

GOVP1200204727

최	종
연구보고서	

농용트랙터의 적정 타이어공기압에 관한 연구

Effect of Tire Inflation Pressure on the
Performance of Agricultural Tractor

연구기관
성균관대학교

농림부



제 출 문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 “농용트랙터의 적정 타이어공기압에 관한 연구” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2001. 12. 27.

주관연구기관명 : 성균관대학교

생명공학부

총괄연구책임자 : 이 규 승

연 구 원 : 이 대 원

박 원 엽

오 만 수

요 약 문

I. 제목

농용트랙터의 적정 타이어공기압에 관한 연구

II. 연구개발의 목적 및 중요성

1. 연구개발의 목적

본 연구의 목적은 타이어공기압이 농용트랙터의 성능 및 토양다짐에 미치는 영향을 구명함으로써 타이어공기압의 조절을 통해 트랙터의 성능향상과 토양다짐을 줄일 수 있는 방안을 제시하고, 연약지에서의 기동성 및 작업성을 향상시킬 수 있는 최첨단 기술인 CTI시스템(Automatic Central Tire Inflation Pressure System)을 농용트랙터에 적용하기 위한 자료를 제시하기 위해 수행되었다.

2. 연구개발의 중요성

트랙터는 서구에서 개발되어 그 지역의 특성에 맞게 발전되어 왔으며 서구의 전작중심의 농업에서는 큰 문제없이 효율적으로 사용되어져 왔다. 그러나 수도작이 전체 농업에서 큰 비중을 차지하고 있는 우리나라의 농업은 기계사용 측면에서 서구의 농업과는 근본적인 차이점이 있다. 전체 논면적

중 9.1%를 차지하는 저습답 연약지에서는 점점 대형화되어 가는 트랙터를 효율적으로 사용하기에 많은 문제점이 있다. 그 중에서도 대표적인 문제점은 저습답 연약지에서의 기동성 또는 작업가능성의 문제와 전작지 및 목장 지역에서의 토양다짐 현상이다. 기동성 문제는 작업자체를 불가능하게 하거나 작업효율을 현저히 감소시키며 토양다짐 현상은 불투수층을 형성하고 뿌리의 성장저하를 초래함으로써 농산물의 생산량을 감소시킨다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 운전석에 설치된 제어판(control panel)을 통해 지면의 상태에 따라 타이어의 공기압을 조절하여 연약지에서 토양다짐의 감소와 기동성을 향상시킬 수 있는 최첨단 기술인 CTI시스템(Automatic Central Tire Inflation Pressure System)의 이용이 필요하다. 그러나 국내의 농용 트랙터에 이러한 CTI시스템을 도입하기 위해서는 먼저 트랙터가 운용되고 있는 토양조건에서 타이어공기압이 트랙터의 성능과 토양다짐에 미치는 영향을 구명하는 연구가 선행되어야 한다. 즉, 트랙터가 운용되고 있는 다양한 토양조건에서 타이어공기압의 변화가 트랙터의 성능에 미치는 영향을 구명함으로써 타이어공기압의 조절을 통해 트랙터의 성능을 최대로 활용하거나 최적 성능을 발휘할 수 있는 적정 공기압을 설정할 수 있고, 또한 작물의 생산량에도 영향을 미치는 토양다짐 현상을 구명할 수 있다. 따라서 농용트랙터의 기동성과 작업성능을 향상시킬 수 있는 CTI시스템의 적용과 작물의 생산량에 영향을 미치는 토양의 다짐현상을 구명하기 위해서는 타이어공기압의 변화에 따른 성능 특성과 토양다짐에 관한 연구가 필요하다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용 및 범위
1차년도	타이어 공기압과 성능에 관한 문헌 및 자료수집	<ul style="list-style-type: none"> · 타이어 공기압과 성능에 관한 문헌 조사 · 농업용 차량의 운용 실태 조사
	인공토조시스템에서 타이어 공기압에 따른 타이어의 성능 실험 및 분석	<ul style="list-style-type: none"> · 타이어공기압에 따른 타이어 성능 평가를 위한 인공토조시스템용 실험 장치 제작 · 인공토조시스템에서 타이어 공기압에 따른 타이어의 성능 실험 및 분석
	토양조건과 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 성능 평가를 위한 성능 측정 장치 제작	<ul style="list-style-type: none"> · 농용트랙터의 공기압 조건에 따른 슬립, 견인력, 운동저항 등의 측정을 위한 트랙터의 성능 측정 시스템 제작
	토양조건과 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 성능 실험 및 분석	<ul style="list-style-type: none"> · 토양조건과 트랙터의 공기압 변화에 따른 농용트랙터의 성능 실험 및 분석 · 전작지등에서 공기압에 따른 트랙터의 토양다짐 현상 및 적정 공기압 분석

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

1. 연구결과

가. 농용트랙터의 운용 실태 조사

농촌지역에서 사용되고 있는 트랙터를 대상으로 트랙터의 공기압 유지실태와 공기압의 중요성에 대한 농민들의 인식을 조사하였다. 조사지역은 경기도와 충청남북도를 주요 대상으로 하였으며, 농촌 현장에서 실제 작업중인 트랙터와 농가에 정차되어 있는 트랙터를 대상으로 조사하였다.

타이어공기압의 조사결과는 대부분의 경우가 적정 공기압보다 높게 나타났다. 좌·우 타이어간에도 공기압의 차가 크게 나타났다. 공기압의 중요성에 대한 농민들의 인식은 대부분의 농민들이 공기압에 대해 무관심하였고, 공기압이 트랙터의 성능에 미치는 영향에 대해서도 이해하지 못하였다. 따라서 타이어의 공기압이 트랙터의 성능에 미치는 효과에 관한 보다 구체적인 연구가 필요할뿐 아니라 공기압의 중요성에 대한 농민들의 교육이 필요한 것으로 조사되었다.

나. 인공토조시스템에서 토양상태와 공기압에 따른 타이어의 성능 분석

노면상태와 타이어의 공기압에 따른 타이어의 성능을 조사하기 위해 인공토조시스템에서 단일 타이어 구동시스템을 이용하여 타이어의 성능 특성을 실험적으로 구명하였다. 공기압에 따른 타이어의 성능 분석은 피구동륜과 구동륜 상태에 대해 각각 수행하였으며 연구 결과는 다음과 같다.

1) 피구동륜의 운동저항은 모든 공기압에 대해서 노면의 강도가 연약할수록 크게 나타났다. 한편, 공기압에 따른 피구동륜의 운동저항은 비도로의 경우에는 공기압이 증가할수록 운동저항도 함께 증가하였으나, 도로 조건에

서는 비도로 조건과는 반대로 공기압의 증가가 운동저항을 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 공기압의 조절을 통해 타이어의 성능을 향상시키기 위해서는 비도로에서는 공기압을 작게, 그리고 도로에서는 공기압을 크게 하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

2) 구동륜의 견인성능은 토양상태와 타이어의 공기압에 크게 영향을 받으며 타이어의 공기압 감소는 구동륜의 운동저항은 감소시키고 견인력과 견인효율은 증대시키는 것으로 나타났고, 그 경향은 토양이 연약할수록 큰 것으로 나타났다. 따라서 구동륜의 견인성능은 공기압의 조절을 통해 향상시킬 수 있고, 공기압의 조절을 통한 구동륜의 성능 향상 효과는 연약지에서 더욱 큰 것으로 판단되었다.

다. 인공토조시스템에서 토양상태와 타이어공기압에 따른 토양다짐 분석

타이어에 의한 토양다짐 현상을 구명하기 위하여 토양다짐에 가장 크게 영향을 미치는 인자로 보고되고 있는 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 변화가 타이어의 접지압 및 토양속 응력분포, 그리고 타이어 아래에서의 토양변형 및 밀도의 변화에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 세 경우 모두 타이어의 접지압과 토양속 응력값을 증가시키는 것으로 나타났고, 토양속으로 깊이 내려갈수록 응력값의 크기가 감소하였다.

2) 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 모두 토양변형과 밀도를 증가시키며 토양 깊이별 토양변형량 및 밀도의 변화량은 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 들어갈수록 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 타이어에 의한 토양다짐은 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 감소를 통해 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

라. 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 견인성능 분석

타이어공기압에 따른 농용트랙터의 견인성능 분석 결과, 타이어공기압의 감소는 트랙터의 운동저항은 감소시키고, 견인력과 견인효율은 증대시키는 것으로 나타났다. 따라서 연약지에서 운용되는 농용트랙터는 공기압의 조절을 통해(최소 허용 공기압까지 타이어공기압의 감소를 통해) 견인성능과 작업성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

마. 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 토양다짐

트랙터의 타이어공기압과 통과횟수의 증가는 토양다짐을 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 토양다짐을 줄이기 위해서는 트랙터가 최초 1회 주행했을 경우에 토양다짐 효과가 가장 크게 나타나므로 트랙터가 통과한 궤적상을 연속해서 통과할 수 있도록 작업 계획을 세우면 전체 경작 면적에 대한 토양다짐을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 타이어의 공기압을 최소 허용 공기압 수준까지 감소시킬 경우 토양다짐을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 활용에 관한 건의

본 연구에서는 타이어의 공기압이 농용트랙터의 성능과 토양다짐에 미치는 효과를 실험적으로 구명하였다. 그 결과 트랙터의 성능은 타이어공기압의 변화에 따라 크게 영향을 미치고, 공기압이 성능에 미치는 효과는 토양상태에 따라 다른 효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 공기압에 따른 토양다짐 효과의 결과도 공기압의 증가는 토양다짐을 증가시키고, 이러한 경향은 토양상태에 따라 그 효과가 다른 것으로 나타났다.

따라서 본 연구의 결과로부터 농용트랙터는 타이어공기압의 조절을 통해 트랙터의 작업성능의 향상과 토양다짐의 최소화를 이룰 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 목적을 달성하기 위해서는 향후 운전석에 설치된 제어판을 통해 지면의 상태에 따라 타이어의 공기압을 운전자가 쉽게 조절하여 연약지에서 토양다짐의 감소와 기동성을 향상시킬 수 있는 최첨단 기술인 CTI시스템을 농용트랙터에 적용하는 연구가 필요한 것으로 판단되며 본 연구의 결과는 CTI 시스템의 적정 설계에 효율적으로 사용될 수 있을 것이다.

SUMMARY

The aim of this study is to investigate experimentally the effects of tire inflation pressure on the performance of agricultural tractor and soil compaction.

First of all, a survey was conducted to investigate the actual level of inflation pressure for agricultural tractor tires and the cognition of farmers on the importance of tractor tire inflation pressure. This survey was carried out in the Kyonggi, Choongbuk and Choongnam province mainly during field operation of tractors from May to July 2001. Actual level of tire inflation pressure were a little higher compared with the recommended pressure. There were some differences for the tire inflation pressure between the right and left tires. Many of the farmers did not have any concept for optimum tire inflation pressure and did not recognize that the tire inflation pressure affect the performance of tractor. Thus it is necessary to investigate the optimum tire inflation pressure in accordance with the soil conditions and recommend this results to the farmers.

Using the single tire test carriage a series of soil bin experiment was carried out to investigate experimentally 1) the effects of tire inflation pressure on the performance of driving and driven tire 2) the effects of vertical load, inflation pressure and multiple tire passes on the soil compaction. On the basis of soil bin experiment results, field tests were performed to investigate the effects of tire

inflation pressure on the performance of agricultural tractor and soil compaction for the real field conditions.

As the strength of soil surface decreased, the motion resistance of driven wheel increased for all levels of tire inflation pressure tested. For the off-road condition, as the tire inflation of driven wheel increased, the motion resistance increased also, but for the on road condition, augmentation of tire inflation pressure diminished motion resistance. Thus in order to improve the tire performance by the control of inflation pressure, it is desirable to reduce the tire inflation pressure for the off-road condition, but augmentation is needed for on-road condition.

Diminishment in tire inflation decreased the motion resistance of driving wheel and increased tractive force and efficiency, and the trend was getting bigger as the soil was getting softer. From above results it is concluded that it is possible to improve the performance of driving wheel by control the inflation pressure.

Augmentation in dynamic load, inflation pressure and number of passes increased not only the contact pressure of tire and stresses in subsurface soil but also soil deformation and density. As the soil depth increased, soil stress, contact pressure, soil deformation and density decreased. Thus the diminishment in dynamic load, inflation pressure and number of passes would bring about the reduction of soil compaction. From the results of field experiment, it was found that decrease in tire inflation pressure diminished the motion resistance of tractor but augmented the tractive force and efficiency of tractor.

So the tractive and working performance could be improved by the reduction of tire inflation pressure. Increase in inflation pressure and number passes brought about the augmentation in soil compaction. First pass of tractor give rise to greater soil compaction and soil compaction decreased gradually as the number of passes increased. For the reduction of soil compaction it is recommended that tractor should follow the first pass of tractor from the second passes and diminish the tire inflation pressure.

CONTENTS

Chapter 1	Introduction	16
Section 1	Background	16
Section 2	Objectives	18
Chapter 2	Riview of Literature and Survey on Tractor Use	19
Section 1	Literature Riview on Tire Inflation Pressure and Tractor Performance	19
Section 2	Survey on the Tractor Use in relation to Tire Inflation Pressure	24
Chapter 3	Effects of Tire Inflation Pressure on Tire Performance .	25
Section 1	Motion Characteristics of Driven Wheel in accordance with Soil Conditions and Tire Inflation Pressure	25
Section 2	Tractive Performance of Driving Wheel in accordance with Soil Conditions and Tire Inflation Pressure	54
Chapter 4	Effects of Tire Inflation Pressure on Soil Compaction	85
Section 1	Effects of Tire Inflation Pressure on Soil Stress Distribution and Tire Contact Pressure	87
Section 2	Effects of Tire Inflation Pressure on Soil Compaction and Deformation	102

Chapter 5	Effects of Tire Inflation Pressure on Soil Compaction and Tractive Performance of Tractor	126
Section 1	Effects of Tire Inflation Pressure on Tractive Performance of Tractor	126
Section 2	Effects of Tire Inflation Pressure on Soil Compaction	142
Chapter 6	Conclusions	154
References	157

목 차

제 1 장 서 론	16
제 1 절 연구배경	16
제 2 절 연구목적	18
제 2 장 타이어 공기압과 성능에 관한 문헌 및 자료수집	19
제 1 절 타이어 공기압과 성능에 관한 문헌 조사	19
제 2 절 타이어 공기압과 관련된 농용트랙터의 운용 실태 조사	24
제 3 장 인공토조에서 타이어공기압에 따른 타이어의 성능	25
제 1 절 토양상태와 타이어공기압에 따른 피구동륜의 운동특성	25
제 2 절 토양상태와 타이어공기압에 따른 구동륜의 견인성능	54
제 4 장 인공토조에서 타이어공기압에 따른 토양다짐	85
제 1 절 타이어공기압에 따른 타이어접지압과 토양속 응력분포	87
제 2 절 타이어공기압에 따른 토양변형과 토양다짐	102
제 5 장 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 견인성능과 토양 다짐	126
제 1 절 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 견인성능	126
제 2 절 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 토양다짐	142

제 6 장 결론 154

참 고 문 헌 157

제 1 장 서 론

제1절 연구배경

트랙터는 서구에서 개발되어 그 지역의 특성에 맞게 발전되어 왔으며 서구의 전작중심의 농업에서는 큰 문제없이 효율적으로 사용되어져 왔다. 그러나 수도작이 전체 농업에서 큰 비중을 차지하고 있는 우리 나라의 농업은 기계사용 측면에서 서구의 농업과는 근본적인 차이점이 있다. 전체 논면적 중 9.1%를 차지하는 저습담 연약지에서는 점점 대형화되어 가는 트랙터를 효율적으로 사용하기에는 많은 문제점이 있다. 그 중에서도 대표적인 문제점은 저습담 연약지에서의 기동성 또는 작업가능성의 문제와 전작지 및 목장지역에서의 토양다짐 현상이다. 기동성문제는 작업자체를 불가능하게 하거나 작업효율을 현저히 감소시키며 토양다짐 현상은 불투수층을 형성하고 뿌리의 성장저하를 초래함으로써 농산물의 생산량을 감소시킨다.

이와 같이 트랙터는 연약지 등에서 주로 운용되기 때문에 트랙터는 엔진출력이 충분하더라도 타이어-토양간의 접지면에서 발생하는 토양의 침하 및 파괴현상에 의해 차량의 주행 및 견인작업에 필요한 충분한 구동력을 발휘할 수 없는 경우가 많다. 즉, 트랙터의 성능은 엔진 및 전동라인의 특성뿐만 아니라 트랙터가 운용되고 있는 토양상태와 주행부의 특성 즉, 타이어-토양 접지면에서의 상호작용에 의한 타이어의 성능에 크게 영향을 받는다.

타이어의 성능에 영향을 미치는 주요 인자로서는 타이어의 형태(직경, 폭, 러그), 타이어에 작용하는 동하중, 타이어의 공기압 등이 보고되고 있다. 그러나 이들 인자 중 타이어의 형태(치수)는 트랙터의 설계단계에서 결정되는 인자이기 때문에 트랙터의 효과적인 운용 측면에서 활용할 수 있

는 인자는 타이어에 작용하는 동하중과 타이어의 공기압이다. 따라서 농민들의 관점에서 트랙터를 효과적으로 운용하기 위해서는 동하중과 공기압의 적절한 선택이 필수적이다. 한편, 동하중의 증가는 견인력을 증대시키는 효과는 있지만, 상대적으로 운동저항도 함께 증가시키기 때문에 효율면에서는 비경제적이다. 따라서 트랙터의 견인력뿐만 아니라 효율측면에서도 높은 성능을 발휘하기 위해서는 트랙터가 운용되는 토양상태에 따라 타이어의 공기압을 적정으로 유지하는 것이 필요하다.

이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 연약지에서 기동성을 향상시킬 수 있는 최첨단적인 기술로 부각되고 있는 CTI시스템(Automatic Central Tire Inflation Pressure System)을 농용트랙터에 이용해야 한다. CTI시스템이란 타이어의 공기압을 운전석에서 설정하고 지반의 상태에 따라 적정 공기압을 제어할 수 있는 시스템으로서 농경지, 산림지역, 간척지 등의 습지, 산악지형, 雪上, 砂地, 일반도로 등 다양한 지면상태에서 타이어의 공기압을 조절함으로써 충분한 기동성을 확보할 수 있도록 하는 장치이다. CTI시스템의 조작은 운전석에 설치된 제어판(control panel)을 통해 지면의 상태에 따라 타이어의 공기압을 원하는 수준으로 설정할 수 있어 모든 비포장도로용 차량에 적용될 수 있다. 그러나 국내의 농용트랙터에 이러한 CTI시스템을 도입하기 위해서는 먼저 농용 트랙터가 운용되고 있는 다양한 토양조건에서 타이어공기압이 트랙터의 성능에 미치는 영향을 구명하는 연구가 선행되어야 한다. 즉, 트랙터가 운용되고 있는 다양한 토양조건에서 타이어 공기압의 변화가 트랙터의 성능에 미치는 영향을 구명함으로써 타이어공기압의 조절을 통해 트랙터의 성능을 최대로 활용하거나 최적 성능을 발휘할 수 있는 적정 공기압을 설정할 수 있고, 또한 작물의 생산량에도 영향을 미치는 토양 다짐의 현상을 구명할 수 있다. 따라서 농용트랙터에 기동성과 작업성능 향상시킬 수 있는 CTI시스템의 적용과 작물의 생산량에 영향을

미치는 토양의 다짐현상을 구명하기 위해서는 타이어공기압의 변화에 따른 성능특성과 토양다짐에 관한 연구가 필요하다.

제2절 연구목적

본 연구의 목적은 타이어공기압이 농용트랙터의 성능 및 토양다짐에 미치는 영향을 구명함으로써 타이어공기압의 조절을 통해 트랙터의 성능향상과 토양다짐을 줄일 수 있는 방안을 제시하고, 연약지에서의 기동성 및 작업성을 향상시킬 수 있는 최첨단 기술인 CTI시스템(Automatic Central Tire Inflation Pressure System)을 농용 트랙터에 적용하기 위한 자료를 제시하기 위해 수행되었다.

제 2 장 타이어공기압과 성능에 관한 문헌 및 자료 수집

제1절 타이어 공기압과 성능에 관한 문헌 조사

1. 타이어 공기압과 성능에 관한 문헌 조사

트랙터 등과 같이 주로 연약지에서 작업을 수행하는 차량은 견인성능이 가장 중요하며, 견인성능을 나타내는 척도로서는 일반적으로 슬립에 따른 견인계수, 운동저항계수, 견인효율 등이 사용되고 있다. 이러한 견인성능은 차량의 설계변수뿐만 아니라 차량이 운용되고 있는 토양조건 즉, 타이어와 토양간의 상호작용 특성에 크게 영향을 받는다. 따라서 토양조건과 타이어 특성이 타이어의 성능에 미치는 영향을 구명하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다.

타이어의 공기압과 성능에 관한 주요 연구 결과로서, Taborek(1975)은 다양한 토양상태에서 공기압이 타이어의 구름저항계수(rolling resistance coefficient)에 미치는 영향에 관한 실험적 조사로부터 단단한 토양에서는 타이어의 공기압이 높을수록 구름저항계수가 감소하지만 연약한 토양조건에서는 공기압이 증가함에 따라 구름저항계수가 증가한다고 보고하였다. 또한 Burt(1982) 등은 각각 10%와 20%의 일정 슬립에 대해 타이어의 공기압을 각각 22kPa, 55kPa, 83kPa, 110kPa로 고정시키고 동하중(dynamic load)을 0부터 40kN까지 증가시켜 총견인력(gross traction)에 미치는 공기압과 동하중의 효과를 조사하였고, 그 결과 동일한 슬립값에서 공기압이 낮을수록 그리고 동하중이 증가할수록 총견인력이 증가한다고 보고하였다. 한편 Lyne

등은 차륜의 하중과 공기압, 엔진조작법 등의 적절한 조작을 통해 연료소비율은 감소시키고 견인효율을 증가시킬 수 있다고 보고하였고, 이로부터 하중과 토양조건에 따라 타이어의 공기압을 자동적으로 조절해 주는 타이어공기압 자동제어시스템(Central Tire Inflation System:CTI)의 개발이 필요하다고 보고하였다.

타이어의 성능에 영향을 미치는 주요 인자로서는 타이어의 형태(직경, 폭, 러그), 타이어에 작용하는 동하중, 타이어의 공기압 등이 보고되고 있다. 그러나 이들 인자 중 타이어의 형태는 타이어의 설계단계에서 결정되는 항목이기 때문에 차량의 효과적인 운용 측면에서 활용할 수 있는 인자는 타이어에 작용하는 동하중과 타이어의 공기압이다. 따라서 농민들의 관점에서 트랙터를 효과적으로 운용하기 위해서는 동하중과 공기압의 적절한 선택이 필수적이다. 한편, 동하중의 증가는 견인력을 증대시키는 효과는 있지만, 상대적으로 운동저항계수도 함께 증가시키기 때문에 효율면에서는 비효율적이다. 따라서 트랙터의 견인력뿐만 아니라 효율측면에서도 높은 성능을 발휘하기 위해서는 트랙터가 운용되는 토양조건에 따라 타이어의 공기압을 적정으로 유지하는 것이 필수적인 것으로 판단된다.

2. 타이어 공기압과 토양다짐에 관한 문헌 조사

토양다짐은 트랙터 등과 같은 농기계에 의해 주로 나타난다. 특히 현대에는 대형 농기계의 사용으로 인해 과도한 토양다짐을 초래하는 경우가 많다. 과도한 토양다짐은 토양밀도의 증가를 가져오고, 이에 따라 토양의 공극율이 작아져 토양중의 산소공급이 감소하게 된다. 또한, 물의 투과특성과 보수특성을 변화시켜 물이 토양 속으로 스며드는 것을 저지하게 되어 물은 토양 위로 흘러 토양의 침식을 증가시킨다. 또한 토양다짐은 토양저항

력을 증가시켜 뿌리성장을 방해하고 이로 말미암아 작물 수확량의 감소를 초래한다(Gill and Vanden Berg, 1967). Raghavan 등(1979)은 기계류의 사용에 따른 토양다짐과 곡물의 생산량과의 관계에 관한 연구에서 토양다짐은 곡물의 수확량을 30~50%까지 감소시킨다고 보고하였다.

토양다짐에 대한 연구는 미국과 유럽 등지에서 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 기계의 성능과 효율에 대한 연구에 비하여 매우 저조한 실정이다. 그러나 국내에서도 농기계의 사용이 증가하고, 또한 그 크기가 점차 대형화되고 있기 때문에 이에 따른 토양다짐의 특성에 관한 지속적인 연구가 필요하다.

토양다짐은 트랙터 등과 같은 대형 농기계의 주행장치 즉, 타이어에 작용하는 동하중이 주요 원인이고, 또한 타이어의 공기압과 통과횟수 등도 토양다짐에 크게 영향을 미친다(Abebe 등, 1989).

동하중과 타이어의 공기압은 토양 위에서 움직이는 타이어의 주행에 중요한 인자이다(Soane 등, 1980 ; Burt 등, 1982). 이것은 또한 타이어가 주행할 때 나타나는 접지압 및 토양 응력의 크기에 동하중과 타이어의 공기압이 중요한 영향을 미친다는 것을 나타낸다. Bailey(1988,1991,1996) 등도 토양응력과 밀도의 크기는 타이어에 미치는 동하중과 공기압이 증가할수록 더욱 크게 나타난다고 하였다. 이 연구에서 Bailey(1991,1996) 등은 2개의 응력 측정기(SST, Stress State Transducer)를 사용하여 동하중과 타이어 공기압의 변화에 따른 타이어 아래에서의 응력 변화를 조사하였고, 이에 따른 토양밀도 등을 측정하였다. 그는 타이어의 공기압을 일정하게 한 상태에서 타이어에 작용하는 하중을 증가시켰을 때 토양응력과 토양밀도는 증가한다고 하였다. 한편, 타이어에 가해지는 하중을 일정하게 하고 타이어의 공기압을 증가시켰을 때 토양 속의 응력과 토양밀도는 증가하고 순 견인력과 견인효율을 감소한다고 보고하였다.

Way(1996) 등은 트랙터타이어의 단면비(Aspect Ratio)가 토양 표면에 침하에 미치는 영향을 조사하고, 타이어의 트레드(tread) 위치에 따른 토양 응력의 크기를 SST를 사용하여 실험하였다. 그는 단면비가 다른 두 종류의 타이어를 이용하여 타이어의 공기압과 동하중을 변화시켜가며 실험하였다. 그 결과 토양 속의 응력과 토양 표면의 침하는 타이어에 가해지는 동하중이 증가함에 따라 커지며, 타이어의 공기압이 증가하였을 때도 커진다고 하였다. 또한 타이어의 중심부와 가장자리의 비교에서 토양 응력은 타이어의 중심부보다 가장자리에서 현저히 작게 나타난다고 하였다.

Ohmiya(1995)는 타이어의 공기압이 토양다짐에 미치는 영향을 조사하기 위하여 인공토조(soil-bin)에서 타이어가 지나간 위치에 따라 원추관입저항 분포를 연구하였다. 타이어의 공기압을 120kPa에서 40kPa까지 감소시켰을 때, 토양과의 접촉면적은 80%까지 증가하였으며, 원추관입저항은 감소한다고 보고하였다.

Arvidsson(1996) 등은 토양표면에서의 응력과 토양다짐의 주요한 원인을 타이어의 공기압으로 판단하여 4개의 타이어를 이용하여 공기압의 변화에 따른 응력과 토양다짐을 연구하였다. 그는 타이어공기압의 증가는 일반적으로 응력과 토양다짐의 증가를 초래하지만, 타이어의 형식과 형태도 토양 응력에 대하여 영향을 미친다고 보고하였다. 예를 들어 650/60-38 바이어스(bias-ply) 타이어는 레이디얼(radial) 타이어보다 같은 공기압과 하중에서 더 높은 응력을 가지며 이것은 상대적으로 강도가 높은 타이어의 카캐스에 의한 것이라고 보고하였다.

Adam(1995) 등은 타이어의 침하가 증가할수록 토양다짐은 증가하지만 그 영향은 비선형적임을 실험적으로 구명하였다. 또한 그는 토양다짐과 타이어의 침하를 지수함수의 관계로 나타내었다.

Raper(1993) 등은 레이디얼 타이어의 공기압과 동하중이 토양다짐에

미치는 영향을 실험적으로 구명하였다. 여기서 그는 타이어의 공기압이 40kPa까지 감소할수록 타이어와 지면의 접촉 면적이 증가하고 토양다짐은 감소하며, 동하중이 증가할수록 토양다짐은 증가한다고 하였다.

Block(1994) 등은 강차륜(rigid wheel)의 중심과 가장자리의 토양속 응력분포를 실험하였으며, 슬립의 효과도 분석하였다. 차륜의 중심부에서 응력이 가장자리에 비하여 현저히 높게 나타났으며, 토양이 깊어질수록 차륜 아래의 응력은 감소한다고 하였다.

한편, 토양은 압력을 받으면 압축하려는 경향이 있다. 토양 압축에 의한 주요 현상은 압축되는 토양으로부터 공기와 물, 즉 이동되는 유체의 부분적 방출로 인하여 토양의 공극이 감소하게 된다. 이로 인하여 토양의 밀도는 증가한다. 지금까지의 많은 연구에도 불구하고 토양다짐을 나타내기 위하여 표준화되어진 방법은 없지만, 토양밀도는 토양다짐을 평가하는데 있어서 가장 빈번하게 사용되어지는 변수중의 하나이다.

이상의 연구 결과로부터 토양다짐에 대한 연구는 타이어 아래 토양 표면 및 토양속 응력상태와 토양의 변형 및 토양밀도를 정확하게 결정하는 것에서 비롯된다. 따라서 트랙터에 의한 토양다짐 효과를 구명하기 위해서는 타이어와 토양의 접촉압력 및 타이어 아래 토양속의 응력 분포와 타이어 아래에서의 토양변형 및 밀도 변화에 관한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

제2절 타이어공기압과 관련된 농용트랙터의 운용 실태 조사

본 절에서는 농촌지역에서 사용되고 있는 트랙터를 대상으로 보유 트랙터의 마력 수 및 공기압 유지실태, 그리고 공기압에 대한 농민들의 인식을 조사하였다. 조사지역은 경기도와 충청남북도를 주요 대상으로 하였으며, 농촌 현장에서 실제 작업중인 트랙터와 농가에 정차되어 있는 트랙터를 대상으로 조사하였다. 보유 트랙터의 마력수의 범위는 19~85마력 이었으며, 마력수별 분포현황은 30마력 이하가 14.6%, 31~40마력 17.1%, 41~50마력 36.6%, 51~60마력 21.9%, 60마력 이상이 9.8%로서 41~50마력의 트랙터가 가장 많았다. 한편, 일반적으로 농민들은 50마력 전·후의 트랙터를 가장 선호하는 것으로 나타났다.

공기압에 대한 농민들의 인식의 조사 결과, 대부분의 농민들이 공기압에 대해 무관심하였고, 공기압이 트랙터의 성능에 미치는 영향에 대해서도 이해하지 못하였다. 따라서 정기적으로 공기압을 조정하는 경우는 거의 없었고, 심지어 작업 전에도 공기압을 조정하는 경우는 거의 없고, 단지 트랙터를 수리할 때나 타이어 펑크시에만 공기압을 조정하는 경우가 대부분이었다. 한편, 현장에서 작업중인 트랙터에 대한 타이어공기압의 조사결과는 대부분의 경우가 적정 공기압보다 높게 나타났으며, 특히 좌·우 타이어간에 공기압의 차가 크게 나타났다. 좌·우 타이어에 대한 공기압의 차는 대부분의 경우가 10% 이상이었고, 100%이상 차이가 나는 경우도 조사되었다.

위의 조사 결과로부터 공기압의 중요성에 대한 농민들의 교육이 필요한 것으로 판단되고, 또한 타이어의 공기압이 트랙터의 성능에 미치는 영향에 대한 보다 구체적인 연구가 필요한 것으로 판단되었다.

제 3 장 인공토조에서 타이어공기압에 따른 타이어의 성능

제1절 토양상태와 타이어공기압에 따른 피구동륜의 운동 특성

승용차 등과 같이 도로(on-road) 또는 단단한 노면에서 운용되고 있는 도로차량(on-road vehicle)의 성능은 일반적으로 엔진과 변속장치 및 최종 구동축(final axle)까지의 동력전달 과정을 포함하는 전동라인(power train)의 특성에 크게 영향을 받는다. 따라서 도로차량의 성능을 향상시키기 위한 연구는 주로 엔진, 변속기 등을 포함한 전동라인의 효율을 높이거나 최종 구동축에서의 출력 토크를 최대로 발휘할 수 있는 방향으로 진행되고 있다. 그러나 농업기계, 건설중장비 등과 같이 비도로(off-road) 또는 연약지(soft terrain)에서 주행뿐만 아니라 견인작업을 목적으로 운용되는 비도로차량(off-road vehicle)은 차량의 엔진출력이 충분한 경우에도 타이어-토양(tire-soil)의 접지면에서 발생하는 토양의 침하 및 파괴현상에 의해 차량의 주행에 필요한 충분한 추진력을 발생시킬 수 없는 경우가 많고, 높은 추진력을 발휘할 수 있는 경우에도 주행부(타이어)의 침하에 따른 운동저항(motion resistance)의 증가로 인해 주행 및 작업시 많은 동력이 소요되어 경우에 따라서는 견인작업은 물론 차량 자체가 주행불능의 상태에 이르게 된다. 따라서 비도로 특히 연약지에서 주로 운용되고 있는 농용트랙터의 주행 및 견인성능을 향상시키기 위해서는 타이어에 의한 토양추진력의 향상뿐만 아니라 운동저항을 최소화할 수 있는 연구가 필요하다.

타이어의 운동저항은 타이어의 형태(직경, 폭, 공기압 등)에 의해 영향을 받으며, 직경과 폭이 동일한 타이어를 사용할 경우에는 타이어의 공기압에 영향을 받는다. 그러나 공기압이 타이어의 운동저항에 미치는 효과는 타이어가 운용되고 있는 노면상태 즉, 도로와 비도로 조건에 대해 각각 다른 경향을 나타낸다.

타이어가 단단한 지면에서 운용될 때 타이어의 운동저항은 타이어-지면간의 상호작용에 의한 타이어의 변형에 따른 회전저항(rolling resistance)의 변화에 의해 나타나는데 이러한 타이어의 변형은 타이어의 공기압에 주로 영향을 받는다. 그러나 연약지에서 주로 운용되는 트랙터의 운동저항은 타이어의 축에 작용하는 수직하중에 의한 타이어의 침하가 주 원인으로서 침하의 증가는 일반적으로 운동저항의 증가를 초래하게 된다. 이러한 타이어의 침하는 타이어가 운용되고 있는 노면상태(ground condition)와 타이어 공기압, 그리고 타이어-토양간의 상호작용에 의한 타이어의 변형량 등에 영향을 받는다. 또한, 타이어의 변형 및 노면상태는 타이어의 회전반경(rolling radius)의 변화를 초래하여 타이어의 운동특성에 영향을 미치게 된다. 따라서 다양한 노면상태에서 운용되는 타이어의 운동특성을 구명하기 위해서는 노면상태와 타이어공기압의 변화에 따른 타이어의 침하, 변형량, 회전반경 및 운동저항 관계의 구명이 선행되어야 한다. 그러나 연약지에서 운용되는 차량의 운동저항값은 구동륜(driving wheel)상태가 아닌 피구동륜(towed wheel)상태에서의 운동저항값이 사용하고 있다. 이것은 타이어의 구동시 발생하는 슬립은 타이어의 침하를 증가시켜 운동저항의 증가를 초래하게 되지만 현재까지 제안된 방법으로는 슬립에 따른 운동저항값의 정확한 측정이 어렵기 때문이다. 즉, 정확한 슬립-운동저항 관계는 정확한 슬립-견인력관계와 슬립-추진력관계의 측정 자료로부터 얻을 수 있으나, 현재의 연구 결과는 슬립-견인력 관계만을 측정할 수 있을 뿐 정확한 슬립-추

인력 관계를 측정하기 위한 방법은 아직까지 명확하게 제시되고 있지 않다. 따라서 현재 비도로차량의 성능 평가를 위해 사용되고 있는 운동저항은 특정 토양 조건에 대해 피구동 상태의 차량을 견인할 때 측정되는 값이 일반적으로 사용되고 있다.

한편, 피구동륜에 대해 수행된 기존의 연구도 주로 특정 토양조건에서 타이어의 공기압에 따른 운동저항 관계만이 제시되었을 뿐, 타이어의 운동특성에 영향을 미치는 타이어의 침하, 변형량, 회전반경 등에 관한 연구결과는 거의 수행되지 않고 있다. 따라서 다양한 노면상태에서 운용되는 피구동륜 운동특성을 보다 정확하게 구명하기 위해서는 다양한 노면상태와 타이어공기압의 변화에 따른 운동저항 관계뿐만 아니라 피구동륜의 침하, 변형량, 회전반경의 관계를 구명하기 위한 연구가 필요하다.

따라서 본 절에서는 비도로 특히 연약지에서 피구동륜의 운동특성을 구명하기 위하여 노면상태와 타이어공기압에 따른 피구동륜의 침하량, 변형량, 회전반경 및 운동저항 관계를 실험적으로 조사, 분석하였다.

1. 실험 장치

가. 인공토조시스템

타이어와 토양간의 상호작용을 정확히 분석하고 평가하기 위해서는 측정 장치로부터 정확하고 신뢰성 있는 데이터를 얻을 필요성이 있다. 그러나 일반 포장에서의 실험은 같은 지역 내에서도 토양의 상태가 불균일하고 원하는 토양상태로의 조절이 불가능하다. 또한 토양조건을 동일한 상태로 유지할 수 없으므로 동일 실험의 재현이 불가능하고, 날씨 등 외부 조건에 의해 많은 영향을 받으므로 신뢰성 있는 데이터를 얻기가 힘들다. 따라서 이러한 야외포장 실험의 문제점을 보완하기 위하여 본 연구에서는 인공토조시스템(soil bin system)에서 실험을 수행하였다.

