

## 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수가 토양다짐에 미치는 영향

### The Effect of Dynamic Load, Inflation Pressure and Number of Passes of Tire on Soil Compaction under the Tire

박원엽  
정회원  
W. Y. Park

이규승  
정회원  
K. S. Lee

#### ABSTRACT

This study was carried out to investigate experimentally the effect of three factors(dynamic load, inflation pressure and number of passes of tire) on soil compaction under the tire. The experiment were conducted with a 6.00R14 radial-ply tire for sandy loam soil using soil bin system. To evaluate the effect of three factors on soil compaction under the tire, the sinkage, density and volume of soil under the tire were measured for the three levels of dynamic load(1.17kN, 2.35kN and 3.53kN), for the three levels of tire inflation pressure(103.42kPa, 206.84kPa and 413.69kPa), and for three different number of passes(1, 3 and 5).

The results of this study can be summarized as follows :

1. As dynamic load, inflation pressure and number of passes of the tire increased, soil sinkage and density increased, and volume of soil decreased. Thus increase in dynamic load, inflation pressure and number of passes of the tire would increase soil compaction.
2. The effect of tire inflation pressure on sinkage, density and volume of soil under the tire was relatively less than that of the dynamic load. Therefore, it was concluded that dynamic load was more important factor affecting soil compaction in comparison to the inflation pressure of tire.
3. The effect of three different factors on sinkage, density and volume of soil decreased as the soil depth increase. Consequently, it was found that soil compaction at a shallow depth in soil was larger than that at deep place in soil.

**Keywords** : Soil compaction, Soil density, Dynamic load, Inflation pressure, Number of passes.

#### 1. 서 론

최근 국내에서 사용되고 있는 농업기계는 점점

대형화되고 있는 추세이다. 그러나 농기계의 대형화, 특히 트랙터 등과 같은 승용농기계의 대형화는 과도한 토양다짐을 초래하게 되어 작물의 생산

---

This Study was Supported by Technology Development Program for Agriculture and Forestry, Ministry of Agriculture and Forestry, Republic of Korea. The article was submitted for publication in September 2001, reviewed in November 2001, and approved for publication by the editorial board of KSAM in November 2001. The authors are Won Yeop Park, Resaerch Associate and Kyou Seung Lee, Professor, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea. The corresponding author is K. S. Lee, Professor, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea. Fax:+82-31-290-7830. E-mail: <seung@yrim.skku.ac.kr>.

량에 영향을 미치게 된다. Gill 등(1967)은 토양다짐은 토양저항력을 증가시켜 뿌리성장을 방해하고 이로 인해 작물의 수확량을 감소시킨다고 보고하였고, Raghavan(1979)은 기계류의 사용에 따른 토양다짐과 곡물 생산량의 관계에 관한 연구에서 토양다짐은 곡물의 수확량을 30~50%까지 감소시킨다고 보고하였다.

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 비선형으로 보고하였고, 타이어의 침하와 토양다짐의 관계를 지수함수 관계로 나타내었다.

토양다짐은 트랙터 등과 같은 대형 농기계의 주행장치 즉, 타이어에 작용하는 수직하중이 주 원인이고, 또한 타이어의 공기압과 타이어의 통과횟수 등도 토양다짐에 크게 영향을 미친다. 즉, 토양다짐은 타이어의 통과에 따른 타이어-토양간의 상호작용에 의한 타이어 아래 토양속 응력변화에 따른 토양의 압축에 의한 체적감소 즉, 토양의 변형과 밀도의 증가에 의해 나타나게 된다. 따라서 타이어에 의한 토양다짐 현상을 구명하기 위해서는 타이어에 작용하는 하중, 공기압, 타이어의 통과횟수의 변화에 따른 토양속 응력분포에 대한 연구가 선행되어야 하고, 다음 단계로서 타이어의 통과에 따른 토양변형 및 밀도의 변화에 관한 연구가 수행되어야 한다.

