

3차원 형상계측법을 이용한 토양변형 측정

Measurements of Soil Deformation Using 3-Dimensional Form Determination

전형규
정회원
H. G. Jun

SUMMARY

This paper reports a technique for measuring a three-dimensional soil deformation and a simplified method to determine the three-dimensional contact area of agricultural tires in a soil bin. A Pirelli 12.4R28 radial-ply tire was used on soft soil. Effects of dynamic load and inflation pressure were determined using the equipment for measuring soil deformation on the soil surface. Soil deformation measurements were made under three conditions of over-load (59kPa-14.2kN), rated-load (108kPa-11.8kN) and under-load (157kPa-9.3kN) in the combinations of the inflation pressures (kPa) and the tire load (kN).

The results from three conditions were shown that the contact area of the over-load increased considerably bigger than those of the rated-load and the under-load. Therefore, to regulate soil deformation, the inflation pressure and the tire load should be set according to the soil conditions.

Keywords : Tire, Soil deformation, Contact area, Inflation pressure, Load.

1. 서 론

연약지에서 타이어의 작용에 따라 토양은 변형하고 토양의 변형저항은 반력으로서 타이어에 작용한다. 이러한 상호작용은 토양의 변형상태에 따라 영향을 받기 때문에 타이어밑의 토양변형을 측정함으로써 전인력 및 토양속의 응력분포를 예측할 수 있다. 수분이 많은 토양에서 깊은 바퀴자국을 형성하는 것은 토양이 다져지면서 소성유동(plastic flow)이 일어났기 때문이다. 토양이 소성변형을 일으키면 구류저항이 크게 되고 전인력은 작게 되며 동시에 미끄럼율은 증가한다. 깊은 바퀴자국이 발생하면 식물의 뿌리가 손상을 입고 포장

작업의 균일성을 갖는 것이 어렵게 된다. 토양변형의 측정방법은 여러 가지들이 소개되었다. Komandi(1976)는 접지면적의 크기와 형상을 측정하기 위하여 주행중의 타이어를 정지하고 타이어를 들어올려 토양에 남은 타이어자국의 형상을 측정했다. 그는 타이어를 주행중에 들어올릴 경우에는 동하중으로서 취급할 수 있다고 믿었다. 또한 토양속에 발생하는 토양변형을 측정하기 위하여 Poterfield(1986) 등은 발포고무를 이용했고, Okhitin(1991) 등은 2개의 평행판을 토양중앙에 묶어서 각각의 토양변형을 측정하기도 했다. Plackett(1983)는 토양변형에 의한 접지면적을 절대비교하기 위하여 단단한 면에서 타이어 변형에 의한 접

The article was submitted for publication in April 2001, reviewed in April 2001, and approved for publication by the editorial board of KSAM in July 2001

The corresponding author is Hyung-gyu Jun, Senior Researcher, Dept. of Bio-mechatronic Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 440-746, Korea: E-mail <hyunggyu@nature.skku.ac.kr>.

지면적을 측정했다. 그는 러그에 잉크를 묻혀서 러그면의 길이마다 타이어를 회전시켜 준비된 용지에 overlay 방식으로 측정했다. Schwanghart(1990)는 접지길이, 접지폭 및 타이어의 탄성계수를 이용하여 단순화시킨 계산식에 의해 접지면적을 구했다. Wulfsohn(1993)는 3차원적으로 접지면적을 구하였고 Jun(1997)은 깊이에 따른 토양변형과 동하중에 의한 접지면적을 구하기도 했다.