인공토조 시스템은 크게 4 가지 즉, 토조 및 레일 시스템, 대차구동시스템, 실험대차, 토양가공대차 등으로 구성되어 있다.

토조는 길이 12m, 폭 1m, 높이 0.7m, 벽두께 0.2m의 철근 콘크리트 구조물로 되어 있으며, 토조 상부에는 실험대차의 이동을 위하여 150×75×5.5×9.5mm의 I-형강 레일이 설치되어 있다. 또한 토양가공대차와 측정대차가 레일 위를 주행할 때 발생하는 진동 및 충격을 최대한으로 줄이기 위하여 두께 0.5 cm의 평벨트가 레일과 콘크리트 토조 사이에 설치되어 있다. 그림 3-1은 토조 및 레일시스템을 보여주고 있다.

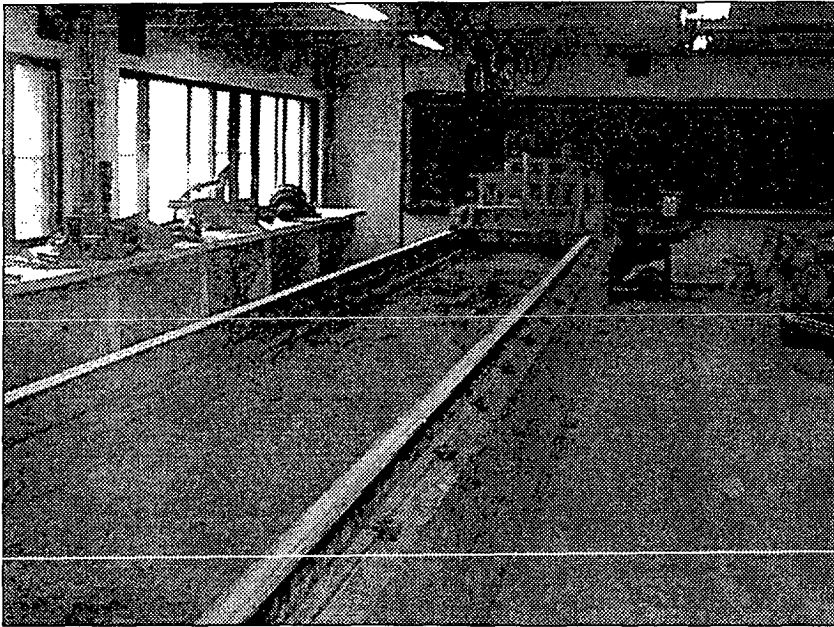


Fig. 3-1 View of soil bin and rail system.

실험에 사용된 토조내의 토양은 미농무성법(USDA) 분류로 사질양토(sandy loam)로서 표 3-1에 실험에 사용된 실험토양의 조성 및 분류를 나타내었다.

Table 3-1 Experimental soil properties by USDA classification

Composition			Texture
Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	
53.5	37.1	9.4	Sandy loam

대차구동시스템은 대차를 이동시키는 장치로서 윈치시스템(Winch System)을 이용하였다. 윈치 시스템에 사용된 윈치 드럼은 직경 35cm로서 철판으로 제작되어 있으며, 구동 모터는 10HP으로서 경운기 변속장치를 이용하여 대차의 속도를 0.08~0.77m/s범위 내에서 조정할 수 있다. 한편 대차구동시스템의 변속은 전진 6단과 후진 2단계인 총 8변속 단계로 구성되었다.

실험대차는 베이스 프레임, 측정 프레임, 차륜 프레임의 3개 주요 부분으로 구성되어 있다. 베이스 프레임은 레일 위에 지지되어 있으며 케이블에 의해 앞·뒤로 이동하는 프레임이다. 이 프레임은 주로 H형강으로 제작되었으며, 모두 12개의 철판 바퀴가 이 프레임을 지지하고 있다. 이 베이스 프레임 위에는 실험차륜의 구동을 위한 유압시스템이 장착되어 있다. 실험대차는 케이블에 의해 견인되어 폭 30cm, 직경 90cm의 바퀴까지 실험할 수 있도록 제작되었다. 측정 프레임에는 연직방향으로 연마봉이 지지되어 있으며 부착된 베어링이 토양상태와 차륜에 걸리는 하중에 따라 상·하로 자유롭게 운동할 수 있도록 되어 있다. 한편, 차륜 프레임은 타이어를 부착하는 프레임으로서 측정프레임에 부착되어 유압모터와 체인 전동방식에 의

해 타이어에 동력을 전달할 수 있도록 구성되었다. 또한 무게 추(weight balance)에 의해 타이어에 작용하는 축하중을 조절할 수 있도록 구성되었다.

토양가공대차는 토양의 물리적 상태가 실험 목적에 적합하도록 실험과 실험 사이에 토양을 가공하는 대차로서 깊이 25cm까지의 로타리작업에 의해 토양층을 파괴시킬 수 있는 로타리틸러가 부착되어 있고, 표면 다짐 작업을 하는 장치로 표면다짐롤러, 표층의 밀도를 조절하는 장치로 표층다짐롤러와 로타리작업 후 불균일한 표면을 균평하게 하는 장치로 균평기가 설치되어 있다. 또한 토양의 수분 함량을 조절하는 장치로 살수기가 포함되어 있다. 그림 3-2는 토양가공대차의 모습을 보여주고 있다.

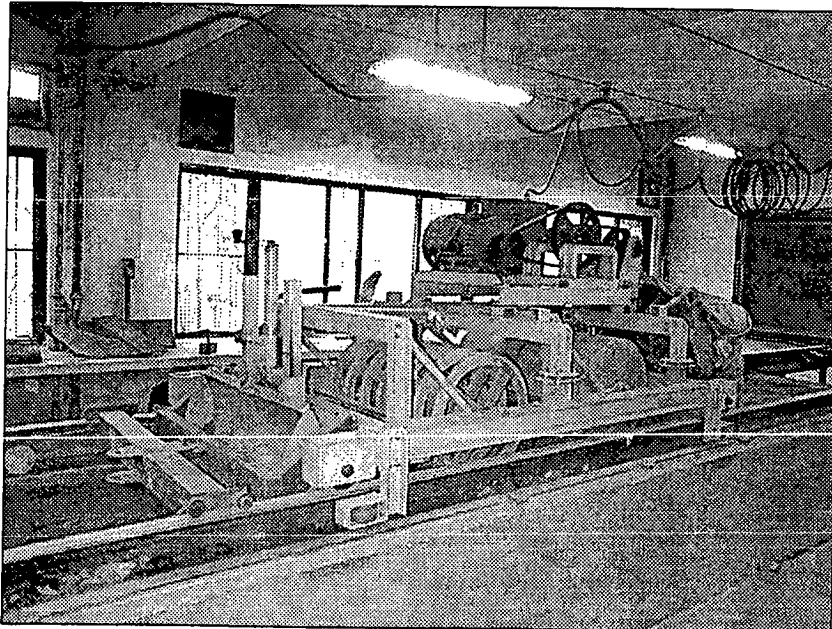


Fig. 3-2 View of soil processing carriage.

나. 실험 타이어

실험에 사용된 타이어는 국내 H사에서 생산되는 6.00 R14 LT인 타이어로서 이 타이어는 외경과 단면폭이 각각 678mm와 152mm이고 허용 최대 공기압과 최대하중은 각각 447.85kPa과 7.36kN이다. 실험타이어는 인공토조시스템의 측정대차에 장착된 차륜프레임에 부착되고, 타이어가 장착된 차륜프레임은 웜기어와 선형베어링에 의해 상·하 및 좌·우 방향으로 자유롭게 이동할 수 있도록 구성되었다.

다. 피구동륜의 이론주행거리 측정 장치

피구동륜의 이론주행거리를 측정하기 위해 피구동륜의 축에 로타리엔코더를 부착하였다(그림 3-3). 로타리엔코더는 피구동륜의 축과 로타리엔코더와의 회전편심에 의한 손상을 방지하기 위하여 피구동축을 가공한 후 flexible coupling을 통해 연결하였다. 로타리엔코더는 축이 1회전할 때마다 1000개의 펄스를 출력하는 일본 NEMICON사의 OEW-10-2M을 사용하였다.

라. 피구동륜의 실제 주행거리 측정 장치

피구동륜의 실제 주행거리는 측정대차의 후부에 5륜(fifth wheel)을 장착한 후 5륜의 주행거리로부터 측정하였다. 5륜은 피구동륜의 이론 주행거리 측정장치와 같은 방법으로 5륜의 축에 flexible coupling을 이용하여 로타리엔코더를 부착하였고, 로타리엔코더는 5륜의 축이 1회전 할 때마다 1024개의 펄스를 출력하는 NEMICON사의 OEW-1024-2M을 사용하였다. 그림 3-4는 실제 주행거리의 측정을 위해 제작한 5륜의 모습을 보여주고 있다.

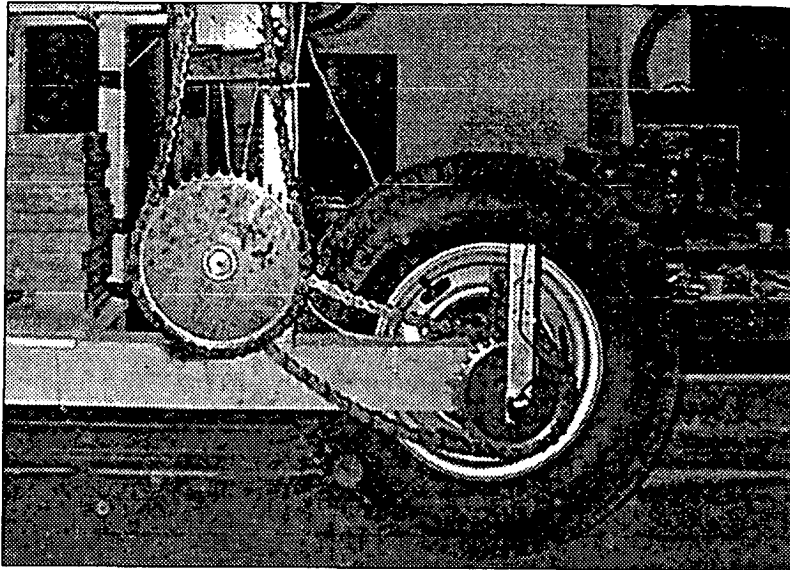


Fig. 3-3 Device for measuring the theoretical travel distance.

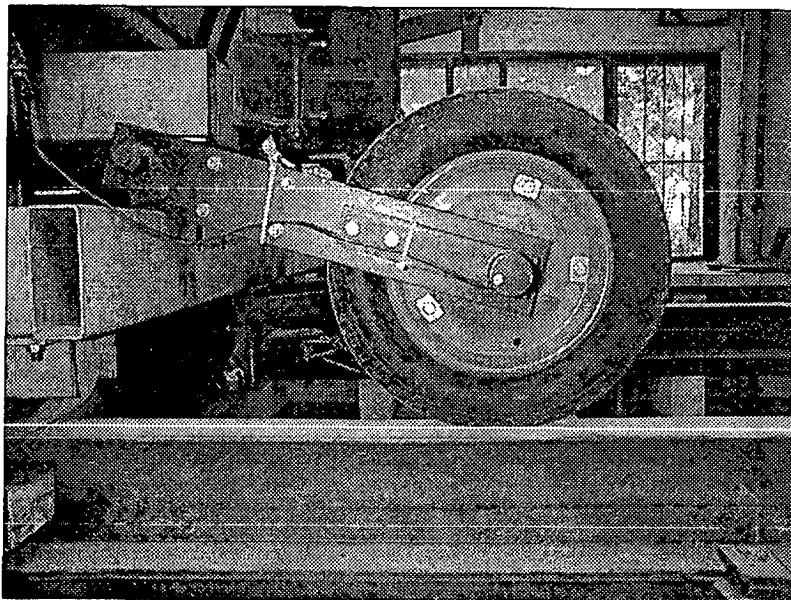


Fig. 3-4 5th wheel for measuring the real travel distance.

마. 축 침하 측정장치

피구동륜의 축침하량은 측정대차 프레임에 랙기어(rack gear)를 장착하고, 측정대차에 부착되어 좌·우 및 상하로 자유롭게 이동할 수 있는 차륜 프레임에 로타리엔코더를 부착하여 로타리엔코더의 펄스신호로부터 측정하였다. 그림 3-5은 피구동륜의 축침하량을 측정하기 위해 구성한 측정장치를 보여주고 있다.

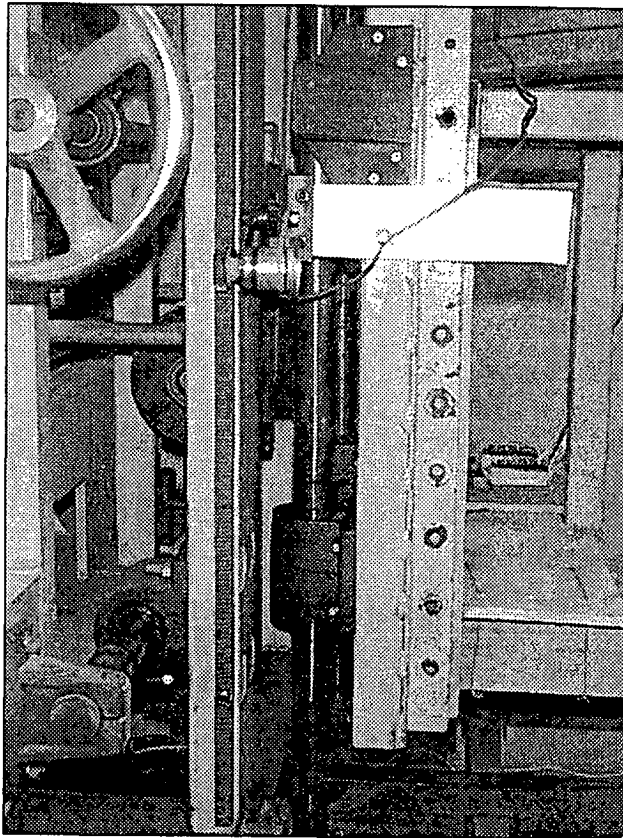


Fig. 3-5 View of system for measuring sinkage of tire axle.

바. 피구동륜 운동저항 측정장치

피구동륜의 운동저항 측정장치는 강선(wire rope)과 하중변환기(loadcell)을 이용하여 구성하였다. 즉, 측정대차와 가공대차 사이에 강선을 연결한 후 그 사이에 CAS(주)에서 제작한 1ton 용량의 하중변환기(SBA-1T)를 부착하여 하중변환기의 인장력을 측정할 수 있도록 하였다. 그림 3-6은 피구동륜의 운동저항을 측정하기 위해 구성한 장치의 모습을 보여주고 있다.

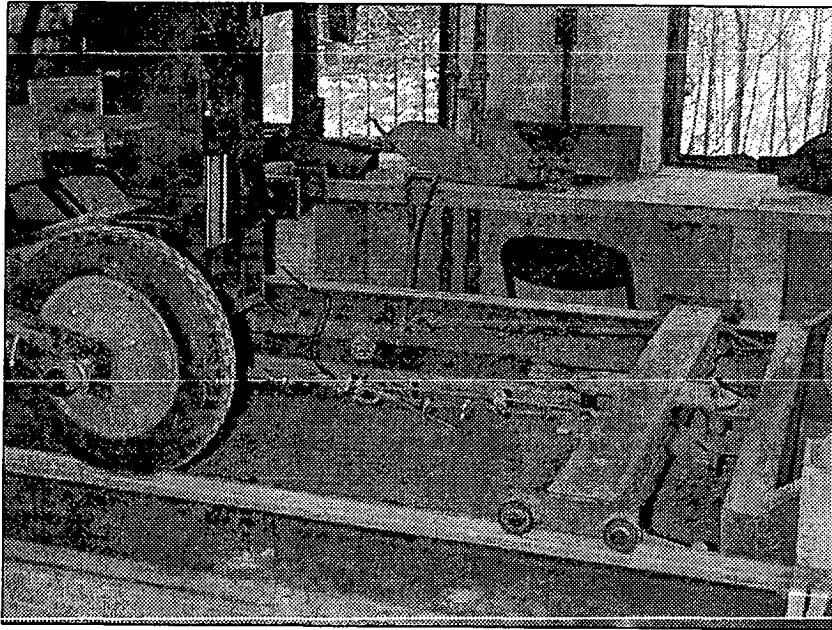


Fig. 3-6 View of wire rope and loadcell.

사. 데이터 수집 장치

피구동륜의 운동특성을 측정하기 위해 구성된 각각의 센서로부터 출력되는 신호를 원하는 정보로 획득하기 위해서는 센서에 따라 다른 인터페이스를 통해 컴퓨터로 입력되어야 한다.

운동저항을 측정하기 위한 하중변환기에서의 출력신호는 μV 단위의 아주 작은 아날로그 형태의 전위차이기 때문에 스트레인 증폭기(strain amplifier)를 통하여 증폭시킨 후 A/D 변환기를 통해 0~5V 범위로 증폭시켰다. A/D 변환기는 12비트의 분해능과 16채널의 멀티플렉서를 내장한 여의자동화사의 AX5412를 사용하였다.

피구동륜의 이론속도와 실제속도, 그리고 축침하의 측정을 위해 사용된 로타리엔코더의 각변위에 따른 펄스신호는 16비트의 분해능과 4채널의 multi-mode counter를 내장하고 있는 여의자동화사의 카운터보드(YS-7400)를 이용하였다.

한편, 데이터 수집장치를 통해 획득된 피구동륜의 운동특성에 관한 모든 측정 결과는 퍼스널 컴퓨터에 파일로 저장되고, 동시에 모든 측정 결과(운동저항, 축침하, 이론속도, 실제속도 등)가 실시간으로 모니터상에 그래픽으로 출력되도록 구성하였다. 그림 3-7은 피구동륜의 운동특성 실험시 실제 측정 결과를 실시간으로 모니터상에 그래픽으로 출력하는 모습을 보여주고 있다. 한편, 본 실험에 사용된 데이터 수집장치의 주요 장치 및 센서들에 대한 제원은 표 3-2와 같고, 그림 3-8에 데이터 수집장치의 전체 흐름도를 나타내었다.

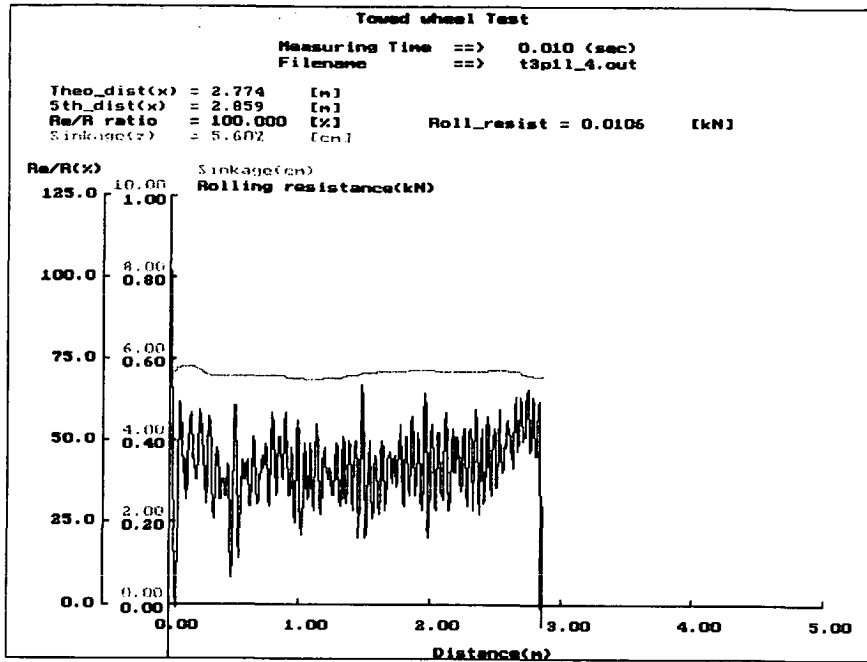


Fig. 3-7 View of real time output on monitor.

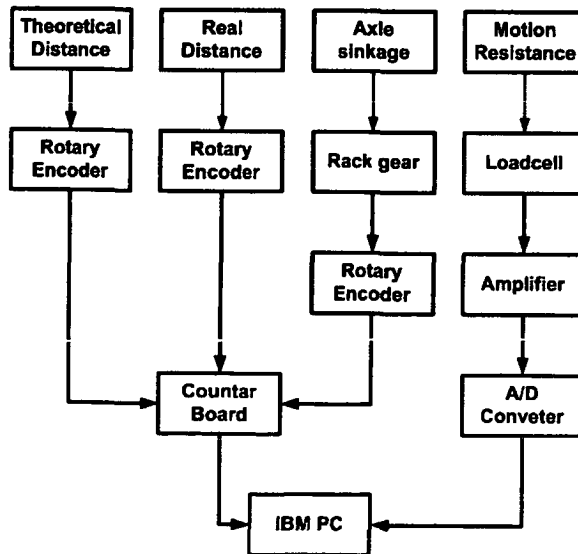


Fig. 3-8 Block diagram of data acquisition system.

Table 3-2 Specifications of devices used for traction test

ITEM (measurement parameters)	Model/Manufacture	Specification
Loadcell (motion resistance)	SBA-1T/ CAS, KOREA	tension & compression maximum capacity : 1000kg output : 3mV/V
Rotary Encoder (theoretical speed)	OEW-1024-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1024 pulse/rev.
Rotary Encoder (real speed)	OEW-10-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1000 pulse/rev.
Rotary Encoder (axle sinkage)	OEW-1024-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1024 pulse/rev.
Data Acquisition Board	AX-5412 / AXIOM Technology, Taiwan	Resolution : 12 bit A/D ch. : 16S.E./8DI. Sampling rate : 90kHz
Counter Board	YS 7400 / Yoi-Auto-System, Korea	Resolution : 24 bit Counter ch. : 4 Max. counting fre. : 1kHz
Strain Amplifier	DPM-711B / KYOWA, Japan	Channel : 3 Gain : 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100×100 με Output-V : ±5V into 5kΩ

2. 실험방법

본 실험에서는 노면상태와 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 운동 특성을 조사하기 위해 인공토조시스템의 토양가공대차를 이용하여 실험토양을 가공방법에 따라 다짐정도가 다른 세 가지 노면상태(soil-I, soil-II, soil-III)로 가공하였다. 또한 비도로에 대한 도로(on-road)조건에서의 상대적인 운동특성을 비교하기 위해 합판을 이용하여 도로조건의 노면상태를 구현하여 총 4 수준의 노면상태(soil-I, soil-II, soil-III, on-road)에서 타이어의 공기압이 각각 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa인 4 수준의 공기압 조건을 이용하여 노면상태와 타이어의 공기압 변화에 따른 피구동륜의 운동 특성을 측정하였다.

가. 노면가공

비도로 노면의 가공은 토양가공대차의 로타리틸러, 균평기, 표면다짐롤러를 이용하여 노면을 다짐정도가 다른 세 종류의 노면상태(soil-I, soil-II, soil-III)로 가공하였으며 매 실험마다 동일한 노면상태를 만들기 위해 그 횟수와 순서를 일정하게 유지하였다. 또한 앞의 세 가지 노면상태외에 도로 조건의 노면상태를 추가로 만들었다.

토양-I (Soil-I)은 2회의 로타리작업으로 토양을 완전히 파쇄한 후 균평기로 균평작업을 1회 실시하였고, 토양-II (Soil-II)와 토양-III (Soil-III)은 로타리작업과 균평작업은 토양-I과 동일하게 수행한 후 표면다짐롤러 작업을 각각 2회와 4회 실시하여 토양-I에 비해 상대적으로 노면의 강도를 높게 가공하였다. 한편, 도로(on-road) 상태는 토양-I ~ 토양-III의 경우와 마찬가지로 로타리작업과 균평작업을 동일하게 수행한 후 표면다짐롤러로 롤러작업을 10회이상 충분히 실시하여 충분한 다짐작업을 수행한 후 그 위에 합판을 올려놓아 피구동륜의 통과시 노면의 침하가 발생하지 않도록 하

였다(그림 3-9). 표 3-3에 각각의 노면상태에 따른 노면가공방법을 나타내었다.

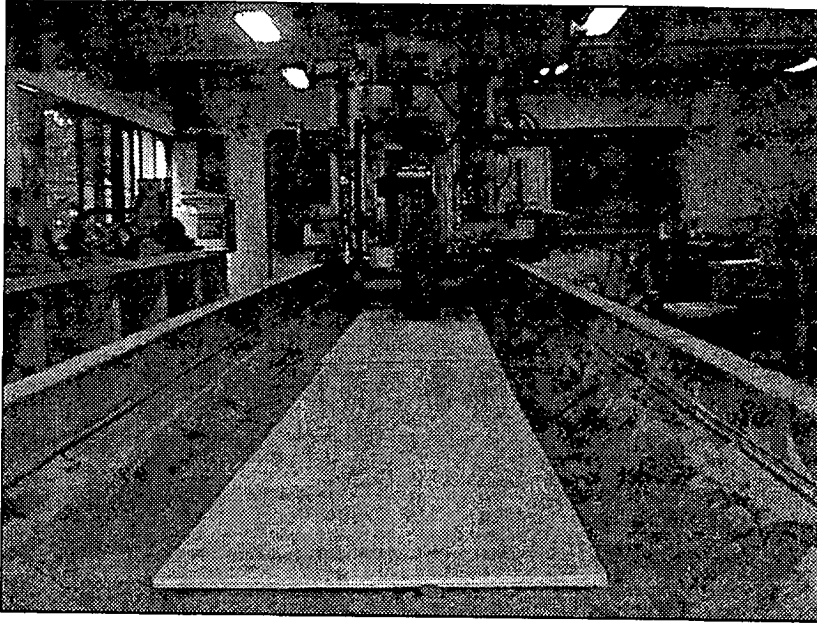


Fig. 3-9 View of on-road condition.

Table 3-3 Ground Processing Method

Ground type	Processing method			
	Rotary	Grader	Surface roller	-
Soil-I	2	1	-	-
Soil-II	2	1	2	-
Soil-III	2	1	4	-
On road	2	2	over 10	wood plate

나. 실험토양의 물리성 측정

실험토양의 물리성은 토양 가공이 끝난 후 피구동륜의 운동특성 실험을 수행하기 직전에 토양의 겉보기 밀도(bulk density), 점착력(cohesion), 내부마찰각(internal friction angle), 원추지수(cone index) 등을 측정하였다. 겉보기 밀도는 100cc 용량의 토양 채취관을 이용하여 인공 토조내의 임의의 5곳에서 토양 샘플을 채취하여 구하였고, 토양의 점착력, 내부마찰각, 원추지수는 SR-2형 토양 경도측정기를 사용하여 토조내의 임의의 5곳을 선정하여 측정하였다. 한편 원추지수는 0-15cm사이의 토양 깊이에서 5cm 간격으로 측정한 후 평균값을 이용하였다. 표 3-4에 4 가지 노면상태에서 측정한 토양의 물리적 특성을 나타내었다.

Table 3-4 Physical properties of experimental ground

Ground types Parameters	Soil-I	Soil-II	Soil-III	On road
Cone Index(CI), kPa	136	422	663	—
Cohesion, kPa	3.15	9.87	11.04	—
Internal friction angle(ϕ), degree	30.05	33.75	35.35	—
Bulk density(ρ), g/cm	1.45	1.52	1.55	—

다. 피구동륜의 운동특성 측정

피구동륜의 운동특성을 구명하기 위하여 전술한 4 가지 노면상태(토양-I, 토양-II, 토양-III, 도로) 각각에 대해서 타이어의 공기압을 각각 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa인 4 수준으로 변화시켜 노면상태와 타이어 공기압의 변화에 따른 피구동륜의 변형량, 침하, 회전반경 및 운동저항을

측정하였다. 한편, 피구동륜에 작용하는 축하중과 피구동륜을 당기는 속도 (pulling velocity)는 각각 2.45kN과 0.08m/s로 일정하게 유지하였다. 표 3-5에 본 실험에서 사용한 각 변수들의 범위를 나타내었다.

Table 3-5 Experimental conditions

Ground conditions	Soil- I (soft)
	Soil- II (hard)
	Soil- III (very hard)
	On road (no sinkage)
Inflation pressure	80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa
Axle load	2.45kN
velocity	0.10 m/sec

노면 상태와 타이어공기압에 따른 피구동륜의 변형량, 침하, 회전반경 및 운동저항의 측정방법은 다음과 같다.

1) 피구동륜의 침하 측정

피구동륜의 침하는 타이어가 지나간 궤적을 30cm 자를 이용하여 측정하였다. 한편, 침하는 타이어 궤적상의 임의의 5 곳에서 측정한 후 평균값을 이용하였다.

2) 피구동륜의 변형량 측정

피구동륜의 변형량(tire deformation)은 축침하 측정장치로부터 피구동륜의 축침하를 측정한 후 축침하량과 피구동륜 침하량의 차로써 결정하였다.

3) 피구동륜의 회전반경 측정

피구동륜의 회전반경(rolling radius)은 피구동륜 1 회전(로타리엔코더 1000 pulse)당 이동거리를 측정한후 피구동륜 1 회전당 이동거리를 2π 로 나누어준 값으로 결정하였다.

4) 피구동륜의 운동저항 측정

피구동륜의 운동저항을 측정하기 위하여 먼저 차륜프레임에서 타이어를 제거한 후 전술한 그림 3-6에 나타난 바와 같이 측정대차의 후부와 토양가공대차 사이에 강선을 연결한 후 그 사이에 CAS(주)에서 제작한 1ton 용량의 하중변환기를 부착하여 토양가공대차로 측정대차를 견인할 때 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정하여 측정대차의 순수 운동저항을 측정하였다. 그 다음에는 차륜프레임에 피구동륜을 장착한 후 피구동륜을 노면에 놓은 상태에서 토양가공대차로 측정대차를 견인하여 하중변환기에 나타나는 피구동륜의 운동저항을 포함한 측정대차의 운동저항을 측정하였다. 따라서 피구동륜의 운동저항은 위에서 측정한 두 가지 운동저항의 차 즉, 피구동륜의 운동저항을 포함한 측정대차의 운동저항값에서 측정대차의 순수 운동저항의 차로써 결정하였다.

3. 노면상태와 타이어공기압에 따른 피구동륜의 운동특성 분석

가. 타이어의 공기압과 노면상태가 피구동륜의 변형에 미치는 영향

그림 3-10은 강도가 다른 4 가지 노면상태(도로, 토양-I, 토양-II, 토양-III)에서 타이어공기압의 변화(80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa)에 따른 피구동륜의 변형율을 측정된 결과이다. 그림 3-10에서 타이어의 공기압이 각각 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa일 때 피구동륜의 변형율은 토양-I의 경우 각각 4.722%, 2.884%, 1.520%, 1.168%이고, 토양-II의 경우에는 각각 7.509%, 5.811%, 4.407%, 3.476%, 토양-III의 경우에는 각각 8.343%, 5.493%, 4.677%, 4.399%, 그리고 도로의 경우에는 각각 12.169%, 9.432%, 8.599%, 7.518%로서 피구동륜의 변형량은 4 가지 노면상태에서 모두 타이어의 공기압이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

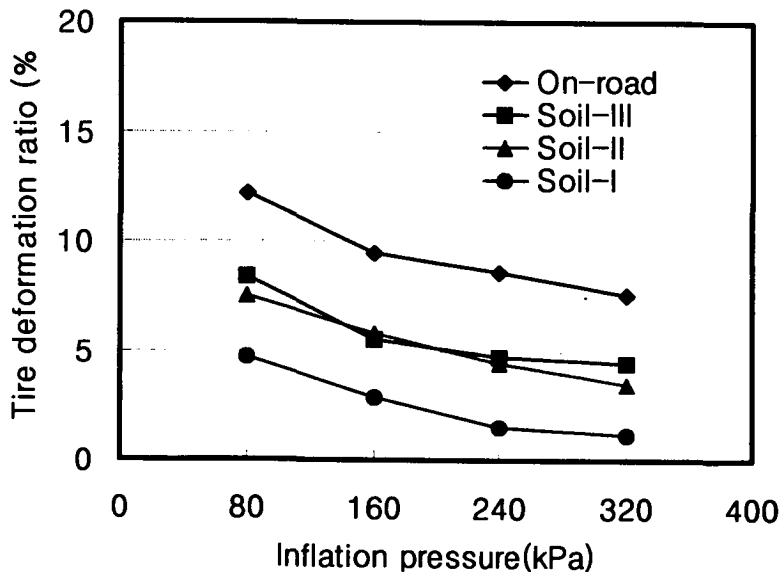


Fig. 3-10 Relationships between tire deformation ratio and tire inflation pressure on four different ground conditions.

또한 동일한 타이어공기압에 대해 노면의 강도에 따른 피구동륜의 변형율의 크기는 4 수준의 공기압 조건 모두에 대해서 도로, 토양-III, 토양-II, 토양-I의 순서로 나타나 노면이 단단할수록 피구동륜의 변형량이 크게 나타났다.

한편, 타이어의 공기압을 80kPa에서 160kPa, 240kPa, 320kPa로 각각 100%, 200%, 300% 증가시켰을 때 토양-I, 토양-II, 토양-III 및 도로 조건에서 타이어변형율의 감소량은 토양-I의 경우에는 각각 1.839%, 1.364%, 0.352%, 토양-II의 경우에는 각각 1.698%, 1.404%, 0.931%, 토양-III의 경우에는 2.85%, 0.816%, 0.278%, 그리고 도로의 경우에는 각각 2.737%, 0.833%, 1.081%로 나타났다. 즉, 토양-I, 토양-II, 토양-III, 그리고 도로에서의 변형량은 모두 공기압이 증가함에 따라 함께 감소하였으나 공기압의 증가에 따른 피구동륜 변형량의 절대적인 감소량은 4 수준의 노면조건에 대해 큰 차이를 나타내지는 않았으나 공기압의 증가에 따른 피구동륜 변형량의 감소경향은 4 수준의 노면상태에서 모두 공기압이 증가할수록 변형량의 절대적인 감소량이 작아지는 지수곡선 형태의 감소경향을 나타내었다.

위와 같이 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 변형량이 감소한 이유는 타이어공기압의 증가에 따른 타이어 강도의 증가 때문으로 판단된다. 한편, 같은 공기압에 대해 노면의 강도가 약할수록 피구동륜의 변형량이 감소하였는데 이러한 결과는 노면이 연약할 경우 타이어의 침하 증가로 인해 토양-타이어간의 접지면적리 증가하게 되고, 이러한 접지면적의 증가가 접지압의 감소로 나타나 피구동륜의 변형량이 작게 나타나게 된 원인으로 판단된다.

나. 타이어의 공기압과 노면상태가 피구동륜의 침하에 미치는 영향

그림 3-11은 강도가 다른 4 가지 노면상태(도로, 토양-I, 토양-II, 토양-III)에서 타이어공기압의 변화(80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa)에 따른 피구동륜의 침하량을 측정한 결과이다.

그림 3-11에서 4 수준의 타이어의 공기압에 대한 피구동륜의 침하 경향은 도로의 경우에는 노면의 변형이 발생하지 않기 때문에 모든 공기압에 대해서 피구동륜의 침하가 나타나지 않았다.

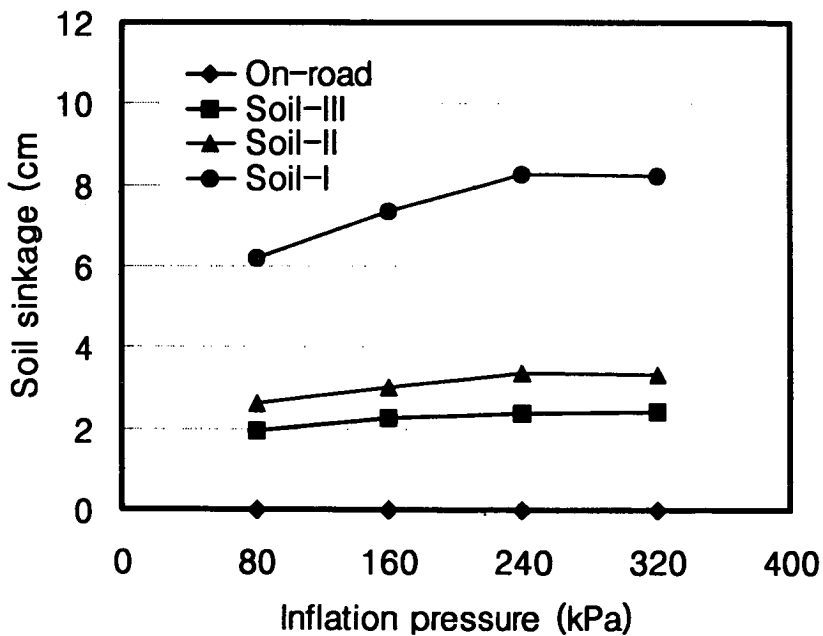


Fig. 3-11 Relationships between sinkage and tire inflation pressure on four different ground conditions.

그러나 비도로 노면인 토양-I, 토양-II, 토양-III의 경우에는 공기압이 변함에 따라 피구동륜의 침하량도 함께 변화하였다. 즉, 타이어의 공기압이 각각 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa일 때 피구동륜의 침하량은 토양-I의 경우 각각 6.208cm, 7.344cm, 8.256cm, 8.233cm이고, 토양-II의 경우에는 각각 2.630cm, 3.033cm, 3.367cm, 3.325cm, 그리고 토양-III의 경우에는 각각 1.958cm, 2.283cm, 2.40cm, 2.425cm로서 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 침하량이 증가하는 것으로 나타나 비도로 노면인 토양-I ~ 토양-III에서는 모두 공기압의 증가가 타이어의 침하량을 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 노면의 강도에 따른 피구동륜의 침하량의 크기는 4 수준의 공기압 조건 모두에 대해서 토양-I, 토양-II, 토양-III, 도로의 순서로 나타나 노면이 연약할수록 피구동륜의 침하가 작은 것으로 나타났다.

