

타이어공기압에 따른 트랙터의 견인성능과 토양다짐

The Effects of Tire Inflation Pressure on Soil Compaction and Tractive Performance of Tractor

박 원 엽* 이 규 승* 오 만 수*
 정회원 정회원 정회원
 W. Y. Park K. S. Lee W. S. Wu

1. 서 론

수도작이 전체 농업에서 큰 비중을 차지하고 있는 우리나라의 농업은 전체 논 면적 중 9.1%를 차지하고 있는 저습담 연약지에서 점점 대형화되어 가는 트랙터를 효율적으로 사용하기에는 많은 문제점이 있다. 그 중에서도 대표적인 문제점은 저습담 연약지에서의 기동성 또는 작업 가능성의 문제와 간척지, 전작 및 목장지역에서의 토양다짐현상이다. 기동성문제는 작업자체를 불가능하게 하거나 작업효율을 현저히 감소시키고, 토양다짐현상은 토양속의 공극감소로 인해 불투수층을 형성하고 뿌리의 성장저하를 초래함으로써 농산물의 생산량을 감소시킨다.

토양다짐은 트랙터 등과 같은 대형 농기계의 주행장치 즉, 타이어의 공기압과 통과횟수 등에 크게 영향을 받고, 연약지에서 운용되는 트랙터의 성능은 타이어의 공기압에 크게 영향을 받는다. 따라서 이러한 문제점들을 해결하기 위해서는 운전석에 설치된 제어판(control panel)을 통해 지면의 상태에 따라 타이어의 공기압을 조절하여 연약지에서 기동성과 작업성능을 향상시키고 토양다짐을 감소시킬 수 있는 최첨단 기술인 CTI시스템(Automatic Central Tire Inflation Pressure System)의 이용이 필요하다. 그러나 국내의 농용트랙터에 이러한 CTI시스템을 도입하기 위해서는 먼저 트랙터가 운용되고 있는 토양 조건에서 타이어의 공기압이 트랙터의 성능과 토양다짐에 미치는 효과를 구명하는 연구가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 농용트랙터

에 CTI 시스템을 적용하기 위한 기초 연구로서 타이어의 공기압이 트랙터의 견인성능과 토양다짐에 미치는 효과를 실험적으로 조사하기 위해 수행되었다.

2. 재료 및 방법

가. 견인력 실험

1) 실험토양

견인력 실험은 성균관대학교 교내에 위치한 논 토양에서 실시하였다. 실험토양의 물리적 특성이 견인력실험을 수행하기 전에 측정되었으며, 측정 변수로는 토양의 원추지수, 결보기밀도, 수분함수율 등이다. 결보기밀도는 실험토양내의 임의의 5곳에서 100cc 용량의 토양채취관을 이용하여 토양샘플을 채취하여 구하였고, 함수율은 토양채취관에 의해 수집된 토양샘플을 오븐 건조법에 의해 구하였다. 또한, 토양의 원추지수는 SR-2 모델의 토양경도측정장치를 이용하여 실험토양내의 임의의 5곳을 선정하여 측정하였다. 표 1에 견인력실험이 수행된 실험토양에서 측정된 토양의 물리적 특성을 나타내었다.

Table 1 Soil properties of experimental soil

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

† 본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 연구비지원에 의해 수행되었음.

* 성균관대학교 생명공학부 바이오메카트로닉스전공

2) 견인력 실험 장치

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, 하중트랙터에는 견인력 실험시 센서로부터 측정되는 신호를 수집하기 위한 자료수집장치를 구성하였다. 견인력실험에 사용된 시험트랙터와 하중트랙터는 각각 (주)LG기계의 45마력 트랙터(LT470D)와 대동(주)의 22마력 트랙터(L2203)를 이용하였다. 그림 1과 그림 2는 각각 견인력실험에 사용된 시험트랙터와 하중트랙터를 보여주고 있고, 표 2에 각각의 제원을 나타내었다.



Fig. 1 View of test tractor.



Fig. 2 View of load tractor.

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

이론 주행거리 측정을 위하여 시험트랙터의 구

동축에 로타리엔코더를 설치하였고, 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. 한편, 실제 주행거리를 측정하기 위하여 로타리엔코더가 부착된 5륜을 제작하여 시험트랙터의 후부에 장착하였다.

