

# 타이어 시뮬레이터를 이용한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템 개발

이규철 류관희 이종용 홍지향 김혁주 유지훈

## Development of an Active Tire Pressure Control System Using a Tire Simulator

K, C. Lee K, H. Ryu J, Y. Rhee J, H. Hong H, J. Kim J, H. Yu

### Abstract

This study was performed to develop an active tire pressure control system that can adjust tire pressure to the optimum level according to traveling and working condition of agricultural tractor. For the development of active tire pressure control system, pneumatic supplier, solenoid valve block including pneumatic supply line, infinite rotation type pneumatic supplier with rotary joint unit, tire pressure transceiver module and control algorithm were developed. Also, tire simulator was developed. Using this tire simulator, the feasibility of each part constructing actual system was tested by checking the performance.

The average communication success ratio was 98.3% between tire pressure transmitter and receiver module according to the various tire rotational speed and data receipt position of receiver module. The communication performance of the developed transmitter and receiver module was very stable in any condition. The tire pressure control system was accomplished by using the proportional control algorithm in this study. Also tire pressure control performance of developed control system was analyzed by using the tire simulator. As a result of control performance analysis to the developed system, the developed control system took 307 seconds to inflate agricultural tractor's tire from 50 kPa to 180 kPa. In opposite case, it took 210 seconds. Also it was able to control the tire pressure accurately under  $\pm 0.9\%$  (FS) in any condition.

**Keywords :** Active tire pressure control, Radio frequency, Tire simulator

## 1. 서론

농용 트랙터의 주행장치에 범용으로 사용되는 공기 주입형 타이어는 포장의 노면진동을 완충시키고 작업에 필요한 견인력과 제동력을 제공하며 조향 시 차량의 안정성을 유지하는 역할을 수행한다. 한편, 농용 트랙터의 타이어 공기압은 차량의 제반 성능 변화에 주요한 영향을 미치는 한 요인으로서 타이어의 공기압이 적정 공기압보다 높을 경우 차량의 조종 안정성이 향상되며 회전저항이 감소하고 연비가 증가하는 반면 승차감이 감소할 뿐 아니라 현가장치의 수명도 감소시키는 등의 영향을 미친다. 이와 반대의 경우는 앞서 언급한 것

과 정 반대의 성능 변화를 야기할 수 있다.(Ryu et al., 2004)

따라서 공기 주입형 타이어를 장착한 농용 트랙터가 원활한 성능을 발휘하기 위해서는 차량의 제반 성능에 영향을 미치는 타이어 공기압을 차량의 주행 상태 및 환경에 따라 적절한 상태를 유지시킬 수 있는 방안이 필요하나 아직까지는 이런 문제점을 해결 할 수 있는 방법이 마련되지 못한 실정이다. 실제로 Lee(2001)는 적정 타이어 공기압에 관한 농민들의 인식조사 결과, 대부분의 농민들이 공기압에 대하여 무관심하여 정기적으로 공기압을 조정하는 경우는 거의 없었으며, 또한 작업 중인 트랙터의 공기압은 적정치보다 높게 사용하였고, 좌·우 타이어 공기압의 차이는 대부분 10% 이상이

The article was submitted for publication on 2009-08-24, reviewed on 2009-12-10, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2010-01-26. The authors are Kyu Cheol Lee, KSAM member, Chief of R&D Center of Seetron, Kwan Hee Ryu, KSAM member, Professor, Joong Yong Rhee, KSAM member, Professor, Ji Hyang Hong, KSAM member, Researcher, Seoul National University, Hyeok Joo Kim, KSAM member, Researcher, National Academy of Agricultural Science, and Ji Hoon Yu, KSAM member, Senior Researcher, Seoul National University. Corresponding author: J. H. Yu, KSAM member, Senior Researcher, Seoul National University RIALS, 151-921, Seoul, Korea; Fax: +82-02-873-2049; E-mail: <aem8493@snu.ac.kr>.

었다고 보고하였다.

한편, 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로서 타이어의 공기압을 자동적으로 제어할 수 있는 시스템과 관련된 기술들이 제안되었으나 북미 지역 및 유럽에서 일부 상용차량 및 비포장 노면의 주행이 많은 차량을 대상으로 부분적으로 적용되고 있으며, 국내에서는 관련기술에 관한 연구가 거의 수행되지 못하고 있는 실정이다. 실례로 타이어 공기압을 자동적으로 조절할 수 있는 시스템과 관련되어 앞서 수행된 연구들은 승용과 상용 차량 및 군용 차량들과 같은 공기 주입형 타이어를 주행 장치로 채택한 차량들의 제반 성능을 개선하기 위한 선행기술의 개발 목적으로 최근 수행된 것으로 분석되었다. Kaczmarek(1984)은 모든 바퀴 구동형 차량의 기동성을 개선하기 위하여 사용할 수 있는 시스템 중에 타이어 공기압 제어 시스템이 가장 효율적이라고 제안하였다. Adams 등(2004)은 농업용 트랙터의 타이어 공기압 제어 시스템의 장착에 따른 성능개선 효과를 검증 실험 결과, 평균적으로 99%의 승차감 개선 효과가 있다고 보고하였다.

본 연구에서는 농업 트랙터의 주행상태 및 작업환경에 따라 타이어 공기압을 능동적으로 조절하여 차량의 성능을 제고할 수 있는 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 개발하기 위한 목적으로 공기압 발생장치, 공압 유로를 포함한 솔레노이드 밸브 블록 및 무한회전형 공기압 공급 장치, 타이어 공기압 측정 및 송·수신 장치 등의 제어 시스템의 각 구성부품과 공기압 자동 제어 알고리즘을 개발하였다. 주행하는 차량에 각종 장치를 장착하고 다양한 시험을 수행하면서 복잡한 운전 조건에 대응이 가능하도록 제어 알고리즘을 포함한 능동형 타이어 공기압 제어시스템의 설계를 완성하는 과정을 시뮬레이션하기 위하여 본 연구에서는 타이어 시뮬레이터를 개발하고 이를 이용하여 농업 트랙터 타이어를 임의의 회전속도로 회전시키면서 제어 시스템의 개별 구성품의 성능 및 작동 상태를 확인하여 실제 제어 시스템에 적용 적합성을 확인하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 타이어 공기압 측정 및 무선 송·수신 장치 설계 및 제작

#### 1) 공기압 측정 및 무선 송신 장치

타이어 공기압을 측정하고 측정 데이터를 송신하기 위한 장치는 타이어 압력, 온도 및 회전속도를 통합 측정할 수 있는 마이크로컨트롤러 내장형 센서소자와 구동 축전지, 변조기 및 송신 안테나로 구성하였다. 센서소자는 Infineon사의 SP30(T) 제품으로 센서 소자 내부에는 반도체 소자를 이용한 피에조 저항 방식의 소자를 휘스톤브리지 회로가 단일 칩 형태로 구성되어 있다. 마이크로컨트롤러는 센서 소자에 내

장되어 있으며 RISC(reduced instructions set computer) 형태의 8비트 마이크로컨트롤러를 사용하였다. CPU는 필립스사의 2세대 저전력 8비트 마이크로컴퓨터로 MRK2 Core를 기반으로 설계되어 있다. 또한 변조기는 주파수 변조방식(FSK) 방식을 사용하여 구성하였으며, 전압제어 발진기(voltage controlled oscillator, VCO)와 위상동기루프(phase locked loop, PLL)이 자체 내장된 Melexis사의 RFIC를 사용하였다.