한편, 타이어의 공기압을 80kPa에서 160kPa, 240kPa, 320kPa로 각각 100%, 200%, 300% 증가시켰을 때 토양-I, 토양-II 및 토양-III에서의 침하량의 증가량은 토양-I의 경우에는 각각 1.136cm, 2.048cm, 2.025cm, 토양-II의 경우에는 각각 0.403cm, 0.737cm, 0.695cm, 그리고 토양-III의 경우에는 0.325cm, 0.442cm, 0.467cm로 나타났다. 즉, 토양-I, 토양-II 및 토양-III에서 공기압의 증가에 따른 피구동륜의 침하량의 증가량은 세 토양조건에서 모두 타이어의 공기압이 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났으나 공기압의 증가에 따른 피구동륜 침하량의 절대적인 증가량은 토양-I, 토양-II, 토양-III의 순으로서 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다. 또한 공기압의 증가에 따른 피구동륜 침하량의 증가경향은 세 수준의 노면상태에서 모두 공기압이 증가할수록 침하량의 증가폭이 감소하는 지수곡선 형태의 증가경향을 나타내었다.

위와 같이 타이어의 공기압이 감소할수록 피구동륜의 침하량이 감소한 이 유는 공기압의 감소는 타이어 변형량(처짐)의 증가에 따른 접지면적의 증가

를 초래하게 되고, 이러한 접지면적의 증가가 접지압의 감소를 나타내어 피구동륜의 침하량을 감소시키게 된 원인으로 판단된다.

다. 타이어의 공기압과 노면상태가 피구동륜의 회전반경에 미치는 영향

그림 3-12은 강도가 다른 4 가지 노면상태에서 4 수준의 타이어공기압에 따른 피구동륜의 회전반경비(ratio of rolling radius)를 측정한 결과이다.

그림 3-12에서 타이어의 공기압이 각각 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa일 때 피구동륜의 회전반경비는 토양-I의 경우 각각 1.073, 1.128, 1.158, 1.167이고, 토양-II의 경우에는 각각 1.023, 1.046, 1.064, 1.065, 토양-III의 경우에는 각각 1.006, 1.029, 1.036, 1.041, 그리고 도로의 경우에는 각각 0.964, 0.969, 0.972, 0.976으로서 4 가지 노면 모두에 대해서 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 회전반경은 증가하는 것으로 나타났다.

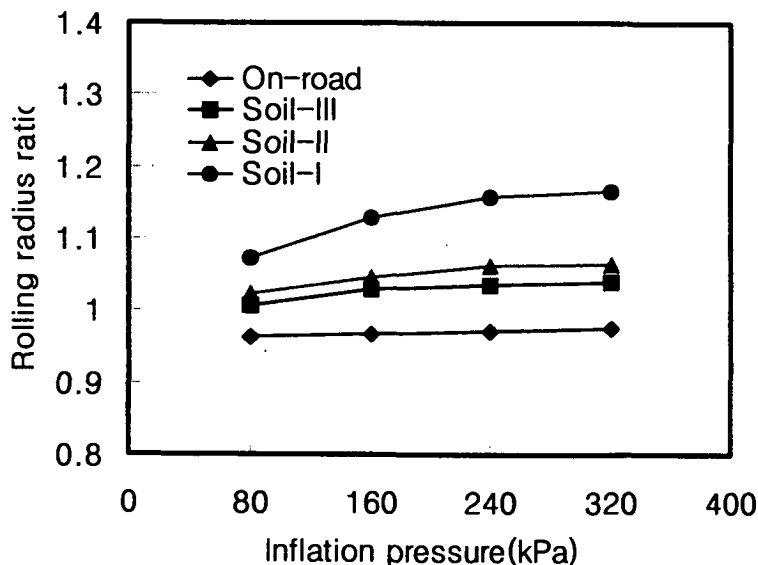


Fig. 3-12 Relationships between rolling radius ratio and tire inflation pressure on four different ground conditions.

또한, 동일한 타이어공기압에 대해서 노면의 강도에 따른 피구동륜의 회전반경비는 4 수준의 공기압 조건 모두에 대해서 토양-I, 토양-II, 토양-III, 도로의 순서로 나타나 노면이 연약할수록 피구동륜의 회전반경은 증가하는 것으로 나타났다.

한편, 위의 결과에서 도로조건에서는 피구동륜의 회전반경비가 4 수준의 공기압에 대해 모두 1보다 작게 나타났으나 비도로노면 즉, 토양-I, 토양-II, 토양-III의 경우에는 회전반경비가 모두 1보다 크고, 또한 토양이 연약할수록 회전반경비가 크게 나타났다. 이러한 결과는 도로와 같은 단단한 노면인 경우에는 피구동륜의 회전반경이 타이어의 변형량에 크게 영향을 받지만, 연약한 토양 조건에서는 타이어의 변형량뿐만 아니라 피구동륜의 회전시 나타나는 토양의 파괴현상에 의해 나타나는 토양-타이어간에 미끄러짐(skid) 효과가 복합적으로 발생하기 때문으로 판단된다. 즉, 피구동륜의 회전시 토양의 파괴현상은 토양의 강도가 약할수록 크게 나타나고, 또한 토양이 약할수록 미끄러짐이 크게 나타나기 때문에 토양의 강도가 약한 토양-I, 토양-II, 토양-III의 순으로 피구동륜의 회전반경이 크게 나타난 것으로 판단된다.

한편, 타이어의 공기압을 80kPa에서 160kPa, 240kPa, 320kPa로 각각 100%, 200%, 300% 증가시켰을 때 토양-I, 토양-II, 토양-III 및 도로에서 피구동륜 회전반경비의 증가량은 토양-I의 경우에는 각각 0.055, 0.085, 0.094, 토양-II의 경우에는 각각 0.023, 0.041, 0.042, 토양-III의 경우에는 각각 0.023, 0.03, 0.035, 그리고 도로의 경우에는 각각 0.005, 0.008, 0.012로 나타났다. 즉, 4 가지 노면상태에서의 회전반경비는 모두 공기압이 증가함에 따라 함께 증가하였으나 공기압의 증가에 따른 회전반경비의 절대적인 증가량은 토양-I, 토양-II, 토양-III, 도로의 순서로서 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다. 또한 공기압의 증가에 따른 피구동륜 회전

반경의 증가경향은 4 수준의 노면상태에서 모두 공기압이 증가할수록 회전 반경의 증가폭이 감소하는 지수곡선 형태의 증가경향을 나타내었다.

위의 결과로부터 피구동륜의 회전반경은 토양조건과 타이어의 공기압에 크게 영향을 받기 때문에 연약지에서 운용되는 차량의 회전반경을 구명하기 위해서는 차량이 운용되는 토양조건과 타이어의 공기압을 모두 고려한 평가가 필요한 것으로 판단된다.

라. 타이어의 공기압과 노면상태가 피구동륜의 운동저항에 미치는 영향

그림 3-13은 강도가 다른 4 가지 노면상태에서 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 운동저항계수를 측정한 결과이다.

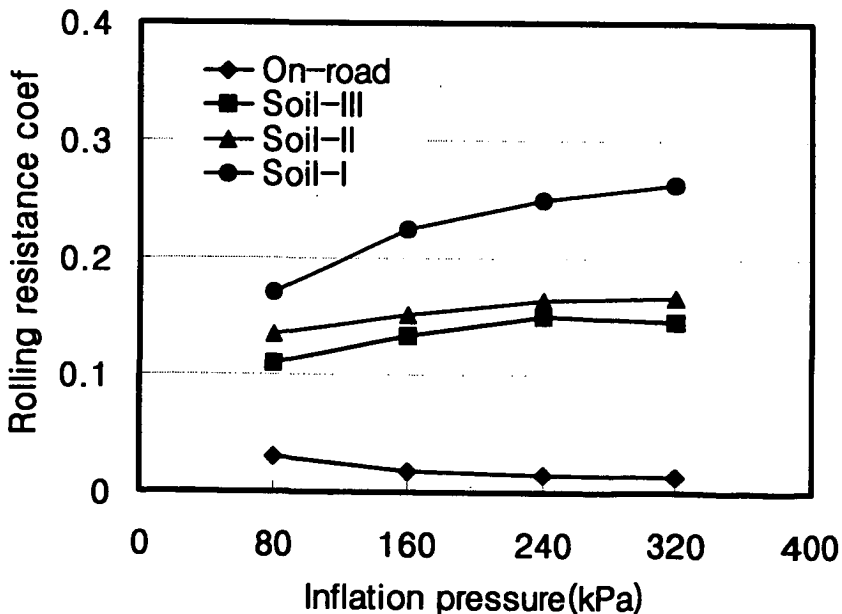


Fig. 3-13 Relationships between rolling resistance coefficient and tire inflation pressure on four different ground conditions.

그림 3-13에서 볼 수 있듯이, 도로 조건에서 타이어의 공기압이 각각 80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa일 때 피구동륜의 운동저항계수는 0.0301, 0.0182, 0.0152, 0.0137로서 타이어의 공기압이 증가할수록 피구동륜의 운동저항은 감소하였으나 비도로 노면인 토양-I ~ 토양-III에서는 도로의 경우와는 반대 경향이 나타났다. 즉, 토양-I의 경우에는 4 수준의 공기압에 대해 피구동륜의 운동저항계수가 각각 0.1705, 0.2247, 0.2486, 0.2626, 토양-II의 경우에는 각각 0.1362, 0.1507, 0.1647, 0.1665, 토양-III의 경우에는 각각 0.1105, 0.1335, 0.1499, 0.1454로서 비도로 노면에서는 모두 공기압이 증가할수록 피구동륜의 운동저항계수는 증가하는 것으로 나타났고, 노면이 연약할수록 전체 공기압 수준 모두에 대해서 운동저항계수가 크게 나타났다.

이와 같이 도로와 토양-I ~ 토양-III의 경우가 다른 경향이 나타난 이유는 비도로 특히, 연약한 노면에서는 토양의 압축 및 파괴현상에 따른 피구동륜의 침하가 발생하기 때문으로 판단된다. 즉, 도로에서 피구동륜의 운동저항은 타이어의 변형에 의한 회전저항이 주 원인으로서 공기압의 증가는 타이어 변형량을 감소시키기 때문에 공기압의 증가가 피구동륜의 운동저항을 감소시키게 된 원인으로 판단된다.

그러나 비도로 특히 연약한 노면에서 운용되는 타이어의 운동저항은 타이어의 변형에 따른 회전저항과 토양-타이어의 접지부에서 나타나는 토양의 압축과 파괴현상에 의한 타이어의 침하에 의해 나타나는 토양다짐저항(compaction resistance)의 합으로 나타난다. 즉, 연약한 노면에서는 타이어의 변형에 의한 회전저항보다 타이어의 침하에 의한 토양다짐저항이 상대적으로 크기 때문에 노면이 연약할수록 전체 운동저항에서 토양다짐저항이 차지하는 비율이 크기 때문에 연약한 노면에서 피구동륜의 운동저항이 크게 나타난 것으로 판단된다. 또한 연약한 노면에서는 공기압의 증가에 따른

회전저항의 감소량보다는 공기압의 증가에 따른 토양다짐저항의 증가량이 상대적으로 크기 때문에 공기압의 증가가 피구동륜의 운동저항을 증가시키게 된 원인으로 판단된다.

한편, 타이어의 공기압을 80kPa에서 160kPa, 240kPa, 320kPa로 각각 100%, 200%, 300% 증가시켰을 때 토양-I, 토양-II 및 토양-III에서 피구동륜의 운동저항계수의 증가량은 토양-I의 경우에는 각각 0.0542, 0.0781, 0.0921, 토양-II의 경우에는 각각 0.0230, 0.0393, 0.0349, 그리고 토양-III의 경우에는 각각 0.0155, 0.0289, 0.0312로서 비도로 조건인 세 노면조건에서는 모두 공기압의 증가에 따른 피구동륜의 운동저항계수가 공기압이 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났으나 공기압의 증가에 따른 피구동륜 운동저항계수의 절대적인 증가량은 토양-I, 토양-II, 토양-III의 순으로서 노면 상태가 연약할수록 크게 나타났다. 또한, 공기압의 증가에 따른 피구동륜 운동저항계수의 증가경향은 세 수준의 노면상태에서 모두 공기압이 증가할수록 운동저항계수의 증가폭이 감소하는 지수곡선 형태의 증가경향을 나타내었다.

한편, 도로의 경우에는 타이어의 공기압을 80kPa에서 160kPa, 240kPa, 320kPa로 각각 100%, 200%, 300% 증가시켰을 때 피구동륜 운동저항계수의 증가량이 각각 -0.0119, -0.0148, -0.0163로서 공기압이 증가할수록 피구동륜의 운동저항계수가 작아지는 것으로 나타났고, 공기압의 증가에 따라 운동저항계수의 감소폭이 작아지는 지수곡선 형태의 감소 경향을 나타내었다.

이상의 결과로부터 공기압의 조절을 통해 타이어의 운동저항을 줄이기 위해서는 비도로 노면에서는 공기압을 작게, 그리고 도로에서 공기압을 크게 하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

본 절에서는 노면상태와 타이어공기압의 변화가 피구동륜의 운동특성에 미치는 영향을 구명하기 위하여 강도가 다른 4 가지 노면(On-road, Soil-I, Soil-II, Soil-III) 상태와 4 수준의 공기압(80kPa, 160kPa, 240kPa, 320kPa) 조건하에서 노면조건과 타이어공기압의 변화에 따른 피구동륜의 변형량, 침하, 회전반경 및 운동저항관계를 실험적으로 조사하였다. 실험은 인공토조내의 사양토에서 수행되었으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 피구동륜의 변형량은 4가지 노면상태에서 모두 공기압이 증가함에 따라 감소하였고, 공기압의 증가에 따른 피구동륜 변형량의 감소경향은 4 가지 노면상태에서 모두 지수곡선 형태의 감소경향을 나타내었다.
- 2) 피구동륜의 침하량은 모든 공기압 조건에서 노면상태가 연약할수록 크고, 공기압의 증가는 피구동륜의 침하량을 지수곡선의 형태로 증가시키는 것으로 나타났다. 또한, 공기압의 증가에 따른 침하량의 증가폭은 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다.
- 3) 피구동륜의 회전반경은 노면의 강도가 클수록 작게 나타났으며 공기압의 증가는 4 가지 노면상태 모두에서 피구동륜의 회전반경을 증가시키는 것으로 나타났다. 또한, 공기압의 증가에 따른 회전반경의 증가경향은 노면상태가 연약할수록 크게 나타났다.
- 4) 피구동륜의 운동저항은 노면이 강도가 약할수록 크게 나타났다. 한편, 공기압의 증가에 따른 피구동륜의 운동저항은 비도로(토양-I, 토양-II,

토양-Ⅲ)의 경우에는 공기압이 증가할수록 함께 증가하였으나, 도로상태에서는 비도로 상태와는 반대로 공기압의 증가가 운동저항을 감소시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 공기압의 조절을 통해 타이어의 성능을 높이기 위해서는 비도로에서는 공기압을 작게, 그리고 도로에서는 공기압을 크게 하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.

제2절 토양상태와 타이어공기압에 따른 구동륜의 성능

비도로 특히, 연약지에서 차량이 주행할 경우 구동륜(driving wheel) 아래 토양-휠의 접지부에서는 토양의 압축과 전단파괴 현상에 의해 수직응력과 전단응력이 나타나며 차량의 주행에 필요한 추진력(soil thrust or gross traction)을 발생시킨다. 이러한 추진력은 차량의 주행에 필요한 운동저항을 극복하기 위해 일부가 소모되고, 나머지는 차량의 가속 및 경사지 등판 또는 작업을 수행하기 위한 견인력(drawbar pull or net traction)으로 나타난다. 일반적으로 연약지에서의 추진력 증가는 구동륜 아래 토양에 대해 전단변위(shear displacement)의 증가를 초래하여 슬립도 함께 증가시키게 되는데 이러한 슬립의 증가는 차량이 정적 하중상태에 있을 때에 비해 더욱 큰 침하를 발생시킨다. 이와 같이 슬립이 증가함에 따라 추가적으로 발생하는 침하 현상을 슬립-침하(slip-sinkage)라 하며, 슬립-침하는 차량이 정적인 상태나 저슬립 상태에 있을 때에 비해 운동저항을 증가시켜 차량의 견인성능에 영향을 미치게 된다.

Reece(1964)는 점토, 건조사토, 습윤사토 등 세 가지 토양조건에서 전단판을 이용하여 전단변위에 따른 침하량을 측정하여 전단변위가 증가함에 따라 침하량도 함께 증가한다는 것을 실험적으로 조사하였다. 또한, Wong(1989)은 전단링시험(shear ring test)을 통해 슬립상태에서의 전체 침하는 정적 하중하에서의 침하(static sinkage)와 슬립에 따른 추가적인 침하(additional sinkage due to slip)의 합으로 나타내야 하고, 차량의 견인성능을 정확하게 예측하기 위해서는 주행장치의 슬립-침하를 고려해야 한다고 보고하였다.

한편 박(2000)은 토양물리성 측정장치인 베바메타(bevameter)를 이용하여

토양의 슬립-침하 특성을 경험적으로 유도하여 슬립-침하 효과를 고려한 휠형차량(off-road wheeled vehicle)의 견인성능 예측 모델을 개발하였고, 모델에 의해 예측된 슬립-견인력 결과를 실제 토양에서 농용 트랙터를 이용하여 측정된 슬립-견인력 결과와 비교함으로써 모델의 타당성을 입증하였다. 그러나 그의 모델에서는 타이어를 강차륜(rigid wheel)로 고려하였기 때문에 타이어의 공기압이 견인성능에 미치는 효과에 대해서는 구명되지 않았다. 또한 예측치와 측정치의 비교는 단지 슬립-견인력 관계만을 비교 대상으로 하였고, 비도로차량의 다른 성능 요소인 추진력, 운동저항 등은 고려하지 않았다. 따라서 비도로 특히, 연약지에서 주로 운용되고 있는 농용트랙터 등의 견인성능을 보다 정확하게 평가하고 예측하기 위해서는 구동륜의 연약지 운동특성 즉, 구동륜의 슬립에 따른 구동륜의 침하, 운동저항, 추진력, 견인력 등과 같은 슬립-견인성능 관계가 규명되어야 한다.

한편, 구동륜의 슬립-견인성능 관계는 타이어가 운용되고 있는 토양상태 뿐만 아니라 타이어의 공기압에 따라 크게 영향을 받는다. 따라서 본 절에서는 토양상태와 타이어의 공기압 변화가 구동륜의 슬립-견인성능 즉, 구동륜의 슬립-침하특성과 구동륜의 슬립에 따른 추진력, 운동저항 및 견인력 관계를 실험적으로 조사하였다.

1. 실험장치

구동륜의 성능을 평가하기 위한 측정은 전술한 3-1절의 피구동륜 운동특성의 측정에서 사용한 측정장치를 그대로 이용하였고, 본 실험을 위해 필요한 측정장비를 새로 구성하여 실험을 수행하였다.

가. 타이어 구동 시스템

구동륜의 성능 실험에 사용된 타이어는 3-1절에서 전술한 피구동륜의 운동특성에서 사용했던 타이어를 그대로 이용하였다. 타이어는 인공토조시스템의 측정대차에 장착된 차륜프레임에 부착되어 차륜프레임에 설치되어 있는 8마력 유압모터에 의해 구동된다. 타이어가 장착된 차륜프레임은 원기어와 미끄럼 베어링에 의해 좌·우 및 상·하 방향으로 자유로이 이동할 수 있도록 구성되었다. 한편, 유압모터로부터 발생된 토크는 스프로킷과 체인 연결방식을 통해 타이어로 전달되도록 구성하여 기어비가 다른 스프로킷의 교환을 통해 타이어의 회전속도와 토크를 쉽게 변환시킬 수 있도록 구성하였다(그림 3-14).

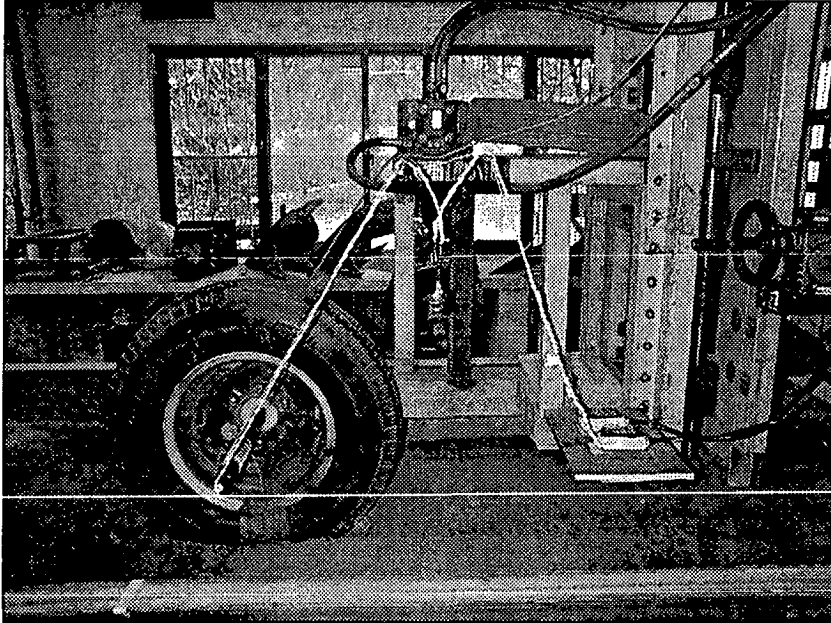


Fig. 3-14 View of tire driving system.

나. 구동륜 토크 측정장치

구동륜의 토크를 측정하기 위해 구동축을 가공하여 Micro-Measurement사의 four-element full bridge type(model:CEA-06-250US-350)의 스트레인게이지를 구동축에 부착하여 구동륜의 토크 측정장치를 구성하였다. Four-element full bridge type의 스트레인게이지는 축같은 등근면에 부착할 때 부착 위치의 표시(marking)가 용이하며 굽힘모멘트(bending moment)의 영향도 적다.

구동축 토크변환기의 측도설정(calibration)은 1m 길이의 강철바에 기지의 하중을 가해 기지의 토크를 작용시킨 후, 작용토크와 토크변환기의 출력전압 관계로부터 결정하였다. 그림 3-15는 구동축토크와 출력전압과의 관계를 보여주고 있다.

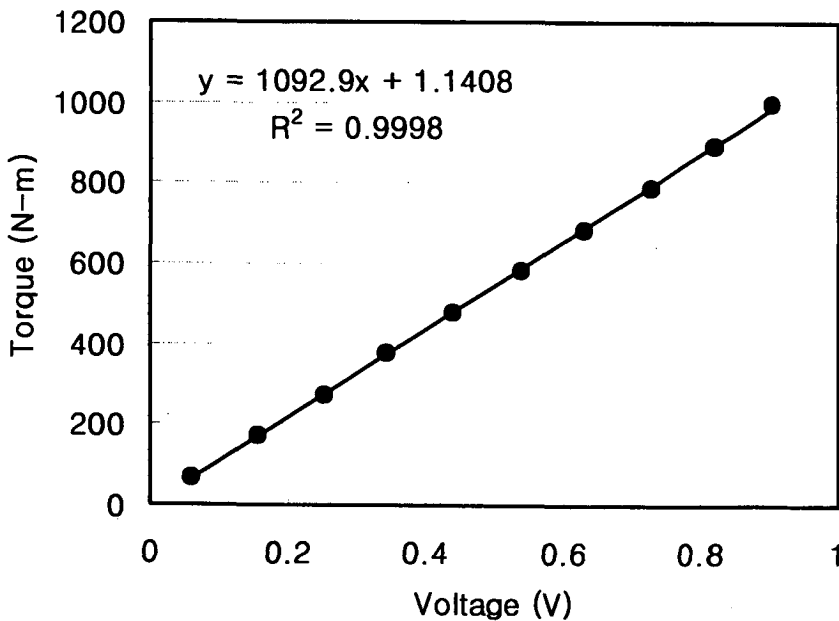


Fig. 3-15 Relationship between torque and voltage of driving axle.

다. 구동륜의 슬립 측정장치

구동륜의 슬립을 측정하기 위한 이론 및 실제 거리 측정장치는 전술한 3장 1절의 그림 3-3과 그림 3-4에서 나타낸 피구동륜의 이론 및 실제거리 측정장치를 사용하였다.

라. 자료 수집 시스템

구동륜의 성능 평가를 위해 구성된 각종 센서로부터 측정된 신호(이론속도, 실제 속도, 축침하, 운동저항, 견인력 및 토크)를 컴퓨터로 획득하기 위해서 자료 수집 시스템을 구성하였다.

자료 수집 장치를 통해 획득된 구동륜의 성능특성에 관한 모든 측정 결과는 퍼스널 컴퓨터에 파일로 저장되며, 동시에 모든 측정 결과는 그림 3-16과 같이 실시간으로 모니터상에 그래픽으로 출력되도록 구성하였다.

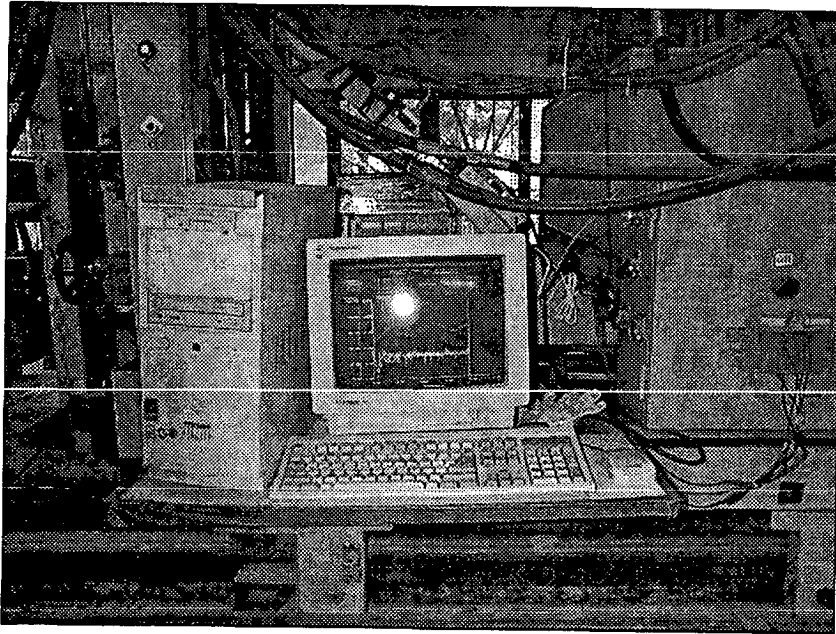


Fig. 3-16 Result of data acquisition

실험에 사용된 데이터 수집장치의 주요 장치 및 센서들에 대한 제원은 표 3-6과 같고, 그림 3-17에 데이터 수집장치의 전체 흐름도를 나타내었다.

한편, 그림 3-18은 타이어 구동장치와 5륜 및 자료수집장치가 구성된 타이어 구동시스템의 전체 모습을 나타내고 있다.

Table 3-6 Specifications of devices used for traction test

ITEM (mesurement parameters)	Model/Manufacture	Specification
Loadcell (motion resistance)	SBA-1T/ CAS, KOREA	tension & compression maximum capacity : 1000kg output : 3mV/V
Strain gage (motion resistance)	CEA-06-250US-350/ Micro-Measurement, USA	Resistance(Ω) : $350 \pm 0.4\%$ Gage factor : $2.065 \pm 0.5\%$
Rotary Encoder (theoretical speed)	OEW-1024-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1024 pulse/rev.
Rotary Encoder (real speed)	OEW-10-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1000 pulse/rev.
Rotary Encoder (axle sinkage)	OEW-1024-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1024 pulse/rev.
Data Acquisition Board	AX-5412 / AXIOM Technology, Taiwan	Resolution : 12 bit A/D ch. : 16S.E./8DI. Sampling rate : 90kHz
Counter Board	YS 7400 / Yoi-Auto-System, Korea	Resolution : 24 bit Counter ch. : 4 Max. counting fre. : 1kHz
Strain Amplifier	DPM-711B / KYOWA, Japan	Channel : 3 Gain : 1, 2, 5, 10, 20, 50, $100 \times 100 \mu\epsilon$ Output-V : $\pm 5V$ into $5k\Omega$

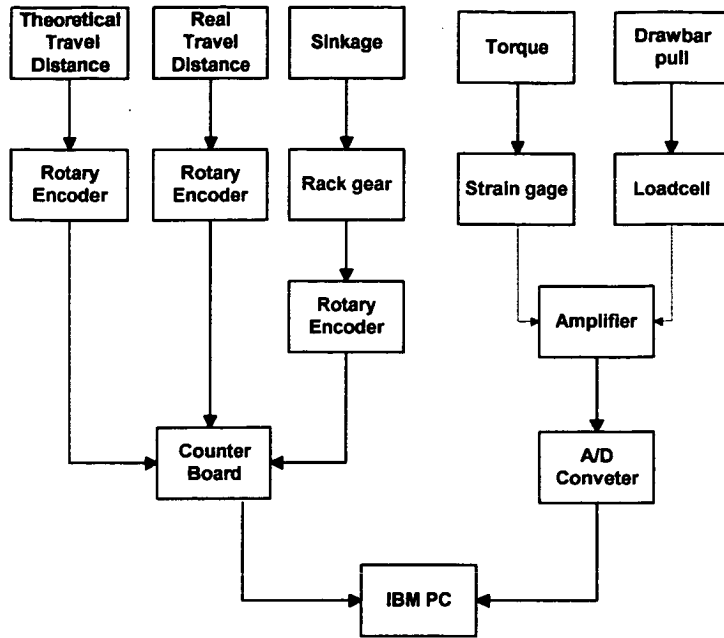


Fig. 3-17 Block diagram of data acquisition system.

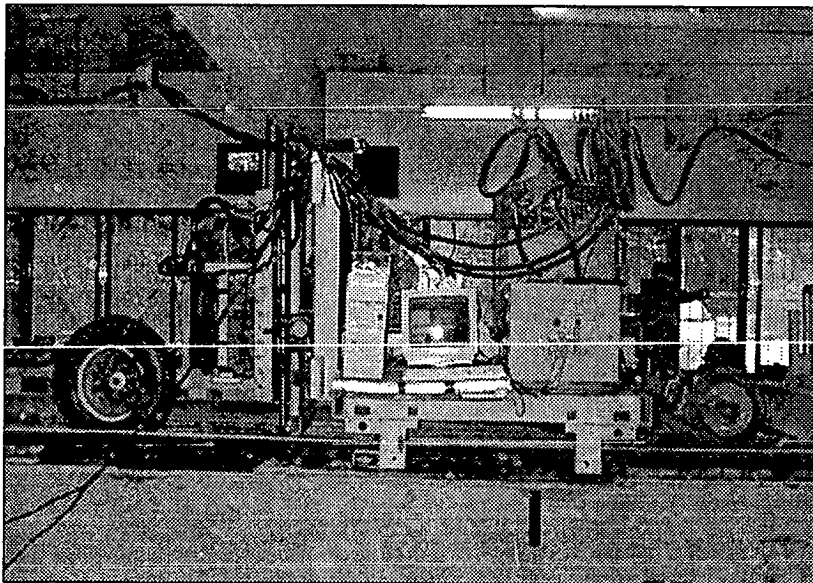


Fig. 3-18 Overall view of tire driving system.

2. 실험방법

토양상태와 타이어공기압의 변화가 구동륜의 슬립-침하 특성과 견인성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실험토양을 강도가 다른 세 가지 토양상태와 세 수준의 타이어공기압 조건에 대해서 구동륜의 견인성능을 측정하였다.

가. 토양가공

구동륜의 견인성능 실험이 수행된 인공토조내의 실험토양은 전술한 피구동륜의 운동특성 측정을 위해 이용한 사양토를 그대로 이용하여 인공토조시스템의 토양가공대차를 이용하여 실험토양을 강도가 다른 세 종류의 토양상태(토양 I, 토양 II, 토양 III)로 가공하였다.

토양 I은 2회의 로타리 작업으로 토양을 완전히 파쇄한 후 균평기로 균평작업을 1회 실시하여 연약한 토양(soft soil)으로 가공하였다. 토양 II와 토양 III은 로타리와 균평작업은 토양 I과 동일하게 수행한 후, 표면다짐롤러로 토양다짐작업을 각각 2회 및 4회 실시하여 토양 I에 비해 토양의 강도가 높도록 가공하였다. 즉, 토양 II는 중간 강도의 토양(medium soil), 그리고 토양 III은 토양 II에 비해 토양의 강도가 상대적으로 높은 단단한 토양(hard soil)으로 가공하였다.

나. 실험토양의 물리성 측정

실험토양의 물리성은 토양가공이 끝난 후 구동륜의 견인성능 실험을 수행하기 직전에 토양의 겉보기밀도, 점착력, 내부마찰각, 원추지수 등을 측정하였다. 겉보기밀도는 100cc 용량의 토양채취관을 이용하여 인공토조내의 임의의 5곳에서 토양샘플을 채취하여 구하였고, 토양의 점착력, 내부마찰

각, 원추지수는 SR-2형 토양 경도측정기를 사용하여 토조내의 임의의 5곳을 선정하여 측정하였다. 한편 원추지수는 0~15 cm 사이의 토양 깊이에서 5cm 간격으로 측정하였다. 표 3-7에 세 가지 토양조건에서 측정한 토양의 물리적 특성을 나타내었다.

Table 3-7 Physical properties of experimental soil

Soil types \ Soil parameters	Soil I	Soil II	Soil III
Cone Index(CI), kPa	136	422	663
Cohesion, kPa	3.15	9.87	11.04
Angle of internal resistance(ϕ), degree	30.05	33.75	35.35
Bulk density(ρ), g/cm ³	1.45	1.52	1.55

다. 구동륜의 견인성능 측정

구동륜의 견인성능 실험은 전술한 세 가지 토양상태(토양 I, 토양 II, 토양 III) 각각에 대해서 타이어의 공기압을 각각 120kPa, 240kPa, 360kPa의 세 수준으로 변화시켜 수행하였다. 또한, 구동륜의 슬립은 0~80% 범위로 조정하였고, 구동륜에 작용하는 축하중은 2.45kN으로 일정하게 유지하였다 (표 3-8).

측정한 견인성능 변수로는 구동륜의 슬립-침하관계와 슬립에 따른 운동저항, 토크, 견인력 등을 측정하였다.

구동륜의 침하는 구동륜이 통과한 후 타이어의 궤적상에서 30cm 자를 이용하여 궤적상의 임의의 5곳에서 측정하여 평균값을 이용하였다.

구동륜의 추진력은 구동축의 토크를 측정한 후 토크와 구동륜의 회전반경의 비로 결정하였다.

견인력은 구동륜과 토양가공대차 사이에 강선을 연결하여 그 사이에 하중변환기를 부착한 후 구동륜을 구동하였을 때 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정하여 구하였고, 구동륜의 속도에 변화를 주어 구동륜의 슬립을 조절하여 슬립의 변화에 따른 견인력을 측정하였다.

한편, 구동륜의 운동저항은 구동륜의 추진력과 견인력의 차로써 결정하였다.

Table 3-8 Experimental conditions for tractive performance test

Soil conditions	soil I (soft soil)
	soil II (medium soil)
	soil III (hard soil)
Inflation pressure	120kPa, 240kPa, 360kPa
Slip range	0~80 %
Axle load	2.45 kN

3. 토양상태와 타이어의 공기압에 따른 구동륜의 성능 분석

가. 구동륜의 슬립-침하 관계

그림 3-19는 토양조건과 공기압에 변화를 주어 측정한 슬립-침하 관계의 일반적 경향으로서 구동륜의 침하량은 세 경우 모두 슬립이 증가함에 따라 매우 크게 증가하였다. 그러나 슬립에 따른 구동륜의 침하 경향은 토양조건과 공기압에 따라 다르게 나타났다. 이러한 결과로부터 구동륜의 슬립-침하 관계는 토양조건과 타이어의 공기압을 고려한 비교, 분석이 필요한 것으로 나타났다. 한편, 토양조건과 공기압의 변화에 따른 슬립-침하 관계는 그림 3-19의 세 경우 모두 슬립이 증가함에 따라 구동륜의 침하량이 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

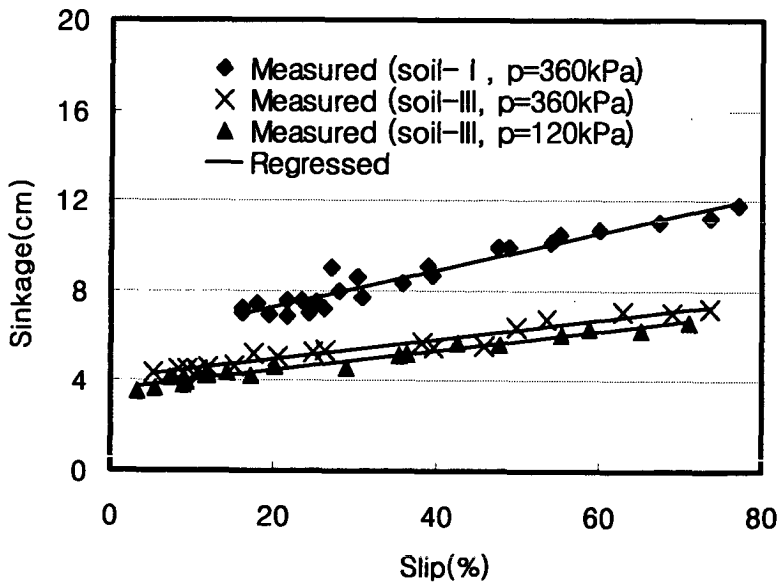


Fig. 3-19 Slip-sinkage data measured for various inflation pressures and soil conditions.

따라서 본 연구에서는 토양조건과 공기압의 변화에 대해 구동륜의 슬립이 침하에 미치는 영향을 분석하는데 있어 슬립-침하 측정치의 1차 회귀방정식으로부터 유도된 결과를 이용하였다(표 3-9).