Table 2 Specifications of test and load tractor

Item	Specifications	
	LT470D	L2203
Model	LT470D	L2203
Front Tire Size (mm)	9.5-20-6PR	7-14-4PR
Rear Tire size (mm)	13.6-28-6PR	11.2-24-4PR
Max. Engine Power (PS/rpm)	45/2600	22 / 2600
Vehicle Weight (kN)	23.64	11.77

견인력 측정은 시험트랙터의 후부와 하중트랙터의 전부에 강선을 연결한 후 그 사이에 CAS(주)에서 제작한 2ton 용량의 하중변환기(SBA-2T)를 부착하여 하중변환기에 나타나는 인장력으로부터 측정하였다. 한편, 견인력 실험시 컴퓨터 및 계측장비 등에 전원을 공급하기 위해 1000W 용량의 소형 발전기를 이용하였다.

3) 실험방법

타이어의 공기압이 트랙터의 견인성능에 미치는 영향을 조사하기 위하여 시험트랙터의 타이어 공기압을 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa의 세 수준으로 조정하여 견인력실험을 수행하였다. 견인력 실험시 측정된 성능변수로는 트랙터의 견인력, 운동저항, 슬립 등이며 모든 변수들은 측정자료의 신뢰성을 높이기 위해 4회 반복 측정하였다.

가) 운동저항 측정

운동저항은 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 측정함으로써 구하였다.

나) 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, 트랙터의 슬립-견인력 관계를 구하기 위하여 견인력 측정은 먼저 하중차량을 중립에 놓은 상태에서 시험차량의 구동력에 의해 하중변환기에 나타난 견인력을 측정하였고, 하중트랙터의 제동력을 단계적으로 변화시켜 가며 시험트랙터의 슬립과 견인력을 측정하여 슬립의 변화에 따른 견인력 관계를 측정하였다.

나. 토양다짐 실험

1) 실험토양

타이어공기압에 따른 트랙터의 토양다짐 실험은 경기도 수원지역의 밭토양에서 실시하였다. 실험토양의 물리성은 토양다짐 실험을 수행하기 직전에 토양의 겉보기밀도, 수분함량, 원추지수 등을 측정하였으며 표 3에 실험토양의 물리적 특성을 나타내었다.

Table 3 Physical properties of experimental soil

Cone Index (kPa)	Bulk density (kg/m ³)	Moisture content (d.b., %)
363.28	1390	16.55

2) 실험 트랙터

토양다짐 실험에 사용된 트랙터는 견인력실험에 사용된 (주)LG기계의 45마력 트랙터를 이용하였다.

3) 실험방법

타이어의 공기압과 트랙터의 통과횟수의 변화에 따른 토양다짐 정도를 측정하기 위해, 타이어의 공기압을 각각 50kPa, 100kPa, 150ka, 200kPa의 4 수준으로 선정하였고, 타이어의 통과횟수는 트랙터가 통과하기 전 최초 상태(0회)와 1, 3, 5회의 4 수준으로 선정하였다(표 4).

한편, 각각의 실험인자(타이어공기압, 통과횟수)에 대한 토양다짐의 분석은 토양다짐 정도의

의 척도로서 널리 이용되고 있는 원추관입저항값을 이용하여 비교, 분석하였다. 원추관입저항은 각각의 타이어공기압과 통과횟수에 대해 트랙터가 통과한 후 SR-2형 토양경도측정장치를 이용하여 타이어 궤적상의 임의의 5곳을 선정한 후 0~25cm 깊이까지 5cm 간격으로 측정하였다.

Table 4 Levels of experimental variables

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

3. 결과 및 고찰

가. 타이어공기압에 따른 트랙터의 견인성능

타이어공기압의 변화에 따른 트랙터의 견인성능 평가는 비도로차량(off-road vehicle)의 견인성능의 평가를 위해 일반적인 척도로 사용되고 있는 운동저항계수, 견인계수, 견인효율 등을 이용하여 비교, 분석하였다.

1) 타이어공기압에 따른 트랙터의 운동저항

그림 3은 타이어의 공기압이 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa일 때 측정한 트랙터의 운동저항계수값을 나타내고 있다.