임업용 차량인 경우, 산림지역은 유기물이 많고 습한 곳이 많기 때문에 심한 토양변형은 주변수목의 뿌리에 손상을 주고 썩게 만든다. Myhrman(1990)는 트랙을 장착한 차량과 타이어를 장착한 차량의 비교실험결과, 트랙의 모서리부분이 표층을 절단함으로써 수목에 심한 손상을 준다고 보고했다. 군사용 차량은 수중, 모래 및 도로에서 충분한 주행성능을 확보할 수 있어야 하는 데 차량의 중량이 증가하면 토양변형에 의한 주행이 불가능할 수 있다. 이와 같은 연약지에서 발생하는 토양변형의 문제점을 해결하기 위하여 미국에서는 CTI시스템(Central Tire Inflation System)을 개발했다. CTI시스템이란 타이어공기압을 운전석에 설치된 제어판(control panel)을 통해 지반의 상태를 여러 단계로 나누어 각각의 상태에서 기동성이 가장 좋은 공기압을 선택하거나 상황에 따라서는 필요한 공기압으로 제설정하는 것이다. 제2차 세계대전 당시 미육군에 의해 개발된 것으로 수륙양용차량이 수중, 모래 및 도로에서 충분한 주행성능을 확보할 수 있도록 공기압을 조절하기 위해 설계된

것이다. 2차대전이 끝나고는 기동성이 요구되는 트럭과 임업용 차량 등 비포장의 악조건에서 주행하는 특수목적용 륜 차량에 확대되어 사용되었다. 이러한 CTI시스템의 기본적인 원리는 공기압을 감소시켜 토양변형을 최소화하여 주행성능을 향상시키는 것이다.

본 연구는 레이저센서를 이용하여 토양 위의 일정한 위치에서 타이어에 의해 변형된 토양의 표면까지의 거리를 측정할 수 있는 토양변형 측정장치를 개발했다. 또한 Jun(1997)이 동하중과 정하중의 접지면적을 비교한 것에 대해 본 논문에서는 3차원적으로 측정된 토양의 변형량을 이용하여 접지면적을 보다 정확히 계산할 수 있는 계산법을 제안하고 이를 통해 각 실험조건에 따른 접지면적과 비교·검토할 것이다.

2. 3차원 접지면적의 계산방법

접지면적을 구하기 위한 방법은 4곳의 측정점을 기준으로 하여 각 위치에 나타난 수직방향의 변위의 차를 이용하여 삼각형의 면적을 구한 후 이를 합하는 방식으로 전체의 접지면적을 구했다. 그림 1 (괄호안의 첨자는 측정위치를 나타냄)에 나타난 것처럼 □ABCD는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\square ABCD = \triangle ABC + \triangle ADC \quad (1)$$

선분 AC는 점A와 점C사이의 길이이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$AC = \sqrt{(x_c - x_a)^2 + (y_c - y_a)^2 + (z_c - z_a)^2} \quad (2)$$

여기서 $z_c - z_a$ 는 A점과 C점에서의 측정변위의 차이이다.

△ABC의 면적을 구하기 위해서는 점 B에서 선분 AC위에 수선을 그은 점 E의 좌표 (x_e, y_e, z_e) 를 구하여 선분BE의 길이를 구하면 된다. 선분 AC상의 한 점 E는 AC의 직선방정식을 이용하면,

$$\frac{x_e - x_a}{x_c - x_a} = \frac{y_e - y_a}{y_c - y_a} = \frac{z_e - z_a}{z_c - z_a} = t \quad (3)$$

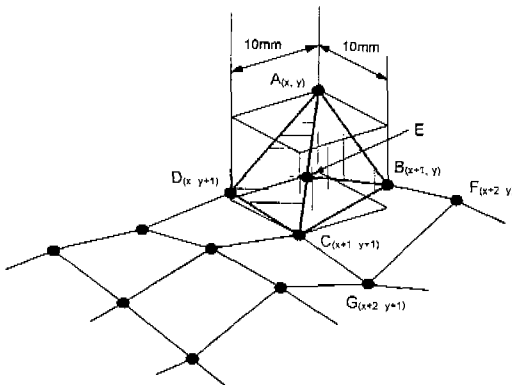


Fig. 1 Schematic used to determine three dimensional contact area.