Table 3-9 Regressed equations and determination coefficients of slip-sinkage curves

Experimental conditions		Regressed equation	R ²
Soil conditions	Inflation pressure		
soil- I	120kPa	y=0.0769x+4.9878	0.7347
	240kPa	y=0.0728x+5.5575	0.9725
	360kPa	y=0.0817x+5.6528	0.9341
soil- II	120kPa	y=0.0487x+3.6961	0.9578
	240kPa	y=0.0459x+3.9738	0.9583
	360kPa	y=0.0497x+4.3540	0.9491
soil- III	120kPa	y=0.0428x+3.6300	0.9709
	240kPa	y=0.0433x+3.8037	0.9590
	360kPa	y=0.0442x+4.0566	0.9543

그림 3-20과 3-21은 각각 토양 I 과 토양 III에서 공기압 조건(120kPa, 240kPa, 360kPa)에 따른 구동륜의 슬립-침하 관계를 나타낸 결과이다.

그림 3-20에서 슬립 0%일 때 세 수준의 공기압에 대한 침하량은 각각 5.0cm, 5.6cm, 5.7cm이고, 슬립 75%일 때는 각각 10.8cm, 11.0cm, 11.8cm로서 슬립이 증가함에 따라 구동륜의 침하도 함께 증가하였고, 공기압이 높을 수록 전체 슬립 구간에서 침하량이 크게 나타났다. 또한, 슬립이 0%에서 75%로 증가했을 때 세 공기압 수준에 대한 침하량의 증가량은 각각 5.8cm, 5.4cm, 6.1cm로서 큰 차이를 나타내지 않았다. 즉, 슬립의 증가에 따른 침하량의 증가경향(회귀계수)은 세 수준의 공기압에 대해 각각 0.0769, 0.0728, 0.0817(Table 3)로서 슬립의 증가에 따른 침하량의 증가경향은 세

가지 공기압에 대해 거의 유사한 경향을 나타내었다.

한편, 그림 3-21(토양 III)의 결과는 그림 3-20의 결과와 마찬가지로 공기압이 클수록 전체 슬립구간에서 침하량이 크게 나타났고, 슬립-침하관계의 회귀계수는 세 수준의 공기압에 대해 각각 0.0428, 0.0433, 0.0442로서 토양 I의 경우와 마찬가지로 공기압의 변화에 대해 거의 차이를 나타내지 않았다. 그러나 두 토양상태에서 공기압에 따른 슬립-침하관계의 회귀계수는 토양 I의 경우에는 0.0728~0.0817, 토양 III의 경우에는 0.0428~0.0442의 범위로서 토양 I의 경우가 토양 III에 비해 기울기가 현저히 크게 나타났다. 한편, 두 토양에서 공기압에 따른 침하량의 차이는 토양 I의 경우가 토양 III에 비해 크게 나타났다.

그림 3-22와 그림 3-23은 각각 120kPa과 360kPa의 일정 공기압 조건에서 토양상태(토양 I, 토양 II, 토양 III)에 따른 구동륜의 슬립-침하 관계를 나타낸 결과로서 토양상태에 따른 슬립-침하관계는 슬립이 증가함에 따라 구동륜의 침하량도 증가하였고, 토양이 연약할수록 전체 슬립구간에서 침하량이 크게 나타났다.

한편, 토양상태에 따른 슬립-침하관계의 회귀계수값은 두 공기압 조건에서 모두 토양 I, 토양 II, 토양 III의 순서로서 토양이 연약할수록 슬립에 따른 추가적인 침하효과가 큰 것으로 나타났다.

그림 3-20~그림 3-23의 결과로부터 슬립의 증가는 토양상태와 공기압 수준에 관계없이 모두 구동륜의 침하량을 증가시키고, 슬립의 증가에 따른 구동륜의 추가적인 침하량은 토양이 연약할수록 큰 것으로 판단된다. 또한 공기압 수준에 따른 침하량은 공기압이 높은 경우가 전체 슬립구간에 걸쳐 침하량이 크고, 공기압에 따른 침하량의 차이는 토양이 연약할수록 크게 나타나 공기압 감소에 의한 침하의 감소 효과는 연약한 토양에서 그 효과가 클 것으로 판단된다.

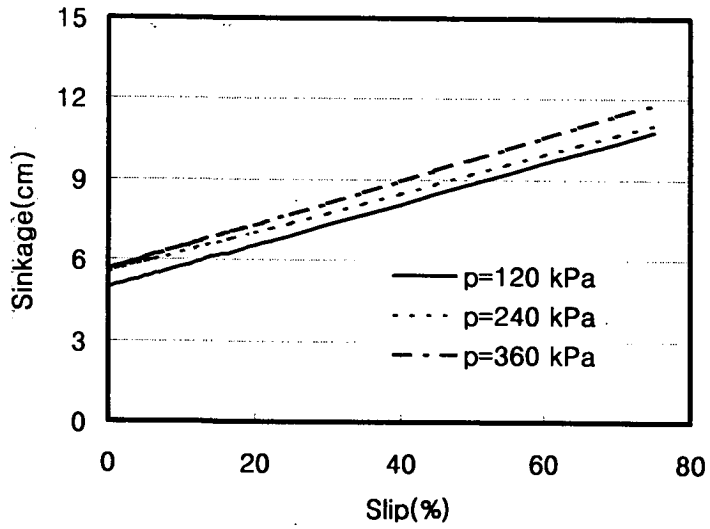


Fig. 3-20 Slip-sinkage relationships for various tire inflation pressure over soil I.

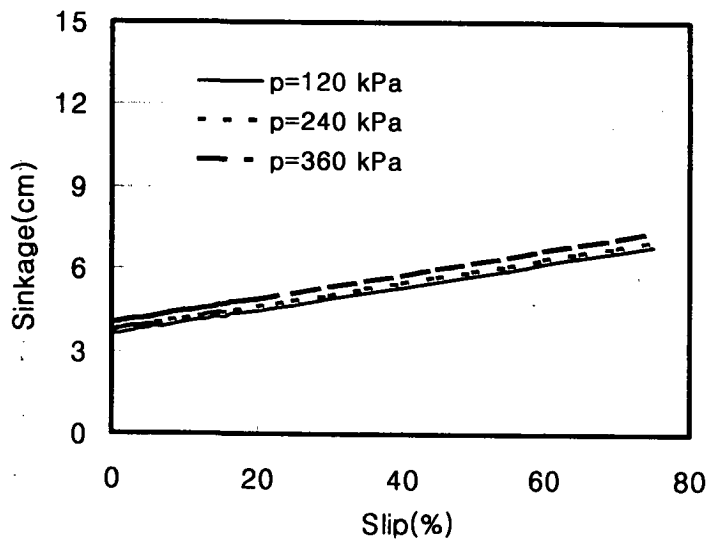


Fig. 3-21 Slip-sinkage relationships for various tire inflation pressure over soil III.

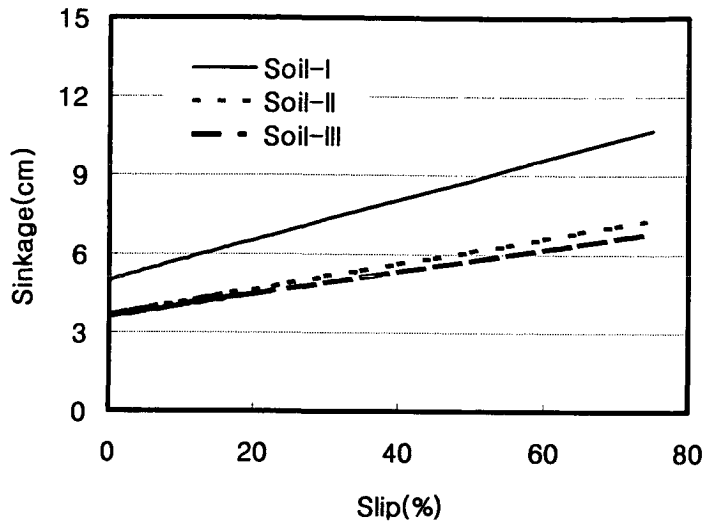


Fig. 3-22 Slip-sinkage relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 120kPa.

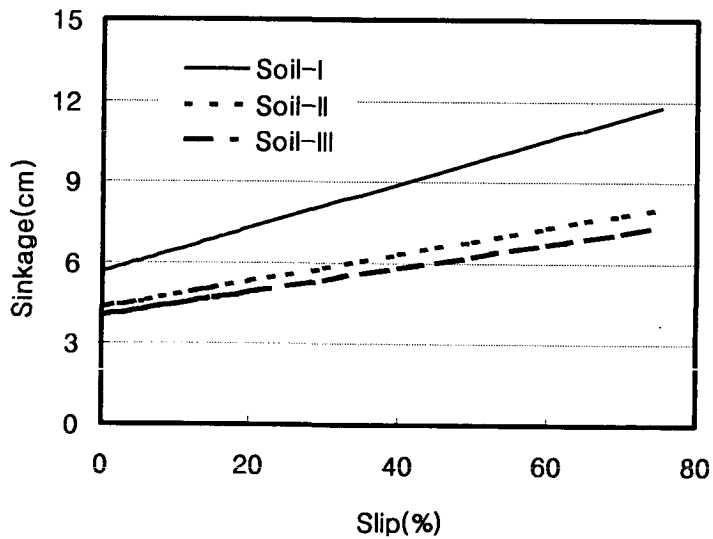


Fig. 3-23 Slip-sinkage relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 360kPa .

나. 구동륜의 슬립-운동저항 관계

토양상태와 공기압에 따른 슬립-운동저항계수(slip-motion resistance coefficient)의 비교는 전술한 슬립-침하의 비교와 마찬가지로 슬립-운동저항계수 측정치의 1차 회귀방정식으로부터 유도된 결과를 이용하였다.

그림 3-24는 토양 I에서 공기압에 따른 구동륜의 슬립-운동저항계수 관계로서 운동저항계수는 세 수준의 공기압에 대해 모두 슬립이 커질수록 증가하였다. 공기압에 따른 운동저항계수의 크기는 공기압이 높을수록 전체 슬립구간에서 운동저항계수의 값이 크게 나타났으나 슬립의 증가에 따른 운동저항계수의 증가경향은 세 가지 공기압 조건에 대해 거의 유사한 경향을 나타내었다.

한편, 그림 3-25에서는 그림 3-24의 결과와 거의 유사한 결과를 나타내었으나 공기압 수준에 따른 운동저항계수값의 차이는 전체 슬립구간에서 그림 3-24의 결과에 비해 작게 나타났다.

그림 3-26과 그림 3-27은 각각 120kPa과 360kPa의 일정 공기압 조건에서 토양상태에 따른 슬립-운동저항계수의 관계를 나타낸 결과로서 일정 공기압 조건하에서 슬립의 증가에 따른 운동저항계수의 증가경향은 세 가지 토양상태에서 모두 유사한 기울기를 나타내었다. 그러나 토양상태에 따른 운동저항계수값의 차이는 공기압이 낮은 경우(120kPa)가 작게 나타났다.

이와 같이 슬립이 증가함에 따라 구동륜의 운동저항계수가 증가한 원인은 그림 3-20~그림 3-23에서 전술한 바와 같이 슬립-침하 효과 때문으로 판단된다. 즉, 슬립의 증가는 타이어-토양 접지면에서 토양의 압축 및 전단 파괴 현상에 의해 구동륜의 침하를 증가시키게 되는데 이러한 구동륜의 침하 증가가 운동저항계수의 증가를 초래한 것으로 판단된다.

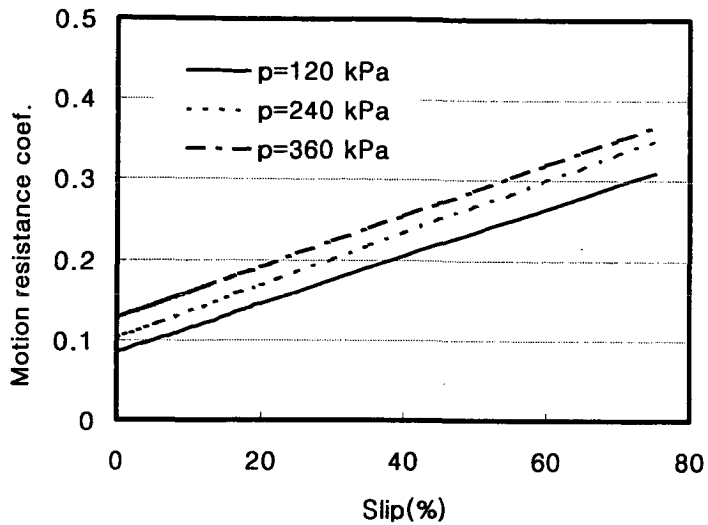


Fig. 3-24 Slip-motion resistance coefficient relationships for various tire inflation pressure over soil I.

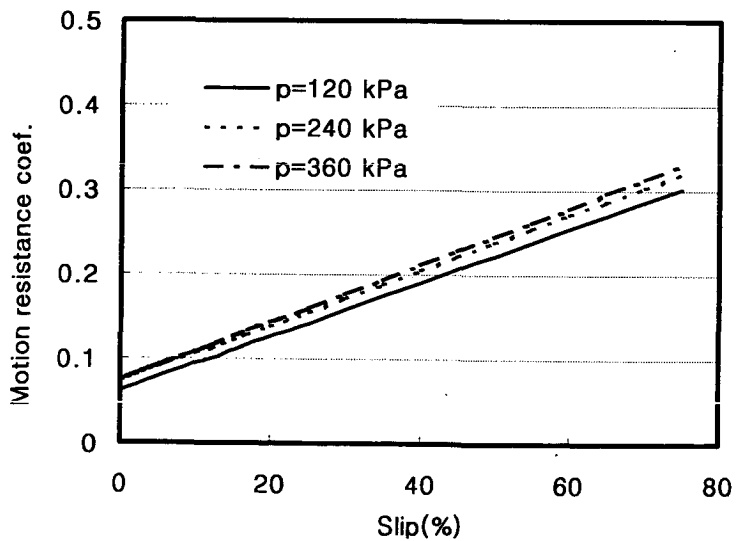


Fig. 3-25 Slip-motion resistance coefficient relationships for various tire inflation pressure over soil III.

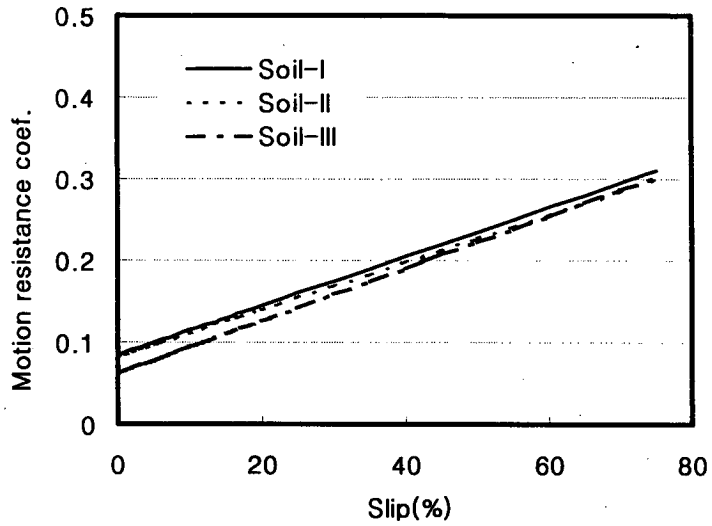


Fig. 3-26 Slip-motion resistance coefficient relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 120kPa.

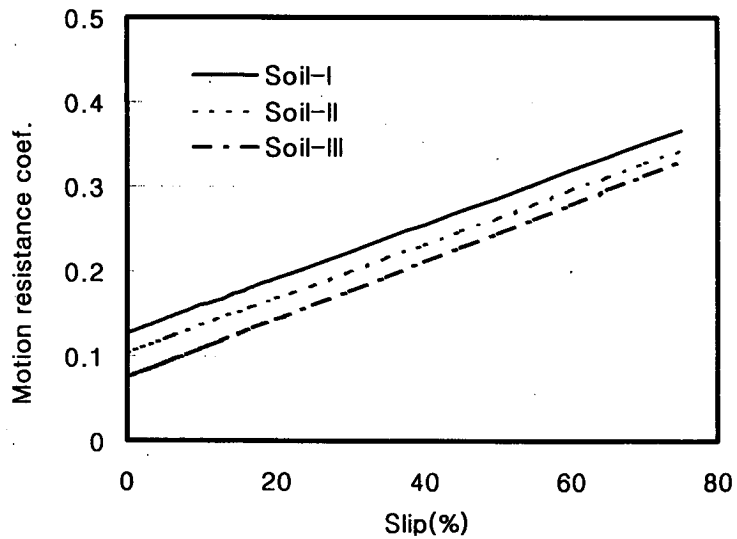


Fig. 3-27 Slip-motion resistance coefficient relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 360kPa.

그림 3-24~그림 3-27의 결과로부터 구동륜의 슬립은 운동저항계수에 영향을 미치는 것으로 나타났고, 구동륜의 운동저항계수는 타이어공기압을 낮게 함으로서 감소시킬 수 있으며, 공기압의 변화에 의한 운동저항계수의 감소 효과는 연약한 토양에서 큰 것으로 판단된다.

다. 구동륜의 슬립-추진력 관계

그림 3-28은 토양 II에서 240kPa의 공기압에 대해 측정된 슬립-추진력계수의 일반적인 관계를 나타낸 결과로서 추진력계수는 슬립이 증가함에 따라 지수곡선 형태로 증가하고, 전체 슬립구간에 걸쳐 어떤 일정한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 모든 토양조건과 공기압 조건에 대해서도 같은 경향을 나타내었다.

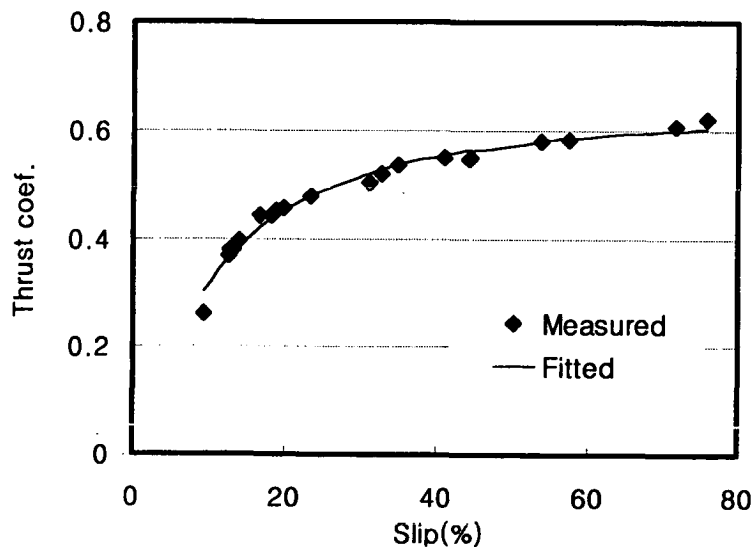


Fig. 3-28 Variation of thrust coefficient with slip for tire with inflation pressure of 240kPa over Soil II.

따라서 본 연구에서는 토양조건과 공기압의 변화에 따른 구동륜의 슬립-추진력 관계를 비교하기 위해 슬립-추진력계수의 측정치를 회귀방정식에 의해 모형화하여 분석하였다.

그림 3-29와 그림 3-30은 각각 토양 I 과 토양 III에서 타이어공기압의 변화에 따른 슬립-추진력계수 관계로서 추진력계수는 슬립의 증가와 함께 증가하였고, 공기압에 따른 슬립-추진력관계는 공기압이 클수록 추진력계수도 크게 나타났으나 공기압에 따른 추진력계수의 차는 크지 않았다. 즉, 공기압이 타이어의 추진력에 미치는 효과는 크지 않은 것으로 판단된다.

그림 3-31과 그림 3-32는 각각 120kPa과 360kPa의 일정 공기압 조건에서 토양상태에 따른 슬립-추진력계수의 관계를 보여주고 있다.

그림 3-31과 그림 3-32에 나타난 바와 같이 토양상태에 따른 슬립-추진력계수의 관계는 120kPa과 360kPa의 일정 공기압 조건에 대해서 모두 전체 슬립 구간에 걸쳐 가장 단단한 토양인 토양 III에서 추진력계수가 가장 크게 나타났고, 그 다음으로는 토양 II, 토양 I의 순서로 나타났다.

그림 3-29~그림 3-32의 결과로부터 타이어의 공기압은 구동륜의 추진력에 크게 영향을 미치지 않지만 토양상태는 구동륜의 추진력에 크게 영향을 미치고, 그 경향은 토양상태가 단단할수록 추진력이 높은 것으로 나타났다.

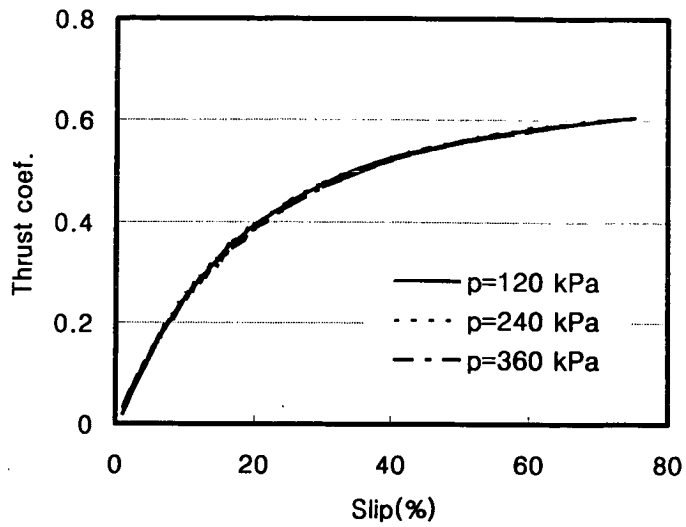


Fig. 3-29 Slip-thrust coefficient relationships for various tire inflation pressure over soil I.

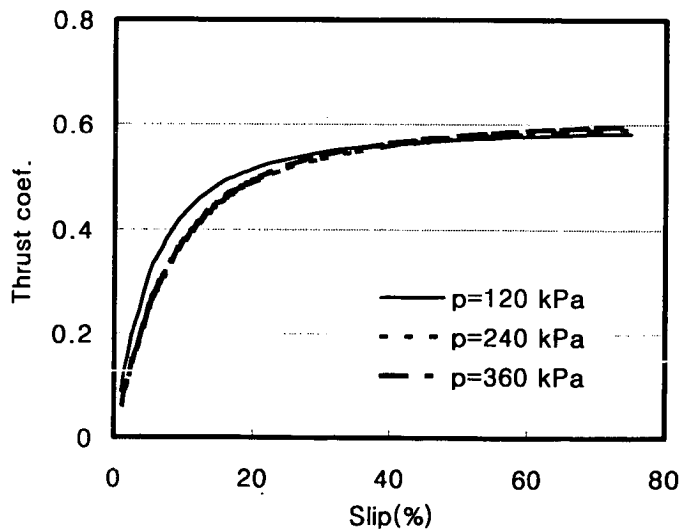


Fig. 3-30 Slip-thrust coefficient relationships for various tire inflation pressure over soil III.

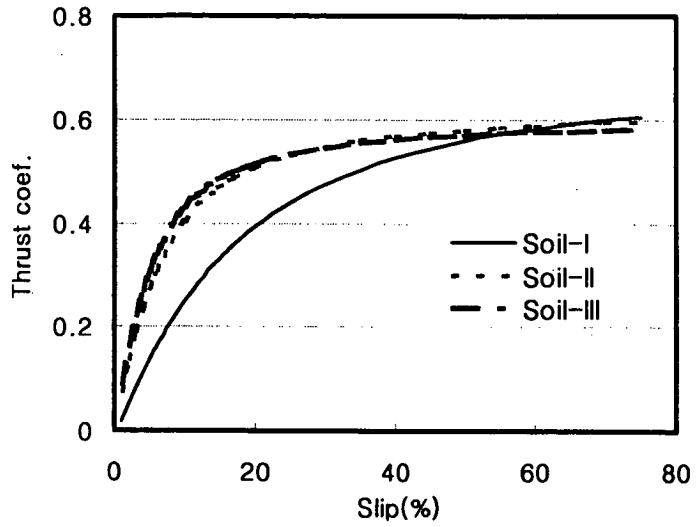


Fig. 3-31 Slip-thrust coefficient relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 120kPa.

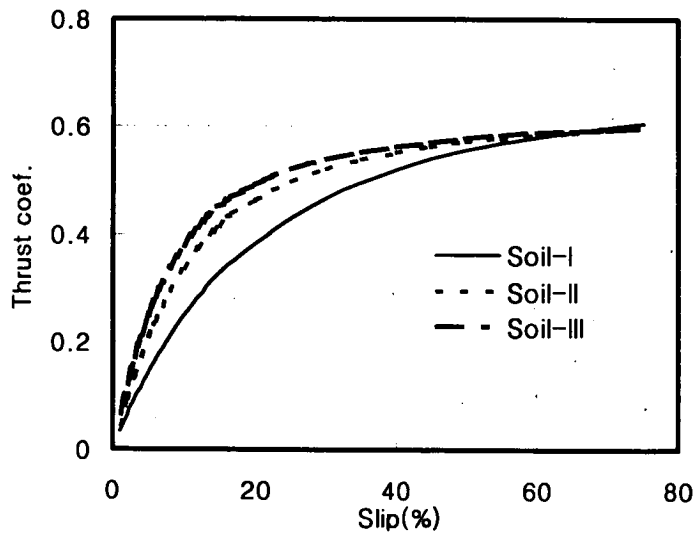


Fig. 3-32. Slip-thrust coefficient relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 360kPa.

라. 구동륜의 슬립-견인력 관계

그림 3-33과 그림 3-34는 각각 토양 I과 토양 III에서 공기압의 변화에 따른 슬립-견인계수 관계로서 슬립-견인계수의 관계는 두 토양상태에서 모두 전체 슬립구간에 걸쳐 공기압이 작을수록 크게 나타났다. 즉, 공기압에 따른 견인계수값의 크기는 120kPa, 240kPa, 360kPa의 순으로 나타났다. 이와 같이 공기압이 작을수록 견인계수가 크게 나타난 이유는 전술한 바와 같이 공기압에 따른 운동저항계수의 차이에 기인하는 것이다.

즉, 견인계수는 추진력계수와 운동저항계수의 차로 나타나는데, 추진력계수는 공기압 수준에 따라 거의 차이가 없지만 운동저항계수는 공기압이 낮을수록 작게 나타났기 때문이다.

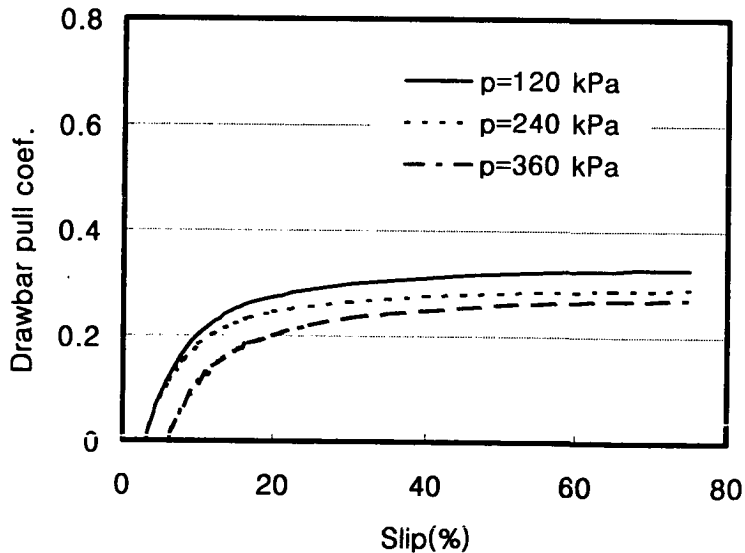


Fig. 3-33 Slip-drawbar pull coefficient relationships for various tire inflation pressure over soil I.

한편, 공기압에 따른 견인계수값간의 차이는 그림 3-34(토양Ⅲ)의 경우가 그림 3-33(토양Ⅰ)의 결과에 비해 작게 나타났다. 이와 같이 단단한 토양에서 공기압에 따른 견인계수값의 차가 작게 나타난 이유는 토양이 단단할수록 공기압에 따른 운동저항계수의 차가 작기 때문으로 판단된다.

그림 3-35와 그림 3-36은 타이어의 공기압이 각각 120kPa과 360kPa일 때 세 가지 토양상태에서 측정한 슬립-견인계수 관계를 나타낸 결과로서 토양 상태에 따른 슬립-견인계수 관계는 전체 슬립구간에 걸쳐 토양이 단단할수록 크게 나타났고, 토양강도에 따른 견인계수의 차이는 명확히 나타났다. 한편, 토양상태에 따른 견인계수값의 차이는 타이어의 공기압이 360kPa인 경우가 120kPa인 경우에 비해 크게 나타났다.

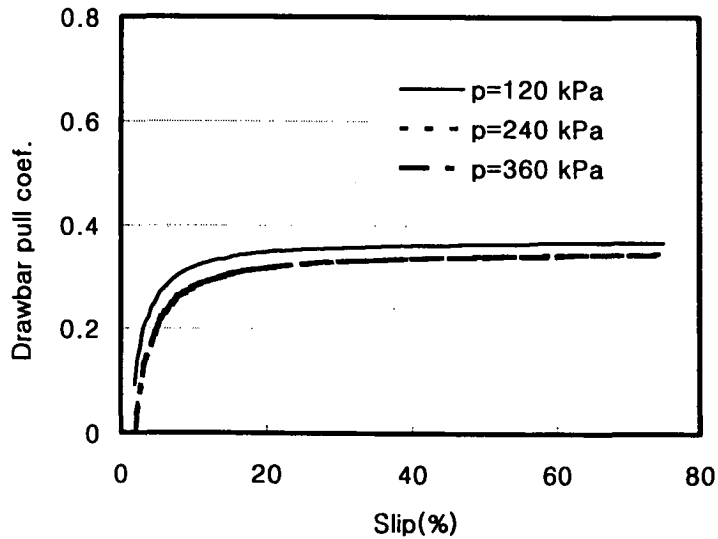


Fig. 3-34 Slip-drawbar pull coefficient relationships for various tire inflation pressure over soil III.

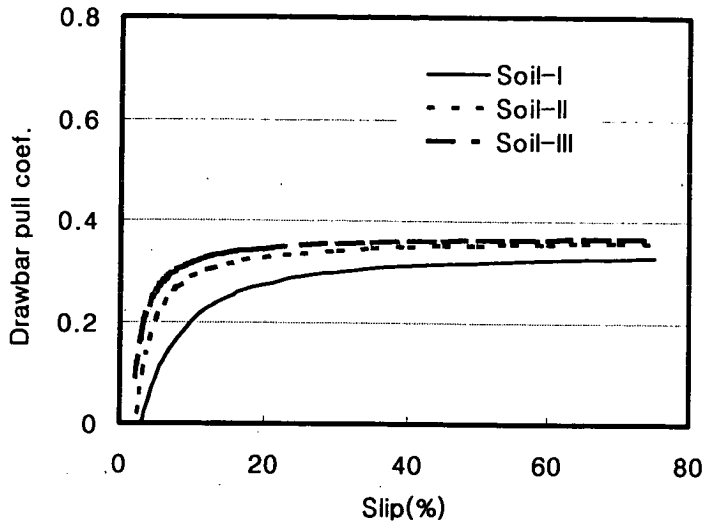


Fig. 3-35 Slip-drawbar pull coefficient relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 120kPa.

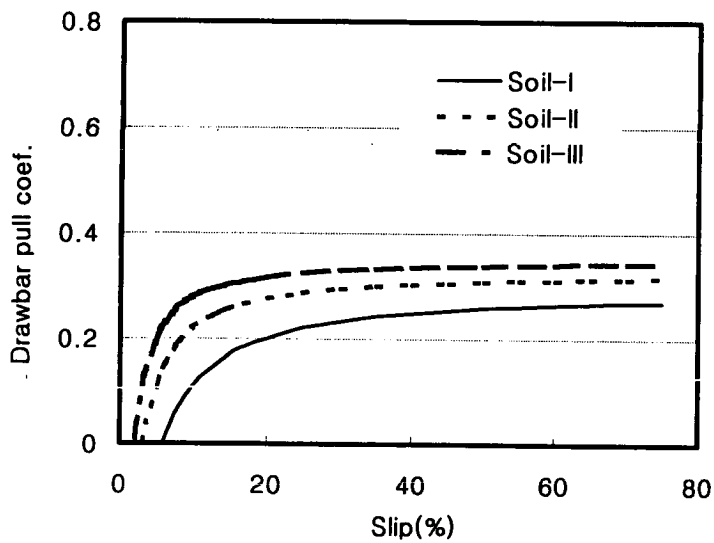


Fig.3-36 Slip-drawbar pull coefficient relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 360kPa.

그림 3-33~그림 3-36의 결과로부터 타이어공기압과 토양상태는 모두 구동륜의 견인계수에 크게 영향을 미치고, 공기압이 낮을수록 그리고 토양이 단단할수록 견인계수가 높게 나타났다. 한편, 공기압이 견인계수에 미치는 효과는 토양이 연약할수록 크고, 토양강도가 견인계수에 미치는 영향은 공기압이 높을수록 크게 나타났다.

마. 구동륜의 슬립-견인효율 관계

그림 3-37은 토양 I에서 공기압의 변화에 따른 슬립-견인효율 관계로서 슬립-견인효율의 관계는 전체 슬립 구간에 걸쳐 공기압이 작을수록 크게 나타났다. 즉, 공기압에 따른 견인효율의 크기는 전체 슬립구간에서 모두 360kPa, 240kPa, 120kPa의 순서로 나타났다. 한편, 각각의 공기압에서의 최대 견인효율은 360kPa의 공기압의 경우에는 45%(슬립 15%)이고, 240kPa에서는 66%(슬립 8%), 그리고 120kPa에서는 75%(슬립 8%)로서 240kPa과 120kPa의 공기압에서의 최대견인효율은 공기압이 360kPa인 경우에 비해 각각 47%와 67% 견인효율의 증가를 나타내었다. 즉, 슬립에 따른 구동륜의 견인효율은 공기압이 낮을수록 크게 나타났고, 또한 공기압이 낮을수록 최대 견인효율도 크게 나타났다.

그림 4-38은 토양 II에서 공기압의 변화에 따른 슬립-견인효율의 관계를 나타낸 결과이다. 그림 4-38에 나타난 바와 같이, 토양 II에서 공기압의 변화에 따른 슬립-견인효율 관계는 그림 4-37(토양 I)에 대해 나타낸 결과와 마찬가지로 공기압이 낮을수록 견인효율이 크게 나타났다. 그러나 각각의 공기압에서의 견인효율 값들간의 차이는 토양 I의 경우에 비해서는 작게 나타났다. 위의 결과로부터 공기압의 감소는 구동륜의 견인효율을 증대시키는 것으로 나타났고, 공기압의 변화에 따른 견인효율의 증대 효과는 토양이 연약할수록 그 효과가 큰 것으로 판단된다.

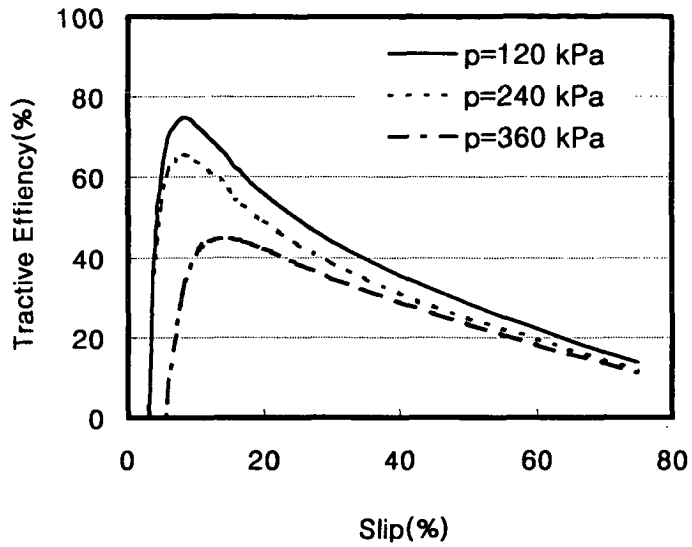


Fig. 4-37 Slip-tractive efficiency relationships for various tire inflation pressure over Soil- I .

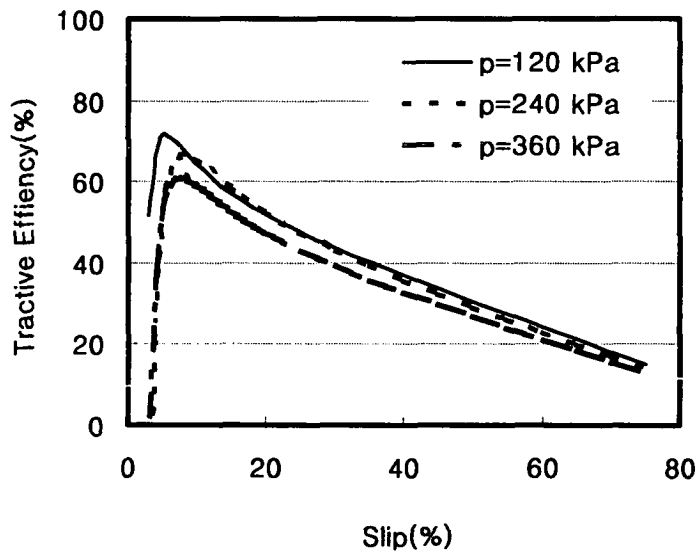


Fig. 4-38 Slip-tractive efficiency relationships for various tire inflation pressure over Soil-II.

그림 4-39는 360kPa의 일정 공기압 조건하에서 토양의 강도가 다른 세 가지 토양에서 측정된 슬립에 따른 견인효율의 관계를 나타낸 결과로서, 세 가지 토양에 대한 슬립에 따른 견인효율의 크기는 전체 슬립구간에서 토양 III, 토양 II, 토양 I의 순서로 나타났다.

