

# 농용 트랙터에 의한 농경지의 토양다짐 예측에 관한 연구

## Prediction of Soil Compaction by Agricultural Tractors

정병학\*    김경옥\*    류일훈\*  
                  정희원  
B.H.Chong    K.U.Kim    I.H.Ryu

### 1. 서론

농기계의 사용이 증가되고, 사용 농기계가 대형화됨에 따라 농기계에 의한 토양다짐, 특히 트랙터에 의한 토양다짐의 영향에 관한 인식이 점차 확대되고 있다. 견인 성능 측면에서와 는 달리 작물의 발아 및 성장 측면에서 볼 때 과도한 토양다짐은 수분의 이동과 뿌리의 성장을 억제시켜 작물의 생산량을 감소시킨다. 실제로 과도한 토양다짐이 발행할 경우 작물의 수확량이 30~50 %까지 감소하기도 한다(Raghavan, 1979). 또한, 토양다짐은 토양 강도를 증가시켜 다음 경운 작업에 소요되는 에너지를 증가시킨다.

토양다짐에 대해서는 작물의 수확량 감소의 관점에서뿐만 아니라 지속 농업의 관점에서도 이해의 폭을 넓혀야 할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 먼저 토양다짐을 정확하고 신속히 예측하고, 평가할 수 있는 기초 연구가 선행되어야 한다.

토양다짐은 타이어의 크기, 차축 동하중, 공기압, 러그의 높이, 슬립, 차량의 통과횟수, 토양의 종류와 함수율 등에 영향을 받는다. 특히, 동하중, 차량의 통과횟수, 토양의 함수율은 토양다짐에 큰 영향을 미치는 요인이다.

본 연구는 트랙터의 통과횟수, 차축에 작용하는 동하중, 타이어의 공기압 등의 변화가 토양다짐에 미치는 영향을 실험적으로 구명하고, 트랙터에 의한 토양다짐을 모형화하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 가. 시험 토양

시험 토양의 점토, 실트, 모래의 비율은, 점토가 1.16 %, 실트가 20.42 %, 모래가 78.42 %로서 미농무성법(USDA) 분류에 의하면 양질 사토(loamy sand)에 해당된다. 또한, 헤이즌의 균질성 계수(Hazen's uniformity coefficient)가 11.7이므로, 시험 토양은 우량 분포 토양(well graded soil)이라고 판단된다.

#### 나. 시험 트랙터

---

\* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

시험에 사용된 트랙터는 F사의 48마력이며, 그 제원은 표 1과 같다. 이때, 구동륜은 11.2-24 6PR인 타이어이었다.

**Table 1 Specifications of test tractor**

Rated power	48 PS
Overall length	2,890 mm
Overall width	1,760 mm
Wheel base	1,940 mm
Tread	1,430 mm
Total weight	16.90 kN
Weight on front axle	6.58 kN
Weight on rear axle	10.32 kN

다. 시험 조건

본 연구에서는 토양 변수로서 원추지수와 함수율을 고려하고, 트랙터 변수로서는 동하중, 통과횟수, 공기압, 주행속도 네 가지를 고려하여 시험을 수행하였다. 각 변수의 변화 범위는 표 2에서와 같다.

**Table 2 Range of experimental variables**

Variables	Units	Values
Wheel load (W)	kN	5.07, 5.25, 6.67, 7.65, 8.19, 9.57
Number of passes (N)	회	1, 2, 3, 4, 5
Inflation pressure (p)	kPa	100, 140, 180
Travel speed (v)	km/h	1.72, 2.57, 3.20, 3.28, 3.79
Soil moisture content (ω)	%(db)	16.20, 18.26, 22.41, 24.41, 27.80

라. 시험 절차

토양다짐은 토양이 다져지기 전과 후의 원추지수의 비로써 나타내며, 동하중, 통과횟수, 타이어의 공기압, 주행속도, 함수율이 토양다짐에 미치는 영향을 구명하기 위하여 각 변수의 수준을 조절하며 트랙터가 주행하기 전후의 원추지수를 측정하였다.

토양다짐을 모형화하기 위한 구체적인 시험 절차는 다음과 같다.

- (1) 시험 토양을 로터리 경운 작업으로 초기화한다.
- (2) 초기화된 시험 토양을 일정 수준 이상으로 다지고, 초기 원추지수를 측정한다.
- (3) 트랙터로 미리 설정된 주행 거리를 주행하며 소요시간을 측정한다.
- (4) 트랙터가 지나간 바퀴 자국에서 원추지수를 측정한다.