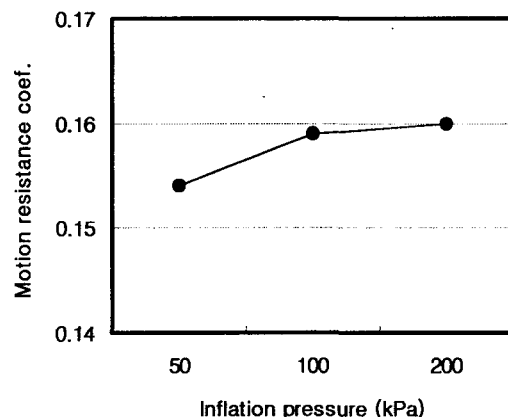


Fig.3 Motion resistance coefficient of tractor with inflation pressure of tire.

그림 3에서 세 수준의 타이어공기압에 대한 트랙터의 운동저항계수는 각각 0.154, 0.159, 0.160 으로서 트랙터의 운동저항계수는 타이어의 공기압이 낮을수록 작게 나타났다. 또한 공기압의 변화에 따른 운동저항계수의 변화량은 공기압이 낮은 경우에서 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 트랙터의 운동저항은 공기압의 조절을 통해 줄일 수 있으며, 공기압의 감소를 통한 운동저항이 감소 효과는 낮은 공기압에서 그 효과가 큰 것으로 나타났다.

2) 타이어공기압에 따른 트랙터의 견인력

그림 4는 타이어의 공기압이 100kPa일 때 측정된 트랙터의 슬립-견인계수 관계를 보여주고 있다.

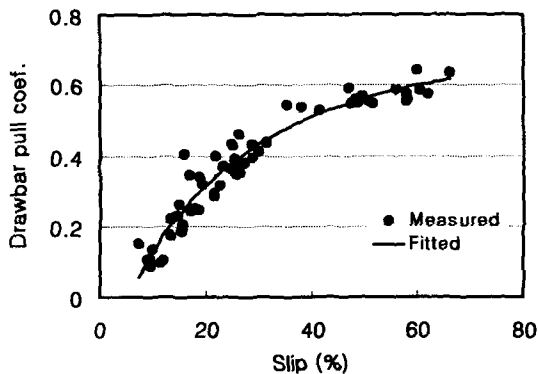


Fig.4 Relationship between slip and drawbar pull coefficient for tractor with tire inflation pressure of 100kPa.

그림 4에 나타난 바와 같이 측정된 슬립-견인계수 관계는 슬립이 증가함에 따라 견인계수도 증가하고 전체 슬립 구간에서 어떤 일정한 경향을 보이는 것으로 나타났지만, 토양의 불균일 등으로 인해 동일한 슬립에 대해서도 측정치가 넓게 분포되어 공기압의 변화에 따른 트랙터의 슬립-견인계수 관계를 직접적으로 비교하기에는 적당치 못한 것으로 판단되었다. 따라서 본 연구에서는 공기압에 따른 트랙터의 슬립-견인계수 관계를 비교하기 위해 슬립-견인계수의 측정치를 회귀방정식에 의해 모형화하여 비교 분석하였다.

그림 5는 타이어의 공기압이 각각 50kPa, 100kPa, 200kPa일 때의 슬립-견인계수 관계를

보여주고 있다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 세 가지 공기압 수준에 대한 슬립-견인계수 관계는 전체 슬립구간에 걸쳐 공기압이 작을수록 견인계수가 크게 나타나 트랙터의 견인력은 공기압의 감소를 통해 향상시킬 수 있는 것으로 나타났다.

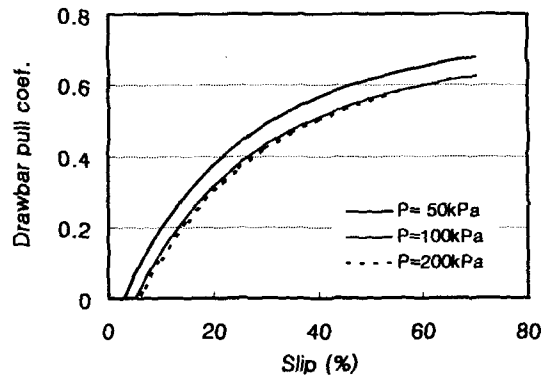


Fig.5 slip-drawbar pull coefficient curves for three different inflation pressure of tire.

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

3) 타이어공기압에 따른 트랙터의 견인효율

그림 6은 50kPa, 100kPa, 200kPa인 세 수준의 타이어공기압에 대해 측정된 트랙터의 슬립-견인효율 관계로서 세 공기압 조건에서의 견인효율의 크기는 전체 슬립 구간에서 모두 50kPa, 100kPa, 200kPa의 순으로서 공기압이 낮을수록 견인효율이 높은 것으로 나타났다.