#### 2) 공기압 무선 수신 장치

공기압 무선 수신 장치는 수신안테나, 저잡음 증폭기, 대역통과 필터, 복조기로 구성된 무선 수신부와 마이크로 컨트롤러 및 입출력 장치로 구성된 데이터 처리부로 나누어 구성하였다. 수신안테나는 송신장치와 마찬가지로 헬리컬 방식의 안테나를 사용하였으며, 저잡음 증폭기를 이용하여 수신된 신호는 15~20 dB 정도 증폭할 수 있도록 설계, 제작하였다. 또한 반송파에 혼재된 잡음 성분은 30~2,500 MHz 대역에서 주로 사용하는 압전현상을 이용한 SAW 필터 소자를 이용하여 제거할 수 있도록 하였다. 그리고 복조기는 송신장치와 마찬가지로 Melexis사의 RFIC를 사용하여 구성하였다.

데이터 처리부를 구성하고 있는 마이크로컨트롤러는 CISC(complex instructions set computer)방식의 8비트 마이크로컴퓨터인 Freescale사의 MC68HC908을 사용하였으며, 128×64 도트 그래픽 액정표시장치 드라이버가 자체 내장되어 공기압 등의 디지털 데이터를 화면에 출력할 수 있으며, 주변기와 통신 포트로 활용할 수 있는 SPI(serial peripheral interface) 등을 내장하도록 설계, 제작하였다. 그림 1은 개발한 공기압 측정 및 무선 송수신 장치의 블록다이어그램이다.

### 나. 타이어 공기압 제어장치 설계 및 제작

#### 1) 공기압 발생장치

타이어 공기압을 제어하기 위해서는 타이어의 현재 압력과 설정 압력을 비교하여 공압회로의 솔레노이드 밸브를 열어 대기 중으로 타이어 내부의 공기를 배출하거나 외부에서 압력을 인가해 주는 작업을 수행하여야 한다. 타이어에 압력을 인가하기 위하여 설정 압력보다 높은 압력을 발생시킬 수 있는 장치로 본 연구에서는 피스톤의 왕복운동과 밸브의 개폐에 따라 외부공기를 흡입하여 압축 후 배출하는 기능을 갖는 왕복 피스톤식 공기 압축기를 적용하였다.

공기 주입 타이어의 설정 압력 도달 시간 및 소요 공기량을 계산하기 위하여 공기 압축기의 흡입 공기량을 선정하였다. 대기온도에서 타이어의 압력을 제어하고자 할 때, 대기압(1 atm, 101 kPa)에서 필요한 공기의 양을  $V_0$ 로 소요시간을  $T$ 라고 하고 압축기의 효율을  $\eta$ 라고 하면 압축기의 흡입 공

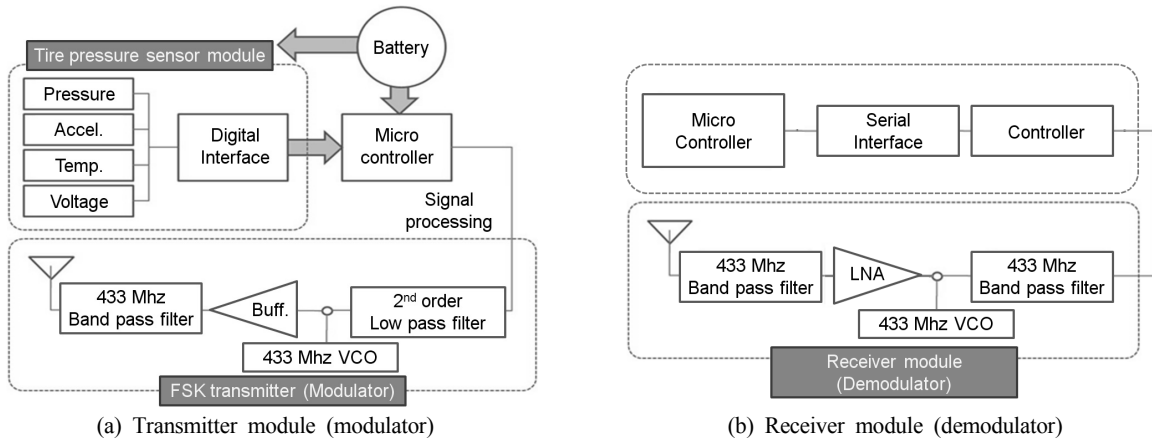


Fig. 1 Blok diagram of transmitter and receiver module for an active tire pressure control system.

기량  $DISP_{comp}$ 는 식 (1)로 계산할 수 있다.

$$DISP_{comp} = \frac{1}{\eta} \times \frac{V_a}{T} \quad (1)$$

식 (1)의 필요공기량  $V_a$ 는 이상기체 상태방정식을 이용하여 계산하였으며, 타이어의 최소 공기압이 50 kPa에서 210 kPa로 상승하는데 소요되는 시간을 5분, 효율을 90%로 가정하여 공기 공급량이 105 L/min인 공기 압축기를 선정하였다. 농용 트랙터에 적용이 가능하도록 설치 공간과 차량의 축 전지(12 VDC)를 구동 전원으로 사용할 수 있는 구조를 고려하여 표 1과 같은 공기압축기(ACD-105, Pneumatic korea, Korea)를 적용하였다.

Table 1 Specification of air compressor

Item	Description
Flow rate	105 L/min
Operating voltage	12 VDC
Pressure for stop operating	1034 kPa
Pressure for start operating	345 kPa

2) 타이어 공기압 제어를 위한 공압용 밸브 블록 어셈블리

타이어 공기압을 제어하기 위하여 공기 주입 및 배출 기능을 담당하는 공압용 솔레노이드 밸브와 밸브 블록을 이용하여 유로를 설계하였다. 선정된 공압용 파일럿식 솔레노이드 밸브(TMV-150, Seetron, Korea)는 12 VDC 전원을 공급하면 솔레노이드가 전자석이 되어 파일럿부에 있는 원통형 막대를 당겨서 공기 흐름을 바꾸고 이것이 다시 메인 스템을 동작시켜 공기 흐름을 단속하는 원리로 작동한다. 각각의 밸브는 동시에 작동하지 않으며, 공기 주입용 밸브가 작동하면 공기압축기에서 생성된 공기가 타이어로 주입되고, 공기 배출용 밸브가 작동하면 타이어 내부의 공기가 대기 중으로 배

출되게 유로를 설계하였다. 유로에 선정된 공압용 솔레노이드 밸브의 제원은 표 2와 같으며, 제작한 밸브 블록은 그림 2와 같다.