- (5) (3) 과정에서 주행했던 바퀴 자국으로 다시 트랙터를 주행하고 (4) 과정을 반복한다.
- (6) 시험이 끝난 후 원추지수를 측정했던 지점의 토양을 채취하여 함수율을 측정한다.
- (7) 동하중, 타이어의 공기압, 주행속도를 변화시키며, (1)~(6) 과정을 반복한다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 가. 구동륜 하중의 영향

구동륜에 작용하는 동하중을 5.07~9.57 kN까지 6단계로 변화시키면서 토양다짐의 변화를 구명하였다. 이때, 주행 속도는 0.71 m/s, 토양 함수율은 23.74 %이며, 타이어의 공기압은 180 kPa 이었다.

동하중의 변화에 따른 원추지수의 변화는 구동 타이어와 초기 토양상태의 영향을 배제하기 위하여 타이어의 접지압(P)에 대한 원추지수의 비로써 나타내었다.

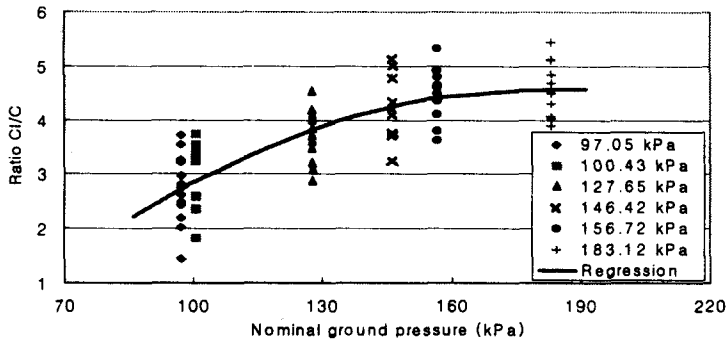


Fig. 1 Soil compaction vs. nominal ground pressure

그림 1은 접지압의 변화에 따른 원추지수의 비를 나타낸 것이다. 이때, 동하중이 증가하면 토양다짐도 증가하였으며, 2차 함수의 관계를 나타내었다.

그림 1로부터 작용압력의 단위를 100 kPa로 나타내면, 접지압과 원추지수의 비는 식 1과 같이 표현된다.

$$\frac{CI}{CI_i} = -2.5247 P^2 + 9.2278 P - 3.8512 \quad (1)$$

원추지수 비는 작용압력이 146.42 kPa 일 때 4.25이었으며, 183.12 kPa 일 때 4.58로 나타났다. 즉, 작용압력이 1.25배 증가하였을 때 토양다짐은 1.08배 증가하였다.

#### 나. 통과 횟수의 영향

토양다짐에 대한 트랙터의 통과 횟수의 영향을 구명하기 위하여 통과 횟수를 1~5회까지 변화시키며 시험을 수행하였다. 이때, 구동륜에 작용하는 하중은 7.65 kN, 주행속도는 0.91 m/s, 토양 함수율은 23.74 %였으며, 타이어의 공기압은 180 kPa 이었다.

통과 횟수와 토양 다짐의 관계는 식 2에서와 같이 2차 함수의 관계로 나타났다.

$$\frac{CI}{CI_i} = -0.1283 N^2 + 1.2473 N + 2.3922 \quad (2)$$

통과 횟수의 영향은 동하중의 영향과 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 토양다짐은 트랙터의 통과횟수에 따라 증가하지만, 증가율은 처음 통과할 때 가장 크며, 차츰 감소하였다. 2회 통과 때까지 토양다짐이 5회 통과 때까지의 토양다짐의 80.68 %를 나타내었다.