한편, 국내에서는 박 등(2001)이 타이어에 의한 토양다짐 현상을 규명하기 위한 기초 연구로서 타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수의 변화에 따른 토양속 응력분포를 실험적으로 구명하였다. 그러나 위의 연구에서 보고된 타이어 아래 토양속 응력분포의 결과만으로는 토양다짐 현상을 직접적으로 나타낼 수 없다. 즉, 타이어 아래에서의 실제적인 토양다짐 정도를 구명하기 위해서는 타이어 아래 토양속 응력분포의 구명뿐만 아니라 응력분포로부터 나타나는 토양의 변형 및 밀도의 변화에 대한 연구가 필수적이다.

따라서 본 연구는 타이어에 의한 토양다짐 현상을 구명하기 위하여 타이어의 동하중, 공기압 및

통과횟수의 변화가 타이어 아래에서의 토양변형 및 밀도의 변화에 미치는 영향을 실험적으로 구명하기 위해 수행되었다.

## 2. 재료 및 방법

### 가. 실험장치

#### (1) 실험토양

타이어 아래 토양의 변형 및 밀도변화를 측정하기 위한 실험은 신뢰성 있는 자료의 측정 및 수집을 위해 인공토조시스템에서 수행되었다. 인공토조내의 실험토양은 미농무성(USDA) 분류로 사양토(sandy loam)이다.

#### (2) 타이어 구동 시스템

실험에 사용된 타이어는 국내 H사에서 생산되는 6.00 R14 LT인 타이어로서 이 타이어는 타이어의 외경, 단면폭이 각각 678mm, 152mm, 허용 최대 공기압과 최대하중은 각각 447.85kPa과 7.36 kN이다.

실험 타이어는 인공토조시스템의 측정대차에 장착된 차륜프레임에 부착되어 측정대차에 설치되어 있는 유압모터에 의해 구동된다. 타이어가 장착된 차륜프레임은 웜기어와 선형배어링에 의해 좌·우 및 상·하 방향으로 자유로이 이동할 수 있도록 구성되었다. 한편 유압모터로부터 발생된 토크는 체인과 스프로킷 전달방식에 의해 타이어를 구동할 수 있도록 하였으며 타이어에서 이용 가능한 최대 동력은 8ps이다. 그림 1은 본 실험에서 사용한 타이어 구동시스템의 모습을 보여주고 있다.



Fig. 1 View of tire driving system.

나. 실험방법

(1) 토양가공

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

(2) 실험인자

타이어 아래에서의 토양다짐 현상을 조사하기 위하여 토양다짐에 크게 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는 타이어의 동하중, 공기압, 그리고 통과횟수의 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 2에는 본 실험에서 이용한 각 변수들의 실험조건을 나타내었다.

(3) 타이어 아래 토양의 침하량 측정

타이어 아래 토양의 침하량을 조사하기 위해 토

양표면(타이어-토양 접지면)과 토양속 10cm 및 20cm 깊이에서 토양층의 침하분포를 측정하였다.

토양표면에서의 침하량은 타이어가 통과한 후 토양표면에 나타난 타이어의 바퀴자국(rut depth distribution)을 측정함으로써 결정하였고, 토양속 10cm 및 20cm 깊이의 토양층의 침하량은 타이어가 통과하기 전에 토양속 10cm 및 20cm 깊이 토양층 각각에 은박지를 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 2는 실제로 타이어가 통과한 후 토양표면에서의 침하형태와 토양속 10cm 및 20cm에서 은박지가 변형된 형태를 보여주고 있다.

(4) 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.