Table 2 Specification of solenoid valve

Item	Description
Maximum ratings	12 VDC ±10%
Fluid	Compressed air
Operating pressure	1700 kPa
Endurance pressure	2400 kPa
Peripheral temp	-10 ~ 60°C
Orifice	∅7
Temperature rising	Below 90°C

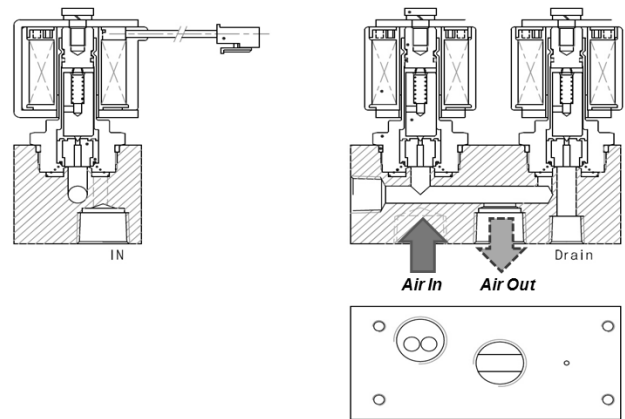


Fig. 2 Pneumatic valve assembly for tire pressure control.

한편, 타이어 공기압을 제어하기 위한 밸브 어셈블리의 제어기는 TTL 신호를 이용하여 공기압축기와 공압 솔레노이드 밸브를 작동하는 전원을 제어하는 릴레이 구동 회로를 기본으로 개발하였다. 또한 개발한 릴레이 구동 회로는 제어기의 TTL 신호로 달링턴 트랜지스터의 동작을 제어함으로써 릴레

이를 작동시켜 릴레이 출력단에 접속되어 있는 솔레노이드 밸브에 전원을 인가 또는 차단할 수 있는 구조로 회로를 개발하였다. 그림 3은 공압 솔레노이드 밸브 블록과 제어기로 이루어진 밸브 어셈블리의 실제 모습이다.

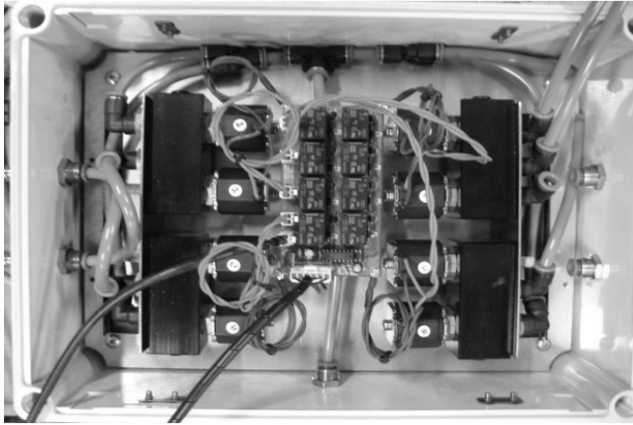


Fig. 3 Pneumatic valve block assembly for an active tire pressure control system.

### 3) 무한회전형 공기압 공급장치

능동형 타이어 공기압 제어 시스템에서 농용 트랙터의 타이어가 회전하는 동안 공기압을 원활히 공급, 배출함으로써 공기압을 제어하기 위한 무한 회전형 공기압 공급장치는 로터리 조인트를 이용하여 구성하였다. 로터리 조인트는 회전하는 부품과 고정된 배관라인을 연결하는 유공압 부품으로, 표 3은 무한회전형 공기압 공급장치에 장착되어 있는 로터리 조인트의 제원이다.

Table 3 Specification of rotary joint

Item	Description
Fluid	Air, oil
Max. pressure	1,500 kPa
Temperature	80℃
Max. speed	1,500 rpm

타이어 휠에 로터리 조인트를 장착하여 공기압측기에서 압축된 공기가 로터리 조인트를 통하여 회전하는 타이어로 공급되거나 타이어 내부의 공기가 유로를 통하여 대기 중으로 배출되도록 무한회전형 공기압 공급장치를 제작하였다. 제작한 공급장치는 이동하거나 작업 중에 외부의 이물질에 의한 파손을 방지하기 위하여 가능한 한 바퀴 외부로 돌출되지 않도록 구성하였으며, 타이어 및 솔레노이드 밸브 블록과 연결할 수 있도록 공기 입·출력 포트를 설치하였다. 또한 그림 4와 같이 로터리 조인트를 타이어 휠에 고정하기 위하여 별도의 고정 장치를 제작하였다.

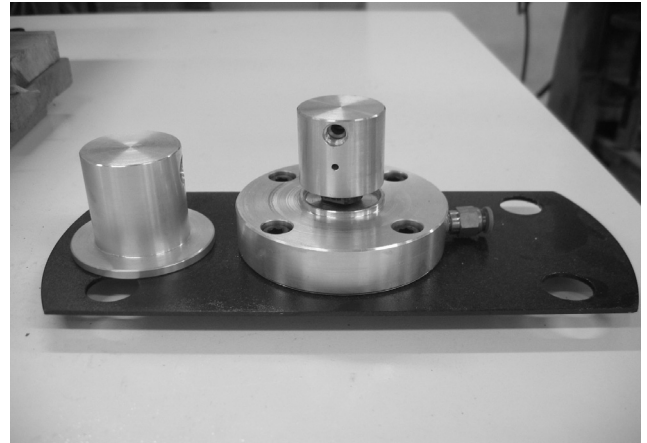


Fig. 4 Infinite rotation type pneumatic supplier with rotary joint unit.

### 4) 공기압 측정 및 무선 송·수신 장치 장착용 지그

일부 외국의 대형 트랙터를 제외한 대부분의 국내 농용 트랙터는 튜브 타이어를 채택하고 있으므로 타이어 공기압 송신장치를 휠 내부에 장착하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 형태의 타이어 휠에 적용이 가능하도록 타이어 공기압 송신장치를 타이어 휠 외부에 고정하는 방식을 선택하였다.