한편, 각각의 공기압에서의 최대 견인효율은 공기압이 200kPa인 경우에는 52.26%(슬립 25%)이고, 100kPa의 경우에는 53.20%(슬립 20%), 그리고 50kPa의 경우에는 56.84%(슬립 20%)로서 100kPa과 50kPa의 공기압에서의 최대 견인효율은 공기압이 200kPa인 경우에 비해 각각 1.79%,

8.75%의 증가를 나타내었다. 즉, 트랙터의 견인효율은 타이어의 공기압이 낮을수록 크게 나타났고, 공기압이 낮을수록 최대 견인효율도 크게 나타났다. 또한, 같은 효율을 발휘하는데 있어서도 공기압이 낮은 경우가 공기압이 높은 경우에 비해 트랙터의 슬립이 작게 나타났기 때문에 작업 효율면에서도 공기압이 낮은 경우가 공기압이 높은 경우에 비해 우수한 것으로 판단된다.

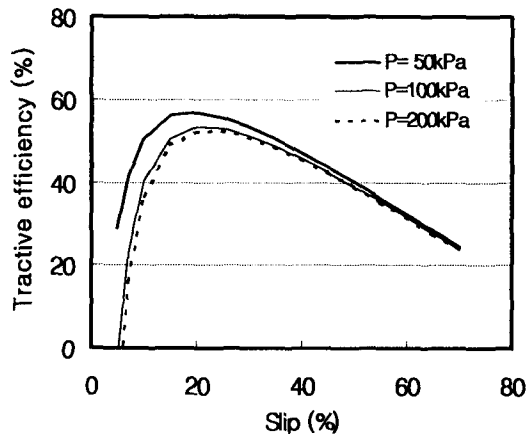


Fig.6 slip-tractive efficiency curves with inflation pressure of tire.

나. 타이어공기압에 따른 토양다짐

그림 7은 각각 트랙터가 통과하지 않은 최초 토양상태(No pass)와 4가지 다른 타이어공기압(50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa)을 갖는 트랙터를 이용하여 트랙터가 통과(1 pass)한 후에 타이어가 지나간 कै적상에서 SR-2형 토양경도측정기를 이용하여 측정된 토양깊이에 따른 원추관입저항(cone penetration resistance) 결과를 보여주고 있다.

그림 7에 나타난 바와 같이 트랙터가 통과하기 전 최초 상태(No pass)에서 토양속 0~25cm 깊이에서 5cm 간격으로 측정된 원추관입저항은 각각 328.3kPa, 380kPa, 367kPa, 377.8kPa, 810.1kPa, 1014.8kPa로서 깊이에 따른 원추관입저항은 0~15cm 깊이 구간에서는 거의 변화가 없었고, 15~25cm 범위에서는 깊이가 증가함에 따라 크게 증가하는 경향을 나타내었다.

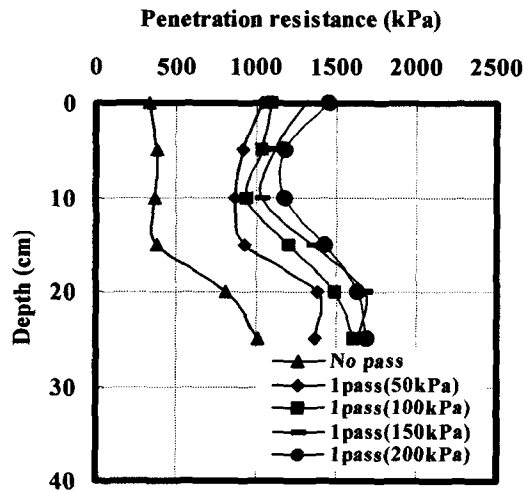


Fig.7 Variations in cone penetration resistance with soil depth after one passage of tractor under four different tire inflation pressures.

한편, 4 수준의 다른 타이어공기압 조건에 대해 트랙터가 통과한 후에 측정된 원추관입저항의 변화를 살펴 보면, 타이어의 공기압이 50kPa인 경우에는 0~25cm 깊이에서의 원추관입저항값이 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.