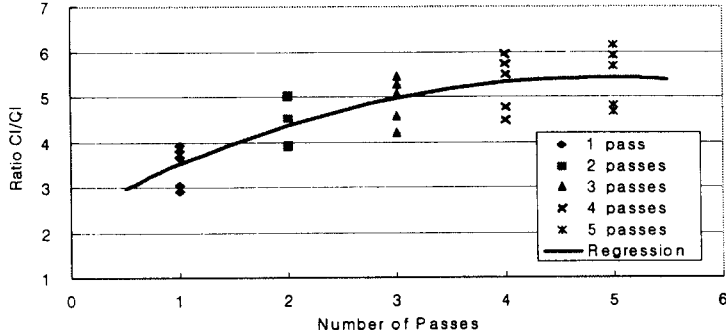


Fig. 2 Soil compaction vs. number of tractor passes

다. 공기압의 영향

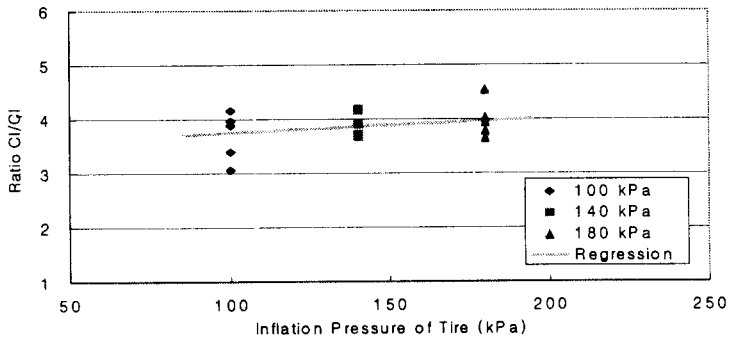


Fig. 3 Soil compaction vs. inflation pressure of tire

타이어 공기압을 100~180 kPa의 범위에서 3단계로 조절하여 토양다짐에 대한 영향을 구명하였다. 그림 3에서와 같이 공기압이 증가할수록 토양다짐도 증가하였다. 공기압이 증가함에 따라 타이어의 접지면적이 감소하고, 토양에 작용하는 압력이 증가하기 때문이다.

공기압과 토양다짐의 관계는 식 3과 같이 직선적으로 나타났다. 이 시험에서는 트랙터의 구동륜에 작용하는 하중은 6.67 kN, 주행 속도는 0.91 m/s를 유지하였으며, 토양의 함수율은 21.36%이었다.

$$\frac{CI}{CI_i} = 0.0026 p + 3.4941 \quad (3)$$

라. 주행속도의 영향

트랙터의 주행속도가 토양다짐에 미치는 영향을 구명하기 위하여 주행속도를 0.48 m/s 에서 1.05 m/s 까지 다섯 수준으로 변화시키며 원추지수를 측정하였다. 이때, 트랙터의 구동륜에 작용하는 하중은 6.67 kN, 타이어 공기압은 180 kPa 을 유지하였으며, 토양의 함수율은 20.43%이었다.

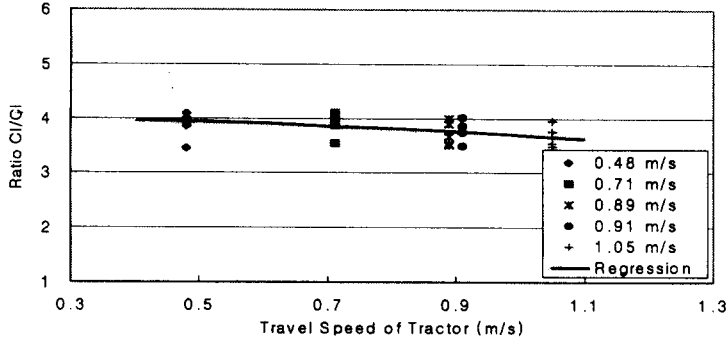


Fig. 4 Soil compaction vs. travel speed of tractor

그림 4에서와 같이 주행속도의 영향은 공기압의 영향과는 반대의 경향을 나타내었다. 주행속도가 증가되면, 트랙터가 토양을 다지는데 소요되는 시간이 감소되기 때문에 토양다짐이 감소되는 것으로 판단된다.

주행속도와 토양다짐의 관계식은 식 4와 같이 표현된다.

$$\frac{CI}{CI_i} = -0.1133 v + 4.1199 \quad (4)$$

마. 함수율의 영향

토양다짐에 대한 함수율의 영향을 구명하기 위하여 토양의 함수율이 16.20%에서 27.80% 인 범위에서 트랙터를 2회 주행할 때, 원추지수의 변화를 측정하였다. 이때, 트랙터의 구동륜에 작용하는 하중은 7.65 kN, 주행 속도는 0.71 m/s, 타이어 공기압은 180 kPa 를 유지하였다.

함수율이 16.20%에서 22.41%까지 증가함에 따라 토양다짐이 증가하였으나, 그 이상의 함수율에서는 함수율이 증가함에 따라 토양다짐이 감소하였다. 그러나 전체적으로 토양다짐에 미치는 함수율의 영향은 15~30%의 함수율 범위에서 크지 않는 것으로 판단된다.

함수율과 원추지수 비의 관계는 식 5에서와 같이 2차식으로 표현되었다.

$$\frac{CI}{CI_i} = -0.0043 w^2 + 0.1837 w + 2.7308 \quad (5)$$

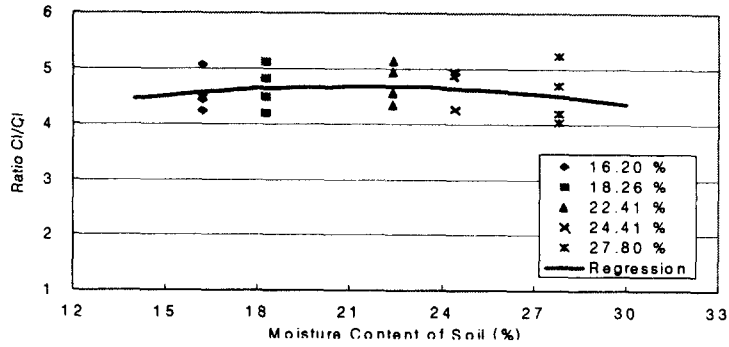


Fig. 5 Soil compaction vs. moisture content of soil

바. 토양다짐 예측식

구동륜에 작용하는 동하중과 트랙터의 통과횟수가 토양다짐에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 타이어 공기압, 주행 속도, 토양의 함수율은 그 영향을 무시할 수 있는 수준이었다.

