

최 종
연구 보고서

농용 트랙터를 위한 능동형 타이어
공기압 제어 시스템 개발

Development of Active Tire Pressure Control System for
Farm Tractors

서울대학교

농림수산식품부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “농용 트랙터를 위한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템 개발” 과제의 보고서로 제출합니다.

2009 년 5 월 29 일

주관연구기관명 : 서울대학교

총괄연구책임자 : 류 관 희

연 구 원 : 유 지 훈

연 구 원 : 최 영 균

연 구 원 : 신 영 섭

연 구 원 : 김 영 주

참 여 기 업 명 : 씨트론(주)

연 구 원 : 이 규 철

연 구 원 : 이 광 수

연 구 원 : 한 재 성

연 구 원 : 김 용 준

연 구 원 : 박 재 현

연 구 원 : 김 근 영

요 약 문

I. 제 목

농용 트랙터를 위한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템 개발

II. 연구개발의 목적 및 필요성

농용 트랙터와 같은 비포장도로의 운행 빈도가 높은 승용 및 상용 차량의 주행 장치에 사용되는 공기 주입 타이어는 포장의 노면진동을 완충시키고 각종 작업에 필요한 견인력과 제동력을 제공하며 조향 시 차량의 안정성을 유지하는 역할을 수행한다. 일반적으로 타이어 공기압이 적정 공기압보다 높으면 차량의 조종 안정성이 향상되며 회전저항이 감소하고 연비가 증가하는 반면 승차감이 감소하고 또한 현가장치의 수명이 감소한다. 또한 공기압이 낮으면 조향 시 회전저항이 증가하는 반면 승차감과 견인성능은 향상되나 연비가 감소한다. 이와 같이 타이어 공기압은 주행 장치로 공기 주입형 타이어를 채택한 차량의 제반 성능에 영향을 미치며, 따라서 차량의 원활한 성능을 발휘하기 위하여 타이어의 적정 공기압이 유지되어야 한다.

본 연구는 타이어 공기압과 농용 트랙터의 기동성능, 조종성능의 상관관계 및 토양 다짐 효과 분석에 대한 지금까지의 연구 결과를 토대로, 설정된 운전 모드 및 주행 속도에 따라 타이어 공기압을 능동적으로 조절하여 농용 트랙터의 성능을 제고할 수 있는 농용 트랙터를 위한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 개발하고, 개발된 제어 시스템을 농용 트랙터에 실제 장착하여 적용 적합성을 확인하고 제어 성능을 검증하기 위하여 수행하였다.

III. 연구개발 내용 및 범위

본 연구에서는 농용 트랙터의 성능을 제고할 수 있는 농용 트랙터를 위한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템의 개발과정을 수행함에 있어서 개발 시스템의 적용 적합성 및 제어 성능의 검증을 위하여 다음과 같은 내용의 연구를 수행하였다.

1. 농용 트랙터용 공기주입 타이어의 압력을 측정하고 이를 무선신호로 변환하여 송·수신하는 공기압 측정 및 무선 송·수신 장치를 개발하고 그 성능을 검증하였다.
2. 개발된 제어 시스템의 제어 성능의 실내 검증을 위한 타이어 시뮬레이터를 제작하고, 이를 이용하여 공기압 발생 장치, 무한 회전형 공기압 공급 장치 및 제어 알고리즘을 포함한 타이어 공기압 제어 장치와 제어 알고리즘을 개발하였다.
3. 개발된 제어 시스템의 제어 모드를 크게 주행과 작업, 비상 및 수동모드로 구분하여 개발하였고 구동륜의 동하중과 차량의 주행속도에 따라 제어 시스템의 설정 공기압을 능동적으로 변화시키는 방법을 개발하였으며, 이를 통하여 농용 트랙터의 주행 상황에 따라 설정 압력으로 타이어 공기압을 가변 제어할 수 있도록 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 완성하였다. 또한 개발된 시스템을 실제 트랙터에 장착하여 실외 검증 시험을 수행함으로써 시스템의 제어 성능 및 개발된 시스템의 적용에 따른 농용 트랙터의 차량 성능의 개선 효과를 평가하였다..

IV. 연구개발결과

본 연구는 농용 트랙터의 타이어 공기압과 차량 기동성능, 조종성능의 상관관계 및 토양 다짐효과 분석에 대한 지금까지의 연구 결과를 토대로, 제어 모드 및 주행 속도에 따라 타이어 공기압을 능동적으로 조절하여 차량 성능을 제고할 수 있는 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 개발하고, 개발된 제어 시스템의 제어 성능을 검증하고 농용 트랙터 적용 적합성을 확인하기 위하여 수행되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 타이어 공기압을 측정하고 송신하고자 하는 각종 정보를 정해진 규약인 데이터그램으로 부호화하고 반송파주파수로 변조하여 송신안테나를 이용하여 전파(傳播)하는 역할을 수행하는 송신장치와, 수신된 전자기파 신호를 증폭하고 복조과정을 거쳐 데이터그램으로 복호화하여 무선으로 송신된 공기압을 확인할 수 있는 수신 장치 구성된 타이어 공기압 측정 및 송·수신 장치 개발하였다. 개발된 장치는 0 ~ 350 kPa 측정 범위에서 ± 0.5 % (FS)의 측정 정확도로 공기압을 측정할 수 있음을 확인하였다. 또한 송신장치에서 측정된 가속도를 이용하여 차속을 계산한 결과, 10 ~ 40 km/h 사이의 운전구간에서는 ± 1 % (FS)의 오차 범위 이내로 차속을 측정할 수 있었다.
2. 공기압 측정 및 송·수신 장치 설계과정에 목표 프레임 에러율을 기준으로 통신 링크 예산을

수립하여 수신 장치 요구 성능 기준을 선정하였다. 개발된 장치를 농용 트랙터에 설치하고 무선성능을 측정한 결과, -110 dBm의 수신 전력에서 20 %의 프레임 에러율이 측정되어 통신 링크 예산 범위 이내로 개발되었음을 확인하였다.

3. 공기압 발생장치, 무한회전형 공기압 공급 장치, 공기주입 및 배출 밸브블록 등의 기계장치, 제어기와 공기주입 및 배출시간 예측 알고리즘으로 구성된 타이어 공기압 제어장치를 완성하였다. 개발된 공기압 제어장치는 타이어 시뮬레이터를 이용하여 승용차용, 상용차용 및 농용 트랙터 타이어를 대상으로 제어 시험을 수행하였으며, ± 1 % (FS)의 정확도로 공기압을 제어할 수 있었다.

4. 타이어 공기압 제어 시스템을 농용 트랙터에 적용하기 위하여 사용 조건에 따라 제어 모드 (작업, 주행, 비상, 수동)를 개발하고 그에 따른 설정 공기압을 결정하였다. 차량의 주행속도에 따라 설정 공기압이 자동으로 가변되는 알고리즘을 제어기에 적용하여 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 완성하였다.

5. 구동륜의 동하중과 차량의 주행속도에 따라 결정되는 설정 압력으로 공기압이 가변되는 구조로 설계된 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 농용 트랙터에 적용하여 주행속도를 가변하면서 공기압 제어 시험을 수행하였다. 시험 결과, 각각의 압력 수준별 타이어 공기압 제어 정확도는 ± 1 % (FS) 이하로 구현되었으며, 실차 조건에서 개발한 제어 알고리즘의 정상 작동 여부를 확인하였다.

6. 완성된 능동형 타이어 공기압 제어 시스템의 농용 트랙터 적용 적합성을 확인하기 위하여 농촌진흥청의 주행 시험로에서 견인동력 측정차량을 이용하여 견인성능 시험을 수행하였다. 시험 결과, 능동형 타이어 공기압 제어 시스템은 농용 트랙터에서 타이어 공기압을 개발 목적에 부합하는 범위 내에서 자동 제어할 수 있음을 확인하였으며, 또한 시스템의 적용에 따른 농용 트랙터의 견인성능 변화를 확인할 수 있었다.

V. 연구성과 및 성과활용 건의

1. 연구성과

본 연구과제는 주요 작업의 종류와 트랙터의 주행조건 및 노면상태에 따라 농용 트랙터가 상시 최적의 성능(견인 및 조향 성능)을 유지함으로써 트랙터를 이용한 각종 작업 시 차량을 효과적으로 운용할 수 있는 기술을 확보하기 위한 농용 트랙터를 위한 능동형 타이어 공기압

제어 시스템(ATPCS)의 개발에 그 목적이 있다. 이러한 연구 개발에 따른 성과는 다음과 같이 요약 할 수 있다.

1) 개발된 농용 트랙터를 위한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 농용 트랙터에 적용함에 따라 차량의 견인성능 및 견인 출력을 개선을 통한 농용 트랙터의 전반적인 성능 향상이 가능할 것으로 예상된다.

2) 개발된 시스템의 적용으로 의도하지 않는 타이어 공기압 손실에 대비하여 농용 트랙터의 타이어 파손 또는 조기 마모로 인하여 야기될 수 있는 인적, 물적, 시간적 손실을 줄일 수 있는 기술의 개발이 가능하다.

3) 농용 트랙터를 이용한 작업 중에 상시 적정 수준의 타이어 공기압 유지가 가능해져 농용 트랙터의 연비 증가 및 유류비 절감과 공해물질의 배출을 감소시킬 수 있다.

4) 국산 트랙터에 본 연구를 통하여 개발된 기술을 적용함으로써 향후 타이어 공기압 제어 시스템의 국산화 원천 기술의 확보 및 국산 트랙터의 고급화에도 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

2. 연구성과 활용 계획

1) 본 연구를 통하여 개발된 기술의 설계 변수 및 구조 변경을 통하여 농용 트랙터 이외의 공기 주입형 타이어를 이용하는 모든 승용, 상용차량 및 군사용 차량에 적용 가능한 기술을 파생시킴으로써 개발 시스템의 적용 범위를 확대하여 새로운 시장을 창출하는 것이 가능할 것으로 예상된다.

2) 개발된 시스템을 타이어 공기압 측정 및 무선 송·수신장치와 타이어 공기압 제어 시스템으로 분리하여 제품화 시킬 경우 농업기계, 승용 차량과 상용차 관련 분야 및 타이어 산업 전반에 걸쳐 관련 기술의 적용에 순취위짐에 따른 경제적 파급 효과 및 관련 시장 수요 창출의 효과가 매우 높을 것으로 예상되므로 개발된 시스템의 핵심 부품의 모듈화에 따른 사업화가 필요할 것으로 예상된다.

SUMMARY

I . Subject

Development of the active tire pressure control system for agricultural tractors

II . Objective

An air-inflated tires for passenger, commercial vehicles and agricultural tractors being operated on off-road absorb vibration transmitted from ground, provide traction and braking forces, and stabilize vehicles during steering. When tire pressure is higher than proper pressure it improves handling of vehicle and fuel efficiency, and reduces steering resistance. However, it causes poor riding comfort and decreasing lifetime of suspension system. On the contrary, when tire pressure is lower than the proper it improves riding comfort and traction efficiency, but increases steering resistance and reduces fuel efficiency. As mentioned above, it should be maintained at proper level, because the tire pressure determines overall vehicle performance.

This study was performed to develop an active tire pressure control system that can adjust tire pressure to the optimum level according to each control modes and vehicle travel speeds, which were determined by relationships between tire pressure and load. The feasibility of the developed control system was tested with agricultural tractors and the performance was evaluated.

III . Research content and scope

This study was conducted to develop the active tire pressure control system for agricultural tractors. In the development process of this system. main contents of this research for the feasibility study and control performance evaluation of developed system

was summarized as follows.

1. The tire pressure measurement and RF transceivers unit were developed, which are able to measure the air-inflated tire's pressure of agricultural tractors and transmit the measured data by using RF signal. Also, their operating performances were evaluated.
2. Tire-simulator was manufactured for the evaluation of the developed control system's performance in the laboratory. By using simulator, the air compressor unit, the air supplying unit with a rotary joint, tire pressure control unit and control algorithm were developed.
3. The developed operating mode for tire pressure control system were working, traveling, emergency and manual mode. As using these modes, target value of tire pressure was set automatically based on the control mode which were classified according to tractor's working condition. Also, the target pressure was adjusted according to the vehicle travel speed from a load-inflation pressure table for tires. In order to apply the control system to agricultural tractors, the feasibility study of the developed control system was conducted with an agricultural tractor on the field.

IV. Major result of research

This study was conducted to develop an active tire pressure control system which is able to adjust tire pressure to the optimum level according to each control modes and vehicle travel speeds, which were determined by relationships between tire pressure and load. The feasibility of the developed control system was tested with agricultural tractors and the performance was evaluated. The result of this study was summarized as follows.

1. In this study, the RF transceiver unit of active tire pressure control system was developed, which are able to measure the tire pressure and communicate measured data by using the prescribed communication protocol (RF signal datagram). The developed RF transceiver unit was able to measure tire pressure with the accuracy $\pm 0.5\%$ (FS) in the range of 0~350kPa. Also, using the measured acceleration of transmitter module, traveling

speed of tractor was able to be measured with the accuracy of $\pm 1\%$ (FS) in the range of 10~40km/h traveling speed.

2. In the process of RF transceiver unit's design, target frame error rate according to communication link budget for agricultural tractor was set and then performance criteria were determined. As a result of these research, frame error rate was 20% at the -110dBm electro-receipt power. And then the developed RF transceiver unit have conformed with the planned goal of a link budget in the process of development.

3. In this study, the air-compressor unit, air supplying unit with rotary joint, solenoid valve assembly and control algorithm were developed for the active tire pressure control system. And then the developed control system's performance was evaluated to the passenger, commercial and agricultural tractors by using the tire simulator. As a result of performance evaluation, the developed control system was able to adjust the tire pressure with the accuracy of $\pm 1\%$ (FS)

4. In order to apply the developed control system to an agricultural tractors, the operating mode was developed according to the working condition of agricultural tractors(working traveling, emergency and manual mode), and then target value of tire pressure was determined for each developed mode. Also, the developed control algorithm was designed to be capable of controlling the tire pressure automatically according to traveling speed of vehicles. Finally, development of the active tire pressure control system was accomplished by applying the control algorithm to the system's controller.

5. As the target pressure being adjusted according to the vehicle's travel speed from a load-inflation pressure table for tires, the feasibility of the developed control system was tested with an agricultural tractor. As a result of the test, an accuracy of the developed system's tire pressure control was below the $\pm 1\%$ (FS), the correct operation of developed system's control algorithm was confirmed while that being applied to the tractors.

6. For the feasibility study of developed system's application to the tractors, the field test was conducted by using the draw bar type dynamometer, As a result of the test, developed control system was able to control the tire pressure of the tractor automatically. Also, it was confirmed that developed system is able to improve the tractive power and force of tractors by using this system.

CONTENTS

Chapter 1. Introduction	1
Section 1. Background of research	1
Section 2. Purpose and scope of research	2
Chapter 2. Present status of technique development in Korea and foreign countries	4
Section 1. Present status of technique development in Korea	4
Section 2. Present status of technique development in foreign countries	6
Chapter 3. Contents and results of research	8
Section 1. Investigation of related literature	8
1. Tire pressure control system	8
2. Relationship of tire pressure with vehicle's performance	9
Section 2. Theoretical background	12
1. Link budget of wireless communication devices	12
A. Standard of judgement about the quality of transferring signal	12
B. Signal to noise ratio	12
C. Bit error rate	13
2. Communication linkage	13
A. Power flux density and effective isotropically radiated power of transmitter	12
B. Antenna gain	14
C. Thermal noise	15
3. Path loss	15
A. Free space loss	15
B. Loss by chassis structure of tractor	16

Section 3. Development of the RF transceiver unit and tire pressure measuring equipment	16
1. Material and method	17
A. Design of RF transceiver unit and tire pressure measuring equipment according to link budget	17
(1) Allowable power of RF transmitting module	18
(2) Channel loss	19
(3) Target success ratio of transmitting and receipt	19
B. Development of tire pressure measuring equipment and RF transmitting module	20
(1) Sensor module and Micro-controller	20
(2) Modulator	21
(3) Transmitter's Antenna	21
(4) Calibration of air-pressure	22
(5) Characteristic of transmitting module's RF parameter	22
C. Development of tire pressure RF receipt module	22
(1) Receipt antenna	23
(2) Low noise amplifier and band pass filter	23
(3) Demodulator	23
(4) Micro-controller of RF receipt module	22
D. Calculation of channel loss	30
(1) Measurement of receiving power by using the receiving signal intensity	30
(2) Selection of RF transmitting module's adjusting position	31
(3) Change of receiving power according to rotational position of wheel	33
(4) Channel loss according to vehicle's chassis structure	34
E. RF simulator	35
(1) Overview of RF simulator	35
(2) Function of RF simulator	35
(3) Construction of RF simulator	35
(4) Evaluation of RF receipt module by using RF simulator	34

2. Result and discussion	42
A. Performance of tire pressure measurement	42
B. Characteristic of RF transmitting module's performance	43
C. Channel loss	46
(1) Selection of RF transmitting module's adjusting position	46
(2) Change of receiving power according to rotational position of wheel	74
(3) Channel loss according to vehicle's chassis structure	74
D. Performance of RF receipt module	49
(1) Required operational capability according to link budget	49
(2) Performance of RF receipt module	55
3. Summary and conclusion	53
Section 4. Development of tire pressure control unit and tire simulator ..	45
1. Material and method	55
A. Design of air compressor unit	55
(1) Overview of air compressor unit	55
(2) Design of air path	58
(3) Construction of air pressure control circuit	55
B. Design of air supplying unit with rotary joint	60
(1) Structure of wheel attachment type air supplying unit	66
(2) Attachment of RF transmitter	68
C. Development of tire simulator	63
(1) Construction of tire simulator	63
(2) Function of tire simulator	66
D. Development of tire pressure control algorithm	55
(1) Period of tire pressure measurement and transmitting	56
(2) Measurement of acceleration and calculation of vehicle's traveling speed	56
(3) Tire pressure control algorithm	66
2. Result and discussion	70
A. Performance of tire simulator	70
B. Measuring performance of wheel's rotational speed	77

C. Performance of tire pressure control	7
D. Performance of RF transceiver unit according to wheel's rotational speed	84
3. Summary and conclusion	86
Section 5. Development of active tire pressure control system	78
1. Material and method	8
A. Construction of hardware	88
B. Mount of active tire pressure control system	9
C. Development of the operating mode	9
(1) Minimum allowable tire pressure	9
(2) Tire pressure according to load inflation and traveling speed	29
(3) Tire pressure according to implements	39
(4) Operating mode and set value of tire pressure	89
D. Feasibility study of active tire pressure control system using draw bar dynamometer	101
2. Result and discussion	103
A. Control performance of active tire pressure control system	103
(1) Working mode	103
(2) Traveling mode	105
(3) Emergency mode	107
(4) Manual mode	107
B. Feasibility study of application to agricultural tractors	109
3. Summary and conclusion	111
Chapter 4. Achievement of the objective and contribution of the related field	113
Section 1. Objective of the research in each year	113
Section 2. Point of the evaluation	115
Section 3. Achievement of the objective	116
Section 4. Contribution to the related field	117

Chapter 5. The plan for practical application of the research	118
Section 1. Suggestion for the prospective research	118
Section 2. Application for another research	118
Chapter 6. Compilation of overseas technical informations during the research	120
Chapter 7. References	123

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	1
제 1 절 연구배경 및 필요성	1
제 2 절 연구목적 및 범위	2
제 2 장 국내·외 기술개발동향	4
제 1 절 국내 기술개발동향	4
제 2 절 국외 기술개발동향	6
제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과	8
제 1 절 문헌연구	8
1. 타이어 공기압 제어 시스템	8
2. 타이어 공기압과 차량의 작업 성능	9
제 2 절 이론적 배경	12
1. 무선통신 장치의 링크 예산	12
가. 전송 신호의 품질에 대한 판단 기준	12
나. 신호 대 잡음비	12
다. 비트 에러율	13
2. 통신 링크	13
가. 송신장치의 전파밀도와 유효 등방성 복사 전력	14
나. 안테나 이득	14
다. 열잡음	15
3. 경로 손실	15
가. 자유공간 손실	16
나. 장착 방향, 회전, 차체 구조 및 주행에 의한 손실	16
제 3 절 공기압 측정 및 송·수신장치 개발	16

1. 재료 및 방법	17
가. 링크 예산에 의한 공기압 측정 및 송·수신장치 설계	17
(1) 송신장치의 허용 전력	8
(2) 채널 손실	9
(3) 목표 송·수신 성공률	9
나. 공기압 측정 및 송신장치 개발	20
(1) 센서 모듈 및 마이크로컨트롤러	0
(2) 변조기	2
(3) 송신 안테나	2
(4) 공기압 교정	2
(5) 송신장치의 무선 특성	2
다. 타이어 공기압 수신 장치 개발	25
(1) 수신 안테나	8
(2) 저잡음 증폭기 및 대역통과 필터	8
(3) 복조기	2
(4) 수신 장치 마이크로컨트롤러	9
라. 채널 손실 계산	30
(1) 수신신호강도를 이용한 수신전력 측정	0
(2) 수신 전력을 이용한 송신장치 장착 방향 선정	2
(3) 휠 회전각도에 의한 수신전력 변화	3
(4) 차량내 무선환경의 채널 손실 계산	4
마. 무선통신 시뮬레이터	35
(1) 무선통신 시뮬레이터 개요	3
(2) 무선통신 시뮬레이터 기능	6
(3) 무선통신 시뮬레이터 구성	3
(4) 무선통신 시뮬레이터를 이용한 수신 장치 성능 측정	4
2. 결과 및 고찰	42
가. 타이어 공기압 계측 성능	42
나. 타이어 공기압 송신장치의 무선 특성	43
다. 채널 손실	46
(1) 송신장치 장착 방향 선정	6

(2) 휠 회전각도에 의한 수신전력 변화	4
(3) 차량의 채널 손실	4
라. 타이어 공기압 수신장치 성능	49
(1) 링크 예산에 의한 수신장치 요구 성능	49
(2) 수신장치 성능	50
3. 요약 및 결론	53
제 4 절 공기압 제어장치 및 시뮬레이터 개발	54
1. 재료 및 방법	55
가. 타이어 공기압 발생장치 설계	55
(1) 장치 개요	55
(2) 유로 설계	58
(3) 공기압 제어 회로 구성	59
나. 무한회전형 공기압 공급 장치 설계	60
(1) 타이어 휠 부착용 공기압 공급 장치 구조	60
(2) 공기압 측정 및 송신장치 부착	62
다. 타이어 시뮬레이터 개발	63
(1) 타이어 시뮬레이터 구성	63
(2) 타이어 시뮬레이터 기능	64
라. 공기압 제어 알고리즘 개발	65
(1) 공기압 측정 및 송신주기	65
(2) 가속도 측정 및 차속 환산	65
(3) 공기압 제어 알고리즘	66
2. 결과 및 고찰	76
가. 타이어 시뮬레이터 성능	76
나. 타이어 회전속도 계측 성능	77
다. 공기압 제어 성능	77
라. 타이어 회전속도에 따른 공기압 송·수신 장치 성능	84
3. 요약 및 결론	86
제 5 절 능동형 공기압 제어 시스템 개발	87
1. 재료 및 방법	88

가. 농용 트랙터 적용을 위한 하드웨어 구성	88
나. 타이어 공기압 제어 시스템 설치	89
다. 제어 시스템의 모드 선정 및 설정 공기압 결정	91
(1) 최소 허용 공기압	9
(2) 하중과 속도에 따른 공기압	9
(3) 작업기 종류에 따른 공기압	9
(4) 제어 모드 및 설정 공기압	9
라. 견인동력차를 이용한 농용 트랙터 적용 적합성 시험	101
2. 결과 및 고찰	103
가. 능동형 타이어 공기압 제어 시스템의 제어 성능	103
(1) 작업 모드	103
(2) 주행 모드	105
(3) 비상 모드	107
(4) 수동 모드	107
나. 농용 트랙터 적용 적합성 확인	109
3. 요약 및 결론	111
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에 기여도	113
제 1 절 연도별 연구목표	113
1. 1차년도	113
2. 2차년도	114
제 2 절 평가착안점	115
제 3 절 연구개발목표의 달성도	116
1. 1차년도	116
2. 2차년도	116
제 4 절 관련분야에의 기여도	117
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	118
제 1 절 장래연구를 위한 제언	118
제 2 절 타 연구에의 활용 결과	118

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보	120
제 7 장 참고문헌	123

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구배경 및 필요성

최근의 차량 기술 동향은 전자 및 컴퓨터 제어기술의 급속한 발전으로 고전적 차량이 갖는 한계를 극복하기 위한 고성능화, 첨단화, 지능화가 주류를 이루고 있다. 특히 현가장치, 조향장치 및 브레이크 장치 등으로 구성되는 차량 새시 시스템은 그 중에서도 변화가 가장 급속하게 이뤄지는 분야이다.

승용 및 운반 작업용 차량의 주행장치에 사용되는 공기 주입 타이어는 포장의 노면진동을 완충시키고 작업에 필요한 견인력과 제동력을 제공하며 조향 시 차량의 안정성을 유지하는 역할을 수행한다. 일반적으로 타이어 공기압이 적정 공기압보다 높으면 차량의 조종 안정성이 향상되며 회전저항이 감소하고 연비가 증가하는 반면 승차감이 감소하고 또한 현가장치의 수명이 감소한다. 공기압이 낮으면 조향 시 회전저항이 증가하는 반면 승차감과 견인성능은 향상되나 연비가 감소한다.

미국 고속도로교통안전국(NHTSA, 2005)의 보고에 의하면 승용 및 상용차의 경우 일반적으로 규정 공기압보다 타이어 압력이 10 % 감소하면 타이어 수명은 17 % 감소하며, 연료 소비량은 1 % 정도 증가하는 것으로 알려져 있다. 또한 차량 고장의 26 %가 타이어 파손으로 인하여 발생하는데, 타이어 파손의 86 %는 부적정한 타이어 공기압이 원인인 것으로 확인되었다. 규정 공기압 이상 또는 미만의 타이어 압력은 마모를 가속화시키며, 이에 따라 차량의 제동 불량, 조향성능 및 안정성 감소 등을 초래한다.

따라서 타이어의 적정 공기압은 연료 소비율 뿐만 아니라 차량의 성능에 영향을 주는 변수이다. 운전자의 경험과 차량의 주행 조건 및 노면 상태에 따라 적절하게 타이어 공기압을 가변시키면 차량의 승차감 및 조종 안전성을 유지할 수 있다. 또한 의도하지 않은 공기압 손실에 대비하여 일정 수준의 공기압을 유지하는 장치는 부적정한 타이어 공기압으로 인한 차량 사고를 미연에 방지할 수 있는 안전장치의 역할을 수행할 수 있다.

주행조건과 노면상태에 따라 최적의 기동성과 조종성능 및 작업 성능을 발휘하도록 타이어 공기압을 자동으로 조절하는 기술은 북미 지역 및 유럽에서 일부 상용차량과 비포장 노면의 주행이 많은 군용 차량을 대상으로 개발되기 시작하였다. 그러나 이러한 기술은 외국에서도 일부 특수 목적의 승용 및 상용차량에만 제한적으로 응용되고 있을 뿐이며, 국내에서는 트랙터를 포함한 농업기계와 상용차량에 적용되고 있지 못한 실정이다.

우리나라 농업은 수도작을 근간으로 하므로 농용 트랙터를 이용한 경운, 정지, 운반, 승용 등

의 주요 농작업은 무논과 같은 연약 지반에서 이뤄지는 비중이 크다. 습답 연약지에서 농용 트랙터를 이용한 작업에는 타이어와 토양간의 접지면에서 발생하는 토양의 침하, 파괴 및 토양 다짐에 의하여 차량의 주행 및 견인 작업에 필요한 충분한 구동력을 발휘할 수 없는 경우가 수반된다. 이와 같은 경우 동력손실이 증가되어 농용 트랙터의 견인성능 및 기동성을 저하시키는 원인으로 작용한다. 또한 조향성능의 저하 및 토양다짐 효과의 가속화 같은 문제점을 수반하게 된다.

차량의 최적 성능 및 작업 효율 유지를 위한 적정 타이어 공기압의 중요성에도 불구하고 사용자의 인식 부족으로 타이어의 적정 공기압 관리가 이뤄지지 못하는 문제점이 대두되고 있다. 이규승(2001)의 적정 타이어 공기압에 관한 농민들의 인식조사 결과, 대부분의 농민들이 공기압에 대하여 무관심하여 정기적으로 공기압을 조정하는 경우는 거의 없다고 보고하였다. 또한 작업 중인 트랙터에 대한 타이어 공기압 조사 결과에 의하면 대부분의 경우가 적정 공기압보다 높게 나타났다으며, 좌·우 타이어 공기압의 차이는 대부분 10 % 이상이었고, 100 % 이상 차이가 나는 경우도 조사되었다.

일반적으로 타이어의 성능에 영향을 미치는 주요 인자로는 타이어의 형상, 타이어에 작용하는 동하중 및 타이어 공기압 등이 있다. 타이어의 형상은 작업자가 쉽게 변경할 수 없으며, 부가중량의 부착에 의한 트랙터 동하중의 증가는 견인력을 증대시키는 일시적인 효과는 있지만 상대적으로 운동저항도 함께 증가시키기 때문에 그 효과가 비교적 낮다고 할 수 있다. 따라서 트랙터의 사용 조건, 주행조건 및 노면상태에 따라 타이어 공기압을 능동적으로 조절하면 트랙터의 견인성능 및 조향성능의 향상과 효율 제고 측면에서 높은 성능을 발휘할 수 있을 것으로 기대된다.

제 2 절 연구목적 및 범위

본 연구는 타이어 공기압과 차량 기동성능, 조종성능의 상관관계 및 토양 다짐효과 분석에 대한 지금까지의 연구 결과를 토대로, 제어 모드 및 주행 속도에 따라 타이어 공기압을 능동적으로 조절하여 차량 성능을 제고할 수 있는 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 개발하고, 농용 트랙터에 장착하여 적용 적합성을 확인할 수 있도록 사용 조건에 따라 설정 공기압을 결정하여 개발된 제어 시스템을 완성하고 그 성능을 평가하기 위하여 수행되었으며, 구체적인 목적을 요약하면 다음과 같다.

1. 공기주입 타이어의 압력을 측정하고 무선신호로 변환하여 송·수신하는 공기압 측정 및 무선 송·수신장치를 개발하고 그 성능을 검증한다.
2. 타이어 시뮬레이터를 제작하고, 공기압 발생 장치, 무한회전형 공기압 공급 장치 및 제어 알고리즘을 포함한 타이어 공기압 제어 장치와 제어 알고리즘을 개발한다.

3. 주행과 작업, 비상 및 수동으로 제어 모드를 구분하고 구동륜의 동하중과 차량의 주행속도에 따라 공기압을 설정하는 방법을 개발하며, 설정 압력으로 타이어 공기압을 가변 제어할 수 있도록 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 완성하고 검증 시험을 통하여 시스템의 성능을 평가한다.

제 2 장 국내·외 기술개발동향

제 1 절 국내 기술개발동향

본 연구와 관련된 국내 기술개발동향에 대한 조사 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

○ 국내의 경우 차량의 기동성 및 조향 성능의 개선을 위한 지능형 타이어 공기압 조절 시스템 및 스마트 타이어와 관련된 차세대 타이어 기술은 한국타이어(주)와 금호타이어(주) 등의 국내 타이어 생산업체의 주도하에 기초 연구가 진행되고 있는 상황임

○ 국내 타이어 생산업체들은 향후 국내 차세대 타이어 시장의 선점을 위한 기술 개발의 일환으로 신소재 및 신기술을 이용한 Run-flat 타이어와 기존의 고전적 개념의 타이어를 뛰어넘는 신개념 타이어의 개발에 연구 인력과 비용을 집중 투자하고 있는 실정임.

○ 국내 업체의 경우 선진 기술 보유기업의 기술 수준과 연구 범위와 비교하여 아직까지는 연구 분야가 제한적인 실정임.

○ 국내 농용 트랙터 생산업체와 완성차 제조업체 및 관련 부품업체의 경우 타이어의 공기압을 조절할 수 있는 기술에 관한 연구를 진행하지 못하고 있는 실정이며 이와 관련된 기술은 타이어 공기압 모니터링이 가능한 제품과 관련되어 제한적으로 부분 적용되고 있는 실정임.

○ 국외의 경우와 비교하였을 때 농용 트랙터나 복합지형을 주행하는 특수목적의 상용차량(농용, 산업용, 군사용)과 관련된 타이어 공기압 조절 기술의 연구 개발은 타이어 공기압과 토양의 다짐 현상과 견인성능 및 조향성능과 차량 효율에 미치는 영향과 같은 기초 요인 연구와 관련하여 학계 및 유관 연구기관에 의하여 제한적으로 연구되고 있는 수준임.

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
한국타이어 (주) 금호타이어 (주)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신소재를 적용한 Run-flat타이어 개발 ○ 타이어 공기압 조절 장치의 필요성에 관한 제안 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Run-flat 타이어의 상용화
쌍용자동차 (주)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 노면 및 주행 상황에 따른 타이어 공기압의 모니터링 및 디스플레이 기술 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 뉴체어맨 모델에 모니터링 시스템 부착 시판
현대자동차 (주) 기아자동차 (주)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 차량의 주행 상황에 따른 타이어 공기압의 모니터링 및 디스플레이 기술 개발 (승용차) ○ 타이어 공기압 제어 시스템의 개발에 관한 선행 연구 수행 중 (상용차) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 오피러스, 제네시스 및 신형 에쿠스 일부모델에 모니터링 시스템 부착 시판
씨트론 (주)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 타이어에 개별 부착이 가능한 무선(RF-ID)형 타이어 공기압 모니터링 시스템의 연구 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 승용차용 타이어 공기압 모니터링 시스템(TPMS) 시판
성균관대학교	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농용 트랙터의 타이어 공기압이 토양 다짐에 미치는 영향에 관한 연구 수행 ○ 타이어 공기압이 견인성과 조향성에 미치는 영향에 관한 연구 수행 ○ 타이어 공기압 제어 시스템 개발 필요성 제안 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 타이어 공기압 제어 시스템에 관한 필요성 제안 (관련 기술의 개발 및 시제품 제작은 수행하지 않음)
산인자원부 교통안전공단	<ul style="list-style-type: none"> ○ 승용차 연료 절감 기법에 관한 연구의 일환으로 타이어 공기압이 승용 차량의 연료 절감에 미치는 영향 분석 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 승용차 연료 절감을 위한 적정 타이어 공기압 유지 중요성 및 방법 제시

제 2 절 국외 기술개발동향

본 연구와 관련된 국외 기술개발동향에 대한 조사 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

○ 국외의 경우, 차량의 기동성 및 조향 성능의 개선을 위한 지능형 타이어, 스마트 타이어와 관련된 차세대 타이어 기술 및 공기압 제어 기술에 관한 연구 개발이 해외 타이어 생산업체의 주도하에 집중적으로 육성 중.

○ 관련 기술 개발의 예는 Michelin Group(프랑스)의 Airless Tweel 이나 Bridgestone Co.(일본)의 Active Wheel 기술 등이 있음.

○ 타이어 공기압 조절 시스템(TPCS)기술은 북미 지역을 중심으로 일부의 트럭 버스와 같은 상용 차량 및 비포장 노면에서의 주행이 많은 군용 차량을 대상으로 최근에 연구가 진행되고 있음.

○ 기존의 기술은 도로에서 대형 트럭 타이어의 마일리지 향상이나 군용 및 특수 목적 차량의 비도로에서 안정성이나 견인성능 강화와 토양 견인력 강화를 통한 작업 능력 향상에 초점이 맞추어져 개발됨. 따라서 농용 트랙터에 이러한 기존의 기술을 적용하기 위한 구조적 변경 및 설계 요인의 분석에 관한 연구가 미비함.

○ 타이어 공기압 조절 기술과 관련하여 해외 상용차 생산업체에서는 특수 목적 차량의 타이어 공기압을 노면의 상태에 따라 실시간으로 조절함으로써 차량의 기동 성능 및 조향 성능을 향상시키고 주행성능을 개선하는 기술에 대한 연구가 진행 중.

○ 해외 타이어 생산업체의 경우 여러 유관 업체와 컨소시엄을 구성하여 주행 타이어 공기압을 제어할 수 있는 시스템을 개발하고 있으며 실용화가 일부 진행 중.

연구수행 기관	연구개발의 내용	연구개발성과의 활용현황
Michelin Group	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지능형 타이어 기술의 개발 ○ 신소재를 적용한 Run-flat타이어 개발 ○ 타이어와 휠의 조합을 탈피한 신개념타이어 기술 연구 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 공기를 주입하지 않는 신개념의 Airless Tweel의 개발
Bridgestone Co.	<ul style="list-style-type: none"> ○ 노면 및 주행 상황에 따른 타이어 공기압의 조절이 가능한 지능형 타이어 기술의 연구 개발 ○ 기존의 타이어에 능동제어 기술이 접목된 신개념 타이어 기술의 연구 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 타이어 공기압의 모니터링이 가능한 지능형 타이어 개발 ○ Active Wheel의 개발
SYEGON.	<ul style="list-style-type: none"> ○ 복합지형을 주행하는 특수 목적 차량의 견인 성능 향상을 위한 타이어 공기압 조절 시스템의 연구 개발 ○ 타이어 공기압 조절 시스템의 모듈화에 관한 연구 수행 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수동으로 공기주입 밸브를 조정하여 타이어 공기압을 제어하는 Kit 개발
IPW automotive GmBh	<ul style="list-style-type: none"> ○ 승용차량의 개별 차륜의 공기압 모니터링 기술 연구 개발 ○ 승용차량의 개별 차륜 공기압을 운전자의도에 따라 조절할 수 있는 기술의 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 승용 차량용 타이어 공기압 제어 장치 개발
DANA	<ul style="list-style-type: none"> ○ 군용 트럭에 장착을 목적으로 하는 타이어 공기압 조절 장치 연구 개발 ○ 군용 트럭의 개별 구동륜에 장착함으로써 비도로에서의 주행성능을 개선하고 연약지반의 노면 침하와 타이어 공기누설 및 펑크로 인한 주행 기능 상실을 방지하기 위한 시스템 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 군용 트럭에 적용 가능한 타이어 공기압 제어 시스템 개발

제 3 장 연구개발 수행내용 및 결과

제 1 절 문헌연구

1. 타이어 공기압 제어 시스템

타이어 공기압 제어 시스템은 노면 상황에 따라 최적의 차량 성능을 확보하기 위하여 타이어 공기압을 제어하는 시스템으로, 2차 세계대전 중 처음으로 그 개념이 소개된 이후 주로 구 러시아의 Kaczmarek 등(1984)에 의하여 연구 개발이 진행되었다. 이와 관련된 연구가 주로 구 러시아의 주도하에 이루어진 이유는 구 러시아의 도로 조건이 열악하였기 때문에 일반도로에서 노외 차량의 안정적인 견인성능 및 기동성능의 확보가 다른 나라보다 더욱 중요시되었기 때문이다. 이러한 기술은 일부의 트럭, 버스와 같은 상용차량 및 비포장 노면에서 주행이 많은 군용차량을 대상으로 하였는데, 포장도로에서 대형 트럭 타이어의 연비 향상이나 비포장도로에서 견인성능 개선을 통한 작업능력 향상에 주로 관심이 집중되었다.

Kaczmarek 등(1984)은 모든 바퀴 구동형 차량의 기동성을 개선하기 위하여 사용할 수 있는 시스템 중에 타이어 공기압 제어 시스템이 가장 효율적이라고 제안하였다. 또한 Lyne 등(1984)은 차륜에 걸리는 하중, 타이어 공기압과 적절한 엔진의 조작을 통하여 연료소비율을 감소시키고 견인효율을 증가시킬 수 있다고 보고하였으며, 이로부터 차량의 하중과 작업 포장의 토양조건에 따라 타이어의 공기압을 자동적으로 조절할 수 있는 타이어 공기압 제어 시스템 개발의 필요성을 강조하였다.

미국에서는 차량의 기동성을 개선하기 위한 타이어 공기압 제어 시스템은 1980년대 이전까지는 주요 연구 대상으로서의 가치를 인정받지 못하였다. 그러나 최근에는 바퀴 구동형 군사용 차량의 경우에 공기압 제어 시스템을 장착하는 것이 일반적이며, AM General, Oshkosh, Stewart Stevenson과 같은 제조사에서 생산되는 군용 차량 및 임업용, 산업용 트랙터 등에 공기압 제어 시스템을 장착하고 있다(Adams, 2002).

이러한 시스템의 상용화는 임업 분야에서 먼저 시작되었다. 미국 내 벌목 회사들이 상용 벌목 작업장에서 이루어지는 작업의 효율성에 타이어 공기압 조절이 미치는 영향을 검증하기 위한 연구를 후원한 결과, Brown & Sessions 등(1999)은 타이어 공기압에 따라 험로 지형의 운반로에서 벌목 운반 차량의 운반 속도는 저하되며, 부가적으로 운반 차량의 승차감 저하로 인한 작업자의 건강과 주의력 등에 미치는 신체 유해성으로 인하여 운반 차량을 좀 더 효율적이고 안전하게 운용할 수 있는 시간이 점차 줄어들게 되는 것과 같은 악영향이 발생할 수 있다고 보고하였다. 또한 바퀴 구동형 차량의 탄성계수가 증가하면 주행속도 및 주행성능이 개선되며, 타이어 공기압을

적절한 수준으로 유지하면 상용, 임업용, 군사용 차량의 주행 시 발생할 수 있는 견인력의 반작용으로 인한 도로의 파손을 최소화하여 도로의 유지보수 비용을 절감시킬 수 있게 하는 효과도 얻을 수 있다고 보고하였다.

농업기계에 타이어 공기압 제어 시스템의 적용에 대한 연구(Hassan, 1983)는 오래전부터 진행되었다. 그러나 메르세데스 벤츠사의 Unimog 트럭과 프랑스, 미국 등에서 생산된 애프터마켓용 상품에 적용된 일부 사례를 제외하고, 농용 차량을 생산하는 업체가 직접 공기압 제어 시스템의 상용화 연구 또는 제품화를 진행한 사례는 거의 찾아볼 수 없었다. 최근에 Adams 등(2004)은 농업용 트랙터의 타이어 공기압에 따른 성능개선 효과를 실험적으로 검증하였다. 시험은 농용 트랙터에 Syegon사에서 상용차용으로 제품화한 수동 공기압 조절장치를 장착하고 수행하였다. 시험의 구체적인 내용은 타이어 공기압 조절에 따른 운전자의 승차감 평가에 관한 것이었으며, 평균적으로 99%의 승차감 개선 효과가 있다고 보고하였다. 또한 견인성능 개선 및 주행차륜의 지반 침하 감소 효과를 실험적으로 구명하였다(Adams, 2002).

2. 타이어 공기압과 차량의 작업 성능

농용 트랙터는 비도로 또는 연약지에서의 주행, 견인, 운반 작업 등을 수행하기 위하여 설계된 다목적 차량이다. 도로를 주행하는 일반 차량과 달리 타이어와 토양 사이의 접지면에서 발생하는 토양침하 및 파괴 현상에 의하여 충분한 추진력을 발생시킬 수 없는 경우가 발생하며 타이어의 침하에 따른 운동저항의 증가로 인하여 작업 시 많은 동력이 소요되거나 최악의 경우에는 견인작업이나 주행이 불가능한 경우가 발생하기도 한다. 그러므로 트랙터의 경우에는 도로 주행을 목적으로 하는 일반 차량과 같이 전동라인의 효율을 높이는 것으로는 견인성능 개선 효과를 도모할 수 없으며 토양조건 및 타이어와 토양 사이의 상호작용에 대한 특성을 고려할 필요가 있다.

토양조건 및 타이어와 토양간의 상호작용에 의한 구름저항의 변화와 견인성능 개선에 관한 연구가 진행되어 왔으며, 그 결과 타이어 공기압 변화에 따른 트랙터의 견인성능 개선에 관한 다수의 연구 결과가 보고되었다. 타이어 공기압과 트랙터의 성능에 관하여 Taborek(1975)은 다양한 토양 상태에서 공기 주입 타이어의 공기압이 타이어의 구름저항에 미치는 영향에 대한 실험적 조사를 수행하였으며, 그 결과 경질 토양에서는 타이어의 공기압이 높을수록 구동륜의 구름저항이 감소하고, 연질 토양의 경우는 타이어의 공기압이 감소할수록 구름저항이 감소한다고 보고하였다. 또한 Burt(1982)는 타이어 공기압과 동하중의 변화가 차량의 총 견인력에 미치는 영향을 연구하기 위하여 10%와 20%의 일정한 슬립 조건에서 타이어의 공기압을 4단계(22 kPa, 55 kPa, 83 kPa, 110 kPa)로 조절하고 동하중을 0 kN에서 40 kN까지 증가시키면서 각 상황의 조합에 따른 총 견인력의 변화를 시험하였다. 연구 결과, 슬립율이 동일한 조건에서는 타이어 공기압이 낮아

질수록 그리고 동하중이 증가할수록 차량의 총 견인력은 증가하였다.

타이어 공기압은 위에서 언급된 바와 같이 차량의 작업 성능과 견인 성능을 개선하는 효과 이외에 차량의 승차감을 개선하는 효과도 있다. Kaczmarek(1984)은 타이어의 접지압이 낮아질수록 견인력을 개선하는 효과가 있으며, 타이어 공기압을 제어하면 험로에서 타이어의 적응성이 높아지기 때문에 차량의 성능과 승차감을 개선하는 효과가 있다고 보고하였다. 또한 작업자와 차량에 흡수되는 에너지의 감소는 작업자의 피로도와 차량 부품의 파손율을 감소시키는 효과가 있음을 언급하였다.

노지에서 농용 트랙터를 운용할 때 발생할 수 있는 토양다짐은 작물의 생육과 관련이 있다. 특히 근래에 이르러 대형 농기계의 사용빈도가 높아지면서 작물의 생육을 저해하는 과도한 토양다짐을 초래하는 경우가 많이 발생하고 있다. 일반적으로 과도한 토양 다짐은 토양 밀도의 증가와 공극률 감소를 야기하는 주요 원인으로, 토양의 수분 투과 특성을 저해시키며 산소공급을 어렵게 하기도 하고 토양 저항력을 증가시켜 작물의 생육을 저해하며 수확량 감소를 초래하기도 한다 (Gill, 1967; Reghavan et al., 1979).

일반적으로 토양다짐의 주요 원인은 트랙터와 같은 차륜형 농업기계의 공기 주입 타이어에 인가되는 동하중으로 알려져 있으며(Soane et al., 1980; Burt et al., 1982), 타이어 공기압과 작업기계의 통과 회수 등도 토양다짐에 영향을 미친다는 것이 Abebe(1989)의 연구에 의하여 보고되었다. 또한 Bailey 등(1988, 1991, 1996)은 타이어의 동하중, 공기압, 토양응력 및 밀도와의 상관관계에 대한 연구를 수행하였으며, 타이어 공기압을 변화시키면서 타이어에 접촉하는 토양응력과 토양밀도의 변화를 응력 측정기를 이용하여 측정하였다. 연구 결과, 타이어에 인가되는 하중을 일정하게 유지한 상태에서 타이어의 공기압을 증가시키면 토양속의 응력과 토양밀도는 증가하게 되고, 차량의 순 견인력과 견인효율은 감소하였다.

Raper 등(1993)은 레이디얼 타이어의 공기압과 동하중이 토양다짐에 미치는 영향을 다수의 실험을 통하여 구명하였으며, 타이어 공기압을 40 kPa까지 감소할수록 지면과 타이어 사이의 접촉 면적은 증가하였으며 토양다짐은 감소한다고 보고하였다. Ohmiya 등(1993)은 타이어 공기압이 토양 다짐에 미치는 영향을 조사하기 위하여 인공 토조에서 타이어가 지나간 위치에 따른 원추관 입저항 분포를 연구하였으며, 타이어의 공기압을 120 kPa에서 40 kPa까지 감소시켰을 때 토양과 타이어간의 접촉 면적은 최대 80 %까지 증가하였으며, 원추관입저항은 감소한다고 보고하였다. Way 등(1996)은 타이어 트레드 위치에 따른 토양응력의 크기를 응력측정기를 이용하여 측정하였으며, 토양응력과 토양 표면 침하는 타이어 공기압이 증가하거나 타이어에 인가되는 동하중이 증가함에 따라 커진다고 보고하였다.

Arvidsson 등(1996)은 토양 표면에서 토양응력과 토양다짐의 주요 변수로 타이어 공기압을 선정하여 압력 변화에 따른 상관관계를 구명하였으며, 공기압 증가 이외에 타이어 외형과 형식 등

도 토양응력과 토양다짐의 증가에 영향을 미친다고 보고하였다. 또한 일반적으로 레이디얼 타이어보다 바이어스 플라이 타이어가 동일한 공기압과 하중에서 좀 더 높은 토양응력을 보이는데, 이는 카캐스 강도가 높기 때문이라고 보고하였다. 또한 Ngunjiri 등(1995) 과 Voorhees 등(1990, 2000)은 견인력 증가와 관련이 있는 타이어와 토양 간의 접촉 면적은 토양다짐 효과에도 영향을 준다고 보고하였다. 접촉 면적이 넓어지면 평균 접촉 응력이 비례적으로 감소하는 것을 실험적으로 구명하였으며, 토양다짐이 작물의 생육에 좋지 않은 영향을 주기 때문에 적정 타이어 공기압은 토양다짐 효과를 감소시킨다고 보고하였다.

국내에서는 박원엽 등(2000, 2002)과, 이규승(2001)은 농용 트랙터의 적정 타이어 공기압에 관한 연구에서 인공 토조 및 노지에서 타이어 공기압에 따른 토양다짐 효과를 구명하였다. 이 연구에서 각각 세 수준의 타이어 공기압과 동하중의 변화에 따른 토양다짐 효과를 시험하였으며, 타이어 공기압의 증가 및 동하중의 증가는 모두 토양변형과 밀도를 증가시켰으며, 적절한 공기압 조절을 통하여 토양다짐 효과를 감소시킬 수 있을 것이라고 보고하였다.

트랙터의 최적 성능 및 효율을 유지하고 작물 생육을 저해하는 토양다짐 효과를 최소화하기 위하여 타이어 공기압을 적정 압력으로 유지하여야 하나, 적정 공기압을 상시 유지하지 못함으로써 주요 농작업 시 농용 트랙터가 최상의 성능 및 작업 효율을 발휘하지 못하는 문제점이 발생하고 있다. 실례로 김경욱 등(1997)의 연구에 의하면 농민들의 적정 공기압의 유지에 관한 교육 미비와 공기압 점검의 필요성에 대한 인식 부족으로 인하여 조사 대상 트랙터 중 대다수가 적정 공기압 수준 이상으로 과도하게 공기압을 유지하는 것으로 조사되었으며, 농작업기를 사용하면서 타이어의 적정 공기압 수준을 유지하지 못하여 최적의 견인성능을 발휘하지 못하는 문제가 발생할 수 있다고 보고하였다.