또한 트랙터의 타이어공기압을 각각 100kPa, 150kPa, 200kPa로 변화시킨 후 측정된 토양 깊이에 따른 원추관입저항은 타이어의 공기압이 50kPa인 경우에 비해 모든 토양 깊이에서 원추관입저항이 증가하였고, 각각의 공기압에서 측정된 원추관입저항값의 크기는 모든 토양 깊이에서 200kPa, 150kPa, 100kPa, 50kPa의 순으로서 타이어의 공기압이 높을수록 원추관입저항값이 크게 나타났다. 또한 토양 깊이에 따른 원추관입저항의 증가량은 모든 공기압에 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.

한편, 그림 8과 그림 9는 트랙터의 통과횟수를 각각 3회 및 5회로 증가시킨 상태에서 타이어공기압의 변화에 따라 측정된 토양 깊이에 따른 원

추관입저항값의 결과로서 트랙터의 통과횟수를 증가시켰을 경우에는 모든 공기압 조건에서 1회 통과와 비교하여 마찬가지로 타이어공기압이 증가함에 따라 원추관입저항이 증가하였으나, 1회 통과에 비해서는 상대적으로 원추관입저항값이 크게 증가하였고, 깊이에 따른 원추관입저항의 효과는 토양표면에서 가장 크고 토양속으로 들어갈수록 감소하는 것으로 나타났다.

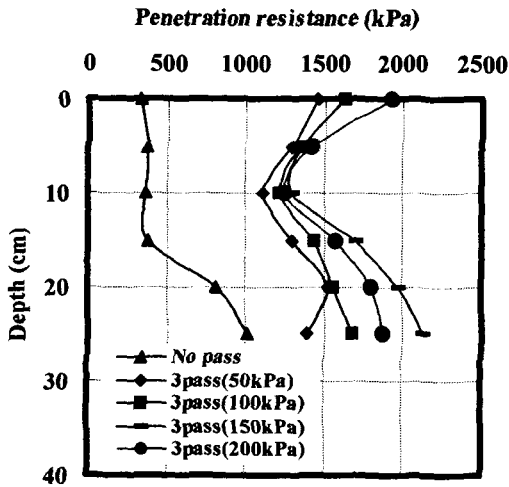


Fig.8 Variations in cone penetration resistance with soil depth after three passage of tractor under four different tire inflation pressures.

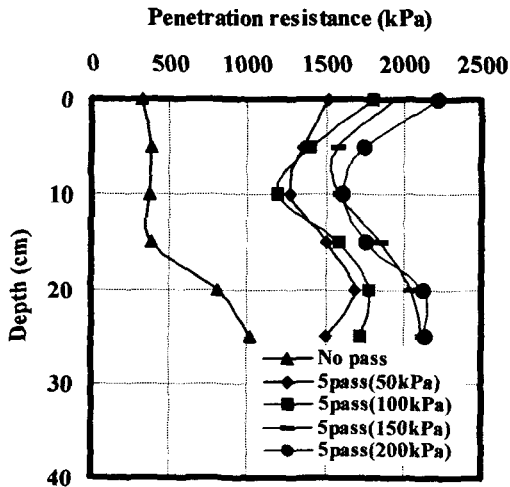


Fig.9 Variations in cone penetration resistance with soil depth after five passage of tractor under four different tire inflation pressures.

그림 10의 (a)~(d)는 타이어의 공기압이 각각 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa인 조건에서 트랙터의 통과횟수가 각각 0, 1, 3, 5회 일 때 측정된 토양깊이별 원추관입저항값을 나타내고 있다.

타이어의 공기압이 50kPa인 그림 10의 (a)에서 트랙터의 통과횟수가 각각 0, 1, 3, 5회 일 때 측정된 토양깊이별 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 통과횟수가 증가할수록 모든 토양 깊이에서의 원추관입저항은 증가하였고, 통과횟수의 증가에 따른 토양깊이별 원추관입저항의 증가량은 토양표면에서 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 증가경향은 상대적으로 감소하였다.

한편, 타이어의 공기압을 100kPa, 150kPa, 200kPa로 증가시킨 후 측정된 그림 10의 (b), (c), (d)의 결과도 공기압이 50kPa일 때 측정된 (a)의 결과와 거의 동일한 결과를 나타냈다. 그러나 통과횟수의 증가에 따른 원추관입저항값의 절대적인 증가량은 200kPa, 150kPa, 100kPa, 50kPa의 순으로서 공기압이 높은 경우가 공기압이 작은 경우에 비해 통과횟수의 증가에 따른 원추관입저항의 증가량이 크게 나타났다.