타이어 공기압 송신장치의 가속도 모듈을 이용하여 차량의 주행 속도를 측정하기 위하여 송신장치의 장착방향이 회전축과 평행한 방향으로 설치되도록 하였으며, 그림 5와 같은 타이어 휠 고정 장치를 제작하였다. 회전하는 물체의 가속도는 회전 반경에 비례하므로, 장착 위치를 회전 중심에서 최대로 사이가 벌어지는 지점을 선택하는 것이 가속도 측정에 유리하다. 타이어 공기압 송신장치는 타이어 휠 회전 중심으로부터 0.3 m인 거리에 부착하였다.

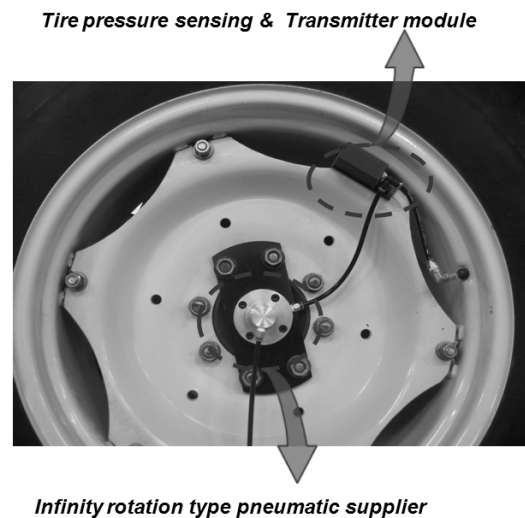


Fig. 5 Tire pressure transmitter mounted on the wheel.

### 5) 공기압 제어 알고리즘

공기압 제어의 최초 과정에서 타이어의 압력 변화를 감지할 수 있는 최소시간 동안 타이어에 공기주입 또는 배출과정을 수행하고, 이에 따라 계산된 압력 변화율을 이용하여 설정 압력으로 제어하기 위하여 공기주입 및 배출 밸브의 열림 시간 계산 방법을 채택하여 공기압 제어 알고리즘을 구축하였다. 개발한 알고리즘은 타이어의 종류와 크기, 공압 라인 및 공기압 발생장치 등의 구성 장치의 특성에 무관하게 공기압을 비교적 정확하게 제어할 수 있는 장점이 있다.

공기압력 변화에 따른 소요 공기량의 계산은 이상기체 상태 방정식을 이용하여 제어 알고리즘에서 사용되는 수식을 간략화 하였으며, 다음의 식 (2)는 제어 알고리즘에서 타이어 내용적( $V_{tire}$ )를 산출하는 식이다.

$$V_{tire} = \left( \frac{P_{atm}}{P_2 - P_1} \right) \times \frac{DISP_{comp}}{60} \times T_{open} \quad (2)$$

where,  $V_{tire}$  : Inner volume of tire (L)  
 $T_{open}$  : Valve open time at first inflation (s)  
 $DISP_{comp}$  : Air flow-rate of compressor (L/min)  
 $P_{atm}$  : Atmospheric pressure (kPa)  
 $P_1$  : Measured tire pressure at initial time (kPa)  
 $P_2$  : Measured tire pressure at 2nd time (kPa)

제어 알고리즘에서는 이상기체 상태방정식을 이용하여 타이어의 부피, 설정 공기압 및 현재 타이어 공기압으로 타이어 주입 공기량을 예측할 수 있으며, 이를 통하여 공기주입 밸브 작동시간, 즉 공기 압축기의 작동시간을 식 (3)을 이용하여 예측할 수 있다.

$$T_{total\ open} = \frac{60 V_{atm}}{DISP_{comp}} \quad (3)$$

where,  $T_{total\ open}$  : Total valve open time at first inflation (s)  
 $V_{atm}$  : Air requirement (L)  
 $DISP_{comp}$  : Air flow-rate of compressor (L/min)

그림 6과 같이 제어 알고리즘은 차량 하중 차이에 따른 압력 변화율 변동, 제어과정 중에서 타이어 압력 차이에 따른 공기주입 및 배출시간 변동 및 공기 주입기 효율의 경시변화 등의 외부 요인에 의한 비선형 요소를 고려하여 비례 제어를 기반으로 개발하였다. 밸브 작동 시간은 이전 밸브 작동시간에 의한 압력 변화를 이용하여 계산된 시간, 압력 변화율에 따라 계산된 시간 및 설정 압력과 현재 압력 차이의 누적 합에 의하여 계산된 시간 등에 각각의 계수를 곱하고 이를 합

산하여 계산하였다. 계산된 밸브 작동시간이 식 (3)으로 예측한 시간과 차이가 발생하는 경우에는 제어 시스템의 이상 상황으로 제어기에서 경보처리를 수행하도록 구성하였다.

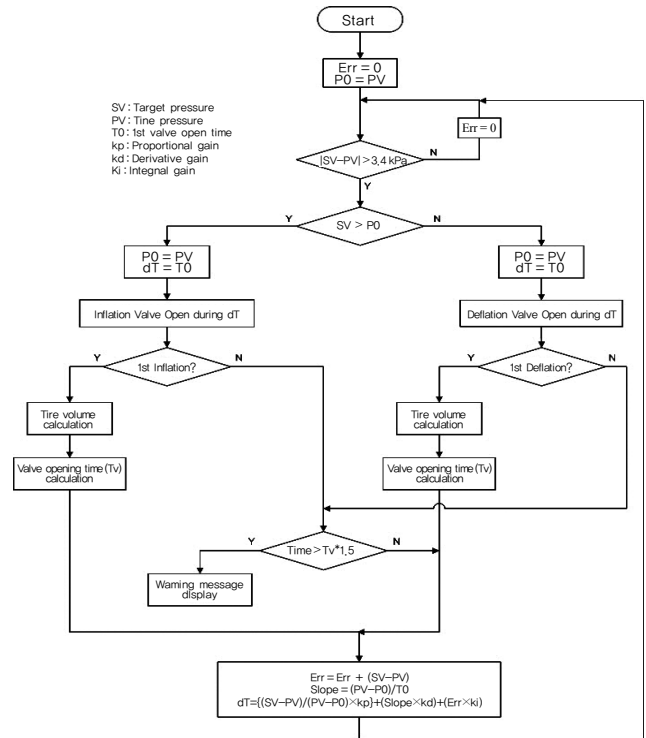


Fig. 6 Flowchart of tire pressure control algorithm.