공기압을 적정 수준으로 유지함으로써 기대되는 효과에 관한 연구에서 적정 공기압의 유지가 트랙터의 성능 및 동력 효율의 개선에 영향을 미친다고 보고하였다. Zoz와 Tuner(1994)는 적절한 공기압을 유지한 레이디얼 플라이 타이어가 차량의 성능에 미치는 영향에 관한 연구에서 토양, 공기압 및 타이어의 조건에 따라 연약지에서는 타이어의 공기압에 따라 견인 효율은 35 % 이상, 동력 전달 효율은 10 % 이상 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 이 연구에서 타이어 공기압을 적절하게 유지하여 트랙터의 견인효율을 개선하는 방법이 엔진 성능, 유압 시스템과 파워트레인 등의 성능을 개선하는 것보다 더 유효한 효과를 거둘 수 있을 것이라고 보고하였다.

이와 유사한 시험은 Lancas 등(1997)이 수행하였으며, 일반적인 타이어 공기압보다 낮은 공기압 또는 적정 공기압을 유지하면 레이디얼 타이어의 견인성능을 개선할 수 있다고 보고하였다. 레이디얼 플라이 타이어와 바이어스 플라이 타이어를 대상으로 두 종류의 변속단수와 토양 조건에서 Sümer와 Sabanci(2005)가 시험을 수행하였으며, 바이어스 타이어와 비교하여 레이디얼 타이어에서 트랙터 효율은 평균적으로 3.44 % 증가하였으며, 연료소비량은 3.08 % 감소하였다고 보

고하였다.

제 2 절 이론적 배경

1. 무선통신 장치의 링크 예산

통신이 형성되는 송신 시작점에서 수신 끝까지 이르는 전체 경로를 통신 링크라고 한다. 통신 링크는 정보의 신호원으로부터 부호화 및 변조 과정, 송신장치와 채널, 신호 처리 단계를 포함한 수신장치와 정보가 최종 도착지에서 복원되어 사용되기까지의 모든 경로를 의미한다.

링크 예산(link budget)은 통신 링크를 전력 관점에서 분석하며, 통신 링크 상의 각 단계별 신호 전력 및 간섭 잡음 전력 등을 계산하여 전력의 흐름을 표시한 것이다. 링크 예산은 이득과 손실의 조합으로 이루어지며 송·수신 자원, 잡음원, 신호 감쇠와 링크를 거치는 과정에서 발생하는 효과들에 대한 자세한 배분 내역을 표시하므로 통신 시스템의 전체 흐름을 파악할 수 있을 뿐만 아니라(최영철 등, 2005), 통신 시스템 설계 과정에서 가장 중요한 기초 정보를 제공한다.

통신 링크의 궁극적인 역할은 송신신호를 얼마나 정확하게 수신하는가에 달려 있으며, 특히 디지털 통신에서는 비트 에러율(bit error rate)이 이러한 통신 링크의 성능을 나타내는 가장 기본적인 지표가 된다. 낮은 비트 에러율의 링크를 갖는 통신 시스템은 전송 전력을 높이면 목표 성능이 쉽게 구현되지만, 실제로는 부품을 통한 성능 구현의 한계와 해당 응용분야의 무선 송·수신 전파 규정 등의 제한을 가지고 있기 때문에 적당한 설계 범위 내에서 목표 비트 에러율의 성능을 포함한 통신 링크 설계 및 구현에는 많은 기술적인 노력이 필요하다.

가. 전송 신호의 품질에 대한 판단 기준

아날로그 파형을 전력 신호로 분류하는 아날로그 통신에서는 평균 신호전력 대 평균 잡음전력 비(S/N 또는 SNR)로 성능평가 기준을 규정한다. 디지털 통신에서는 SNR을 정규화한 비트 에너지 대 잡음전력 스펙트럼 밀도 비(E_b/N_0)를 사용한다. 여기에서 E_b 는 비트 시간과 신호전력의 곱이며, 평균 전송 전력을 전송 속도(bit rate)로 나누어 계산할 수도 있다. N_0 는 잡음전력을 대역폭으로 나눈 값이다. 무차원의 E_b/N_0 는 디지털 통신 시스템의 정량적인 성능평가 기준이다.

링크 예산은 전송 신호의 전력 관점에서 통신 링크를 분석하는 것이 일반적이지만, 링크 상에서 전송된 신호가 갖는 이득과 손실, 그리고 잡음의 영향을 고려하여 E_b/N_0 의 관점에서의 분석 방법도 많이 사용된다. 이러한 E_b/N_0 는 일반적인 디지털 통신 링크에서 가장 기본적인 내용이며, 전송 속도, 변조 방식, 코딩 방식 등에 따라 변할 수 있다.

나. 신호 대 잡음비

E_b 는 전송 신호의 비트가 갖는 에너지를 나타낸다. 타이어 공기압 송신장치가 1 mW (0 dBm)의 평균전력과 10 kbps의 전송속도로 신호를 전송하면 비트 당 에너지(E_b)는 10 nW이고, 이를 데시벨로 환산하면 -50 dBm이다.

N_0 는 잡음밀도를 의미하는 용어로, 전송 채널에 포함되는 전체 잡음의 크기를 나타낸다. 일반적으로 공기를 매질로 하는 무선 통신에서는 주파수 대역이 전송 채널에 해당되기 때문에 주파수 대역이 포함하는 모든 잡음의 크기를 주파수 대역폭으로 나눈 값으로 정의한다.

다. 비트 에러율

통신에서 비트 에러율은 신호의 품질을 판단하는 기준으로 통신 링크 예산 수립에 있어서 가장 기본이 된다. 비트 에러율은 전송 신호 비트가 갖는 에너지와 전송 채널이 갖는 잡음과의 관계를 나타내며, E_b/N_0 의 함수이다. 일반적으로는 통신 중 에러가 생긴 비트 수를 총 전송한 비트 수로 나눈 값을 의미하며, 10의 음수 승으로 표시한다. 비트 에러율은 패킷이나 데이터 전송 단위들이 통신 에러로 인하여 얼마나 자주 재전송되어야 하는지를 나타낸다.

2. 통신 링크

통신 시스템에서 일반적으로 링크가 포함하는 기본적인 세 가지 요소는 송신장치, 수신장치 및 채널로 정의한다. 채널이란 송신장치로부터 출력된 전파가 수신장치에 도달할 때까지의 전체 경로를 의미한다. 그림 2.1은 무선 송·수신 회로에서 송신장치로부터 출력된 전파가 무선구간을 통하여 수신장치에 입력될 때까지의 경로를 나타낸 것이다(윤지영, 2005).

수신 전력은 전파가 송신장치에서 출력되어 전송선, 안테나, 전파경로를 거쳐 수신장치에 입력되는 전력이며, 이러한 요소를 기준으로 송신 신호의 크기와 수신 신호의 크기와의 관계를 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$P_r = P_t + G_{at} - L_{ft} - L_{path} + G_{ar} - L_{fr} \dots\dots\dots (2.1)$$

- 여기에서, P_r : 수신전력 (received signal level)
- P_t : 송신장치 출력전력 (transmitter output power)
- G_{at} : 송신 안테나 이득 (transmitter antenna gain)
- L_{ft} : 송신 전송선 손실 (transmitter feeder loss)
- L_{path} : 경로 손실 (path loss)
- G_{ar} : 수신 안테나 이득 (receiver antenna gain)

L_{fr} : 수신 전송선 손실 (receiver feeder loss)

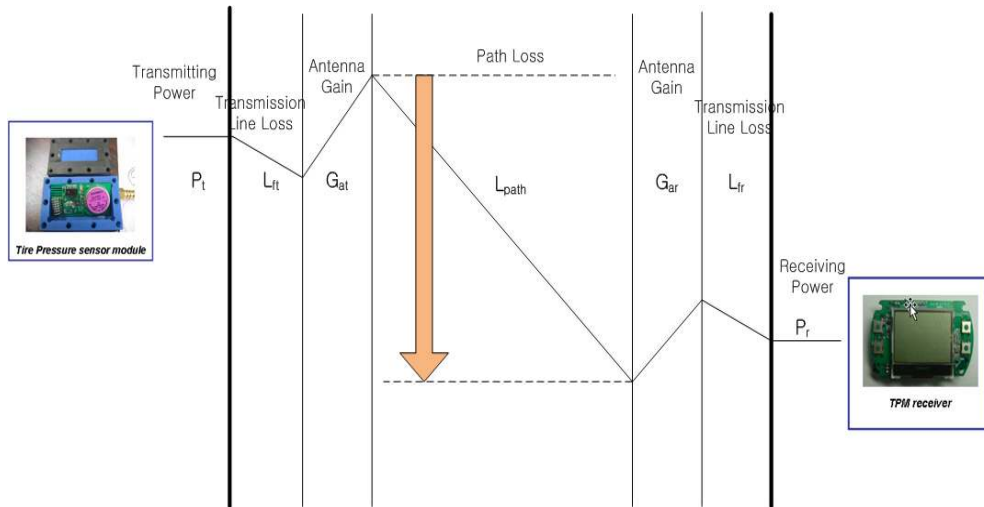


Fig. 2.1 Radio frequency link.

가. 송신장치의 전파밀도와 유효 등방성 복사 전력

송신장치는 기저 대역의 데이터를 생성한 후, 이를 무선 통신 대역으로 변조하고 증폭하여 안테나를 통하여 매질(일반적으로 공기) 상으로 신호를 전파하는 장치를 의미한다. 전송 전력 관점에서 송신장치에서는 전파 밀도와 유효 등방성 복사 전력(EIRP)을 고려한다.

일반적으로 송신장치의 전송 전력은 증폭기와 안테나에 의하여 결정되며, 송신장치의 전력을 나타내는 경우에는 일반적인 전력이 아닌 유효 등방성 복사 전력을 사용한다. EIRP는 전파밀도의 분자에 해당되며, 식 2.2와 같이 소스로부터 떨어진 거리와 관계없이 소스 자체가 발산하는 전파에너지를 표현한다.

$$\begin{aligned}
 EIRP &= \text{power of transmitter} \times \text{gain of antenna} \dots\dots\dots (2.2) \\
 &= P_t + G_{at} \text{ (dB)}
 \end{aligned}$$

나. 안테나 이득

안테나 이득이란 사용 안테나로 송·수신한 경우를 표준인 무지향성 안테나를 사용한 경우와 비교하여 같은 전계강도에서의 전력의 비를 dB 단위로 나타낸 것으로, 송신장치와 수신장치 양쪽 다 적용된다. 일반적으로 안테나 이득은 회로와 안테나 사이의 임피던스 정합에 따라 달라질 수 있다. 따라서 이 값은 수식으로 계산할 수도 있으나, 전파간섭을 받지 않는 전자파무반사실 내에 표준 안테나 및 측정기를 설치하여 실제로 측정하여 사용하기도 한다. 안테나 이득은 dBi 단

위로 표시한다. dBi 개념은 표준 안테나(가상의 등방성 안테나) 이득을 1배로 기준을 정하여 해당 안테나 이득을 계산하는 방법이다.

다. 열잡음

잡음이란 송신 중에 추가된 불필요한 신호로서 원래의 신호를 손상하거나 왜곡시키는 역할을 한다. 잡음은 수신장치의 오동작을 발생시키거나 원래 신호로 복호화를 불가능하게 하기 때문에 통신 시스템의 성능을 저하시킨다.

열잡음은 열이 발생하는 소자에 발생하는 잡음으로, 주로 저항체에서 발생한다. 열잡음은 도체 내에서 온도에 따른 자유 전자의 운동량 변화에 기인하기 때문에 온도에 대한 함수로 표현되며 주파수 스펙트럼에 골고루 분포하므로 흔히 백색 잡음이라고도 한다. 열잡음은 전자회로에서는 반드시 존재하므로 통신 시스템의 효율성에 대한 상한 값을 규정하는 척도가 되며, 수신 전력을 계산할 때 기본이 된다. 수신 전력은 안테나 입력단에 비하여 잡음지수만큼 수신장치 내부에서 발생한 잡음이 포함되어 출력단에서 신호 대 잡음비가 나빠지므로 잡음지수가 더해진다.

$$N = kTB \dots\dots\dots (2.3)$$

여기에서, N : 잡음 전력 (watt)

k : 볼츠만 상수 (1.38×10^{-23} J/°K)

T : 시스템 온도, 통상 290 °K로 가정함

B : 채널 대역폭

비트 에러율을 결정짓는 E_b/N_0 에서 분모 N_0 는 잡음밀도를 포함한다. 이러한 잡음은 항상 절대 온도 (0 °K) 이상인 조건에서 발생하게 되며 복사 에너지(전자기파) 형태로 존재한다. 따라서 잡음 밀도 N_0 는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$N_0 = kT \dots\dots\dots (2.4)$$

290 °K 인 상온의 조건에서 본 연구에서 개발한 타이어 공기압 무선 송·수신장치를 포함한 대부분의 통신 시스템에서 온도에 의한 잡음 밀도는 dB 단위로 -124 dBm / kHz 또는 -114 dBm / MHz의 값을 갖는다.

3. 경로 손실

무선 통신은 전자기파를 이용한 통신이다. 전자기파는 매질을 통과할 때 산란, 반사, 흡수 등

에 의하여 통신 링크의 전력관점에서 신호 손실의 결과로 나타난다. 이러한 경로 손실 (path loss) 은 자유공간 전파손실, 반사손실, 회절손실의 합으로 계산한다(Seybold, 2005).

차량의 차체 구조, 타이어 휠 형상 등의 특성이 타이어 공기압 송·수신장치의 무선 성능에 미치는 영향은 자유공간 손실과 타이어 회전, 차체 구조 및 주행에 의한 손실 등으로 요약할 수 있다.

가. 자유공간 손실

자유공간은 무선 전파에 있어서 흡수, 반사, 굴절, 또는 회절과 같은 방해요소가 없는 채널로 가정된다. 자유 공간 손실은 전파가 자유공간을 진행하면서 자연적으로 발생하는 손실로, 전송거리와 주파수에 영향을 받으며, 자유공간에서 전파(傳播)되는 전파의 강도는 거리의 제곱에 반비례하여 작아진다.

나. 장착 방향, 회전, 차체 구조 및 주행에 의한 손실

타이어 공기압 송신장치는 타이어의 휠에 설치되어 휠의 형상 또는 회전에 의한 송신장치 안테나 방향의 변화, 차량 구조 및 주행에 의한 송신 신호의 흡수 및 반사 현상에 의하여 신호 감쇠가 발생하는 특수한 환경에서 작동한다. 이러한 통신 환경은 통신 링크에서 운용되는 송·수신장치의 설계 과정에서 링크 예산을 수립하여 정상작동 여부를 예측하는데 가장 중요한 변수가 된다. 통상적으로 송·수신장치가 운용되는 환경에서의 채널 손실 예측은 이론적인 계산보다는 실험적인 접근을 필요로 한다.

제 3 절 공기압 측정 및 송·수신장치 개발

타이어 공기압 측정 및 송·수신장치는 공기압을 측정하고 송신하고자 하는 각종 정보를 정해진 규약인 데이터그램(datagram)으로 부호화하고 반송파주파수로 변조하여 송신 안테나를 통하여 전파(傳播)하는 역할을 수행하는 송신장치와, 수신된 전자기파 신호를 증폭하고 복조과정을 거쳐 데이터그램으로 복호화하여 무선으로 송신된 공기압을 확인할 수 있는 수신장치로 구성하였다.

타이어 공기압을 측정하여 무선으로 송·수신하는 장치는 차량의 복잡한 차체 구조 내·외부에 신호 전송 및 전원 공급용 케이블을 추가하여 포설할 필요가 없으며, 스트레인게이지와 앰프로 구성된 기존의 압력 측정장치에 비하여 상당히 저렴하게 장치를 구성할 수 있는 장점이 있다. 또한 압력, 온도 및 가속도 등의 물리량을 하나의 집적회로로 구현한 반도체식 센서는 이미 승용차 타이어의 공기압 경보장치에 적용되고 있어 부품의 신뢰성이 검증되어 있다. 그러나 금속 재질의

차체 구조는 무선 신호를 감쇠 또는 왜곡시킬 수 있으므로 송·수신장치의 개발에는 이를 극복하기 위한 노력이 필요하다.

무선 데이터 송·수신장치는 초기 설계과정에서 데이터의 원활한 전송을 위한 전송전력 결정 과정이 필요하다. 차량 내부의 운용 환경에서 통신 성능을 최적화하여 측정 공기압을 제어 시스템에 완벽하게 전달하는 기능은 시스템의 제어 성능 제고 측면에서도 반드시 구현하여야 한다.

송신장치는 차량의 타이어 휠에 장착되며 수신장치는 운전석 주위에 설치된다. 일반적인 통신 시스템에 비하여 공기압 송·수신장치의 무선통신 환경은 열악할 수밖에 없다. 따라서 무선통신 시뮬레이터는 장치의 개발과정에서 실제 작동 환경과 유사한 조건을 모사하여 장치의 작동상태를 확인하고 그 내용을 피드백하여 최적의 성능을 구현하기 위하여 필요한 장치이다.

본 연구에서는 차량의 타이어 공기압 제어 시스템에 필요한 공기압 측정 및 송·수신장치를 개발하기 위하여 통신 환경을 분석하여 링크 예산을 예측 및 실험적으로 구명하였으며, 이에 따라 원활한 데이터 통신이 가능한 송·수신장치의 설계 기준을 확립하였다. 열악한 무선 환경에 대한 영향을 예측 및 검증하기 위하여 무선통신 시뮬레이터를 개발하였으며, 송·수신장치의 성능 개선 및 검증에 활용하였다.

1. 재료 및 방법

가. 링크 예산에 의한 공기압 측정 및 송·수신장치 설계

타이어 공기압 측정 및 송·수신장치의 설계과정에서 링크 예산의 수립은 송·수신장치의 전송 전력을 결정하는 중요한 과정이다. 통신 장치의 설계가 완료되면 각 단계별 이득 및 손실이 결정되고, 이를 바탕으로 링크 예산이 수립되면 통신 장치의 목표 비트 오류 확률에 따른 최소 전송 전력이 결정된다. 일반적으로 무선자원을 활용하는 송신장치의 설계과정에서는 전파 법규 내에서 형식 승인을 획득할 수 있는 허용 범위 내에서 송신전력의 한계를 확인하여야 하며, 이에 따라 적용이 가능한 부품을 선정하여야 한다.

무선통신에서 송신장치와 수신장치를 연결하는 전파 매체 또는 전기적인 경로를 채널이라고 한다. 송·수신장치는 포장 또는 비포장도로에서 주행하는 차량의 내부 환경에서 무선 통신을 수행하기 때문에 발생할 수 있는 전파의 손실 요인을 고려하여 설계하여야 한다. 송신장치는 타이어 휠에 장착되어 회전하므로 송신 안테나의 복사 패턴이 연속적으로 변하며 차체 구조 및 주행에 의하여 전파의 반사, 흡수, 회절 등에 의한 채널 손실이 발생한다.

타이어 공기압 측정 및 송·수신장치의 성능은 데이터 프레임의 길이, 한 패킷당 프레임 수, 데이터 패킷의 전송속도, 변조방법, 송신 주파수, 송신전력, 안테나의 위치 및 이득, 수신 장치 감도, 차량 내부 전자기장의 간섭 등의 다양한 파라미터에 영향을 받는다(Vikas et al., 2007). 송·수신

장치가 특수한 환경에서 원활하게 작동하도록 하기 위하여 초기 설계과정에서 송신장치의 허용 전력과 채널에 의한 손실을 계산 및 예측하고 목표 송·수신 성공률을 확립하여 수신 장치 성능을 검증하는 일련의 작업이 선행되어야 하며, 이는 개발된 장치가 차량에 장착되어 최적의 성능을 구현하도록 하기 위한 필수 요건이다.

(1) 송신장치의 허용 전력

무선 통신에서의 기저대역(baseband) 신호는 보내고자 하는 정보가 무선 통신에 사용되는 주파수 대역폭에 맞게 가공된 형태를 의미한다. 대부분의 국가는 제한된 전파자원을 보호할 목적으로 무선 통신의 종류에 따라 사용할 수 있는 주파수와 대역폭을 정해놓고 있다.

ISM 대역은 산업(industrial), 과학(scientific), 의료용(medical) 기기에서 사용 가능한 주파수 대역으로, 별도의 허가가 불필요한 소출력 무선기기들이 많이 사용하고 있다. 국내에서는 타이어 공기압 무선 전송에 433.92 MHz의 주파수를 250 kHz이내의 대역폭 내에서 사용하도록 허가하고 있다. 이러한 대역폭의 제한은 보내고자 하는 정보의 전송 속도(bit per second)의 한계를 결정짓는 요소로 작용한다.

본 연구의 타이어 공기압 측정 및 송·수신 장치 승용차 및 상용차에 적용되는 ‘타이어 공기압 모니터링 시스템’과 같은 무선 규정 기준을 적용하였다. 국내에서는 방송통신위원회에서 공고한 ‘차량용 타이어 공기압 경보장치 (TPMS) 형식 등록’ 규정이 제정되어 있다. 규정에는 자동송신 관련 듀티 사이클, 공중선 절대이득을 포함한 복사 전력 (ERP) 및 스푸리어스 영역에서의 불요발사에 관한 조건을 규정하고 있으며 그 내용은 그림 3.1과 같다.

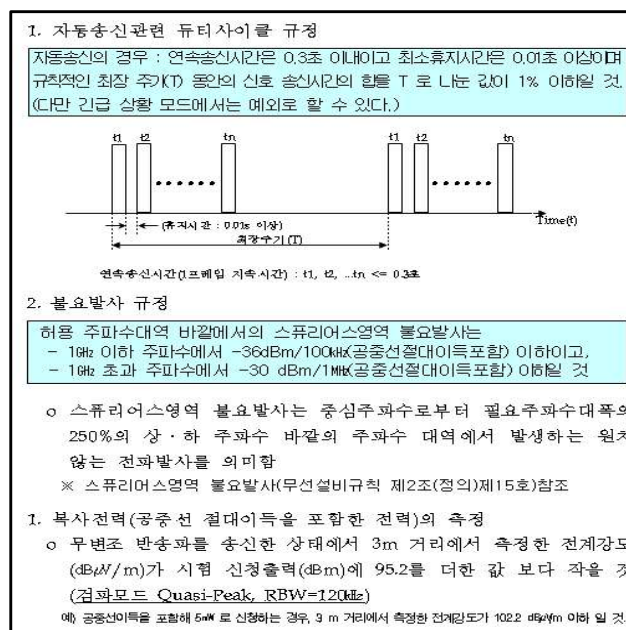


Fig. 3.1 Regulations of radio wave for tire pressure monitoring system.

(2) 채널 손실

승용 및 상용차 등의 작업 및 운반차량에 장착하여 타이어 공기압을 측정하고 무선으로 송·수신하는 장치의 개발에서 무선 통신의 링크 예산 수립에 필수적인 채널 손실은 실험적인 방법을 사용하거나 예측을 통하여 그 값을 미리 계산하여야 한다. 통신 링크를 구성하는 송신장치의 송신전력 등은 정부에서 허가된 전파 법규 기준 이내의 제한된 범위에서 구현해야 하는 제약조건을 갖고 있다. 주어진 무선 통신 환경에서 안정적인 통신을 수행할 수 있는 조건을 확보하고 있는지 확인하기 위하여 채널 손실을 실험적으로 측정하였다. 채널 손실 측정 결과를 송·수신 장치 개발 과정에 반영하여 손실을 가능한 한 줄일 수 있도록 부품 배치, 기구물 제작 등의 설계 기준을 확립하였다.

송신장치는 타이어 휠에 장착되어 운용된다. 휠이 금속성 재질이므로 송신 안테나 주위는 전파 전송에 열악한 환경이며, 송신 안테나의 복사 패턴, 송신장치의 장착 위치와 장착 방향은 수신장치 수신 전력에 영향을 줄 수 있다. 차량의 차체 구조는 대부분 철판 및 강재 등의 금속으로 구성되어 있어 전파 송·수신 환경에 결정적인 영향을 준다. 송신장치가 장착되는 휠이 주행 중에 회전하므로 내부의 송신 안테나 방향은 연속적으로 변하며, 이에 따라 안테나의 복사 패턴을 이론적으로 정형화된 패턴으로 예측하기는 어려운 상황이다. 이러한 변수들이 개별적인 형태로 작용하거나 복합적으로 영향을 주기 때문에 채널 손실을 측정하고 이를 최소화 하도록 장치의 목표 성능을 설정하여야 한다.

(3) 목표 송·수신 성공률

목표 송·수신 성공률이란 통신 링크의 수신 장치 수신된 신호의 품질을 나타내는 척도이다. 디지털 데이터 통신의 경우에는 일반적으로 비트 에러율을 사용하기도 하나, 본 연구에서는 프레임 에러율과 패킷 에러율을 기준으로 사용하였다. 타이어 휠에 장착된 수신 장치 고유 번호, 공기압, 온도, 가속도 및 에러 체크 바이트 등을 포함한 하나의 완전한 데이터 정보를 프레임 또는 데이터그램이라 한다. 패킷은 송신장치에서 데이터를 전송할 때 동일 프레임을 일정한 시간 간격으로 연속적으로 송신하는 형태를 의미하며, 본 연구에서는 송신장치의 소비전류를 고려하여 4개의 프레임을 하나의 패킷으로 구성하였다.

기존에 상용화가 완료되어 승용차에 적용중인 타이어 공기압 모니터링 시스템(tire pressure monitoring system)은 제조업체에서 통상적으로 50 % 이하의 프레임 에러율 또는 10 % 이하의 패킷 에러율을 기준 규격으로 제공하고 있다. 본 연구의 타이어 공기압 송·수신 장치 목표 송·수신 성공률도 이 기준으로 설정하였다.

나. 공기압 측정 및 송신장치 개발

무선 데이터 통신에서 송신장치는 그 순서에 따라 송신하고자 하는 물리적 신호를 전기 신호로 변환하여 기저대역 신호를 생성하고 변조 과정을 거쳐 전파(傳播)하는 역할을 수행한다.

본 연구에서 개발한 공기압 측정 및 송신장치는 압력, 온도 등을 측정하는 센서 모듈, 센서로부터 물리적 데이터를 측정하여 무선 통신이 가능하도록 규정된 데이터그램으로 변환하고 작동 알고리즘에 따라 송신장치의 전체 작동을 제어하는 마이크로컨트롤러, 데이터를 무선 송신이 가능하도록 변조하는 변조기, 안테나, 그리고 송신장치의 각 부품에 전원을 공급하는 배터리로 구성하였다. 그림 3.2와 그림 3.3은 공기압 측정 및 송신장치의 구성이다.



Fig. 3.2 Transmitter.

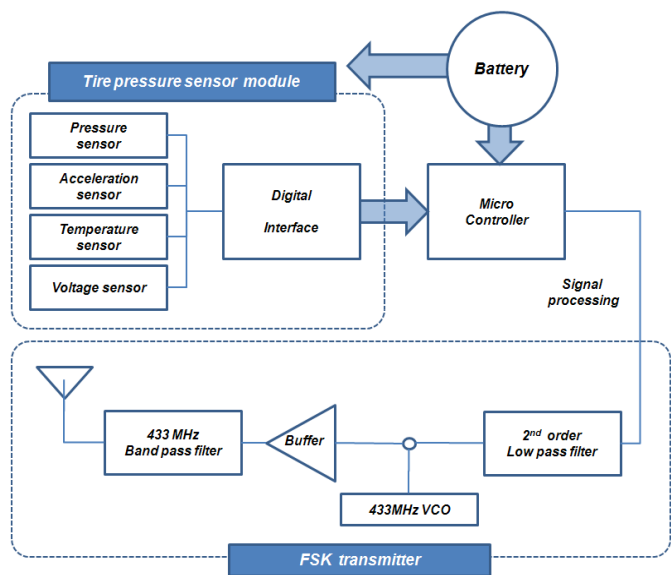


Fig. 3.3 Block diagram of transmitter.

(1) 센서 모듈 및 마이크로컨트롤러

타이어 공기압을 측정하기 위한 센서 모듈은 압력, 온도 및 가속도 센서 소자가 하나의 모듈로 구성되어 있는 부품으로 Infineon사의 SP30(T)를 사용하였다. 모듈 내부에는 반도체 소자를 이용한 피에조 저항 방식의 소자를 휘스톤브리지 회로로 연결한 구조가 단일 칩 형태로 구성되어 있다. 또한 칩 내부에는 온도 및 가속도 측정용 소자가 같이 내장되어 있어 송신장치의 크기를 소형화 할 수 있으며, 기존의 스트레인게이지를 측정소자로 사용하는 압력센서에 비하여 저렴하고, 신호처리회로가 자체 내장되어 있기 때문에 회로 구성도 단순화할 수 있는 장점이 있다. 표 3.1에 센서 모듈의 개략적인 명세를 정리하였다.

Table 3.1 Specifications of SP30(T)

Measurement	Min.	Max.	Error
Pressure	0 kPa	350 kPa (800kPa)	± 7 kPa @ 0 to 50 °C
Temperature	-40 °C	125 °C	± 3 °C
Acceleration	-12 g	115 g	± 18.75 %
Battery voltage	1.8 V	3.6 V	± 100 mV

마이크로컨트롤러는 SP30(T)에 내장되어 있는 RISC(reduced instructions set computer) 형태의 8비트 마이크로컴퓨터를 사용하였다. CPU는 필립스사의 2세대 저전력 8비트 마이크로컴퓨터로, MRK2 Core를 기반으로 설계되어 있다. 그림 3.4는 SP30의 내부 구조를 나타낸 개략도이다.

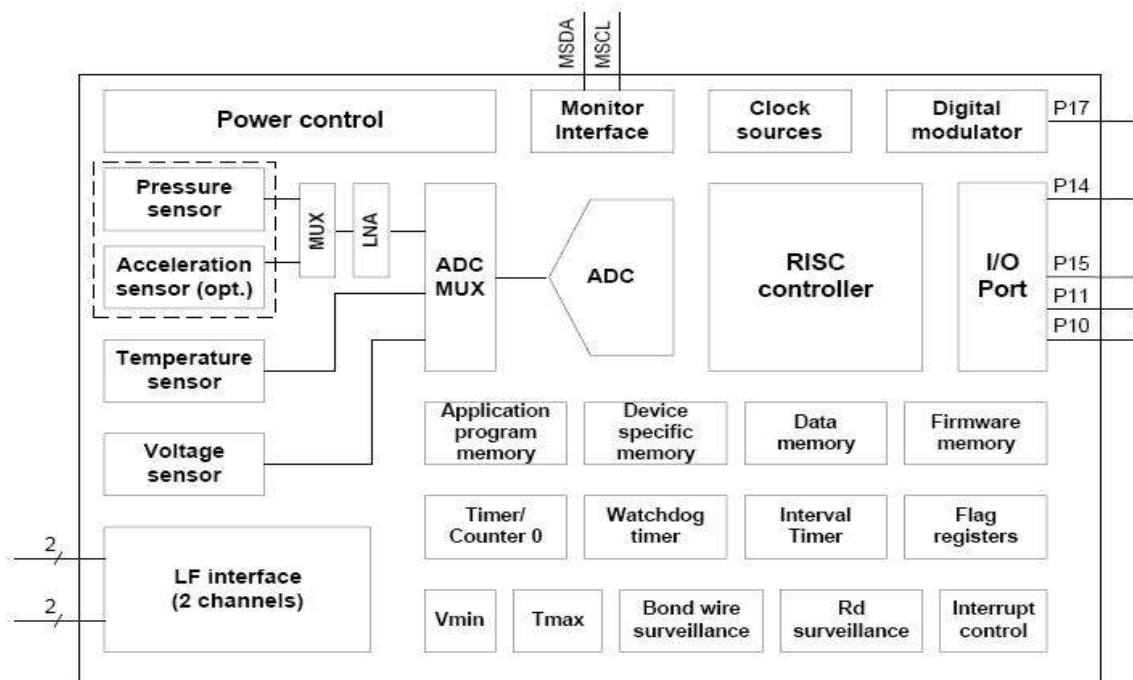


Fig. 3.4 Structure of micro-controller inside transmitter.

마이크로컨트롤러는 각각의 센서 모듈과 내부적으로 규정된 프로토콜을 이용하여 프로그램을 작성하면 사용자가 원하는 측정 정보를 얻을 수 있다. 수집된 정보를 송신장치를 이용하여 수신장치 전송하는 데이터그램은 통신 환경을 고려하여 상호간에 약정된 형태로 개발하기 위하여 마이크로컨트롤러의 펌웨어를 별도로 개발하였으며, 그 구체적인 기능은 다음과 같다.

① 부호화

부호화(encoding)란 데이터 전송을 위하여 0과 1의 신호를 특정한 부호들의 나열로 그 형태를 바꾸는 것을 의미하며, 일반적인 통신 분야에서는 주로 맨체스터 코드(manchester code)를 사용한다. 맨체스터 코드는 각각의 데이터 비트들이 0과 1을 표현함에 있어서 전압 위상 변화를 갖는다. 이러한 위상 변화를 이용한 코딩 방식은 데이터 복호화(decoding) 시 동기화 신호를 코딩 방식 자체가 제공할 수 있는 특징 때문에 시간 지연에 의한 타이밍 에러 즉, jittering을 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 연구에서 개발한 무선 송·수신 장치 적용한 부호화 방법은 맨체스터 코드를 사용하였으며, falling edge를 1로 정의하였다.

② 에러 체크

통신 시스템의 데이터 전송 과정에서 발생하는 오류를 검출하기 위한 방법에는 패리티 비트 검사, 바이트 총합, 주기적 덧붙임 검사(CRC, cyclic redundancy check) 등의 방법으로 분류하는데, 본 연구에서는 CRC 방법을 사용하였다. 이 방법은 송신 측에서 데이터를 블록으로 나누고, 각 블록 뒤에 2진 다항식의 특수 계산에 의하여 얻어진 순환 부호를 여분으로 붙여서 전송하면, 수신 측에서도 동일한 계산에 의하여 같은 순환 부호가 얻어지는지의 여부로 전송 오류의 유무를 검사하는 방법이다. 이 방법은 패리티 비트나 바이트 총합 등의 방법보다 정교하므로 오류 검출 능력이 뛰어나고, 회로 구성의 경우 부호기나 복호기의 오류 검출 회로가 간단하여 X-모뎀이나 커밋 등의 통신 프로토콜에서 사용되고 있다.

CRC는 일종의 계산 과정으로, CRC 알고리즘에 사용되는 데이터는 이진수로 변환되며 전체 데이터 또한 특정한 형태의 다항식으로 나눗셈 계산이 수행된다. 이 나머지 값은 전송하고자 하는 정보의 맨 끝에 붙여지게 된다. CRC 체크섬(checksum)이 덧붙여진 정보를 수신하는 수신 장치 송신장치가 CRC 체크섬을 만들기 위하여 사용했던 동일한 다항식을 이용하여 전체 정보를 나누는 과정을 동일하게 반복하며, 결과적으로 남은 나머지가 0이면 송신기가 보낸 정보가 올바른 정보라고 판단하고, 0이 아니면 전송 과정 중 데이터 오류가 발생한 것으로 판단한다.

본 연구에서 개발한 타이어 공기압 무선 송·수신장치에는 MSB를 먼저 보내는 신호 전송 방법을 취하고 있으며, generating polynomial로 0x07을 사용하는 CRC-8-ATM 방식을 사용하였다.

③ 데이터그램 생성

송신장치에서 수신 장치 전송하는 데이터는 상호간에 약정된 형태로 가공되어야 한다. 데이터그램은 송신장치의 기본정보를 포함한 전송 데이터의 완전한 정보 구조를 의미한다. 본 연구에서

개발한 데이터그램은 각각의 송신장치가 내장하고 있는 고유 ID 바이트, 측정된 압력, 온도, 가속도 정보 및 CRC 체크섬 등을 포함하며, 구체적인 구조는 그림 3.5와 같다. 일반적으로 통신 시스템에서는 정보 전달의 오류를 줄이기 위하여 동일한 데이터그램을 여러 번 반복 전송하고, 에러 체크 기능을 이용하여 정상적으로 수신된 데이터그램을 확인한다.

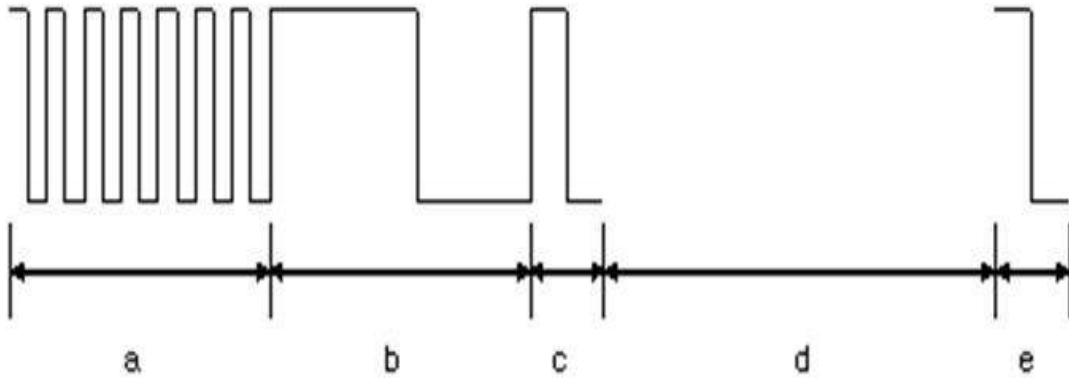


Fig. 3.5 Structure of datagram.

- A : Preamble (high 0.052 msec, low 0.052 msec)
- B : Synchronization signal (high 0.4 msec, low 0.3 msec)
- C : Start bit (high 0.052 msec, low 0.052 msec)
- D : Data bytes {ID(3 bytes), pressure(1 byte), temperature(1 byte), acceleration(1 byte), CRC-8(1 byte)}
each high tick and low tick of bit 0.052 msec
- E : Stop bit (high 0.052 msec, low 0.052 msec)

(2) 변조기

특정한 주파수에 신호를 실어 보내기 위해서 주파수 성분을 갖는 전자기파가 필요하며, 이를 반송파라고 호칭한다. 변조는 보내고자 하는 기저대역 신호에 따라 반송파에 변화를 주는 과정을 의미한다. 일반적으로 반송파의 진폭, 주파수, 또는 위상에 변화를 주어 송신하고자 하는 기저대역 신호를 표현한다.

일반적으로 무선 통신에서는 진폭 변조(ASK) 또는 주파수 변조(FSK)를 사용하는데, 타이어 공기압 송신장치와 같이 통신 링크의 채널에 의한 손실의 변화가 큰 무선 통신 장치의 경우에는 주파수 변조 방식이 좀 더 유리하므로 본 연구에서는 이 방식을 채택하였다. 변조기는 기저 대역 신호의 진폭, 주파수와 위상을 고주파의 반송파 신호로 변경시키기 위하여 사용하는 소자로, 본 연구에서 개발한 송신장치에는 VCO(voltage controlled oscillator)와 PLL(phase locked loop)이 자체 내장된 Melexis사의 RFIC를 사용하였다.

(3) 송신 안테나

기본적으로 입력포트가 하나뿐인 안테나는 입력 반사계수를 의미하는 S11값만 나타나며 특정한 주파수에서 공진하는 특성을 갖는다. 즉, S11값이 낮아지는 주파수에서는 안테나로 입력된 신호 전력이 반사되어 되돌아오지 않고 최대한 안테나를 통해 외부로 복사된다는 의미를 나타낸다. 안테나의 근본적인 원리는 공진에 의한 에너지 전달이므로 그 크기는 통신하고자 하는 전자기파의 주파수에 의존한다.

본 연구의 송신장치 안테나는 헬리컬 형태의 안테나를 개발하여 사용하였다. 헬리컬 안테나는 금속선을 나선형 구조로 감아서 소형화시킨 형태로 제작하는데, 직선 방향의 수직면에서 복사 패턴이 최대가 된다. 일반적으로 이 안테나는 같은 주파수에서 다이폴 또는 모노폴 안테나보다 소형으로 제작할 수 있으며, 헬릭스(helix, 나선형을 이루는 원형의 지름)를 적용 파장보다 훨씬 작은 조건으로 설계할 수 있는 장점이 있다.

송신장치의 송신주파수의 파장의 길이(λ)는 69.3 cm이므로 안테나는 파장의 1/4 길이로 설계하였다. 안테나의 재료는 두께가 1 mm인 니켈 재질의 금속선을 사용하였으며, 안테나는 지름 10 mm의 나선형 구조로 대략 6.5 바퀴를 꼬아서 제작하였다. 그림 3.6에 개발된 송신 안테나의 외형을 나타내었다.



Fig. 3.6 Helical antenna for transmitter.

(4) 공기압 교정

압력센서 모듈에서 측정된 공기압의 정확도는 한국표준과학원의 압력센서 교정 표준(KMIRA-CM-052) 방법에 의거하여 그림 3.7과 같은 압력 교정장치를 구성하여 평가하였다. 공기압 측정 정확도는 버퍼탱크 내부의 압력을 정밀 압력 교정기로 변화시키면서 교정기에 표시되는 압력과 개발한 센서 모듈에서 측정된 공기압을 비교하여 평가하였다.

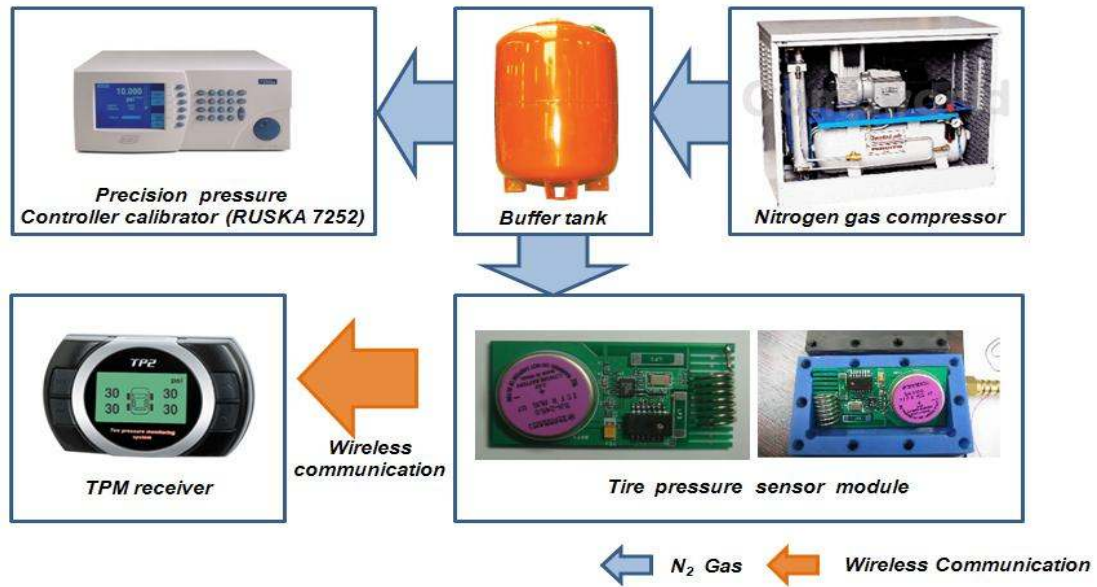


Fig. 3.7 Pressure calibration system.

(5) 송신장치의 무선 특성

개발된 송신장치의 무선 특성은 기저대역 데이터, 반송파주파수, 송신출력, 대역폭 및 반사계수 등으로 표현할 수 있으며, 오실로스코프, 스펙트럼 분석기, 네트워크 분석기 등의 무선통신 장치용 계측기를 사용하여 측정하였다. 외부 환경 잡음의 영향을 배제하기 위하여 간이 전자파무반사실에서 측정 작업을 수행하였다. 송신장치의 무선 특성 측정점을 그림 3.8과 같이 인쇄회로기판에 표시하였다.

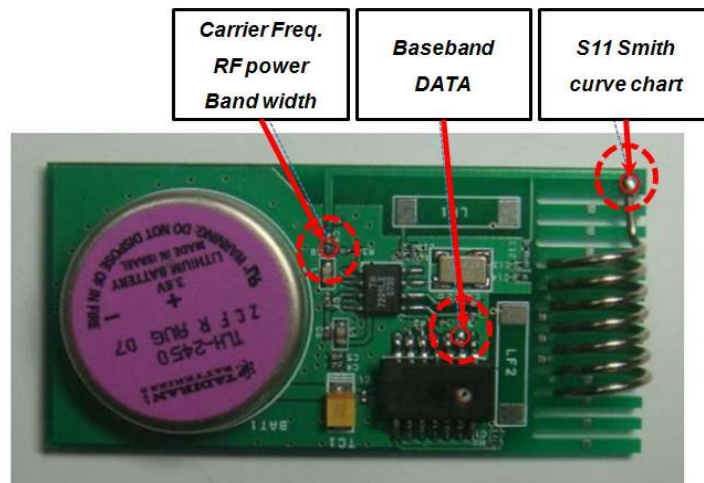


Fig. 3.8 Test point of RF parameters in PCB

다. 타이어 공기압 수신 장치 개발

본 연구에서 개발한 수신 장치 수신 안테나, 저잡음 증폭기, 대역 통과 필터, 복조기로 구성되

는 무선 수신부와 마이크로컨트롤러 및 입출력 장치로 구성된 데이터 처리부로 나누어진다. 수신 장치 구성은 그림 3.9 및 3.10과 같다.

(1) 수신 안테나

수신 안테나는 송신 안테나와 마찬가지로 헬리컬 안테나를 사용하였다. 안테나의 길이는 파장의 1/4인 69.3 cm를 선정하였으며, 지름 10 mm의 나선형 구조로 제작하였다. 차량의 차체 진동과 노면의 진동에도 견딜 수 있도록 인쇄회로 기판에 안테나는 그림 3.9의 좌하단에 나타낸 것과 같이 플라스틱 재질의 원통을 이용하여 고정하였다.

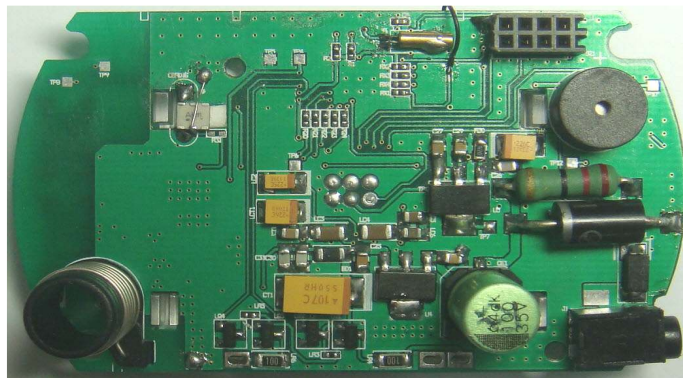


Fig. 3.9 Receiver.

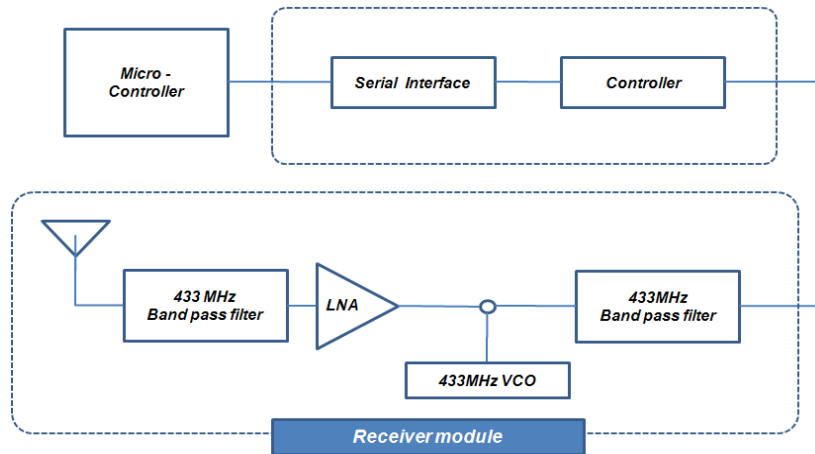


Fig. 3.10 Block diagram of receiver.

(2) 저잡음 증폭기 및 대역통과 필터

공기 중에 존재하는 전자기파는 수신 안테나에 의하여 도선 상의 전기적 신호로 변환된다. 안테나에서 수신된 전력은 감쇠 및 잡음의 영향을 받는 매우 낮은 전력 레벨이므로 저잡음 증폭기를 이용하여 증폭하였다. 전파환경에서 다양한 잡음이 포함되어 신호가 수신되므로 잡음을 최소

화하면서 원하는 신호만 증폭할 수 있도록 저잡음 증폭기는 잡음지수가 낮아지도록 동작점과 임피던스 정합점을 잡아서 설계하였다.

잡음지수는 능동부품이나 회로에서 증폭이나 변환과정을 거치면서 발생한 열잡음에 의하여 회로를 통과하는 신호에 부가된 잡음의 정도를 나타낸다. 저잡음 특성을 나타내는 수신 장치 구현하기 위하여 낮은 잡음지수 특성을 갖는 트랜지스터를 사용하고 저항 등의 열 잡음 소자를 적게 사용하면서 동시에 낮은 전류소비 특성을 갖도록 회로를 설계하였다. 본 연구에서 개발한 수신 장치 무선 송신 데이터와 잡음을 구별하여 잡음을 최소화하고 필요 신호만을 증폭하는 저잡음 증폭기와 대역통과 필터를 그림 3.11과 같이 안테나와 복조단 사이에 설치하였다.

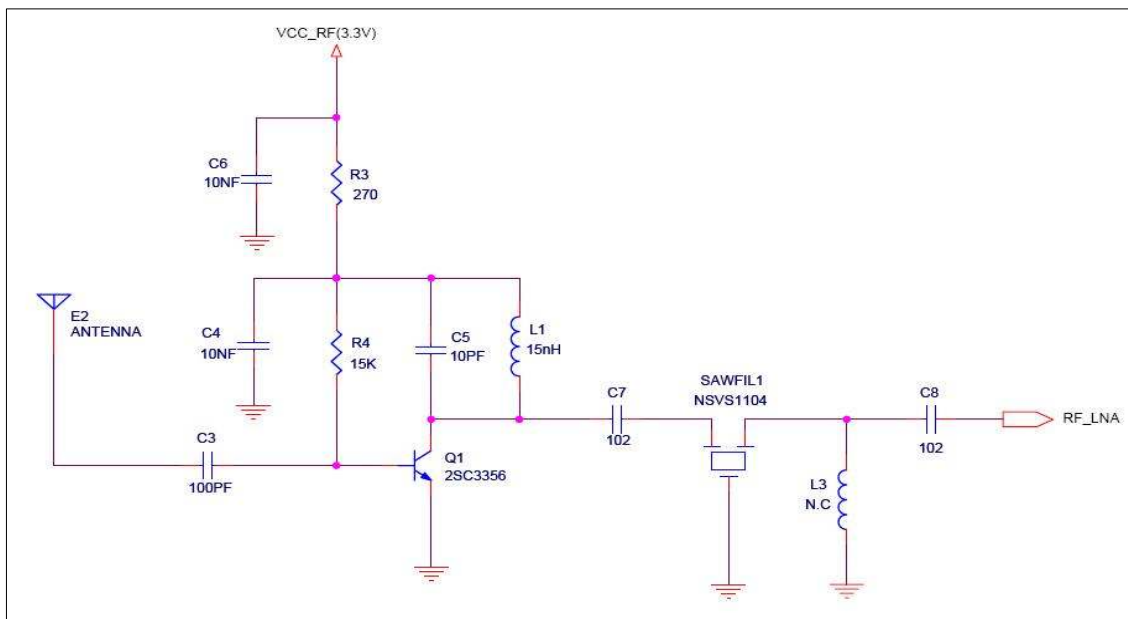


Fig. 3.11 Low noise amplifier and band pass filter.