그림 11은 통과횟수가 각각 0, 1, 3, 5회 일 때 공기압의 변화(50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa)에 따른 원추지수(Cone Index; CI)의 관계를 보여주고 있다. 여기서 원추지수는 0~15cm 깊이에서 측정된 원추관입저항값의 평균값으로 취하였다.

그림 11의 결과에서 볼 수 있듯이, 모든 통과횟수(1, 3, 5)에서 타이어공기압의 증가는 원추지수를 증가시키는 것으로 나타났고, 공기압의 증가에 따른 원추지수의 증가 경향은 3 가지 통과횟수(1, 3, 5회)에 대해 약간 다른 경향을 보이고

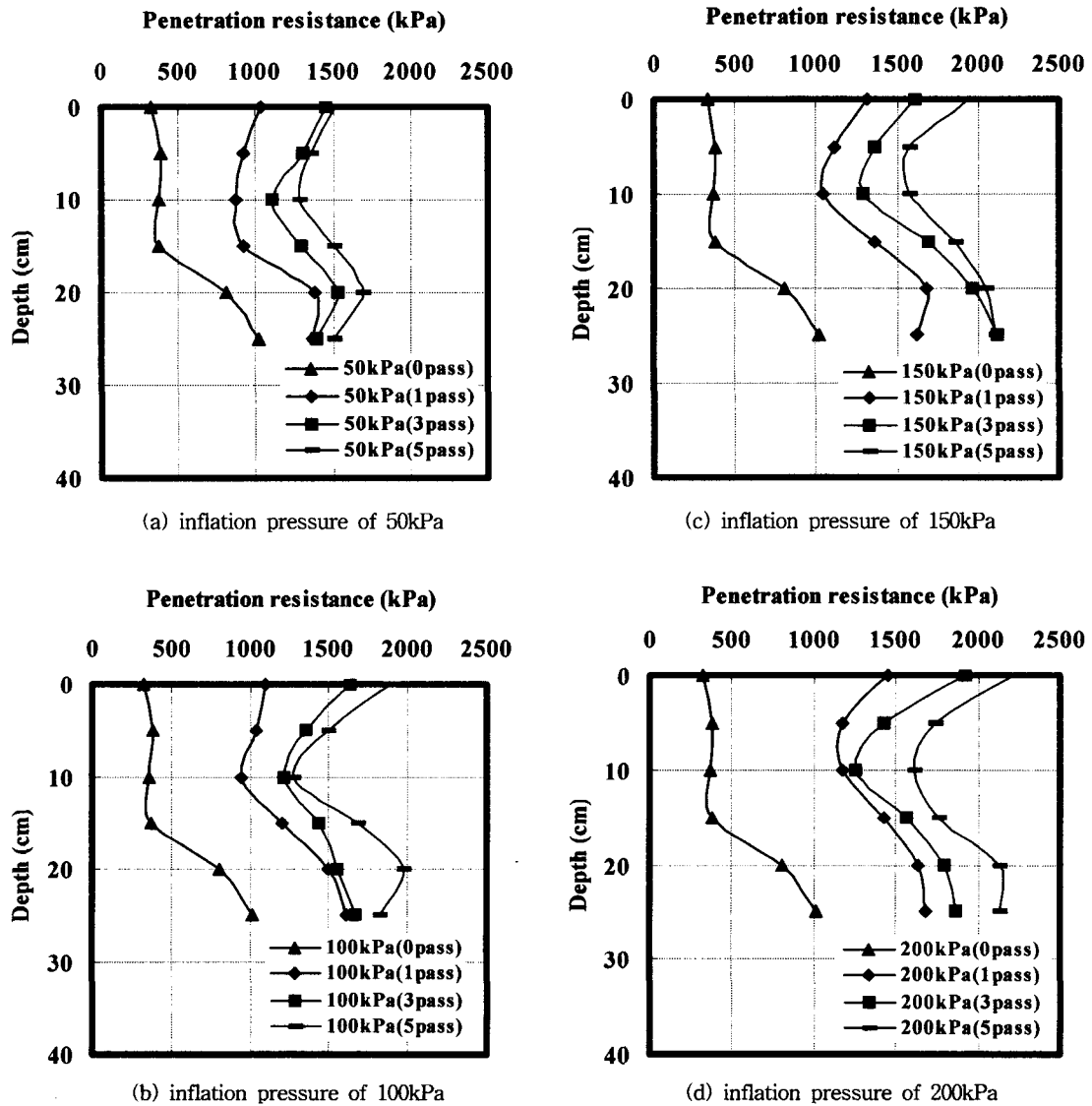


Fig.10 Variations in cone penetration resistance with soil depth at four different number of passes for tractor with tire inflation pressure of 50kPa, 100kPa, 150kPa and 200kPa.