### 다. 타이어 시뮬레이터

그림 7과 같이 타이어 공기압 제어 시뮬레이터는 농용 트랙터 타이어를 임의 회전속도로 회전시키면서 공기압 제어 시스템을 구성하고 있는 개별 구성품의 성능 및 작동 상태를 실내에서 확인하기 위한 장치로, 타이어 압력을 조절하기 위하여 공기압 발생장치로 사용하는 공기 압축기, 공압용 우레탄 튜브와 윈터치 커플러로 구성된 공압 유로, 공기 주입 및 배출 기능을 담당하는 솔레노이드 밸브 블록 등의 기계 장치와 공기압을 제어하기 위한 밸브 제어 회로 등으로 구성하였다. 또한 그 기능은 타이어 공기 주입 및 배출, 공기압 조절 및 표시, 회전속도 조절 및 표시 기능으로 요약될 수 있다.

개발된 타이어 시뮬레이터의 타이어 공기압 조절 기능은 전기 스위치와 순차 회로를 이용하여 공기 주입 및 배출용 솔레노이드를 수동으로 조작하여 작동하였다. 공압 유로 상에 스트레인게이지 방식의 압력 송신기(PSC-10, Sensys, Korea)를 설치하여 공기압을 표시할 수 있도록 표시장치와 부착하여 육안으로 확인이 가능하도록 하였다. 타이어 회전에 필요한 동력원은 전동기(TEB414B, SH Electric, Korea)를 이용하였으며, 회전속도를 조절하기 위하여 전용 제어기

를 설치하였다. 타이어 회전속도는 전위차계(RES-1K, Spectra, Japan)를 이용하여 모터 제어기의 회전속도 제어단자에 입력되는 전압을 조절하여 설정할 수 있도록 구성하였다. 따라서 시뮬레이터를 작동하면서 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 구성하는 각종 부품의 정상 작동 여부 및 타이어 공기압 제어 시스템에의 적용 적합성을 확인하였다.

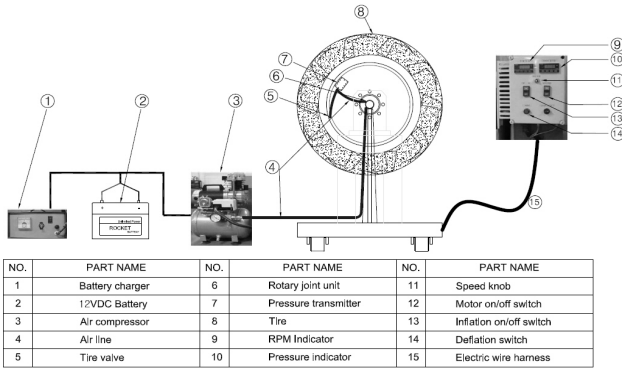


Fig. 7 Construction of tire simulator.

## 라. 타이어 시뮬레이터를 이용한 개별 구성품의 성능 평가

### 1) 차속 및 공기압 측정 장치의 성능 평가

타이어 시뮬레이터에 농용 트랙터 타이어를 장착하고 무선 송신장치 내의 공기압 센서 소자(SP30, Infineon Co., France)에 내장되어 있는 가속도 센서의 측정 정확도 및 차속 환산 성능을 측정하였다. 이를 위하여 그림 8과 같이 타이어가 회전하는 동안 휠에 장착된 송신장치는 원심력에 의한 가속도를 측정하여 개발된 데이터그램에 1바이트 크기로 포함시켜 측정값을 전송하도록 구성하였으며, 전송된 측정값은 수신장치에서 복호화 과정을 거쳐 제어기로 전달되도록 하였다. 또한 최종적으로 측정된 가속도는 제어기에서 식 (6)에 대입하여 연산과정을 통하여 차량의 주행 속도로 환산하였다.

$$A = r \times (N \times 2\pi/60)^2 \quad (4)$$

$$N = 9.55 \times \sqrt{\frac{A}{r}} \quad (5)$$

where, A : Measured acceleration in transmitter module (m/s<sup>2</sup>)

r : Distance between center of wheel and transmitter module (m)

N : Rotational speed of tire (rpm)

$$V = R \times (N \times 2\pi/60) \times 3.6 \quad (6)$$

where, V : Traveling speed of vehicle (km/h)

R : Radius of tire (m)

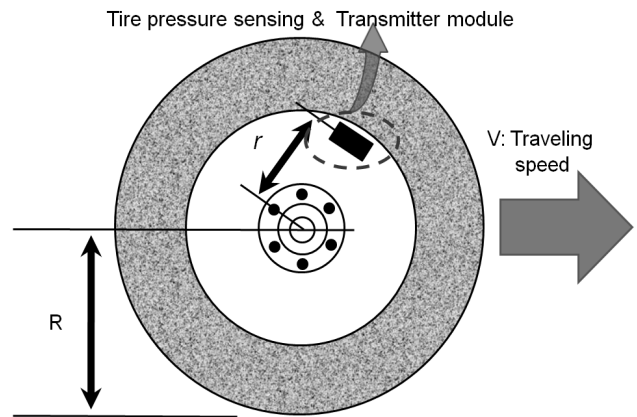


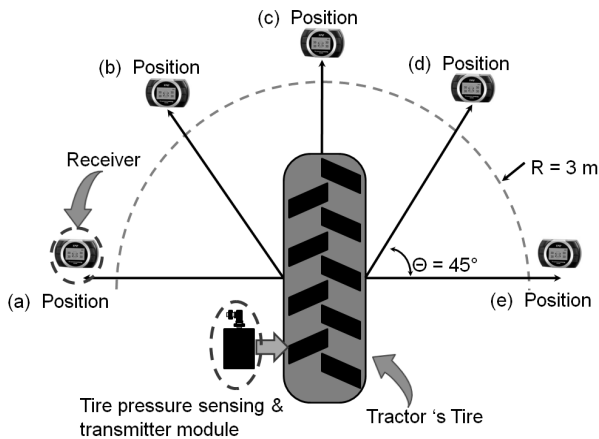
Fig. 8 Calculation of vehicle speed from accelerometer.

차속 측정장치의 성능을 평가하기 위하여 송신 장치에서 측정된 회전속도와 시뮬레이터의 회전축에 부착된 모터리인 코더(HT-5500, Onosokki Co., Japan)에서 측정된 회전속도를 비교 분석하였다. 타이어 시뮬레이터를 이용하여 타이어 회전속도를 50 rpm 에서 160 rpm 까지 10 rpm 씩 증가시키면서 회전속도를 측정하였다. 또한, 타이어 공기압은 디지털 압력계(DPI-603, Druck Co., Germany)를 이용하여 측정값과 송신장치의 압력센서로 측정된 값을 비교 분석하였으며, 이때 타이어 공기압은 0~280 kPa 범위에서 40 kPa 씩 증가시키면서 공기압을 측정하였다.