Table 1 Soil physical properties of experimental soil

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

Table 2 Levels of experimental variables

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

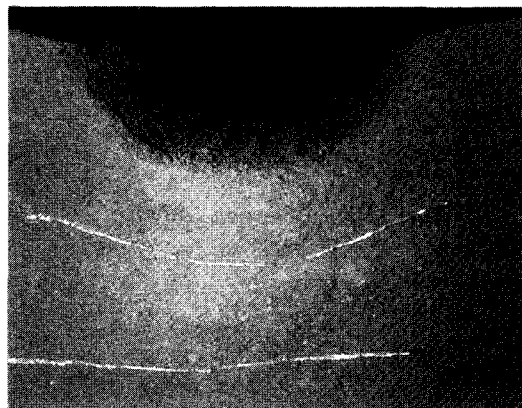


Fig. 2 Example of soil deformation under a tire.

타이어의 통과에 따른 토양밀도의 변화는 두 토양층 사이의 구간(0~10cm, 10~20cm)에서 타이어 통과 전의 토양밀도( $\rho_{before}$ )와 통과 후의 토양밀도( $\rho_{after}$ )를 측정 한 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/cm<sup>3</sup>의 범위였고, 토양속 10~20cm 구간은 1.233~1.336g/cm<sup>3</sup>의 범위로서 각 구간의 평균 밀도는 각각 1.166g/cm<sup>3</sup>과 1.292g/cm<sup>3</sup> 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 토양변형량은 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 측정 한 후, 세 토양층 사이의 두 구간(0~10cm, 10~20cm)에 대해서 타이어의 통과전 단면적( $A_{before}$ )과 통과 후의 단면적( $A_{after}$ )을 측정 한 후, 통과 전에 대한 통과 후의 면적비( $A_{ratio} = A_{after} / A_{before}$ )를 이용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 타이어 아래 토양의 침하

그림 3은 103.42kPa의 공기압과 1.17kN의 동하중하에서 타이어가 통과한 후에 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm 깊이에서 측정 한 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 내려 갈수록 작게 나타났으며 토양속 20cm 깊이에서는

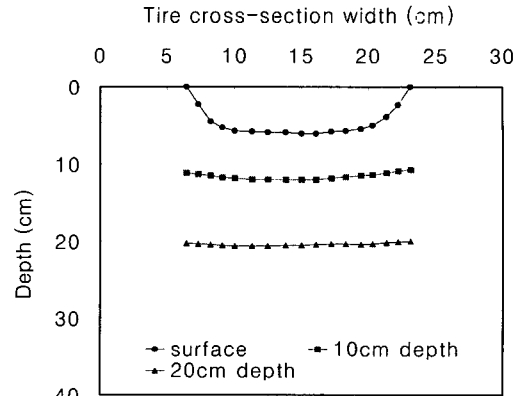


Fig. 3 Soil sinkage distribution under the tire with inflation pressure of 103.42 kPa and dynamic load of 1.17kN.

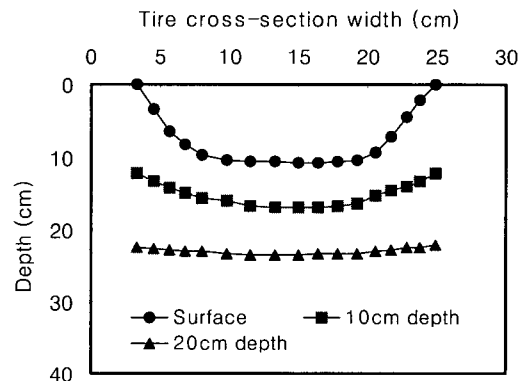


Fig. 4 Soil sinkage distribution under the tire with inflation pressure of 413.69 kPa and dynamic load of 3.53kN.

침하량이 아주 미세함을 알 수 있다.

한편, 그림 4는 타이어의 동하중과 공기압을 각각 3.53kN과 413.69 kPa로 증가시킨 조건에서 측정 한 타이어 아래에서의 침하분포로서 그림 3의 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 3의 결과에 비해서는 상대적으로 곡선에 가까운 형태를 나타내었다.