동하중과 통과횟수를 변수로 하여 토양다짐을 모형화하면 식 6과 같고, 이를 그림으로 나타내면 그림 6에서와 같다.

$$\frac{CI}{CI_i} = 0.232 \times (-2.5247 P^2 + 9.2278 P - 3.8512) \quad (6)$$

$$(-0.1283 N^2 + 1.2473 N + 2.3922)$$

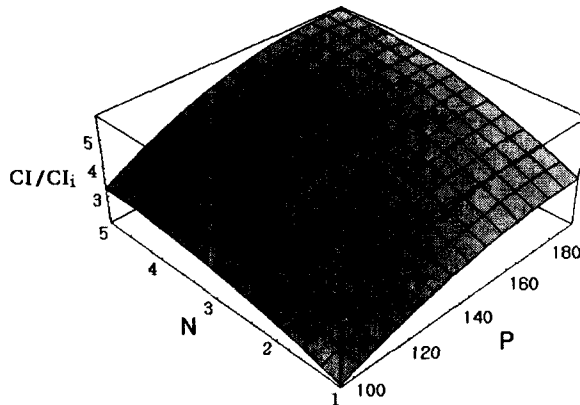


Fig. 6 Soil compaction as a function of wheel load and number of tractor passes

그림 6에서 보는 바와 같이 토양다짐을 나타내는 원추지수의 비는 작용압력으로 나타낸 동하중과 통과 횟수가 증가할수록 증가한다. 본 연구의 시험 조건에서 최소의 토양다짐은 동하중이 5.07 kN 이고 통과횟수가 1회 일 때 일어났으며, 원추지수가 초기상태보다 2.2배 증가되었다. 최대 토양다짐은 동하중이 9.57 kN 이고 통과횟수가 5회 일 때 일어났으며 원추지수는 초기상태보다 5.75배 증가되었다.

#### 4. 결론 및 요약

본 연구는 트랙터가 농경지의 토양다짐에 미치는 영향을 실험적으로 구명하기 위하여 수행되었다. 구동륜에 작용하는 동하중, 차량의 통과횟수, 타이어의 공기압, 차량의 주행속도, 토양의 함수율 중 토양다짐에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 구동륜에 작용하는 동하중과 차량의 통과횟수이었다.

토양다짐을 나타내는 변수로 원추지수를 이용하고, 토양다짐 정도를 트랙터가 통과하기 전후의 원추지수 비로 나타내어, 트랙터에 의한 토양다짐 예측식을 개발하였다. 이 예측식이 적용될 수 있는 범위는 구동륜에 작용하는 동하중이 5.07~9.57 kN 이고, 트랙터의 통과횟수가 1~5회이다. 또한, 타이어의 공기압은 100~180 kPa 이고, 주행속도는 0.48~1.05 m/s, 토양의 함수율은 16.20~27.80%이다.

결론적으로 개발된 토양다짐 예측식을 이용하면, 토양다짐에 영향을 미치는 주요 변수에 대한 영향 정도를 파악할 수 있으며 트랙터에 의한 토양다짐을 신속히 예측할 수 있다고 판단된다.

#### 5. 참고 문헌

1. ASAE Standard No. S313.2. 1994. Agricultural Engineers Yearbook, ASAE. St. Joseph, MI 49085
2. Bailey, A. C., C. E. Johnson and R. L. Schafer. 1986. A model for agricultural soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research 33: 257-262.
3. Daniel Hillel. 1980. Fundamental of soil physics. Academic Press, Inc.
4. Johnson, C. E. and A. C. Bailey. 1988. A soil compaction model cylindrical stress states. Transactions of the ASAE 32(3): 822-825.
5. McKyes, E. 1989. Agricultural engineering soil mechanics. Elsevier. pp.222-231.
6. 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. Transactions of the ASAE 22(4): 1256-1259.
7. Salokhe, V. M. and T. N. Nguyen. 1993. Modelling soil compaction under pneumatic tyres in clay soil. Journal of Terramechanics 30(2): 63-75.
8. Vanden Berg, G. E. and Bailey, A. C. 1968. Yielding by compaction and shear in unsaturated soils. Transactions of the ASAE 11(3): 307-311, 317.