### 2) 회전 속도에 따른 타이어 공기압 무선 송·수신 장치 성능 평가

타이어 공기압 측정 및 무선 송·수신 장치는 타이어 회전 속도에 따라 회로 및 안테나 성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 타이어 회전속도에 따른 공기압 송·수신 장치의 성능을 분석하기 위하여 그림 9와 같이 타이어 시뮬레이터에 공기압 측정 및 무선 송신장치를 부착하고 수신장치의 위치를 바꿔가면서 무선 데이터의 송·수신 성공률 확인 시험을 수행하였다.

트랙터용 타이어의 회전속도는 0~150 rpm(차속기준 36 km/h)범위에서 50 rpm 씩 증가하면서 각 회전속도 별로 송·수신 성공률을 측정하였다. 수신장치의 위치는 타이어 중심점으로부터 반경 3 m 의 거리에서 수평면 기준으로 45°씩 변경하면서 각각의 타이어 회전속도별로 총 5회 반복 측정하였다.



**Fig. 9** Performance test of transmitter and receiver using tire simulator.

**3) 타이어 공기압 제어장치의 성능 평가**

타이어 공기압 제어장치의 제어 알고리즘은 임의의 타이어를 제어 대상으로 초기 공기주입에 의한 압력 변화를 이용하여 임의의 설정압력으로 제어하기 위한 소요 공기량을 계산하여 공기주입 밸브의 개폐시간을 예측하는 과정을 수행하도록 구성되어 있다. 초기 공기압 제어 알고리즘에는 기본적으로 PID 제어기 적용을 고려하였으나, 제어과정에 분단위의 소요 시간이 필요하며 제어 대상인 타이어 압력의 측정에 일정 시간의 안정화 시간이 필요한 응답특성을 갖기 때문에 본 연구에서는 미분( $K_i$ ) 및 적분( $K_d$ ) 제어계수는 0으로 설정하여 미분제어와 적분제어를 수행하지 않더라도 원하는 제어성능을 구현할 수 있는 비례 제어를 타이어 공기압 제어장치에 채택하였다. 따라서 본 연구에서는 타이어 시뮬레이터를 이용하여 최적의 타이어 공기압 제어성능을 확보하기 위하여

공기압 제어장치의 비례제어 계수( $K_p$ )를 설정하기 위한 시험과 설정된 제어 계수에 따른 공기압 제어장치의 성능평가 시험을 수행하였다.

타이어 시뮬레이터를 이용한 제어계수 최적화 작업은 농용 트랙터 타이어의 공기압을 152 kPa 에서 설정 공기압 210 kPa 까지 가압시키는 공기주입 제어동작과, 공기압 210 kPa 에서 설정 공기압 138 kPa 까지 감압시키는 공기배출 제어 동작을 수행하는 동안 제어계수를 변화시키면서 제어시간을 측정하였다. 또한 타이어 시뮬레이터와 타이어 공기압 제어장치를 이용하여 시뮬레이터에 장착된 타이어를 100 rpm 의 회전속도로 회전시키면서 50 kPa 에서 138, 180, 210 kPa 로 설정 공기압까지 공기 주입 및 배출 과정을 각각 5회씩 수행하여 개발된 제어장치의 공기압 제어성능을 확인하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**가. 차속 및 공기압 측정장치의 성능 분석**

**1) 차속 측정 성능 분석**

타이어 시뮬레이터를 이용하여 타이어의 회전속도를 50 rpm 부터 160 rpm 까지 10 rpm 단위로 증가시키면서 타이어 휠에 장착된 무선 송신장치에서 전송된 데이터그램에서 가속도를 확인하였다. 표 4와 같이 시속 10 km 이상의 속도 구간에서는 대략 ±1 %(FS) 이내의 정확도로 차속을 계산할 수 있음을 확인하였다.

**2) 공기압 측정 성능 분석**

공기압 측정 및 송신 장치의 타이어 공기압 측정 성능은 교정기로 디지털 압력계(DPI-603, Druck Co., Germany)를

**Table 4** Results of test for vehicle speed measurement of transmitter module

Tire simulator		Tire pressure sensing and transmitter module		
Rotational speed (rpm)	Vehicle speed computed from rotational speed (km/h)	Acceleration (m/s <sup>2</sup> )	Vehicle speed computed from acceleration (km/h)	Error (% , FS)
49.3	11.7	4.91	9.4	-5.8
59.4	14.1	9.81	13.3	-2.0
70.5	16.7	14.72	16.3	-1.2
80.2	19.0	19.62	18.8	-0.6
89.5	21.2	25.53	21.0	-0.6
100.0	23.7	31.88	24.0	0.5
109.8	26.1	39.24	26.6	1.3
119.8	28.4	44.15	28.2	-0.6
129.9	30.8	53.96	31.2	0.8
139.4	33.1	61.31	33.2	0.3
150.1	35.6	68.67	35.2	-1.2
160.0	38.0	78.48	37.6	-1.0

이용하여 측정된 값과 송신장치의 압력센서로 측정된 값을 비교하는 방법을 이용하여 분석하였다. 타이어 공기압을 0~280 kPa 범위에서 40 kPa 씩 증가시키면서 비교 측정하였다. 표 5와 같이 각각 교정기를 이용하여 측정한 실제 타이어의 공기압과 공기압 측정 및 송신 장치를 이용하여 측정한 값을 비교한 결과 개발된 공기압 측정 및 송신 장치의 공기압 측정 오차는 전체 측정 범위 내에서 0.7%(FS) 이내로 확인되었다.

**Table 5** Results of test for tire pressure measurement of transmitter module

Actual pressure of tire (kPa)	Measured pressure of tire from transmitter (kPa)	Error (% FS)
0	0	0.0
40	39	-0.4
80	78	-0.4
120	118	-0.7
160	159	-0.4
200	200	0.0
240	242	-0.7
280	282	-0.7

#### 나. 타이어 회전속도에 따른 타이어 공기압 무선 송·수신 장치 성능 분석

개발한 타이어 공기압 무선 송신 장치는 타이어 회전속도에 따라 타이어 휠에 부착되어 있는 송신장치의 회로 및 안테나 성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 타이어 회전 속도에 따른 공기압 송수신 장치의 성능을 분석하기 위하여 송신장치로부터 100개의 데이터그램을 송신하도록 설정한 후 수신장치가 정상적으로 수신한 데이터를 백분율로 표시하는 방법을 사용하였다.

표 6의 무선 송·수신 장치 성능분석 결과, 평균 수신 성공률은 98.3%로 나타났으며, 수신장치의 장착위치의 변경에 따른 수신 성공 균일도(CV)는 0.6%로 타이어 공기압 무선 송수신 장치의 통신 성능은 타이어의 회전 속도 및 수신 장치의 위치에 관계없이 안정적임을 확인하였다. 이 결과를 토대로 농용 트랙터의 통상적인 주행 속도 이내에서는 개발된

타이어 공기압 무선 송·수신 장치의 무선 통신 성능은 차륜의 회전속도나 송·수신 장치 사이의 장착 방향에 구애받지 않음을 확인할 수 있었다.

