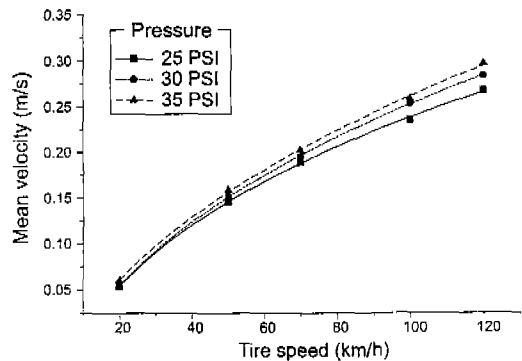


Fig. 8 Mean velocity as a function of tire speed (probe position : 6cm from the rim)

Fig. 8에 림으로부터 6cm 떨어진 지점에서의 각 압력에 대한 평균속도를 타이어 주행속도의 함수로 도시하였다. Schuring 등은 내부 유속과

타이어 주행속도와의 관계를 단순히 1차 함수로 가정하였다. 하지만, 본 연구에서는 Fig. 8에 나타난 결과로부터 무부하 회전구동 타이어의 내부 유속과 타이어 주행속도와의 관계를 식 (4)와 같은 지수함수 형태로 가정하였다.

$$\bar{u} = a V^n + b \quad (4)$$

위 식에서,  $\bar{u}$  는 타이어 내부의 평균유속,  $V$  는 타이어 주행속도이다. 또한, 식 (4)의 계수  $a$ ,  $b$ ,  $n$  은 측정점의 위치와 내부 압력의 함수로 생각할 수 있다.

Fig. 8에 도시된 결과에 대한 계수  $a$ ,  $b$ ,  $n$  값들을 곡선 적합법(curve fitting)으로 계산하여 Table 1에 나타내었다. 아울러, 이 계수들을 식 (4)에 대입한 결과를 Fig. 8에 선으로 도시하였다. 하지만, 본 연구에서 측정한 값들만으로는 내부 유속과 측정점의 위치 및 내부 압력간의 함수 관계를 규명하기는 어려웠다. 이 계수들의 정확한 함수관계를 규명하기 위해서는 향후 다양한 경우들에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

Table 1 Coefficients of equation (4) in case of the 6cm probe position

Pressure	$a$	$n$	$b$
25 psi	0.08841	0.34561	-0.19585
30 psi	0.06242	0.40944	-0.15873
35 psi	0.04644	0.45908	-0.12322

### 3.2. 주행속도 변화에 따른 속도분포

타이어 내부압력이 일정한 경우 주행속도 변화가 내부유동 속도에 미치는 영향은 Fig. 9에 나타내었다. 내부압력은 25psi이고, 마찬가지로 점선은 선형회귀법에 의한 결과를 나타내고 있다.

공기압 변화 실험 결과로부터 유추할 수 있듯이, 이 경우에도 마찬가지로 공기압이 높아질수록, 그리고 주행속도가 증가할수록 타이어 내부의 평균유속은 증가하는 경향을 나타내었다. 그

러나, 공기압 변화 실험에서 타이어 주행속도가 증가할수록 압력변화에 의한 평균유속의 변화율이 증가하는 것을 볼 수 있었던 것과는 다르게 주행속도 변화에 따른 유속변화율이 압력의 변화에 대하여 거의 일정함을 볼 수 있다.

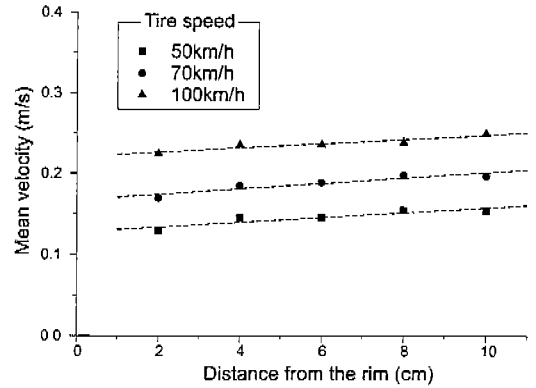


Fig. 9 Effects of tire speed on the mean velocity distribution for the case of inflation pressure 25psi (1.8kgf/cm<sup>2</sup>)