안테나로부터 수신된 신호는 저잡음 증폭기를 이용하여 15 ~ 20 dB 정도 증폭하였으며, 반송파에 혼재된 잡음 성분은 대역통과 필터를 이용하여 제거하였다. 인덕터와 커패시터의 조합으로 구성하는 대역통과 필터는 삽입손실에 의한 수신신호의 감쇠가 발생하며 광대역폭에 의한 불필요한 신호의 유입이 발생하여 신호 대 잡음비가 저하되므로, 본 연구에서는 SAW 필터를 이용한 대역통과 필터를 개발하였다. SAW 필터는 압전현상을 이용한 소자로, 30~2,500 MHz 대역에서 주로 사용하는 무선통신 부품이다. 개발된 대역통과 필터의 특성은 네트워크 분석기를 이용하여 433.92 MHz를 중심으로 4 MHz 주파수 폭 이내에서 전달계수(S21)를 측정하였으며, 대역폭이 800 kHz임을 확인하였다. 개발된 대역통과 필터의 특성은 그림 3.12와 같다.

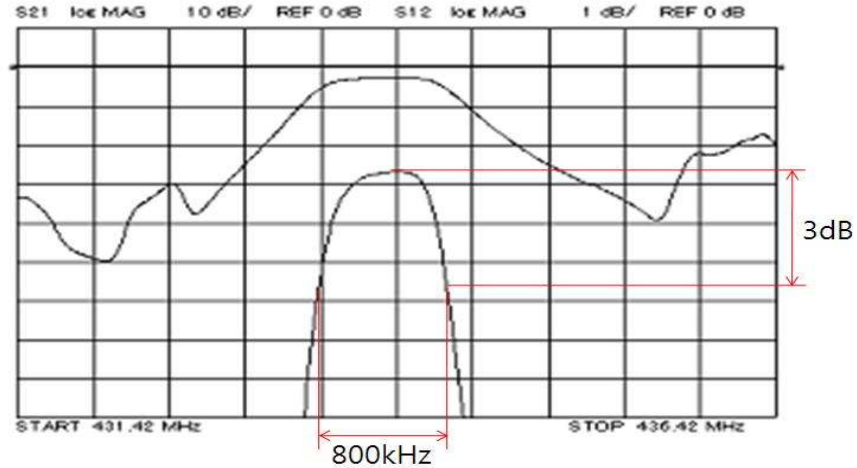


Fig. 3.12 Frequency response curve in narrow band.

(3) 복조기

복조는 반송파로부터 송신기에서 송신한 원신호를 추출하고 반송파를 제거하는 과정이다. 진폭 변조에서는 진폭의 변화만이 추출되고, 주파수 변조에서는 주파수의 변화만 추출된다. 본 연구의 수신장치에는 주파수 변조방식을 적용하였다.

수신 안테나에서 수신된 반송파와 기저대역 신호를 분리하기 위하여 수신 장치 복조기는 Melexis사의 RFIC를 사용하였다. 수신 장치 복조기는 저잡음 증폭기(LNA)와 마이크로컨트롤러 사이에 위치하며, 개발된 복조기와 주변회로 구성은 그림 3.13에 나타내었다.

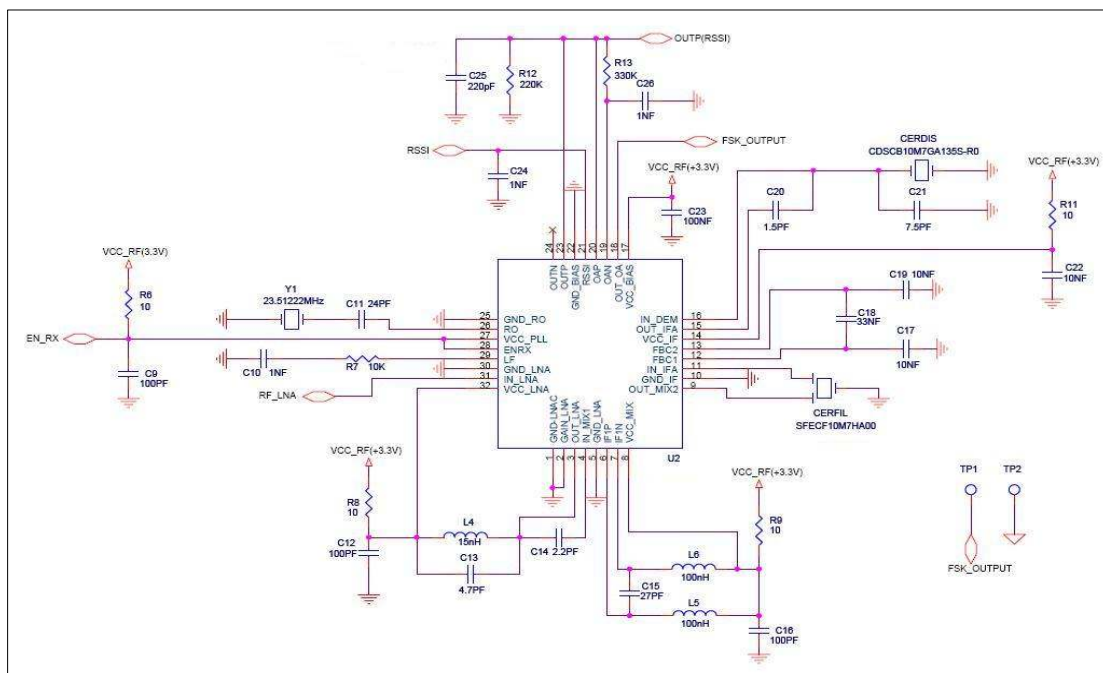


Fig. 3.13 Circuit diagram of demodulator.

(4) 수신 장치 마이크로컨트롤러

무선 데이터 통신에서 복호화는 복조된 디지털 형태의 신호로부터 0과 1의 신호로 해석하는 과정을 의미한다. 0과 1의 해석 기준은 송신장치의 데이터그램 생성 시의 부호화 기준과 동일하게 사용한다.

개발된 송신장치는 falling edge를 1로 정의하는 맨체스터 코드 방식을 사용하였으므로 수신 장치 동일한 코드 기준으로 데이터를 해석하였다. 수신 장치 수신된 무선신호는 복조기를 통과하면서 기저대역 신호로 변환되어 마이크로컨트롤러로 입력되며, 개발된 펌웨어를 이용하여 데이터그램이 정의한 타이밍을 기준으로 나누어 0과 1로 해석하여 송신장치에서 송신한 문자열 데이터로 복원하였다. 신호 전송 중에 발생하는 오류를 점검하기 위하여 본 연구에서는 CRC-8-ATM 방식을 에러 체크 기능으로 사용하였다. 그림 3.14에 본 연구에서 개발된 수신 장치 마이크로컨트롤러가 복조된 신호로부터 수신 장치 약정된 데이터그램에 따라 복호화하는 내부 펌웨어 알고리즘 흐름을 나타내었다.

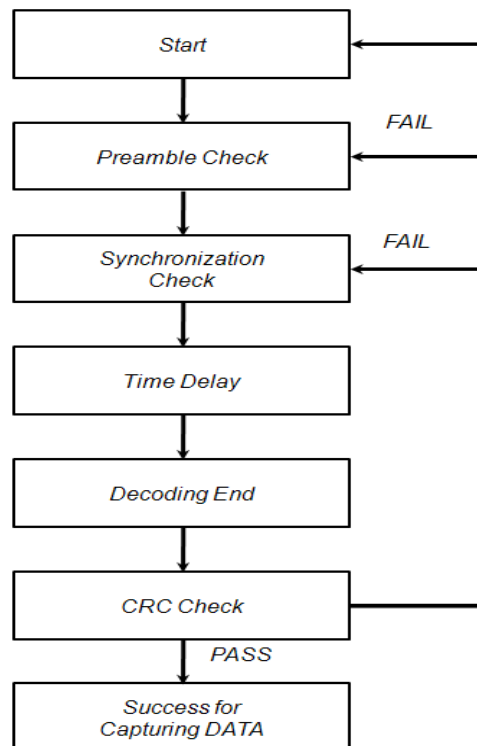


Fig. 3.14 Flowchart of decoding process.

또한 수신 장치 마이크로컨트롤러는 수신된 공기압 정보를 그림 3.15와 같은 LCD 화면에 표시하거나 스위치, 부저 등의 입출력 장치를 제어하는 역할을 담당한다. 수신 장치 사용된 마이크로컨트롤러는 CISC(complex instructions set computer)방식의 8비트 마이크로컴퓨터인

Freescale사의 MC68HC908을 사용하였으며, 128×64 도트 그래픽 LCD 드라이버가 자체 내장되어 공기압 등의 디지털 데이터를 화면에 출력할 수 있으며, 주변기기와 통신 포트에 활용할 수 있는 SCI(serial peripheral interface) 등을 내장하고 있다.



Fig. 3.15 LCD and user interface.

라. 채널 손실 계산

무선 송·수신 장치 운용되는 무선 통신 환경의 채널 손실을 고려하여 타이어 휠에 장착되는 송신장치는 데이터그램의 정상적인 송·수신이 가능한 조건으로 개발하여야 한다. 공기압 송·수신 장치 운용되는 무선환경에서 예상되는 채널 손실은 휠에 장착하는 송신장치 안테나 방향, 휠의 회전에 따른 복사 패턴의 변화로 나타나는 전력 손실과 차체 구조 및 주행에 의한 전파 손실 등으로 예상할 수 있다. 채널 손실에 의한 영향은 송신장치의 송신 출력의 감쇠로 나타나므로 측정 장치를 별도로 구성하여 수신신호강도를 측정하고, 일정한 간섭 잡음 마진(fade margin)을 고려하여 차량 내부의 무선 환경에 대한 채널 손실을 예측하였다.

(1) 수신신호강도를 이용한 수신전력 측정

수신신호강도(RSSI, received signal strength indication/indicator)는 수신 장치 수신되는 신호의 강도를 표시하는 신호 또는 회로를 의미한다. RSSI는 중간 주파수 증폭기 전단이나 기저대역 증폭기 전단에서 측정한다. RSSI 출력은 아날로그 전압 레벨이며, A/D 컨버터를 이용하여 신호의 샘플링이 가능하다.

RSSI는 안테나의 이득값이 포함된 수신신호의 강도를 나타내므로 동일한 수신 장치 및 전파 환경에서 안테나의 효율을 측정하는 목적으로 사용되기도 한다. 그림 3.16은 RSSI를 측정하기 위하여 본 연구에서 개발한 측정장치의 개략도이다. RSSI는 측정장치의 출력단자를 통하여 전압으로 출력되며, 출력범위는 0.5 ~ 2.5 VDC이다.

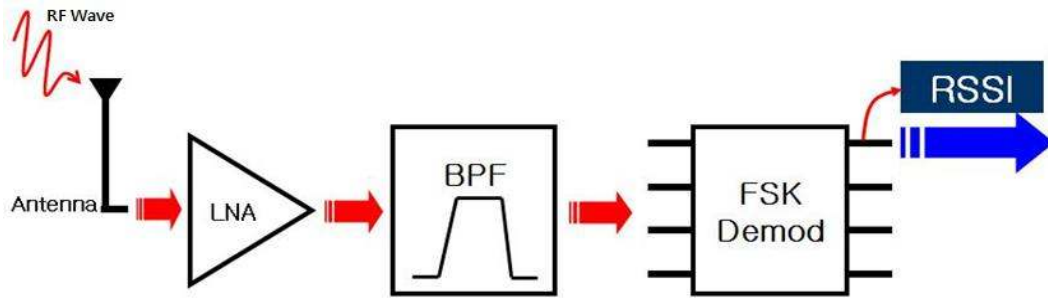


Fig. 3.16 RSSI measurement device.

측정장치의 프리앰프단에서의 이득특성이 RSSI가 출력되는 복조기의 표준환경과 다르며, 복조기에 인가되는 입력전압도 다르기 때문에 RSSI 출력단자로부터 측정된 전압을 안테나의 이득이 고려된 실제 수신 신호의 무선출력으로 환산하기 위하여 교정과정을 수행하였다. RSSI 교정은 외부 전파잡음의 영향을 최대한 배제하기 위하여 측정장치와 분석기를 유선으로 연결하여 수행하였다.

RSSI 교정에는 무선신호 발생기로 Agilent사의 E4420B를 사용하였으며, Keithley사의 디지털 멀티미터를 전압 측정기로 사용하였다. 계측 및 분석기의 제어를 위하여 랩톱컴퓨터의 PCMCIA 슬롯에 장착되는 GPIB 인터페이스 카드와 분석기를 연결하였으며, 그림 3.17과 그림 3.18에 RSSI 교정장치의 구성 및 계측 제어용 프로그램을 나타내었다. 무선 신호 발생기를 이용하여 기준 전력 신호를 측정장치에 입력하였으며, 복조기의 RSSI 출력단자의 출력 전압을 랩톱컴퓨터를 이용한 데이터 수집장치로 비교 분석하여 측정장치의 수신신호강도 교정과정을 수행하였다.

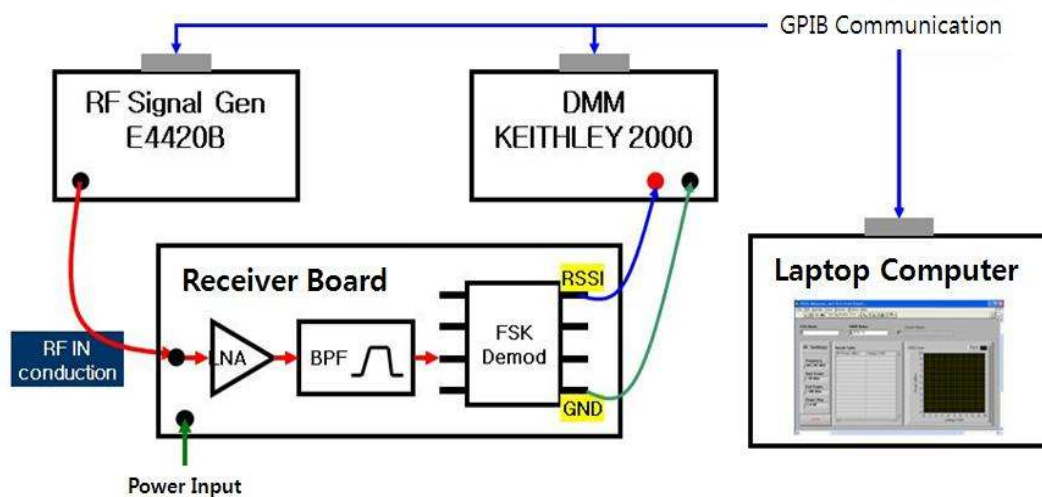


Fig. 3.17 RSSI calibration system.

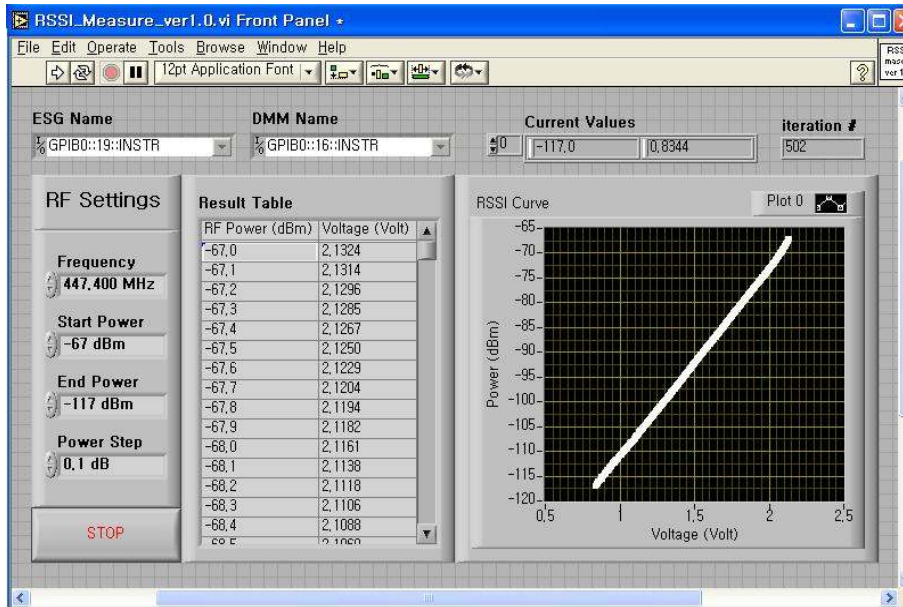


Fig. 3.18 RSSI calibration program and data.

그림 3.19는 RSSI 측정을 통한 수신전력 변환 과정 및 그 측정 원리를 나타낸다. 개발된 공기압 측정 및 송신장치로부터 전파된 무선신호는 RSSI 측정장치의 안테나에 의하여 수신되고, 저잡음 증폭기와 대역통과 필터를 거쳐 복조기로 전달된다. 복조기에 전달된 무선신호는 RSSI 출력단자에서 직류전압으로 출력되므로 RSSI 교정값에 대입하여 수신 전력으로 환산하였다.

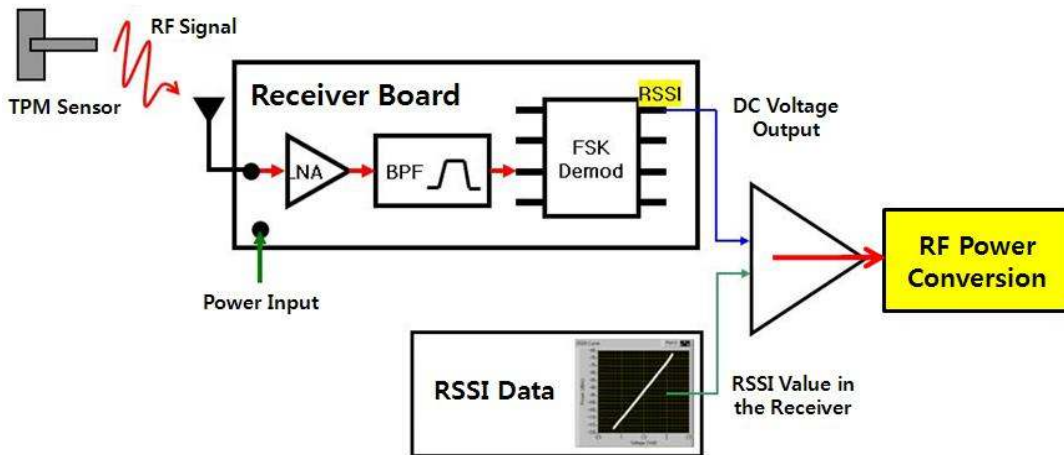


Fig. 3.19 Received power conversion through RSSI measurement.

(2) 수신 전력을 이용한 송신장치 장착 방향 선정

안테나의 복사 패턴은 방향성을 갖기 때문에 송신장치의 휠 장착 방향에 따라 송신 출력 감쇠 특성을 나타낸다. 따라서 송신장치의 장착방향에 따른 송신 출력 감쇠 특성을 측정하기 위하여

그림 3.20과 같은 측정장치를 구성하였다. 타이어 휠의 밑면에 (그림 3.20에서 X-Z 평면) 송신장치 안테나의 방향을 X축 방향과 Y축 방향으로 두 개의 시료를 설치하고, 3 m 떨어진 지점에 1 m 높이로 측정장치를 설치하여 수신 전력을 측정하였다.

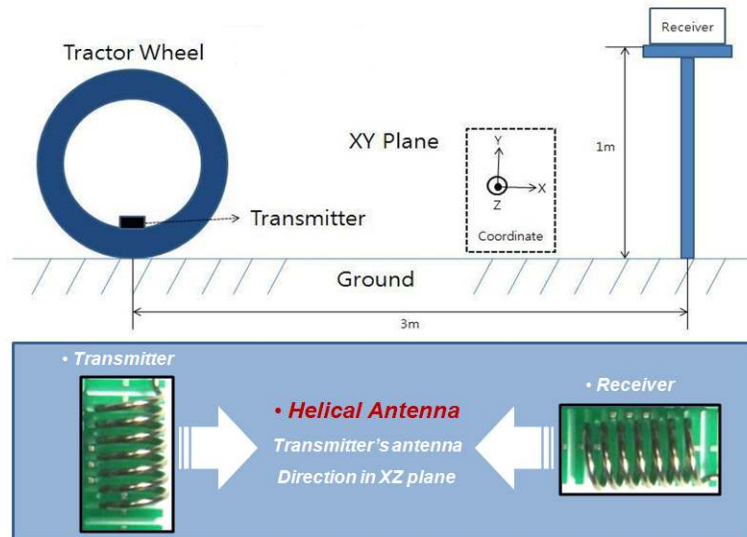


Fig. 3.20 RSSI concerning direction of wheel and transmitter.

(3) 휠 회전각도에 의한 수신전력 변화

송신장치가 설치된 휠의 각도 변화에 의한 수신전력 변화는 그림 3.21과 같은 장치를 구성하여 측정하였다. 그림과 같이 0°, 90°, 180°, 270°의 네 방향의 위치에서 송신장치의 헬리컬 안테나가 Z축과 평행한 방향으로 위치하도록 고정하고 수신 전력을 측정하였다.

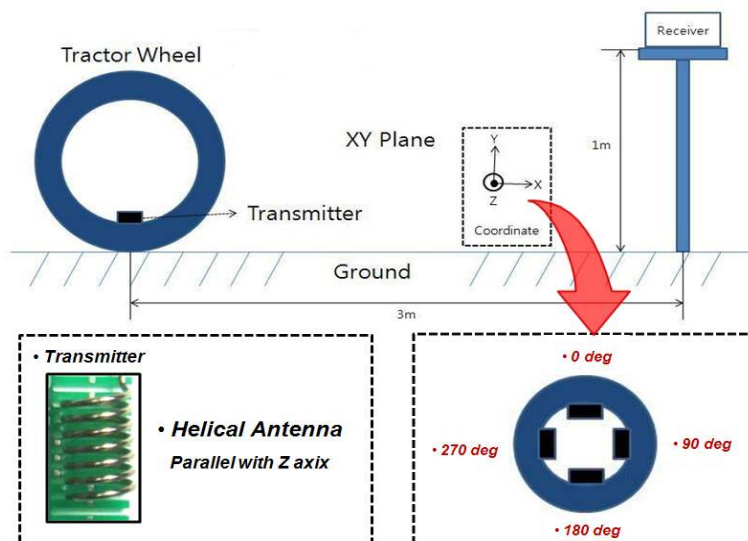


Fig. 3.21 RSSI concerning wheel rotation.

(4) 차량내 무선환경의 채널 손실 계산

RSSI는 수신 장치 성능을 나타내는 지표로 활용되기도 하지만, 송신 신호원을 고정하여 기준으로 사용하면 측정된 RSSI는 통신 시스템이 운용되는 무선환경의 특성을 분석하는 자료로 사용할 수 있다. 실제 무선환경에서 발생하는 다양한 손실은 이론적인 분석으로 정량화할 수는 없으며, 대부분 실험적인 측정과 일정한 마진을 고려한 예측 방법으로 손실을 결정하고 통신 시스템의 성능을 분석한다.

본 연구에서 개발한 타이어 공기압 송·수신 장치 다양한 차량에 적용이 가능하도록 구성하였다. 타이어의 크기, 형상 및 차체 구조를 고려하면 무선 환경 조건을 기준으로 농용 트랙터는 채널 손실의 예측 정도가 일반 승용 및 상용차에 비하여 크기 때문에 농용 트랙터를 대상으로 송·수신 장치 수신신호강도를 측정하여 수신 전력으로 환산한 후, 간섭 잡음 마진을 고려하여 채널 손실을 계산하였다. 계산된 채널 손실을 고려하여 개발한 송·수신 장치 성능을 검증하였다.

송신장치를 그림 3.22와 같이 농용 트랙터에 장착하여 차체 구조 및 주행에 의하여 발생하는 무선 환경 변화에 따른 수신전력 변화를 측정하였다. 송신장치는 휠을 기준으로 Z축에 평행인 방향으로 송신 안테나가 위치하도록 휠에 장착하였으며, RSSI 측정장치는 공기압 수신 장치 설치 위치와 동일하도록 트랙터 운전자의 시인성 및 조작의 편의성을 고려하여 운전석 계기판 중앙에 설치하였다. 기기에 의한 전파 간섭 영향을 최소화하기 위하여 데이터 수집 시스템은 측정장치로부터 이격시켜 트랙터 운전석의 외부에 설치하고 시험을 수행하였다. 또한 차량의 주행 상태에 따른 수신전력 변화를 확인하기 위하여 그림 3.23과 같이 트랙터를 30 km/h의 일정 속도로 주행 하면서 수신 전력을 측정하였다.



Fig. 3.22 RSSI measurement setup in tractor. (stationary)



Fig. 3.23 RSSI measurement setup in tractor. (driving)

마. 무선통신 시뮬레이터

타이어에 장착되는 송신장치와 운전석 주위에서 운용되는 수신 장치 구성되는 공기압 송·수신 장치 일반적인 디지털 통신 시스템에 비하여 열악한 무선통신 환경에서 운용될 수밖에 없다. 장치를 개발하고 성능을 검증하는 과정을 실제 차량 환경 조건에서 시험을 수행하면서 진행하는 부담을 덜기 위하여 개발과정에서는 무선 송·수신 환경을 실제 조건과 유사한 환경 조건으로 모사하여 장치의 작동상태를 확인하고 그 결과를 피드백하는 작업이 필요하다.

송신장치의 무선관련 각종 지표는 전파 법규에 규제를 받기 때문에 무선 환경에 따라 송신장치의 성능을 변경하여 장치의 품질을 개선하는 데는 한계가 존재한다. 따라서 무선 환경의 조건에 따라 수신 장치 수신되는 무선신호를 다양하게 변화시키면서 수신 장치 성능을 개선하고 검증할 수 있는 무선통신 시뮬레이터를 개발하여 공기압 송·수신 장치 개발에 활용하였다. 개발된 시뮬레이터는 실험실 내에서 장치의 성능을 분석하고 개선하는 과정을 빠르고 효율적으로 수행하는 목적으로 사용하였다.

(1) 무선통신 시뮬레이터 개요

송신장치에서 출력되는 신호는 특정한 프로토콜로 구성된 UHF 대역에서의 무선신호로, 전송 과정 중에 온·습도 등 통신환경에 의한 영향으로 기저대역 중심주파수, 점유주파수 대역폭 등이 변화할 수 있다. 또한 전자회로에서 프로토콜의 기준 시간을 제공하는 수정발진기는 온도 및 진동에 민감하므로 발진주파수 및 송신출력 변화 등을 초래할 수 있다. 무선 공기압 송·수신 장치 개발에서 다양한 환경 변화에 대응한 장치의 설계, 개발된 장치의 성능 검증 및 향상 작업은 개

발과정에서 중요하다.

무선통신 시뮬레이터는 다양한 전파환경에서 송신장치로부터 전송하는 UHF 대역의 신호 변화를 재현할 수 있는 장비로, 기저대역 신호 발생기, 무선 변조기, 장비 제어용 컴퓨터 및 프로토콜 시뮬레이션 소프트웨어로 구성하였다. 개발된 무선통신 시뮬레이터의 개략은 그림 3.24와 같다.

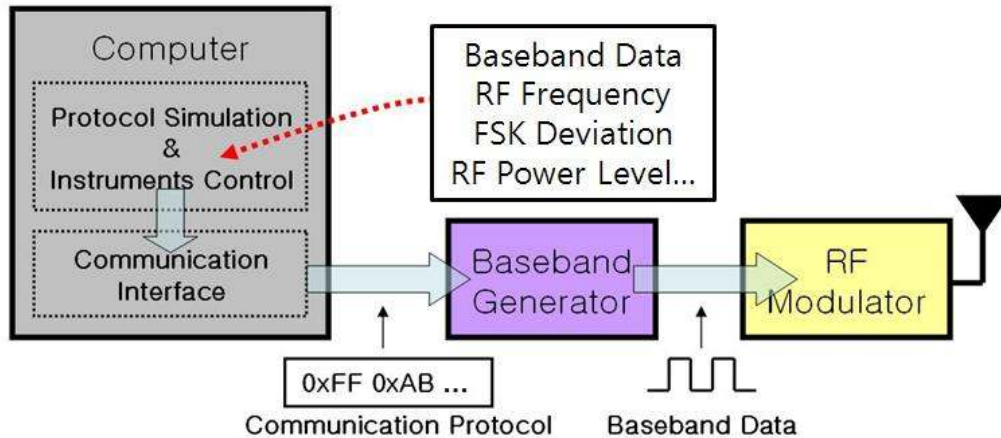


Fig. 3.24 Overview of RF simulator.

(2) 무선통신 시뮬레이터 기능

공기압 송·수신 장치 요구되는 주요 성능은 다양한 무선환경에서 송신장치가 전송한 무선신호를 수신 장치 얼마나 안정적으로 수신하였는가를 나타내는 송수신 성공률로 표현한다. 실제 차량에 적용하기 전에 장치의 송·수신 성능을 시험실 내에서 확인하고 개선점을 반영하여 성능을 향상시키기 위한 일련의 과정에 장치가 적용되는 다양한 환경 조건에 따라 변화하는 전송 신호를 재현하는 것이 모사장치의 요구 기능이다.

송신장치의 내부 부품은 온도 등의 외부 환경조건에 따라 특성이 달라질 수 있다. 부품의 특성 변화에 의하여 송신주파수 또는 송신출력 등이 변화할 수 있으며, 이에 따른 수신 장치 수신전력 감소는 공기압 등의 측정 데이터를 왜곡시키거나 수신이 불가능한 상황을 야기할 수 있다.

본 연구에서는 하드웨어 또는 환경의 영향에 따른 송신장치의 특성 변화에 의한 출력 특성 변화를 다양한 조건으로 생성하고, 이 생성된 신호를 수신 장치 입력시켜 성능 검증 및 확인에 활용하고자 하는 목적으로 무선통신 시뮬레이터를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 무선통신 시뮬레이터의 기능은 다음과 같다.

- ① RF 출력 제어
- ② RF 반송파주파수 제어

③ RF 반송파주파수 및 출력의 복합 제어

(3) 무선통신 시뮬레이터 구성

무선통신 시뮬레이터는 기저대역 신호 발생기, 무선 변조기, 장비 제어용 컴퓨터 및 인터페이스 장치 등의 하드웨어와 시뮬레이션 소프트웨어로 구성된다.

① 기저대역 신호 발생기

기저대역 신호 발생기는 기존의 정형화된 함수 발생 기능뿐만 아니라 사용자가 임의로 정의한 파형대로 신호를 생성할 수 있는 임의 파형 발생 기능을 내장하고 있는 Agilent사의 HP33120A를 사용하였다. 파형 데이터는 GPIB 통신을 이용하여 HP33120A의 메모리로 전송하였다. 신호 발생기의 메모리에 저장된 데이터에 따라 송·수신 장치 데이터그램의 내부 데이터를 변경하여 송신한 데이터와 수신 장치 수신한 데이터를 비교하여 수신 장치 성능을 검증할 수 있다.

그림 3.25는 National Instruments사의 LabVIEW를 이용하여 작성된 데이터그램 생성 소프트웨어의 원시코드이다. 데이터그램을 규정하는 전체 데이터가 6250개이고, 주기가 8 Hz (125 msec) 이면 데이터그램 내 각 펄스의 시간 간격은 0.02 msec로, 이 시간 간격은 데이터 기준 클럭 또는 샘플 클럭이며 신호 발생기의 메모리 크기 범위 내에서 생성할 수 있는 데이터그램의 범위와 생성 주기의 제약 조건으로 작용한다. 그림 3.26은 기저대역 신호 발생기를 이용하여 LabVIEW로 개발한 기저대역 임의 신호 발생 소프트웨어의 실행화면이며, 소프트웨어 원시코드는 그림 3.27과 같다.

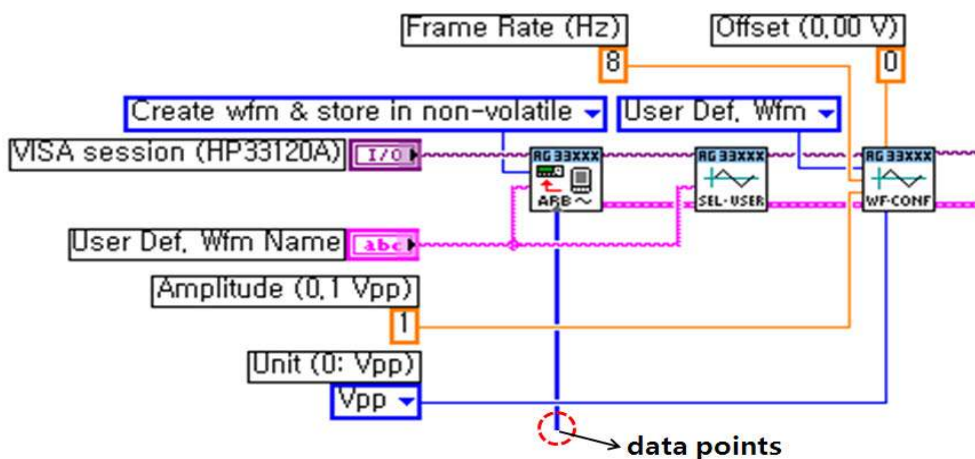


Fig. 3.25 Source code of datagram generation.

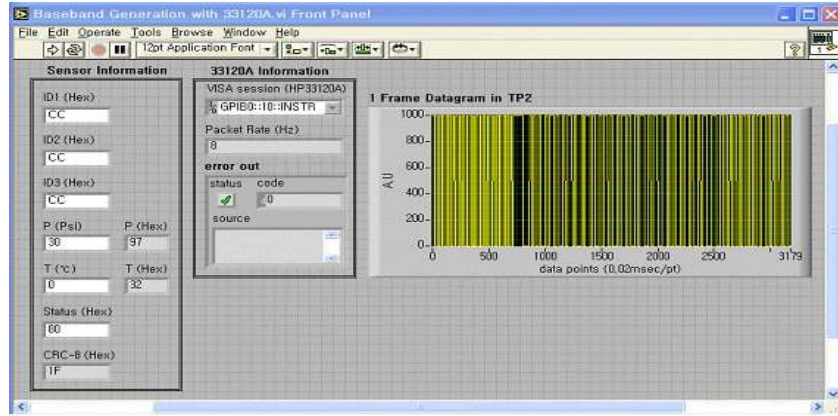


Fig. 3.26 Front panel of baseband generation.

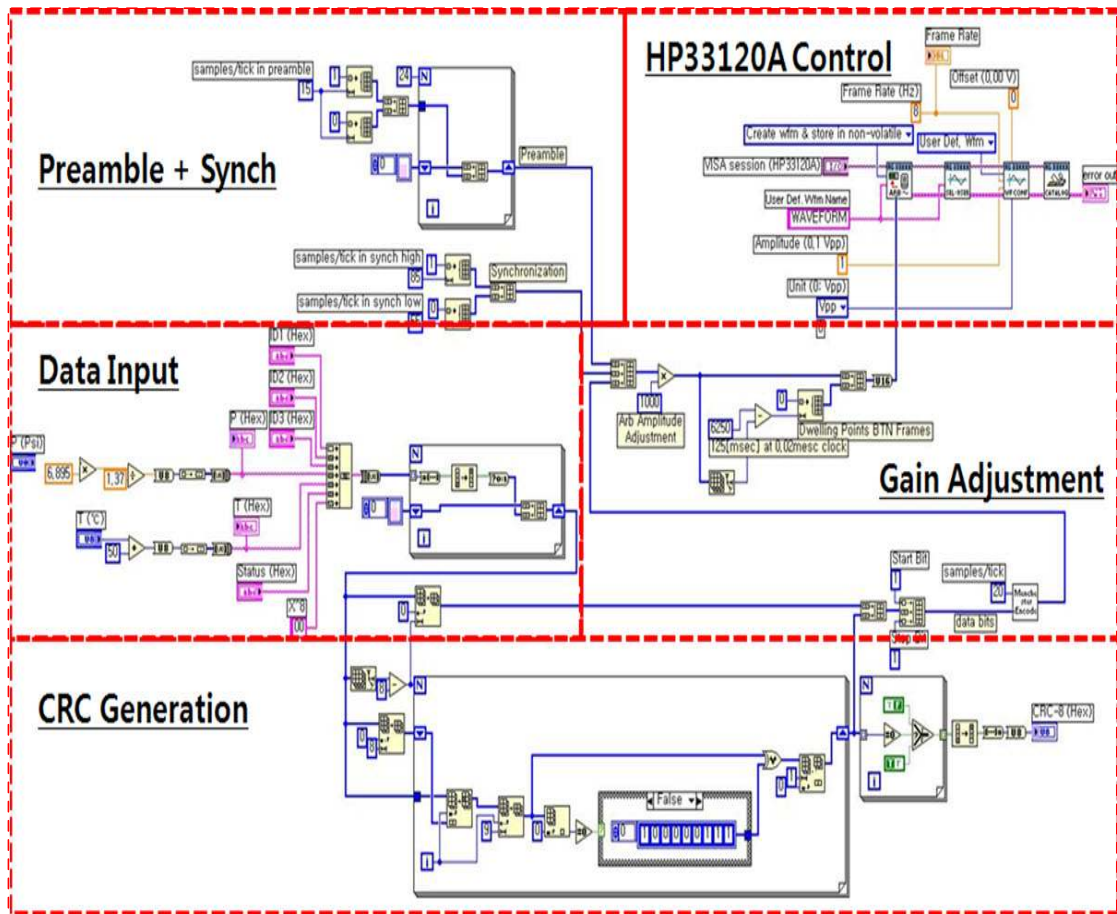


Fig. 3.27 Source code of baseband generation.

기저대역 신호 발생 소프트웨어는 송신장치의 고유 ID, 압력, 온도 및 상태 정보로 구성되는 데이터그램의 기저대역 정보를 임의로 입력할 수 있으며, 입력된 데이터에 따라 생성된 파형을 그래프 형태로 출력하는 기능을 갖는다. 본 연구에서 개발한 신호 발생 소프트웨어는 송신장치 정보 입력, CRC 체크섬, 프리앰블 및 동기화 데이터 생성 등의 데이터그램 구성 기능, 데이터그

램의 진폭 조정과 같은 신호 발생기의 제어 기능 등을 조합하여 구성하였다.

② 무선 변조기

시뮬레이터의 무선 변조기는 Agilent사의 E4420B를 이용하였다. 이 장비는 진폭 변조와 주파수 변조 방법으로 소출력 무선기기의 송신 주파수인 ISM 밴드 대역의 주파수 생성 기능을 내장하고 있다. 또한 변조 과정에서 외부로부터 기저대역 신호를 입력받을 수 있도록 외부입력 단자를 구비하고 있다. 무선 변조기에서는 0.01 Hz 단위의 해상도로 무선 신호를 생성할 수 있으며, -136 dBm ~ +13 dBm의 범위와 0.5 dB 이내의 고정밀도로 출력 레벨을 조절할 수 있다.

무선통신 시뮬레이터에서 무선 변조기는 기저대역 신호 발생기로부터 생성된 기저대역 데이터(데이터그램)를 외부입력 포트를 통하여 입력받아 FSK 형태로 변조시켜 RF 주파수 대역으로 설정된 출력 레벨로 송출하는 기능을 수행한다. 무선 변조기는 장비 제어용 컴퓨터와 GPIB 인터페이스 장치를 통하여 연결되며, 소프트웨어의 설정 기능을 이용하여 무선 신호의 진폭, 송신 주파수 및 주파수 편이 등의 무선통신 매개변수를 제어하여 다양한 조합을 갖는 무선 신호를 생성할 수 있다. 그림 3.28은 LabVIEW를 이용한 무선 변조기의 매개변수 제어화면을 나타내며, 컴퓨터를 이용하여 GPIB 인터페이스를 통하여 변조기를 제어하는 원시코드는 그림 3.29와 같다.

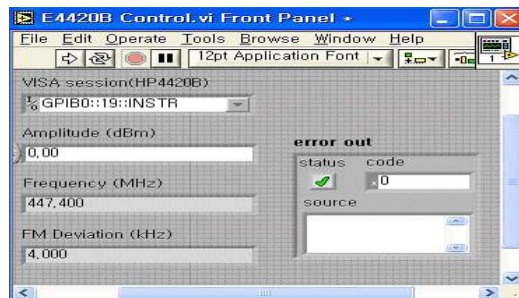


Fig. 3.28 Front panel of RF modulator control with GPIB.

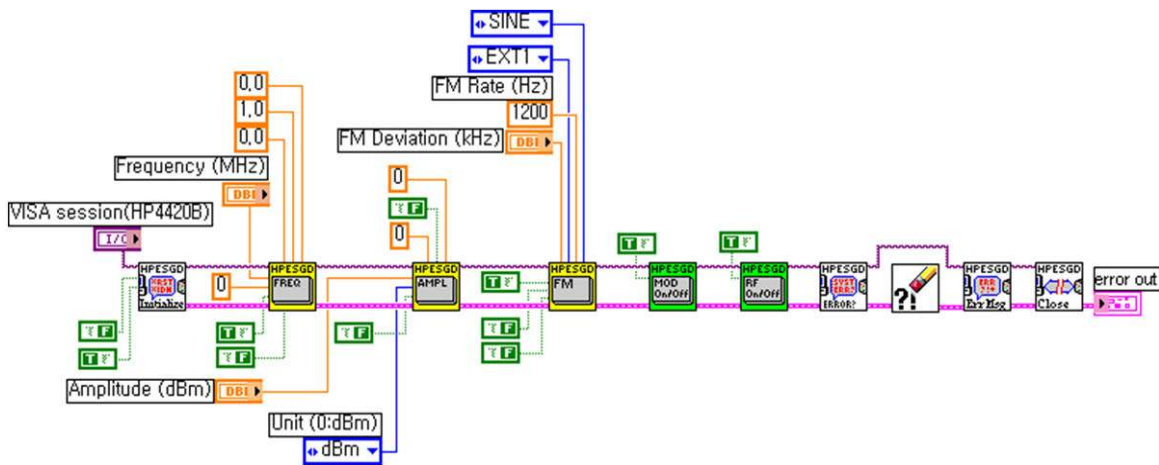


Fig. 3.29 Source code of RF modulator control with GPIB interface.

③ 완성된 무선통신 시뮬레이터 하드웨어

무선통신 시뮬레이터의 하드웨어는 기저대역 신호 발생기, 무선 변조기 및 GPIB 인터페이스 장치로 연결된 시뮬레이터 제어용 랩톱컴퓨터 등으로 구성하였다. 개발된 시뮬레이터의 외형은 그림 3.30과 같다.

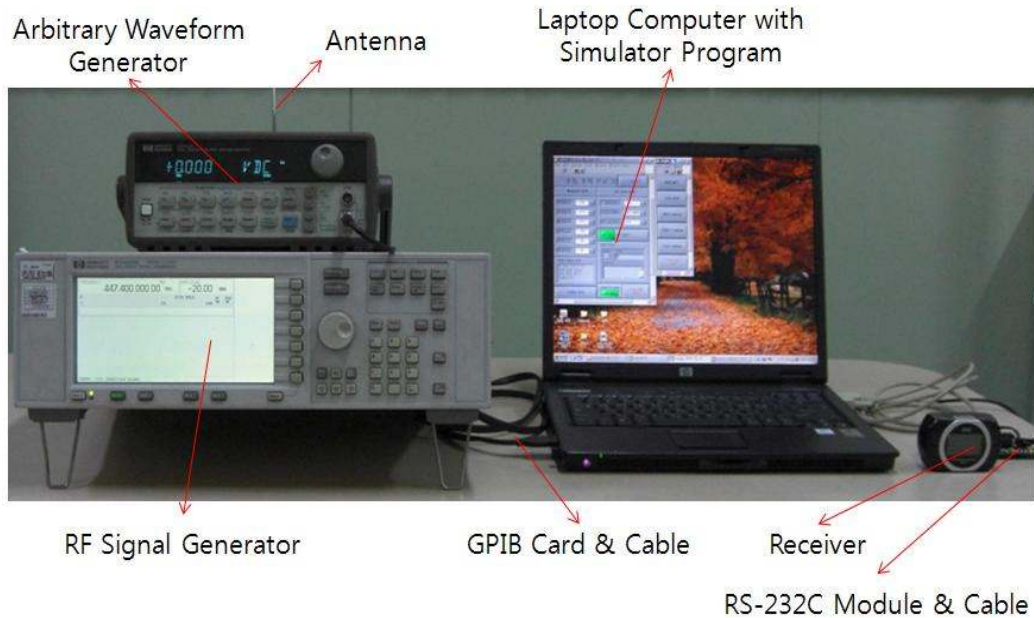


Fig. 3.30 RF simulator.

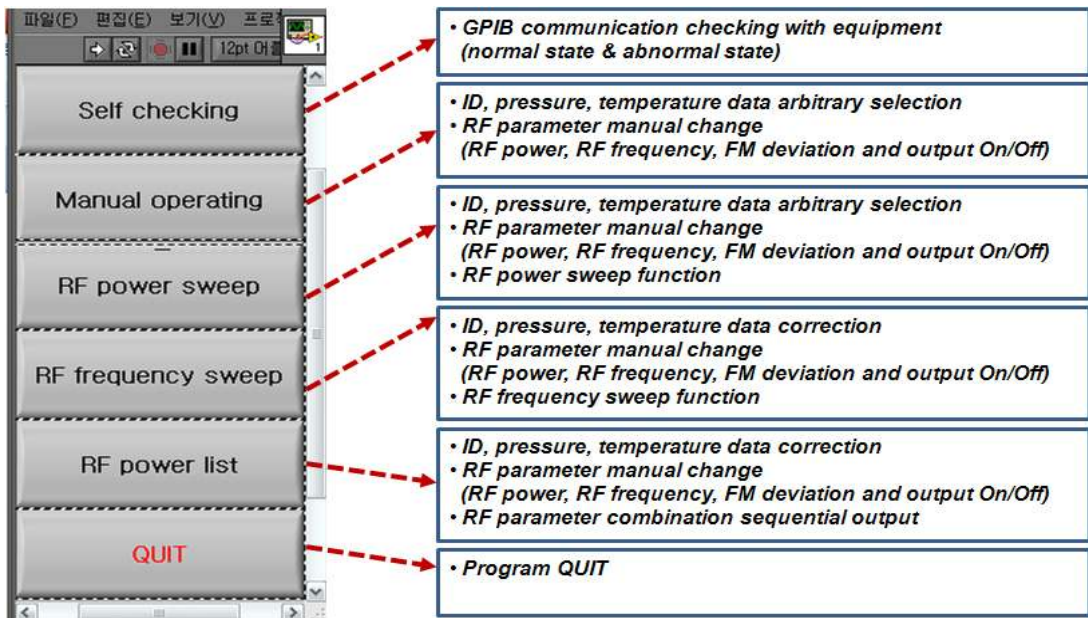


Fig. 3.31 Main program of RF simulator.

④ 무선통신 시뮬레이션 소프트웨어

무선통신 시뮬레이터의 운용 소프트웨어는 LabVIEW와 계측장비 전용 드라이버를 이용하여

개발하였다. 운용 소프트웨어의 기능으로 무선 출력 제어(RF Power Sweep) 모드, 무선 주파수 제어(RF Frequency Sweep) 모드 및 복합 제어(RF Parameter List Sweep) 모드를 구현하였다. 개발된 운용 소프트웨어의 주화면 구성은 그림 3.31이며, 복합 제어 모드의 화면은 그림 3.32와 같이 구성하였다.

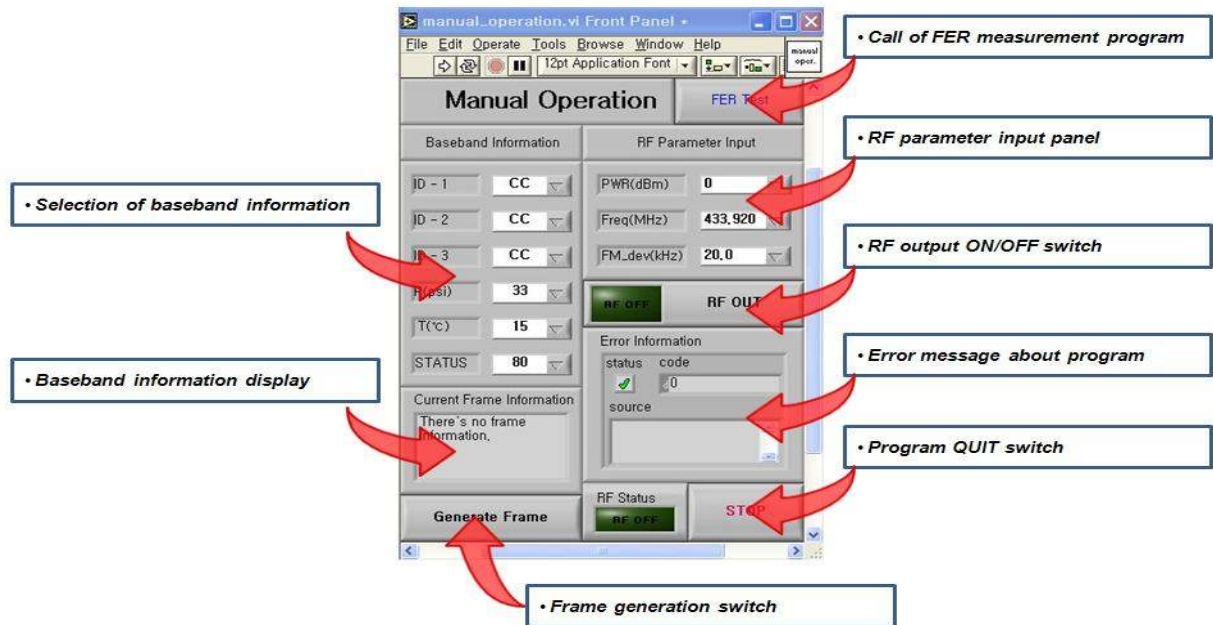


Fig. 3.32 Sub program of RF simulator.