그림 3과 4의 결과로부터 타이어의 동하중과 공기압의 변화는 타이어 아래 토양의 침하형태 및 침하량에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나

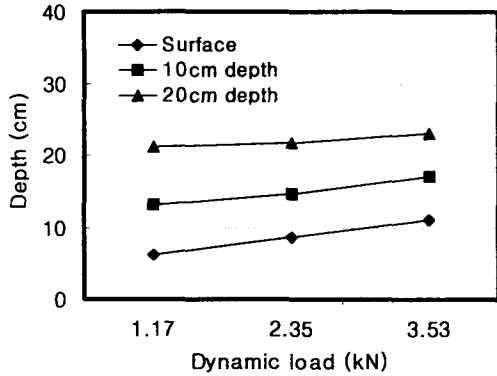


Fig. 5 Variations in maximum sinkage with dynamic load at three different soil depth for the tire with the constant inflation pressure of 413.69kPa.

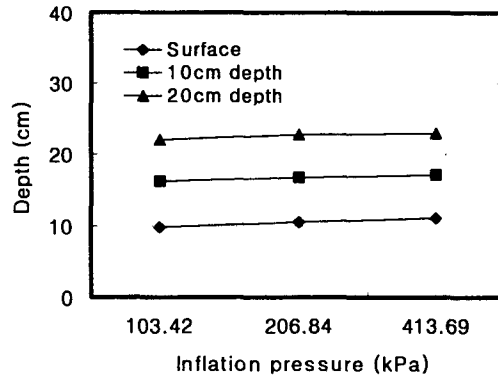


Fig. 6 Variations in maximum sinkage with inflation pressure at three different soil depth for the tire with the dynamic load of 3.53kN.

타이어 아래 토양층의 침하형태는 토양 깊이 뿐만 아니라 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 측정된 침하분포값 중 타이어 중심 아래에서의 최대 침하량(이하 침하량)을 이용하였다.

그림 5는 413.69kPa의 일정 공기압 조건에서 타이어의 동하중을 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN으로 변화시켰을 때 타이어 아래 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm 깊이에서 측정된 동하중의 변화에 따른 침하 관계를 보여주고 있다.

그림 5에 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 통과 후의 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 20cm에서의 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, 토양

속 20cm의 순서로서 토양깊이가 깊을수록 침하량이 작은 것으로 나타났다.

그림 6은 3.53kN의 일정 동하중하에서 타이어의 공기압이 각각 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa일 때 측정된 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm에서의 침하량을 나타낸 결과이다.

그림 6에서 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 작게 나타났다. 따라서 본 실험범위 내에서 동하중의 증가는 공기압을 증가시킨 경우에 비해 타이어 아래 토양의 침하에 미치는 효과가 큰 것으로 판단된다.

그림 7은 타이어의 동하중과 공기압이 각각 1.17kN과 103.42kPa인 조건에서 타이어의 통과횟수(1, 3, 5회)에 따른 토양표면과 토양속 10cm 및

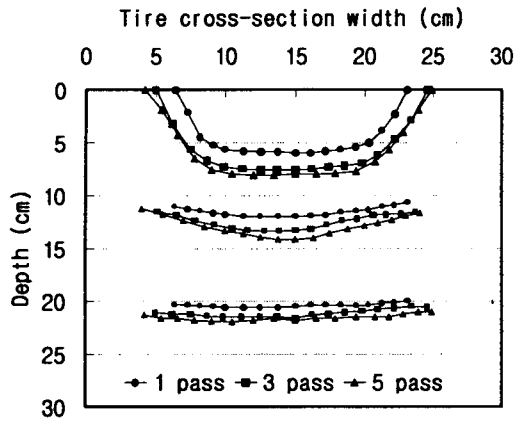


Fig. 7 Effects of number of passes on sinkage distribution at three different soil depth under the tire with dynamic load of 1.17kN and inflation pressure of 103.42kPa.