한편, 각각의 토양에서의 최대 견인효율은 토양 I의 경우에는 45%(슬립 15%)이고, 토양 II에서는 61%(슬립 8%), 그리고 토양 III에서는 78%(슬립 5%)로서 토양 II와 토양 III에서의 최대 견인효율은 토양 I인 경우에 비해 각각 36%와 73%의 견인효율의 증가를 나타내었다. 즉, 슬립에 따른 구동륜의 견인효율은 토양이 단단할수록 크게 나타났고, 또한 토양이 단단할수록 최대 견인효율도 크게 나타났다.

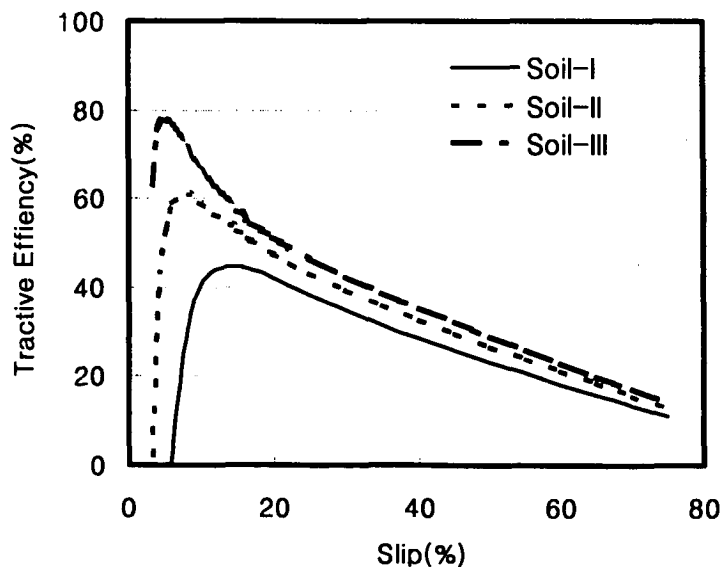


Fig. 4-39 Slip-tractive efficiency relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 360kPa.

그림 4-40은 타이어의 공기압이 240kPa일 때 토양상태에 따른 슬립-견인 효율의 관계를 나타낸 결과로서, 공기압이 240kPa일 때의 토양상태에 따른 슬립-견인효율 관계는 그림 4-39(360kPa)의 결과와 마찬가지로 토양상태가 단단할수록 견인효율이 크게 나타났다. 그러나 견인효율 값들간의 차이는 공기압이 360kPa인 경우에 비해서는 작게 나타났다.

위의 결과로부터 토양상태는 구동륜의 견인효율에 크게 영향을 미치고, 그 경향은 토양상태가 단단할수록 견인효율이 높은 것으로 나타났다. 또한 토양상태에 따른 견인효율의 증대효과는 타이어의 공기압이 클수록 그 효과가 큰 것으로 판단된다.

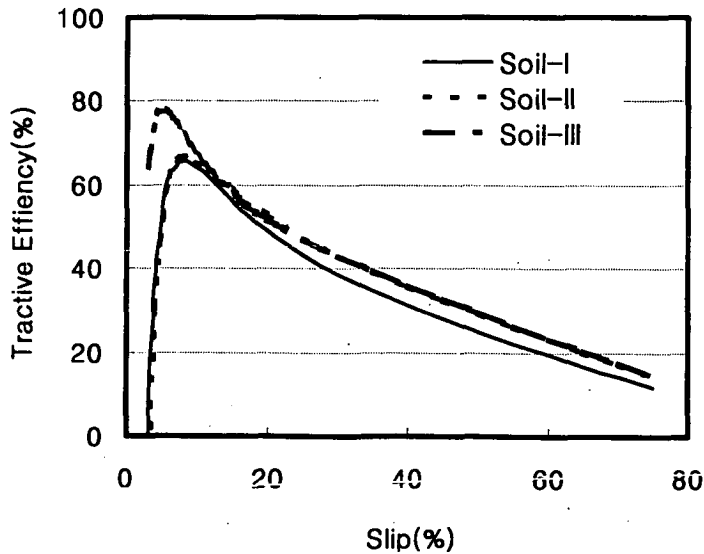


Fig. 4-40 Slip-tractive efficiency relationships for various soil conditions under tire inflation pressure of 240kPa.

4. 요약 및 결론

본 절에서는 토양상태와 타이어의 공기압이 구동륜의 견인성능에 미치는 영향을 구명하기 위해 구동륜의 슬립-침하 특성과 슬립에 따른 구동륜의 추진력, 운동저항, 견인력의 관계를 실험적으로 조사하였다. 실험은 강도가 다른 세 가지 토양조건과 세 수준의 타이어공기압 조건에 대해 인공토조에 서 수행되었으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 구동륜의 슬립-침하관계는 실험이 수행된 세 수준의 공기압과 토양상태에 대해 모두 슬립이 증가함에 따라 침하량도 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 토양상태와 공기압의 변화에 따른 슬립-침하 경향은 일정 공기압 조건에서는 토양상태가 연약할수록 구동륜의 침하가 크고, 슬립에 따른 침하량의 증가경향이 큰 것으로 나타났다. 한편, 일정 토양 조건에서는 공기압이 클수록 구동륜의 침하가 크게 나타났다.
- 2) 타이어의 공기압과 토양상태는 모두 구동륜의 운동저항에 크게 영향을 미치고, 공기압이 낮을수록 그리고 토양이 단단할수록 구동륜의 운동저항은 작게 나타났다. 한편, 토양이 연약할수록 공기압이 운동저항에 미치는 효과가 크게 나타났다.
- 3) 타이어의 공기압은 구동륜의 추진력에 크게 영향을 미치지 않았지만, 토양상태는 구동륜의 추진력에 크게 영향을 미치고, 그 경향은 토양이 단단할수록 추진력이 높은 것으로 나타났다.
- 4) 타이어의 공기압과 토양상태는 모두 구동륜의 견인계수에 크게 영향을

미치고, 공기압이 낮을수록 그리고 토양이 단단할수록 견인계수가 높은 것으로 나타났다. 한편, 공기압이 견인계수에 미치는 효과는 토양이 연약할수록 크고, 토양강도가 견인계수에 미치는 영향은 타이어의 공기압이 높을수록 크게 나타났다.

5) 타이어의 공기압에 따른 구동륜의 견인효율은 타이어의 공기압이 낮을수록 크게 나타났고, 공기압에 따른 견인효율값의 차이는 토양이 연약할수록 크게 나타났다. 또한 일정 타이어공기압에 대해서는 토양이 단단할수록 구동륜의 견인효율이 크게 나타났고, 토양상태에 따른 견인효율값의 차이는 타이어공기압이 높을수록 크게 나타났다.

6) 이상의 결과로부터 구동륜의 견인성능은 토양상태와 타이어의 공기압에 크게 영향을 받고, 연약지에서의 타이어공기압의 감소는 구동륜의 견인성능을 향상시킬 수 있으며 공기압의 감소를 통한 견인성능의 증대 효과는 토양이 연약할수록 큰 것으로 나타났다. 따라서 연약지에서 구동륜의 견인성능은 공기압의 조절을 통한 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

제 4 장 인공토조에서 타이어공기압에 따른 토양 다짐

토양다짐은 트랙터 등과 같은 농기계에 의해 주로 나타난다. 특히 현대에는 대형 농기계의 사용으로 인해 과도한 토양다짐을 초래하는 경우가 많다. 과도한 토양다짐은 토양밀도의 증가를 가져오고, 이에 따라 토양의 공극율이 작아져 토양중의 산소공급이 감소하게 된다. 또한, 물의 부과특성과 보수특성을 변화시켜 물이 토양 속으로 스며드는 것을 저지하게 되어 물은 토양 위로 흘러 토양의 침식을 증가시킨다. 또한 토양다짐은 토양저항력을 증가시켜 뿌리성장을 방해하고 이로 말미암아 작물 수확량의 감소를 초래한다(Gill and Vanden Berg, 1967). Raghavan 등(1979)은 기계류의 사용에 따른 토양다짐과 곡물의 생산량과의 관계에 관한 연구에서 토양다짐은 곡물의 수확량을 30~50%까지 감소시킨다고 보고하였다.

토양다짐에 대한 연구는 미국과 유럽 등지에서 활발히 진행되고 있으나 국내에서는 기계의 성능과 효율에 대한 연구에 비하여 매우 저조한 실정이다. 그러나 국내에서도 농기계의 사용이 증가하고, 또한 그 크기가 점차 대형화되고 있기 때문에 이에 따른 토양다짐의 특성에 관한 지속적인 연구가 필요하다.

토양다짐은 트랙터 등과 같은 대형 농기계의 주행장치 즉, 타이어에 작용하는 동하중이 주요 원인이고, 또한 타이어의 공기압과 통과횟수 등도 토양다짐에 크게 영향을 미친다(Abebe 등, 1989).

Bailey(1996) 등은 토양변형과 밀도의 크기는 타이어의 동하중과 공기압이 증가할수록 크게 나타난다고 보고하였고, Schwanghant(1991) 등은 토양다짐 정도는 타이어 바로 아래에서 최대이고 깊이가 깊어질수록 감소하며

30cm 이상의 깊이에서는 토양다짐의 효과가 거의 나타나지 않는다고 하였다. 또한, Adam(1995) 등은 타이어의 침하와 토양다짐 관계를 실험적으로 조사하여 타이어의 침하가 증가할수록 토양다짐은 증가하나 그 영향은 비선형적인 것으로 보고하였고, 타이어의 침하와 토양다짐의 관계를 지수함수 관계로 나타내었다.

즉, 토양다짐은 타이어의 통과에 따른 타이어-토양간의 상호작용에 의한 타이어 아래 토양속의 응력변화에 따른 토양의 압축에 의한 체적감소 즉, 토양의 변형과 밀도의 증가에 의해 나타나게 된다. 따라서 타이어에 의한 토양다짐 현상을 구명하기 위해서는 타이어에 작용하는 동하중, 공기압, 타이어의 통과횟수의 변화에 따른 토양속 응력분포에 대한 연구가 선행되어야 하고, 다음 단계로서 타이어의 통과에 따른 토양변형 및 밀도의 변화에 관한 연구가 수행되어야 한다. 즉, 타이어 아래에서의 실제적인 토양다짐 정도를 구명하기 위해서는 타이어 아래 토양속 응력분포의 구명뿐만 아니라 응력분포로부터 나타나는 토양의 변형 및 밀도의 변화에 대한 연구가 필요하다.

따라서 본 장에서는 타이어에 의한 토양다짐 현상을 구명하기 위하여 토양다짐에 가장 크게 영향을 미치는 인자로 보고되고 있는 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 변화가 타이어의 접지압 및 토양속 응력분포, 그리고 타이어 아래에서의 토양변형 및 밀도의 변화에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

제1절 타이어공기압에 따른 타이어접지압과 토양속 응력분포

1. 실험장치 및 방법

가. 토양가공

실험토양은 매 실험마다 동일한 토양상태를 유지하기 위하여 인공토조시스템의 토양가공대차를 이용하여 매 실험 전에 20cm 깊이로 로타리작업 2회와 균평작업을 1회 실시하였다. 또한 작은 돌이나 흙덩어리가 압력센서에 미칠 수 있는 영향을 최소화하기 위해 직경 2mm의 채를 이용하여 균일한 토양상태를 유지하도록 하였다. 표 4-1은 토양가공이 수행된 직후에 측정된 토양의 물리적 특성을 나타내고 있다.

Table 4-1 Soil properties of experimental soil

Cone Index (kPa)	Cohesion (kPa)	Internal friction angle (degree)	Moisture content (%)
221.8	3.05	24.4	12

나. 타이어 접지압 및 토양속 응력 측정

타이어가 진행할 때 나타나는 타이어의 접지압을 측정하기 위하여 타이어 트래드의 중심부 표면을 가공하여 소형 압력센서를 부착한 후(그림 4-1), 타이어가 진행할 때 타이어 표면에 부착된 압력센서가 토양표면과 접촉하는 구간에 걸쳐 타이어-토양 접지면에서의 토양반력을 측정함으로써 구하였다.

사용된 압력센서는 일본 KYOWA사에서 생산되는 PS-SF3형의 소형 압력센서

로서 최대 허용압력은 500kPa이다. 한편, 토양속 응력분포는 타이어접지압의 측정에 사용된 것과 동일한 압력센서를 토양표면으로부터 각각 10cm 및 20cm 깊이의 토양속에 묻은 후, 타이어가 토양속 압력센서 위를 통과하는 동안에 토양속 10cm 및 20cm 깊이에 묻혀 있는 압력센서에 나타나는 응력값을 각각 측정함으로써 구하였다.

표 4-2에 접지압 및 토양속 응력 측정에 사용된 센서 및 주요 장비의 제원을 나타내었고, 그림 4-2는 본 실험을 위해 구성한 데이터 수집장치의 주요 흐름도를 나타내고 있다. 한편, 그림 4-3은 타이어의 진행시 타이어접지압 및 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력값이 본 자료수집장치를 통해 모니터에 실시간으로 출력되는 모습을 보여주고 있다.

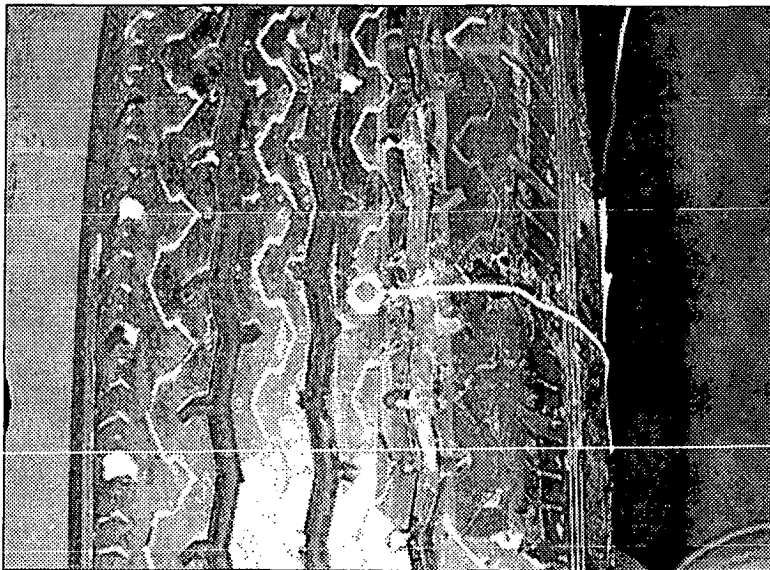


Fig. 4-1 View of pressure transducer for measuring the contact pressure of tire.

Table 4-2 Specifications of devices used for test.

ITEM	Model/Manufacture	Specification
Pressure Transducer	PS-5KASF3/ KYOWA, Japan	maximum pressure : 500kPa
Rotary Encoder	OEW-1000-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1000 pulse/rev.
Rotary Encoder	OEW-1024-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1024 pulse/rev.
A/D Convert	AX-5412 / AXIOM Technology, Taiwan	Resolution : 12 bit A/D ch. : 16S.E./8DI. Sampling rate : 90kHz
Counter Board	YS 7400 / Yoi-Auto-System, Korea	Resolution : 24 bit Counter ch. : 4 Max. counting fre. : 1kHz
Strain Amplifier	DPM-711B / KYOWA, Japan	Channel : 3 Gain : 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100×100 $\mu\epsilon$ Output-V : $\pm 5V$ into 5k Ω

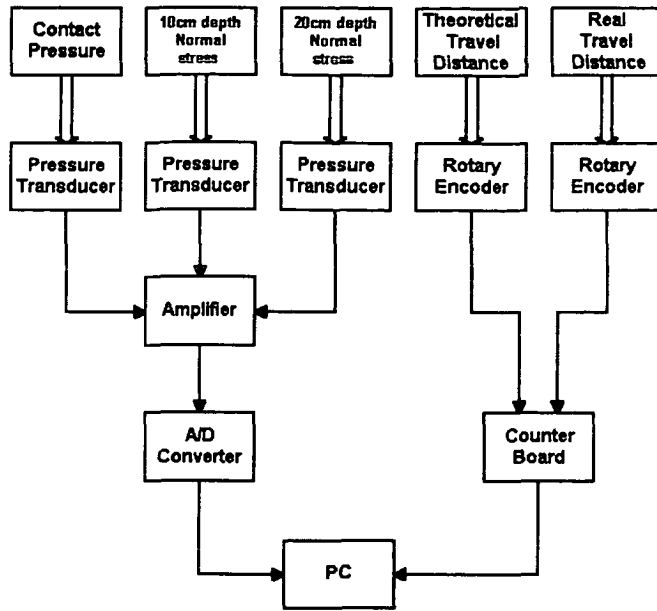


Fig. 4-2 Block diagram of data acquisition system.

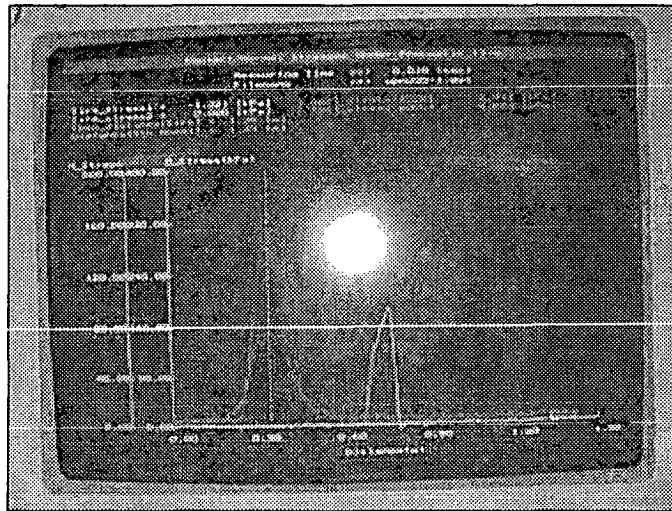


Fig.4-3 Results of normal stress and contact pressure under the centerline of tire.

다. 실험인자

타이어의 동하중과 공기압, 그리고 타이어의 통과횟수가 타이어 접지압과 토양속 응력에 미치는 영향을 조사하기 위하여 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수를 각각 변화시켜가며 실험을 수행하였다.

동하중은 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN의 세 수준으로 선정하였고, 공기압은 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa의 세 수준으로 선정하였다. 한편 타이어의 통과횟수는 1, 2, 3, 4, 5회의 5수준으로 선정하였고, 모든 실험은 3회 반복하였다. 표 4-3에 본 실험에서 수행한 각 변수의 실험조건을 나타내었다.

Table 4-3 Conditions of experimental variables

Variables (unit)	Range
Dynamic load (kN)	1.17, 2.35, 3.53
Inflation pressure (kPa)	103.42, 206.84, 413.69
Number of passes	1, 2, 3, 4, 5

2. 타이어접지압과 토양속 응력분포의 분석

가. 타이어의 동하중과 공기압이 타이어접지압과 토양속응력에 미치는 영향

그림 4-4는 타이어의 동하중과 공기압이 각각 3.53kN과 103.42kPa인 조건에서 타이어의 접지압분포(토양표면)와 타이어 아래 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포를 측정한 결과이다. 그림에서 x축상의 0(zero)은 타이어 중심축의 연직하방의 위치를 나타내고, 음수(-)와 양수(+)부분은 각각 타이어의 진입부(entry part)와 탈출부(exit part)의 연직하방에서 타이어 중심축까지의 수평거리를 나타낸다.

그림 4-4에서 볼 수 있듯이, 타이어가 진행할 때 타이어의 접지압과 토양 속 10cm 및 20cm에서의 응력분포는 타이어의 중심축보다 앞서 나타나기 시작하여 타이어의 중심축에 가까워질수록 응력값이 점점 증가하여 타이어의 중심축 아래에서 최대 응력값이 나타났고, 그 후 타이어의 중심축을 넘어선 탈출부에서의 응력값은 진입부에 비해서 급격히 0으로 감소하였다. 즉, 타이어접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포구간은 세 토양 깊이 모두에서 타이어 진입부에서의 응력분포구간이 탈출부의 경우보다 넓게 나타났다.

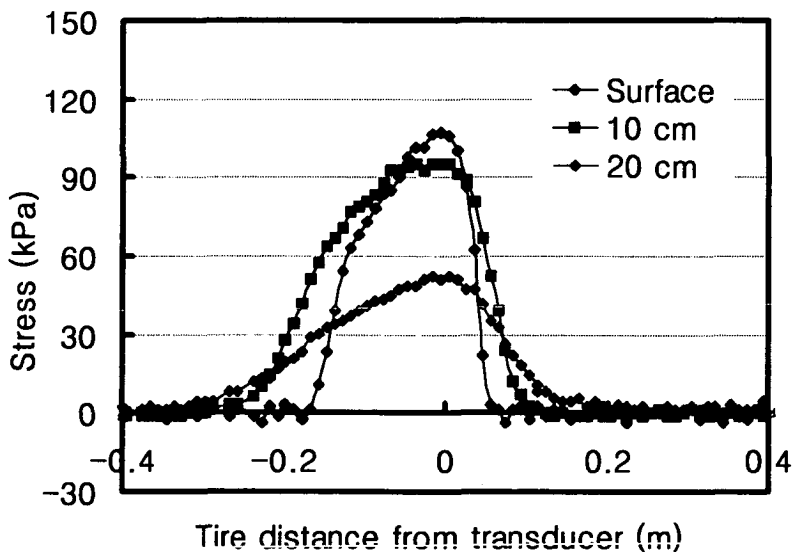


Fig. 4-4 Soil stress distributions at three different soil depth for the tire with the dynamic load of 3.53kN and the inflation pressure of 102.42kPa.

타이어의 접지압 및 토양 속 응력분포구간이 타이어의 중심축을 기준으로 후방보다 전방에서 더욱 넓게 나타난 이유는 토양이 탄-소성 거동을 하기 때문으로 판단된다. 즉, 타이어가 주행할 때 타이어의 진입각은 탈출각보다 크기 때문에 타이어-토양간의 접지면에 있어서 타이어 중심축을 기준으로 전방에서의 접지길이가 후방에서의 접지길이보다 크게 되어 타이어 중심축 아래 전방에서의 응력분포구간이 후방에 비해 더욱 넓게 나타난 것으로 판단된다.

또한 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대응력값은 접지압의 경우가 가장 크고 토양속 10cm 및 20cm의 순으로 나타났다. 이러한 결과로부터 타이어에 의한 토양다짐 효과는 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 들어갈 수록 그 효과가 작은 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서는 타이어에 작용하는 동하중과 타이어의 공기압의 변화가 타이어접지압과 토양속 응력분포에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 그러나 앞의 그림 4-4에 나타난 바와 같이 타이어의 접지압분포와 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포는 x축상의 넓은 구간에 걸쳐 다르게 나타나기 때문에 타이어의 동하중과 공기압의 변화에 따른 접지압 및 토양속 응력값을 직접적으로 비교하기에는 적당치 못하였다. 따라서 동하중과 공기압의 변화에 따른 접지압 및 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력값의 비교는 응력이 나타나는 전체 구간내에서 최대 응력값을 이용하였다.

그림 4-5는 206.84kPa의 일정 공기압 조건에서 타이어의 동하중을 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN으로 변화시켰을 때 타이어의 최대 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값을 측정한 결과를 보여주고 있다.

그림 4-5에 나타난 바와 같이, 타이어의 동하중이 각각 1.17kN, 2.53kN, 3.53kN일 때 토양표면에서의 최대 타이어접지압은 각각 85.242kPa, 114.417kPa, 116.530kPa이고, 토양속 10cm의 경우에는 각각 54.416kPa,

83.557kPa, 97.214kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 27.670kPa, 51.250kPa, 56.095kPa로서 타이어의 동하중이 증가할수록 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값은 증가하였다. 또한 토양 깊이에 따른 최대 응력값은 토양표면에서 가장 크고 토양깊이가 깊어질수록 작아지는 것으로 나타났다.

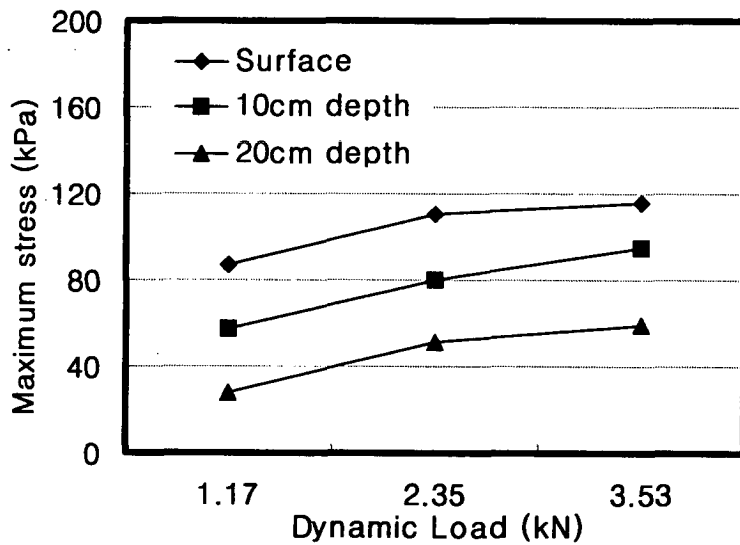


Fig. 4-5 Variations in maximum stress with dynamic load at three different soil depth for the tire with the constant tire inflation pressure of 206.84 kPa.

한편, 타이어의 동하중을 1.17kN에서 2.35kN 및 3.53kN으로 각각 100% 및 200% 증가시켰을 때의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대응력값의 증가량은 접지압의 경우 각각 29.185kPa, 31.288kPa, 토양속 10cm의 경우에는 각각 29.141kPa, 42.798kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 23.580kPa, 28.425kPa로 나타났다. 즉, 타이어의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값은 세 수준의 토양깊이에 대해 모두 타이어의 동하중이 증가함에 따라 함께 증가하는 것으로 나타났고, 동하중의 증가에 따른 최대 응력값의 증가량은 세 토양 깊이에 대해 큰 차이를 보이지 않았다. 또한 응력값의 증가경향은 세 수준의 토양깊이에 대해 모두 동하중이 증가함에 따라 증가율이 감소하는 지수곡선의 형태로 나타났다.

이와 같이 타이어의 동하중이 증가함에 따라 타이어의 접지압과 토양속 최대 응력값의 증가량이 감소하는 이유는 동하중이 증가할 경우 타이어의 침하가 증가하게 되어 타이어-토양간의 접지면적이 넓어지기 때문으로 판단된다. 또한 동하중의 증가는 타이어의 변형 특히 타이어의 트래드중심부의 변형을 유발하여 트래드 중심부의 형태가 곡선에서 평면에 가까운 형태로 변형되어 트래드의 중심부분에서 지지되던 하중의 일부가 트래드의 측면으로 이동하기 때문으로 판단된다.

그림 4-6은 2.35kN의 일정 동하중 조건에서 타이어의 공기압이 각각 103.42kPa, 206.82kPa, 413.69kPa 일 때 측정된 타이어의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값을 나타내고 있다.

그림 4-6에서 타이어의 공기압이 각각 103.42 kPa, 206.84kPa, 413.69kPa 일 때 토양표면에서의 최대 접지압은 각각 86.62kPa, 114.417kPa, 129.617kPa이고, 토양속 10cm의 경우에는 각각 68.766kPa, 83.557kPa, 95.88kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 48.218kPa, 51.270kPa, 59.815kPa로서 타이어의 공기압이 증가할수록 타이어의 접지압과 토양속

10cm 및 20cm에서의 최대 응력값은 증가하였다. 또한 토양 깊이에 따른 최대 응력값은 토양표면에서 가장 크고 토양깊이가 깊어질수록 작아지는 것으로 나타났다.

한편, 타이어의 공기압이 103.42kPa에서 206.84kPa 및 413.69kPa으로 각각 100% 및 300% 증가되었을 때의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값의 증가량은 접지압의 경우에는 각각 27.796kPa, 42.996kPa, 토양속 10cm의 경우에는 각각 14.791kPa, 27.115kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 3.052kPa, 11.597kPa로 나타났다.

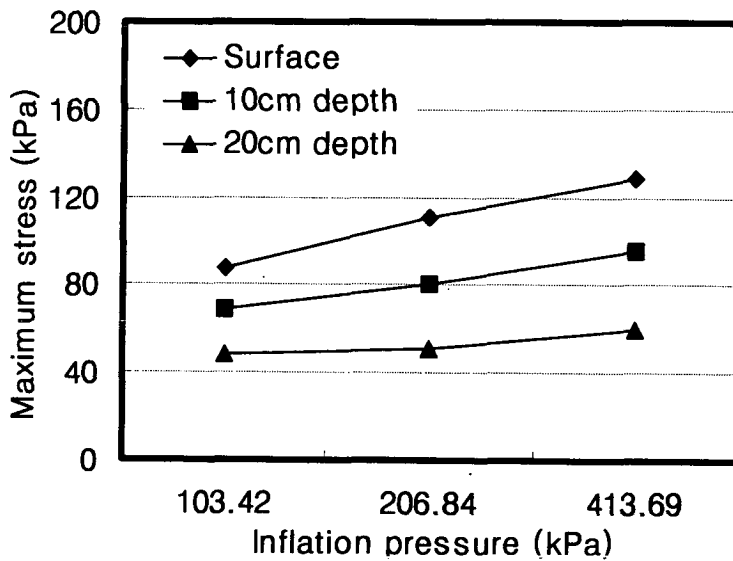


Fig. 4-6 Variations in maximum stress with inflation pressure at three different depth of soil for the tire with the constant dynamic load of 2.35 kN.

그림 4-6의 결과로부터, 타이어공기압의 증가는 전술한 동하중의 결과(그림 4-5)와 마찬가지로 접지압 및 토양속 응력값을 증가시키는 것으로 나타났으나 공기압의 증가에 따른 세 토양 깊이에서의 최대 응력값의 증가량은 접지압의 경우가 가장 크게 나타났고, 토양속으로 들어갈수록 증가량이 작게 나타났다. 즉, 공기압의 증가에 따른 토양 깊이별 다짐효과는 토양표면에서 가장 크고, 토양 깊이가 깊어질수록 작아지는 것으로 나타났다. 또한 공기압의 증가에 따른 접지압 및 토양속 응력의 증가경향은 동하중을 증가시켰을 때와는 달리 상대적으로 거의 선형적인 경향을 나타내었다.

나. 타이어의 통과횟수가 타이어의 접지압 및 토양속 응력에 미치는 영향

그림 4-7은 타이어의 동하중과 공기압이 각각 1.17kN과 413.69kPa인 조건에서 타이어의 통과 횟수가 각각 1, 3, 5회일 때 측정된 타이어의 접지압분포를 나타내고 있고, 그림 4-8은 같은 조건에서 측정된 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포를 나타내고 있다.

그림 4-7과 4-8에서 볼 수 있듯이, 통과횟수에 따른 타이어의 접지압분포와 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력분포는 모두 통과횟수가 많아짐에 따라 측정구간은 감소하였고, 최대 응력은 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 결과는 타이어가 토양 위를 처음(1회) 통과할 때는 토양이 상대적으로 연약하여 타이어의 침하가 크게 되어 타이어-토양간의 접지구간이 넓게 나타나지만 통과횟수가 증가할수록 토양은 점점 다져져 타이어의 침하가 작아지게 되어 타이어-토양간의 접지면적이 감소하기 때문이다. 즉, 통과횟수의 증가에 따른 접지면적의 감소는 타이어접지압 및 토양속 응력측정구간의 감소로 나타나고, 이러한 접지면적의 감소가 타이어의 최대 접지압 및 토양속 최대 응력값의 증가로 나타나게 된 것으로 판단된다.

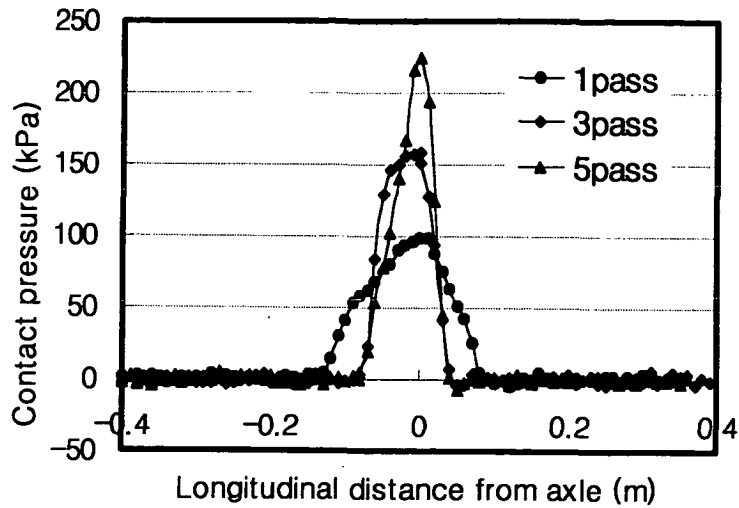


Fig. 4-7 Effect of number of passes on contact pressure for the tire with the dynamic load of 1.17kN and the inflation pressure of 413.69 kPa.

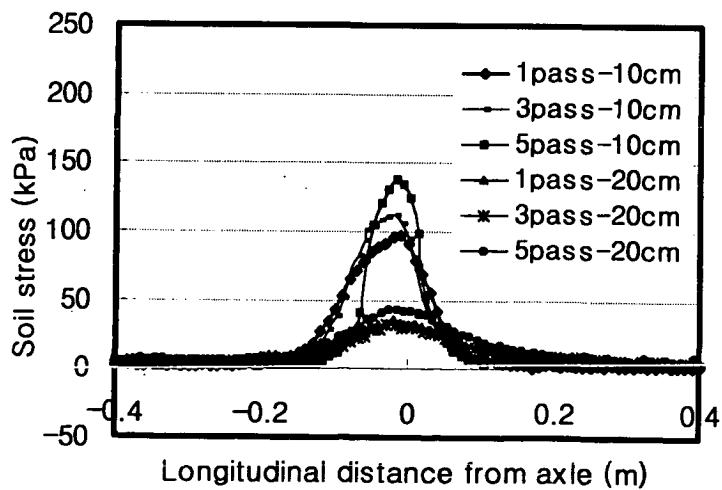


Fig. 4-8 Effect of number of passes on soil stresses for the tire with the dynamic load of 1.17 kN and the inflation pressure of 413.69 kPa.

그림 4-9는 타이어의 동하중과 공기압이 각각 3.35kN, 413.69kPa인 조건에서 통과횟수의 변화에 따른 타이어의 최대 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값을 측정한 결과이다.

그림 4-9에 나타난 바와 같이 1~5회까지 통과횟수에 증가에 따른 세 토양 깊이에서의 최대 응력값은 접지압의 경우 각각 151.369kPa, 198.947kPa, 212.402kPa, 241.693kPa, 233.155kPa, 토양속 10cm의 경우에는 각각 97.280kPa, 155.843kPa, 162.761kPa, 166.423kPa, 168.864kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 56.095 kPa, 79.346kPa, 84.228kPa, 82.228kPa, 84.229 kPa로서 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값은 세 경우 모두 통과횟수가 많아질수록 증가하는 것으로 나타났다.

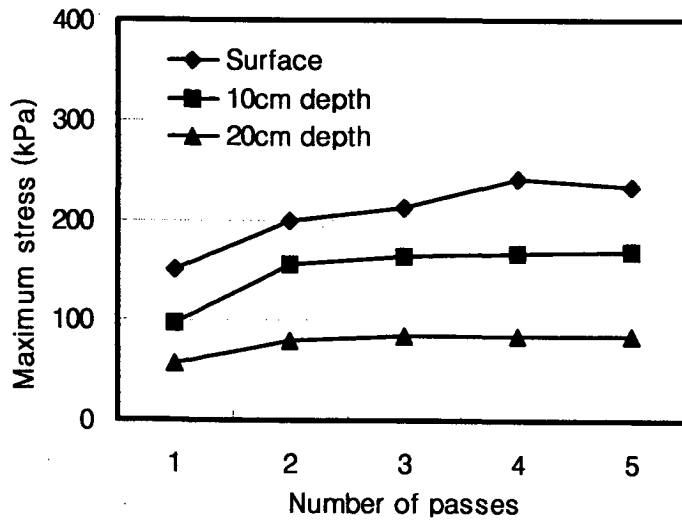


Fig. 4-9 Variations in maximum stress with number of passes at three different soil depth for the tire with dynamic load of 3.35kN and inflation pressure of 206.84kPa.

또한 타이어의 1회 통과에 대한 2~5회 통과후의 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 최대 응력값의 증가량은 접지압의 경우에는 각각 47.578kPa, 61.033kPa, 90.324kPa, 81.786kPa, 토양속 10cm의 경우에는 각각 58.563kPa, 65.481kPa, 69.143kPa, 71.584kPa, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 23.251kPa, 28.133kPa, 24.133kPa, 28.134kPa로서 1회 통과에 대해 통과횟수의 증가에 따른 응력값의 증가 경향은 2회 통과했을 때의 증가량이 가장 크게 나타났고, 그 후 통과횟수가 증가할수록 증가량이 점점 감소하여 특정 통과횟수 이후에는 응력값의 증가가 거의 나타나지 않았다. 즉, 통과횟수의 증가에 따른 접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력값은 세 경우 모두 지수곡선 형태로 증가하는 경향을 나타내었다.

한편, 통과횟수의 증가에 따른 토양 깊이별 최대응력값의 증가량은 접지압의 경우가 가장 크고 토양속 10cm 및 20cm의 순서로 나타났다. 즉, 통과횟수에 따른 토양 깊이별 최대 응력값의 증가량은 토양속으로 들어갈수록 작은 것으로 나타났다.

이러한 결과로부터 타이어의 통과횟수의 증가는 토양다짐의 증가를 보이는 것으로 나타났고, 타이어의 1회 통과에 대해 통과횟수의 증가에 따른 토양의 추가적인 다짐효과는 통과횟수가 증가할수록 그 영향이 작아지는 것으로 나타났다. 또한 통과횟수의 증가에 따른 토양 깊이별 다짐효과는 토양 표면에서 가장 크고 토양속으로 내려갈수록 감소하는 것으로 판단된다.