(4) 무선통신 시뮬레이터를 이용한 수신 장치 성능 측정

434MHz의 주파수 대역은 ISM 대역으로, 개발된 공기압 송·수신 장치 아니라 다양한 소출력 전파 기기의 주파수 사용 대역이다. 따라서 개발된 장치의 무선 특성 측정을 수행하는 경우, 시험실 내의 반송파주파수 대역에서의 전파 환경을 모니터링 하여 측정 결과 분석에 반영하여야 한다.

아날로그 시스템에서는 수신 장치 수신감도로 정의되는 SINAD(signal to noise and distortion)로, 수신된 신호와 잡음, 그리고 왜곡된 신호의 비율로 수신감도를 표시한다. 본 연구에서 개발된 수신 장치 성능은 디지털 통신 시스템의 성능지수를 표시하는 프레임 에러율을 기준으로 하였다. 무선신호 시뮬레이터를 이용한 수신 장치 성능 측정을 위한 장치 구성도는 그림 3.33과 같다.

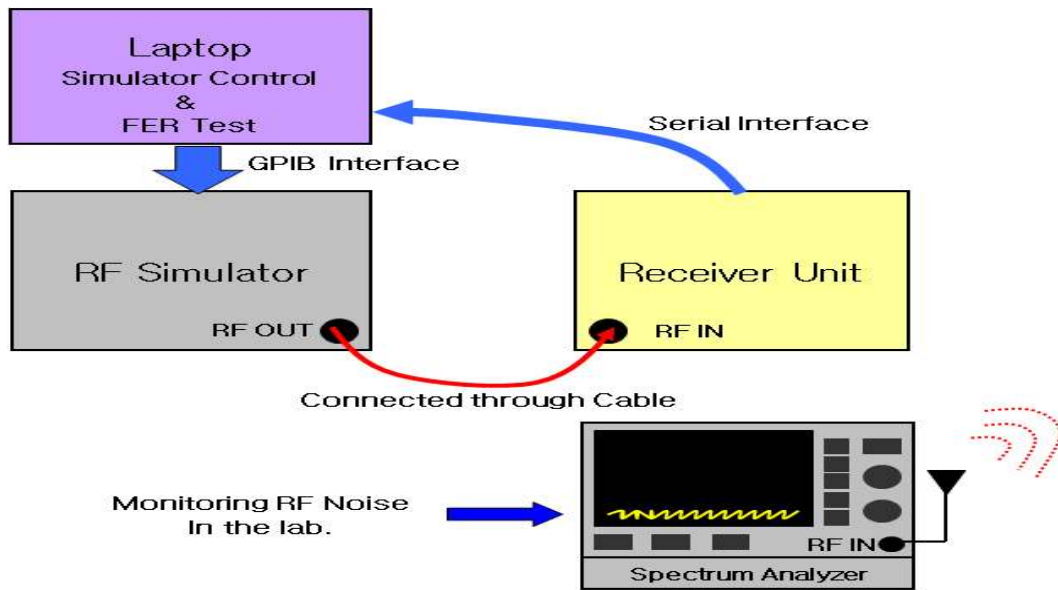


Fig. 3.33 Receiver performance test system using RF simulator.

2. 결과 및 고찰

가. 타이어 공기압 계측 성능

개발된 타이어 공기압 측정에 사용된 압력센서 모듈인 SP30(T)는 측정 범위가 대기압 기준으로 0 ~ 350 (0 ~ 800) kPa이며, 휘스톤브리지 회로, 신호처리 회로 및 12비트 분해능의 A/D 컨버터를 내장하고 있다. 센서 모듈에서 측정된 압력값은 회로 내부에서 직접 마이크로컨트롤러 모듈로 디지털 값으로 입력되므로 회로 구성이 단순하다. 송신장치에서 압력 측정값은 데이터그램에서 1바이트(256비트)로 전송되므로 대략 1.4 kPa의 분해능을 갖는다.

압력 교정장치의 표준가스는 질소가스를 사용하였으며, 정밀 압력 교정기(RUSKA 7252)를 이용하여 버퍼탱크 내부의 압력을 0 kPa부터 350 kPa 까지 70 kPa 단위로 변화시키면서 개발된 공기압 측정 및 송·수신 장치 표시값과 비교하였다. 또한 반복도를 확인하기 위하여 교정압력을 0 kPa에서 350 kPa, 그리고 350 kPa에서 0 kPa로 압력을 변화시키면서 3회 반복하여 측정하였다.

개발된 공기압 측정장치의 압력 측정 결과는 그림 3.34에 나타내었으며, 측정 불확도는 그림 3.35와 같다. 인가된 공기압에 따라 센서 모듈에서 출력되는 디지털 값을 변환하여 1차 회귀식으로 계산된 공기압의 측정 정확도는 전 측정 영역에 대하여 $\pm 0.5 \%FS$ 로 확인하였다.

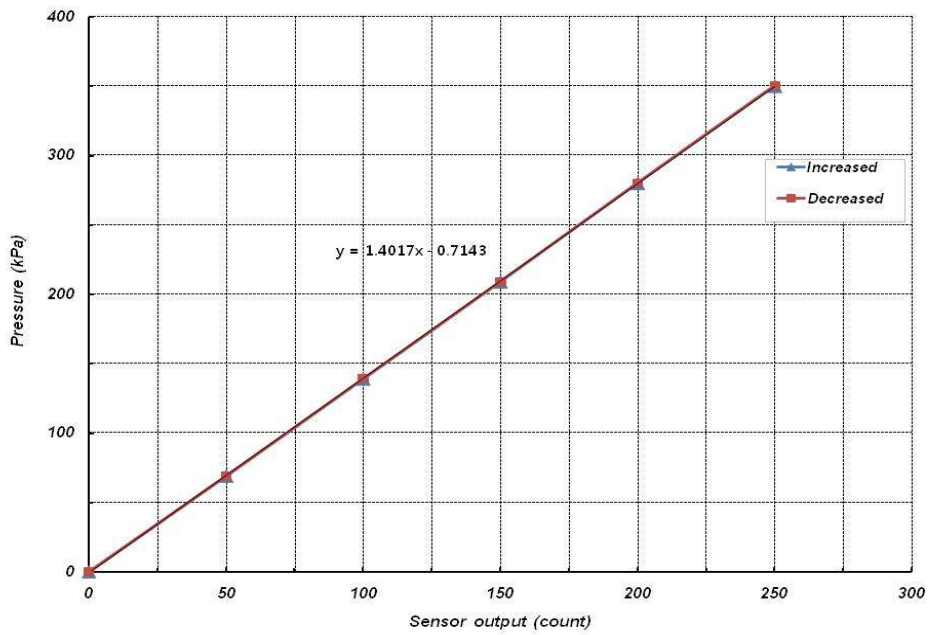


Fig. 3.34 Results of pressure calibration.

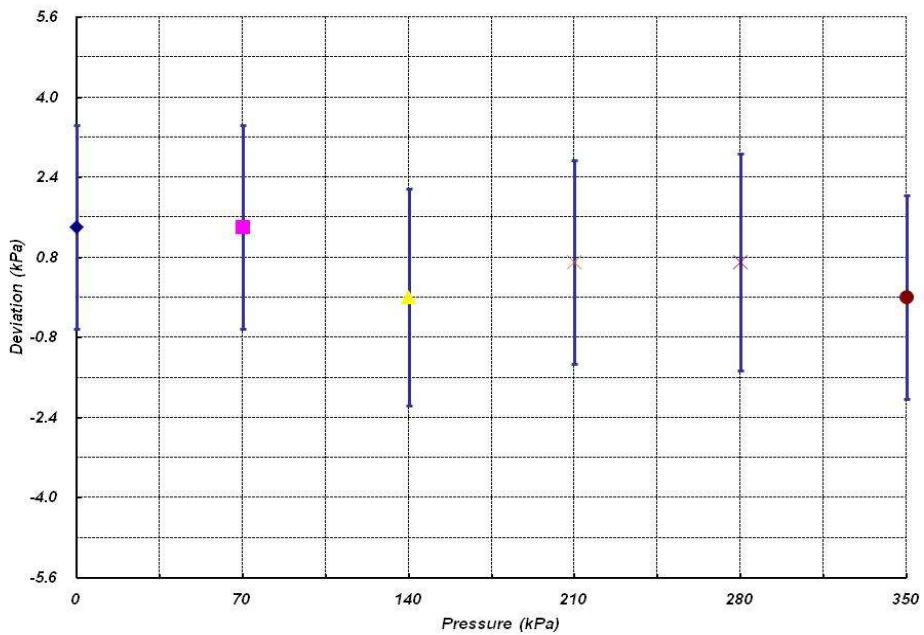


Fig. 3.35 Result of uncertainty.

나. 타이어 공기압 송신장치의 무선 특성

개발된 공기압 송신장치의 무선 특성은 기저대역 데이터, 반송파주파수, 송신출력, 대역폭 및 반사계수 등으로 확인할 수 있다. 그림 3.36은 마이크로컨트롤러에서 생성되어 FSK 변조기로 전

송되는 공기압을 포함한 데이터그램의 실제 출력을 측정한 그림이다. 송·수신 장치 통신 규약을 위하여 본 연구에서 개발한 데이터그램은 3바이트의 프리앰블 신호, 동기화 신호, 시작 비트, 공기압 등의 데이터 바이트, CRC 에러체크 및 정지비트로 구성하였다. 측정된 데이터그램의 주기는 9.23 msec로, 9600 bps의 데이터 전송속도에서 이론적인 주기인 9.228 msec와 거의 일치하였다.

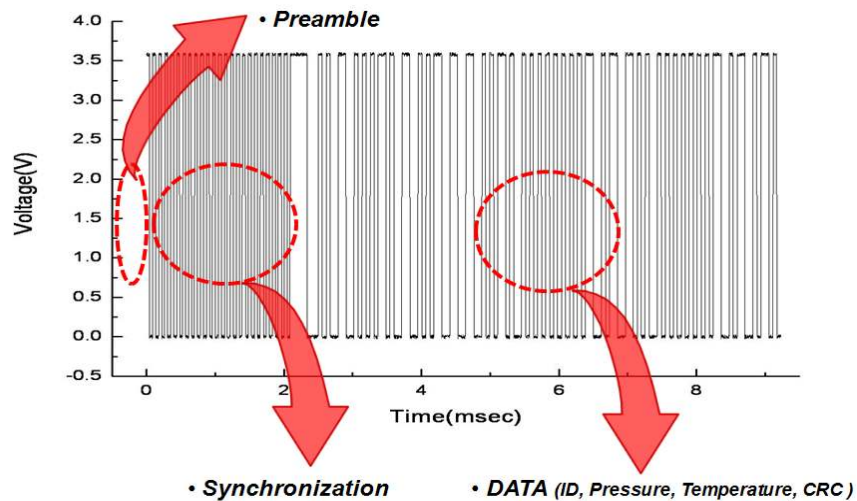


Fig. 3.36 FSK datagram.

Agilent사의 8594E 스펙트럼 분석기를 사용하여 송신장치의 송신출력, 반송파주파수, 주파수 편이를 측정하였다. 송신출력은 분석기의 주파수 스패를 500 MHz로 설정하여 최대 출력값을 측정하여 확인하였다. 반송파주파수 및 주파수 편이는 분석기의 주파수 스패를 150 kHz로 낮게 설정하여 측정하였다.

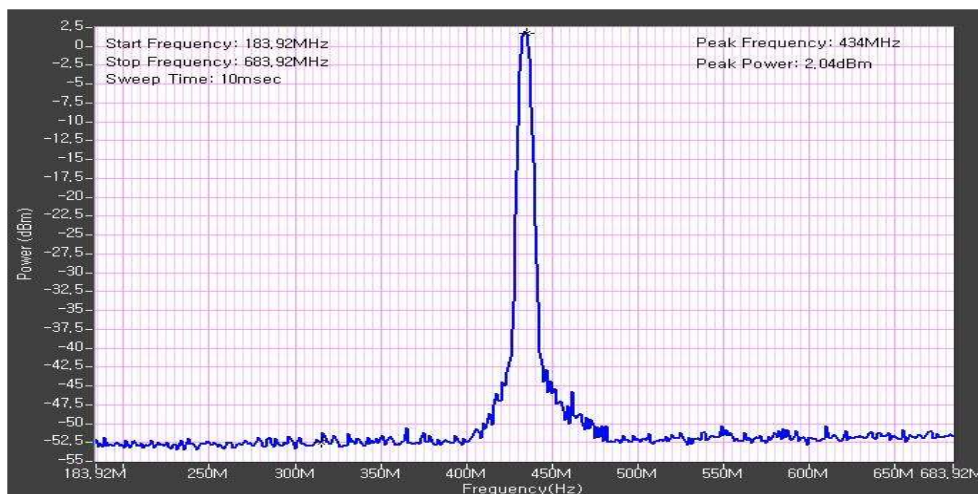


Fig. 3.37 Result of transmitted power.

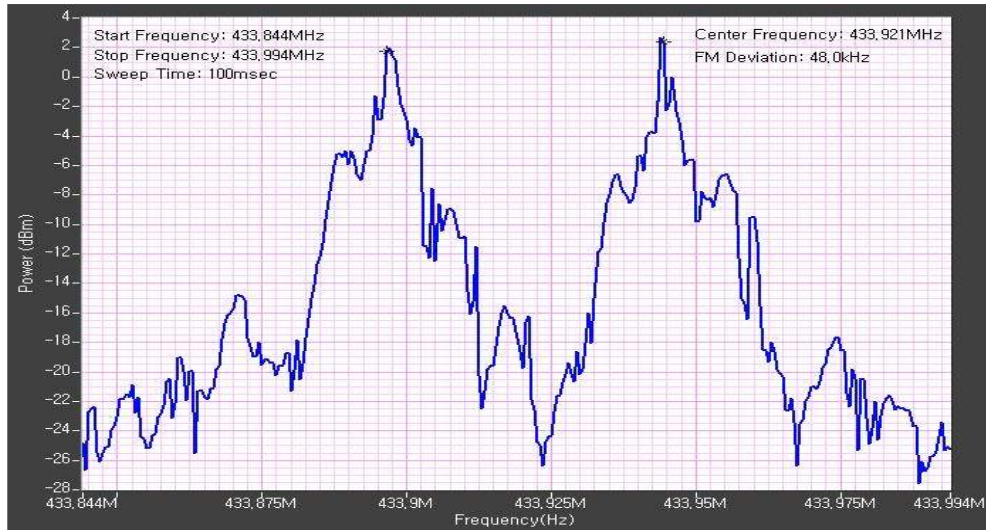


Fig. 3.38 Carrier frequency and deviation.

측정 결과, 개발된 송신장치의 최대 송신출력은 그림 3.37과 같이 2.04 dBm으로 측정되었으며, 그림 3.38과 같이 반송파주파수 433.921 MHz를 중심으로 48 kHz의 주파수 편이를 갖고 데이터그램을 송신하였다.

송신장치에 적용된 헬리컬 안테나의 공진 주파수를 네트워크 분석기 (8753D, Agilent)를 이용하여 측정하였다. 그림 3.39는 안테나의 반사계수를 측정한 곡선이며, 이 그림에서 공진주파수를 확인할 수 있다. 측정 결과, 안테나의 공진 주파수는 433.9 MHz로 송신장치의 반송파주파수 대역과 거의 일치하였다.

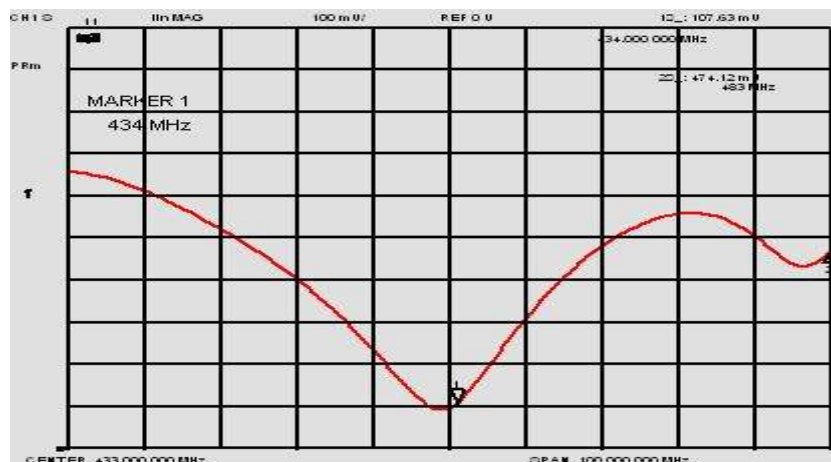


Fig. 3.39 S11 curve of transmitting antenna.

무선 회로에서 출력단과 입력단을 연결할 때, 서로 다른 두 연결단의 임피던스 차이에 의한 신호의 반사 손실을 줄이기 위한 과정을 임피던스 정합이라 한다. 무선회로에서 송신회로와 안테나

간의 임피던스 정합은 송신장치의 안테나로 제작된 헬리컬 안테나와 변조기의 출력단을 네트워크 분석기를 이용하여 측정하였다. 측정 결과, 안테나 공진주파수에서 실수부의 저항값이 $49.9\ \Omega$ 으로 일반적인 무선 통신 회로의 임피던스인 $50\ \Omega$ 과 큰 차이가 없었으며, 허수부의 저항값은 $1.13\ \Omega$ 으로, $0\ \Omega$ 에 근접하였다. 그림 3.40은 네트워크 분석기의 스미스차트 생성기능을 이용하여 측정한 임피던스 정합 결과를 보여준다.

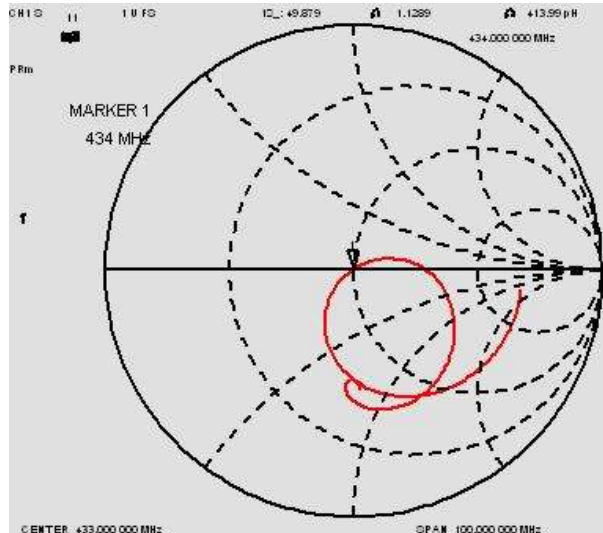


Fig. 3.40 Smith chart of transmitting antenna.

다. 채널 손실

(1) 송신장치 장착 방향 선정

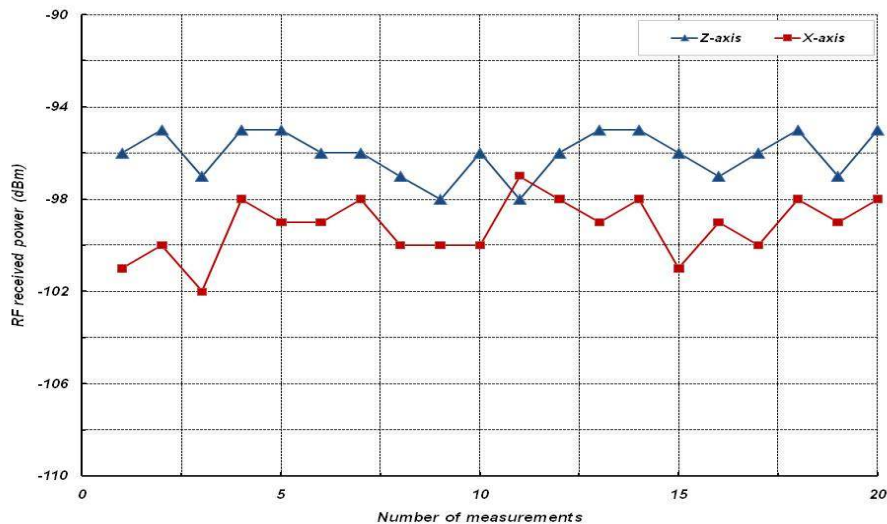


Fig. 3.41 RSSI data at different direction of wheel and transmitter.

송신장치의 안테나 방향에 따른 측정장치의 수신전력 측정 결과는 그림 3.41과 같다. 측정 결

과, 송신장치의 헬리컬 안테나의 축방향이 휠 평면에 직각 방향으로 설치하는 경우가 평행으로 설치하는 경우보다 3 dB 정도 수신전력에 이득이 발생하였다. 이에 따라 송신장치 인쇄회로기판의 부품 배치를 확정하였으며, 휠 장착 기구물을 설계하였다.

(2) 휠 회전각도에 의한 수신전력 변화

타이어가 회전하면 휠에 장착된 송신장치의 안테나의 위치가 달라지기 때문에 안테나의 복사 패턴이 변화된다. 또한 안테나가 회전하면 주변의 유전체 또는 접지 등의 매질 분포가 달라지므로 송신장치의 수신전력에 영향을 줄 수 있다. 측정 결과, 휠 회전에 따라 최소 수신전력과 최대 수신전력의 차이가 20 dB 이상인 것을 확인하였으며, 그림 3.42에 그 결과를 나타내었다.

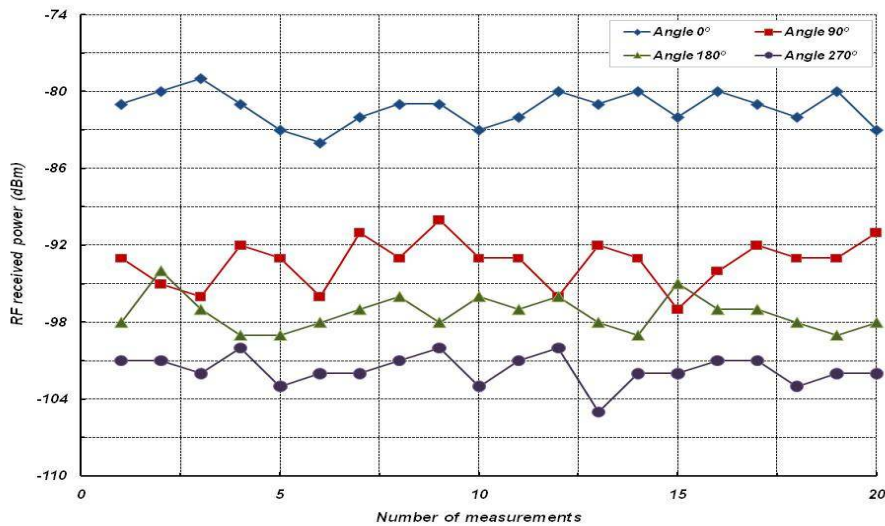


Fig. 3.42 RSSI data at different wheel rotation angle.

(3) 차량의 채널 손실

송신장치의 위치 변화에 따른 수신전력 변화를 확인하기 위하여 트랙터가 정지되어 있는 상태에서 타이어 휠에 장착된 송신장치를 45° 간격으로 회전하면서 각 위치에서 데이터그램을 200개씩 송신하였다. 측정된 RSSI의 누적 분포는 그림 3.43에 나타내었다. 휠의 각도에 따라 대략 -80 ~ -100 dBm의 범위에서 수신전력이 측정되었다.

또한, 트랙터를 30 km/h의 일정 속도로 주행하면서 시험을 수행하였다. 트랙터 주행에 따라 변화하는 무선 환경에서 개발된 송신장치로부터 데이터그램을 1000회 송신하고, RSSI 측정장치에서 측정된 수신전력의 누적 분포를 그림 3.44에 나타내었다.

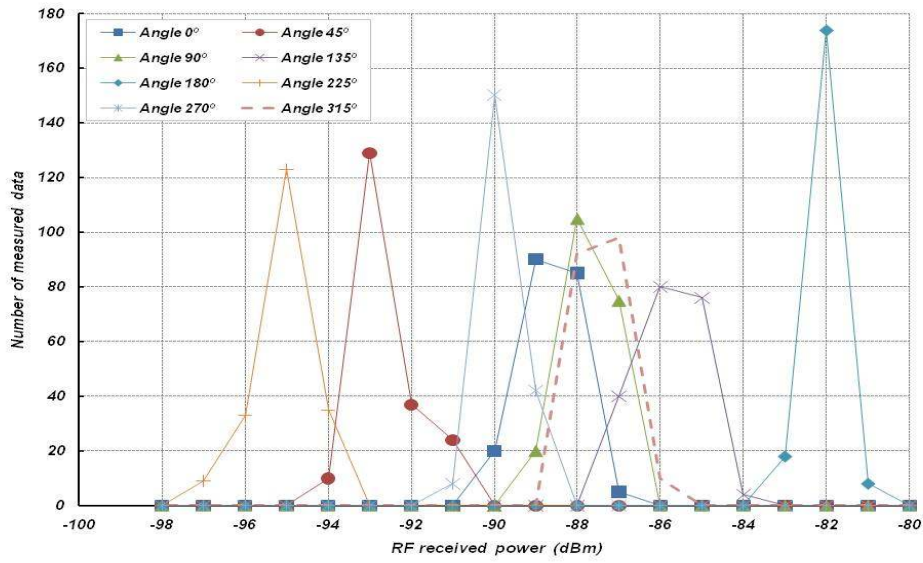


Fig. 3.43 RSSI level in tractor along the transmitter position.

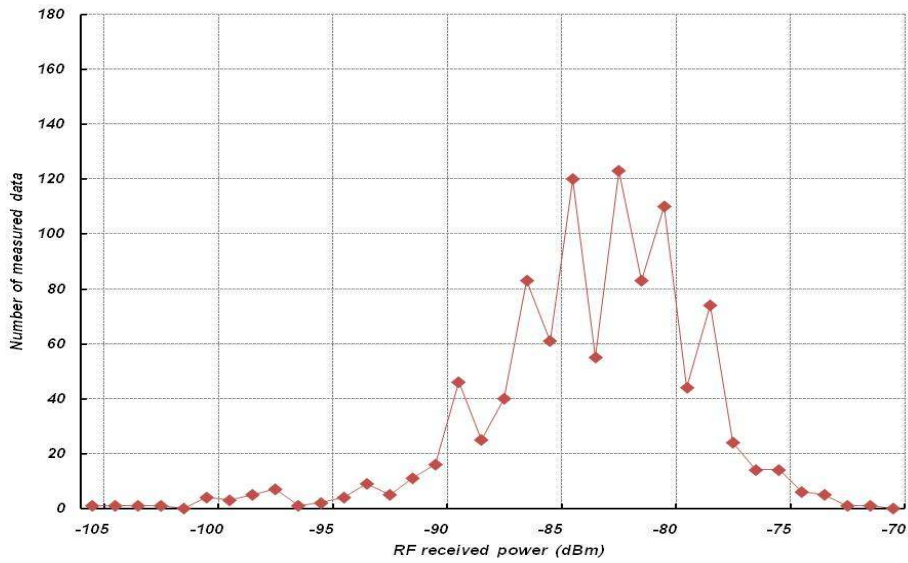


Fig. 3.44 RSSI distribution in agricultural tractor at travel speed of 30km/h.

트랙터 주행에 따른 수신전력의 분포 범위는 송신장치의 휠 장착각도를 변화하면서 운전석에서 측정된 수신전력 범위와 큰 차이가 없음을 확인하였다. 승용 및 상용차에 비하여 트랙터는 타이어의 직경이 크고 주행속도가 낮기 때문에 타이어 회전에 따른 수신전력의 감쇠 범위가 상대적으로 작지만, 트랙터의 복잡한 차체 구조로 인하여 승용 및 상용차의 수신전력 측정 분포와 크게 다르지 않을 것이라 예상할 수 있다.

개발된 송·수신장치를 차량에 장착하여 무선통신을 수행하는 경우, 채널 손실은 타이어 휠의

회전에 따른 송신 안테나 방향 변화, 금속 성분으로 구성된 타이어 휠의 재질 특성, 차량의 차체 구조에 의한 전파의 반사, 흡수, 회절 및 주행에 의하여 발생하는 무선 환경 변화에 따른 손실의 합으로 정의할 수 있다. 본 연구에서 개발된 공기압 송·수신장치의 채널 손실은 송신장치를 차량에 장착하고 실제로 주행하면서 송신한 데이터그램을 수신하면서 측정한 수신전력을 이용하여 식 3.1과 같이 계산할 수 있다.

$$L_{ch} = 10 \log \left(\frac{P_r}{P_{totalrad}} \right) \dots\dots\dots (3.1)$$

여기에서, $P_{totalrad}$: 송신장치의 복사 전력 총합

식 3.1을 이용하여 송신 안테나 이득을 포함한 송신전력과 수신 안테나 이득을 포함한 수신전력의 비를 계산하면 차량의 무선 환경에서의 채널 손실의 합을 계산할 수 있다. 전파 법규가 허용하는 출력 범위와 설치 환경을 고려하여 개발한 송신장치의 송신 출력은 2.04 dBm이며, 제작된 송신 안테나의 이득은 -6.9 dBi로 측정되었다. 개발된 수신장치의 수신 안테나 이득을 포함한 요구 수신전력은 트랙터의 무선환경에서 RSSI 측정장치를 이용하여 측정한 최저 수신 레벨(-100 dBm)에 간섭 잡음 마진(Fade margin)을 고려하여 계산하였다.

간섭 잡음 마진은 무선 링크가 적용되는 다양한 환경에서 발생할 수 있는 전파 상쇄 간섭 현상에 의한 전파 강도 손실을 고려하기 위한 용어로, 수신장치에서는 최소 허용 수신전력보다 간섭 잡음 마진만큼 여유를 주고 설계한다. 간섭 잡음 마진에 대한 명확한 해석은 없으며, 고품질 통신이 필요한 경우에는 높은 신뢰도를 적용하며 음성통신 위주의 품질은 신뢰도를 낮게 적용하는 것이 일반적이다. 통상적으로 간섭 잡음 마진은 -10 dB로 설정하며(윤지영, 2005), 이 값과 식 3.1으로 계산된 채널손실을 합하면 농용 트랙터의 무선환경에서의 채널 손실의 총합은 -105 dB를 얻을 수 있다. 식 2.1을 고려하여 이 값과 송신 안테나 이득을 고려한 송신장치의 출력값을 더하여 농용 트랙터 환경에서 수신장치의 성능을 검증하는 최소 기준을 -110 dBm으로 결정하였다.

라. 타이어 공기압 수신장치 성능

(1) 링크 예산에 의한 수신장치 요구 성능

통신 시스템에서 일반적으로 링크가 포함하는 기본적인 세 가지 요소는 송신장치, 수신장치 및 채널로 분류한다. 본 연구에서 개발된 타이어 공기압 송·수신장치에서 채널은 장치가 운용되는 주위 환경과 및 타이어 휠을 포함한 차체 구조물 등이 해당된다.

송·수신장치 개발에 있어서 링크 예산의 계산은 장치의 목표 성능을 확립하고 이를 구현하기 위한 수신 에러율의 기준을 정하고자 하는 경우에 필요하다. 링크 예산 수립 과정에는 측정 또는

예측되는 채널 손실에 대하여 송신출력과 수신전력을 적절하게 배분하여 기준으로 채택한 수신 에러율을 확보하기 위한 개발 과정이 포함된다. 차량 내부의 통신 링크에서 전파 법규가 허용하는 출력 범위와 작동환경을 고려하여 개발된 송신장치의 출력과 채널 손실을 고려하면 수신장치의 요구 성능은 -110 dBm의 수신전력에서 프레임 에러율을 50 % 이하로 설정하는 것이 타당하다고 사료된다.

개발된 공기압 송신장치는 2.04 dBm의 송신출력, 433.92 MHz의 반송파주파수를 중심으로 48 kHz의 주파수 편이 특성을 나타내었다. 하드웨어 또는 환경의 영향에 따른 송신장치의 출력 특성 변화를 무선통신 시뮬레이터로 구현하여 개발된 수신장치에 입력하고 링크 예산에 의한 수신장치의 요구 성능 기준에 부합하는지 확인하였다. 수신 성능은 송신출력 변화에 따른 FER(frame error rate), 반송파주파수 변화에 따른 FER 및 반송파주파수와 송신출력의 복합제어에 따른 FER로 나누어 측정하였다.

(2) 수신장치 성능

① RF 송신출력 변화에 따른 수신전력

개발된 수신장치에 무선신호 시뮬레이터로부터 송신주파수를 433.92 MHz로 고정하고 송신 출력을 변화시키면서 FER을 측정하였다. 수신장치로 입력되는 프레임의 개수는 1000개를 기준으로 하였으며, 수신장치에서 정상적으로 복호화된 프레임 개수는 RS-232C 통신을 이용하여 컴퓨터로 인터페이스 하여 별도의 프로그램에서 계산하였다.

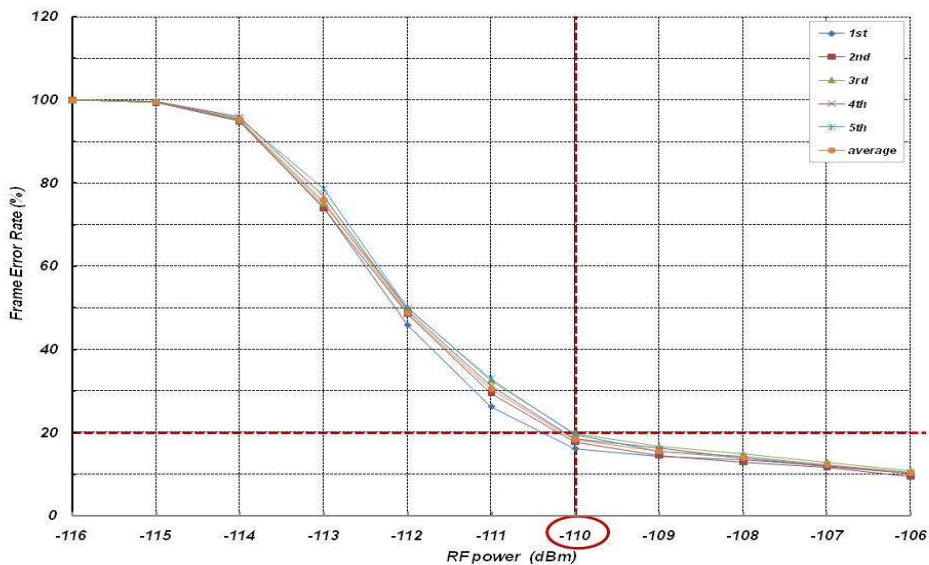


Fig. 3.45 FER test result concerning power sweep.

시뮬레이터에서 생성된 무선 신호는 RF 케이블을 이용한 전도시험(conduction test) 방법으로 수신 장치 입력하였다. 측정 결과에 영향을 줄 수 있는 주변의 전파 잡음 정도는 스펙트럼 분석기로 측정하였으며, 측정 과정 중에 수신 장치 영향을 줄 수 있을 정도의 외란이 발생하는 경우에는 시험과정을 반복하여 측정하였다. 측정은 총 5회에 걸쳐서 반복 수행하였으며, 그림 3.45에 측정 결과를 나타내었다. 100 %의 FER은 무선통신 시뮬레이터로부터 1000개의 프레임을 수신 장치 인가하였을 때 하나의 프레임도 정상적으로 인식하지 못하는 경우를 의미하며, 0 %의 FER은 그 반대의 경우를 의미한다.

수신회로 및 복호화 기능이 내장된 펌웨어를 포함한 통신 시스템에서 프레임 에러율에 의한 수신 전력의 정의는 개발된 장치의 성능 검증에 대한 실제 정보를 제공한다고 할 수 있다. 측정 결과, 고정된 반송파주파수 및 주파수 편이 조건에서 개발된 수신 장치 수신 전력은 20 %의 FER을 기준으로 -110 dBm이므로 개발된 수신 장치 링크 예산에 의한 요구 성능을 만족하였다.

② RF 반송파주파수 변화에 따른 주파수 대역폭

무선통신 시뮬레이터로부터 수신 장치 인가되는 송신출력을 -106 dBm으로 고정시킨 상태에서 반송파주파수를 변화시키면서 FER을 측정하였다. 수신 장치 입력되는 프레임 개수는 1000개를 기준으로 하였으며, 수신 장치 정상적으로 복호화된 프레임 개수는 RS-232C 통신을 이용하여 컴퓨터로 인터페이스 하여 별도의 프로그램에서 계산하였다. 측정 결과는 그림 3.46과 같다.

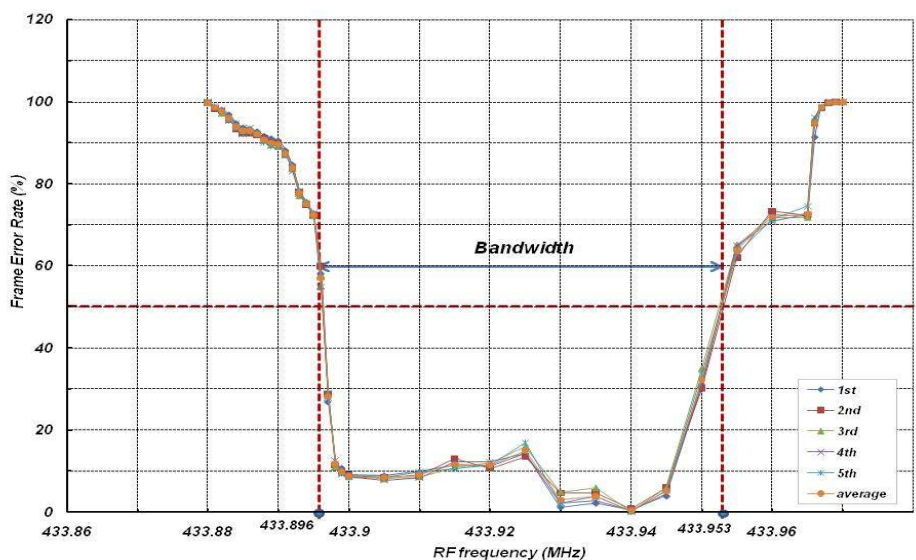


Fig. 3.46 FER test result concerning frequency sweep.

무선통신 시스템에서 통과대역(pass band)의 대역폭에 대한 정의는 임의의 크기를 가진 신호

를 시스템에 통과시켰을 때 -3 dB (50%) 줄어드는 지점의 주파수 폭을 의미한다. 마찬가지로 각각의 주파수에 대해서 정해진 크기를 갖는 신호의 진폭에 대한 손실을 그래프로 표현하여 대역폭에 대한 결과를 얻을 수 있다.

시뮬레이터를 이용하여 송신출력과 주파수편이를 고정하고 반송파주파수를 변화시키면서 FER을 계산하여 개발된 수신 장치 대역폭을 측정하였다. -106 dBm의 송신출력으로 50% 이하의 FER을 기준으로 구한 대역폭은 55 kHz이며, 이 결과는 개발된 송신장치의 48 kHz의 주파수 편이를 포함하는 것을 나타낸다.

③ RF 반송파주파수와 송신출력 변화에 따른 수신 성능

무선통신 시뮬레이터로부터 수신 장치 인가되는 송신신호의 무선특성이 표 3.2와 같이 복합적으로 변화하는 상황에서 FER의 변동 추이를 확인하기 위한 시험을 수행하였다. 이전 시험과 동일하게 입력되는 프레임 개수는 1000개를 기준으로 하였으며 수신 장치 정상적으로 복호화된 프레임 개수는 RS-232C 통신을 이용하여 컴퓨터로 인터페이스 하여 별도의 프로그램에서 계산하였다. 시험조건은 표 3.2와 같으며, 측정 결과는 그림 3.47과 같다.

Table 3.2 RF parameter list

LIST	Frequency (MHz)	Power (dBm)	Deviation (kHz)
A	433.88	-103	±15
B	433.89	-106	
C	433.90	-109	
D	433.91	-112	
E	433.92	-112	
F	433.93	-112	
G	433.94	-112	
H	433.95	-109	
I	433.96	-106	
J	433.97	-103	

무선통신 시뮬레이터의 송신출력은 -103 ~ -112 dBm 사이에서 단계적으로 3 dB 변화시켰으며, 주파수는 1 kHz 단위로 증가시키면서 FER 변동 추이를 측정하여 통과대역 이내의 주파수 영역과 그 이외의 영역으로 나누어 비교하였다. 측정 결과, 통과대역 이내에서는 3 dB의 송신출력 변화가 FER에 크게 영향을 주지 않았으며, 통과대역을 벗어나면 송신출력의 변화보다는 주파수 변화가 FER에 영향을 더 준다는 사실을 확인하였다.

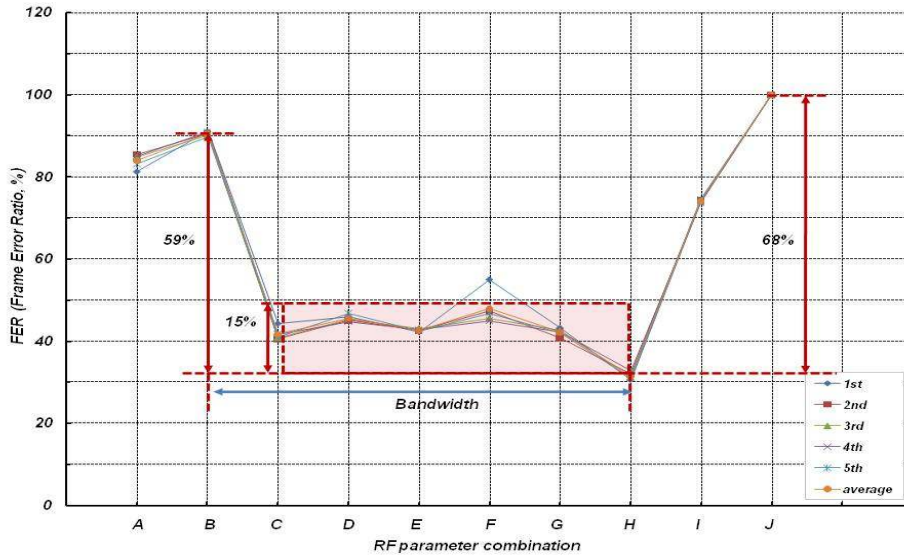


Fig. 3.47 FER test result concerning RF parameter list sweep.

3. 요약 및 결론

본 장에서는 공기압을 측정하고 송신하고자 하는 각종 정보를 정해진 규약인 데이터그램으로 부호화하고 반송파주파수로 변조하여 송신안테나를 통하여 전파(傳播)하는 역할을 수행하는 송신장치와, 수신된 전자기파 신호를 증폭하고 복조과정을 거쳐 데이터그램으로 복호화하여 무선으로 송신된 공기압을 확인할 수 있는 수신 장치 구성된 타이어 공기압 측정 및 송·수신 장치 개발하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 센서 모듈과 마이크로컨트롤러 일체형인 반도체 소자, 변조기, 안테나 및 배터리로 구성된 공기압 측정 및 송신장치를 개발하였다. 0 ~ 350 kPa 측정 범위에서 개발된 장치의 압력 측정 정확도는 $\pm 0.5\%$ FS로 확인하였다.

나. 수신 안테나, 저잡음 증폭기, 대역통과 필터, 복조기 및 마이크로컨트롤러로 구성된 수신 장치 개발하였다. 개발된 수신 장치 데이터 표시장치는 128×64 도트의 그래픽 LCD를 사용하였다.

다. 송·수신 장치 성능을 개선하고 검증하기 위하여 기저대역 신호 발생기, 무선 변조기, 제어용 컴퓨터 및 시뮬레이션 소프트웨어로 구성된 무선통신 시뮬레이터를 개발하였다. 개발된 시뮬레이터는 송신 출력 및 반송파주파수를 임의로 가변시킬 수 있으므로 송·수신 장치 작동환경 변

화에 따른 다양한 무선 환경을 구현하면서 성능 시험을 수행할 수 있었다.

라. 개발된 송신장치의 무선특성 측정 결과, 데이터그램은 433.921 MHz의 반송파주파수를 중심으로 48 kHz의 주파수 편이(偏移) 특성을 나타내며, 송신출력은 2.04 dBm으로 나타났다.

마. 개발된 수신 장치 차량에 설치하고 무선성능을 측정한 결과, -110 dBm의 수신 전력에서 20 %의 프레임 에러율을 확인하였다. 이 결과는 개발한 송·수신 장치 운용 환경을 고려하여 통신 링크 예산으로 수립한 50 %의 목표 프레임 에러율 기준 이내로 수신 장치 요구 성능을 만족하였다.

제 4 절 공기압 제어장치 및 시뮬레이터 개발

타이어 공기압 제어장치는 타이어 휠에 장착되어 공기압을 측정하고 무선으로 전송하는 송신 장치, 이를 수신하여 제어기로 전달하는 수신 장치, 타이어 공기압을 설정된 제어 모드에 따라 제어하는 제어기 등의 전자회로와 공기 압축기로 구성된 공기압 발생장치, 회전하는 타이어에 공기압의 주입 및 배출의 역할을 수행하는 솔레노이드 밸브 블록과 무한회전형 공기압 공급 장치 등의 기계장치로 구성하였다.

주행하는 차량에 각종 장치를 장착하고 다양한 시험을 수행하면서 복합적인 운전 조건에 대응이 가능하도록 제어 알고리즘을 포함한 공기압 제어 장치를 완성하는 과정은 현실적으로 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 타이어를 임의의 회전속도로 회전하면서 공기압 제어 시스템에 필요한 기계 장치의 성능 및 작동 상태를 확인하고, 회전속도와 공기압 등의 다양한 변화를 통하여 시험 조건 및 대상 타이어를 변경시키면서 공기압 제어 알고리즘을 개발하고자 하는 목적으로 타이어 시뮬레이터를 개발하였다.

본 연구에서는 타이어 공기압 제어 시스템에 필요한 공기압 발생장치, 공압 유로를 포함한 솔레노이드 밸브 블록 및 무한회전형 공기압 공급 장치를 개발하고, 타이어 시뮬레이터를 이용하여 개발한 장치의 작동 상태를 확인하였으며, 다양한 타이어를 대상으로 공기압 제어 시험을 수행하였다. 타이어 시뮬레이터는 승용, 상용 및 트랙터 타이어를 장착하고 전기 모터를 이용하여 임의의 회전속도로 회전시킬 수 있으며, 개발된 공기압 발생 및 공급 장치를 통하여 설정된 공기압으로 수동 및 자동 제어가 가능하도록 구현하였다. 개발된 타이어 시뮬레이터를 이용하여 가속도를 이용한 차량 속도 측정 알고리즘을 검증하였으며, 회전속도를 가변하여 차량 속도 변화에 따른 공기압 송·수신 장치 성능을 확인하였다. 공기압 제어 알고리즘을 완성하고 성능시험을 수행하여 개발된 장치의 제어성능을 검증하였다.

1. 재료 및 방법

가. 타이어 공기압 발생장치 설계

(1) 장치 개요

타이어 공기압 제어는 현재 압력이 설정 압력보다 높으면 공압회로의 솔레노이드 밸브를 열어 대기 중으로 공기를 배출하거나, 현재 압력이 낮을 경우에는 외부에서 압력을 인가해주어야 한다. 압력 인가 또는 공기 주입을 위하여 설정 압력보다 높은 압력을 발생시킬 수 있는 외부장치가 필요하므로 본 연구에서는 피스톤의 왕복운동과 밸브의 개폐에 따라 공기를 흡입하여 압축 후 배출하는 기능을 갖는 왕복 피스톤식 공기 압축기를 적용하였다. 일반적으로 공기 압축기에는 압축 공기를 저장하는 별도의 공기압 탱크를 부착되어 있으나, 차량 내부 설치 공간상의 제약조건과 경제성을 고려하여 공기압 탱크는 제거하고 공기 압축기 본체만 사용하였다.

공기 주입 타이어의 설정 압력 도달 시간 및 소요 공기량을 계산하기 위하여 공기 압축기의 흡입 공기량을 선정하여야 한다. 대기온도 25 °C에서 타이어의 압력을 제어하고자 할 때 필요한 대기압(1 atm, 101 kPa)의 공기의 양을 V_a , 시간을 T라고 하면 압축기의 흡입 공기량 $DISP_{comp}$ 는 식 4.1로 계산할 수 있다.

$$DISP_{comp} = \frac{1}{\eta} \times \frac{V_a}{T} \dots\dots\dots (4.1)$$

여기에서, η : 압축기의 효율

V_a 는 이상기체 상태방정식과 반데르발스(Van der waals) 상태방정식으로부터 예측할 수 있다. 이상기체 상태방정식은 식 4.2와 같다.

$$PV = nRT \dots\dots\dots (4.2)$$

타이어의 압력을 P_1 에서 P_2 로 증가시키고자 할 때, 소요 공기량은 식 4.3으로 구할 수 있다.

$$n_2 - n_1 = \frac{V_{tire}}{RT} (P_2 - P_1) \dots\dots\dots (4.3)$$

압력의 변화를 위하여 필요한 공기의 양, 즉 $n_2 - n_1$ 값을 대기압에서의 부피로 계산하면 식 4.4와 같다.

$$n = \frac{V_{atm}}{RT} P_{atm} \quad \dots\dots\dots (4.4)$$

$$\frac{V_{tire}}{RT} (P_2 - P_1) = \frac{V_{atm}}{RT} P_{atm} \quad \dots\dots\dots (4.5)$$

$$V_{atm} = \left(\frac{P_2 - P_1}{P_{atm}} \right) V_{tire} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$

구동륜 타이어의 부피가 대략 350 L라 하면, 타이어의 압력을 69 kPa에서 207 kPa로 제어하는 경우에 소요 공기량은 식 4.6과 같이 이상기체 상태방정식으로 계산하면 대략 478 L가 필요하다.

반데르발스 상태방정식은 이상기체 상태방정식에 비하여 실제 기체를 더 정확하게 반영한다. 반데르발스 상태방정식은 식 4.7과 같다.

$$\left(P + \frac{n^2 a}{V^2} \right) (V - nb) = nRT \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

대기 중의 공기가 질소와 산소 각각 76.5 %, 23.5 %로 구성되어 있다고 가정하면, 표 4.1의 계수를 이용하여 압력, 부피, 온도를 알고 있는 경우에 공기의 양(*mol* 수)을 계산할 수 있다.