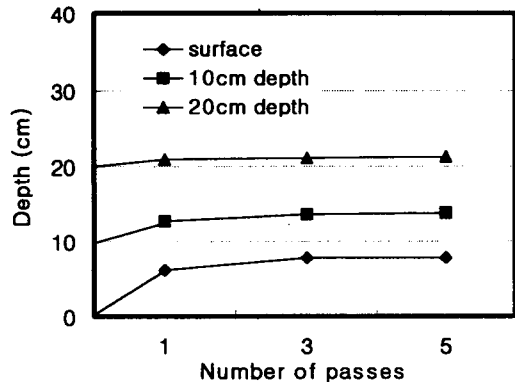


Fig. 8 Variations in maximum sinkage distribution with the number of passes at three different soil depth for the tire with dynamic load of 1.17kN and inflation pressure of 103.42kPa.

20cm에서의 침하분포를 측정된 결과이다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 타이어의 통과횟수에 따른 토양표면, 토양속 10cm 및 20cm에서의 침하 분포는 모두 통과횟수가 증가할수록 침하량이 증가하고, 통과횟수의 증가에 따른 침하량의 증가량은 토양 표면에서 가장 크며 토양 속으로 들어갈수록 작게 나타났다.

그림 8은 103.42kPa의 공기압과 1.17kN의 동하중하에서 타이어의 통과횟수를 각각 1, 3, 5회로

변화시켰을 때 토양표면과 토양속 10cm 및 20cm에서 측정된 침하량을 나타낸 결과이다.

그림 8에 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.

그림 8의 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, 이후 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,  $\rho_{ratio}$ )의 관계를 이용하였다.

그림 9는 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 9에서 타이어의 동하중이 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN일 때 0~10cm 구간에서의 면적비는

타이어의 동하중, 공기압 및 통과횟수가 토양다짐에 미치는 영향

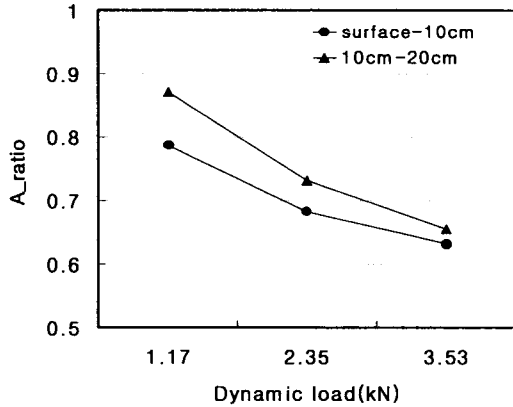


Fig. 9 Variations in the ratio of soil area with the dynamic load for the tire with the constant inflation pressure of 103.42kPa.

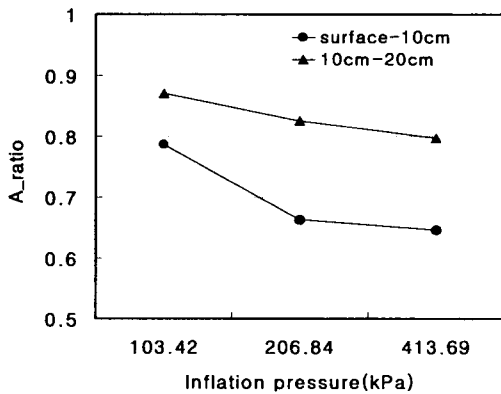


Fig. 10 Variations in the ratio of soil area with the inflation pressure for the tire with the dynamic load of 1.17 kN.