3. 요약 및 결론

본 절에에서는 타이어에 의한 토양다짐 현상을 구명하기 위한 선행 연구로서 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 변화가 타이어접지압과 토양속(토양속 10cm 및 20cm) 응력값에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다.

실험은 인공토조내의 사양토에서 단일 타이어 구동시스템을 이용하여 수행되었으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 세 경우 모두 토양표면에서의 타이어접지압과 토양속 10cm 및 20cm에서의 응력값을 증가시켰다. 따라서 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 모두 토양다짐을 증가시키는 것으로 판단된다.
- 2) 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 변화에 따른 토양깊이별 응력값의 크기는 세 경우 모두 접지압, 토양속 10cm 및 20cm의 순서로서 토양속으로 들어갈수록 응력값이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 토양깊이별 다짐효과는 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 들어갈수록 감소하는 것으로 판단된다.
- 3) 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가에 따른 세 수준의 토양 깊이별 응력값의 증가경향은 동하중과 통과횟수를 증가시켰을 경우에는 지수곡선의 증가경향을 나타내었으나 공기압을 증가시킨 경우에는 동하중을 증가시킨 경우에 비해 상대적으로 선형적인 증가경향을 나타내었다.
- 4) 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가에 따른 응력값의 절대적인 증가량은 공기압을 증가시킨 경우가 동하중과 통과횟수를 증가시킨 경우에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 공기압의 증가는 동하중과 통과횟수를 증가시킨 경우에 비해 상대적으로 토양다짐 효과가 작은 것으로 판단된다.

제2절 타이어공기압에 따른 토양변형과 토양다짐

1. 실험장치 및 방법

가. 실험인자

타이어 아래에서의 토양다짐 현상을 조사하기 위하여 토양다짐에 크게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는 타이어의 동하중, 공기압, 그리고 통과 횟수의 변화에 따른 타이어 아래에서의 토양침하와 토양의 변형(체적변화) 및 밀도변화를 측정하였다.

타이어의 동하중과 공기압은 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN 및 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa의 세 수준으로 선정하였고, 타이어의 통과횟수는 1, 3, 5회의 3수준으로 선정하였으며, 모든 실험은 3회 반복하였다. 표 4-4에 본 실험에서 선정한 각 변수들의 실험조건을 나타내었다.

Table 4-4 Levels of experimental variables

Variables (unit)	Levels
Dynamic load (kN)	1.17, 2.35, 3.53
Inflation pressure (kPa)	103.42, 206.84, 413.69
Number of passes	1, 3, 5

나. 타이어 아래 토양의 침하량 측정

타이어 아래 토양의 침하량을 조사하기 위해 토양표면(타이어-토양 접지면)과 토양속 10cm 및 20cm 깊이에서 토양층의 침하분포를 측정하였다.

토양표면에서의 침하량은 타이어가 통과한 후 토양표면에 나타난 타이어의 바퀴자국(rut depth distribution of tire)을 측정함으로써 결정하였고, 토양속 10cm 및 20cm 깊이의 토양층의 침하량은 타이어가 통과하기 전에 토양속 10cm 및 20cm 깊이 토양층 각각에 그림 4-10과 같이 은박지(aluminum foil)를 묻은 후, 타이어가 통과한 후에 각 토양층에 위치한 은박지의 변형량을 측정함으로써 구하였다. 즉, 타이어가 통과하기 전 기준 토양층(0, 10, 20cm)에 대한 타이어 통과 후의 변형된 토양층의 차로써 결정하였다. 그림 4-11은 실제로 타이어가 통과한 후 토양표면에서의 침하형태와 토양속 10cm 및 20cm에서 은박지가 변형된 형태를 보여주고 있다.

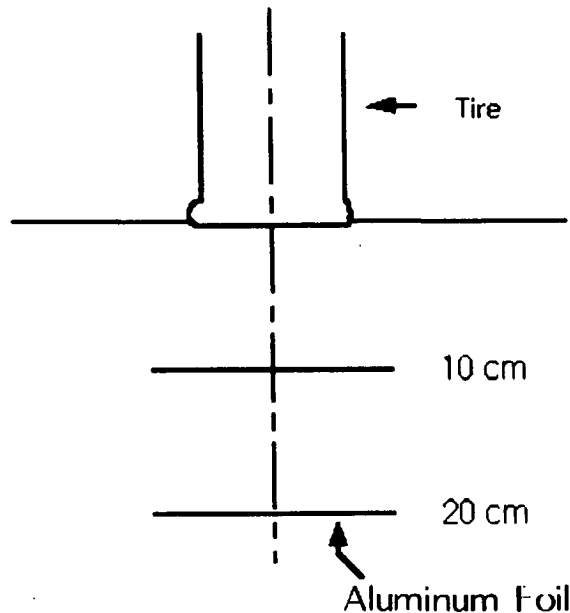


Fig. 4-10 view of tire and aluminum foils under the tire.

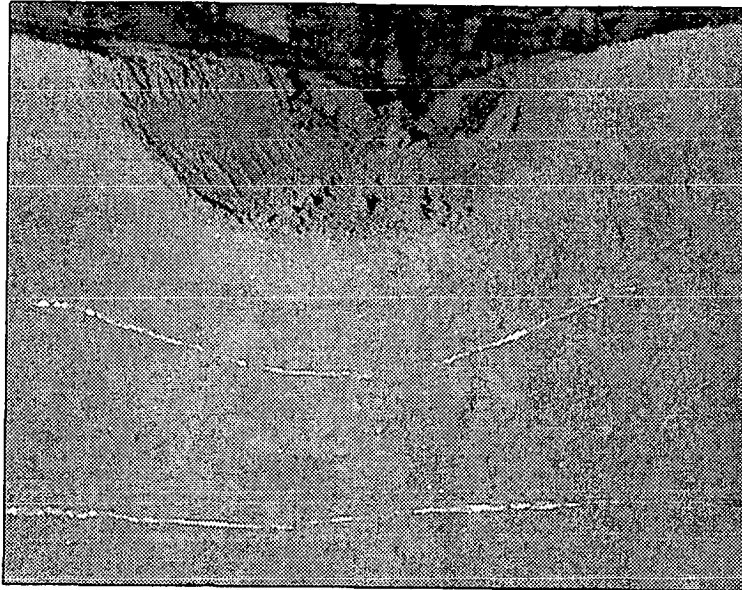


Fig. 4-11 Example of soil deformation under a tire.

다. 타이어 아래 토양변형 및 밀도 측정

토양 표면에 타이어의 하중 등과 같은 외부의 힘이 작용할 경우, 토양은 표층뿐만 아니라 토양속 특정 깊이의 토양층에서도 연직하방으로 토양층의 이동이 발생한다. 이러한 토양층의 이동은 토양표면과 토양속 임의 깊이의 층 또는 토양속 임의의 두 층 사이에 존재하는 토양의 압축과 토양 내 유체의 부분적 방출 등에 의한 공극의 감소로 인해 두 토양층 사이 토양에 대해 체적 감소와 이에 따른 밀도의 증가 즉, 토양다짐을 초래하게 된다. 따라서 타이어에 의한 토양의 다짐정도는 토양속 특정 위치에 있는 두 토양층 사이 일정 구간내의 토양에 대해 타이어의 통과 전과 통과 후의 체적변화와 밀도변화를 분석함으로써 평가할 수 있다.

타이어의 통과에 따른 토양밀도의 변화는 두 토양층 사이의 구간(0-10cm 구간, 10-20cm구간)에서 타이어가 통과하기 전의 토양밀도(ρ_{before})와 통과

후의 토양밀도(ρ_{after})를 측정한 후 통과 전에 대한 통과 후의 밀도비 ($\rho_{ratio} = \rho_{after}/\rho_{before}$)를 이용하여 비교·분석하였다.

본 실험에서는 타이어가 통과하기 전 0-10cm 구간의 토양밀도는 1.133~1.176g/cm³의 범위였고, 토양속 10-20cm 구간은 1.233~1.336g/cm³의 범위로서 각 구간의 평균 밀도는 각각 1.166g/cm³과 1.292g/cm³ 이었다.

한편, 임의의 두 토양층 사이의 토양에 대한 변형량은 직접적으로 측정하기가 곤란하기 때문에 본 연구에서는 두 토양층 사이의 토양에 대한 체적변화를 측정함으로써 결정하였다. 토양의 체적변화를 측정하기 위해서는 타이어 궤적 아래의 토양에 대해 타이어의 진행방향(x), 측방향(y), 연직방향(z)에서의 변형량이 필요하다. 그러나 타이어 진행방향의 토양변형은 타이어 진행방향의 모든 궤적상에서 일정한 것으로 볼 수 있기 때문에 본 연구에서는 타이어 아래 토양의 체적변화를 결정하는데 있어 타이어 진행 방향의 정면에서 보았을 때 나타나는 두 토양층 사이 토양에 대한 단면적의 변화를 측정함으로써 구하였다. 즉, 세 깊이(0cm, 10cm, 20cm)의 토양층에 대해 타이어의 통과 전과 통과 후의 침하분포를 측정한 후, 세 토양층 사이의 두 구간(0-10cm, 10-20cm)에 대해서 타이어의 통과전 단면적(A_{before})과 통과후의 단면적(A_{after})을 측정한 후, 통과 전에 대한 통과 후의 면적비 ($A_{ratio} = A_{after}/A_{before}$)를 이용하였다.

그림 4-12는 타이어가 토양 위를 지나간 후 토양속 단면 형태를 타이어 진행방향의 정면에서 보았을 때, 토양속 특정 깊이에서의 토양층의 침하를 도식적으로 나타낸 그림이다. 그림 4-12에서 점선은 타이어가 통과하기 전의 토양층을 나타내고 있고, 실선은 타이어 통과후의 변형된 토양층의 형태를 나타내고 있다.

그림 4-12에서 볼 수 있듯이, 토양표면 위에서 타이어가 통과한 후의 토

양층의 침하는 타이어의 중심축 아래에서 가장 크게 나타나고, 토양 깊이에 따른 토양층의 침하경향은 일반적으로 토양 표면에서 가장 크고 토양속 아래로 내려갈수록 감소하게 된다. 따라서 타이어 통과후의 토양층은 곡선형태로 연직하방으로 이동하게 되고, 토양속 특정 위치에 있는 두 층 사이의 토양은 단면적과 밀도의 변화가 발생한다. 예를 들어, 그림 4-12에 나타낸 바와 같이 토양 표면과 토양속 5cm 사이 구간의 토양은 타이어가 지나가면서 침하가 발생하고, 깊이가 다른 두 토양층의 침하는 토양속 5cm의 경우보다 토양 표면에서 더욱 크게 나타나기 때문에 두 구간내의 토양은 타이어가 지나가기 전에 비해 단면적의 감소와 밀도의 증가가 발생한다. 이러한 관계를 이용하여 토양표면을 포함하여 토양속 특정 깊이층 사이에 대해 타이어의 통과전과 통과후의 침하변화 및 밀도 변화를 비교함으로써 토양의 다짐 정도를 분석하였다.

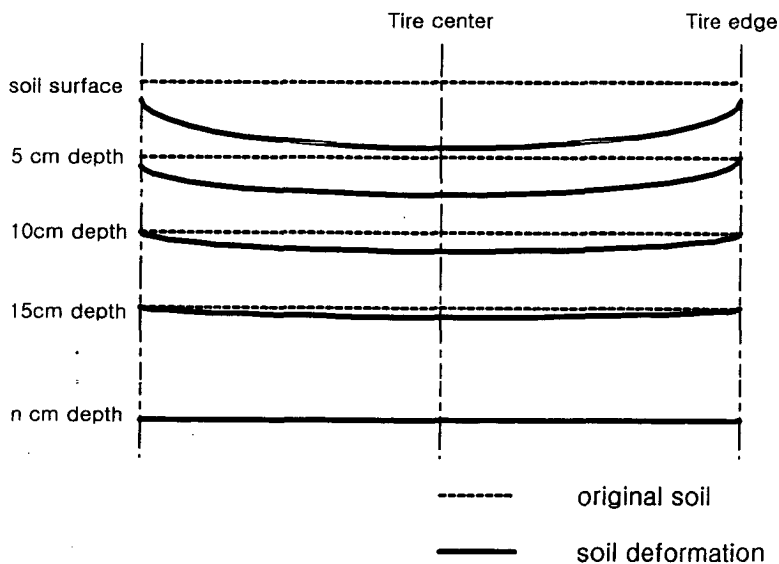


Fig. 4-12 Simplified soil deformation at different depth after a passage of a pneumatic tire.

토양의 침하를 분석하기 위하여 그림 4-13에 나타낸 바와 같이, 타이어에 의해 토양 표면의 침하가 나타나는 부분에서부터 타이어 중심까지의 구간을 수평으로 r 등분하고, 토양 표면에서 연직하방으로 토양속 특정 깊이까지를 토양의 다짐 정도를 구하고자 하는 간격으로 t 등분 하였다. 그림 4-13에서 점선은 타이어 아래 특정 깊이에 위치한 토양층의 타이어 통과전의 침하 형태이고, 실선은 통과 후의 침하 형태를 도식적으로 나타낸 결과이다.

그림 4-13으로부터 타이어의 통과 전과 통과 후의 침하에 의한 특정 위치에서의 두 토양층의 단면적 비는 다음과 같이 식 (4-1)로부터 구할 수 있다.

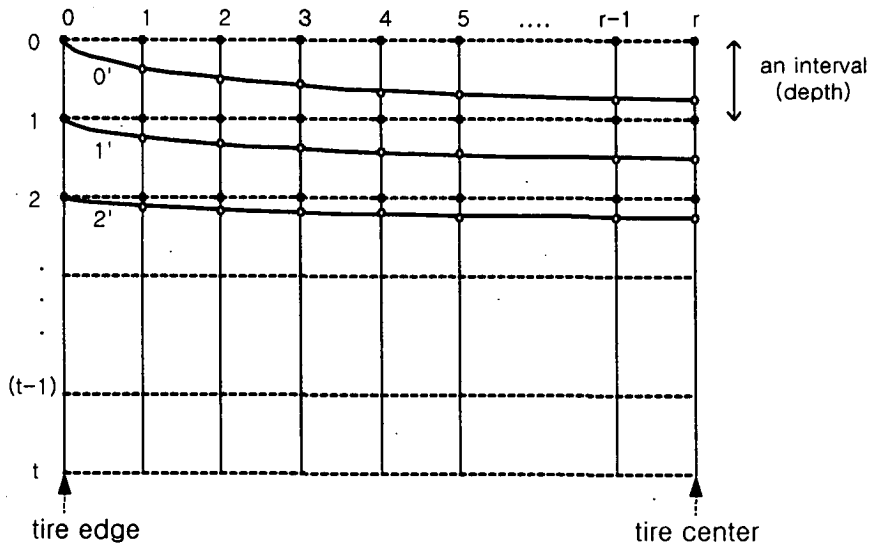


Fig. 4-13 Analysis for soil deformation at different depth under a tire.

$$(A_{ratio})_{i-1,i} = \frac{\sum_{j=0}^r (Z_{i,j} - Z_{i-1,j})}{\sum_{j=0}^r (Z_{i,j} - Z_{i-1,j})} \quad \text{-----} \quad (4-1)$$

여기서, $(A_{ratio})_{i-1,i}$: $i-1$ 번째와 i 번째 토양층 사이 토양의 타이어 통과전과 통과후의 면적비, ($i = 1, 2, 3, \dots, t$)

$Z_{i,j}$: 타이어 통과전 i 번째 토양층에서 타이어의 가장자리에서부터 j 번째 위치에서의 침하, (cm)
($j = 1, 2, 3, \dots, r$)

$Z_{i-1,j}$: 타이어 통과전 $i-1$ 번째 토양층에서 타이어 가장자리에서부터 j 번째 위치에서의 침하, (cm)

$Z_{i',j}$: 타이어 통과 후 i' 번째 토양층에서 타이어에 의해 토양 표면의 침하가 나타나는 부분에서 j 번째 위치에서의 침하, (cm), ($i' = 1', 2', 3', \dots, t'$)

$Z_{i'-1,j}$: 타이어 통과후 $i'-1$ 번째 토양층에서 타이어에 의해 토양 표면의 침하가 나타나는 부분에서 j 번째 위치에서의 침하, (cm)

식 (4-1)의 $(A_{ratio})_{i-1,i}$ 로부터 타이어가 통과한 후의 토양층은 통과 전에 비해 어느 정도 침하했는지를 판단할 수 있다. 또한 타이어의 통과 전과 통과 후의 두 토양층 사이의 밀도 변화는 타이어의 통과 전 밀도(ρ_{before})와 통과 후 밀도(ρ_{after})를 측정한 후, 식 (4-2)와 같이 통과 전 밀도에 대한 통과 후 밀도의 비(ρ_{ratio})로서 판단할 수 있다.

$$\rho_{ratio} = \frac{\rho_{after}}{\rho_{before}} \quad \text{-----} \quad (4-2)$$

여기서, ρ_{ratio} : 타이어 통과 전 밀도와 통과 후 밀도의 비

ρ_{before} : 타이어 통과 전의 밀도

ρ_{after} : 타이어 통과 후의 밀도

식 (4-1)에서 통과 전에 대한 통과 후의 두 토양층 사이의 면적비의 값은 일반적으로 1보다 작게 나타나고, 면적비의 값이 1보다 작은 경우에 토양은 침하가 발생한 경우이고, 그 값이 작을수록 즉, 0에 가까워질수록 토양의 침하 및 토양다짐이 많이 발생했다고 볼 수 있다. 또한 식 (4-2)에서 밀도 비가 1보다 클 경우에는 밀도의 증가가 발생한 경우이고, 그 값이 커질수록 밀도의 증가가 크고 토양다짐이 크데 나타난 것으로 볼 수 있다.

3. 결과 및 고찰

가. 타이어 아래 토양의 침하

그림 4-14는 103.42kPa의 공기압과 1.17kN의 동하중하에서 타이어가 통과 한 후에 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm 깊이에서 측정한 대표적인 침하분포를 나타낸 결과이다. 타이어 아래 세 깊이의 토양층에서의 침하형태는 토양표면의 경우에는 타이어의 형상을 유지하여 거의 곡선 형태를 나타냈으나 토양 깊이가 깊어짐에 따라 토양층의 침하형태는 직선에 가까운 형태로 나타났다. 또한 세 깊이에서 토양층의 침하량은 토양 속으로 깊이 내려갈수록 작게 나타났으며 토양속 20cm 깊이에서는 침하량이 가장 작았다.

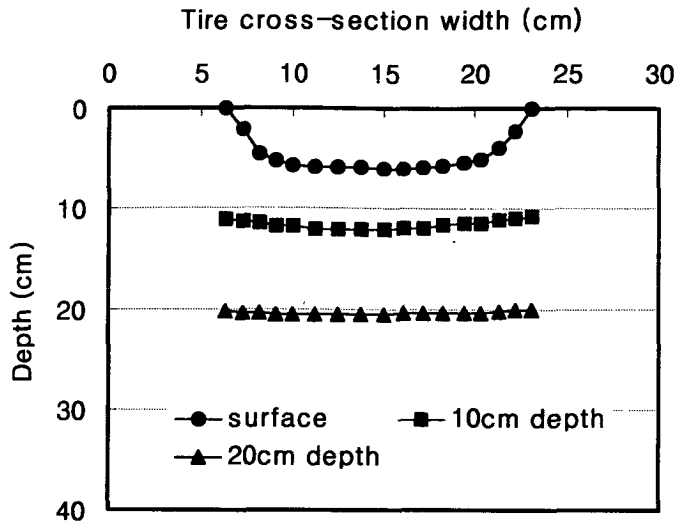


Fig. 4-14 Soil sinkage distribution under the tire with inflation pressure of 103.42kPa and dynamic load of 1.17kN.

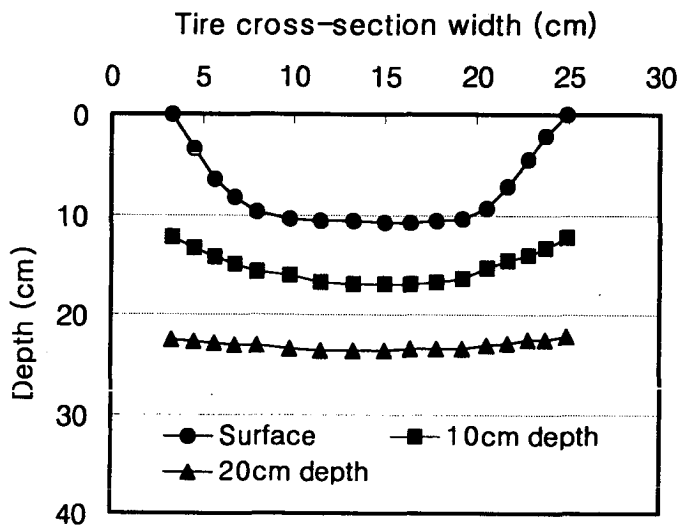


Fig. 4-15 Soil sinkage distribution under the tire with inflation pressure of 413.69kPa and dynamic load of 3.53kN.

한편, 그림 4-15는 타이어의 동하중과 공기압을 각각 3.53kN과 413.69 kPa로 증가시킨 조건에서 측정한 타이어 아래에서의 침하분포로서 그림 4-14의 결과와 유사하게 토양속으로 깊이 들어갈수록 침하량은 감소하고, 침하분포는 점차 직선 형태로 나타났다. 그러나 세 깊이의 토양층에서의 침하량은 모두 그림 3의 결과에 비해서는 크게 나타났고, 침하형태에 있어서도 그림 4-13의 결과에 비해서는 상대적으로 곡선에 가까운 형태를 나타내었다.

그림 4-14와 4-15의 결과로부터 타이어의 동하중과 공기압의 변화는 타이어 아래 토양의 침하형태 및 침하량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 타이어 아래 토양층의 침하형태는 토양 깊이 뿐만아니라 동하중 및 공기압에 따라서도 침하분포가 다르게 나타나기 때문에 동하중과 공기압의 변화에 따른 토양층의 침하분포를 직접적으로 비교하기에는 적합하지 않았다. 따라서 본 연구에서는 동하중과 공기압의 변화에 따른 타이어 아래 토양층의 침하를 비교하는데 있어 각각의 토양층에서 측정한 침하분포값 중 타이어 중심 아래에서의 최대 침하량(이하 침하량)을 이용하였다.

그림 4-16은 413.69kPa의 일정 공기압 조건에서 타이어의 동하중을 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN으로 변화시켰을 때 타이어 아래 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm 깊이에서 측정한 동하중의 변화에 따른 침하 관계를 보여 주고 있다.

그림 4-16에 나타난 바와 같이 타이어의 동하중이 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN일 때 타이어 통과 전의 세 토양깊이에서 초기 기준면(토양표면, 10cm, 20cm)에 대한 타이어 통과후의 최대 침하량은 토양표면의 경우 각각 6.13cm, 8.65cm, 11.06cm이고, 토양속 10cm의 경우에는 각각 3.0cm, 4.55cm, 7.01cm, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 1.10cm, 1.60cm, 2.95cm로서 타이어의 동하중이 증가할수록 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm

에서의 침하량이 증가하는 것으로 나타났고, 동하중의 증가에 따른 침하량의 증가경향은 토양깊이에 따라 약간의 차이를 나타내고는 있지만 세 깊이의 토양층에서 모두 거의 선형적인 관계를 나타내었다. 또한, 토양 깊이에 따른 침하량의 크기는 세 수준의 동하중에 대해서 모두 토양표면, 토양속 10cm, 토양속 20cm의 순서로서 토양깊이가 깊을수록 침하량이 작은 것으로 나타났다.

그림 4-17은 3.53kN의 일정 동하중 조건하에서 타이어의 공기압이 각각 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa일 때 측정한 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm에서의 침하량을 나타낸 결과이다.

그림 4-17에서 공기압이 각각 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa일 때 토양표면에서의 침하량은 각각 9.88cm, 10.05cm, 11.06cm이고, 토양속 10cm의 경우에는 각각 6.25cm, 6.68cm, 7.01cm, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 2.03cm, 2.65cm, 2.95cm로서 타이어의 공기압이 증가할수록 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm에서의 침하량은 증가하였다.

또한, 토양 깊이에 따른 침하량의 크기는 동하중의 경우와 마찬가지로 세 수준의 공기압에 대해서 모두 토양표면에서 가장 크고, 토양 깊이가 깊어질수록 작아지는 것으로 나타났다.

한편, 공기압의 증가에 따른 침하량의 증가경향은 동하중을 증가시킨 경우와 마찬가지로 거의 선형적인 증가경향을 나타내었으나, 공기압의 증가에 따른 침하량의 증가율(기울기)은 동하중을 증가시킨 경우에 비해서 상대적으로 작게 나타났다. 따라서 본 실험범위 내에서 동하중의 증가는 공기압을 증가시킨 경우에 비해 타이어 아래 토양의 침하에 미치는 효과가 큰 것으로 판단된다.

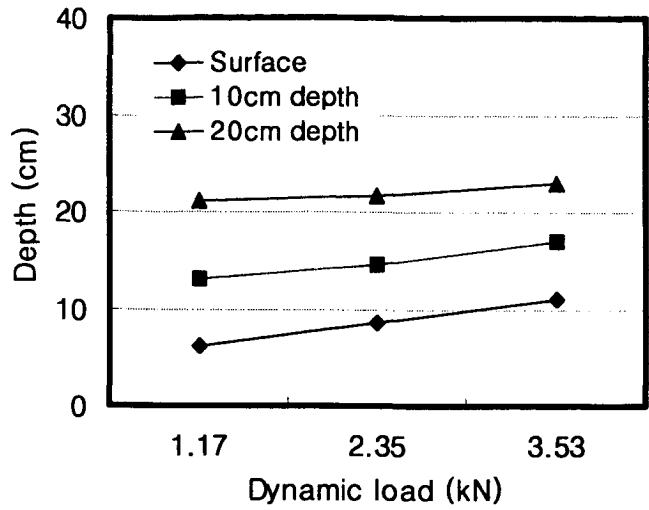


Fig. 4-16 Variations in maximum sinkage with dynamic load at three different soil depth for the tire with the constant inflation pressure of 413.69kPa.

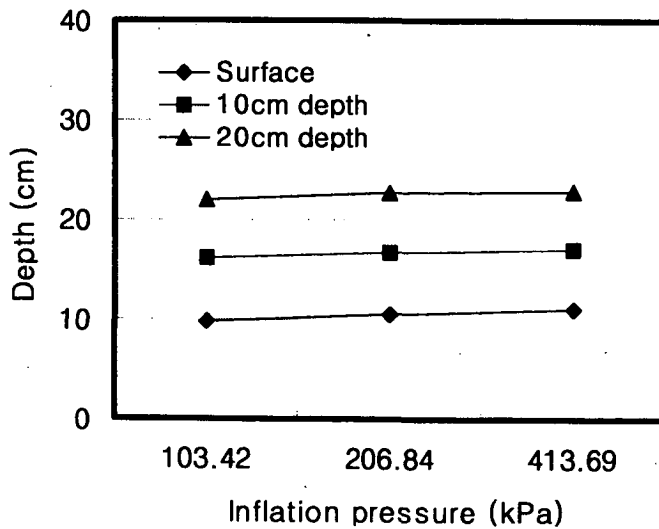


Fig. 4-17 Variations in maximum sinkage with inflation pressure at three different soil depth for the tire with the dynamic load of 3.53kN.

그림 4-18은 타이어의 동하중과 공기압이 각각 1.17kN과 103.42kPa인 조건에서 타이어의 통과횟수(1, 3, 5회)에 따른 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm에서의 침하분포를 측정한 결과이다.

그림 4-18에서 볼 수 있듯이 타이어의 통과횟수에 따른 토양표면, 토양속 10cm 및 20cm에서의 침하분포는 모두 통과횟수가 증가할수록 침하량이 증가하고, 통과횟수의 증가에 따른 침하량의 증가량은 토양 표면에서 가장 크며 토양 속으로 들어갈수록 작게 나타났다.

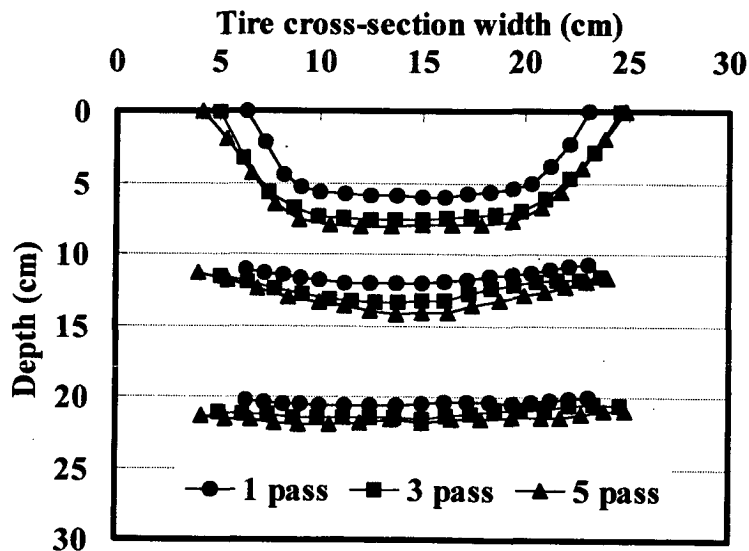


Fig. 4-18 Effects of number of passes on sinkage distribution at three different soil depth under the tire with dynamic load of 1.17kN and inflation pressure of 103.42kPa.

그림 4-19는 103.42kPa의 공기압과 1.17kN의 동하중하에서 타이어의 통과 횟수를 각각 1, 3, 5회로 변화시켰을 때 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm에서 침하량을 측정한 결과이다.

그림 4-19에 나타난 바와 같이 타이어의 통과횟수가 각각 1, 3, 5회 일 때 세 깊이의 토양층에서 초기 기준면(토양표면, 10cm, 20cm)에 대한 최대 침하량은 토양표면의 경우에는 각각 6.2cm, 7.71cm, 7.76cm이고, 토양속 10cm의 경우에는 각각 2.7cm, 3.52cm, 3.78cm, 그리고 토양속 20cm의 경우에는 각각 0.87cm, 1.07cm, 1.35cm로 나타났다.

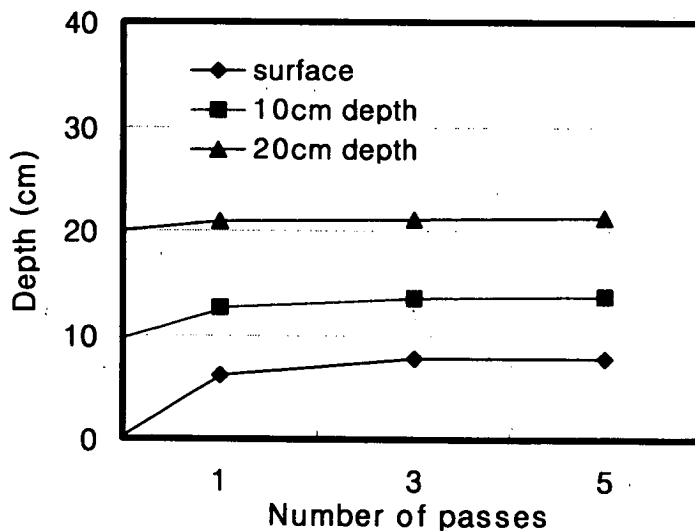


Fig.4-19 Variations in maximum sinkage distribution with the number of passes at three different soil depth for the tire with dynamic load of 1.17kN and inflation pressure of 103.42kPa.

그림 4-19의 결과로부터 통과횟수의 증가는 토양표면 및 토양속에서 모두 침하량을 증가시키는 것으로 나타났고, 통과횟수의 증가에 따른 침하량의 증가경향은 세 깊이의 토양층 모두에 대해서 초기 1회 통과시에 가장 크게 나타났으며 통과횟수가 증가할수록 침하량의 증가경향이 감소하는 지수곡선의 증가형태를 나타내었다.

이러한 결과는 타이어가 통과하기 전의 토양상태는 매우 연약하기 때문에 초기 1회 통과시에는 토양의 다짐(변형)이 크게 발생하지만, 이 후 통과횟수가 증가할 경우에는 이미 단단해진 토양 위를 통과하기 때문에 1회 통과시에 비해 상대적으로 토양의 다짐현상이 작게 나타나기 때문으로 판단된다. 한편, 토양깊이에 따른 토양의 침하량은 토양깊이가 깊어질수록 작게 나타났는데 이러한 결과로부터 토양깊이에 따른 토양다짐 효과는 토양표면에서 크고, 토양속으로 들어갈수록 작아지는 것으로 판단된다.

나. 타이어 아래 토양의 체적 및 밀도변화

본 절에서는 타이어에 작용하는 동하중과 공기압 및 통과횟수가 토양변형(체적변화) 및 밀도에 미치는 영향을 비교, 분석하였다. 한편, 토양의 밀도변화 및 변형정도는 전술한 바와 같이 타이어의 통과 전과 통과 후의 면적비(ratio of soil area, A_{ratio})와 밀도비(ratio of soil density, ρ_{ratio})의 관계를 이용하였다.

그림 4-20은 103.42kPa의 일정 공기압 조건에서 타이어의 동하중이 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN일 때 토양속 0-10cm 구간과 10-20cm의 구간에서 측정된 동하중과 면적비의 관계를 나타낸 결과이다.

그림 4-20에서 타이어의 동하중이 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN일 때 0-10cm 구간에서의 면적비는 각각 0.7867, 0.6824, 0.6319로서 타이어의 통과 전에 비해 각각 21.33%, 31.76%, 36.81%의 면적비의 감소를 나타냈고,

또한 토양속 10-20cm 구간에서는 각각 0.8714, 0.7309, 0.6557로서 각각 12.86%, 29.91%, 34.43% 면적비가 감소하였다.

위의 결과로부터 타이어에 작용하는 동하중의 증가는 토양의 면적비를 감소시키며 그 경향은 동하중의 증가에 따라 지수곡선 형태로 감소하는 것으로 나타났다. 또한 동하중의 증가에 따른 토양 깊이별 면적비의 감소량은 10-20cm 구간에 비해 0-10cm의 구간에서 더욱 크게 나타났다. 즉, 동하중이 토양 변형에 미치는 영향은 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 깊이 들어갈수록 감소하는 것으로 나타났다.

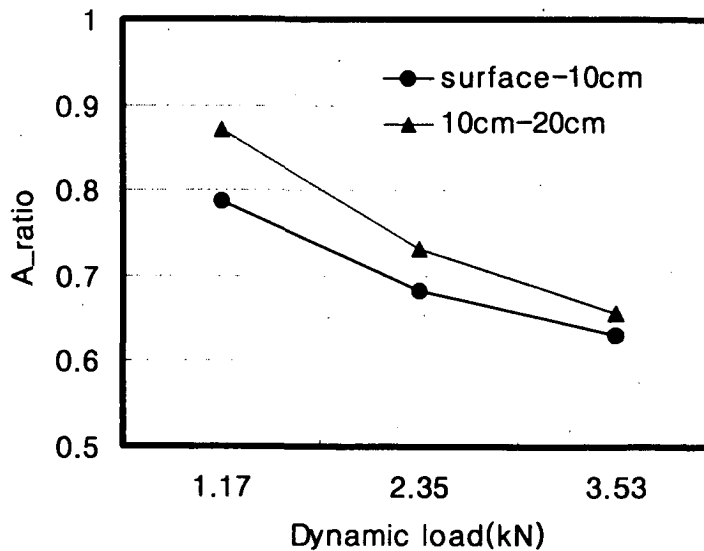


Fig. 4-20 Variations in the ratio of soil area with the dynamic load for the tire with the constant inflation pressure of 103.42kPa.

그림 4-21은 1.17kN의 일정 동하중 조건에서 타이어의 공기압이 각각 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa일 때 토양속 0-10cm 구간과 10-20cm의 구간에 대해서 타이어의 통과 전에 대한 통과 후의 면적비를 나타낸 결과이다. 그림 4-21에서 공기압의 증가에 따른 면적비의 감소 경향은 동하중을 증가시켰을 경우와 마찬가지로 지수곡선의 형태로 감소하는 경향을 나타내었으나 동하중을 증가시킨 경우에 비해서는 면적비의 감소량이 작게 나타났다. 즉, 타이어 공기압의 증가는 동하중을 증가시킨 경우에 비해 토양변형에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났다.

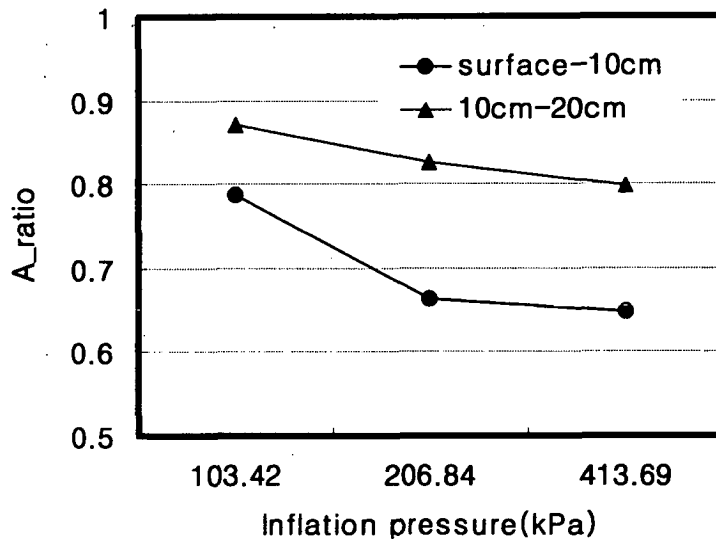


Fig. 4-21 Variations in the ratio of soil area with the inflation pressure for the tire with the dynamic load of 1.17kN.

그림 4-22는 103.42kPa의 공기압과 1.17kN의 동하중 조건에서 토양속 0-10cm 및 10-20cm의 구간에서 타이어가 통과하기 전의 초기 상태에 대해 타이어 통과횟수(1, 3, 5회)에 따른 면적비의 관계를 나타낸 결과이다.