Table 4.1 Van der waals coefficients

	$a \text{ (atm} \cdot \text{l}^2/\text{mol}^2\text{)}$	$b \text{ (l/mol)}$
N ₂	1.408	0.03913
O ₂	1.360	0.03180

공기의 경우, 반데르발스 계수는 식 4.8과 식 4.9로 계산된다.

$$am = 1.408 \times 0.765 + 1.360 \times 0.235 = 1.397 \text{ atm} \cdot \text{l}^2/\text{mol}^2 \quad \dots (4.8)$$

$$bm = 0.03913 \times 0.765 + 0.03180 \times 0.235 = 0.0374 \text{ l/mol} \quad \dots\dots (4.9)$$

타이어의 부피가 350 L 이고 온도가 298.15 °K인 조건에서, 압력이 69 kPa일 때 *n*은 24.1 *mol*, 압력이 207 kPa일 때 *n*은 43.6 *mol*이므로 추가로 주입해야 할 공기의 양은 19.5 *mol*이 되며, 같은 온도에서 대기압 조건의 공기량으로 계산하면 부피는 477 L이다.

이상기체 상태방정식과 반데르발스 방정식의 결과를 토대로 69 kPa에서 207 kPa로 타이어 압

력을 제어하는데 필요한 공기량 V_a 는 대략 480 L 이고, 제어에 소요되는 시간을 5분, 효율을 약 90%로 가정하면 공기 압축기의 분당 공기 흡입량은 107 L 이다. 본 연구에서는 흡입 공기량이 분당 105 L 인 공기 압축기를 선정하였다.

상용차는 공압 제동장치를 작동하기 위하여 별도의 공기압축기가 내장되어 있으므로 타이어 공기압 제어 시스템을 적용하는 경우 공기압 발생장치를 추가로 설치할 필요가 없다. 그러나 국내에서 생산되는 대부분의 승용차 및 농용 트랙터에는 공기압축기가 설치되어 있지 않으므로 공기압 발생장치를 추가하여야 한다. 농용 트랙터에 내장된 유압회로를 이용하여 유압모터, 상용차용 컴프레서 및 유압 관련 부품을 추가하면 흡입 공기량이 큰 공기압 발생장치를 제작할 수 있으나, 고가의 추가 비용이 발생하며 트랙터에 추가적인 장치 설치 공간이 필요한 단점이 있다.

공기 압축기의 작동 전원은 자체적으로 충전이 가능하여 유지보수의 필요가 없는 차량의 내장 배터리를 사용하였다. 공기 압축기를 병렬로 추가하면 흡입 공기량은 쉽게 증가시킬 수 있다. 공기압 발생장치에 적용된 공기 압축기의 명세와 외형은 표 4.2 및 그림 4.1과 같다.

Table 4.2 Specification of air compressor

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

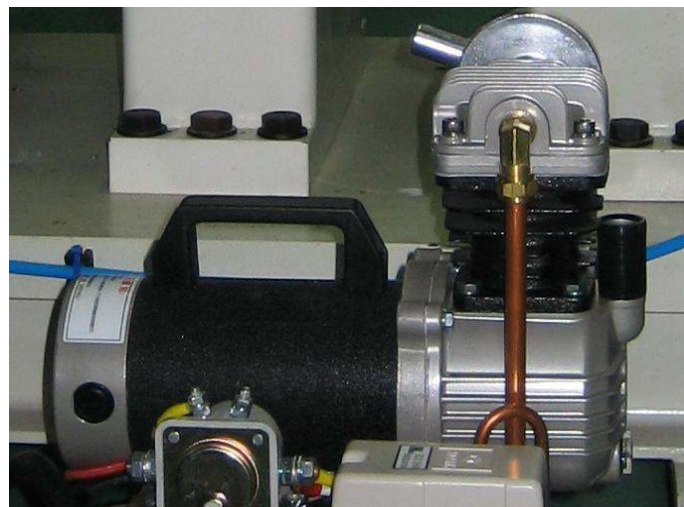


Fig. 4.1 Air compressor.

(2) 유로 설계

타이어 공기압을 제어하기 위하여 공기 주입 및 배출 기능을 담당하는 공압용 솔레노이드 밸브와 밸브 블록을 이용하여 유로를 설계하였다. 설계된 유로는 그림 4.2와 같다.

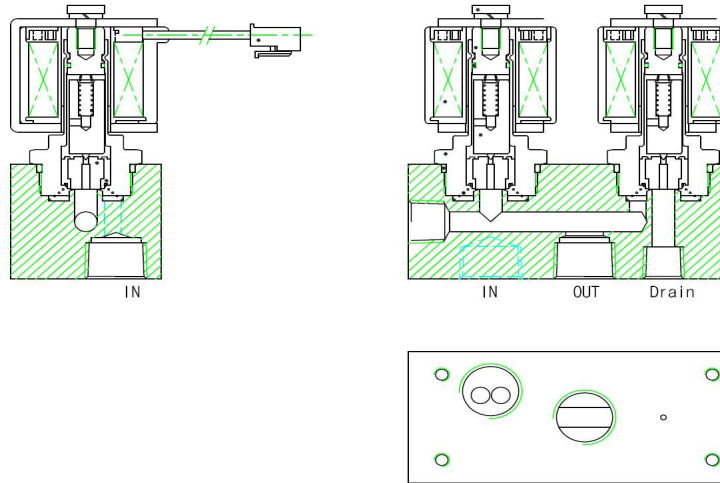


Fig. 4.2 Air path of valve block.

공압용 파이로트식 솔레노이드 밸브는 12 VDC 전원을 공급하면 솔레노이드가 전자석이 되어 파이로트부에 있는 원통형 막대를 당겨서 공기 흐름을 바꾸고 이것이 다시 메인 스프링을 동작시켜 공기 흐름을 단속하는 원리로 작동한다. 각각의 밸브는 동시에 작동하지 않으며, 공기 주입용 밸브가 작동하면 공기 압축기에서 생성된 공기가 타이어로 주입되고, 공기 배출용 밸브가 작동하면 타이어 내부의 공기가 대기 중으로 배출된다. 유로에 적용한 공압용 솔레노이드 밸브의 명세는 표 4.3에 나타내었으며, 제작된 밸브 블록은 그림 4.3과 같다.

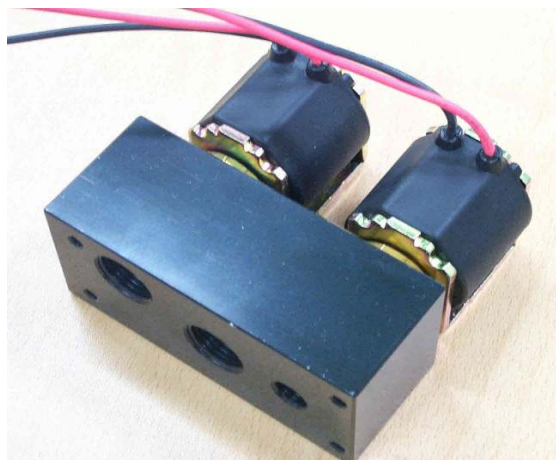


Fig. 4.3 Valve block assembly.

Table 4.3 Specification of solenoid valve

Item	Description
Maximum Ratings	12 VDC \pm 10%
Fluid	Compressed Air
Operating Pressure	1700 kPa
Endurance Pressure	2400 kPa
Peripheral temp	-10 ~ 60 $^{\circ}$ C
Orifice	\varnothing 7
Temperature rising	Below 90 $^{\circ}$ C

(3) 공기압 제어 회로 구성

타이어 공기압을 제어하기 위하여 제어기의 TTL 신호를 이용하여 공기 압축기와 공압 솔레노이드 밸브를 작동하는 전원을 제어하는 릴레이 구동 회로를 개발하였다. 개발된 릴레이 구동 회로는 제어기의 TTL 신호로 달링턴 트랜지스터를 통하여 릴레이를 작동시켜 릴레이 출력단에 접속되어 있는 솔레노이드 밸브에 전원을 인가 또는 차단할 수 있는 구조로 설계되어 있다. 개발된 릴레이 구동 회로는 그림 4.4 및 그림 4.5와 같다.

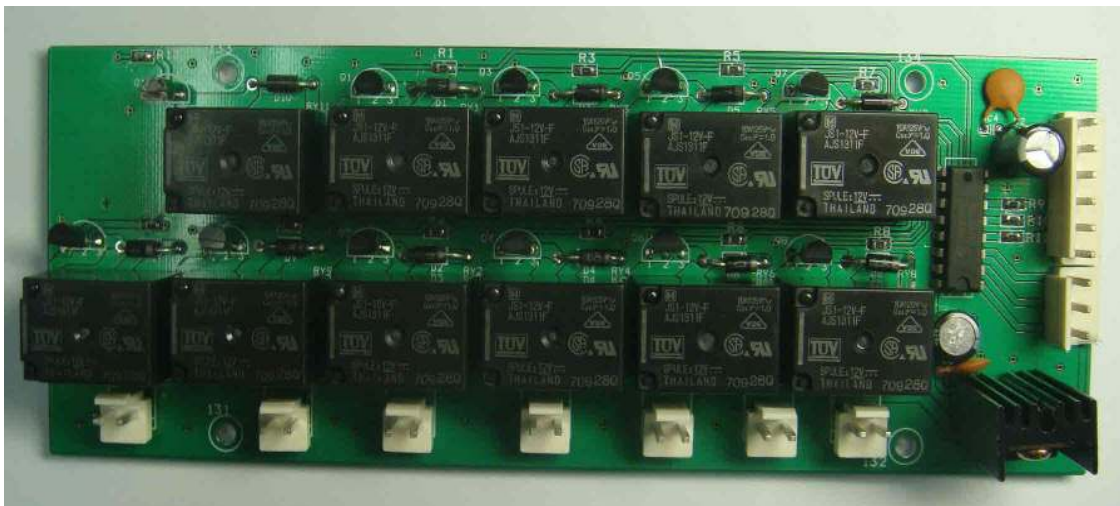


Fig. 4.4 Solenoid control PCB.

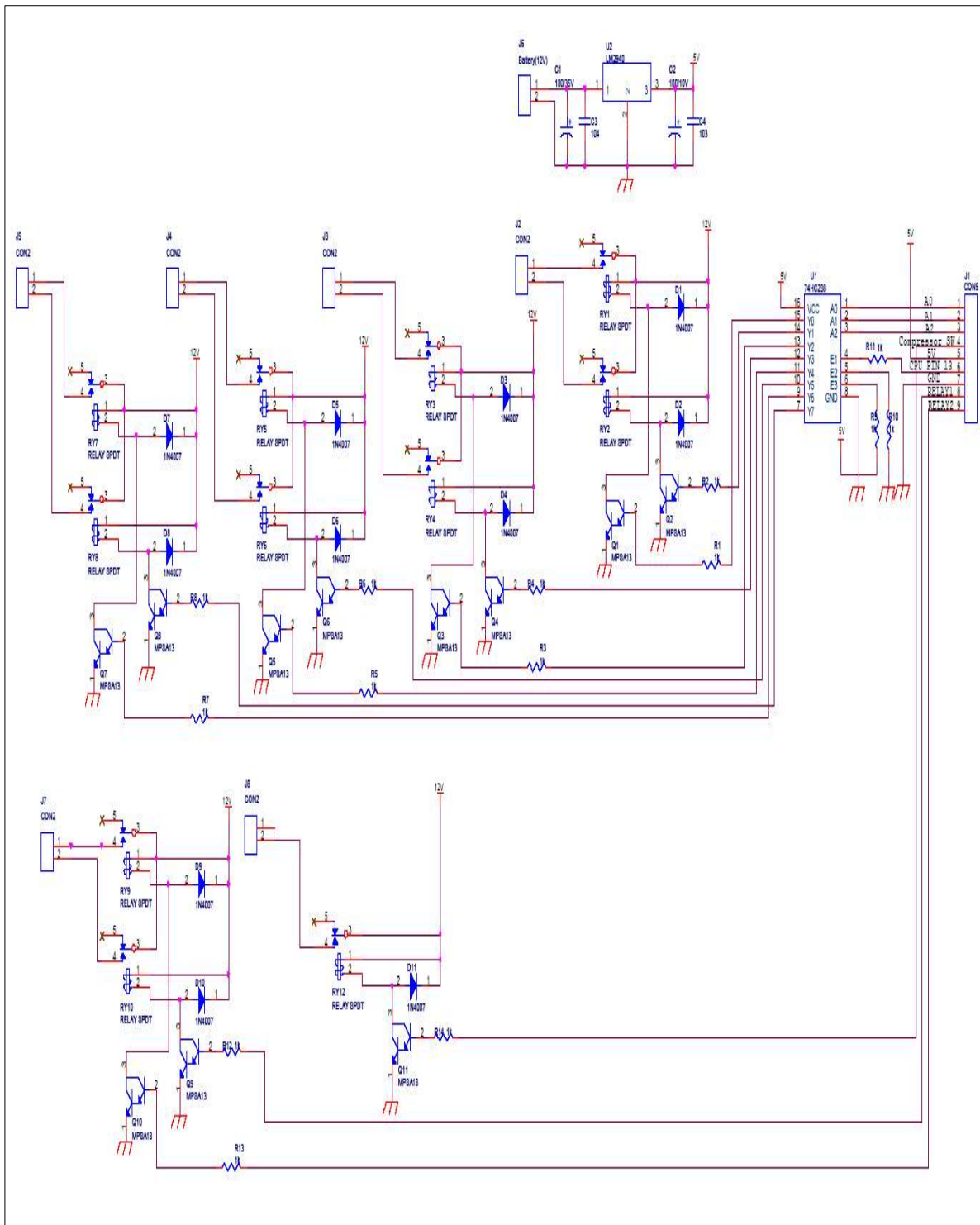


Fig. 4.5 Circuit diagram of solenoid drive.

나. 무한회전형 공기압 공급 장치 설계

(1) 타이어 휠 부착용 공기압 공급 장치 구조

로터리 조인트는 회전하는 부품과 고정된 배관라인을 연결하는 유공압 부품의 일종이다. 장비가 고속 회전을 하거나 고압의 경우에는 고가의 특수형 로터리 조인트를 사용하여야 한다. 승용

차는 고속 주행의 경우에 타이어의 회전속도가 높아지지만, 상용차 또는 농용 트랙터는 타이어는 직경이 크기 때문에 최고 주행속도에서 타이어의 최대 회전속도는 대략 1,500 rpm 미만이다. 또한, 공기 압축기의 최대 압력은 대략 1,030 kPa이므로 회전하는 타이어에 공기를 공급하기 위한 무한회전형 공기압 공급 장치에는 일반 산업용 로터리 조인트를 적용할 수 있다. 승용차의 경우, 구동축의 최대 회전속도는 대략 3,000 rpm 이므로 고속용의 로터리조인트를 적용하여야 한다. 본 연구에서 선정된 로터리 조인트의 명세는 표 4.4와 같다.

Table 4.4 Specification of rotary joint

Item	Description
Fluid	Air, Oil
Max. pressure	1,500 kPa
Temperature	80 °C
Max. speed	1,500 rpm

로터리 조인트를 타이어 휠에 고정하기 위하여 별도의 고정 장치를 제작하였다. 그림 4.6과 같이 타이어 휠에 로터리 조인트를 장착하여 공기압축기에서 압축된 공기가 로터리 조인트를 통하여 회전하는 타이어로 주입되거나 타이어 내부의 공기가 유로를 통하여 대기 중으로 배출되는 무한회전형 공기압 공급 장치 완성하였다. 개발된 장치는 차량을 이용한 승용 및 운반 작업 중에 외부의 이물질에 의한 파손을 방지하기 위하여 가능한 한 휠 외부로 돌출되지 않도록 구성되었으며, 타이어 및 솔레노이드 밸브 블록과 연결할 수 있도록 공기 입출력 포트를 설치하였다.

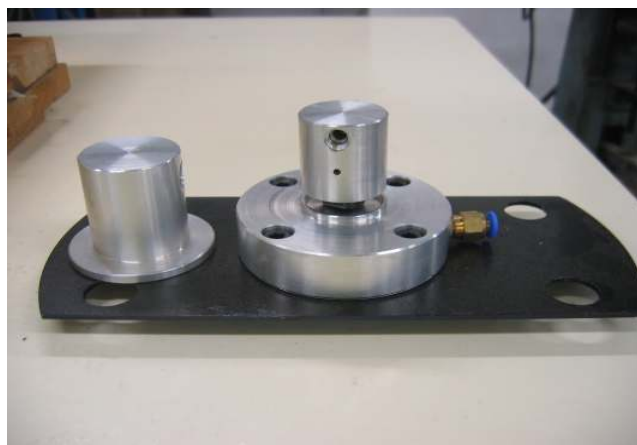


Fig. 4.6 Installation of rotary joint unit.

(2) 공기압 측정 및 송신장치 부착

대부분의 승용 또는 상용 자동차에는 주행장치로 튜브가 없는 (tubeless) 타이어가 장착되어 있기 때문에 공기압 측정 및 송신장치를 휠 내부에 고정하는 방식을 선택할 수 있다. 그러나 일부 외산의 대형 트랙터를 제외한 대부분의 국내 농용 트랙터는 튜브 타이어를 채택하고 있으므로 송신장치를 휠 내부에 장착하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 다양한 휠에 적용이 가능하도록 타이어 공기압 송신장치를 휠 외부에 고정하는 방식을 선택하였다. 송신장치의 가속도 모듈을 이용하여 차량의 주행 속도를 측정하기 위하여 송신장치의 장착방향이 회전축과 평행한 방향으로 설치되도록 그림 4.7과 같은 휠 고정장치를 제작하였다.



Fig. 4.7 Pressure transmitter case and adaptor.

회전하는 물체의 가속도는 회전 반경에 비례하므로, 장착 위치를 회전 중심에서 최대로 이격되는 지점을 선택하는 것이 가속도 측정에 유리하다. 송신장치는 그림 4.8과 같이 휠에 부착하였으며, 회전 중심으로부터 장치까지의 거리는 트랙터 타이어의 경우에 0.3m로 측정되었다.

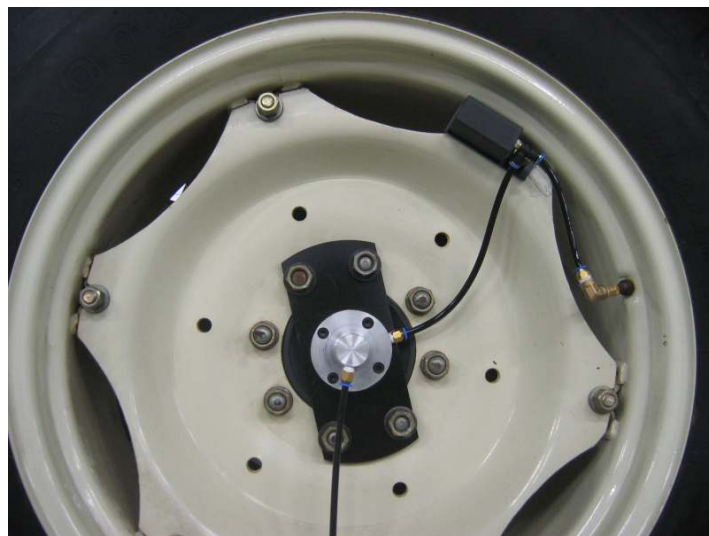


Fig. 4.8 Tire pressure transmitter mounted on the wheel.

다. 타이어 시뮬레이터 개발

(1) 타이어 시뮬레이터 구성

본 연구에서 설계 및 제작된 공기압 제어장치의 각종 하드웨어 성능 및 작동 상태를 확인하고 완성도를 높이기 위하여 실차 조건과 같이 타이어를 임의의 속도로 회전시키면서 공기압을 조절할 수 있는 타이어 시뮬레이터를 개발하여 공기압 제어 알고리즘 개발에 활용하였다. 그림 4.9 및 그림 4.10과 같이 본 연구에서 개발된 타이어 시뮬레이터의 구성은 다음과 같다.

1. 타이어 회전 장치 : 전기모터 및 모터 제어기로 구성
2. 타이어 지지 장치 : 주축 및 베어링 하우징을 포함한 동력전달 장치, 타이어 고정용 지그, 장비 고정판 등으로 구성
3. 공기압 제어 장치 : 공기 압축기, 솔레노이드 밸브 블록, 무한회전형 공기압 공급 장치 등으로 구성
4. 제어 패널 : 타이어 회전속도 수동조절 및 표시장치, 공기압 수동조절 및 표시장치 등으로 구성
5. 기타 : 장비 전원 공급용 배터리 및 충전기

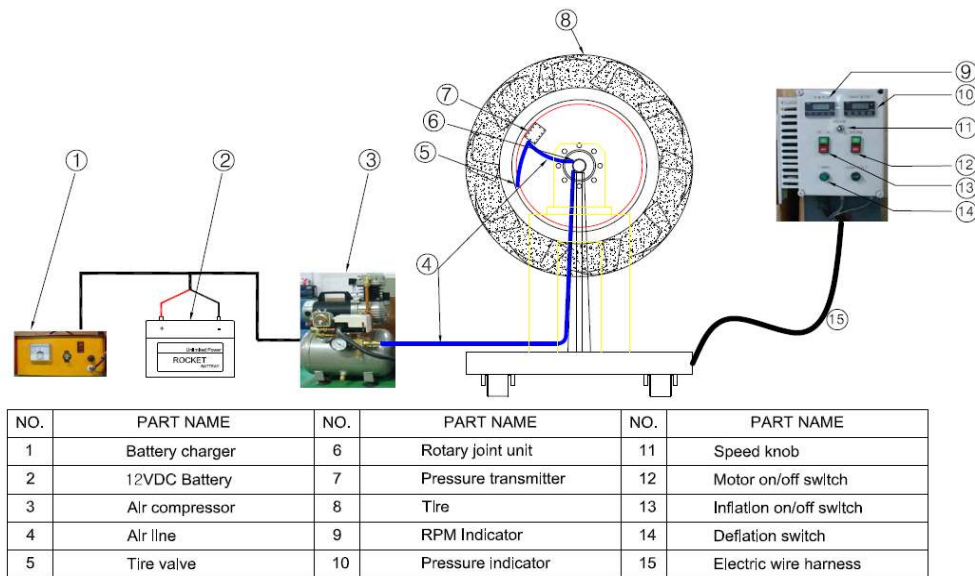


Fig. 4.9 Diagram of tire simulator.

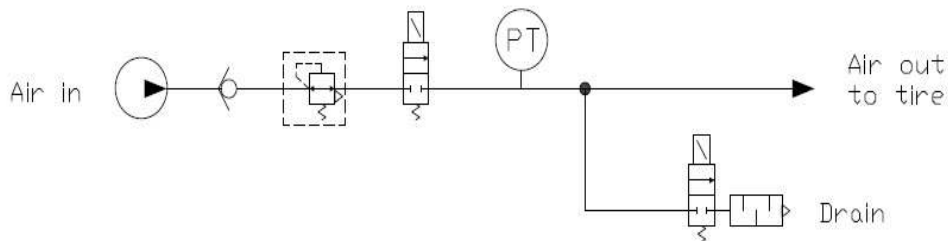


Fig. 4.10 Circuit diagram of air supply line.

(2) 타이어 시뮬레이터 기능

개발된 타이어 시뮬레이터의 기능은 다음과 같다.

1. 타이어 공기 주입 및 배출
2. 타이어 공기압 조절 및 표시
3. 타이어 회전속도 조절 및 표시

타이어 시뮬레이터는 공기압을 조절하기 위하여 공기압 발생장치로 사용하는 공기 압축기, 공압용 우레탄 튜브와 원터치 커플러로 구성된 공압 유로, 공기 주입 및 배출 기능을 담당하는 솔레노이드 밸브 블록 등의 기계 장치 및 전기 회로로 구성되는 밸브 제어 회로 등으로 구성하였다. 시뮬레이터의 각종 부품은 개발한 공기압 제어장치의 구성 부품을 대부분 그대로 적용하였다. 따라서 시뮬레이터를 작동하면서 각종 부품의 정상 작동 여부 및 타이어 공기압 제어 시스템에의 적용 적합성을 확인하였다.



Fig. 4.11 Tire simulator.

시뮬레이터의 타이어 공기압 조절 기능은 전기 스위치와 시퀀스 회로를 이용하여 공기 주입 및 배출용 솔레노이드를 수동으로 조작하여 구현하였다. 공압 유로 상에 스트레인게이지 방식의 압력 트랜스미터를 설치하고 표시장치와 연결하여 공기압을 표시할 수 있도록 시뮬레이터를 제작하였다. 타이어 회전에 필요한 동력원은 전기 모터를 이용하였으며, 회전속도를 조절하기 위하여 전용 제어기를 설치하였다. 타이어 회전속도는 포텐쇼미터를 이용하여 모터 제어기의 회전속

도 제어단자에 입력되는 전압을 조절하여 설정할 수 있도록 구성하였다. 개발된 타이어 시뮬레이터의 외형은 그림 4.11과 같다.

라. 공기압 제어 알고리즘 개발

(1) 공기압 측정 및 송신주기

본 연구에서 개발한 타이어 공기압 송신장치는 내장 배터리를 전원으로 사용하였다. 따라서 배터리 수명은 데이터의 무선 송신주기와 상관관계가 있다. 제어기에서는 수신된 공기압을 제어 신호로 사용하므로 공기압 송신주기는 제어기의 샘플링 속도와 동일한 개념을 갖는다. 샘플링 속도는 제어기의 성능 및 신뢰성에 영향을 미치므로 적당한 값을 선정하여야 한다.

송신주기가 너무 짧으면 배터리의 방전이 빨라져 배터리 교체주기가 짧아지는 단점이 있으므로 송신 시의 전류 소모를 고려하여 2초 주기로 압력과 가속도를 측정하여 공기압이 14 kPa 보다 큰 경우에 측정값을 송신하도록 송신장치의 소프트웨어를 구성하였다. 개발된 압력 측정 및 송신 알고리즘은 그림 4.12와 같다.

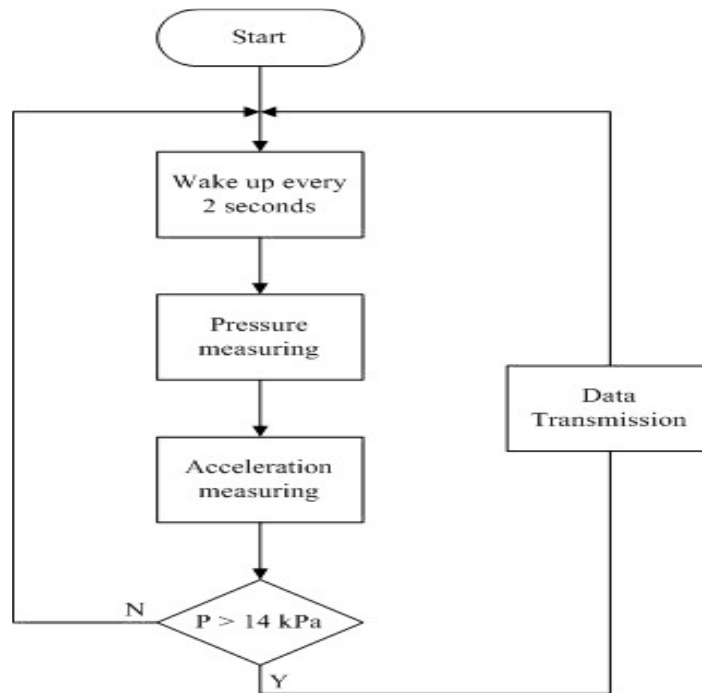


Fig. 4.12 Flowchart of transmitter for tire pressure control.

(2) 가속도 측정 및 차속 환산

그림 4.13과 같이 타이어 휠이 회전하는 동안 휠에 장착된 송신장치는 원심력에 의한 가속도를 측정하여 개발된 데이터그램에 1바이트 크기로 포함시켜 측정값을 전송한다. 전송된 측정값은

수신 장치 복호화 과정을 거쳐 제어기로 전달된다. 최종적으로 측정된 가속도는 제어기에서 식 4.12에 대입하여 연산과정을 통하여 차량의 주행 속도로 환산된다.

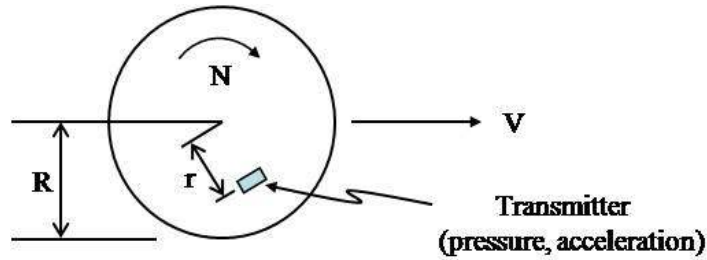


Fig. 4.13 Calculation of vehicle speed from accelerometer.

$$A = r \times (N \times 2\pi / 60)^2 \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

$$N = 9.55 \times \sqrt{\frac{A}{r}} \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

여기에서, A : 송신장치에서 측정된 가속도 (m/s^2)

r : 휠 회전 중심으로부터 송신장치까지의 거리 (m)

N : 타이어 회전속도 (rpm)

$$V = R \times (N \times 2\pi / 60) \times 3.6 \quad \dots\dots\dots (4.12)$$

여기에서, V : 차량 주행 속도 (km/h)

R : 타이어 반경 (m)

(3) 공기압 제어 알고리즘

승용차용 타이어에 비하여 트럭 및 농용 트랙터 타이어는 내용적이 크기 때문에 공기 압축기를 통하여 공기를 주입하면 압력이 상승하는 정도가 상당히 느리게 반응하는 응답특성을 갖고 있다. 따라서 주어진 제어 신호에 대응하여 빠른 응답특성을 갖는 대부분의 제어 시스템과는 차별화된 제어 알고리즘이 필요하다. 타이어 시뮬레이터를 이용하여 공기를 주입 또는 배출하면서 송신장치로부터 전송된 압력과 제어신호 등을 그래프에 표시하고 저장할 수 있는 데이터 수집 장치를 개발하여 제어 알고리즘 개발에 활용하였다.

데이터 수집 장치는 그림 4.14와 같이 타이어 시뮬레이터의 휠에 장착된 송신장치로부터 전송된 공기압 및 가속도 측정값을 수신 장치 수신하여 RS-232C 직렬 통신으로 랩톱컴퓨터로 입력하여 데이터를 수집할 수 있도록 구성하였다. 랩톱 컴퓨터에서 실행되는 데이터 수집 프로그램은 National Instruments사의 LabVIEW를 이용하였으며, 측정값을 그래프에 표시하거나 저장하

는 기능을 수행한다. 그림 4.15는 개발된 프로그램의 화면 예이다.

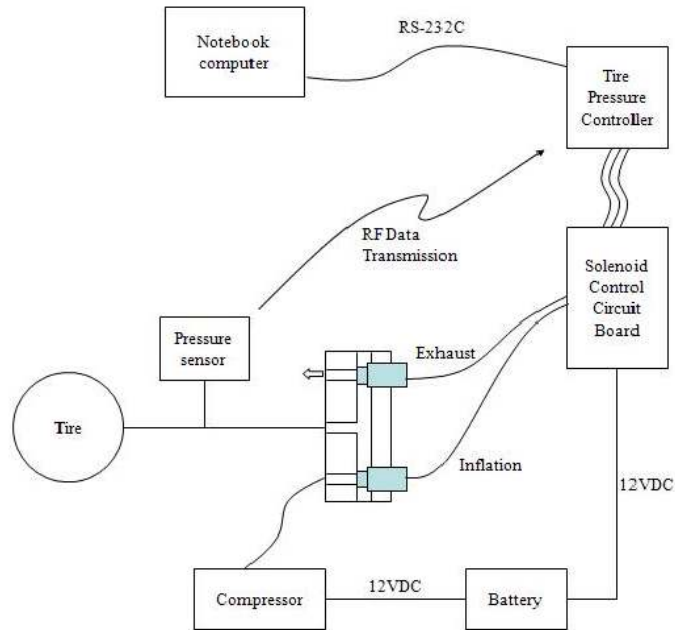


Fig. 4.14 Block diagram of data logging.

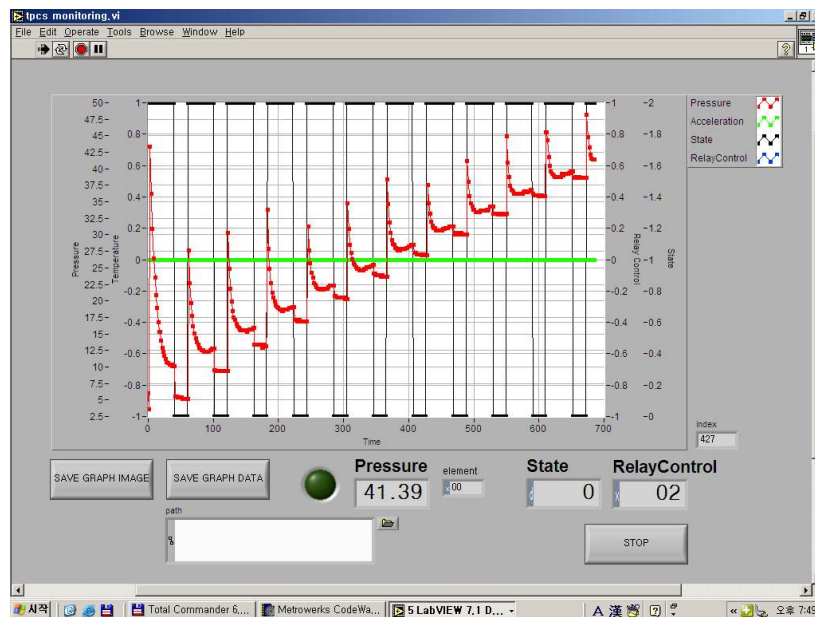


Fig. 4.15 Data logging program.

공기압 제어 알고리즘을 개발하기 위하여 주입된 공기압에 따른 제어 시스템의 응답특성을 확인하기 위한 기초 시험을 수행하였다. 34 kPa의 초기 타이어 공기압에서 40초 동안 공기주입 밸브를 열어 공기를 주입하고 밸브를 닫은 후, 타이어의 압력이 안정될 때까지 수 초 동안 기다린

후 공기압을 측정하고, 다시 40초 동안 밸브 열기 과정을 반복하여 타이어의 압력이 276 kPa에 도달할 때까지 데이터를 수집하였다.

그림 4.16에 휠에 장착된 송신장치로부터 수신한 압력값을 그래프에 표시하였다. 공기주입 밸브가 닫히고 압력이 안정화되는 시점의 압력이 실제 타이어 압력이며, 그 이외의 값들은 공기주입 과정 중에 공기 압축기와 유로 등의 영향에 의하여 타이어를 포함한 공압라인에 형성되는 압력으로, 정상적인 타이어 공기압과는 차이가 있음을 확인할 수 있었다.

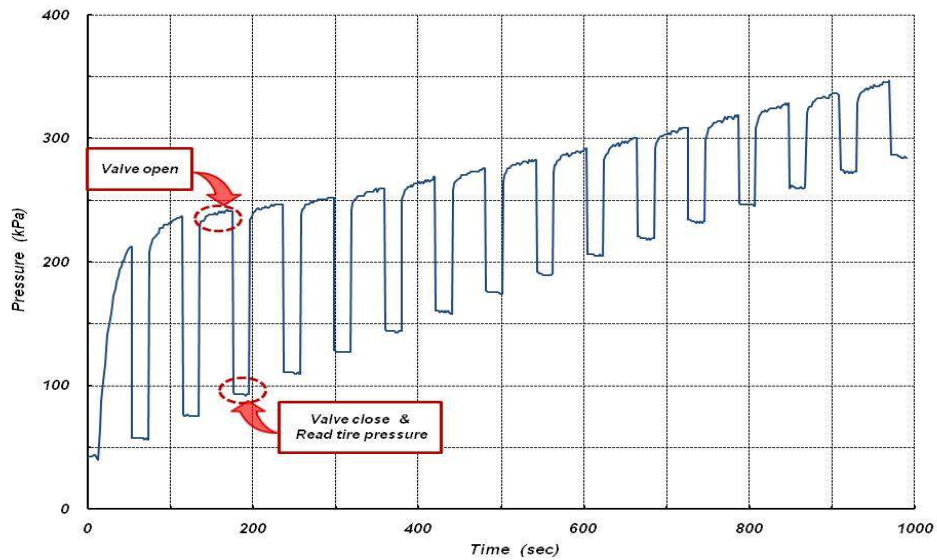


Fig. 4.16 Logged data of tire inflation test.

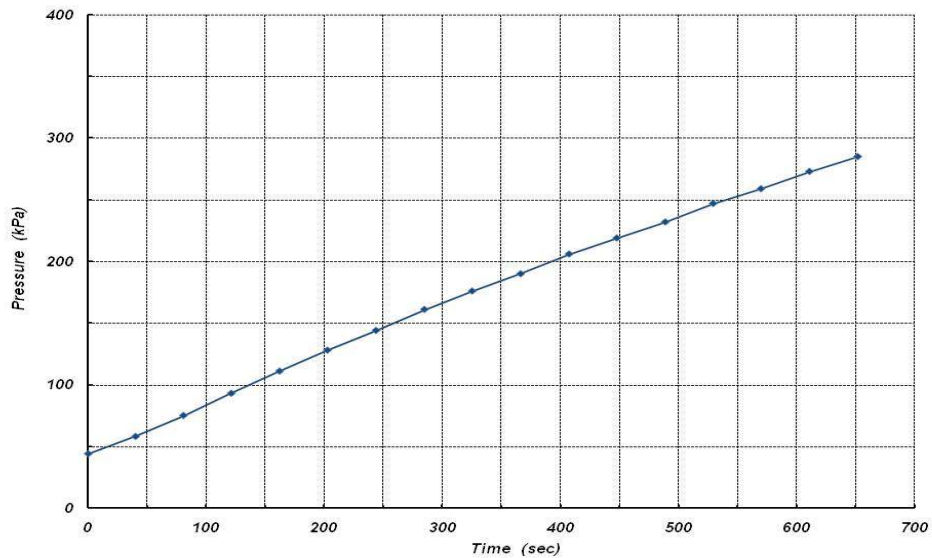


Fig. 4.17 Characteristic curve of tire inflation.

그림 4.17은 40초 간격으로 공기를 주입하고 공기압이 안정화 된 이후에 측정한 압력의 평균 값을 나타낸 그래프이며, 타이어의 압력이 높아질수록 압력을 증가시키기 위하여 더 많은 시간, 즉 더 많은 공기량이 요구됨을 확인할 수 있다. 이 현상은 토출량이 큰 공기 압축기가 기본 장착 되어 있는 상용차의 경우에는 큰 문제가 없으나, 별도로 고압용 공기 압축기를 농용 트랙터에 적용하고자 하는 경우에는 추가 비용, 설치 공간의 제약 조건 및 별도 구동전원의 확보 문제가 선행되어야 한다

공기주입 시험과 동일한 방법으로 배출시험을 수행하였다. 상용차 또는 농용 트랙터의 타이어는 내용적이 크므로 공기압을 감소시키는데 시간이 많이 소요된다. 배출 시간을 단축하기 위하여 승용 및 상용차 타이어의 공기 배출 시간 단축에 상당한 효과를 보이는 공압용 진공 이젝터 밸브의 부착을 검토하였다. 배출시험은 공기 배출용 밸브에서 빠져나가는 타이어 내부의 공기를 대기중으로 그대로 배출하는 방법과 이젝터 밸브를 부착하여 배출 속도를 증가시키는 방법으로 각각 수행하였다.

진공 이젝터의 구조는 그림 4.18과 같다. 진공 이젝터는 베르누이의 원리를 이용하여 공기 압축기에서 토출되는 공기의 흐름으로 타이어 측의 압력을 진공상태로 유지하고 공기중으로 배출되는 타이어 내의 공기 유속을 빠르게 하여, 배출되는 공기량을 증가시키는 공압 부품의 일종이다. 그림 4.19는 시험을 수행하기 위하여 유로에 이젝터 밸브를 설치한 그림이며, 그 시험 결과는 그림 4.20과 같다.

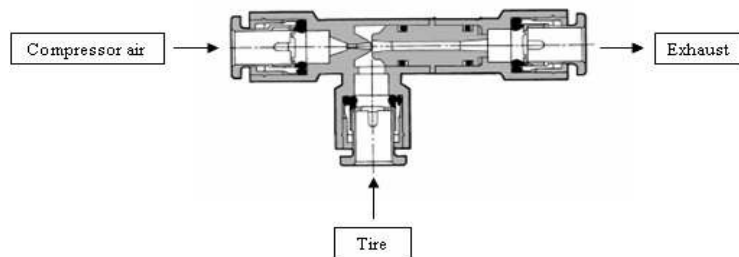


Fig. 4.18 Diagram of ejector.

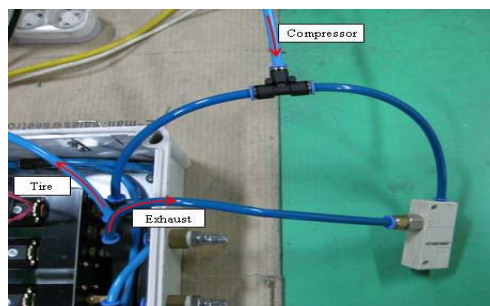


Fig. 4.19 Installation of ejector.

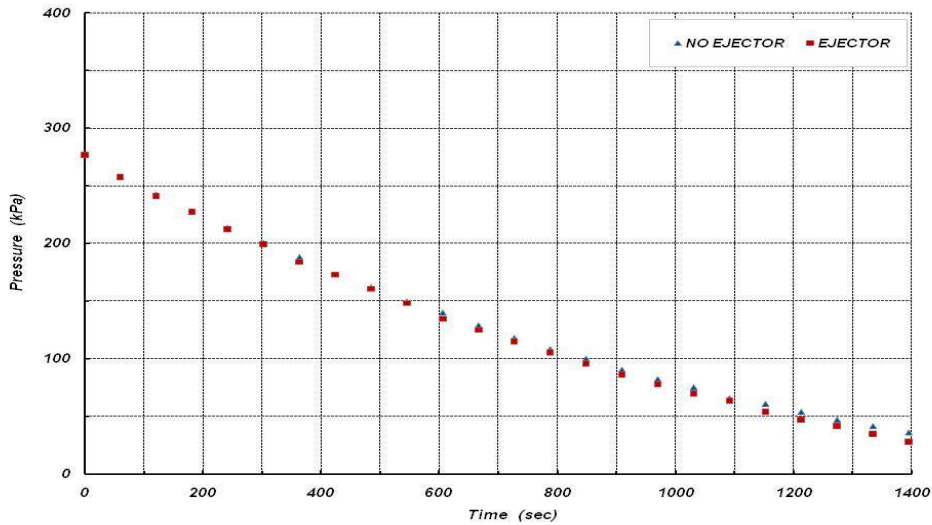


Fig. 4.20 Characteristic curve of tire deflation.

배출시험 결과, 100 ~ 250 kPa 구간의 공기압 범위에서는 이젝터로 인한 배출시간 감소 효과가 미약하지만, 타이어의 압력이 낮아지면 이젝터의 부착 효과를 약간 보이는 것을 확인하였다. 따라서 이젝터를 타이어 공기압 제어 시스템에 적용하는 경우에 타이어의 종류 및 제어 공기압에 따라 적용 효과가 달라질 수 있으므로 주의하여야 한다. 본 연구에서 농용 트랙터 타이어를 대상으로 구성된 제어 시스템은 이젝터를 부착하지 않은 상태로 실증시험을 수행하였다.

타이어의 공기주입용 밸브 내부에는 그림 4.21과 같은 코어가 결합되어 있다. 이 부품은 공기주입이 완료된 후 타이어로부터 공기가 누출되는 것을 방지하는 체크밸브의 역할을 수행한다. 그러나 이 코어의 내경은 2 mm 정도로, 공기주입 또는 배출 시에 공기의 흐름을 방해하는 요소로 작용한다.



Fig. 4.21 Feature of valve core.

밸브 코어를 제거하고 공기주입 및 배출 시험을 수행한 결과는 그림 4.22 및 그림 4.23과 같다. 타이어 공기압을 36 kPa에서 280 kPa로 증가시키는 경우에 주입 시간은 651초에서 450초로 31 %

정도 단축되었으며, 공기압을 280 kPa에서 36 kPa로 감소시키는데 소요된 배출시간은 1400초에서 300초로 79 % 정도 단축되었다. 이는 공기 유로의 단면적을 줄이는 저항의 역할을 하는 밸브 코어를 제거하면 유효 단면적이 증가하는 효과를 나타내기 때문으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 공기 주입 및 배출에 소요되는 제어 시간을 단축시키기 위하여 공기압 제어 장치를 부착하는 타이어는 밸브 코어를 제거하고 조립하는 것으로 결정하였으며, 이를 고려하여 제어 알고리즘을 개발하였다.

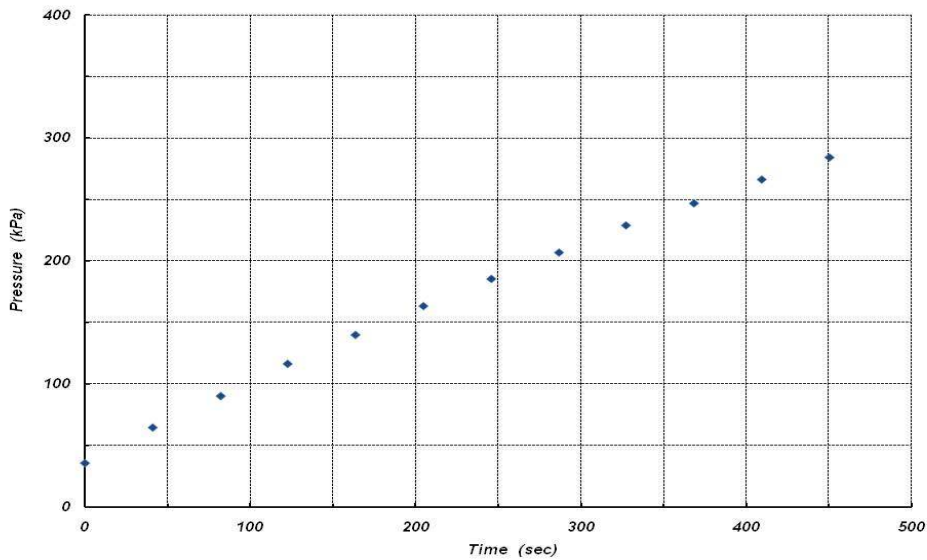


Fig. 4.22 Characteristic curve of tire inflation without valve core.

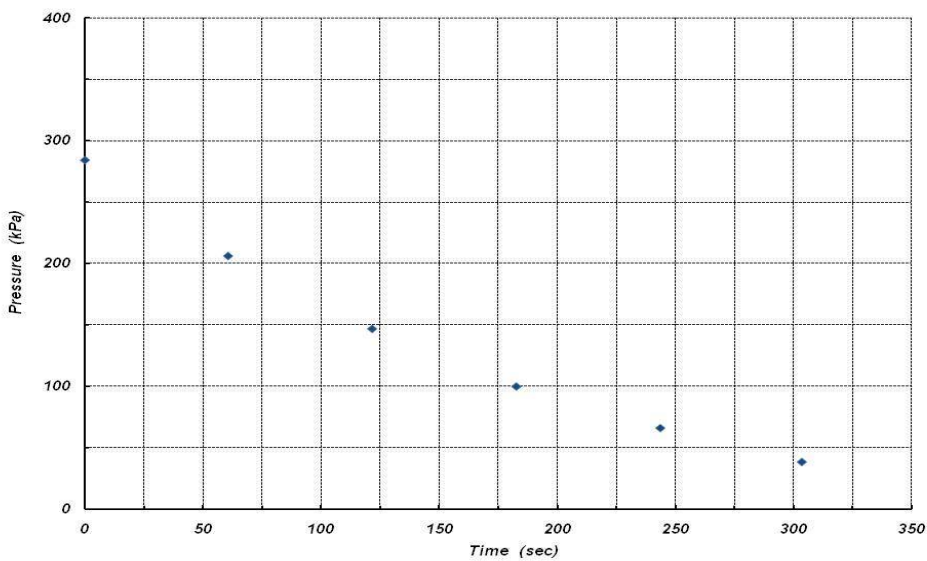


Fig. 4.23 Characteristic curve of tire deflation without valve core.

타이어 공기압 제어장치는 그 구조가 간단하여 공압 유로 등에서 발생하는 유량손실의 영향을 크게 고려할 필요가 없다. 따라서 상기의 공기주입 및 배출에 대한 예비 시험 결과를 고려하면 시험을 수행한 압력 범위 이내에서는 공기주입 및 배출 솔레노이드 밸브의 개폐시간을 적절하게 조절하는 제어 과정으로 개략적인 압력 제어 알고리즘을 구현할 수 있다. 그러나 적용 타이어의 규격이 변경되는 경우에 매번 동일한 시험을 반복 수행하고 그 결과를 제어 알고리즘에 입력해주어야 하는 번거로움이 발생한다. 또한 시뮬레이터를 이용한 예비 시험에서는 차량 하중의 영향이 반영되지 않은 결과이므로 실제 차량 환경에서는 공기주입 및 배출 시간이 달라진다.

차량에 적용되는 타이어의 종류와 크기는 다양하며, 타이어 공기압 제어장치를 설치하는 경우에 형성되는 공압라인의 형태도 차량의 종류별로 다양한 조합이 형성될 수 있다. 따라서 차량의 종류 및 적용 타이어의 형태에 따른 조건과 공기압측기, 공압 유로, 밸브블록 등 장치의 내부 특성에 영향을 받지 않는 제어 알고리즘의 개발은 공기압 제어장치의 성능 및 신뢰성 확보에 필수적이다.

본 연구에서는 제어의 최초 과정에서 타이어의 압력 변화를 감지할 수 있는 최소시간 동안 타이어에 공기주입 또는 배출과정을 수행하고, 이에 따라 계산된 압력 변화율을 이용하여 설정압력으로 제어하기 위한 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.

압력 변화에 따른 소요 공기량의 계산 결과, 반데르발스 방정식과 이상기체 상태 방정식을 이용한 계산 결과간의 차이가 크지 않으므로 본 연구에서는 연산의 편의성을 고려하여 식 4.6을 적용하여 공기량 예측 및 제어 알고리즘을 완성하였다. 타이어의 내용적 (V_{tire})은 타이어에 최초로 일정시간 동안 공기를 주입한 이후 타이어의 압력 변화를 식 4.6에 대입하면 식 4.15로 구할 수 있다.

$$V_{tire} = \left(\frac{P_{atm}}{P_2 - P_1} \right) \times \frac{DISP_{comp}}{60} \times T_{open} \quad \dots\dots\dots (4.15)$$

여기에서, V_{tire} : 타이어의 부피 (L)

T_{open} : 최초 공기주입 밸브 작동시간 (sec)

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 4.16으로 예측할 수 있다.

$$T_{total\ open} = \frac{60 V_{atm}}{DISP_{comp}} \dots\dots\dots (4.16)$$

여기에서, $T_{total\ open}$: 공기주입 밸브 작동시간 (sec)

V_{atm} : 설정 공기압으로 제어하기 위하여 필요한 공기량 (L)

$DISP_{comp}$: 공기 압축기의 흡입 공기량 (L/min)

최초 밸브 작동시간에 의한 압력 변화율을 고려하여 타이어의 내용적을 계산하고, 이상기체 상태방정식과 공기 압축기의 흡입 공기량을 이용하여 밸브 작동시간을 예측하는 공기주입 및 배출시간 예측 제어 알고리즘의 흐름도는 그림 4.24에 나타내었다. 제어의 불감대는 3.4 kPa로 설정 하였으며, 공기 주입 또는 배출과정은 설정압력과 현재압력의 차이가 불감대를 벗어나는 경우에 수행되도록 구성하였다.