#### 다. 타이어 공기압 제어장치 성능 분석

##### 1) 공기압 제어장치의 제어계수 선정

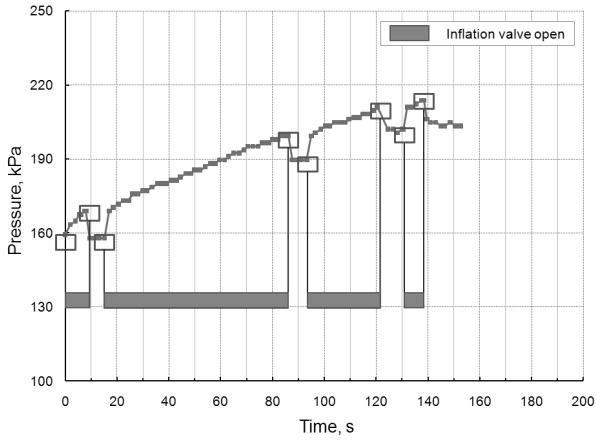
타이어 공기압 제어장치의 제어 알고리즘은 임의의 형식을 갖는 타이어를 제어대상으로 초기 공기주입에 의한 압력변화를 이용하여 임의의 설정압력으로 제어하기 위한 소요 공기량을 계산하여 공기주입 밸브의 개폐시간을 예측하는 과정을 수행하게 된다. 타이어 공기압 제어장치의 제어 알고리즘은 비례제어 기능을 이용하였으며, 이에 따라 제어장치의 최적의 비례제어 계수( $K_p$ )를 결정하기 위한 시험을 수행하였다.

이를 위하여 농용 트랙터 타이어로 152 kPa의 초기압력에서 207 kPa 까지 압력 제어동작을 수행한 결과를 그림 10에 나타내었다. 그림에서 표시된 압력값은 공기압 측정 및 무선 송신 장치로부터 수집된 값이며, 공기주입 밸브를 닫은 후에 그래프 상에서 평탄하게 표시되는 부분이 실제 타이어 공기압을 나타낸다. 그 이유는 공기 압축기, 유로, 솔레노이드 밸브 블록과 공기압 측정 및 송신장치가 하나의 공압라인에 연결되어 있기 때문에 공기주입 또는 배출 과정 중에는 공기 압축기의 송출압력 또는 대기 중으로 개방되는 배출 밸브의 영향으로 공압 라인에 형성되는 압력이 실제 타이어 공기압과 다를 수밖에 없는 시스템의 구조적인 특징을 갖기 때문이다. 시험 결과, 그림과 같이  $K_p$ 가 0.8인 경우에는 4회의 공기주입 밸브의 제어동작이 필요하였으며, 제어시간은 140초 소요되는 것으로 분석되었다.  $K_p$ 가 1.0인 경우에는 3회의 공기주입 밸브 작동 후에 제어동작이 완료되었으며, 제어시간은 133초 소요되는 것으로 분석되었다.  $K_p$ 를 1.2로 설정하면 2회의 밸브 작동 이후에 설정압력을 초과하여 배출 밸브로 공기를 배출시켜 초과된 압력을 낮추는 불필요한 감압 제어과정이 추가되어, 설정압력 도달시간은 총 185초가 소요됨을 확인하였다. 상기 시험 결과를 고려하여 본 연구에서 개발한 공기압 제어기의 비례 제어계수는 1.0으로 선정하였다.

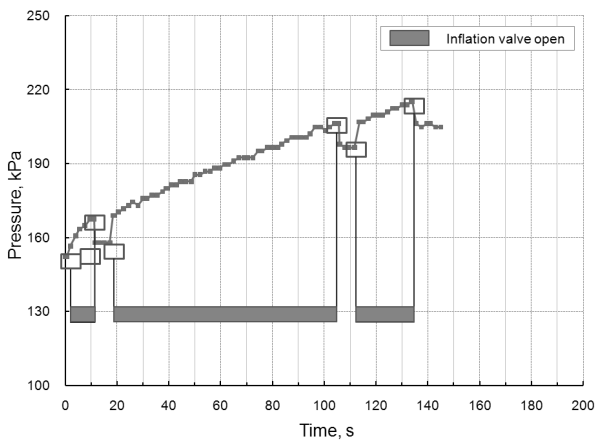
**Table 6** RF communication performance between transmitter and receiver module

Wheel speed (rpm)	Data receipt success ratio by position of receiver module (%)					Aver. (%)	CV (%)
	A (0 deg.)	B (45 deg.)	C (90 deg.)	D (135 deg.)	E (180 deg.)		
0	98	99	96	98	98	97.8	1.0
50	99	99	98	99	99	98.8	0.4
100	98	98	97	98	99	98.0	0.6
150	99	98	99	99	98	98.6	0.5

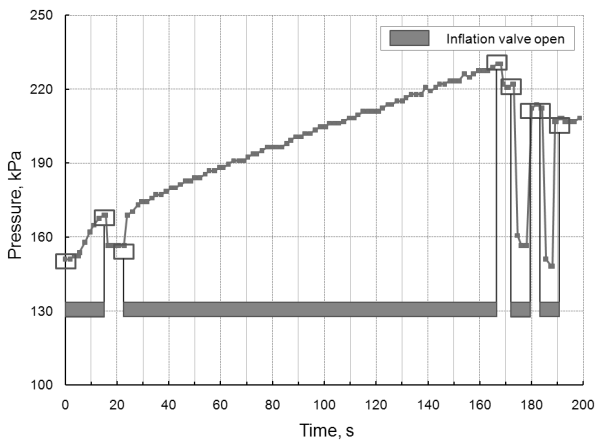




(a)  $K_p=0.8$



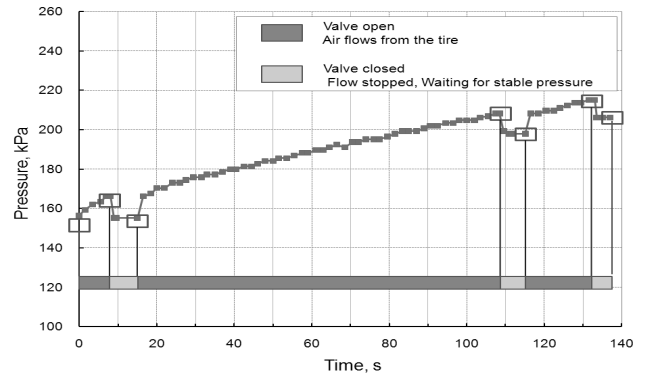
(b)  $K_p=1.0$



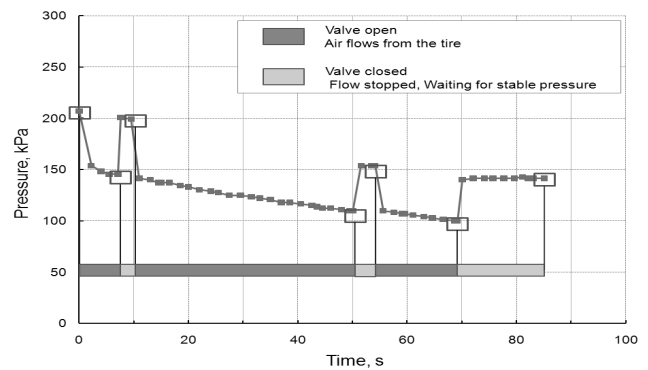
(c)  $K_p=1.2$

**Fig. 10** Pressure control of agricultural tractor's tire using tire pressure controller with different values of  $K_p$ .