그림 4-22에 나타난 바와 같이, 타이어의 통과횟수가 각각 1, 3, 5회 일 때 토양속 0-10cm 구간에서 통과횟수에 따른 면적비는 각각 0.7867, 0.5627, 0.5539로서 타이어 통과 전에 비해 각각 21.33%, 43.73%, 44.61% 면적비가 감소하였고, 토양속 10-20cm 구간의 경우에는 세 수준의 통과횟수에 대해 각각 0.8714, 0.7909, 0.7639로서 통과 전에 비해 각각 12.86%, 20.91%, 23.61%의 면적비가 감소하였다.

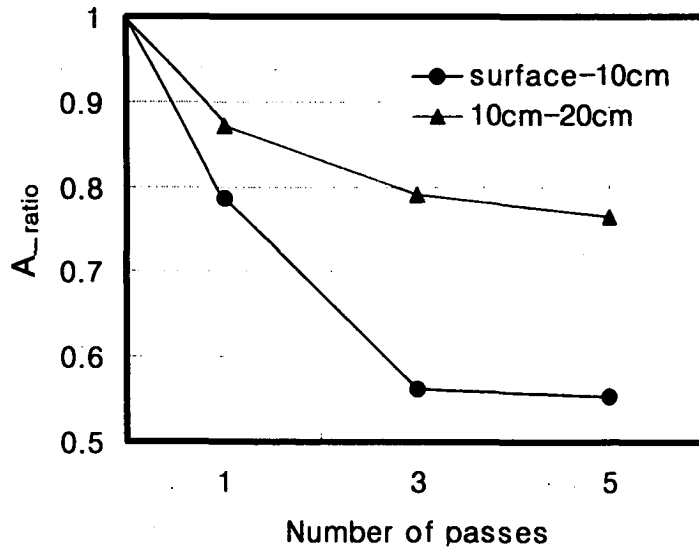


Fig. 4-22 Variations in the ratio of soil area with the number of passes for the tire with the dynamic load of 1.17kN and the inflation pressure of 103.42kPa.

즉, 통과횟수의 증가에 따른 토양의 변형량은 토양속보다는 토양 표면에
서 더욱 크고, 또한 토양속 두 구간 모두에 대해 초기 1회 통과시에 토양
변형량이 가장 크게 나타났으며 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 토양변형
량의 증가량이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 타이어의 통과횟수가 토
양다짐에 미치는 효과는 초기 1회 통과시에 가장 크고, 그 후 통과횟수가
증가함에 따라 토양다짐 효과는 점점 감소하여 특정 통과횟수 이상에서는
통과횟수가 토양다짐에 거의 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

그림 4-23은 103.42kPa의 일정 공기압 조건에서 타이어의 동하중을 각각
1.17kN, 2.35kN, 3.53kN 으로 변화시켰을 때 토양속 0-10cm 구간과 10-20cm
구간에서 타이어의 통과 전에 대한 통과 후의 밀도비를 나타낸 결과이다.

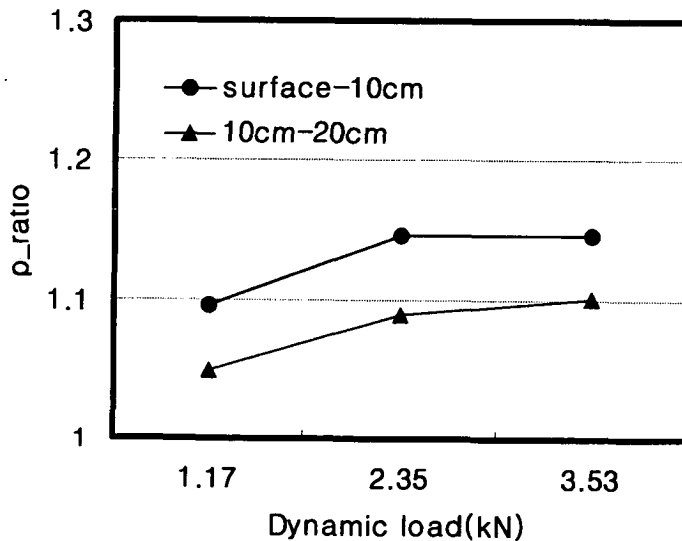


Fig. 4-23 Variations in the ratio of soil density with the dynamic
load for the tire with the constant inflation pressure
of 103.42kPa.

그림 4-23에 나타난 바와 같이, 타이어의 동하중이 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN일 때 0-10cm 구간에서의 밀도비는 각각 1.096, 1.146, 1.147로서 타이어의 통과 전에 대한 통과 후의 밀도는 각각 9.58%, 14.58%, 14.66% 증가하였고, 토양속 10-20cm 구간에서는 각각 1.050, 1.089, 1.100으로서 각각 4.96%, 8.88%, 10.02% 증가하였다. 즉, 동하중의 증가는 토양의 밀도를 증가시키고, 그 경향은 동하중이 증가함에 따라 지수곡선의 형태로 증가하는 것으로 나타났다. 또한 동하중의 증가에 따른 토양 깊이별 밀도의 증가량은 토양속 10-20cm의 구간에 비해 0-10cm까지의 구간에서 더욱 크게 나타났다.

그림 4-23의 결과로부터 동하중의 증가가 토양밀도에 미치는 영향은 토양 표면에서 가장 크고, 토양속으로 깊이 들어갈수록 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 동하중의 증가에 따른 토양다짐 현상은 토양표면에서 가장 크고, 토양 속으로 내려갈수록 토양다짐 효과가 작게 나타나는 것으로 판단된다.

위와 같은 결과가 나타나게 된 원인은 전술한 바와 같이 동하중의 증가는 타이어 아래 토양에 대해 침하의 증가와 체적의 감소를 유발하게 되어 토양 내 공극을 감소시키고, 또한 이러한 경향은 토양속보다는 토양 표면에서 상대적으로 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

한편, 동하중의 증가에 따른 밀도비의 증가폭은 전술한 그림 4-22의 단면 적비의 감소폭보다 작게 나타났는데, 이것은 타이어 아래 토양은 타이어가 통과한 후에 밀도의 증가량보다는 체적의 감소량이 상대적으로 크고, 동하중이 증가할수록 그 경향이 더욱 크게 나타난다는 것을 의미한다. 이와 같이 토양밀도의 증가량보다 면적비의 감소량이 더욱 크게 나타나게 된 원인은 타이어가 통과할 때 나타나는 토양의 압축 및 팽창에 의한 토양의 이동 현상이 타이어의 연직하방뿐만 아니라 타이어 진행방향의 양 측면으로도 함

계 발생하기 때문으로 판단된다.

그림 4-24는 1.17kN의 일정 동하중 조건에서 타이어의 공기압이 각각 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa일 때, 0-10cm 구간과 토양속 10-20cm의 구간에서 타이어의 공기압과 밀도비의 관계를 나타낸 결과로서 전체적인 경향은 동하중을 증가시킨 경우와 거의 유사하게 나타났다.

즉, 공기압의 증가는 토양 밀도의 증가를 나타내었고, 토양 깊이별 밀도의 증가량은 토양속 보다는 토양표면에서 크게 나타났다. 그러나 동하중을 증가시킨 경우에 비해서는 밀도비의 증가량이 작게 나타나 공기압의 증가는 동하중을 증가시킨 경우에 비해서는 상대적으로 토양다짐 효과가 작은 것으로 판단된다.

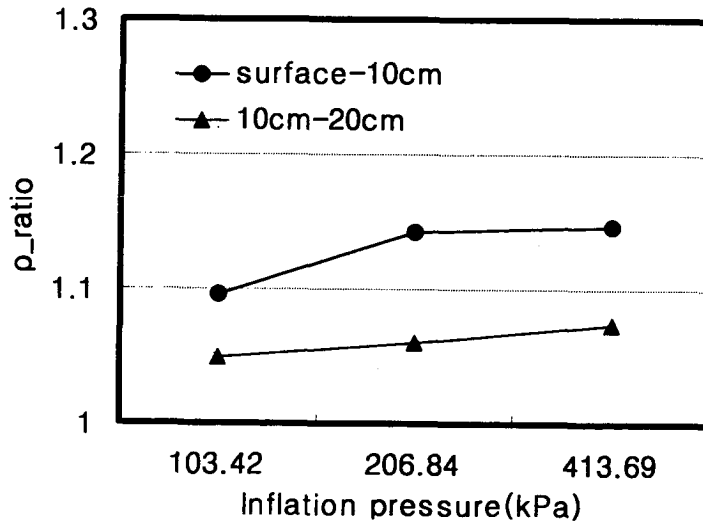


Fig. 4-24 Variations in the ratio of soil density with the inflation pressure for the tire with the dynamic load of 1.17kN.

그림 4-25는 103.42kPa의 공기압과 1.17kN의 동하중 조건에서 0-10cm 구간과 토양속 10-20cm의 구간에서 타이어가 통과하기 전의 초기 상태에 대한 타이어의 통과횟수(1, 3, 5회)에 따른 밀도비의 변화를 나타낸 결과이다.

그림 4-25에 나타난 바와 같이, 0-10cm의 구간에서는 1, 3, 5회의 통과횟수에서의 밀도비가 각각 1.0958, 1.1643, 1.1724로서 각각 타이어의 통과 전에 비해 각각 9.58%, 16.43%, 17.24%의 밀도 증가를 나타냈고, 토양속 10-20cm 구간의 경우에는 세 수준의 통과횟수에 대해 각각 1.0496, 1.0546, 1.0672로서 통과 전에 비해 각각 4.96%, 5.46%, 6.72%의 밀도 증가량을 나타냈다.

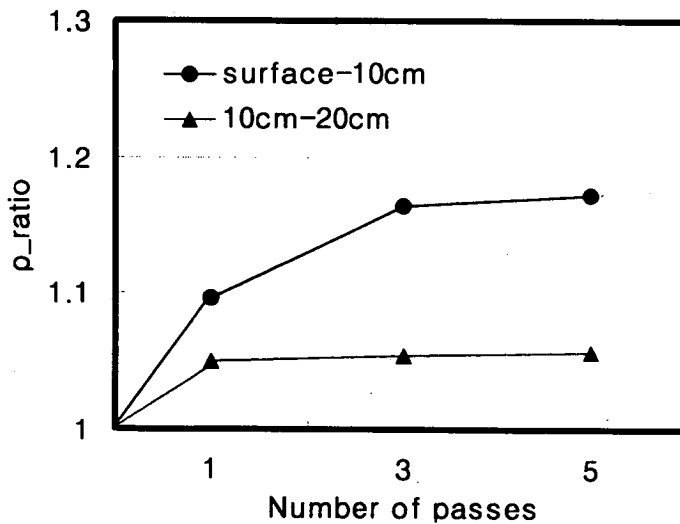


Fig. 4-25 Variation in the ratio of soil density with the number of passes for the tire with the dynamic load of 1.17kN and the inflation pressure of 103.42kPa.

위의 결과는 통과횟수의 증가에 따른 밀도의 증가량이 토양 속보다는 토양 표면에서 더욱 큰 것으로 나타났고, 또한 토양속 두 구간 모두에 대해 초기 1회 통과시에 밀도의 증가량이 가장 크게 나타났으며 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 밀도의 증가량이 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 타이어의 통과횟수가 토양다짐에 미치는 효과는 초기 1회 통과시에 가장 크고, 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 토양다짐 효과는 점점 감소하여 특정 통과횟수 이상에서는 통과횟수가 토양다짐에 거의 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 절에서는 타이어에 의한 토양다짐 현상을 구명하기 위하여 타이어의 동하중(1.17kN, 2.35kN, 3.53kN), 공기압(103.43kPa, 206.84kPa, 413.69kPa) 및 통과횟수(1, 3, 5회)의 변화가 타이어 아래 토양의 침하, 변형 및 밀도 변화에 미치는 영향을 실험적으로 조사하였다. 모든 실험은 인공토조내의 사양토에서 단일 타이어 구동시스템을 이용하여 수행되었으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 타이어의 동하중과 공기압의 증가는 타이어 아래 세 깊이(0cm, 10cm, 20cm)의 토양층에서의 침하량을 거의 선형적으로 증가시켰으나 통과횟수를 증가시킨 경우에는 초기 1회 통과시에 침하량이 가장 크고, 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 증가율이 감소하는 지수곡선 형태의 증가 경향을 나타내었다. 한편, 동하중의 증가에 따른 침하량의 증가량은 공기압을 증가시킨 경우에 비해 크게 나타났다.

- 2) 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가에 따른 토양 깊이별 침하량의 증가량은 세 경우 모두 토양표면, 토양속 10cm 및 20cm의 순서로서 세 경우 모두 토양표면에서 가장 크고 토양속으로 들어갈수록 감소하였다.
- 3) 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 모두 토양속 두 구간(0-10cm, 10-20cm)에서 토양의 밀도비(통과후밀도/통과전밀도, ρ_{ratio})를 증가시키는 것으로 나타났고, 토양 깊이에 따른 밀도비의 크기는 0-10cm, 10-20cm 구간의 순으로 토양 속으로 깊이 들어갈수록 밀도의 증가량이 작게 나타났다.
- 4) 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 토양속 두 구간에서 면적비(통과후단면적/통과전단면적, A_{ratio})를 지수곡선의 형태로 감소시키는 것으로 나타났고, 깊이에 따른 면적비의 값은 토양속으로 깊이 들어갈수록 작게 나타나 토양속으로 깊이 들어갈수록 토양의 변형량이 큰 것으로 나타났다.
- 5) 위의 결과로부터 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 모두 토양변형과 밀도를 증가시키며 토양 깊이별 토양변형량 및 밀도의 변화량은 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 들어갈수록 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 타이어에 의한 토양다짐은 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 변화를 통해 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

제 5 장 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 견인성과 토양다짐

제1절 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 견인성능

앞의 3장에서는 인공토조시스템에서 토양조건과 타이어의 공기압이 구동륜의 성능에 미치는 영향을 구명하기 위한 실험을 수행하였고, 그 결과 토양조건과 타이어공기압은 구동륜의 성능에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 본 절에서는 실제 농용트랙터를 이용하여 타이어의 공기압이 트랙터의 견인성능에 미치는 효과를 실험적으로 조사하였다. 농용트랙터의 견인성능 실험은 경기도 수원에 위치한 논 토양에서 실시하였다.

1. 실험장치

가. 견인력 실험장치

견인력 실험장치는 타이어공기압에 따른 트랙터의 견인성능을 평가하기 위한 시험트랙터(test tractor)와 시험트랙터에 수평 견인부하를 가해주기 위한 하중트랙터(load tractor)로 구성되었다. 시험트랙터는 본 연구의 실험 목적에 적합하도록 슬립 등을 측정할 수 있는 장치를 구성하였고, 하중차량에는 견인력 실험시 센서로부터 측정되는 신호를 수집하기 위한 자료수집장치를 구성하였다. 견인력실험을 위해 사용된 시험트랙터와 하중트랙터는 각각 (주)LG기계의 45마력 트랙터(LT470D)와 대동(주)의 22마력 트랙터(L2203)를 이용하였다. 그림 5-1과 그림 5-2는 각각 견인력실험에 사용된 시험트랙터와 하중트랙터를 보여주고 있고, 표 5-1에 제원을 나타내었다.



Fig. 5-1 View of test tractor.



Fig. 5-2 View of load tractor.

Table 5-1 Specifications of test tractor and load tractor

Item	Specification	
	Model	LT470D
Vehicle Length (mm)	3655	2850
Vehicle Width (mm)	1644	1235
Vehicle Height (mm)	2410	1970
Front Tire Size (mm)	9.5-20-6PR	7-14-4PR
Rear Tire size (mm)	13.6-28-6PR	11.2-24-4PR
Maximum Engine Power(PS/rpm)	45/2600	22 / 2600
Vehicle Weight (kN)	23.64	11.77

견인력 실험시 슬립을 측정하기 위해 시험트랙터의 이론주행거리와 실제 주행거리를 측정할 수 있는 장치를 구성하였다.

시험트랙터의 이론 주행거리는 시험트랙터의 구동축에 로타리엔코더를 설치하여 측정하였고, 로타리엔코더는 구동축과 로타리엔코더와의 회전편심에 의한 손상을 방지하기 위해 구동축을 가공한 후 flexible coupling을 통해 연결하였다. 로타리엔코더는 구동축이 1회전할 때마다 1024개의 펄스를 출력하는 일본 NEMICON사의 OEW-1024-2M을 사용하였다. 그림 5-3은 트랙터의 이론 주행거리 측정을 위해 제작한 측정장치의 모습을 보여주고 있다.

시험트랙터의 실제 주행거리는 시험차량의 후부에 5륜을 장착하여 5륜의 주행거리로부터 측정하였다. 5륜은 인공토조시스템에서 사용한 5륜을 사용하였으며 시험트랙터의 하부링크를 가공하여 부착하였다. 그림 5-4는 시험트랙터에 장착된 5륜의 모습을 보여주고 있다.

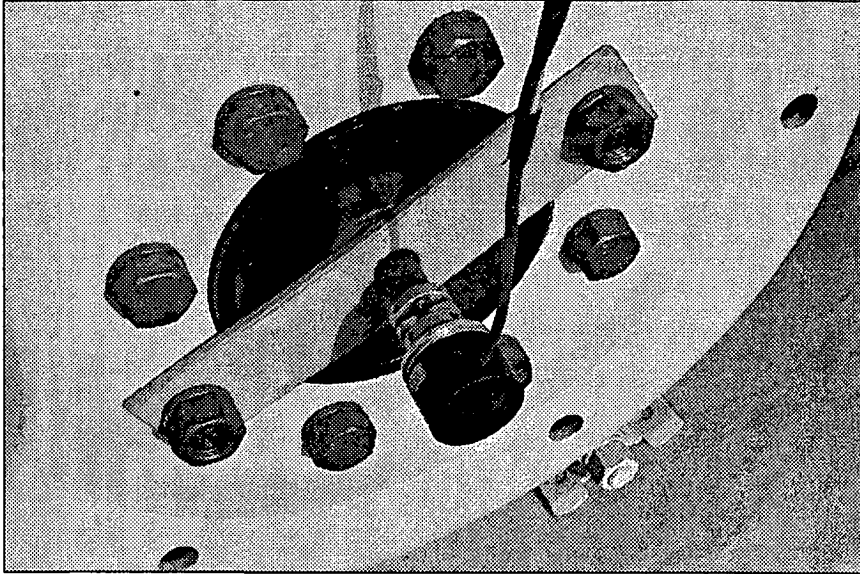


Fig. 5-3 Devices for measuring the theoretical travel distance.



Fig. 5-4 5th wheel for measuring the real travel distance.

견인력 측정은 시험트랙터의 후부와 하중트랙터 전부에 강선을 연결한 후 그 사이에 CAS(주)에서 제작한 2ton 용량의 하중변환기를 부착하여 하중변환기에 나타나는 인장력으로부터 측정하였다(그림 5-5). 한편, 견인력 실험시 컴퓨터 및 계측장비 등에 전원을 공급하기 위해 1000W 용량의 소형 발전기를 이용하였다. 표 5-3에 견인력 실험에 사용된 주요 센서 및 장비의 제원을 나타내었고, 그림 5-6은 자료수집장치를 하중트랙터에 구성한 모습을 보여주고 있다.

Table 5-3 Specifications of devices used for traction test

ITEM (measurement parts)	Model/Manufacture	Specification
Loadcell (traction)	SBA-2T/ CAS, KOREA	tension & compression maximum capacity : 2000kg output : 3mV/V
Rotary Encoder (theoretical speed)	OEW-1024-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1024 pulse/rev.
Rotary Encoder (real speed)	OEW-10-2M/ NEMICON, Japan	resolution : 1000 pulse/rev.
Data Acquisition Board	AX-5412 / AXIOM Technology, Taiwan	Resolution : 12 bit A/D ch. : 16S.E./8DI. Sampling rate : 90kHz
Counter Board	YS 7400 / Yoi-Auto-System, Korea	Resolution : 24 bit Counter ch. : 4 Max. counting fre. : 1kHz
Strain Amplifier	DPM-711B / KYOWA, Japan	Channel : 3 Gain : 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100×100 $\mu\epsilon$ Output-V : $\pm 5V$ into 5k Ω
Generator	EU10i / HONDA, Japan	AC Maximum output : 1000VA AC Voltage : 220V

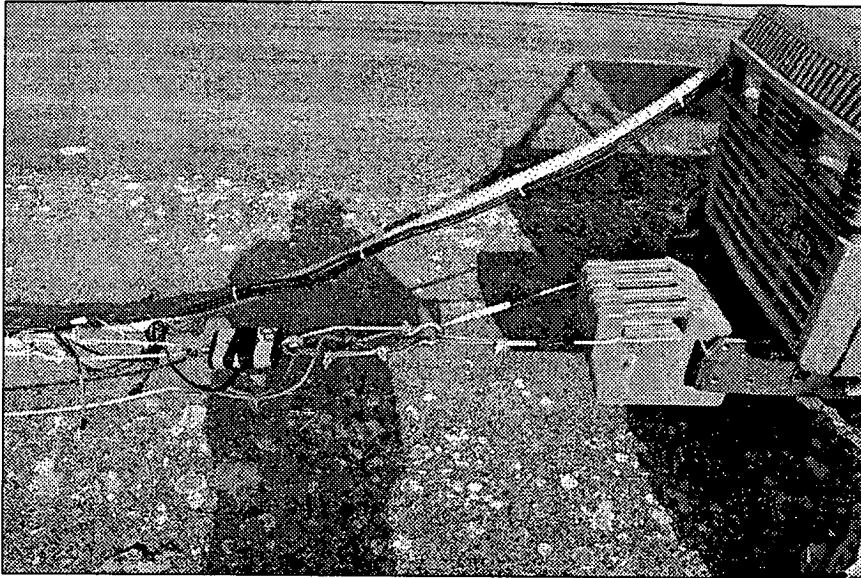


Fig. 5-5 View of loadcell for measuring the traction of tractor.

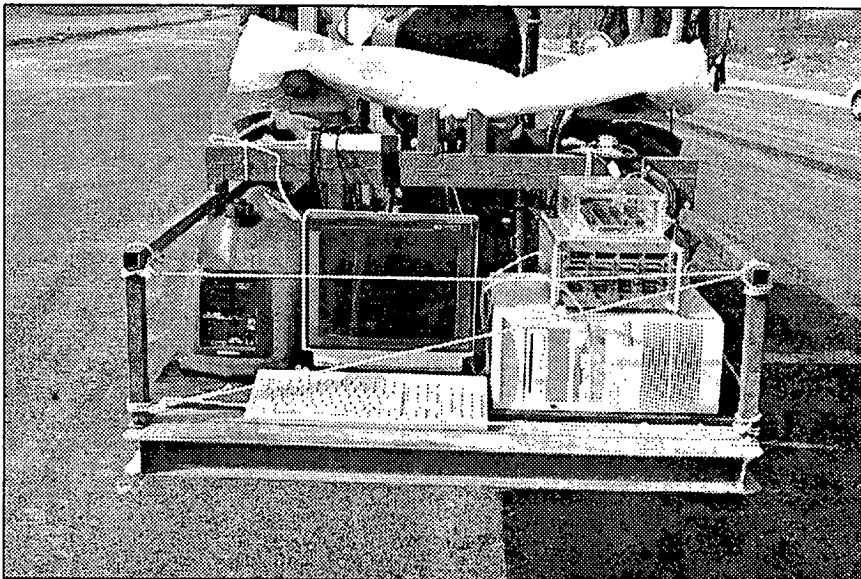


Fig. 5-6 View of data acquisition system mounted on load tractor.

2. 실험방법

가. 실험 인자

타이어의 공기압이 농용트랙터의 견인성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시험트랙터의 터이어공기압을 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa의 세 수준으로 조정하여 견인력 실험을 수행하였다.

견인력실험시 측정된 성능변수로는 시험트랙터의 견인력, 운동저항, 슬립 등이며 모든 변수들은 측정자료의 신뢰성을 높이기 위해 4회 반복을 수행하였다.

나. 실험토양의 물리적 특성 측정

실험토양의 물리적 특성은 견인력실험을 수행하기 전에 토양의 원추지수, 겉보기밀도, 수분함수율을 측정하였다.

겉보기밀도는 100cc 용량의 토양채취관(EVERWELL 332)을 사용하여 실험토양내의 임의의 5곳을 선정하여 구하였고, 함수율은 토양채취관에 의해 수집된 토양샘플을 오븐 건조법에 의해 구하였다. 또한, 토양의 원추지수는 SR-2 모델의 토양전단장치를 이용하여 실험토양내의 임의의 5곳을 선정하여 측정하였다. 표 5-4에 실험토양에서 측정한 토양의 물리적 특성을 나타내었다.

Table 5-4 Soil properties of experimental soil

Cone Index (kPa)	Bulk density (kg/m ³)	Moisture content (d. b. %)
352.6	1375	24.53

다. 견인력 측정

견인력 측정은 시험트랙터의 후미 견인고리와 하중트랙터의 전면 견인고리에 각각 강선을 연결하고 그 사이에 인장력을 측정할 수 있도록 하중변환기를 부착한 후, 시험차량을 구동하여 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정하여 구하였다. 한편, 견인력과 슬립의 관계를 구하기 위하여 견인력 측정은 먼저 하중차량을 중립에 놓은 상태에서 시험차량의 구동력에 의해 하중변환기에 나타난 견인력을 측정하였고, 하중트랙터의 제동력을 단계적으로 변화시켜 가며 나타나는 시험트랙터의 슬립과 견인력을 측정하여 슬립에 따른 견인력을 측정하였다. 한편, 견인력실험시 측정되는 슬립-견인력 자료는 컴퓨터 모니터상에 실시간으로 그래픽으로 출력되도록 구성하였다. 그림 5-7에 실제 견인력 실험 장면을 나타내었다.

라. 슬립 측정

슬립측정은 시험트랙터를 중립에 놓은 상태에서 하중트랙터가 시험트랙터를 견인할 때를 제로 슬립상태(zero condition: ASAE S296.4 DEC95)로 정의하여 시험트랙터가 하중트랙터를 견인할 때 측정되는 이론 주행거리와 실제 주행거리로부터 다음과 같이 시험트랙터의 슬립을 계산하였다.

$$\text{슬립} (i) = \left(1 - \frac{\text{차량의 실제 이동거리}}{\text{차량의 이론적인 이동거리}} \right) \times 100 (\%)$$

다. 운동저항 측정

시험트랙터의 운동저항 측정은 시험트랙터의 전면 견인고리와 하중트랙터의 전면 견인고리에 각각 강선을 연결하고 그 사이에 하중변환기를 부착한 후, 시험트랙터의 기어를 중립에 놓은 상태에서 하중트랙터가 시험트랙터를

견인할 때 하중변환기에 나타나는 인장력을 측정하여 구하였다. 그림 5-8은 실제 운동저항을 측정하는 모습을 보여 주고 있다.



Fig. 5-7 Scheme of drawbar pull test.



Fig. 5-8 Scheme of motion resistance test.

3. 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 견인성능 분석

타이어의 공기압에 따른 트랙터의 견인성능의 평가는 비도로차량의 견인성능의 평가를 위해 일반적인 척도로 사용되고 있는 운동저항계수, 추진력계수, 견인계수, 견인효율 등을 이용하여 비교, 분석하였다.

가. 타이어공기압에 따른 트랙터의 운동저항

그림 5-9는 타이어의 공기압이 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa일 때 측정한 트랙터의 운동저항계수값을 나타내고 있다. 그림 5-7에서 세 수준의 타이어공기압에 대한 트랙터의 운동저항계수는 각각 0.154, 0.159, 0.160으로서 타이어의 공기압이 낮을수록 트랙터의 운동저항은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 공기압의 증가에 따른 운동저항계수의 증가 경향은 공기압이 높을수록 증가량이 감소하는 지수곡선 형태의 증가경향을 나타내었다.

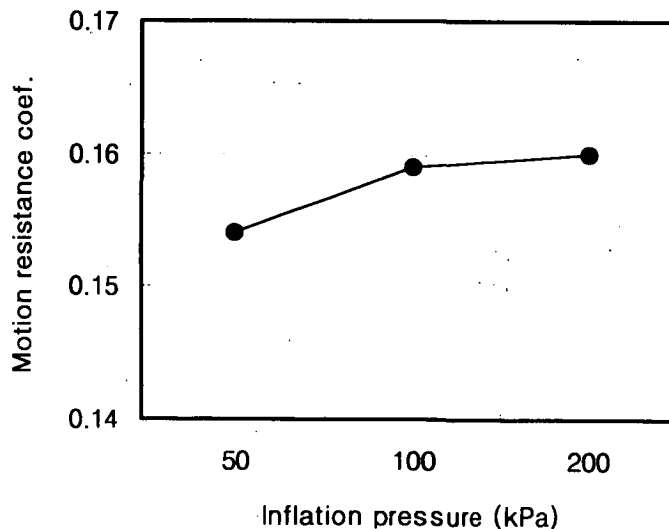


Fig. 5-9 Motion resistance coefficient of tractor with inflation pressure of tire.

나. 타이어공기압에 따른 트랙터의 견인력

그림 5-10~그림 5-12는 타이어의 공기압이 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa 일 때 측정한 트랙터의 슬립-견인계수 관계를 보여주고 있다. 그림에 나타난 바와 같이, 세 수준의 공기압에 대해 측정된 슬립-견인계수 관계는 세 경우 모두 슬립이 증가함에 따라 견인계수도 증가하고, 전체 슬립 구간에서 어떤 일정한 경향을 보이는 것으로 나타났지만, 토양의 불균일 등으로 인해 동일한 슬립에 대해서도 측정치가 넓게 분포되어 세 가지 공기압에 대한 트랙터의 슬립-견인계수 관계를 직접적으로 비교하기에는 적당치 못한 것으로 판단되었다. 따라서 본 절에서는 공기압에 따른 트랙터의 슬립-견인계수 관계를 비교하기 위해 슬립-견인계수의 측정치를 식 (5-1)에 나타낸 회귀식에 의해 모형화하여 비교 분석하였다.

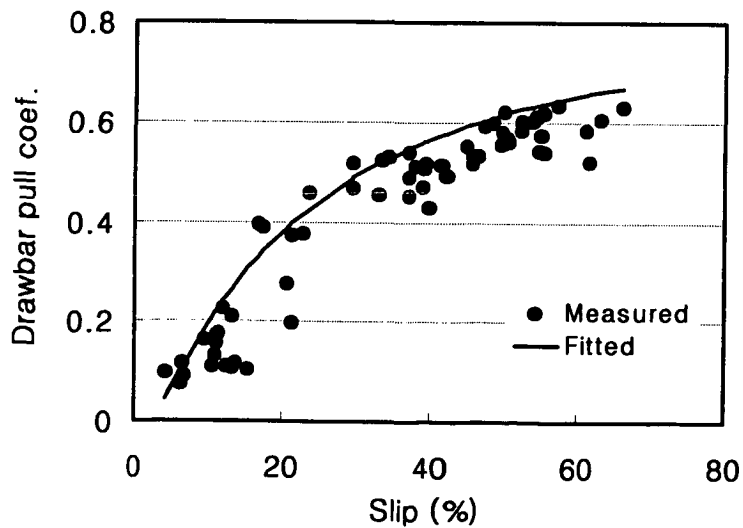


Fig. 5-10 Relationship between slip and drawbar pull coefficient for tractor with tire inflation pressure of 50kPa.

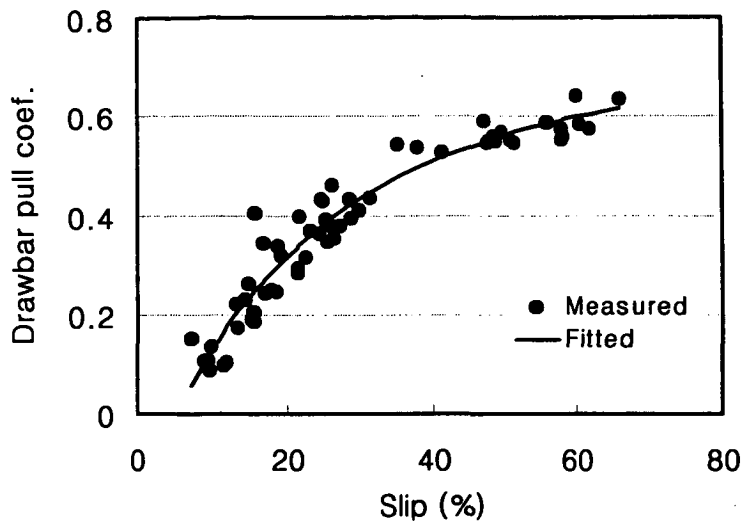


Fig. 5-11 Relationship between slip and drawbar pull coefficient for tractor with tire inflation pressure of 100kPa.

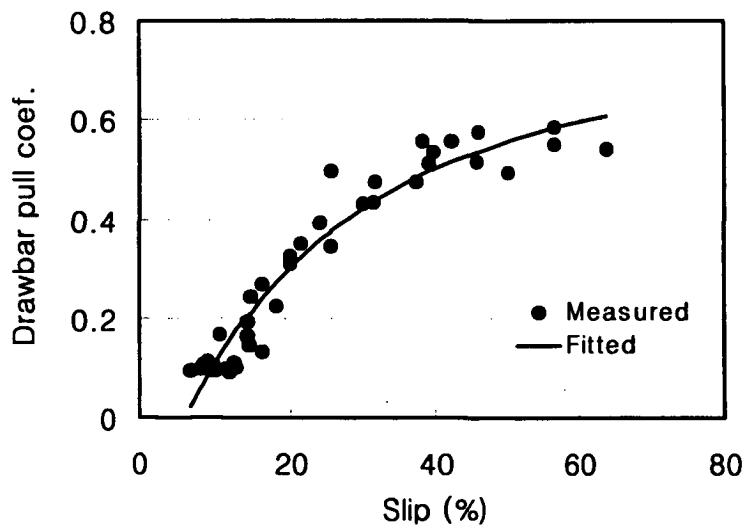


Fig. 5-12 Relationship between slip and drawbar pull coefficient for tractor with tire inflation pressure of 200kPa.

$$C_T = A \cdot \left[1 - \frac{B}{s} \cdot (1 - e^{-\frac{s}{B}}) \right] + C \quad \text{----- (5-1)}$$

여기서, C_T : 견인계수

s : 슬립

A, B, C : 상수

그림 5-13은 타이어의 공기압이 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa일 때 측정된 결과를 식 (5-1)을 이용하여 모형화한 슬립-견인계수 관계를 나타내고 있다. 그림 5-13에서 볼 수 있듯이, 세 가지 공기압에 대한 슬립-견인계수 관계는 전체 슬립구간에 걸쳐 공기압이 작을수록 견인계수가 크게 나타나 공기압의 감소는 트랙터의 견인력을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

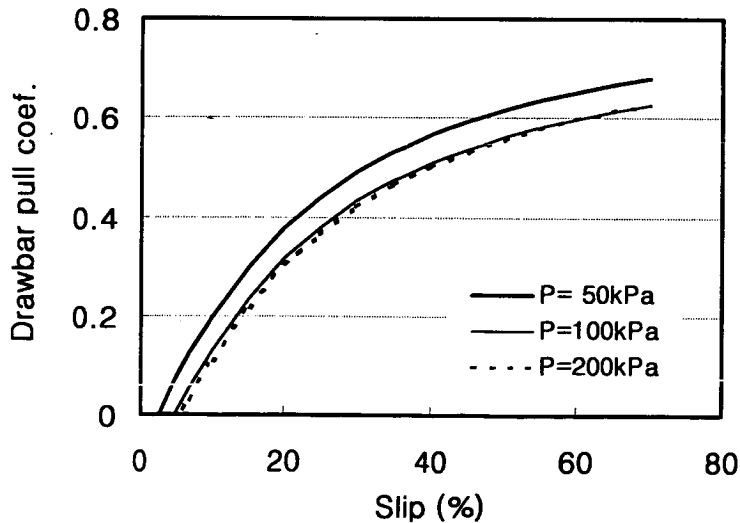


Fig. 5-13 slip-drawbar pull coefficient curves for three different inflation pressure of tire.

한편, 50kPa과 100kPa인 두 수준의 공기압에 대해서는 공기압에 따른 견인계수값의 차가 전체 슬립구간에서 크게 나타났으나 100kPa과 200kPa일 때를 비교하였을 경우에는 두 공기압 수준에 대해 견인계수값의 차가 매우 작게 나타났다. 이러한 결과로부터 트랙터의 견인력은 공기압의 감소를 통해 향상시킬 수 있는 것으로 나타났지만 어느 수준 이상의 공기압에서는 공기압의 증가에 따른 견인계수의 증대 효과가 크지 않은 것으로 판단된다.

다. 타이어공기압에 따른 트랙터의 견인효율

그림 5-14는 세 수준의 공기압에 대해 측정된 슬립-견인효율 관계를 보여주고 있다. 그림 5-14에서 볼 수 있듯이, 50kPa, 100kPa, 200kPa의 세 가지 공기압 조건에서의 견인효율의 크기는 전체 슬립 구간에서 모두 50kPa, 100kPa, 200kPa의 순서로서 공기압이 낮을수록 견인효율이 높게 나타났다.

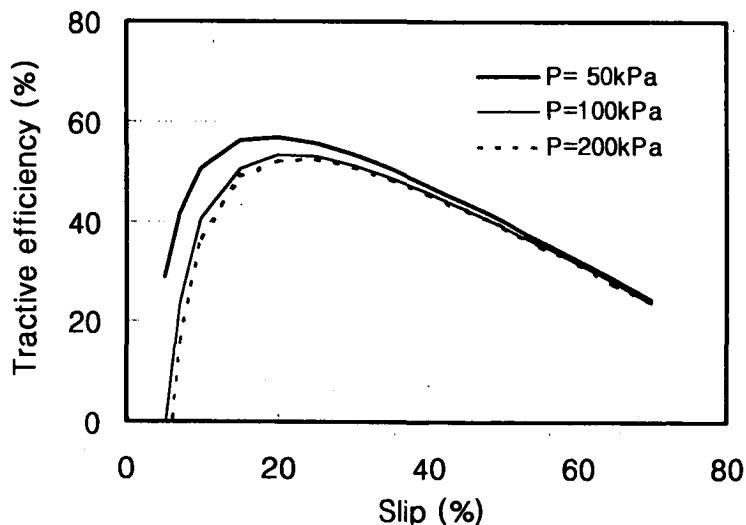


Fig. 5-14 slip-tractive efficiency curves with inflation pressure of tire.