제어 알고리즘은 차량 하중 차이에 따른 압력 변화율 변동, 제어 과정 중에서 타이어 압력 차이에 따른 공기주입 및 배출시간 변동 및 공기 주입기 효율의 경시변화 등의 외부 요인에 의한 비선형 요소를 고려하여 PID 제어를 기반으로 설계하였다. 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 합산하여 계산 하였다. 계산된 밸브 작동시간이 식 4.16으로 예측한 시간과 차이가 발생하는 경우에는 제어 시스템의 이상 상황으로 제어기에서 경보처리를 수행하도록 구성 하였다. 본 연구에서 개발된 제어기의 제어 계수는 승용차용(255/65R16), 상용차용(11R22.5) 및 농용 트랙터 타이어(14.9-28-8PR)를 대상으로 응답특성 시험을 수행하여 선정하였다.

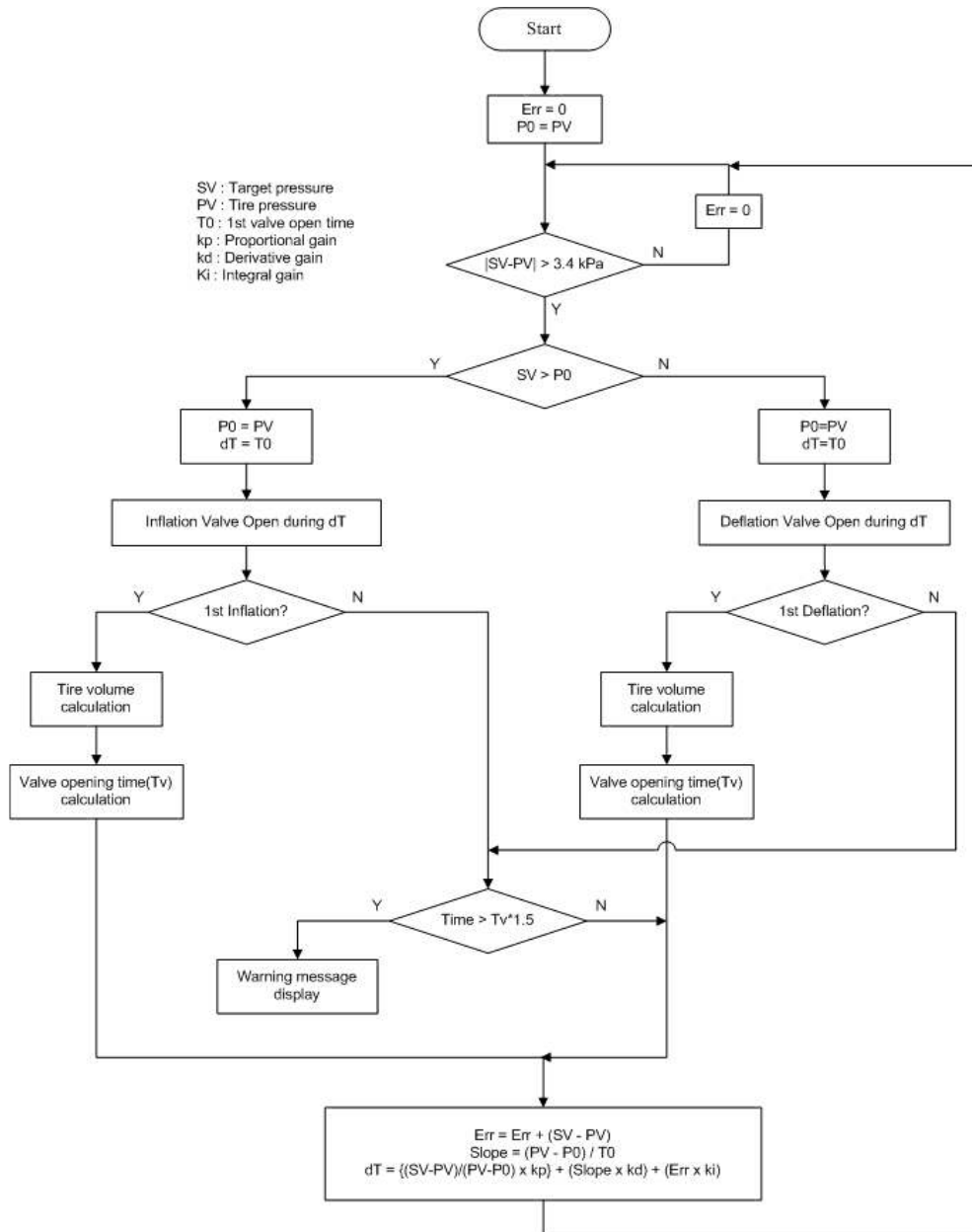


Fig. 4.24 Flowchart of tire pressure control.

개발된 타이어 공기압 제어장치는 야외에서 험로 주행 또는 승용 및 운반작업을 수행하는 차량에 장착되기 때문에 타이어 및 공기 유로 등의 파손에 따른 비정상 동작 등에 대하여 제어기의 예외처리 기능이 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 밸브 작동 시간에 비하여 타이어의 압력 변화량이 상대적으로 작거나, 압력 변화량이 감지되지 않는 경우 등이 발생하면 제어기가 자동으로 감지하여 운전자에게 경고하고 이를 처리하여 발생한 비상 상황을 해제할 수 있는 기능을 제어 알고리즘에 추가하였다. 개발된 예외처리 알고리즘은 그림 4.25와 같다.

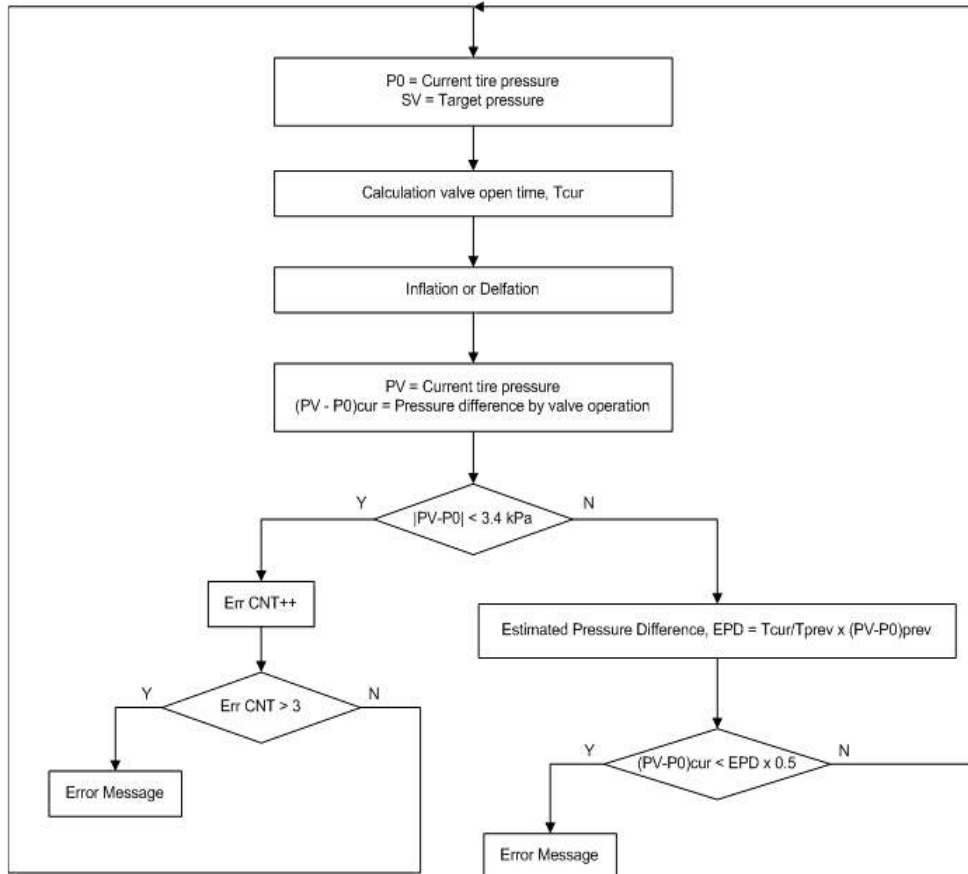


Fig. 4.25 Flowchart of error treatment.

2. 결과 및 고찰

가. 타이어 시뮬레이터 성능

개발된 타이어 시뮬레이터의 회전속도 제어 정확도는 Onosokki사의 HT-5500 반사관형 회전속도 측정장치를 이용하여 측정된 회전속도와 설정 회전속도를 비교하였으며, 그 결과는 표 4.5와 같다. 압력 제어 정확도는 Druck사의 DPI-603 압력교정기를 이용하여 설정된 압력값과 표시장치에 표시된 압력값을 비교하였으며, 그 결과는 표 4.6에 나타내었다.

Table 4.5 Accuracy of speed control for tire simulator

Reference speed (rpm)	Actual speed (rpm)	Error (%FS)
0	0	0.0
50	49	-0.3
100	99	-0.3
150	148	-0.7
200	198	-0.7
250	248	-0.7
300	298	-0.7

Table 4.6 Accuracy of pressure control for tire simulator

Reference pressure (kPa)	Actual pressure (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 회전속도 계측 성능

타이어 시뮬레이터를 이용하여 타이어의 회전속도를 50 rpm부터 160 rpm까지 10 rpm 단위로 증가시키면서 타이어 휠에 장착된 송신장치에서 전송된 데이터그램에서 가속도를 확인하였다. 표 4.7과 같이 1열은 타이어 시뮬레이터의 회전속도, 2열은 1열의 회전속도로부터 식 4.12에 의하여 계산된 주행속도, 3열은 송신장치로부터 전송된 가속도, 4열은 가속도로부터 계산된 주행속도를 나타내었다. 측정 결과, 시속 10 km 이하의 저속 구간에서는 가속도 측정 센서의 오차 때문에 측정된 가속도로부터 계산된 차속의 정확도가 떨어지지만, 그 이상의 고속 구간에서는 대략 $\pm 1\%$ FS 이내의 정확도로 차속을 계산할 수 있음을 확인하였다.

Table 4.7 Results of test for vehicle speed measurement

Rotational speed (rpm)	Vehicle speed computed from rotational speed (km/h)	Acceleration (m/s^2)	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

다. 공기압 제어 성능

본 연구에서 개발한 공기압 제어 알고리즘의 특징은 임의의 타이어를 제어 대상으로 초기 공기주입에 의한 압력 변화를 이용하여 임의의 설정압력으로 제어하기 위한 소요 공기량을 계산하여 공기주입 밸브의 개폐시간을 예측하는데 있다. 제어 알고리즘에는 기본적으로 PID 제어기 적

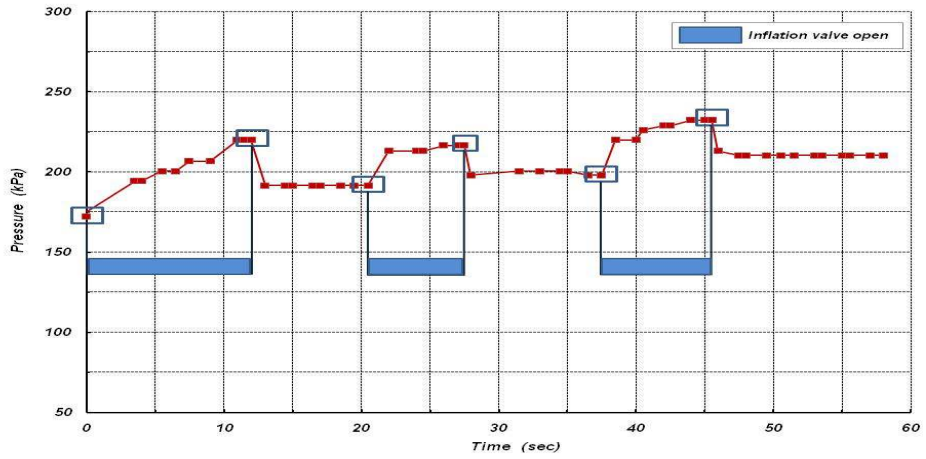
용을 고려하였으나, 일반적인 제어계와 비교하여 본 연구의 제어계는 제어과정에 분단위의 소요 시간이 필요하며, 제어 대상인 타이어 압력의 측정에 일정 시간의 안정화 시간이 필요한 응답특성을 갖기 때문에 미분 및 적분 제어계수는 0으로 설정하여 미분제어와 적분제어를 수행하지 않더라도 원하는 제어 성능을 구현할 수 있다. 따라서 제어기의 제어 알고리즘은 비례제어 기능을 이용하였으며, 이에 따라 비례제어 계수를 결정하기 위한 예비 시험을 수행하였다.

비례제어 계수에 따라 타이어 종류별 제어기의 응답특성은 그림 4.26, 그림 4.27 및 그림 4.28과 같이 변화되었다. 그림에 표시된 압력값은 공기압 측정 및 수신 장치 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 때문이며, 공기주입 또는 배출 과정 중에는 공기 압축기의 토출 압력 또는 대기 중으로 개방되는 배출 밸브의 영향으로 공압라인에 형성되는 압력이 실제 타이어 공기압과 다를 수밖에 없는 시스템의 구조적인 특징을 갖기 때문이다. 공기주입 밸브를 닫은 후, ± 1.7 kPa 이내에서 압력이 8초 이상 측정되면 타이어 공기압이 안정화되었다고 판단하고 다음 제어 과정을 수행하도록 제어 알고리즘을 구성하였다.

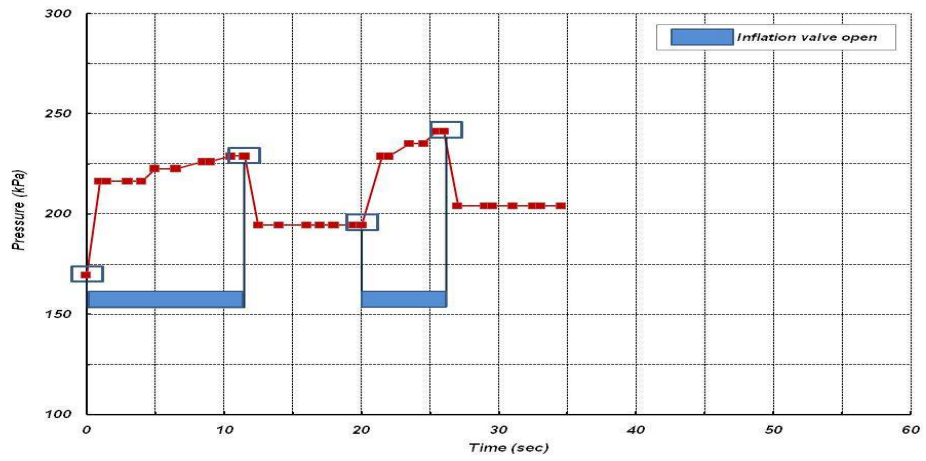
승용차용 타이어는 166 kPa의 초기압력에서 207 kPa의 설정압력으로 제어과정을 수행하였으며, 그림 4.26과 같이 비례제어 계수를 1.0으로 설정하는 경우에 제어시간이 가장 짧게 걸렸으며, 배출과정이 필요한 오버슈트도 발생하지 않았다.

상용차 타이어는 다른 타이어에 비하여 규정 공기압이 높기 때문에 동일한 비율로 공기압을 증가시키는 경우에 소요 공기량이 커지게 되며 공기압 제어시간도 길어진다. 그림 4.27에서 비례제어 계수를 변화시키면서 상용차용 타이어를 496 kPa에서 621 kPa까지 제어하는 경우의 응답특성을 확인할 수 있다. K_p 가 1인 경우 제어시간은 승용차 타이어와 비교하면 6배 이상 소요되지만 오버슈트가 없이 비교적 정확한 제어 성능을 나타냄을 확인하였다.

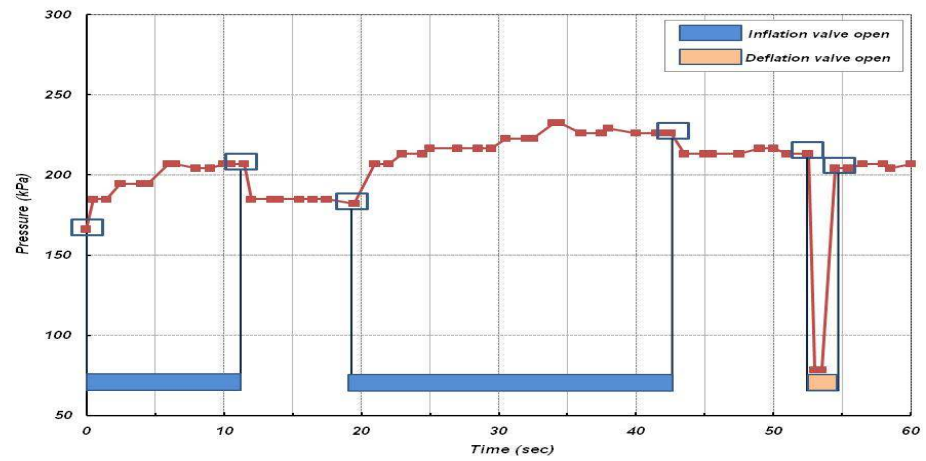
농용 트랙터 타이어로 152 kPa의 초기압력에서 207 kPa로 압력 제어 시험을 수행한 결과를 그림 4.28에 나타내었다. 그림과 같이 K_p 가 0.8인 경우에는 4회의 공기주입 밸브의 제어 동작이 필요하였으며, 제어 시간은 140초 소요되었다. K_p 가 1.0인 경우에는 3회의 공기주입 밸브 작동 후에 제어동작이 완료되었으며, 제어 시간은 133초 소요되었다. K_p 를 1.2로 설정하면 2회의 밸브 작동 이후에 설정압력을 초과하여 배출 밸브로 공기를 배출시켜 초과된 압력을 낮추는 불필요한 감압 제어 과정이 추가되어, 설정압력 도달시간은 총 185초가 소요됨을 확인하였다. 상기 시험 결과를 고려하여 본 연구에서 개발한 공기압 제어기의 비례 제어계수는 1.0으로 선정하였다.



(a) $K_p=0.8$

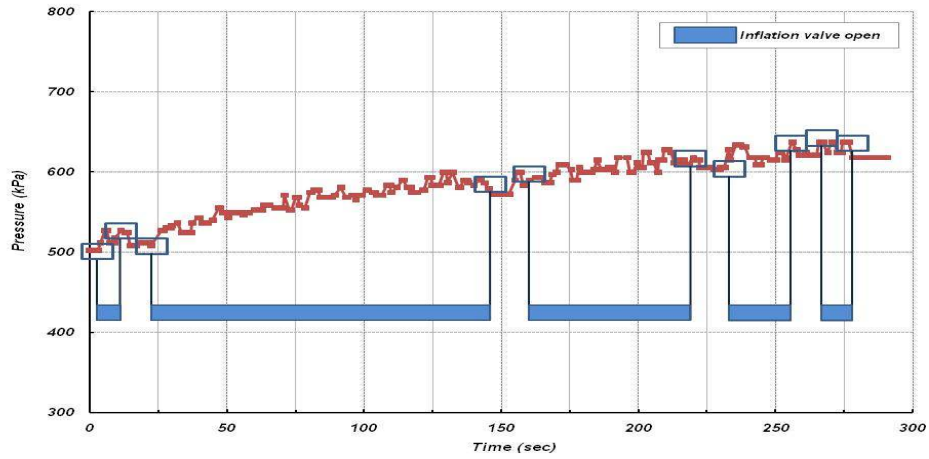


(b) $K_p=1.0$

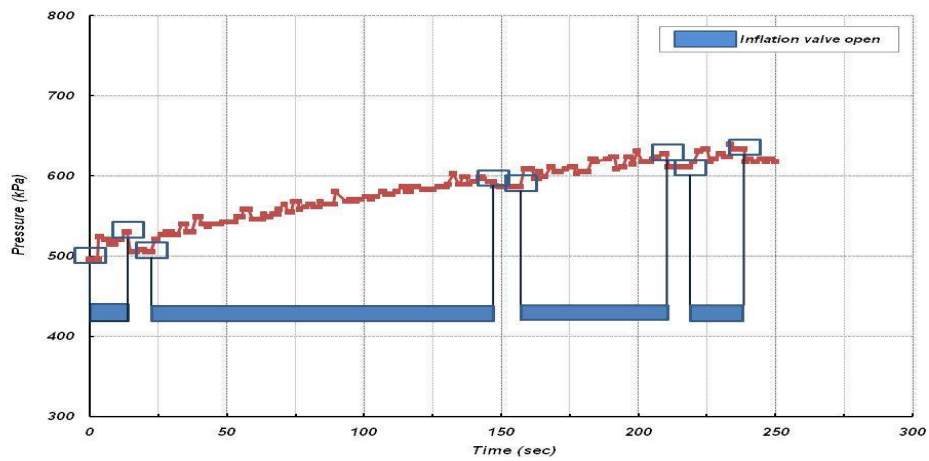


(c) $K_p=1.2$

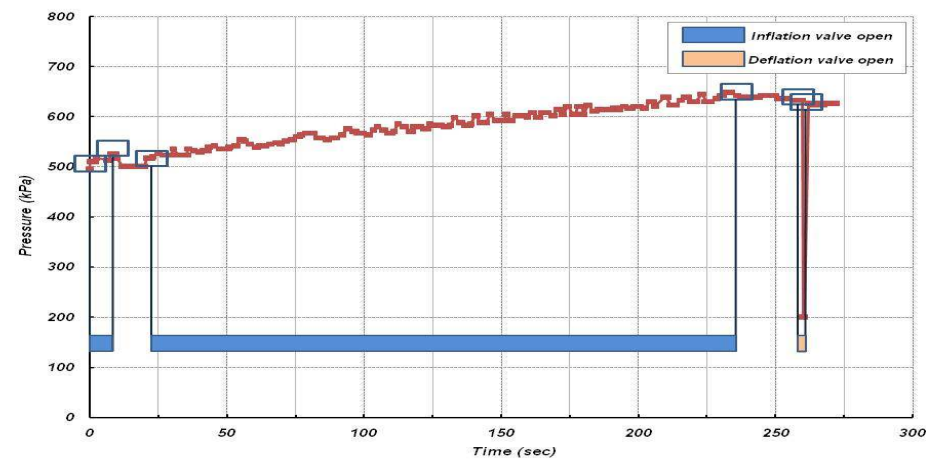
Fig. 4.26 Pressure control of passenger car tire with different values of K_p .



(a) $K_p=0.8$

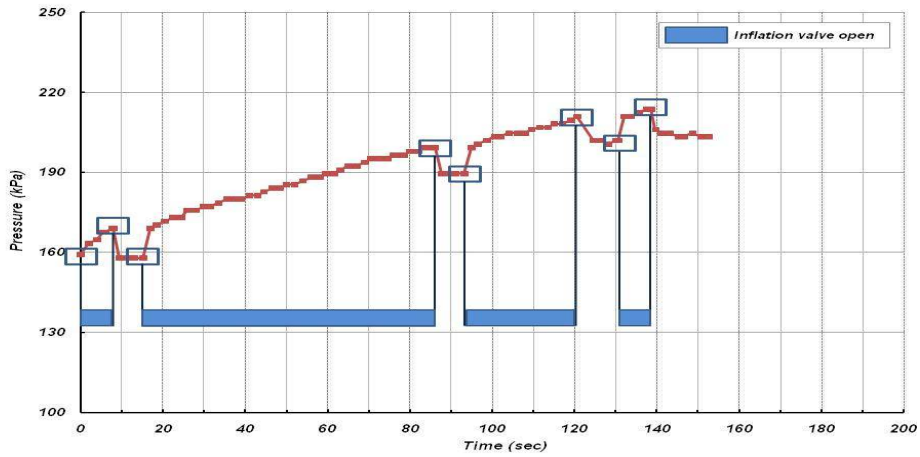


(b) $K_p=1.0$

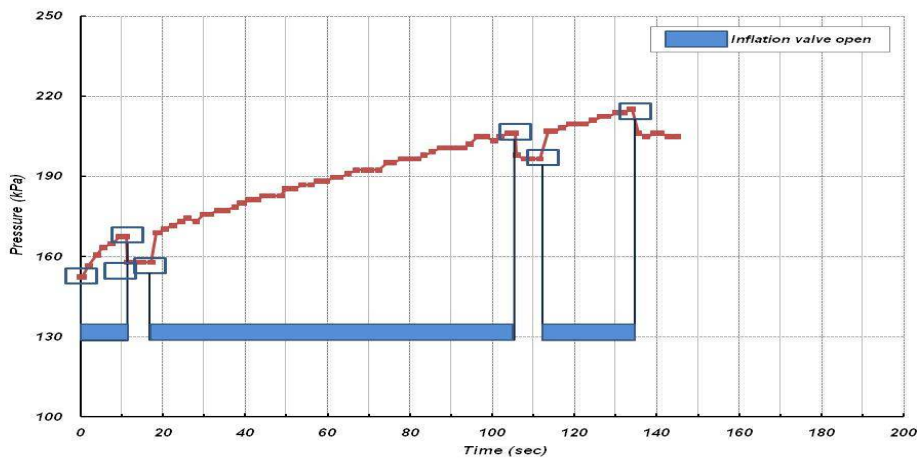


(c) $K_p=1.2$

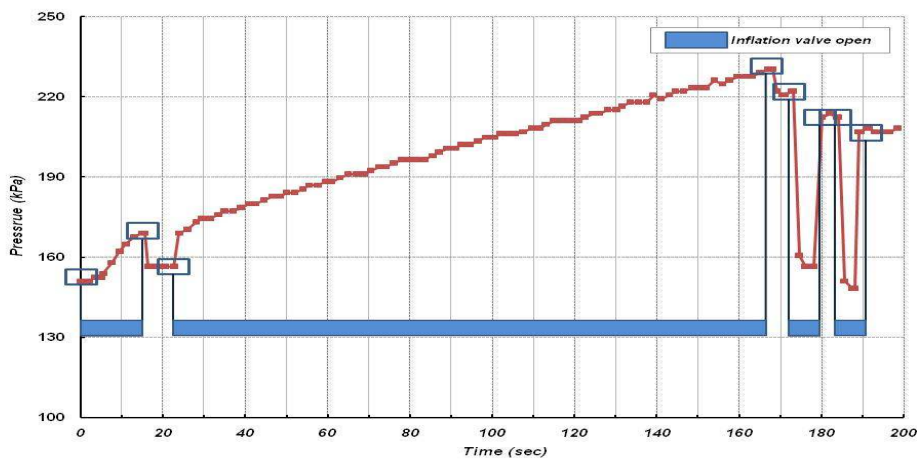
Fig. 4.27 Pressure control of commercial vehicle tire with different values of K_p .



(a) $K_p=0.8$



(b) $K_p=1.0$



(c) $K_p=1.2$

Fig. 4.28 Pressure control of agricultural tractor tire with different values of K_p .

그림 4.29는 농용 트랙터 타이어를 대상으로 초기 공기압 152 kPa에서 설정 공기압 210 kPa까지 개발된 제어 알고리즘으로 공기주입 제어 동작을 수행하는 과정을 나타낸 그래프이며, 그림 4.30은 초기 공기압 210 kPa에서 설정 공기압 138 kPa까지 공기배출 제어 동작을 수행하는 과정을 나타낸다.

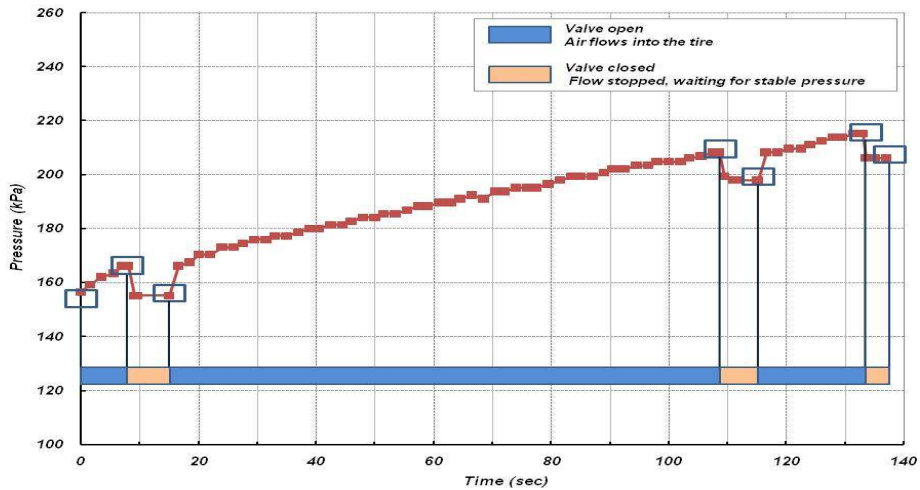


Fig. 4.29 Pressure-time curve in automatic tire inflation control.

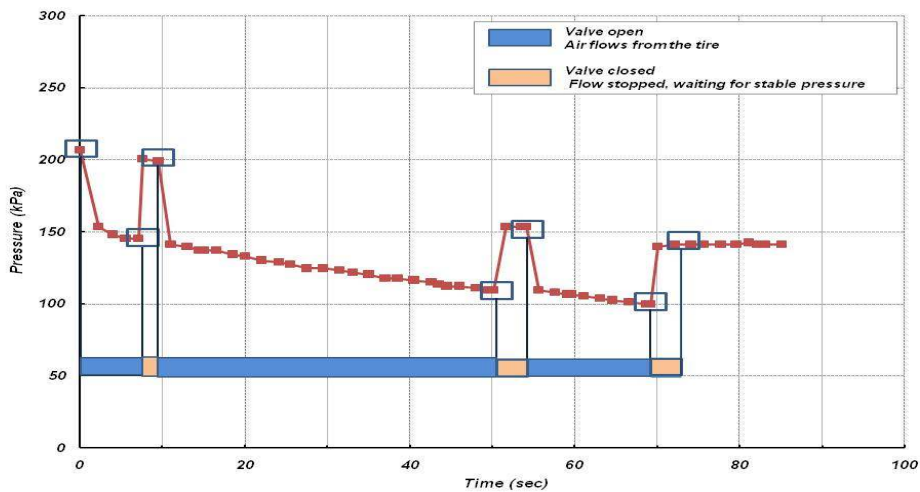


Fig. 4.30 Pressure-time curve in automatic tire deflation control.

개발된 공기압 제어 알고리즘을 이용하여 승용, 상용 및 트랙터용 타이어를 대상으로 공기압 제어 성능을 확인하였다. 제어 성능 확인 시험은 타이어 시뮬레이터를 이용하여 타이어를 100 rpm으로 회전시키면서 공기 주입 및 배출 시험을 각각 5회씩 수행하고 평균값을 구하여, 그 결과를 각각 표 4.8, 표 4.9 및 표 4.10에 나타내었다. 제어 알고리즘에서 불감대는 3.4 kPa로 설정하

였다. 시험 결과, 공기주입 및 배출시간 예측 알고리즘이 적용된 공기압 제어 장치는 타이어 종류에 무관하게 대략 ± 1 %FS의 정확도로 공기압을 제어하였다.

표 4.10은 농용 트랙터 타이어를 대상으로 각각의 압력 조절 단계별로 공기주입 및 배출시간을 측정한 결과이다. 시험 결과, 타이어의 최소 허용 공기압 (50 kPa)에서 규정 공기압 (180 kPa)까지 제어하는 경우 공기주입 소요시간은 대략 307초이며, 그 반대로 제어하는 경우 소요시간은 대략 201초로 측정되었다. 제어 과정 중 공기주입 및 배출밸브의 개폐 횟수는 3~4회에서 제어가 가능하였다.

Table 4.8 Results of pressure control test for passenger car tire

Start pressure (kPa)	Target pressure (kPa)	Actual pressure (kPa)	Time (sec)	Valve open (Times)	Error (%FS)
169	207	207	31	2	0
169	248	248	49	2	0
207	248	248	38	2	0
207	169	169	25	2	0
248	207	207	19	2	0
248	169	166	44	3	-0.9

Table 4.9 Results of pressure control test for commercial vehicle tire

Start pressure (kPa)	Target pressure (kPa)	Actual pressure (kPa)	Time (sec)	Valve open (Times)	Error (%FS)
496	620	621	243	4	0.3
496	744	743	655	6	-0.3
620	744	743	262	4	-0.3
620	496	496	83	3	0
743	620	621	65	4	0.3
743	496	496	153	4	0

Table 4.10 Results of pressure control test for agricultural tractor tire

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
50	210	207	431	4	-0.9
138	50	50	150	4	0
180	50	51	201	4	0.3
210	50	48	228	4	-0.6

라. 타이어 회전속도에 따른 공기압 송·수신 장치 성능

타이어 회전속도에 따라 휠에 부착되어 있는 송신장치의 회로 및 안테나 성능에 영향을 줄 수 있다. 따라서 타이어 시뮬레이터를 이용하여 타이어를 임의의 회전속도로 회전시키면서 수신 장치 위치를 그림 4.31과 같이 변경하여 개발된 송·수신 장치 송·수신 성공률 확인 시험을 수행하였다.

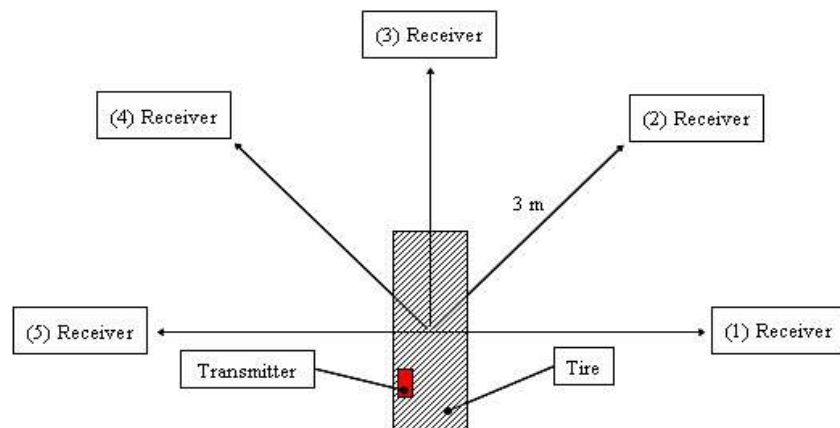


Fig. 4.31 Location of receiver unit for RF test.

승용차용 타이어는 800 rpm (차속기준 100 km/h), 상용차용 타이어는 500 rpm (차속기준 100 km/h), 트랙터용 타이어는 150 rpm (차속기준 36 km/h)까지 타이어의 회전속도를 단계별로 증가시키면서 시험을 수행하였다. 수신 장치 위치는 타이어 중심점으로부터 반경 3 m의 거리에서 수평면 기준으로 45°씩 변경하면서 각각의 타이어 회전속도별로 총 5회 측정하였다.

송신장치로부터 100개의 데이터그램을 송신하도록 설정한 후 수신 장치 정상적으로 수신된 데이터를 백분율로 나타낸 결과를 타이어 종류에 따라 각각 표 4.11, 표 4.12 및 표 4.13에 나타내었다. 시험 결과, 타이어의 종류에 따른 각 차량별 통상적인 주행속도 이내에서는 타이어 휠에 장

착되는 송신장치와 운전석 주변에 설치되는 수신 장치 간의 무선 성능은 타이어 회전속도의 영향을 받지 않았다.

Table 4.11 Results of RF performance test for passenger car tire

Wheel speed (rpm)	Item	Success ratio by position (%)				
		1*	2	3	4	5
0	Frame	98	99	96	98	98
	Packet	100	100	100	100	100
100	Frame	99	99	98	99	99
	Packet	100	100	100	100	100
200	Frame	98	98	97	98	99
	Packet	100	100	100	100	100
300	Frame	99	98	99	99	98
	Packet	100	100	100	100	100
400	Frame	98	99	100	97	98
	Packet	100	100	100	100	100
500	Frame	98	98	98	96	99
	Packet	100	100	100	100	100
600	Frame	97	98	98	99	97
	Packet	100	100	100	100	100
700	Frame	98	99	99	99	96
	Packet	100	100	100	100	100
800	Frame	99	99	99	99	99
	Packet	100	100	100	100	100

* The position is shown in Fig. 4.31

Table 4.12 Results of RF performance test for commercial vehicle tire

Wheel speed (rpm)	Item	Success ratio by position (%)				
		1*	2	3	4	5
0	Frame	99	98	99	99	98
	Packet	100	100	100	100	100
100	Frame	97	97	98	99	98
	Packet	100	100	100	100	100
200	Frame	99	99	99	99	99
	Packet	100	100	100	100	100
300	Frame	97	98	99	99	96
	Packet	100	100	100	100	100
400	Frame	99	99	99	98	98
	Packet	100	100	100	100	100
500	Frame	96	97	98	99	98
	Packet	100	100	100	100	100

* The position is shown in Fig. 4.31

Table 4.13 Results of RF performance test for agricultural tractor tire

Wheel speed (rpm)	Item	Success ratio by position (%)				
		1*	2	3	4	5
0	Frame	98	99	96	98	98
	Packet	100	100	100	100	100
50	Frame	99	99	98	99	99
	Packet	100	100	100	100	100
100	Frame	98	98	97	98	99
	Packet	100	100	100	100	100
150	Frame	99	98	99	99	98
	Packet	100	100	100	100	100

* The position is shown in Fig. 4.31

3. 요약 및 결론

본 장에서는 타이어 공기압 측정 및 송신장치, 수신 장치 및 제어기, 공기압 발생장치, 무한회전형 공기압 공급 장치, 공기주입 및 배출 밸브블록 등으로 구성된 타이어 공기압 제어장치를 개발하였다. 임의의 회전속도로 타이어를 회전시키면서 각종 시험을 수행할 수 있는 시뮬레이터를 개발하여 개발된 장치의 성능을 검증하고 공기압 제어 알고리즘을 완성하였으며, 그 결과를 다음과 같이 요약하였다.

가. 공기압 발생장치, 무한회전형 공기압 공급 장치, 공기주입 및 배출 밸브블록 등의 기계장치, 제어기와 주입 및 배출시간 예측 알고리즘으로 구성된 타이어 공기압 제어장치를 완성하였다.

나. 타이어를 장착하여 임의의 속도로 회전하면서 공기압을 수동으로 조작할 수 있는 타이어 시뮬레이터를 개발하여 타이어의 작동 조건에 따른 기계장치의 적용 적합성 확인, 제어 알고리즘의 개발 및 무선 송·수신 장치 성능 검증에 활용하였다.

다. 개발된 타이어 시뮬레이터를 이용하여 타이어의 회전속도를 50 rpm부터 160 rpm까지 10 rpm 단위로 증가시키면서 송신장치에서 측정된 가속도를 이용하여 차속으로 환산하고 그 오차를 비교하였다. 농용 트랙터 타이어를 대상으로 시험한 결과, 10 ~ 40 km/h 사이의 운전구간에서는 대략 $\pm 1\%$ FS 이내의 오차 범위로 차속을 측정할 수 있었다.

라. 개발된 공기압 제어 장치의 성능을 확인하기 위하여 승용차용, 상용차용 및 농용 트랙터 타이어를 타이어 시뮬레이터에 장착하고 공기압 제어 시험을 수행하였으며, $\pm 1\%$ FS의 정확도로 공기압을 제어할 수 있었다.

마. 타이어 시뮬레이터를 이용하여 타이어를 임의의 회전속도로 회전시키면서 수신 장치 위치에 따른 송·수신 장치 송·수신 성공률을 확인하였다. 타이어의 종류에 무관하게 각 차량별 통상 주행속도 이내에서는 타이어 휠에 장착되는 송신장치와 수신 장치 간의 무선 성능은 타이어의 회전속도에 영향을 받지 않았다.

제 5 절 능동형 공기압 제어 시스템 개발

본 연구에서 개발한 타이어 공기압 제어 시스템은 공기압 측정 및 송·수신 장치, 타이어 공기압을 설정된 제어모드에 따라 제어하는 제어기와 스위치, 부저, 표시장치 등의 사용자 인터페이스 및 솔레노이드 밸브를 포함한 종말 작동장치로 구성되는 전기, 전자회로와 공기압 발생장치, 무한회전형 공기압 공급 장치 등의 기계장치로 구성하였다. 시스템의 구성 및 조립 부품은 승용, 운반 및 작업 등의 다목적 차량에 쉽게 탈·부착이 가능하도록 제작하였다. 완성된 공기압 제어 시스템을 농용 트랙터에 장착하여 제어 성능 및 적용 적합성을 검증하였다.

농용 트랙터의 사용 조건에 따라 설정 공기압을 결정하는 과정은 개발된 공기압 제어 시스템의 제어 모드를 완성하는데 필수적인 사항이다. 설정 공기압을 결정하기 위하여 문헌 조사와 타이어 관련 규정집을 참고하여 필요 내용을 정리하고 이를 수식화 하였다. 이를 토대로 주요 작업별 허용 공기압을 계산하여 작업기 종류에 따라 작업 모드 분류의 타당성을 검토하였다. 타이어의 일정한 부하 조건에서 주행 속도에 따른 적정 공기압에 대한 자료는 타이어 제조회사에서 제공하거나 표준 산업 규격으로 규정하고 있다. 이러한 규격을 이용하면 주행 속도에 따라 설정 공기압을 가변시켜 이를 추종하는 능동형 공기압 제어 시스템을 완성할 수 있다.

대부분의 농작업자는 주요 작업의 형태와 포장의 노면 상태에 따른 농용 트랙터 타이어의 적정 공기압을 인식하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내의 농작업 환경에 적합한 제어 모드와 그에 따른 설정 공기압을 결정하고, 이를 바탕으로 능동형 타이어 공기압 제어 시스템의 하드웨어 및 소프트웨어를 개발하여 농용 트랙터에 적용이 가능한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 완성하였다. 개발된 능동형 타이어 공기압 제어 시스템은 농용 트랙터에 장착하여 검증 시험을 통하여 시스템의 성능 및 적용 적합성을 검증하였다.

1. 재료 및 방법

가. 농용 트랙터 적용을 위한 하드웨어 구성

본 연구에서 개발한 타이어 공기압 제어 시스템의 공압 회로는 그림 5.1과 같이 트랙터에 내장된 충전식 배터리를 전원으로 사용하는 공기 압축기와 그림 5.2와 같은 솔레노이드 밸브 블록의 입력포트가 연결되며, 출력포트가 각각의 타이어로 연결되는 구조로 구성되어 있다. 출력포트의 공압호스는 무한회전형 공기압 공급 장치의 입력포트를 통하여 타이어로 연결되며, 공기압 측정 및 송신장치의 기구물과 병렬로 연결된다. 공기주입 및 배출 밸브와 공기 압축기를 구동하는 릴레이 구동회로는 그림 5.3과 같은 수신 장치 통합되어 있는 제어기의 디지털 입·출력 회로를 이용하여 제어된다.

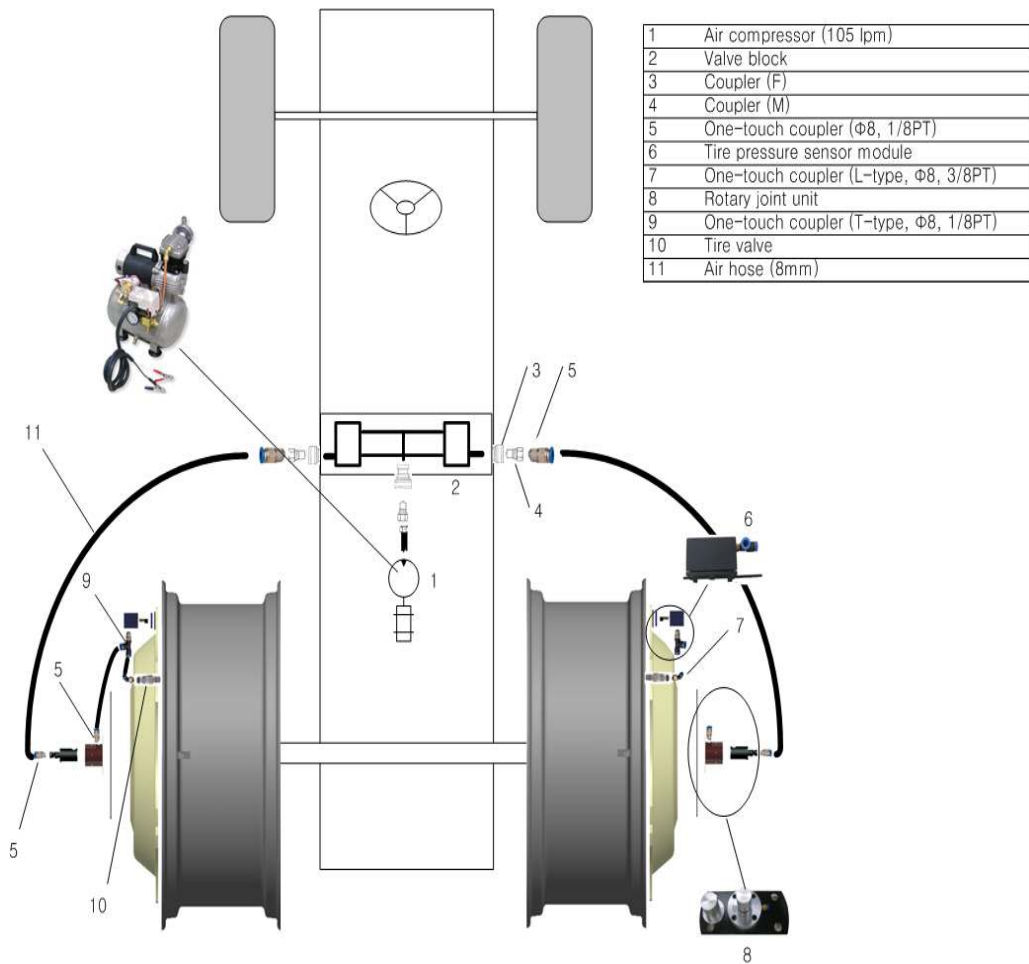


Fig. 5.1 Construction of active tire pressure control system.



Fig. 5.2 Solenoid valve block assembly.



Fig. 5.3 Control and display unit.

나. 타이어 공기압 제어 시스템 설치

개발된 타이어 공기압 제어 시스템을 농용 트랙터에 설치하여 성능 검증 시험을 수행하기 위하여 동양물산(주)의 T502를 공시체 트랙터로 선정하여 시스템의 각 구성품을 장착하였다. 공기압축기는 트랙터 후면의 PTO 블록 상단의 여유 공간에 설치하였으며, 솔레노이드 밸브 블록은 운전석 후면의 여유 공간에 설치하였다. 그림 5.4는 트랙터의 후미에 장착한 공기압축기를 나타낸 그림이다.

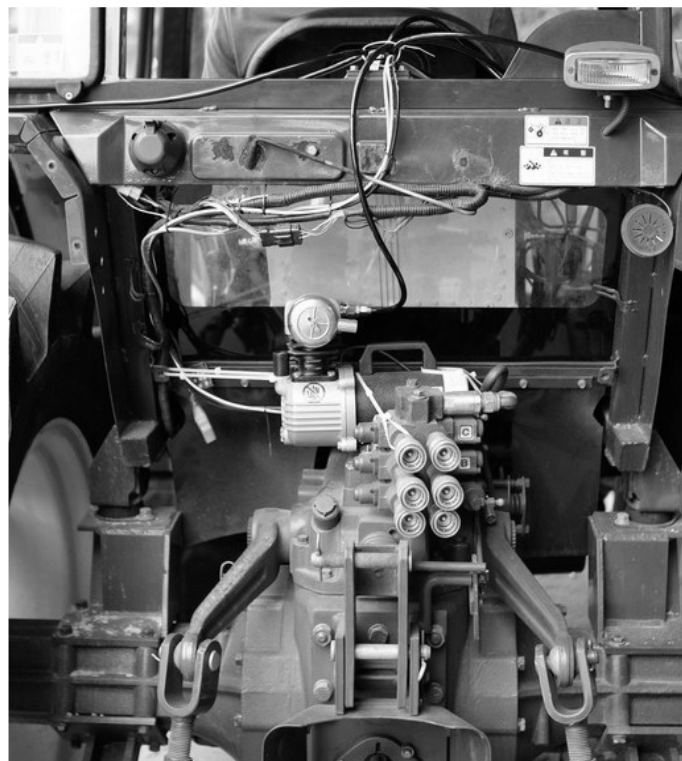


Fig. 5.4 Air compressor installed on the back of T502 tractor.

공기압측기에서 생성된 공기압은 솔레노이드 밸브 블록을 통하여 그림 5.5와 같이 공압 호스를 이용하여 트랙터의 구동륜 타이어로 전달된다. 타이어 휠에는 공기압 측정 및 송신장치와 무한회전형 공기압 공급 장치를 부착하였으며, 공압 호스를 통하여 타이어의 공기주입 노즐로 연결하였다.



(a) right wheel

(b) left wheel

Fig. 5.5 Rotary joint unit and air supply line.

개발된 제어기는 그림 5.6과 같이 T502의 운전석 전면의 계기판에 설치하였다. 운전자는 운전석 계기판 상단에 설치된 제어기를 통하여 타이어의 현재 공기압을 확인할 수 있으며, 제어기의 스위치와 디스플레이를 통하여 공기압을 설정하거나 시스템 작동 상황 등을 모니터링 할 수 있다.



Fig. 5.6 Controller installed on the instrument panel of T502 tractor.

다. 제어 시스템의 모드 선정 및 설정 공기압 결정

농용 트랙터의 작업 속도와 부하에 따른 적정 공기압을 계산하였으며, 트랙터를 이용한 작업을 분류하고 각각의 제어 모드에 따른 설정 공기압을 결정하였다.