그림 11은 선정된 비례제어 계수를 이용하여 트랙터 타이어의 초기 공기압 152 kPa 에서 설정 공기압 210 kPa 까지 공기주입 제어동작을 수행하는 과정을 나타낸 것이며, 그림 12는 초기 공기압 210 kPa 에서 설정 공기압 138 kPa 까지 공기배출 제어동작을 수행하는 과정을 나타낸 것이다.



**Fig. 11** Pressure-time curve in automatic tire inflation control.



**Fig. 12** Pressure-time curve in automatic tire deflation control.

개발된 공기압 제어 알고리즘을 이용하여 농용 트랙터 타이어를 대상으로 공기압 제어성능을 분석하였다. 제어성능은 타이어 시뮬레이터를 이용하여 타이어를 100 rpm 으로 회전 시키면서 공기 주입 및 배출 시험을 각각 5회씩 수행한 평균 값으로 확인하였다. 표 7은 농용 트랙터 타이어를 각각의 압력 조절 단계별로 공기 주입 및 배출시간을 측정된 결과로, 타이어의 최소 허용 공기압 (50 kPa)에서 규정 공기압 (180 kPa)까지 제어하는 경우 제어시간은 대략 307초가 소요되었고 그 반대로 제어하는 경우 대략 201초가 소요되었으며, 제어과정 중 공기 주입 및 배출밸브의 개폐 횟수는 3~4회에서

**Table 7** Tire pressure control performance of designed tire pressure controller

Start pressure (kPa)	Target pressure (kPa)	Actual pressure (kPa)	Time (sec)	Valve open (Times)	Error (%FS)
50	138	137	190	3	-0.3
50	180	180	307	4	0.0
50	210	207	431	4	-0.9
138	50	50	150	4	0.0
180	50	51	201	4	0.3
210	50	48	228	4	-0.6

제어가 가능하였다. 공기 주입 및 배출 시간 예측 알고리즘이 적용된 타이어 공기압 제어장치는 대략  $\pm 0.9\%$ (FS)의 정확도로 공기압을 제어할 수 있었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구에서는 농용 트랙터의 주행상태 및 작업환경에 따라 타이어 공기압을 능동적으로 조절하여 차량의 성능을 제고할 수 있는 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 개발하기 위한 목적으로 공기압 발생장치, 공압 유로를 포함한 솔레노이드 밸브 블록 및 무한회전형 공기압 공급 장치, 타이어 공기압 측정 및 송·수신 장치 등의 제어 시스템의 각 구성부품과 공기압 자동 제어 알고리즘을 개발하였다. 또한 타이어 시뮬레이터를 개발하여 공기압 제어 시스템의 개별 구성품의 성능 및 작동 상태를 확인하여 실제 제어 시스템에의 적용 적합성을 평가하였으며, 그 결과를 다음과 같이 요약하였다.

- (1) 공기압 발생장치, 무한회전형 공기압 공급장치, 공기주입 및 배출 밸브블록 등의 기계장치, 제어기와 주입 및 배출시간 예측 알고리즘으로 구성된 타이어 공기압 제어장치를 개발하였다. 개별 구성품에 대한 장치의 적용 적합성을 확인하고 공기압 제어 알고리즘의 완성 및 개발한 무선 송·수신 장치의 성능을 분석하기 위하여 타이어 시뮬레이터를 제작하였다.
- (2) 타이어 시뮬레이터에 개발한 장치를 장착하고 차속 및 공기압 측정장치의 성능시험을 수행하였다. 측정 결과, 차속은 1%(FS)의 측정 정확도를 확인하였으며, 공기압은 0.7%(FS)의 오차범위 이내로 측정할 수 있었다.
- (3) 타이어 회전속도의 변화 및 수신 장치의 데이터 수신 위치에 따른 타이어 공기압 무선 송·수신장치의 데이터 평균 수신 성공률은 98.3%, 수신 성공 균일도(CV)

는 0.6%로 측정되어 개발한 장치의 통신 성능은 차량의 회전속도나 송·수신 장치 사이의 장착 방향에 구애받지 않음을 확인할 수 있었다.

- (4) 타이어 공기압 제어 시스템은 비례 제어를 기반으로 한 제어 알고리즘을 이용하여 완성하였으며, 제어기의 비례제어 계수( $K_p$ )는 1.0으로 결정하였다. 개발된 공기압 제어장치 및 타이어 시뮬레이터를 이용하여 농용 트랙터용 타이어를 대상으로 공기압 제어성능을 분석한 결과, 개발된 공기압 제어 시스템은 타이어의 최소 허용 공기압인 50 kPa에서 규정 공기압 180 kPa까지 공기주입 소요시간이 대략 307초, 그 반대의 경우는 201초가 소요되었으며, 대략  $\pm 0.9\%$ (FS)의 정확도로 공기압이 제어되었다.

#### 참 고 문 헌

1. Adams, B. T., J. F. Reit, J. W. Hummel, Q. Zhang and R. G. Hoeff. 2004. Effect of central tire inflation systems on ride quality of agricultural vehicles. *Journal of Terramechanics* 41:199-207.
2. Kaczmarek, R. W. 1984. Central tire inflation enhance vehicle mobility. *Proceedings of the 8th International Conference of the ISTVS* 3:1255-1271.
3. Lee, K. S. 2001. Effect of Tire Pressure on the Performance of Agricultural Tractors. Report of Agricultural R&D research. Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries, Seoul, Korea.
4. Ryu, K. H., K. U. Kim, K. D. Kim, S. T. Kim, K. J. Park, S. J. Park, J. G. Park, S. R. Ser, B. S. Shin, K. S. Youn, K. S. Lee and K. M. Lee. 2004. *Tractor Engineering Principles*. pp. 346-379. Munundang, Seoul, Korea.