## 4. 결론

본 연구에서는 하중을 받지 않는 상태에서 회전하는 타이어의 내부 공기압력과 주행속도 변화에 따른 내부공기의 유속분포를 실험적으로 고찰하였다. 실험결과로부터 타이어 내부의 유동은 일차적으로 점성력에 의하여 유발되며 전체적인 유동형태를 지배하는 것을 알 수 있다. 하지만 공기입자들의 미소 관성력도 유동특성에 중요한 인자로 작용하고 있다는 결론을 내릴 수 있었다. 또한, 타이어 내부 공기가 갖는 평균유속은 공기압과 회전구동 속도가 증가할수록 그리고 림으로부터 트레드 쪽으로 갈수록 증가하는 경향을 나타내었다. 하지만 이러한 인자들이 부하가 있는 실제 구동 타이어에서는 어떠한 영향을 나타내지는 아직 단언할 수 없다. 또한, 부하가 있는 경우는 마찰에 의한 온도상승의 영향으로 인하여 각 인자들 간의 상호 관계가 더욱 복잡하게 나타나리라 예상된다. 더욱이, 림과 타이어 내측면의 형상

이 제작회사에 따라 차이가 있는 것도 일반화된 내부 유동의 경향을 유추하는데 어려움을 줄 것으로 예상된다.

따라서, 본 연구의 결과는 향후 실제 타이어와 동일한 부하상태에서 구동하는 타이어의 변형, 즉 연동 펌핑운동에 의하여 유발되는 유동 및 내부 온도장 측정 등을 통하여 열전달 특성을 규명하는 연구로 이어질 예정이다. 또한, 구동 드럼의 표면에 돌출부를 부착한 돌기(cleat) 승월 시험기를 이용하여 내부유동 특성을 고찰하는 것도 의미 있는 과제라 사료된다.

## 후 기

본 연구는 1997년도 한국학술진흥재단의 공모 과제(과제번호 1997 - 003 - E00015) 연구비에 의하여 연구되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Schuring, D. J., Skinner, G. T. and Rae, W. J., "Contained air flow in a radial tire", SAE Trans., Vol. 90, pp. 705~712, 1982.
2. Rae, W. J., "Flow inside a pneumatic tire: A peristaltic- pumping analysis for the thin-tire limit at very low forward speed", J. of Applied Mechanics, Vol. 105, pp. 255~258, 1983.
3. Lin, J. Y. and Tarbell, J. M., "An experimental and numerical study of periodic flow in a curved tube", J. Fluid Mech., Vol. 100, pp. 623~638, 1980.
4. Mullin, T. and Greated, C. A., "Oscillatory flow in curved pipes. Part I. The developing-flow case", J. Fluid Mech., Vol. 98, pp. 383~395, 1980.
5. Stewartson, K., Cebeci, T. and Chang, K.

- C., "A boundary-layer collision in a curved duct", Q. J. Mech. Appl. Math., Vol. 33, pp. 59~75, 1980.
6. Talbot, L. and Wong, S. J., "A note on boundary-layer collision in a curved pipe", J. Fluid Mech., Vol. 122, pp. 505~510, 1982.
7. Wild, R., Pedley, T. J. and Riley, D. S., "Viscous flow in collapsible tubes of slowly varying elliptical cross section", J. Fluid Mech., Vol. 81, pp. 273~294, 1977.
8. Yao, L. S. and Berger, S. A., "Entry flow in a curved pipe", J. Fluid Mech., Vol. 67, pp. 177~196, 1975.
9. Taulbee, D. B., Wey, M. J. and Rae, W. J., "Calculation of flow inside a loaded rotating tire", the 37th Annual Meeting, American Physical Society, Division of Fluid Dynamics, Providence, RI., 1984.
10. Rae, W. J. and Ollila, C. J., "The rayleigh problem for the interior of a torus", J. of Fluids Engineering, Vol. 115, pp. 603~607, 1993.
11. 김병삼, 홍동표, 지창현, "하중을 받고 회전하는 승용차 타이어의 반경방향 고유진동수 측정에 관한 실험적 연구", 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제1호, pp. 1~13, 1996.
12. Kim, Y. J., "Analytic solutions of flowfields inside a rolling deformed torus", KSME Int. J., Vol. 11, No. 1, pp. 67~76, 1997.
13. TSI Incorporated, Model 1127/1128 Air Velocity Calibrator-Instruction Manual, 1997.
14. White, F. M., Fluid Mechanics, 3rd Edition, McGRAW-HILL, pp.299, 1994.