(1) 최소 허용 공기압

박원엽 등(2002)은 타이어 공기압에 따른 트랙터의 견인성능과 토양다짐 효과를 논토양에서 시험하여 공기압이 작을수록 견인계수가 증가한다는 사실을 확인하였다. 또한 이동렬 등(1998)은 연약지반에서 작업 시 트랙터 타이어의 공기압을 최소 허용 공기압까지 감소시키면 견인 성능과 작업 성능을 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 상기 내용을 토대로 논토양과 같은 연약지반에서는 최소 허용 공기압을 설정 공기압으로 결정하였다. 타이어의 최소 허용 공기압에 관한 수식은 류관희 등(2004)이 저술한 자료에서 식 5.1을 발췌하였으며, 이 수식을 이용하여 타이어의 최소 허용 공기압을 계산하였다.

$$P = \left[\frac{W}{0.0004KS^{1.39}(D_r + S)} \right]^{\frac{1}{0.58}} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$S = S_1 \frac{180^\circ - \sin^{-1} \frac{W_1}{S_1}}{141.3^\circ} \dots\dots\dots (5.2)$$

- 여기에서, P : 공기압 (kg/cm²)
 W : 타이어에 작용하는 수직하중 (kg)
 D_r : 림의 직경 (mm)
 W₁ : 표준 림의 폭 (mm)
 S₁ : 타이어 단면 폭 (mm)
 K : 하중계수 (load coefficient)

본 연구에서 사용한 공시체 트랙터의 타이어 규격은 14.9-28-8PR이며, 이 규격을 식 5.2에 대입하여 최소 허용 공기압 계산식을 식 5.3으로 단순화하였다.

$$P = \left[\frac{W}{1680.15} \right]^{\frac{1}{0.58}} \dots\dots\dots (5.3)$$

Table 5.1 Load coefficient

Types of tire	Load coefficient, K
Steering wheel	1.10
Driving wheel	
Implement wheel	1.48
Garden tractor	1.90

(2) 하중과 속도에 따른 공기압

물을 채우지 않은 논이나 밭 작업, 농로 및 일반 도로 주행에서의 공기압은 미국 농공학회 규정 (ASAE S430.1)과 한국산업규격 (KS M6752)에 명시되어 있는 차량의 속도와 부하에 따른 타이어 공기압에 관한 규정을 참고하여 계산하였다. 이 두 규정은 일정한 공기압에 대한 최대 허용 하중에 관한 내용을 포함하고 있다. 각 규정은 기준 속도에 대한 공기압과 하중간의 관계를 표로 명시하고 있으며, 기준 속도 이외의 속도에 대해서는 속도의 변화에 따라 일정한 비율로 하중계수를 보상하는 방법을 택하고 있다(표 5.3 참조).

미국 농공학회 규정인 ASAE S430.1에서는 농용 트랙터의 기준속도를 40 km/h로 규정하고 있다. 40 km/h의 기준 속도는 적용 타이어가 정상적으로 주행할 수 있는 최대 속도를 의미한다. 이 규정에서는 40 km/h 이하의 속도에서는 타이어 공기압에 대한 최대 허용 하중과 최고 속도의 크기에 따른 하중계수를 별도로 규정하고 있다. 표 5.2에 공시체 트랙터(T502, 동양물산)의 구동축 타이어 규격인 14.9-28에 대한 공기압과 최대 허용 하중에 관한 관계를 ASAE에서 발췌하여 나타내었다. 표에서 *로 표시된 부분은 타이어의 등급을 말하며 타이어의 등급이 높을수록 더 높은 하중을 견딜 수 있음을 의미한다. 표 5.3은 차속의 변화에 따른 허용 하중의 상관관계를 ASAE에서 규정한 표이며, 속도가 낮을수록 동일한 공기압에 대하여 허용되는 하중이 증가하는 것을 확인할 수 있다.

Table 5.2 Basic tire load for speed of 40 km/h and under from ASAE S430.1

Pressure (kPa)	80	100	110	120	140	150	170	180	190	210	220
Load(kg)	1060	1170	1270	1360	1450	1530	1610	1700	1770	1840	1900
*	-	-	-	-	(6)	-	-	(8)	-	-	(10)

Note : * indicates tire class.

Table 5.3 Load coefficients from ASAE S430.1

Maximum speed (km/h)	Load coefficient
15	1.33
25	1.22
35	1.11
40	1.00

표 5.2를 이용하여 차속 40 km/h 조건에서 타이어 공기압과 허용 하중 간의 관계식을 식 5.4와 같이 구하였다.

$$P = 0.165 \times W - 98.39 \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

여기에서, P : 타이어 공기압 (kPa)

0.165 : 허용 하중에 따른 공기압 변화율 (kPa/kg)

W : 타이어 허용 하중 (kg)

표 5.3의 하중 계수를 속도에 관한 수식으로 정리하면 식 5.5와 같다.

$$K_v = -0.013 \times v + 1.53 \quad \dots\dots\dots (5.5)$$

여기에서, K_v : 하중 계수

v : 차속 (km/h), 15~40 km/h

식 5.5의 하중 계수 계산식을 이용하여 15~40 km/h 사이에서 차속 변화에 따른 하중 변화량을 고려한 타이어 공기압은 식 5.6과 같이 계산할 수 있다.

$$P = 0.165 \times \frac{W}{-0.013 \times v + 1.53} - 98.39 \quad \dots\dots\dots (5.6)$$

여기에서, v : 차속 (km/h), 15~40 km/h

한국산업규격 KS M6752에 대해서도 같은 절차를 반복하였다. KS M6752에서는 기준속도를 30 km/h로 규정하고 있으며, 30 km/h 이외의 속도에 대해서는 압력의 변화 없이 하중계수를 곱한 값으로 허용 하중을 규정하고 있다. 표 5.4는 KS M6752에서 구동축 타이어(14.9-28)에 대한 공기압과 허용 하중을 규정한 내용이다. 속도 30 km/h에 대한 허용 하중은 규정에서 참고하였으

며, 그 외의 속도에 대한 허용 하중은 표 5.5의 하중계수를 참고하여 정리하였다.

Table 5.4 Tire load vs. tire pressure for various speeds from KS M6752

Pressure (kPa) \ Speed (km/h)	80	100	120	140	160	180
20	1386	1578	1758	1932	2076	2256
25	1236	1407	1568	1723	1851	2012
30	1155	1315	1465	1610	1730	1880
35	1040	1184	1319	1449	1557	1692

Table 5.5 Load coefficients from KS M6752

Maximum speed (km/h)	Load coefficient
20	1.20
25	1.07
30	1.00
35	0.90

한국산업규격을 기준으로 표 5.4와 표 5.5를 이용하여 최대 허용 하중과 속도에 대한 타이어 공기압을 계산하였다. 30 km/h의 기준속도에서 공기압과 허용 하중에 관한 상관관계는 식 5.7과 같이 계산된다.

$$P = 0.14 \times W - 82.63 \quad \dots\dots\dots (5.7)$$

표 5.5를 이용하여 속도와 하중계수와의 관계를 수식으로 정리하면 식 5.8과 같다.

$$K_v = -0.019 \times v + 1.58 \quad \dots\dots\dots (5.8)$$

여기에서, K_v : 하중 계수
 v : 차속 (km/h), 20~35 km/h

KS 규정에 따라 식 5.8을 식 5.7에 대입하여 20~35 km/h 구간에서 차속 변화에 따른 하중 변화량을 고려한 타이어 공기압은 식 5.9로 계산할 수 있다.

$$P = 0.14 \times \frac{W}{-0.019 \times v + 1.58} - 82.63 \quad \dots\dots\dots (5.9)$$

여기에서, v : 차속 (km/h), 20~35 km/h

식 5.6과 식 5.9를 비교하기 위하여 25 km/h의 차속 조건에서 하중에 따른 타이어 공기압에 대한 관계를 그림 5.7에 나타내었으며, KS 6752에서 발췌한 값을 기준 공기압으로 선정하였다. 기준 공기압에 대한 오차의 평균은 각각 식 5.6은 4.8 kPa이며 식 5.9는 4.7 kPa으로, 본 연구에서는 식 5.9를 하중과 차속에 따른 공시체 트랙터의 제어 공기압 계산식으로 선정하였다.

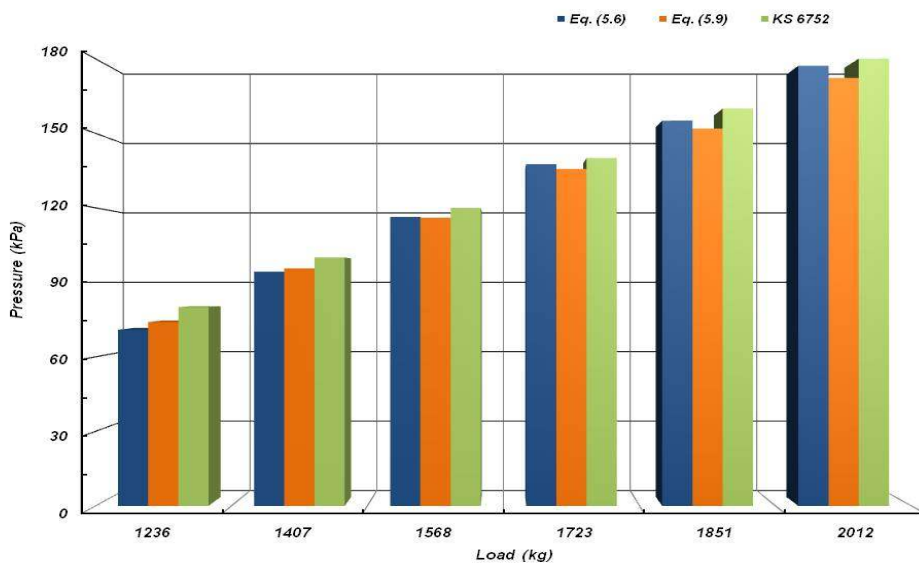


Fig. 5.7 Comparison of tire pressures determined by Eq.(5.6), Eq.(5.9) and KS M6752.

(3) 작업기 종류에 따른 공기압

국내에서 트랙터를 이용한 작업은 쟁기작업, 로타리작업, 무논정지작업 등이 있으며, 각각의 작업은 전용 작업기를 부착하여 수행한다. 표 5.6에 트랙터에 사용되는 대표적인 작업기의 종류와 평균 하중을 정리하였다. 작업기는 본 연구에서 공시체 트랙터로 사용한 50마력 이하의 트랙터에 일반적으로 사용하는 제품을 중심으로 선정하였으며, 주식회사 경일(로타베이터, 무논정지기), 웅진기계공업(쟁기, 원판쟁기, 로타베이터, 무논정지기), 세웅(로타베이터, 원판쟁기, 몰드보드쟁기), 유영기계(몰드보드 쟁기, 원판쟁기) 등 총 4개 회사의 제품을 비교하여 평균 중량을 계산하였다. 무논정지기는 수도작이 많은 우리나라와 일본 등지에서 사용하는 작업기이다. 무논 작업 시 사용하는 무논정지기는 일반 로타리를 이용하는 것보다 정지작업 소요시간이 37% 정도 절감되고 토양의 균평도도 향상되기 때문에 많이 사용된다. 공시체 트랙터의 작업기별 적정 작업속도는 표 5.7에 정리하였다.

Table 5.6 Average weight of implements for T502 tractor

Implement	Avg. weight (kg)
Moldboard plow	285
Disk plow	428
Rotavator	383
Paddy harrow	337

Table 5.7 Travel speed of implements for T502 tractor

Implement	Travel speed	
	Range (km/h)	Typical (km/h)
Moldboard plow	5.0~9.5	8.0
Disk plow	5.0~9.5	6.0
Rotavator	2.0~3.0	2.6
Paddy harrow	3.0~5.0	4.2

표 5.8은 공시체 트랙터인 동양물산 T502 모델의 주요 제원이다. T502는 엔진마력 기준으로 50마력급 트랙터로, 무부가중량은 2,700 kg이며 구동축 타이어는 규정 공기압이 180 kPa인 14.9-28 바이어스 플라이 타이어를 장착하고 있다.

Table 5.8 Specifications of T502 tractor

Engine power (kW)	33 / 2,400 rpm
Overall length (mm)	4,030
Full width (mm)	1,800
Overall height (mm)	2,480
Wheel base (mm)	2,114
Weight (kg) [front, rear]	2,700 [1080, 1620]
Front wheel tire & placard pressure	9.5-20, 230 kPa
Rear wheel tire & placard pressure	14.9-28, 180 kPa

공시체 트랙터에 적용되는 작업기의 종류별 설정 공기압을 선정하기 위하여 구동축 타이어에 인가되는 수직하중을 계산하였다. 일반적으로 작업기를 장착한 농용 트랙터의 하중 전이는 그림

5.8과 같이 단순화하여 식 5.10으로 계산할 수 있다.

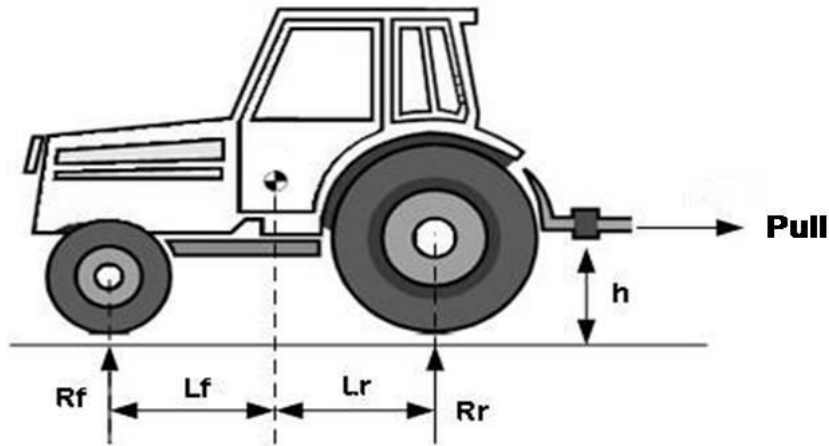


Fig. 5.8 Load transfer by drawbar pull.

$$\Delta R_r = \frac{P \times h}{L_f + L_r} \dots\dots\dots (5.10)$$

여기에서, $L_f + L_r : 2,114 (mm)$
 $h : 610 (mm)$

공시체 트랙터에 작업기를 장착하는 경우에 구동축 타이어에 인가되는 수직하중은 차량 중량에 의하여 구동축 타이어에 인가되는 정하중과 하중 전이 효과에 의한 지면 반력의 변화량을 합산하면 식 5.11과 같이 계산된다(이동렬, 1997).

$$W = \frac{\text{static load} + \text{load transfer}}{2} \dots\dots\dots (5.11)$$

무논정지 작업에 대한 최소 허용 공기압을 식 5.3을 이용하여 계산하였다. 무논 정지기는 바닥에 고정되어 이동하므로 견인 작업에 필요한 견인력은 무논정지기의 평균 중량, 공시체 트랙터의 최대 견인출력과 작업기의 평균 작업속도를 고려하면 16 kN로 계산된다. 이 값을 식 5.11에 대입하여 무논정지 작업 시 구동축 타이어에 인가되는 하중을 계산하면 10 kN이며, 이 값을 식 5.9에 대입하면 무논정지 작업의 최소 허용 공기압은 43 kPa로 계산된다.

쟁기, 원판쟁기 및 로타베이터에 대하여 각 작업기의 권장 작업 속도, 작업기의 하중 및 견인력을 고려하여 각 작업기별 구동축 타이어의 최소 허용 공기압을 계산하여 표 5.9에 정리하였다.

Table 5.9 Minimum required tire pressure for implements of T502 tractor

Implements	Pressure (kPa)
Plow	42
Disk plow	43
Rotavator	46
Paddy harrow	43

공시체 트랙터의 각 작업기별 최소 허용 공기압은 42 ~ 46 kPa로 작업기 종류에 따른 공기압 차이가 매우 작음을 확인하였다. 상기 내용을 토대로 본 연구에서 개발된 타이어 공기압 제어 시스템의 제어 성능을 고려하면 공시체 트랙터인 50마력급 트랙터의 작업기에 따른 설정 공기압 차이는 미미하기 때문에 시스템의 제어 모드를 작업기 별로 세분화하지 않는 것으로 결정하였다.

(4) 제어 모드 및 설정 공기압

타이어 공기압 제어 시스템의 제어 모드는 작업자가 트랙터의 사용 조건에 따라 제어 시스템에 미리 입력되어 있는 모드 중에서 쉽게 선택할 수 있도록 설계하였다. 작업자가 선택한 모드에 따라 제어기는 자동적으로 내부 메모리에 저장되어 있는 해당 모드의 설정 공기압이 자동 입력되도록 구성하였다. 제어기의 제어 모드는 작업, 주행, 비상, 수동 조작 등 4가지로 구분하였다.

① 작업 모드

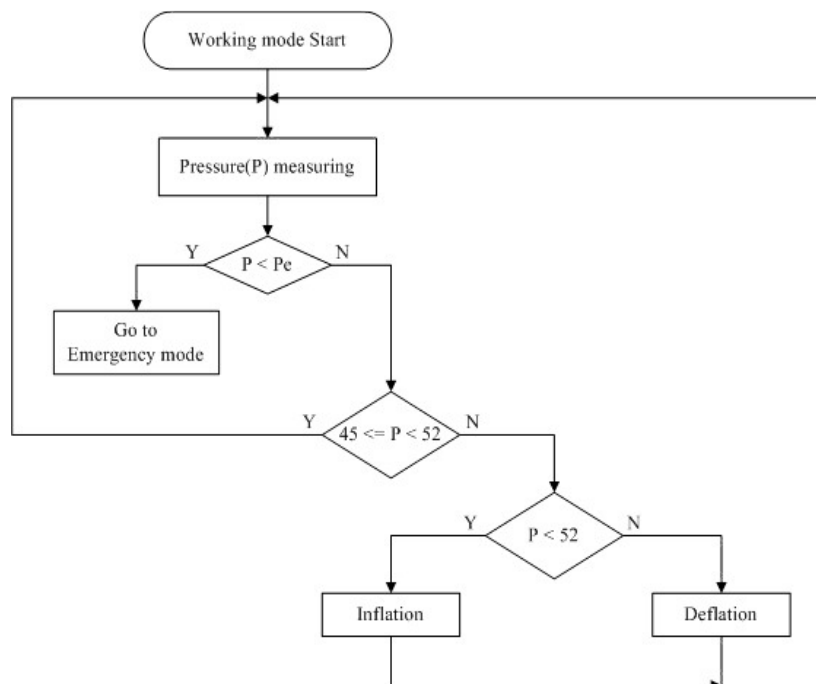


Fig. 5.9 Flowchart of tire pressure control on working mode.

작업 모드는 농용 트랙터에 쟁기, 로터리, 무논정지기 등의 작업기를 부착하여 작업을 수행하는 경우에 설정한다. 이 모드는 작업기의 종류에 따라 설정 공기압을 세분화하지 않았으며, 견인력을 증가시키기 위하여 타이어의 설정 공기압은 작업기의 설정 공기압으로 결정한 50 kPa로 자동 입력하도록 구성하였다. 작업 모드에서 제어기의 작동 알고리즘 흐름도는 그림 5.9와 같다.

② 주행 모드

주행 모드는 농로 또는 포장도로 등에서 주행 및 운반작업 시에 적용할 수 있다. 주행속도는 송신장치에서 측정된 가속도로부터 환산하고, 수직하중은 표 5.4로부터 공시체 트랙터 구동축 타이어의 규정 공기압 조건에서 최대 허용하중인 1,880 kg을 입력하였다. 주행 모드에서 설정 공기압은 KS M6725로부터 개발된 식 5.9의 공기압 계산식에 트랙터 주행속도를 대입하여 제어기에서 자동으로 계산된다.

주행 모드에서의 속도 조건은 20 km/h 미만, 20 ~ 25 km/h, 25 ~ 30 km/h 및 35 km/h 이상의 4 단계로 구분하였다. 식 5.9를 이용하여 계산하면 트랙터 속도에 따라 138 kPa에서 210 kPa 범위에서 설정 공기압이 결정된다. 주행 모드에서 제어기의 작동 알고리즘 흐름도는 그림 5.10과 같다.

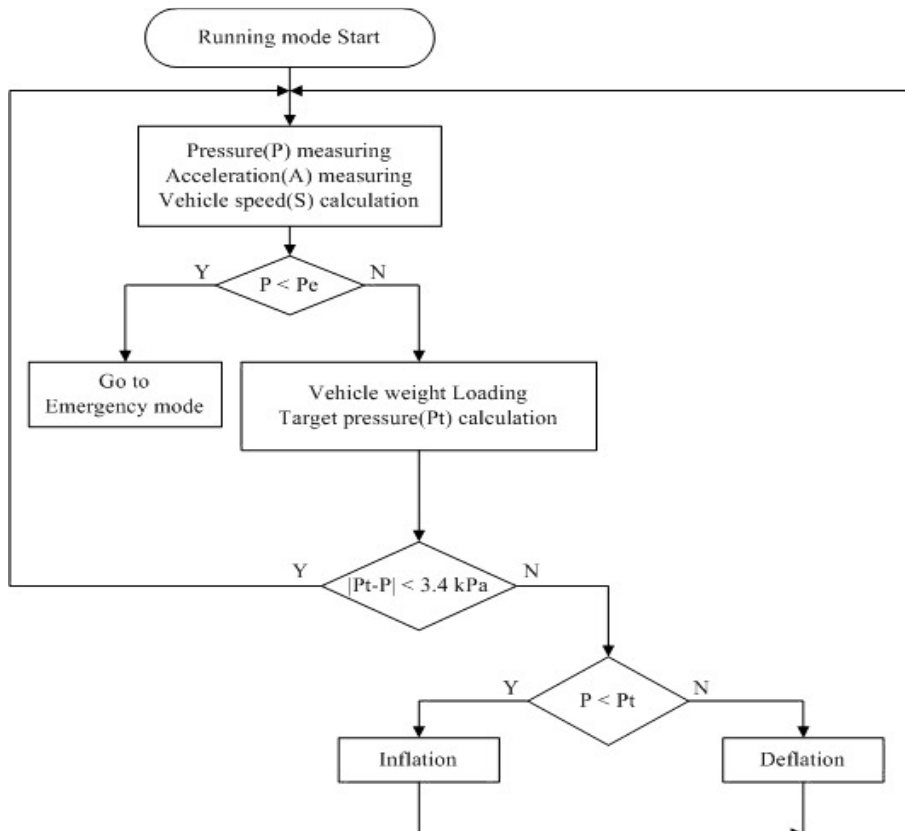


Fig. 5.10 Flowchart of tire pressure control on running mode.

③ 비상 모드

비상 모드는 타이어 손상 또는 공압 유로의 이상 등으로 공기압이 최소 공기압 이하로 떨어지는 등 긴급 상황의 발생 시에 선택할 수 있는 모드로, 비상 모드의 설정 공기압은 규정 공기압의 75%를 선택하였다. 송신장치로부터 전송된 공기압을 이용하여 타이어의 이상 상황을 제어기에서 판정하여 자동으로 비상 모드로 전환하거나, 작업자가 이상을 확인하고 수동으로 선택할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다. 비상 모드에서 제어기의 작동 알고리즘 흐름도는 그림 5.11과 같다.

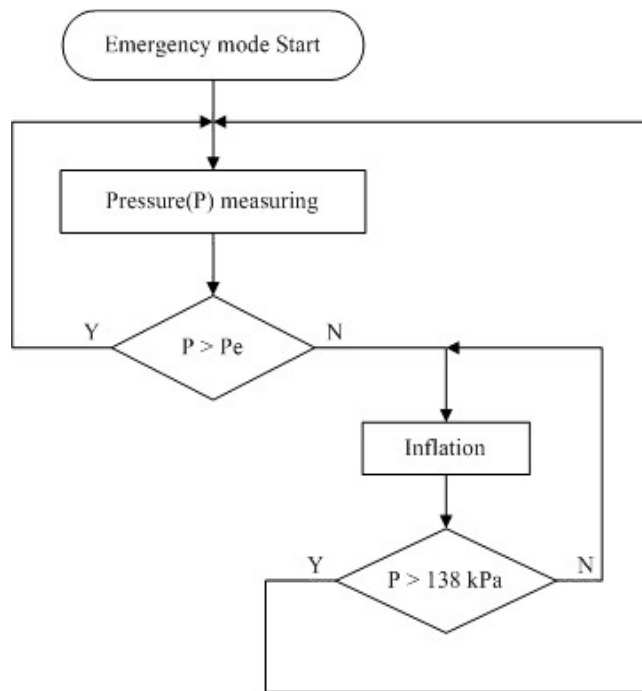


Fig. 5.11 Flowchart of tire pressure control on emergency mode.

④ 수동 모드

수동 모드는 작업자가 설정 공기압을 제어기에 직접 입력할 수 있도록 구성하였다. 작업자는 제어기에서 타이어의 현재 압력을 확인하고 차량의 주행 조건이나 작업 상황에 따라 수동으로 공기압을 입력할 수 있으며, 제어기는 작업자로부터 수동으로 입력된 설정 공기압으로 그림 5.12와 같은 알고리즘을 이용하여 공기압 제어를 수행한다.

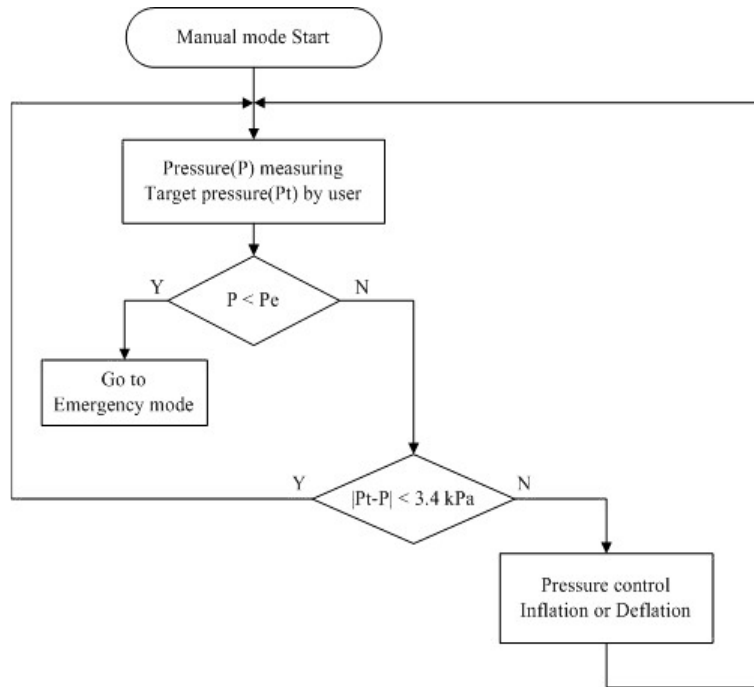


Fig. 5.12 Flowchart of tire pressure control on manual mode.

라. 견인동력차를 이용한 농용 트랙터 적용 적합성 시험

본 연구에서 개발한 공기압 제어 시스템을 공시체 트랙터에 장착하고 타이어 공기압 제어에 따른 견인성능 변화 여부를 시험하고 능동형 타이어 공기압 제어 시스템의 농용 트랙터 적용 적합성을 확인하기 위하여 농촌진흥청의 주행 시험로에서 그림 5.13과 같은 견인동력 측정차량을 이용하여 견인성능 시험을 수행하였다. 견인동력 측정차량을 이용한 측정 항목은 엔진속도, 견인력, 주행속도, 슬립율 등이며, 견인성능 시험은 OECD 트랙터 코드 등의 국제규격과 국내 트랙터 시험방법인 KS 규격에 부합하는 농용 트랙터 견인성능 시험방법(국립농업과학원 고시 2008-1)을 준용하여 그림 5.14와 같은 견인바를 이용하여 공시체 트랙터와 측정차량을 연결하여 총 연장 600 m의 농촌진흥청 농기계주행시험장의 시험 주행로(콘크리트 포장)에서 수행하였다. 시험에 사용된 견인동력 측정차량 본체부의 주요 명세는 표 5.10과 같다.

Table 5.10 Specifications of dynamometer car

Measurement range	Max. Traction force	60 kN
	Max. Traction power	45 kW
Dynamometer	Type	EC, 120 kW
	Cooling method	Water cooling, 250 L
Drawbar	Cylindrical	Load cell mount type
Traction force	Loadcell	10 kN, 50 kN, 10 kN
Speed sensor	Optical type	0.2~50 km/h



Fig. 5.13 Drawbar performance test by a dynamometer car on test track.



Fig. 5.14 Drawbar connected to dynamometer car.

시험에 사용한 견인동력 측정차량의 데이터 수집 장치 주요 명세는 표 5.11과 같다. 견인력은 견인동력 측정차량에 장착된 로드셀을 이용하여 측정하였다. 트랙터의 주행속도와 슬립율은 견인동력 측정차량의 5륜형 속도측정장치를 이용하여 측정 및 계산하였다. 엔진속도는 로터리 엔코더를 이용하여 PTO축의 회전속도를 측정하고 기어비를 곱하여 계산하였다. 견인동력 측정차량의 데이터 수집 장치 구성도는 그림 5.15와 같다.

Table 5.11 Specifications of data acquisition system

Device	Specification	Measurement	Remark
Load cell	0.05 %	Traction force	20 kN, 50 kN, 10 kN
5th wheel speedometer	360 pulse	Traction speed	Rotary encoder
Pulse meter	360 pulse	Engine rpm	PTO
Pulse meter	360 pulse	Rear wheel rpm	Slip
Thermocouple	0 ~ 150 ℃	Temperature	Fuel, Engine oil

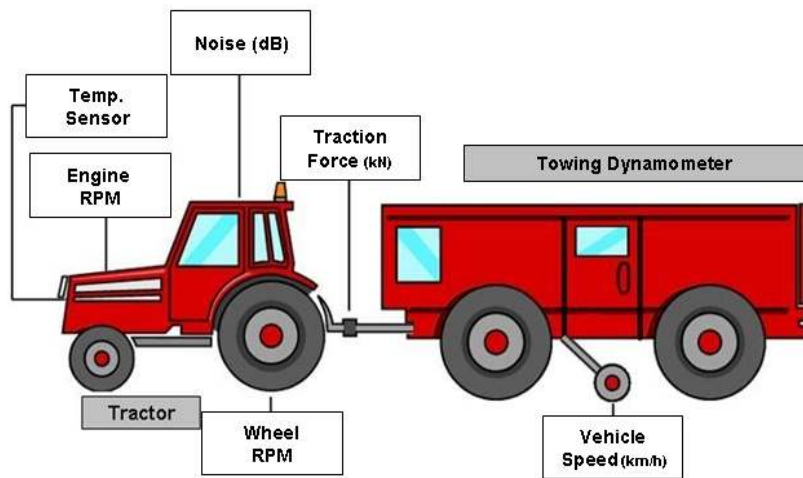


Fig. 5.15 Data acquisition system of dynamometer car.

2. 결과 및 고찰

가. 능동형 타이어 공기압 제어 시스템의 제어 성능

본 연구에서 개발한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 공시체 트랙터에 설치한 후, 개발된 제어 모드의 정상 작동 여부 및 제어 성능을 확인하였다. 실제 농용 트랙터의 장착 환경에서 제어 시스템의 전원은 차량에 장착된 충전 배터리를 사용하였으며, 전원 회로를 구성하여 공기압측기, 솔레노이드 밸브 블록 및 제어기 등에 작동 전원을 공급하였다.

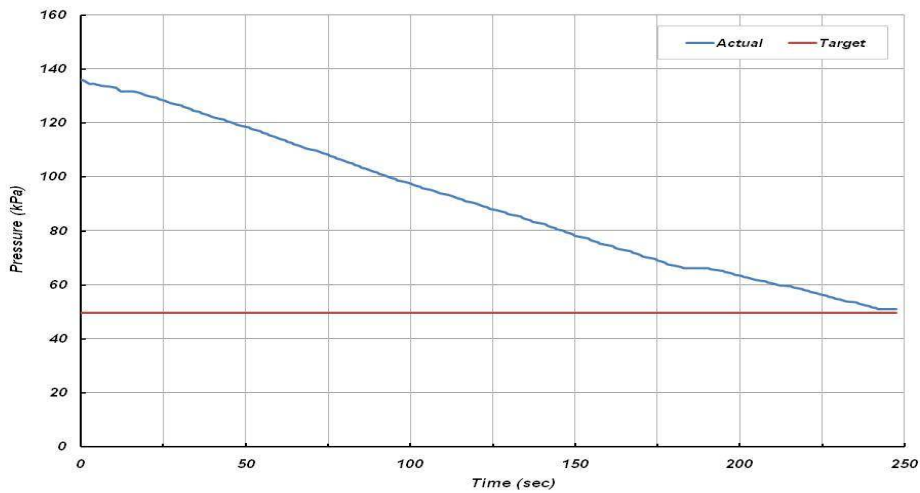
(1) 작업 모드

제어기의 제어 모드를 작업 모드로 설정하면 설정 공기압이 50 kPa로 설정되어 제어과정을 수행한다. 작업 모드의 제어 성능을 확인하기 위하여 각각 138 kPa, 180 kPa, 210 kPa의 3 수준의 초기 공기압에서 50 kPa까지 제어하는데 소요되는 시간 및 제어 정확도를 측정하였다. 성능 시험은 각 공기압 수준 별로 각각 5회의 반복 시험을 수행하여 그 결과를 표 5.12와 그림 5.16에 각

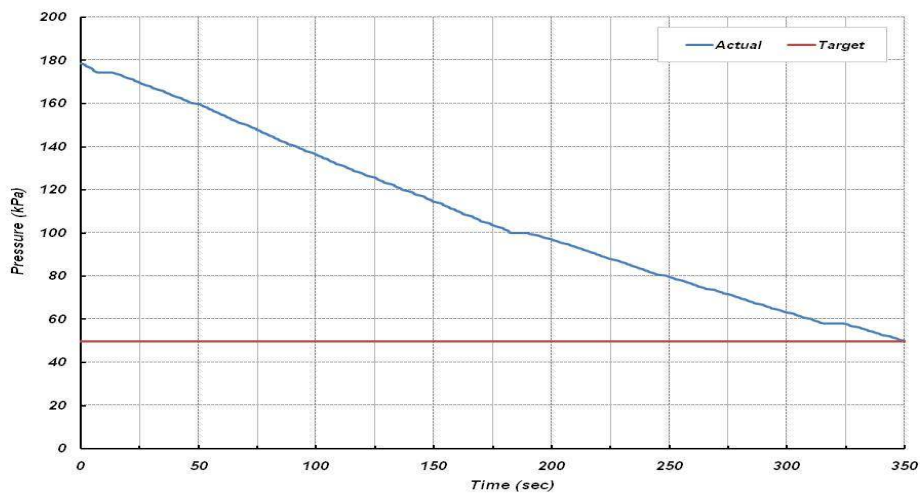
각 나타내었다. 시험 결과, 제어 시스템을 공시체 트랙터에 장착한 상태에서 제어 정확도는 ± 1 %FS 이내임을 확인하였으며, 주입 및 배출 밸브의 제어 동작도 3~4회에서 제어가 가능하였다.

Table 5.12 Results of test for tire pressure control on working mode

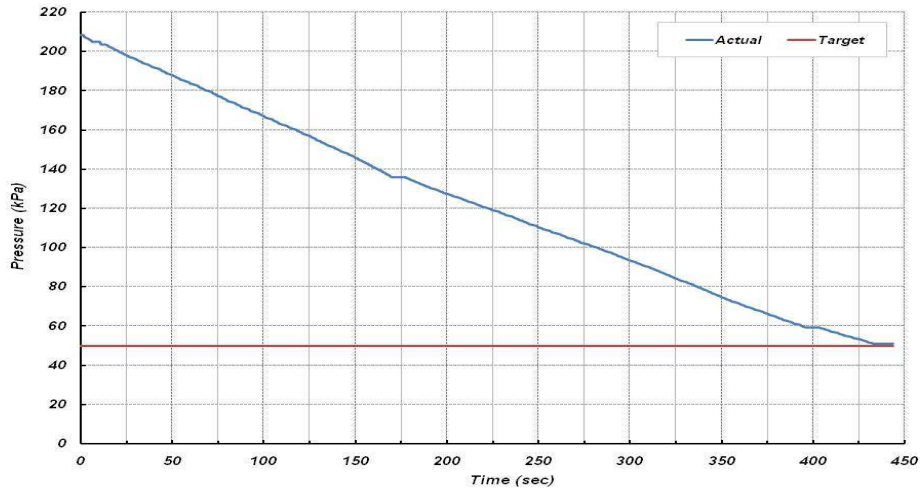
Start pressure (kPa)	Target pressure (kPa)	Actual pressure (kPa)	Time (sec)	Valve open (times)	Error (%FS)
138	50	51	242	3	0.3
180	50	50	350	4	0
210	50	51	432	4	0.3



(a) 138 kPa → 50 kPa



(b) 180 kPa → 50 kPa



(c) 210 kPa → 50 kPa

Fig. 5.16 Tire pressure change on working mode.

(2) 주행 모드

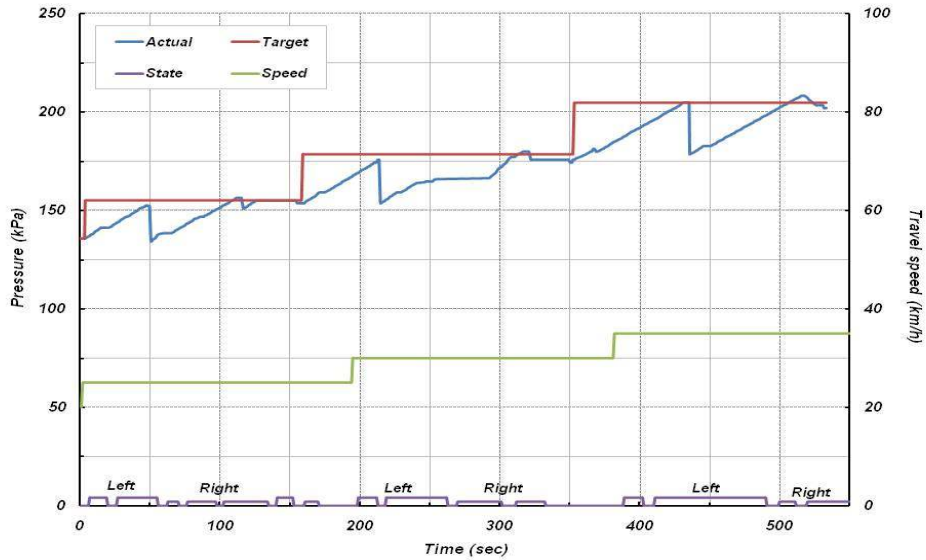
주행 모드는 송신장치에서 측정한 가속도로부터 환산되는 차량의 주행속도에 따라 설정 공기압이 가변되는 구조로 설계되었다. 따라서 주행 모드의 성능은 트랙터의 주행속도 변화에 따른 설정 공기압의 자동 변경 여부와 변경된 설정 공기압에 따른 제어 시스템의 제어 정확도 시험을 수행하여 검증하였다.

주행속도는 20 km/h 이하, 20 ~ 25 km/h, 25 ~ 30 km/h, 30 km/h 이상의 4 수준으로 분류하였으며, 시험에 사용된 공시체 트랙터의 경우 주행속도 수준에 따라 설정 공기압은 식 5.9에 의하여 각각 138 kPa, 156 kPa, 178 kPa, 205 kPa로 계산되었다. 타원형의 시험 주행로에서 공시체 트랙터의 주행속도를 변화하여 제어기의 설정 공기압이 자동으로 변화되는지 확인하였으며, 공기압 및 주행속도 등의 데이터를 제어기의 RS-232 직렬통신 단자를 이용하여 랩톱컴퓨터에서 수집하였다.

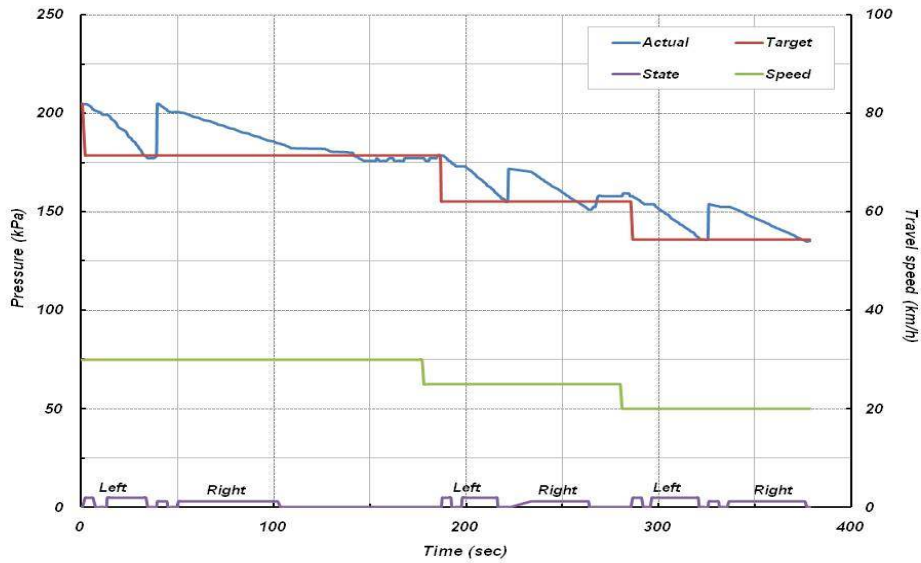
Table 5.13 Results of test for tire pressure control on running mode

Speed (km/h)	Start pressure (kPa)	Target pressure (kPa)	Actual pressure (kPa)	Error (%FS)
20 → 25	136	156	156	0
25 → 30	156	178	176	-0.6
30 → 35	178	205	203	-0.6
35 → 30	205	178	176	-0.6
30 → 25	178	156	153	-0.9
25 → 20	156	136	135	-0.3

주행모드의 성능시험은 초기 속도를 20 km/h로 주행하다가 단계적으로 25 km/h, 30 km/h, 35 km/h로 차속을 변화시키며 속도의 변화에 따른 설정 공기압으로 타이어 공기압의 제어가 완료 될 때까지 제어기의 정상 작동 여부를 확인하는 방법으로 수행하였다. 시험과정 중 수집된 데이터를 이용하여 주행 속도에 따른 설정 공기압 변화, 제어 시간 및 공기압 제어의 정확도 등을 표 5.13과 그림 5.17에 나타내었다.



(a) acceleration



(b) deceleration

Fig. 5.17 Tire pressure change on running mode.

(3) 비상 모드

비상 모드의 정상 작동 여부를 확인하기 위하여 공압 유로에 수동 조작이 가능한 배출밸브를 추가하여 타이어 공기압을 인위적으로 배출시켜 유로에 이상이 발생하는 상황을 구현하였다. 그림 5.18에 타이어 공기압을 인위적으로 감소하여 타이어의 초기 공기압보다 20% 이하로 떨어지면 자동으로 비상 모드로 진입하여 제어기가 138 kPa의 설정 공기압으로 제어 과정을 반복적으로 수행하는 시험 결과를 그래프로 표시하였다. 그림과 같이 타이어 공기압이 설정 압력보다 20% 이하로 떨어지는 경우에 비상 모드가 정상적으로 작동하였으며, 제어기의 설정 공기압은 타이어 규정 공기압의 75% 수준으로 자동으로 변경되어 제어과정을 수행하였다.

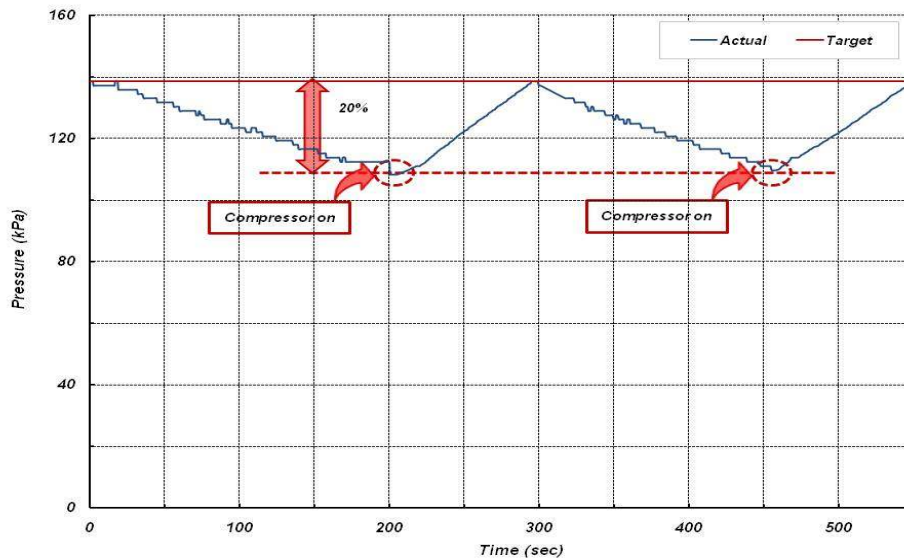


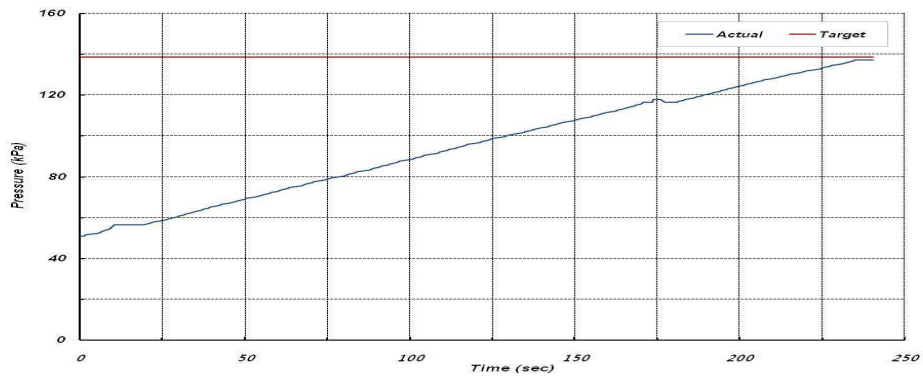
Fig. 5.18 Tire pressure change on emergency mode.

(4) 수동 모드

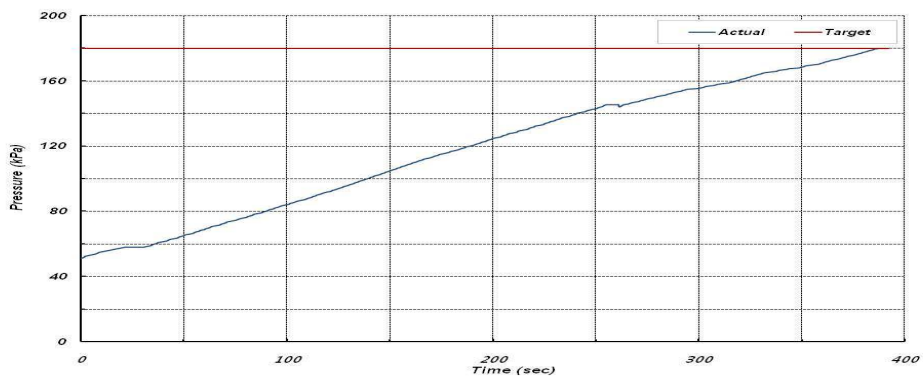
수동 모드의 성능은 제어기의 조작 스위치를 이용하여 수동으로 입력한 설정 공기압에 따른 제어 시스템의 제어 정확도 시험을 수행하여 확인하였다. 수동 모드의 성능 시험은 타이어의 초기 압력을 50 kPa로 고정하고 138 kPa, 180 kPa, 210 kPa으로 3 수준의 공기압으로 제어과정을 각각 5회 반복 수행하였으며, 제어 소요시간과 압력제어 정확도를 측정하였다. 제어과정의 공기압 변화를 그림 5.19에 나타내었으며, 시험 결과는 표 5.14와 같다. 수동 모드 제어 성능 시험 결과, 제어 시스템을 공시체 트랙터에 장착한 상태에서 제어 정확도는 $\pm 1\%$ FS 이내임을 확인하였으며, 3~4회의 공기주입 및 배출 밸브의 제어 동작으로 공기압 제어가 가능하였다.

Table 5.14 Results of test for tire pressure control on manual mode

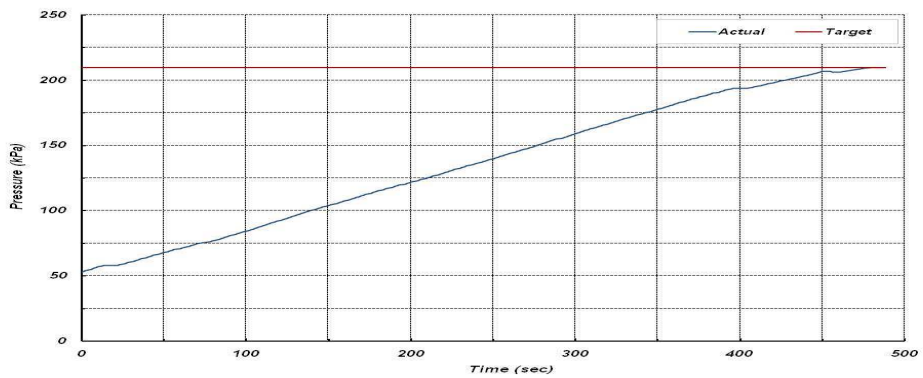
Start pressure (kPa)	Target pressure (kPa)	Actual pressure (kPa)	Time (sec)	Valve open (times)	Error (%FS)
50	138	137	235	3	-0.3
50	180	180	389	4	0
50	210	210	475	4	0



(a) 50 kPa → 138 kPa



(b) 50 kPa → 180 kPa



(c) 50 kPa → 210 kPa

Fig. 5.19 Tire pressure change on manual mode.

나. 농용 트랙터 적용 적합성 확인

본 연구에서 개발한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템의 농용 트랙터 적용 적합성을 확인하기 위하여 공시체 트랙터의 변속단수를 트랙터 형식검사의 전부하 견인성능 시험에서 견인력 및 견인출력이 가장 높게 출력된 L-4단과 H-1단의 두 수준으로 고정하고 제어기를 이용하여 타이어의 공기압을 각각 50 kPa, 138 kPa, 180 kPa, 210 kPa의 4수준으로 변화시키면서 견인시험을 수행하였다. 각각의 공기압 수준 및 변속단수에 따라 10회 반복 시험을 수행하였으며, 측정 데이터를 이용하여 견인출력을 계산하였다. 공기압 제어에 따른 견인성능의 변화는 각각 표 5.15, 표 5.16과 그림 5.20, 그림 5.21에 나타내었다.

견인동력차량을 이용하여 각 변속단수에서 슬립율을 일정하게 유지하고 공기압 변화에 따른 견인력, 차속, 견인출력 및 견인계수를 표 5.15에 정리하였으며, 표 5.16에 공기압 변화에 따른 견인력과 견인출력의 변화율을 공시체 트랙터 타이어의 규정 공기압을 기준으로 백분율로 표시하였다. 그림 5.20과 그림 5.21은 각각 타이어의 공기압에 따른 견인력과 견인출력의 변화를 나타낸 그래프이다.

L-4단에서는 견인동력차량을 이용하여 트랙터의 견인부하를 조절하여 슬립율을 15 % 조건으로 유지하면서 시험을 수행하였으며, H-1단에서는 5 %의 슬립율 조건에서 공시 트랙터의 최대 견인출력을 나타내므로 이 조건에서 시험을 수행하였다.