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, 동하

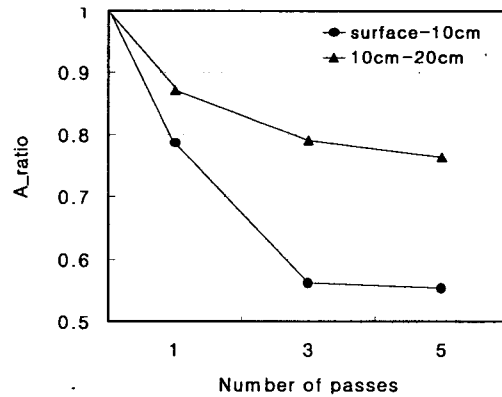


Fig. 11 Variations in the ratio of soil area with the number of passes for the tire with the dynamic load of 1.17 kN and the inflation pressure of 103.42kPa.

중이 토양 변형에 미치는 영향은 토양표면에서 가장 크고, 토양속으로 깊이 들어갈수록 감소하는 것으로 나타났다.

그림 10은 1.17kN의 일정 동하중하에서 타이어의 공기압이 각각 103.42kPa, 206.84kPa, 413.69kPa 일 때 토양속 0~10cm 구간과 10~20cm의 구간에 대해서 타이어 통과 전에 대한 통과 후의 면적비를 나타낸 결과이다.

그림 10에서 공기압의 증가에 따른 면적비의 감소 경향은 동하중을 증가시켰을 경우와 마찬가지로 지수곡선의 형태로 감소하는 경향을 나타냈으나 동하중을 증가시킨 경우에 비해서는 면적비의 감소량이 작게 나타났다. 즉, 타이어 공기압의 증가는 동하중을 증가시킨 경우에 비해 토양변형에 미치는 영향이 작은 것으로 나타났다.

그림 11은 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 11에 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 비

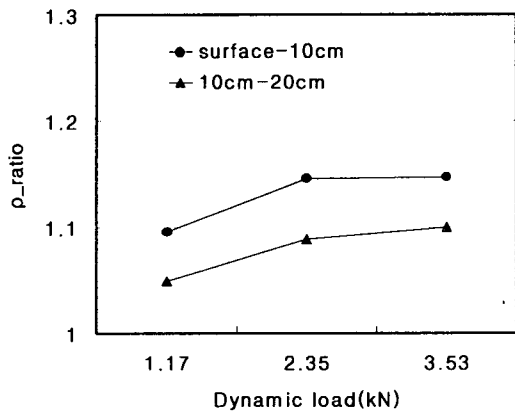


Fig. 12 Variations in the ratio of soil density with the dynamic load for the tire with the constant inflation pressure of 103.42kPa.

해 각각 12.86%, 20.91%, 23.61%의 면적비가 감소하였다.

즉, 통과횟수의 증가에 따른 토양의 변형량은 토양속보다는 토양 표면 쪽에서 더욱 크고, 또한 토양속 두 구간 모두에 대해 초기 1회 통과시에 토양 변형량이 가장 크게 나타났으며 그 후 통과횟수가 증가함에 따라 토양 변형량의 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.

그림 12는 103.42kPa의 일정 공기압 조건에서 타이어의 동하중을 각각 1.17kN, 2.35kN, 3.53kN으로 변화시켰을 때 토양속 0~10cm 구간과 10~20cm 구간에서 타이어 통과 전에 대한 통과 후의 밀도비를 나타낸 결과이다.

그림 12에 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 통과전에 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 증

가하는 것으로 나타났다. 또한 동하중의 증가에 따른 토양 깊이별 밀도의 증가량은 토양속 10~20cm의 구간에 비해 0-10cm까지의 구간에서 더욱 크게 나타났다.

그림 12의 결과로부터 동하중의 증가가 밀도에 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 토양내 공극을 감소시키고, 또한 이러한 경향은 토양속보다는 토양 표면에서 상대적으로 크게 나타나기 때문으로 판단된다.

한편, 동하중의 증가에 따른 밀도비의 증가폭은 그림 9에서 전술한 단면적비의 감소폭보다 크게 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 함께 발생하기 때문으로 판단된다.