한편, 각각의 공기압에서의 최대 견인효율은 200kPa의 경우에는 52.261(슬립 25%)이고, 100kPa의 경우에는 53.198(슬립 20%), 그리고 50kPa의 경우에는 56.836(슬립 20%)로서 100kPa과 50kPa의 공기압에서의 최대 견인효율은 공기압이 200kPa인 경우에 비해 각각 0.937(1.79%), 4.575(8.754%)의 증가를 나타내었다. 즉, 트랙터의 견인효율은 타이어의 공기압이 낮을수록 크게 나타났고, 공기압이 낮을수록 최대 견인효율도 크게 나타났다. 또한, 같은 효율을 발휘하는데 있어서 공기압이 낮은 경우가 공기압이 높은 경우에 비해 트랙터의 슬립이 작게 나타나기 때문에 작업 효율면에서도 공기압이 낮은 경우가 공기압이 높은 경우에 비해 우수한 것으로 나타났다.

4. 요약 및 결론

타이어공기압이 농용트랙터의 견인성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 트랙터의 타이어공기압을 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa의 세 수준으로 조정하여 공기압에 따른 트랙터의 견인성능을 비교, 분석하였다.

- 1) 타이어의 공기압이 높을수록 트랙터의 운동저항이 증가하는 것으로 나타났고, 공기압의 증가에 따른 운동저항의 증가 경향은 공기압이 높을수록 증가량이 감소하는 지수곡선 형태의 증가경향을 나타내었다.
- 2) 공기압에 따른 슬립-견인계수 관계는 전체 슬립구간에 걸쳐 공기압이 작을수록 견인계수가 크게 나타나 공기압의 감소는 트랙터의 견인력을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 공기압의 조절을 통한 트랙터의 견인력 증대 효과는 낮은 공기압 범위에서는 효과가 크지만 높은 공기압 범위에서는 상대적으로 효과가 작은 것으로 나타났다.

- 3) 공기압에 따른 트랙터의 슬립-견인력 관계는 전체 슬립구간에 걸쳐 공기압이 작을수록 견인력이 크게 나타나 공기압의 감소는 트랙터의 견인력을 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 공기압의 조절을 통한 트랙터의 견인력 증대 효과는 낮은 공기압 범위에서는 효과가 크지만 높은 공기압 범위에서는 상대적으로 효과가 작은 것으로 나타났다.

- 4) 트랙터의 슬립-견인효율 관계는 전체 슬립구간에 걸쳐 타이어의 공기압이 낮을수록 크고, 공기압이 낮을수록 최대 견인효율도 크게 나타났다. 또한, 같은 효율을 발휘하는데 있어서 공기압이 낮은 경우가 공기압이 높은 경우에 비해 트랙터의 슬립이 작게 나타나기 때문에 작업효율면에서도 공기압이 낮은 경우가 공기압이 높은 경우에 비해 우수한 것으로 나타났다.

- 5) 위의 결과로부터 공기압의 감소를 통해 트랙터의 운동저항은 감소시키고, 견인력과 견인효율은 증대시킬 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 연약지에서 트랙터의 공기압의 조절을 통해 트랙터의 기동성과 작업성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

제2절 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 토양다짐

앞의 4장에서는 타이어의 공기압, 동하중 및 통과횟수가 토양다짐에 미치는 효과를 인공토조내에서 실험적으로 조사하였고, 그 결과 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수는 모두 토양다짐에 영향을 미치는 것으로 조사되었다. 따라서 본 절에서는 실제 트랙터를 이용하여 트랙터의 타이어 아래에서의 토양다짐 효과를 조사하기 위한 실험을 수행하였다.

위의 세 가지 인자중 동하중의 변화는 트랙터에 부착하는 부가하중(무게추)에 의해 증감시키게 되는데 이러한 부가하중에 의해 트랙터의 하중을 증가시킬 수 있는 양은 전체 트랙터 무게에 비해 매우 작다. 또한 트랙터의 하중 증가는 연약지에서 운용되는 트랙터에 대해 견인력을 증가시키는 반면 운동저항의 증가와 견인계수 및 견인효율의 감소를 초래하여 전체적으로는 트랙터의 견인성능을 저하시키기 때문에 동하중에 의해 토양다짐을 감소시키는 효과는 고려할 필요가 없는 것으로 판단하였다. 따라서 본 실험에서는 토양다짐에 영향을 미치는 세 가지 인자중 타이어의 동하중은 제외하고 타이어의 공기압과 통과횟수의 변화에 따른 트랙터의 토양다짐 효과를 조사하였다.

1. 실험장치 및 방법

가. 실험토양

농용트랙터의 타이어공기압의 변화에 따른 토양다짐 실험은 경기도 수원 지역의 밭토양에서 실시하였다. 실험토양의 물리성은 토양다짐 실험을 수행하기 직전에 토양의 겉보기밀도, 수분함량, 원추지수 등을 측정하였다. 표 5-1은 실험토양에서 측정한 토양의 물리적 특성을 보여주고 있다.

Table 5-1 Physical properties of experimental soil

Cone Index (kPa)	Bulk density (kg/m ³)	Moisture content (d.b., %)
363.28	1.39	16.55

나. 실험 트랙터

실험에 사용된 트랙터는 견인력실험에 사용된 트랙터를 이용하였다.

다. 실험방법

타이어의 공기압과 트랙터의 통과횟수의 변화에 따른 토양다짐 정도를 측정하기 위해, 타이어의 공기압을 각각 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa의 4 수준으로 선정하였고, 타이어의 통과횟수는 트랙터가 통과하기 전 최초상태 (0회)와 1, 3, 5회의 4수준으로 선정하였으며, 모든 실험은 3회 반복하였다. 표 2에는 본 실험에서 이용한 각 변수들의 실험조건을 나타내었다.

한편, 각각의 실험인자(타이어공기압, 통과횟수)에 대한 토양다짐의 분석은 토양다짐의 평가에 널리 이용되고 있는 원추관입저항값을 이용하여 비교, 분석하였다. 원추관입저항은 각각의 타이어공기압과 통과횟수에 대해 트랙터가 통과한 후 SR-2형 토양경도 측정장치를 이용하여 타이어 궤적상의 임의의 5곳을 선정한 후 0~25cm 깊이까지 5cm 간격으로 측정하였다.

Table 2 Levels of experimental variables

Variables (unit)	Levels
Weight of tractor (kN)	24.5
Inflation pressure (kPa)	50, 100, 150, 200
Number of passes	0, 1, 3, 5

2. 결과 및 고찰

그림 5-15는 각각 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa의 타이어공기압을 갖는 트랙터를 이용하여 트랙터가 통과(1 pass)한 후 타이어의 통과 궤적상에서 SR-2형 토양 경도측정기(cone penetrometer)를 이용하여 각각의 타이어공기압 조건에 대해 측정한 토양깊이에 따른 원추관입저항(Cone penetration resistance)의 측정 결과를 보여주고 있다.

그림 5-15에 나타난 바와 같이 트랙터가 통과하기 전의 최초 상태(0 pass)에서, 토양속 0~25cm 깊이의 범위에서 5cm 깊이 간격으로 측정한 원추관입저항은 각각 328.3kPa, 380kPa, 367kPa, 377.8kPa, 810.1kPa, 1014.8kPa로서 깊이에 따른 원추관입저항은 0~15cm 깊이 구간에서는 거의 일정한 경향을 나타내었고 15~25cm 깊이에서는 깊이가 증가함에 따라 함께 증가하는 경향을 나타내었다.

한편, 4 수준의 다른 타이어공기압 조건에 대해 트랙터가 통과한 후에 측정한 원추관입저항의 변화를 살펴 보면, 타이어의 공기압이 50kPa인 경우 0~25cm 깊이에서의 원추관입저항값은 각각 1032.9kPa, 915.3kPa, 868.3kPa, 925.1kPa, 1377.9kPa, 1374kPa로서 토양깊이에 따른 원추관입저항은 트랙터가 통과하지 않은 최초 상태에 비해 모든 토양 깊이에서 크게 증가하였다. 토양 깊이에 따른 원추관입저항의 증가량은 0 cm 깊이에서 가장 크고 토양속으로 들어갈수록 감소하여 25cm 깊이에서 가장 작게 나타났다. 트랙터의 타이어공기압을 각각 100kPa, 150kPa, 200kPa로 변화시킨 후 측정한 토양 깊이에 따른 원추관입저항은 타이어의 공기압이 50kPa인 경우에 비해 모든 토양 깊이에서 원추관입저항이 증가하였고, 각각의 공기압에 따른 원추관입저항의 크기는 모든 토양 깊이에서 200kPa, 150kPa, 100kPa의 순으로서 타이어의 공기압이 높을수록 크게 나타났다. 또한 토양 깊이에

따른 원추관입저항의 증가량은 세 가지 공기압 조건에 대해 모두 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 들어갈수록 작게 나타났다.

위의 결과로부터 공기압의 증가는 토양다짐을 증가시키는 것으로 나타났고, 깊이에 따른 토양다짐 현상은 토양표면에서 가장 크고 토양속으로 들어갈수록 작아지는 것으로 나타났다.

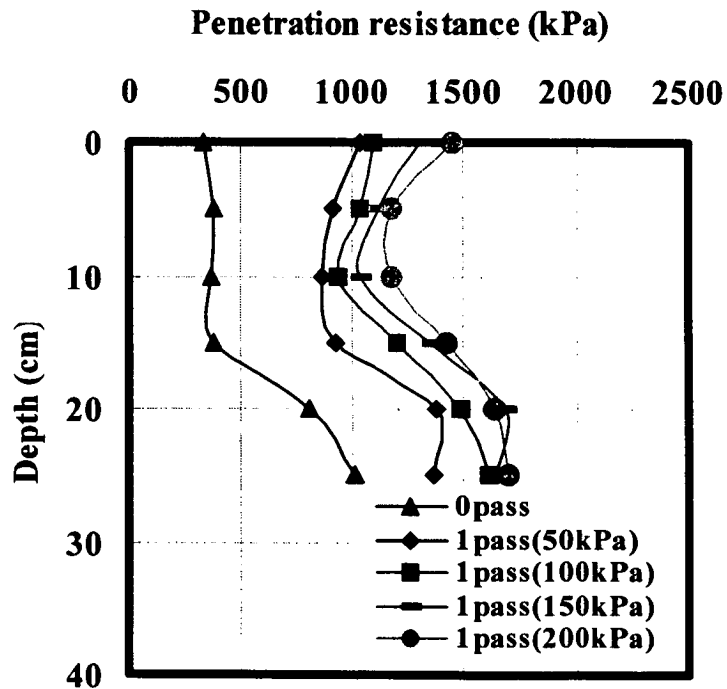


Fig. 5-15 Variations in cone penetration resistance with soil depth after one passage of tractor under four different tire inflation pressures.

한편, 그림 5-16과 그림 5-17은 트랙터의 통과횟수를 각각 3회 및 5회 통과시킨 후 측정된 토양 깊이에 따른 원추관입저항을 측정한 결과로서 트랙터의 통과횟수를 증가시켰을 경우에도 1회 통과에 비해 상대적으로 원추관입저항이 증가하였지만 전체적인 경향은 1회 통과와 마찬가지로 타이어공기압이 증가함에 따라 원추관입저항이 증가하였고, 깊이에 따른 원추관입저항의 효과는 토양표면에서 가장 크고 토양속으로 들어갈수록 감소하는 것으로 나타났다.

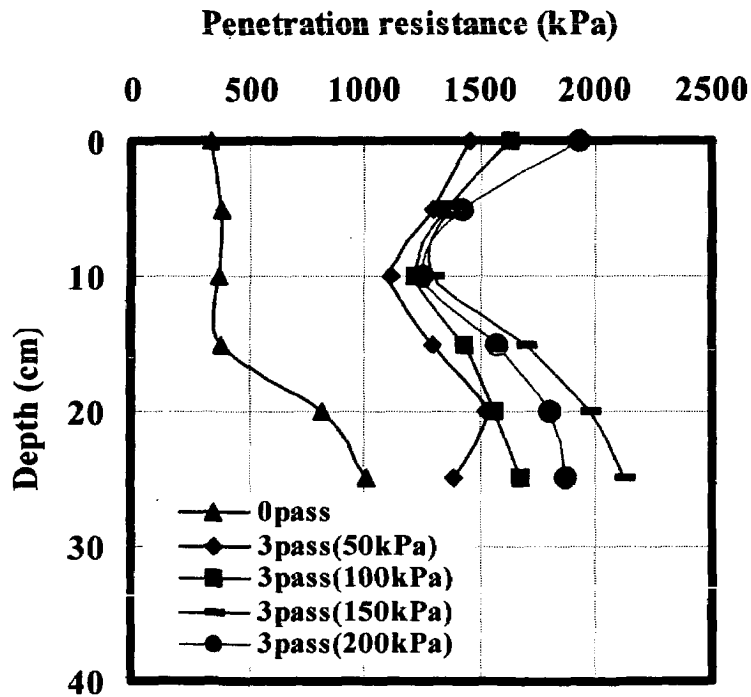


Fig. 5-16 Variations in cone penetration resistance with soil depth after three passage of tractor under four different tire inflation pressures.

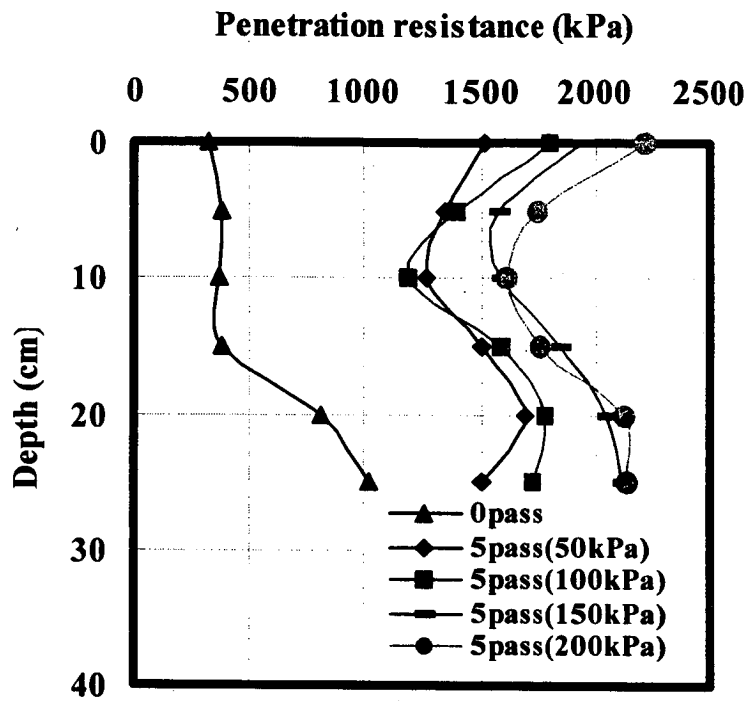


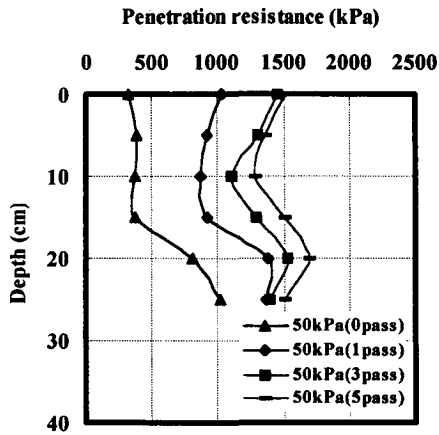
Fig. 5-17 Variations in cone penetration resistance with soil depth after five passage of tractor under four different tire inflation pressures.

그림 5-18의 (a)~(d)는 트랙터의 타이어공기압이 각각 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa인 조건에서 트랙터의 통과횟수가 각각 0, 1, 3, 5회 일 때 측정된 토양깊이별 원추관입저항값을 나타내고 있다.

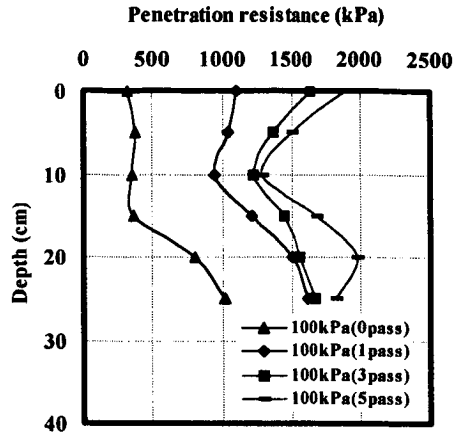
그림 5-18의 (a)에서 타이어의 공기압이 50kPa인 트랙터의 통과횟수가 각각 0, 1, 3, 5회 일 때 토양 깊이별 원추관입저항은 0cm 깊이의 경우에는 각각 328.3kPa, 1032.9kPa, 1457.3kPa, 1521.5kPa, 5cm 깊이의 경우에는 각각 380.0kPa, 915.3kPa, 1299.8kPa, 1359.8kPa, 10cm 깊이의 경우에는 각각 367.0kPa, 868.3kPa, 1108.9kPa, 1276.5kPa, 15cm 깊이의 경우에는 각각 377.8kPa, 925.1kPa, 1294.3kPa, 1506.8kPa, 20cm 깊이의 경우에는 각각 810.1kPa, 1377.9kPa, 1526.3kPa, 1686.8kPa, 그리고 25cm 깊이의 경우에는 각각 1014.8kPa, 1374.0kPa, 1388.7kPa, 1509.2kPa로서 트랙터의 통과횟수가 증가할수록 모든 토양 깊이에 따른 원추관입저항은 증가하였고, 통과횟수의 증가에 따른 토양 깊이별 원추관입저항의 증가량은 토양 표면에서 가장 크고 토양속으로 들어갈수록 감소하였다.

또한 통과횟수의 증가에 따른 원추관입저항의 증가경향은 최초 1회 통과시에 가장 크게 증가하였고 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 통과횟수의 증가에 따른 원추관입저항의 증가 경향은 상대적으로 감소하였다.

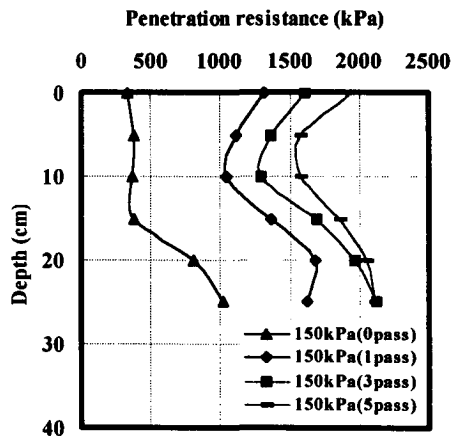
한편, 타이어의 공기압을 100kPa, 150kPa, 200kPa로 증가시킨 후 측정된 그림 5-18의 (b), (c), (d)의 결과도 타이어의 공기압이 50kPa일 때 측정된 (a)의 결과와 거의 동일한 결과를 나타냈다. 그러나 통과횟수의 증가에 따른 원추관입저항의 절대적인 증가량의 크기는 200kPa, 150kPa, 100kPa, 50kPa의 순으로 나타나 공기압이 높은 경우가 공기압이 작은 경우에 비해 통과횟수의 증가에 따른 원추관입저항의 증가량이 크게 나타났다.



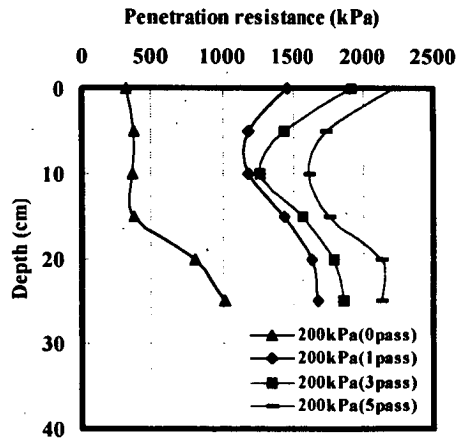
(a) inflation pressure of 50kPa



(b) inflation pressure of 100kPa



(c) inflation pressure of 150kPa



(b) inflation pressure of 200kPa

Fig. 5-18 Variations in cone penetration resistance with soil depth at four different number of passes for tractor with tire inflation pressure of 50kPa, 100kPa, 150kPa and 200kPa.

그림 5-19는 0, 1, 3, 5인 4 수준의 통과횟수에 대해서 타이어공기압의 변화(50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa)에 따른 원추지수(Cone Index: CI)의 관계를 보여 주고 있다. 여기서 원추지수는 0~15cm 깊이에서 측정된 원추 관입저항값의 평균값으로 취하였다.

그림 5-19의 결과에서 볼 수 있듯이, 모든 통과횟수(1, 3, 5)에서 타이어 공기압의 증가는 원추지수를 증가시키는 것으로 나타났고, 공기압의 증가에 따른 원추지수의 증가 경향은 3 가지 통과횟수(1, 3, 5회)에 대해 약간 다른 경향을 보이고는 있지만 전체적인 경향은 타이어의 공기압이 증가함에 따라 원추지수값이 지수곡선 형태로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 각각의 통과횟수에서의 원추지수의 크기는 모든 타이어공기압에 대해 통과 횟수가 많을수록 원추지수가 크게 나타났다.

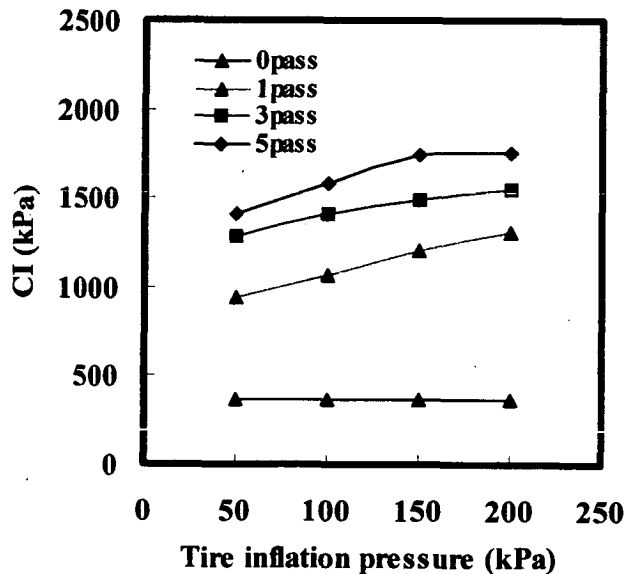


Fig. 5-19 Variations in CI with inflation pressure of tire at four different number of passes.

그림 5-20은 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa인 4 수준의 타이어공기압 조건에서 통과횟수의 변화(0, 1, 3, 5)에 따른 원추지수값의 관계를 보여 주고 있다.

그림 5-20의 결과는 4 수준의 공기압에 대해 모두 통과횟수의 증가는 원추지수값을 증가시키는 것으로 나타났고, 통과횟수의 증가에 따른 원추지수값의 증가경향은 4 수준의 공기압에 모두에 대해 초기 1회 통과시에 원추지수값의 증가량이 가장 크고, 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 원추지수값의 증가량이 감소하는 지수곡선 형태의 증가 경향을 나타내었다. 한편, 공기압 수준별 원추지수값의 크기는 모든 통과횟수에 대해 타이어의 공기압이 높을수록 원추지수값이 크게 나타났다.

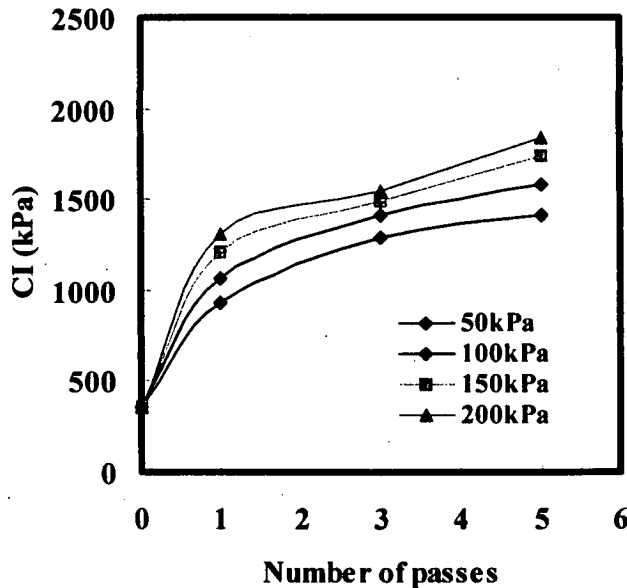


Fig. 5-20 Variations in CI with the number of passes of tractor at inflation pressure of 50kPa, 100kPa, 150kPa and 200kPa, respectively.

3. 요약 및 결론

- 1) 트랙터가 통과한 후 타이어 궤적상에서 측정한 원추관입저항은 트랙터가 통과하기 전 최초 토양상태에 비해 현저히 증가하였고, 공기압에 따른 원추관입저항값은 공기압이 높을수록 크게 나타났다. 한편, 토양 깊이 에 따른 원추관입저항값의 증가경향은 모든 타이어공기압에 대해서 토양 표면에서 가장 크고 토양 깊이가 깊어질수록 감소하였으며 토양속 10cm 이내에서는 원추관입저항의 증가량이 크게 나타났으나 10cm 깊이 아래에서는 원추관입저항의 증가량이 상대적으로 작게 나타났다.
- 2) 트랙터가 통과하기 전의 원추관입저항값에 대해 트랙터의 통과횟수 증가에 따른 원추관입저항값은 모든 토양 깊이에서 1회 통과시에 가장 크게 증가하였고, 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 통과횟수의 증가에 따른 원추관입저항값의 증가경향은 감소하였다. 한편, 통과횟수의 증가에 따른 원추관입저항의 증가경향은 공기압이 높을수록 크게 나타났다.
- 3) 타이어공기압의 증가는 모든 통과횟수에 대해 원추지수를 증가시키는 것으로 나타났고, 공기압의 증가에 따른 원추지수의 증가 경향은 타이어의 공기압이 증가함에 따라 원추지수값의 절대적인 증가량이 감소하는 지수 곡선 형태의 증가 경향을 나타내었다. 또한 각각의 통과횟수에서의 원추지수의 크기는 모든 타이어공기압에 대해 통과횟수가 많을수록 크게 나타났다.
- 4) 트랙터의 통과횟수의 증가는 원추지수값을 증가시키는 것으로 나타났고, 통과횟수의 증가에 따른 원추지수값의 증가경향은 모든 공기압 조건에

대해서 초기 1회 통과시에 원추지수의 증가량이 가장 크고 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 원추지수값의 증가량이 감소하는 지수곡선 형태의 증가경향을 나타내었다.

- 5) 이상의 결과로부터 트랙터의 타이어공기압과 통과횟수의 증가는 토양다짐을 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 토양다짐을 줄이기 위해서는 트랙터가 최초 1회 주행했을 경우에 토양다짐 효과가 가장 크게 나타나므로 트랙터가 통과한 궤적상을 연속해서 통과할 수 있도록 작업 계획을 세우면 전체 경작 면적에 대한 토양다짐을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 타이어의 공기압을 최소 허용 공기압 수준까지 감소시킬 경우 토양다짐을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

제 6 장 결 론

본 연구는 타이어의 공기압이 농용트랙터의 성능 및 토양다짐에 미치는 효과를 실험적으로 구명하기 위해 수행되었다.

타이어공기압이 농용트랙터의 성능과 토양다짐에 미치는 효과를 구명하기 위해, 먼저 인공토조시스템에서 단일 타이어 구동시스템을 이용하여 타이어공기압에 따른 피구동륜과 구동륜의 성능을 실험적으로 구명하였고, 또한 타이어의 공기압, 동하중 및 통과횟수에 따른 토양다짐 효과를 실험적으로 구명하였다. 인공토조내에서 구명된 결과를 토대로 실제 농용트랙터를 이용하여 타이어공기압에 따른 트랙터의 성능과 토양다짐 현상을 실험을 통해 조사하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 농촌지역에서 사용되고 있는 트랙터를 대상으로 트랙터의 공기압 유지실태와 공기압의 중요성에 대한 농민들의 인식을 조사하였다. 조사지역은 경기도와 충청남북도를 주요 대상으로 하였으며, 농촌 현장에서 실제 작업중인 트랙터와 농가에 정차되어 있는 트랙터를 대상으로 조사하였다. 타이어공기압의 조사결과는 대부분의 경우가 적정 공기압보다 높게 나타났다. 좌·우 타이어간에도 공기압의 차가 크게 나타났다. 공기압의 중요성에 대한 농민들의 인식은 대부분의 농민들이 공기압에 대해 무관심하였고, 공기압이 트랙터의 성능에 미치는 영향에 대해서도 이해하지 못하였다. 따라서 타이어의 공기압이 트랙터의 성능에 미치는 효과에 관한 보다 구체적인 연구가 필요할뿐만 아니라 공기압의 중요성에 대한 농민들의 교육이 필요한 것으로 조사되었다.

2. 피구동륜의 운동저항은 모든 공기압에 대해서 노면의 강도가 연약할수록 크게 나타났다. 한편, 공기압에 따른 피구동륜의 운동저항은 비도로의 경우에는 공기압이 증가할수록 운동저항도 함께 증가하였으나, 도로 조건에서는 비도로 조건과는 반대로 공기압의 증가가 운동저항을 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 공기압의 조절을 통해 타이어의 성능을 향상시키기 위해서는 비도로에서는 공기압을 작게, 그리고 도로에서는 공기압을 크게 하는 것이 효과적인 것으로 나타났다.
3. 구동륜의 견인성능은 토양상태와 타이어의 공기압에 크게 영향을 받으며 타이어의 공기압 감소는 구동륜의 운동저항은 감소시키고 견인력과 견인효율은 증대시키는 것으로 나타났고, 그 경향은 토양이 연약할수록 큰 것으로 나타났다. 따라서 구동륜의 견인성능은 공기압의 조절을 통해 향상시킬 수 있고, 공기압의 조절을 통한 구동륜의 성능 향상 효과는 연약지에서 더욱 큰 것으로 판단되었다.
4. 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 세 경우 모두 타이어의 접지압과 토양속 응력값을 증가시키는 것으로 나타났고, 토양속으로 깊이 내려갈수록 응력값의 크기가 감소하였다.
5. 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 증가는 모두 토양변형과 밀도를 증가시키며 토양 깊이별 토양변형량 및 밀도의 변화량은 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 들어갈수록 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 타이어에 의한 토양다짐은 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 감소를 통해 줄일 수 있는 것으로 나타났다.

6. 타이어공기압에 따른 농용트랙터의 견인성능 실험 결과, 타이어공기압의 감소는 트랙터의 운동저항은 감소시키고, 견인력과 견인효율은 증대시키는 것으로 나타났다. 따라서 연약지에서 운용되는 농용트랙터는 공기압의 조절을 통해(최소 허용 공기압까지 타이어공기압의 감소를 통해) 견인성능과 작업성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

7. 트랙터의 타이어공기압과 통과횟수의 증가는 토양다짐을 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 토양다짐을 줄이기 위해서는 트랙터가 최초 1회 주행했을 경우에 토양다짐 효과가 가장 크게 나타나므로 트랙터가 통과한 궤적상을 연속해서 통과할 수 있도록 작업 계획을 세우면 전체 경작 면적에 대한 토양다짐을 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 또한 타이어의 공기압을 최소 허용 공기압 수준까지 감소시킬 경우 토양다짐을 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

8. 이상의 결과로부터 농용트랙터의 타이어공기압의 조절을 통해 트랙터의 작업성능의 향상과 토양다짐의 최소화를 이룰 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 목적을 달성하기 위해서는 운전석에 설치된 제어판을 통해 지면의 상태에 따라 타이어의 공기압을 운전자가 쉽게 조정하여 연약지에서 토양다짐의 감소와 기동성을 향상시킬 수 있는 최첨단 기술인 CTI시스템을 농용트랙터에 적용하는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 박원엽, 이규승, 2000. "그라우저에 의해 발생하는 궤도의 측면추진력 예측", 한국농업기계학회지, 25(1) pp.1~10.
2. 박원엽, 이규승, 2000. "로외에서 운용되는 휠형차량의 견인성능 예측", 한국자동차공학회는문집, 8(5) pp.188~195.
3. 박원엽, 이규승, 2000. "휠형차량의 연약지 견인 성능 예측", 한국농업기계학회지, 25(5) pp.359-368.
4. 이규승, 1993. "연약지에서 상사성 원리를 이용한 차륜의 성능분석에 관한 연구", 한국농업기계학회지 18(3) pp.220-229.
5. Abebe, A. T., T. Tanaka and M. Yamazaki. 1989. Soil Compaction by Multiple Passes of a Rigid Wheel Relevant for Optimization of Traffic. *Journal of Terramechanics* 26(2):139-148.
6. Adam, K. M. and D. C. Erbach. 1995. Relationship of Tire Sinkage Depth to Depth of Soil Compaction. *Transaction of the ASAE* 38(4):1011-1016.
7. Adebisi, O. A., M.Koike, T. Konaka, S. Yuzawa and I. Kuroishi. 1991. "Compaction Characteristics for The Towed and Driven Conditions of A Wheel Operating in An Agricultural Soil", *Journal of Terramechanics*, Vol. 28. No. 4, pp.371-382.
8. Ajay Kumar Sharma, K.P. Pandey, 1998. "Traction data analysis in Reference to A Unique Zero Condition ", *Journal of Terramechanics* 35 179-188.
9. Arvidsson, J. and S. Ristic. 1996. "Soil Stress and Compaction

- Effects for Four Tractor Tyres", *Journal of Terramechanics* 33(5):223-232.
10. Bailey, A. C. and E. C. Burt. 1988. "Soil Stresses State under Various Tire Loadings", *Transaction of the ASAE* 31(3):672- 676.
 11. Bailey, A. C. and E. C. Burt. 1988. "Soil Stresses State Determination under Wheel Loads", *Transaction of the ASAE* 31(5):1309-1314.
 12. Bailey, A. C., R. L. Raper, T. R. Way, E. 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.
 13. Block, W. A., C. E. Johnson, T. R. Bailey, E. C. Burt and R. L. Raper. 1994. "Soil Stresses Measurement Under Rigid Wheel Loading", *Transaction of the ASAE* 37(6):1753- 1756.
 14. Bolling, I. H. 1986. "How to Predict Soil Compaction from Agricultural Tires", *Journal of Terramechanics* 22(4):205-223.
 15. Dwyer, M. J. 1984. "The Tractive Performance of Wheeled Vehicles", *Journal of Terramechanics*, 21(1):19-34.
 16. Dwyer, M. J. 1987. "Prediction of Drawbar Test Performance", *Journal of Terramechanics*, 24(2):167-177.
 17. Gill, W. R. and G. E. Vanden Berg. 1967. Soil Dynamics in Tillage and traction. Handbook 316. Agr. Res. Service, U. S. Dept. Agriculture, Washington. D. C.
 18. Onafenko, O. and A. R. Reece. 1967. Soil stresses and Deformations beneath Rigid Wheels. *Journal of Terramechanics* 4(1):59-80.
 19. Raghavan, G. S., V. E. McKyes, F. Taylor, P. Richard and A.

- Watson. 1979. The Relationship between Machinery Traffic and Corn Yield Reductions in Successive years. Transaction of the ASAE 22(4):1256-1259.
20. Raper, R. L., A. C. Bailey, E. C. Burt and T. R. Way. 1993. "Inflation pressure and Dynamic load Effect on Soil Deformation and Soil-tire interface stresses", ASAE meeting presentation, No. 93-1517.
21. Reaves, C. A. and A. W. Cooper. 1960. Stress Distribution in Soils Under Tractor Loads. Journal of Agricultural Engineering Research 41:20-21, 31
22. Reece, A. R. 1996. "Principles of Soil-Vehicle Mechanics", Proc. Institute of Mechanical Engineers, Vol. 180. Part 2A.
23. Schwanghart, H. 1991. Measurement of Contact Area, Contact Pressure and Compaction under Tires in Soft Soil. Journal of Terramechanics 28(4):309-318.
24. Shibusawa, S. and A. Sasao, 1996. " Traction Data Analysis With the Traction Prediction Equation " Journal of Terramechanics, Vol. 33, No, 1 pp, 21-28.
25. Shmulevich, I., U.Mussel and D. Wolf, 1998. "The effect of velocity on rigid wheel performance", Journal of Terramechanics, Vol. 35(3) pp.189~207.
26. Upadhyaya, S. K., W.J. Chancellor, D.Wulfsohn and J. L. Glancey, 1989. "Sources of variability in Traction Data", Journal of Terramechanics, Vol. 25, No. 4, pp. 249-272.
27. Upadhyaya, S. K., D. Wulfsohn and G. Jubbal, 1989. "Traction

- Prediction Equations for Radial Ply Tyres", Journal of Terramechanics, Vol. 26, No,2, pp. 149-175.
28. 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.
 29. Way, T. R., T. Kishimoto, E. C. Burt and A. C. Bailey, 1997. "Tractor Tire Aspect Ratio Effects on Soil Stresses and Rut Depths", Transaction of the ASAE 40(4):871-881.
 30. Wong, J. Y. 1984. "Terramechanics and Off-road Vehicles", Elsevier Publishers.
 31. Wong, J. Y. 1993. "Theory of Ground Vehicles", John Wiley & Sons.
 32. Wulfsohn, D., S. K. Upadhyaya and W. J. Chancellor, 1988. " Tractive Characteristics of Radial ply and Bias ply Tyres in a California Soil " Journal of Terramechanics, Vol.25, No. 2. pp. 111-134.
 33. Yu Gu and R. L. Kushwaha, 1994. " Dynamic Load Distribution and tractive Performance of A Model Tractor" Journal of Terramechanics, Vol. 31, No. 1 ,pp.21-39.