타이어 공기압 변화에 따른 견인성능의 변화는 변속단수 별로 서로 다른 결과가 나타났다. H-1단에서는 타이어 공기압이 증가할수록 견인력과 견인출력이 모두 감소하는 경향을 보이는 반면, L-4단에서는 공기압을 50 kPa에서 138 kPa로 증가하면 견인성능이 미약하게 증가하였다가, 이후 공기압 증가에 따라 견인력과 견인출력이 감소하는 경향을 나타내었다.

공시체 트랙터의 하중과 견인바에서 측정한 견인력을 식 5.11에 대입하여 계산한 구동축 동하중을 이용하여 견인계수를 계산하여 그 결과를 표 5.15에 정리하였다. 공기압 변화에 따라 L-4단에서 견인계수는 0.81 ~ 0.88 사이의 범위에서 분포하였으며, H-1단에서는 0.51 ~ 0.56의 범위를 나타내었다. L-4단에서는 타이어 공기압을 210 kPa에서 138 kPa로 조절하면 견인계수가 대략 0.07 정도 증가하였으나, 138 kPa에서 50 kPa로 공기압을 감소시키면 견인계수가 다소 감소하였다. H-1단에서는 210 kPa에서 50 kPa로 공기압이 감소됨에 따라 견인계수가 0.05 정도 증가하는 경향을 나타내었다.

Table 5.15 Results of traction performance test

Gear level	Tire pressure (kPa)	Traction power (kW)	Engine speed (rpm)	Travel speed (km/h)	Traction force (kN)	Traction coefficient	Slip (%)
Low-4	50	11.91	2655	2.35	18.25	0.86	15.1
	138	12.29	2653	2.37	18.67	0.88	15.0
	180	11.32	2635	2.37	17.20	0.82	15.0
	210	11.21	2667	2.42	16.68	0.81	14.9
High-1	50	27.26	2452	9.19	10.68	0.56	4.8
	138	27.05	2447	9.41	10.35	0.55	4.7
	180	26.62	2451	9.49	10.10	0.54	4.6
	210	25.47	2452	9.51	9.64	0.51	4.4

Table 5.16 Effects of tire pressure on traction performance

Gear level	Tire pressure (kPa)	Traction power change (%) (Reference pressure : 180 kPa)	Traction force change (%) (Reference pressure : 180 kPa)
Low-4	50	5.2	6.1
	138	8.5	8.8
	180	0.0	0.0
	210	-0.1	-3.0
High-1	50	2.4	5.7
	138	1.6	2.5
	180	0.0	0.0
	210	-4.4	-4.6

이와 같이 타이어 공기압의 변화에 따른 견인력과 견인출력 등의 견인성능 변화는 타이어의 규격, 노면의 상태 및 작업 조건에 따라 달라질 수 있지만, 본 시험에서는 트랙터 운행 상태에서 설정된 타이어 공기압으로 제어가 가능하였으며, 공기압을 감소하면 견인력이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

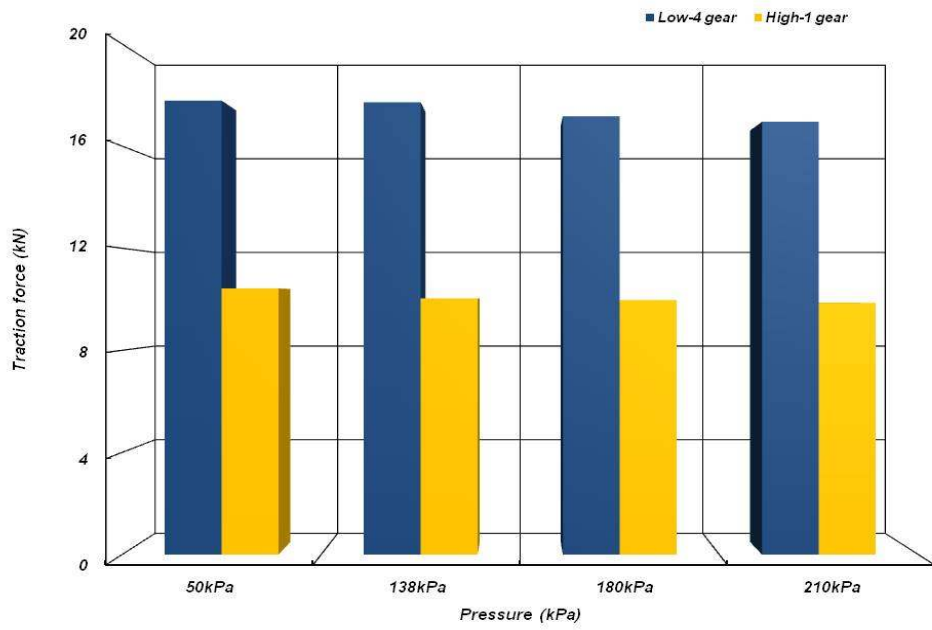


Fig. 5.20 Effects of tire pressure on traction force at two different gears.

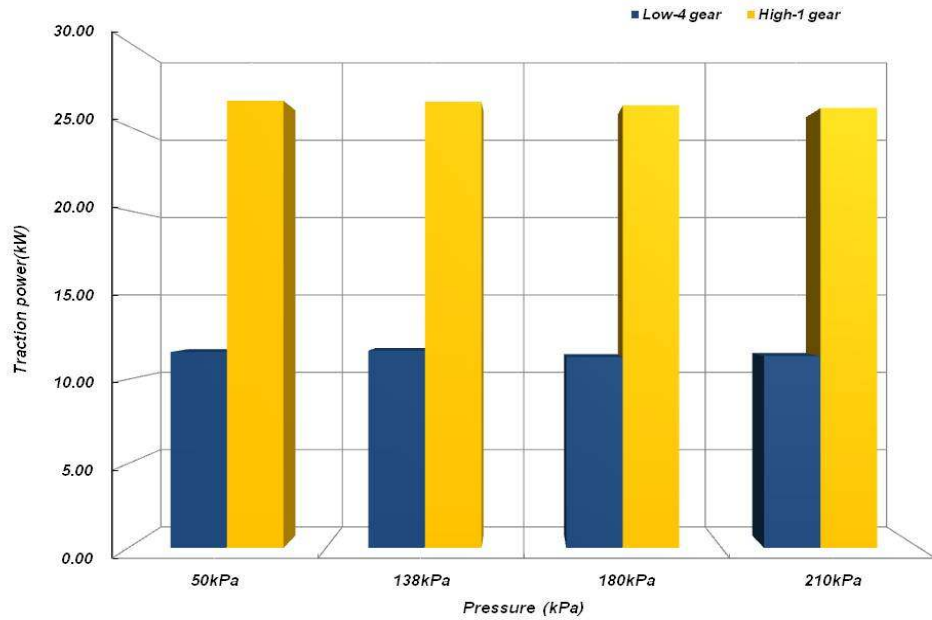


Fig. 5.21 Effects of tire pressure on traction power at two different gears.

3. 요약 및 결론

본 장에서는 개발한 타이어 공기압 제어 시스템을 농용 트랙터에 적용하기 위하여 사용 조건

에 따라 제어 모드를 개발하고 그에 따른 설정 공기압을 결정하였다. 차량의 주행속도에 따라 설정 공기압이 자동으로 가변되는 알고리즘을 제어기에 적용하여 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 완성하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

가. 개발한 타이어 공기압 제어 시스템을 농용 트랙터에 적용하기 위하여 4가지 제어 모드(작업 모드, 주행 모드, 비상 모드, 수동 모드)를 개발하였다. 완성된 타이어 공기압 제어 시스템의 제어 성능 시험은 공시체 트랙터에 시스템을 장착하여 수행하였다. 시험 결과, 개발된 각각의 제어 모드는 실차 조건에서 정상적으로 작동하였다.

나. 구동륜의 동하중과 차량의 주행속도에 따라 결정되는 설정 압력으로 공기압이 가변되는 구조로 설계된 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 농용 트랙터에 적용하여 주행 속도를 가변하면서 공기압 제어 시험을 수행하였다. 시험 결과, 각각의 압력 수준별 타이어 공기압 제어의 정확도는 $\pm 1\%$ FS 이하이며, 개발한 제어 알고리즘이 실차 조건에서도 원활한 제어 동작을 수행하였다.

다. 타이어 또는 공기 유로의 손상으로 외부로 공기누출이 발생하는 경우 공기압 제어 시스템의 공기 압축기 토출량 범위 이내에서는 개발된 제어 모드로 타이어 공기압을 유지할 수 있음을 확인하였다. 시험 결과, 공기압이 20% 이상 감소하면 제어 시스템이 자동으로 감지하여 타이어 공기압을 설정 공기압으로 제어하는 알고리즘이 정상적으로 수행되었다.

라. 완성된 능동형 타이어 공기압 제어 시스템의 농용 트랙터 적용 적합성을 확인하기 위하여 농촌진흥청의 주행 시험로에서 견인동력 측정차량을 이용하여 견인성능 시험을 수행하였다. 시험 결과, 능동형 타이어 공기압 제어 시스템은 농용 트랙터에서 타이어 공기압을 자동으로 제어하여 공기압 변화에 따른 견인성능 변화를 확인할 수 있었다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에 기여도

제 1 절 연도별 연구목표

1. 1차년도

구분	세부과제별	연구개발의 목표	연구개발의 내용
1차년도 (2007)	(세부)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 개념 설계와 공기압 측정 모듈 및 무선 송수신 장치 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 작업조건 및 주행조건에 따른 공기압 특성에 관한 문헌 수집 및 자료 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 타이어 공기압 제어 시스템에 관한 정보 수집 - 농용 트랙터의 타이어 공기압에 따른 토양 다짐의 효과와 기동성능, 조향성능, 작업효율의 상관관계에 관한 정보 수집 - 농용 트랙터에 적용되는 타이어의 공기압과 타이어의 성능 및 차량 동특성의 상관관계 분석 - 주행조건 및 작업조건에 따른 타이어 내부 온도 및 공기압 변화 관계 분석 - 농용 트랙터의 작업조건 및 주행조건에 따른 최적 공기압 조건 수립 ○ 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 개념 설계 <ul style="list-style-type: none"> - 국내외 유사제품 자료조사 및 기능분석 - 제어 요인 및 외란 조건에 대한 분석 - 공기압 측정/제어 모듈의 개념 설계 - 무선 송수신 모듈의 개념 설계 - 주행모드/제어모드의 개념 설계 - 제어/무선 송수신 알고리즘의 개념 설계 ○ 공기압 측정 모듈 및 무선 송수신 장치 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 공기압 측정 모듈 개발 - 무선 송수신 회로 개발 - 회로 분석 및 부품 성능 분석 - 무선 송수신 장치용 시뮬레이터 개발 - 무선 송수신용 프로토콜 개발 - 작동 환경을 고려한 시작품 개발

2. 2차년도

구분	세부과제별	연구개발의 목표	연구개발의 내용
2차년도 (2008)	(새부)	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농용 트랙터에 적용 가능한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 시제품 개발 및 성능 검증 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 설계 <ul style="list-style-type: none"> - 제어 시스템의 각 모듈의 설계 및 해석 - 제어 시스템의 알고리즘 설계 - 회로 부품 성능의 해석 ○ 작업조건 및 주행조건에 따른 공기압 제어/주행 모드 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 농용 트랙터의 기동성과 조향 성능 및 작업 효율을 향상시킬 수 있는 시스템에 적합한 주행 모드 개발 - 작업 조건(작업 종류, 견인부하) 및 주행조건에 따른 공기압 제어 모드 개발 ○ 공기압 제어 시스템의 H/W 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 공기압 제어와 디스플레이 등의 사용자 인터페이스를 포함한 제어 장치 개발 - 공압 컴프레서, 탱크 및 솔레노이드 블록 등을 포함한 공기압 발생 장치 개발 - 타이어에 공기를 주입 및 배출하는 무한회전형 공기압 공급 장치 개발 ○ 공기압 제어 알고리즘 및 S/W 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 공기압 제어용 소프트웨어 개발 - 사용자 인터페이스 개발 - 긴급 상황을 사용자에게 경고해 줄 수 있는 경보 기능 개발 ○ 농용 트랙터에 장착 가능한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 시제품 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 농용 트랙터에 대한 적용 방안 분석 ○ 개발된 시제품의 성능 및 신뢰성 검증을 통한 보완 및 개선

제 2 절 평가착안점

구분	연도	세부연구개발 목표	가중치	평가의 착안점 및 기준
1차 년도	2007	- 작업조건/주행조건에 따른 공기압 특성에 관한 문헌정보 수집 및 분석	20 %	- 작업조건/주행조건에 따른 공기압 조절이 실행 가능한 전략을 구성하였는가?
		- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 개념 설계	30 %	- 실제 농용 트랙터에 적용 가능한 시스템을 설계 하였는가?
		- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 공기압 측정 모듈 및 무선 송수신 장치 개발	50 %	- 농용 트랙터의 새시 및 구조에 간섭 없이 타이어의 공기압 측정이 가능하며, 신뢰성이 있는가?
2차 년도	2008	- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 설계	10 %	- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 요구 조건을 충족 하였는가?
		- 작업조건 및 주행조건에 따른 공기압 제어/주행 모드 개발	10 %	- 작업조건/주행조건에 따른 최적의 효율을 도출 할 수 있는 모드를 개발하였는가?
		- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 H/W 개발	25 %	- 제안된 작동조건으로 안정되게 제어하는가?
		- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 공기압 제어 알고리즘 및 S/W 개발	20 %	- 사용자 편의성을 제공하며 제안된 제어 신뢰성을 제공하는가?
		- 농용 트랙터에 장착 가능한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 시제품 개발	15 %	- 시스템이 안전하며 유지관리에 편리한가?
		- 시제품의 성능 및 신뢰성 검증을 통한 보완 및 개선	20 %	- 시제품의 성능 및 신뢰성이 제안된 목표에 도달하였는가?
최종 평가		- 공간 적용성 평가	20 %	- 제작된 시제품을 농용 트랙터에 적용 할 수 있는가?
		- 농용 트랙터의 효율성 향상	30 %	- 시스템 장착을 통하여 농용 트랙터의 효율이 향상 되었는가?
		- 제어 신뢰성	25 %	- 시스템의 제어 성능이 제안된 제어 목표를 달성할 수 있는가?
		- 안전성	15 %	- 시스템의 장착을 통하여 작업자나 주변 환경에 안전한가?
		- 경제성 분석	10 %	- 시스템의 장착을 통하여 농용 트랙터의 효율 및 경제성 향상에 관한 분석을 합리적으로 수행하였는가?

제 3 절 연구개발목표의 달성도

1. 1차년도

목 표	연구개발 수행내용	달 성 도(%)
- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 개념 설계	- 국외 논문 조사(일리노이) - 관련 기술자료 조사 - P&ID 작성	100%
- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 공기압 측정 모듈 및 무선 송수신 장치 개발	- TMPS 시뮬레이터 제작 - TPMS 모듈 제작 - TPMS 검/교정 - 통신 성능 검증	100%

2. 2차년도

목 표	연구개발 수행내용	달 성 도(%)
- 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 설계	- 제어 시스템의 각 모듈의 설계 및 해석 - 제어 시스템의 알고리즘 설계 - 회로 부품 성능의 해석	100%
- 작업조건 및 주행조건에 따른 공기압 제어/주행 모드 개발	- 농용 트랙터의 기동성과 조향 성능 및 작업 효율을 향상시킬 수 있는 시스템에 적합한 주행 모드 개발 - 작업 조건(작업 종류, 견인부하) 및 주행조건에 따른 공기압 제어 모드 개발	100%
- 공기압 제어 시스템의 H/W 개발	- 공기압 제어와 디스플레이 등의 사용자 인터페이스를 포함한 제어 장치 개발 - 공압 컴프레서, 탱크 및 솔레노이드 블록 등을 포함한 공기압 발생 장치 개발 - 타이어에 공기를 주입 및 배출하는 무한회전형 공기압 공급 장치 개발	100%
- 공기압 제어 알고리즘/ S/W 개발	- 공기압 제어용 소프트웨어 개발 - 사용자 인터페이스 개발 - 긴급 상황을 사용자에게 경고해 줄 수 있는 경고 기능 개발	100%
- 농용 트랙터에 장착 가능한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 시제품 개발	- 농용 트랙터에 대한 적용 방안 분석 - 개발된 시제품의 성능 및 신뢰성 검증을 통한 보완 및 개선	100%

제 4 절 관련분야에의 기여도

본 연구를 통하여 개발된 시스템은 아래와 같이 관련분야에 기여 하였다.

농용 트랙터를 위한 능동형 타이어 공기압 제어 시스템(ATPCS)의 개발로 주요 작업의 종류와 트랙터의 주행조건 및 노면상태에 따라 상시 최적의 작업 효율 및 견인, 조향성능을 유지하여 트랙터를 효과적으로 운용할 수 있는 기술을 확보.

○ 의도하지 않는 타이어 공기압 손실에 대비하여 농용 트랙터의 타이어 파손 또는 조기 마모로 인하여 야기될 수 있는 인적, 물적, 시간적 손실을 줄일 수 있는 기술을 개발.

○ 적정 수준의 공기압 유지로 농용 트랙터의 연비 증가 및 유류비 절감과 공해물질 배출 감소 효과도 기대

○ 국산 트랙터에 본 기술을 적용함으로써 타이어 공기압 제어 시스템의 국산화 원천 기술의 확보 및 국산 트랙터의 고급화에 기여.

○ 본 기술의 이용 시 설계 변수 및 구조의 변경을 통하여 공기 주입형 타이어를 이용하는 모든 승용 및 상용차량(농용, 산업용, 군사용)에 적용 가능한 기술의 파생 가능.

○ 농업기계, 승용 차량과 상용차 관련 분야 및 타이어 산업 전반에 걸쳐 관련 기술의 적용에 따른 경제적 파급 효과 및 관련 시장 수요 창출의 효과가 매우 높을 것으로 기대됨.

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

제 1 절 장래연구를 위한 제언

본 연구는 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 개발하고자 수행하였다. 연구수행 과정 중에서 미흡하였거나, 후속적인 연구가 필요할 것으로 판단되는 사항을 요약하면 다음과 같다.

가. 타이어 제조사 또는 산업규격으로 차속과 최대 허용 동하중에 대한 적정 공기압이 규정되어 있다. 타이어 및 사용 조건에 따른 공기압 제어 효과를 극대화하기 위하여 타이어의 최소 허용 공기압을 가능한 한도까지 낮추어 지면과의 접지면적을 넓게 하여야 한다. 일부 타이어 제조사에서는 이에 필요한 자료를 제공하고 있으나, 대부분의 업체에서 제공되는 자료는 현재로서는 미흡한 실정이다. 궁극적으로 토양 조건이나 노면 조건에 따른 타이어 표준에 대한 타이어 제조사의 지속적인 연구 개발이 필요하다고 사료된다.

나. 농용 트랙터 타이어의 공기압을 조절하여 견인성능을 극대화하기 위한 조건은 슬립율과 차량의 동하중 등을 공기압 제어변수로 활용하여야 한다. 그러나 본 연구는 경제성을 고려한 공기압 제어 시스템을 개발하고자 하는 목적으로 수행하였기 때문에 상기 물리량을 측정하기 위한 별도의 장치 개발은 부득이하게 본 연구의 범위에 포함하지 않았다. 슬립율과 동하중을 측정하는 기술은 다양한 방법으로 구현이 가능하나, 장치가 복잡해질 뿐만 아니라 시스템의 단가 상승 문제가 수반된다. 차량이 점차 첨단화, 지능화되면서 각종 전자 제어 장치가 차량 출하 시에 기본 장착되는 근시일 내에 상기 측정장치를 포함한 최적의 공기압 제어 시스템의 완성을 기대한다.

다. 승용, 상용차뿐만 아니라 농용 트랙터 등의 차량에서 타이어 공기압 제어의 효과에 관한 많은 연구가 수행되었다. 그러나 대부분의 연구 내용이 수동 제어 방법으로 공기압을 조절하고 시험을 수행한 후에 그 효과를 분석하는 방법으로 구성되어 있다. 본 연구에서 개발한 제어 시스템은 작업 또는 주행 중에 자동으로 공기압을 가변 제어할 수 있도록 구성하였으므로 이를 활용한 다양한 연구가 진행되기를 기대한다.

제 2 절 타 연구에의 활용 결과

본 연구에서는 개발된 능동형 타이어 공기압 제어 시스템을 공기 주입형 타이어를 사용하는 모든 차량(승용, 상용, 군사용)에 적용 시킬 수 있도록 하는 관련 기술의 파생 가능성을 타진하기 위하여 본 연구의 대상인 농용 트랙터 이외에도 개발된 제어 시스템을 승용 및 상용차량의 타이

어에 장착하고 연구과정에서 개발된 타이어 시뮬레이터를 이용하여 공기압 측정, 송·수신 성능 및 공기압 제어 성능을 확인하는 별도의 연구를 수행하였다 또한 제어 알고리즘을 개발하는 과정을 수행하였다.

그 결과 개발된 시스템을 승용차량에 부착하였을 경우 공기압 제어 성능은 승용차용 타이어의 경우 초기 압력 166kPa에서 207kPa의 설정 압력으로의 제어 과정에서 개발된 시스템의 공압 제어 회로의 비례제어 계수를 1.0으로 설정할 경우 최상의 성능을 발휘하는 것으로 분석되었으며 이와 관련된 실험 결과는 본 연구보고서의 77~78 pp의 그림 4.26에 나타나 있는 것과 같다. 또한 동일한 실험을 상용차 타이어에 적용한 결과 초기 압력 496 kPa에서 621kPa까지 제어하는 경우 제어시간은 승용차 타이어보다 6배 이상 소요되지만 본 연구에서 개발된 시스템을 상용차에 적용할 경우 비교적 정확한 공기압의 제어가 가능함을 확인 할 수 있었으며, 이러한 내용은 본 연구 보고서의 77, 79 pp에 명시되어 있다.

한편 승용과 상용 차량의 타이어의 회전 속도에 따른 개발된 공기압 송·수신 장치의 성능을 확인해본 결과 개발된 시스템에서 별도의 설계 변경 없이도 승용차 타이어의 경우 800rpm(차속 기준 100km/h), 상용차 타이어의 경우 500rpm(차속기준 100km/h)의 회전속도까지는 성능저하 없이 98% 정도의 수신 성공률을 보이는 것으로 나타났다. 이와 관련된 실험결과는 본 연구보고서의 84~85 pp에 자세히 명시되어 있다.

따라서 본 연구에서 개발된 능동형 타이어 공기압 제어 시스템은 간단한 구조 변경을 거칠 경우 승용 및 상용과 군용 차량에 이르기까지 공기압 타이어를 사용하는 광범위한 차종에 대한 적용이 가능 할 것으로 예상되며, 추후 농용을 제외한 다른 차종에 개발된 시스템을 적용하기 위한 후속 연구가 뒤 따른다면 관련 기술의 파생효과 및 관련 시장의 수요 창출효과가 있을 것으로 예상된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

○ 컨티넨탈(Continental. co.)은 공기 주입형 타이어를 장착한 차량에서 타이어 공기압이 현저히 떨어질 경우 이를 경고하는 간접방식의 측정시스템 DDS(Deflation Detection System)를 약 6년 전에 출시하였으며, 최근에는 차량 전장 부품의 발달에 힘입어 원격 차량 열쇠용 안테나와 타이어 공기압 장치와 결합하는 것을 포함하여, 타이어 공기압 모니터링 시스템과 DDS, ESP(차량 자세 장치)를 통합한 제어시스템의 구축을 목표로 하고 있다

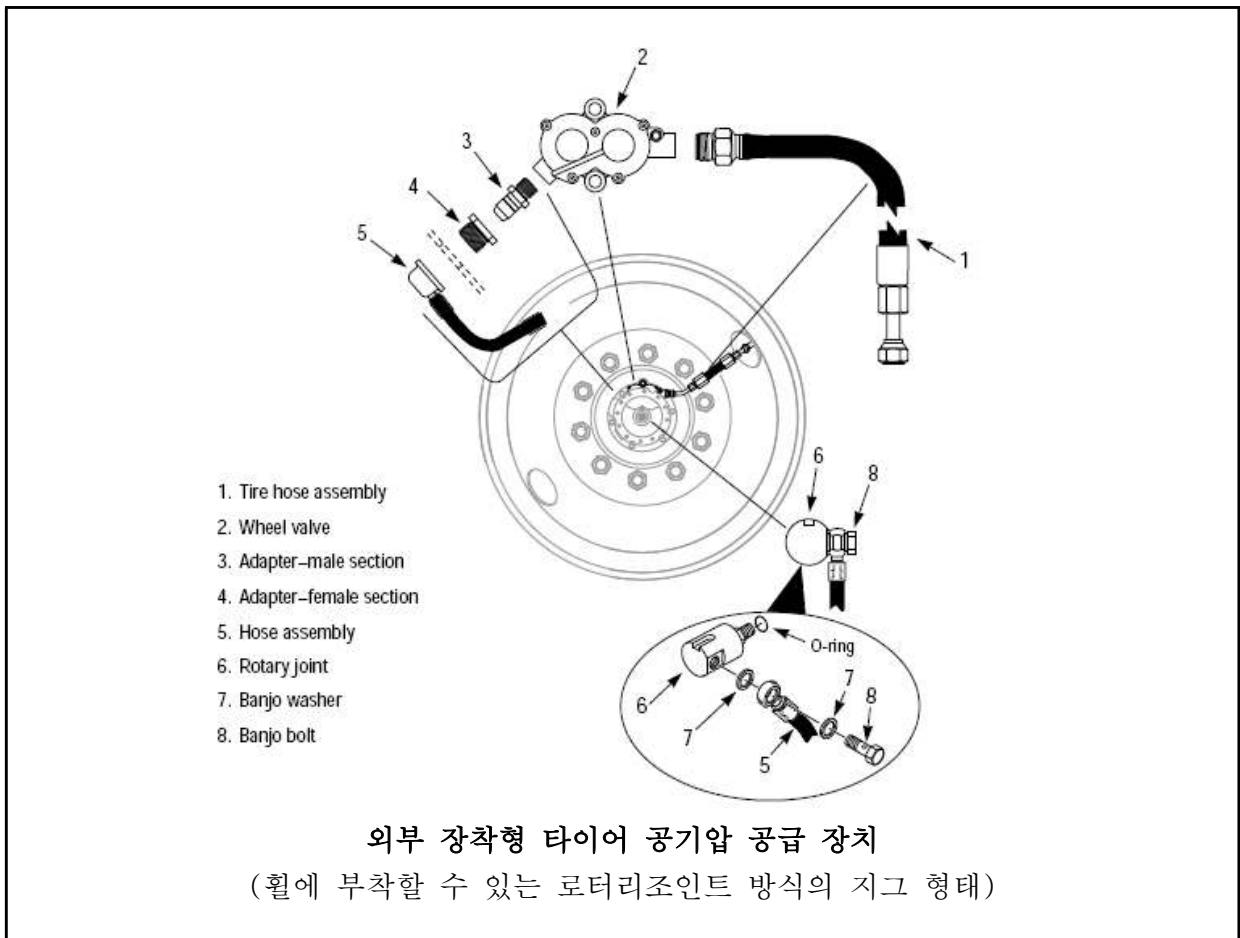
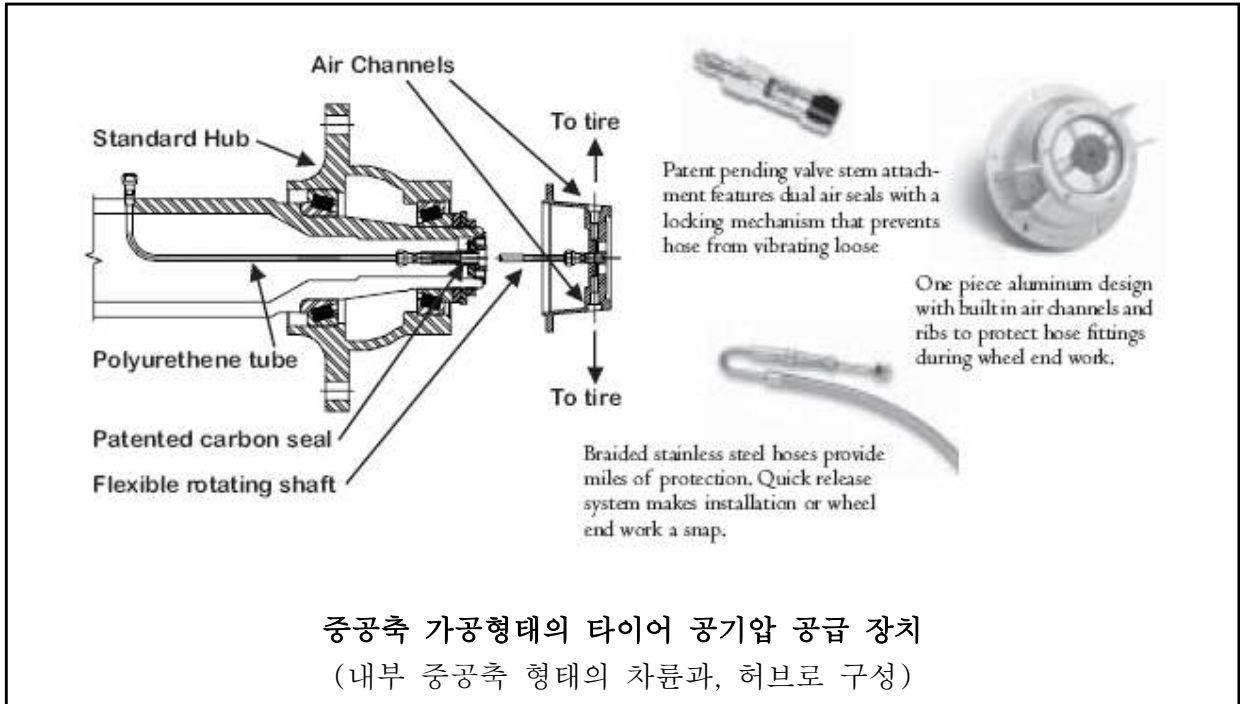
○ 베루사(Veru co.)의 TSS(Tyre Safety System)는 제어 유닛과 네 바퀴에 장착되는 전자장치들로 구성되며, 센서와 송신기 및 배터리를 하나의 유닛으로 통합하여 각각의 바퀴에 장착된 개별 유닛이 무선으로 송신하여 자동으로 타이어의 위치를 감지할 수 있도록 하여 타이어 위치 교환에 따른 센서 위치 교정의 과정이 생략된 타이어 공기압 모니터링 시스템을 개발 중이다

○ 지멘스(Siemens co.) VDO와 굿이어(Goodyear Ltd.)가 공동개발한 제2세대 시스템인 Tire IQ는 연료 소모가 증가하거나 타이어가 마모될 만큼 공기압이 낮아지면 운전자에게 이를 알리는 시스템을 개발 중임, 특히 본 연구에서 개발 한 타이어 공기압 제어 시스템의 한 부분품인 타이어 공기압 측정 및 무선 송·수신 모듈을 차량에 장착되어 있는 ECU가 통제함에 따라 각 바퀴에 장착된 송·수신장치가 필요한 정보를 보내면 ECU가 이를 처리하여 운전자가 필요로 하는 정보(타이어 공기압)를 전달하는 구조로서 앞으로의 관련 시스템의 연구 개발에 있어서 ECU와의 네트워크 구축이 필요할 것으로 예상된다

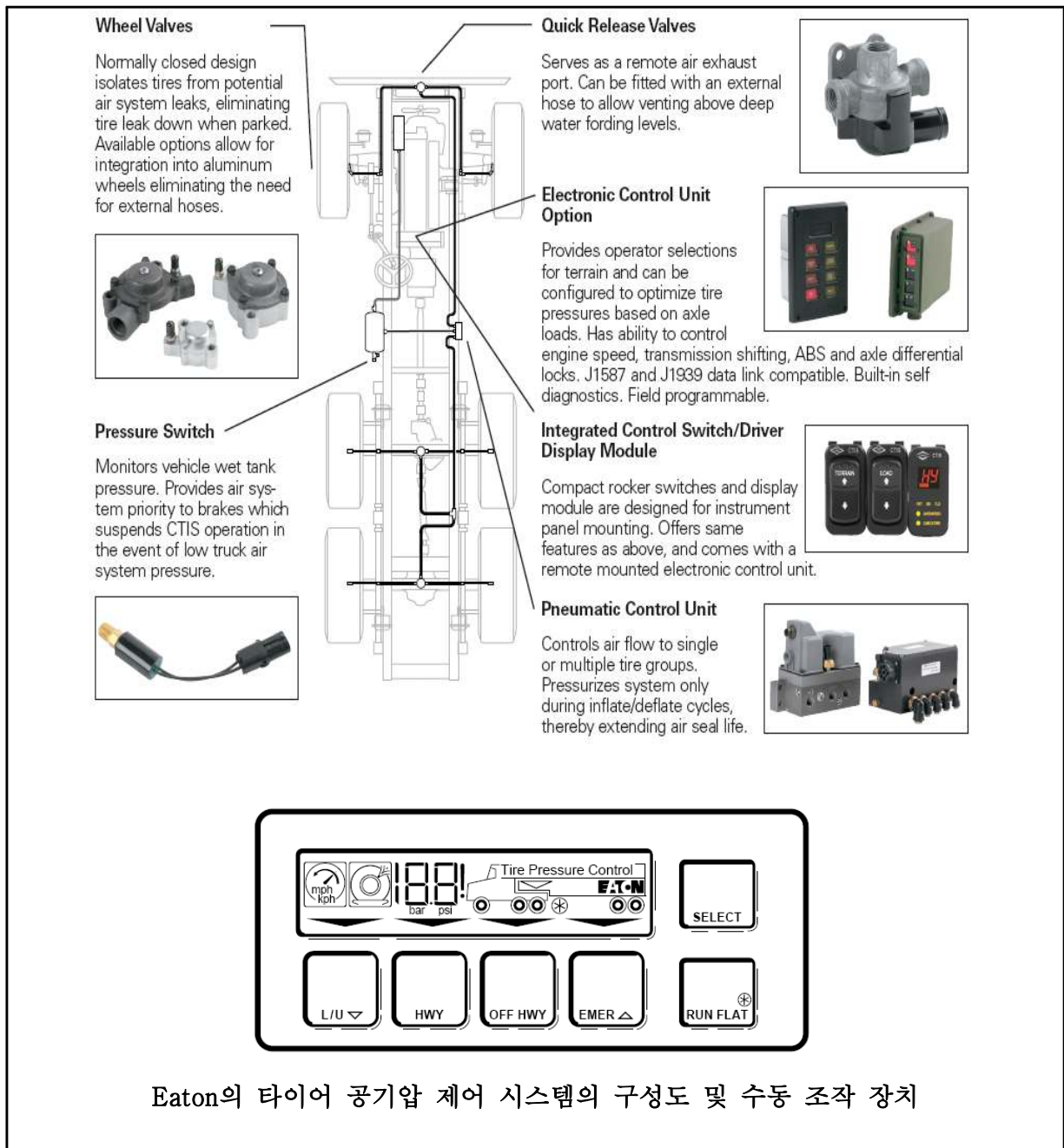
○ 한편 타이어 공기압 제어 시스템(TPCS-Tire Pressure Control System)의 경우 제어 동작 시 타이어 공기압의 원활한 공급을 위하여 타이어 공기압 공급 장치의 개발이 필요하다. 최근 해외의 관련 기술을 살펴보면 공급장치의 공급 방식은 크게 차륜을 지지하는 차축을 중공축 형태로 가공하여 공압 공급 라인을 형성하는 방법과 외부에 차륜의 회전과 상관없이 타이어에 공압을 공급해줄 수 있는 별도의 무한회전형 공기압 공급 장치를 설치하는 방법으로 구분된다.

차륜의 가공을 통한 공압 공급 라인을 형성하는 경우는 차량의 생산 단계에서부터 타이어 공기압 제어 시스템의 공압 공급 라인의 형성할 수 있는 설계가 필요하므로 완성차 생산업체와 타이어 공기압 제어 시스템의 설계가 공유되어야하며 또한 제조상의 어려움이 있다는 단점이 있다. 그러나 외부 장착형의 경우 별도의 차륜 가공 없이 시스템의 탈부착이 가능하다는 장점이 있는 것으로 나타났으나 다만 중공축 형태의 공기압 공급 장치보다 유로의 설계가 복잡해지는 단점이

있는 것으로 나타났다. 다음의 그림은 연구 과정에서 수집한 공기압 공기장치의 중공축 가공형과 외부 장착형의 대표적인 형태를 보여 주고 있다.



○ 다음의 그림은 해외의 대표적인 상용차용 타이어 공기압 제어 시스템(TPCS-Tire Pressure Control System)인 Eaton 사의 개발 모델인 AXSM-0010 로서 지금까지의 대다수의 상용차용 타이어 공기압 제어시스템과 마찬가지로 주행상황(차속)에 따라 능동적으로 공기압을 조절하는 형태가 아닌 정보 표시 장치에 표시되는 정보를 근거로 운전자의 조작에 의하여 수동으로 타이어 공기압을 제어하는 형태가 주를 이루고 있다. 보는 바와 같이 대다수의 타이어 공기압 제어 시스템은 아직까지도 조작부와 정보 표시 장치로 구성된 컨트롤러에서 운전자가 공기압을 설정하면, 지속적으로 설정 공기압을 유지하는 시스템의 채택하고 있다.



제 7 장 참고문헌

1. 류관희. 2004. 트랙터공학. 문운당.
2. 이규승. 2001. 농용 트랙터 적정 타이어 공기압에 관한 연구. 농림기술개발 연구보고서.
3. 한국표준협회. 2004. 농업 차량용 타이어 KS M 6752.
4. Park, W. Y., and K. S. Lee. 2002b. The effect of tire inflation pressure on soil compaction and tractive performance on tractor. *Journal of Biosystems Eng.* 27(6): 491–500.
5. Park, W. Y., and K. S. Lee. 2002a. The effect of dynamic load, inflation pressure and number of passes of tire on soil compaction under the tire. *Journal of Biosystems Eng.* 27(1): 1–10.
6. Yoon, J. Y. 2005. Most suitable link budget calculation device in military V/UHF communication. Unpublished MS thesis. Chungnam National University.
7. Lee, D. R., B. H. Chong, and K. U. Kim. 1998. Effect of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. *Journal of Korean Society for Agricultural Machinery* 23(1): 1–12.
8. Choi, S. W., and K. W. Kim. 1997. Survey on inflation pressure of agricultural tractor tires. *Proceeding of the KSAM 1997 summer conference* 2(2): 49–54.
9. Choi, Y. C., S. M. Kim, and Y. K. Lim. 2005. A study on the link budget for underwater acoustic communication. *Journal of Ship & Ocean Eng.* 40: 61–70.
10. Abebe, A. T., T. Tanaka, and M. Yamasaki. 1989. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic. *Journal of Terramechanics* 26(2): 139–148.
11. Adams, B. T. 2002. Central Tire Inflation for Agricultural Vehicles. Unpublished Ph.D. Dissertation. University of Illinois
12. Adams, B. T., J. F. Reit, J. W. Hummel, Q. Zhang, and R. G. Hoefl. 2004. Effect of central tire inflation systems on ride quality of agricultural vehicles. *Journal of Terramechanics* 41: 199–207.
13. Adam, K. M., and D. C. Erbach. 1993. Relationship of sinkage depth to depth of compaction. Presented at the 1993 Mid-central conference of the ASAE Paper No. MC93–128
14. ASABE. 2003. Agricultural equipment tire loading and inflation pressures. ASAE

S430.1.

15. ASAE. 2003. Agricultural machinery management data. ASAE D497.4.
16. Arvidsson, J., and S. Ribtic. 1996. Soil stress and compaction effects for four tractor tires. *Journal of Terramechanics* 33(5): 223–232.
17. Bailey, A. C., and B. C. Burt. 1993. Soil stresses state under various tire loadings. *Transaction of the ASAE* 31(3): 672–676.
18. Bailey, A. C., R. L. Raper, T. R. Way, B. C. Burt, and C. E. Johnson. 1996. Soil stresses under a tractor tire at various load and inflation pressures. *Journal of Terramechanics* 33(1): 1–11.
19. Bailey, A. C., R. L. Raper, T. R. Way, B. C. Burt, and C. E. Johnson. 1993. Soil stresses under tractor tires at various inflation pressures. *Proceedings of the 11th International conference of the ISTVS* 1: 276–285.
20. Bailey, A. C., R. L. Raper, and E. C. Burt. 1991. The effects of tire inflation pressure on soil stress states. ASAE Paper No. 91–1062.
21. Bailey, A. C., C. E. Burt, R. K. Wood, and C. E. Johnson. 1988. The effects of tire dynamic load on soil stress states. ASAE Paper No. 88–1511.
22. Brown, C., and J. Sessions. 1999. Variable tire pressures for tropical forests – a synthesis of concepts and applications. *Journal of Tropical Forest Science* 11(2): 380–400.
23. Burt, E. C., and A. C. Bailey. 1982. Load and inflation pressure effects on tires. *Transaction of the ASAE* 25(4): 881–884.
24. Lee, D. R. 1997. Effects of inflation pressure on tractive performance of bias-ply tires. Unpublished MS thesis. Seoul National University.
25. Gill, W. R., and G. B. Vanden Berg. 1967. Soil dynamics in tillage and traction. Handbook 316. Agr. res. service. U.S. Dept. Agriculture.
26. Hassan, A. E., 1983. A prime mover equipped with central tire inflation system. ASAE Paper No. 83–1055.
27. Kaczmarek, R. W. 1984. Central tire inflation enhance vehicle mobility. *Proceedings of the 8th International Conference of the ISTVS* 3: 1255–1271.
28. Kukshya, V., H. J. Song, H. P. Hsu, and R. W. Wiese. 2007. Characterizing performance of tire pressure monitoring systems using experimental measurements and system simulation. *Proceeding of IEEE Antenna and propagation international*

symposium :4112–4115.

- 29.Lancas, K. P., A. G. dos Santos Filho, and S. K. Upadhyaya. 1997. Performance of low/correct pressure radial–ply tires. ASAE Paper No. 97–1026.
- 30.Lyne, P. W. L., E. C. Burt, and J. D. Jarrell. 1983. Computer control for the national tillage machinery laboratory single wheel tester. ASAE Paper No. 83–1555.
- 31.Michelin. 2000. Michelin agricultural tire data book. The Michelin company.
- 32.Ngunjiri, G. M. N., and J. C. Siemens. 1995. Wheel traffic effects on com growth. Transactions of the ASAE 38(3): 691–699.
- 33.NHTSA. 2005. Tire pressure monitoring system – FMVSS NO. 138. U.S. Department of transportation.
- 34.Ohmiya, K., N. Noguchi, and H. Terao. 1993. Cone resistance measuring system for generating cone resistance distribution map. Journal of Terramechanics 30(3): 181–190.
- 35.Raper, R. L., A. C. Bailey, E. C. Burt, and T. R. Way. 1993a. Inflation pressure and dynamic load effects on soil deformation and soil–tire interface stresses. ASAE Paper No. 931517.
- 36.Raper, R. L., A. C. Bailey, E. C. Burt, T. R. Way, and P. Liberati. 1993b. Inflation pressure effects on soil–tire integrate stresses. Proceedings of the 10th International Conference of the ISTVS: 781–790.
- 37.Reghavan, G. S., V. E. McKyes, F. Taylor, P. Richard, and A. Watson. 1979. The relationship between machinery traffic and corn yield reduction in successive years. Transaction of the ASAE 22(4): 1256–1259.
- 38.Saybold, J. S. 2005. Introduction to RF propagation. Wiley interscience.
- 39.Soane, B. D., P. S. Blackwell, J. W. Dickson, and D. J. Painter. 1980. Compaction by agricultural vehicles: a review II. compaction under tyres and other running gear. Soil and Tillage Research 1(4): 373–400.
- 40.Song, H. J., J. S. Colburn, H. P. Hsu, and R. W. Wiese. 2006. Development of reduced order model for modeling performance of tire pressure monitoring system. Proceedings of IEEE Vehicular technology conference : 1–5.
- 41.Sümer, S. K., and A. Sabanci. 2005. Effects of tire configurations on tractor performance. Turkey Journal of Agric. For. 29: 461–468.
- 42.Voorhees W. B. 2000. Interaction of axle load, soil water regime, and soil texture on

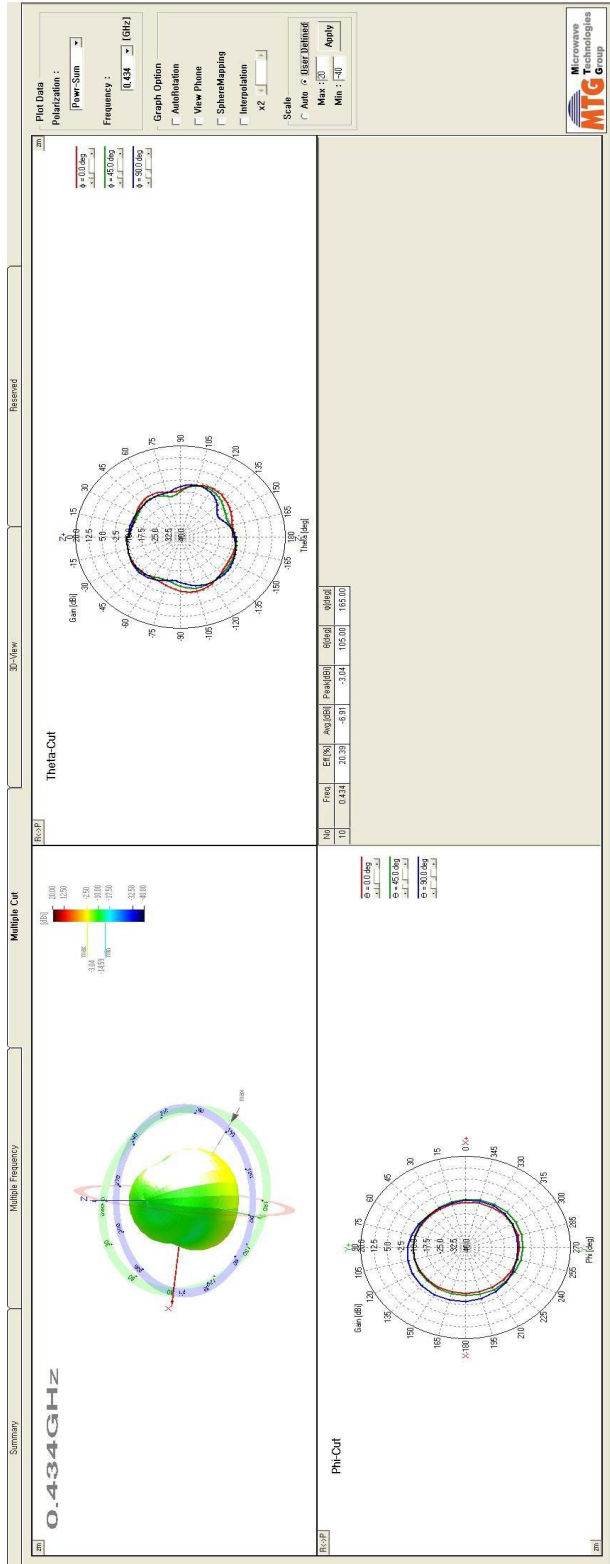
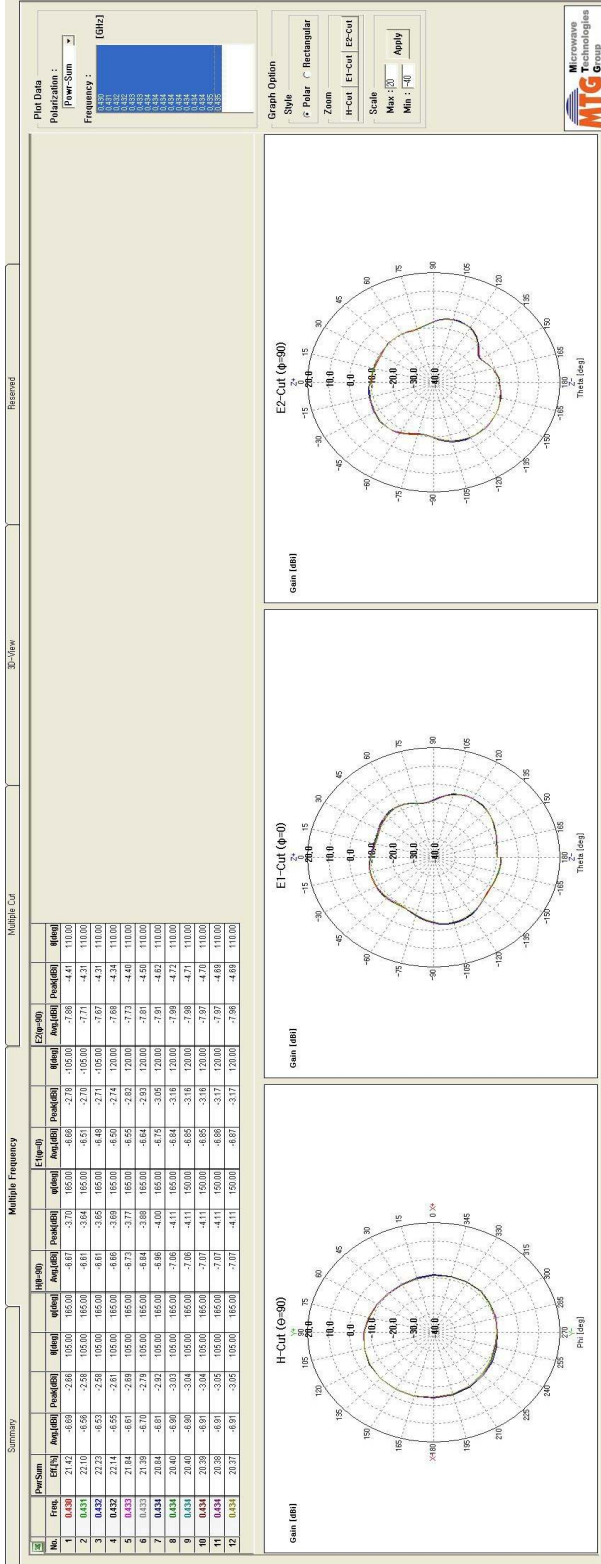
long-term compaction and crop yields in North America. Proceedings of the 4th International conference on Soil Dynamics.

43.Voorhees, W. B. 1990. Yield effects of compaction – Are they significant? ASAE No. 90-1076.

44.Way, T. R., C. E. Johnson, A. C. Bailey, R. L. Raper, and E. C. Burt. 1996. Soil stresses state orientation beneath a tire at various load and inflation pressures. Journal of Terramechanics 33(4): 185-194.

45.Zoz, F. M., and R. J. Turner. 1994. Effect of correct pressure on tractive efficiency of radial-ply tires. ASAE Paper No. 94-1051.

부록 A. 안테나 이득 측정 결과



부록 B. 무한회전형 공기압 공급장치 지그 상세 도면