는 있지만 전체적인 경향은 타이어의 공기압이 증가함에 따라 원추지수값이 지수곡선 형태로 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 각각의 통과횟수에서 원추지수의 크기는 모든 공기압에 대해 통과횟수가 많을수록 원추지수가 크게 나타났다.

그림 12는 50kPa, 100kPa, 150kPa, 200kPa인 4 수준의 타이어공기압 조건에서 통과횟수의 변화 (0, 1, 3, 5)에 따른 원추지수값의 관계를 보여 주고 있다. 그림 12의 결과는 통과횟수의 증가는

모든 공기압에 대해서 원추지수값을 증가시키는 것으로 나타났고, 통과횟수의 증가에 따른 원추지수값의 증가경향은 4 수준의 공기압에 대해 모두 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.

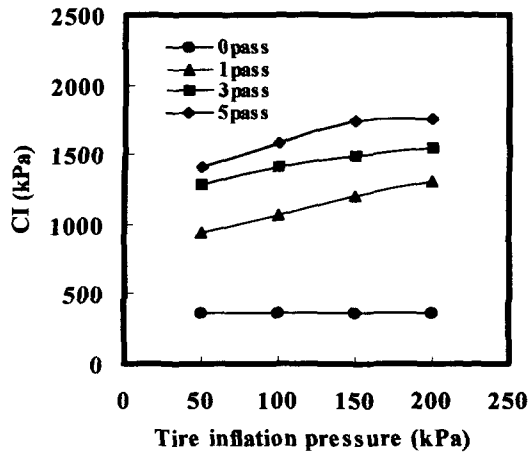


Fig.11 Variations in CI with inflation pressure of tire for four different number of passes.

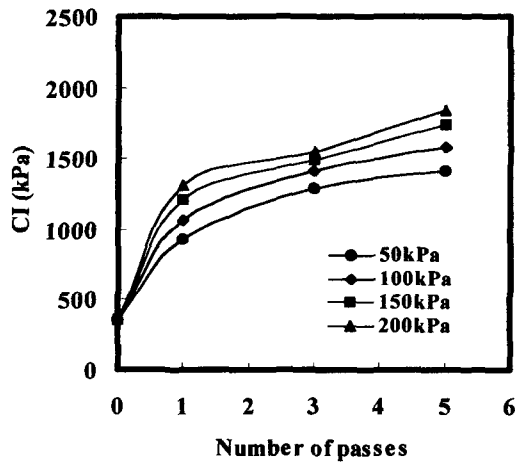


Fig.12 Variations in CI with the number of passes of tractor for inflation pressures of 50kPa, 100kPa, 150kPa and 200kPa.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 타이어의 공기압이 농용트랙터의 견인성능과 토양다짐에 미치는 효과를 실험적으로 조사하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 타이어공기압에 따른 트랙터의 견인성능 실험 결과, 공기압의 감소는 트랙터의 운동저항은 감소시키고, 견인력과 견인효율은 증대시키는 것으로 나타났다. 따라서 연약지에서 운용되는 트랙터는 공기압의 조절을 통해(최소 허용 공기압

까지 타이어공기압의 감소를 통해) 견인성능과 작업성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

2) 트랙터의 타이어공기압과 통과횟수의 증가는 모두 토양다짐을 증가시키는 것으로 나타났다. 따라서 토양다짐을 줄이기 위해서는 트랙터가 통과한 케적상을 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.

3) 위의 결과로부터 트랙터의 작업성능의 향상과 토양다짐의 최소화는 타이어공기압의 조절을 통해 어느 정도 이룰 수 있는 것으로 판단된다. 따라서 이러한 목적을 달성하기 위해서는 운전석에 설치된 제어판을 통해 지면의 상태에 따라 타이어의 공기압을 운전자가 쉽게 조절할 수 있는 최첨단 기술인 CTI시스템을 농용트랙터에 적용하는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Bolling, I. H. 1986. How to Predict Soil Compaction from Agricultural Tires. *Journal of Terramechanics* 22(4):205-223.
4. 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.*
5. 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.