그림 13은 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 토양속보다는 토양표면에서 크게 나타났다. 그러나 동하중을 증가시킨 경우에 비해서는 밀도비의 증가량이 작게 나타나 공기압의 증가는 동하중을 증가시킨 경우에 비해서는 토양다짐 효과가 작은 것으로 판단된다.

그림 14는 103.42kPa의 공기압과 1.17kN의 동하중 조건에서 0~10cm 구간과 토양속 10~20cm의 구



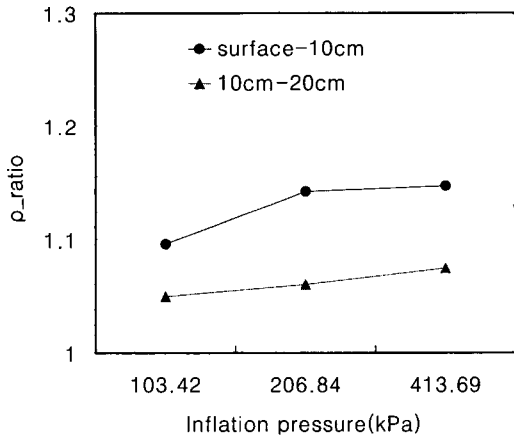


Fig. 13 Variations in the ratio of soil density with the inflation pressure for the tire with the dynamic load of 1.17kN.

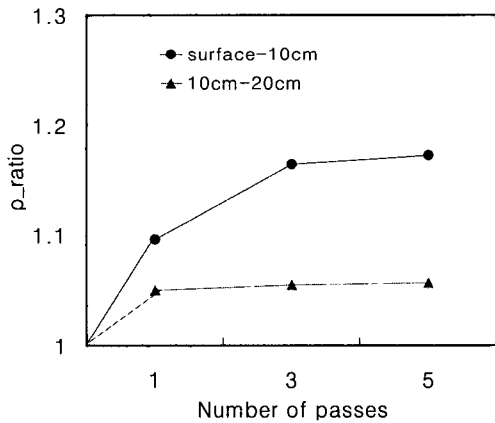


Fig. 14 Variation in the ratio of soil density with the number of passes for the tire with the dynamic load of 1.17 kN and the inflation pressure of 103.42kPa.

간에서 타이어가 통과하기 전의 초기 상태에 대한 타이어 통과횟수(1, 3, 5회)에 따른 밀도비의 변화를 나타낸 결과이다.

그림 14에 나타난 바와 같이, 0~10cm의 구간에서는 1, 3, 5회의 통과횟수에 따른 밀도비가 각각 1.0958, 1.1643, 1.1724로서 각각 타이어 통과전에 비해 각각 9.58%, 16.43%, 17.24%의 밀도 증가를 나타냈고, 토양속 10~20cm 구간의 경우에는 세 수

준의 통과횟수에 대해 각각 1.0496, 1.0546, 1.0672로서 통과 전에 비해 각각 4.96%, 5.46%, 6.72%의 밀도 증가량을 나타냈다.

위의 결과는 통과횟수의 증가에 따른 밀도의 증가량이 토양 속보다는 토양 표면 쪽에서 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 연구에서는 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 밀도변화에 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)에서의 토양층의 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,  $\rho_{ratio}$ )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.

### 참 고 문 헌

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. Onafenko, O. and A. R. Reece. 1967. Soil stresses and Deformations beneath Rigid Wheels. Journal of Terramechanics 4(1):59-80.
5. Park, W. Y. and K. S. Lee. 2001. The Effect of Dynamic Load, Inflation Pressure and Multiple Passes of Tire on Soil Stress. Proceeding of the KSAM 2001 Winter Conference. 4(1):40-46.(In Korean)
6. Park, W. Y. and K. S. Lee. 2001. A Study on Soil Stress and Contact Pressure of Tire. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 26(3):245-252.
7. 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.
8. Schwanghart, H. 1991. Measurement of Contact Area, Contact Pressure and Compaction under Tires in Soft Soil. Journal of Terramechanics 28(4):309-318.