각 점의 측정간격(실험방법에 따라 변화시킬 경우에도 계산식에 별다른 문제는 없다)이 1cm 인 경우, x 성분 및 y 성분의 변위차는 $|x_c - x_a| = 1$, $|y_c - y_a| = 1$ 이고 (3)식을 매개 변수 t에 관하여 정리하면 E점의 좌표는 다음과 같다.

$$E = (t + x_a, t + y_a, (z_c - z_a)t + z_a) \quad (4)$$

또한 선분 AC와 선분 BE는 수직이기 때문에 내적인 관계를 이용하면 t를 구할 수 있다.

$$t = \frac{1 - (z_c - z_a)(z_a - z_b)}{2 + (z_c - z_a)^2} \quad (5)$$

식(5)를 식(4)에 대입하면 E점의 좌표를 구할 수 있고 선분 BE의 길이도 다음과 같이 구할 수 있다.

$$BE = \sqrt{(x_e - x_b)^2 + (y_e - y_b)^2 + (z_e - z_b)^2} \quad (6)$$

이를 통해 $\triangle ABC$ 의 면적을 구할 수 있고 $\triangle ADC$ 의 면적도 위와 같은 방법으로 구할 수 있다. 단, 접지면적의 경계조건(soil-tire contact boundary condition)은 다음과 같이 설정했다.

$$|z_c - z_a| > 0 \quad (7)$$

경계조건식(7)은 C점과 A점의 수직변위(z축의 값)의 차가 0일 경우에는 토양변형이 발생하지 않은 것으로 간주하여 접지면적의 계산에서 제외시키는 것을 의미한다.

따라서 $\square ABCD$ 의 면적 S_i 는

$$S_i = \triangle ABC + \triangle ADC \quad (8)$$

로 되고, 본 실험에서는 토양변형의 경계조건을 충분히 만족시키기 위해 x축 방향(접지폭)으로 10mm씩 47회, y축 방향(접지길이)으로 10mm씩 112회 반복했다. 총측정점의 수는 5264(47×112)점으로 만들어지는 4각형의 수는 5106이다. 그래서 접지면적 S는

$$S = \sum_{i=1}^k S_i \quad (1 \leq k \leq 5106) \quad (9)$$

로서 구해진다.

3. 실험장치 및 실험방법

가. 측정장치

본 실험에서 사용한 측정장치를 그림 2에 나타냈다. 측정장치의 프레임은 접지길이변이 1,400mm, 접지폭변이 700mm이다. 이 프레임에 캐리어 가이드와 센서캐리어를 부착했다. 캐리어가이드는 피치 10mm의 모노캐리어를 사용하여 1회전시 10mm씩 이동하도록 했다.

레이저센서(일본松下電工製, ANL1200)는 역광부와 수광부를 갖는 센서부와 컨트롤부로 구성되어 있다. 측정중심거리는 250mm±150mm의 측정범위를 갖는다. 분해능은 150μm(10Hz), 500μm(100Hz), 1.5mm(1kHz)의 3종류에서 선택가능하며 본 실험에서는 보다 정확한 데이터를 얻기 위하여 150μm(10Hz)를 선택했다. 센서에서 출력된 데이터는 A/D보드를 통하여 PC에 입력했다.

토양변형의 측정은 각각의 실험조건에 따라 변형된 토양의 형상을 레이저센서에 의해 수직방향의 변형량을 측정하도록 했다. 레이저센서를 접지폭과 접지길이 방향으로 각각 10mm씩 이동시켜 3차원 입체형상을 얻을 수 있었다. 레이저센서의 이동제어, 거리계측 및 데이터의 보존은 PC를 이

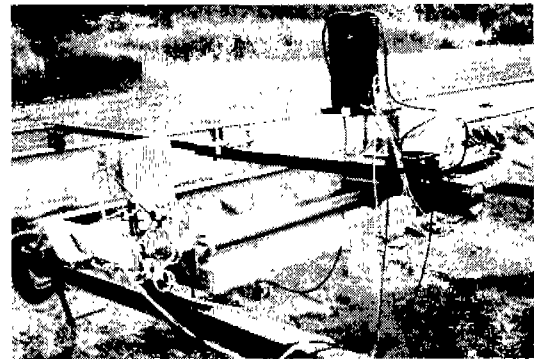


Fig. 2 The equipment for measuring soil deformation.

용하여 자동 제어했고 레이저센서의 이동은 스텝모터를 사용했다. 만약 보다 정밀한 형상을 얻기 위해서는 이동거리를 조절하면 된다.

나. 실험조건

본 실험에서 사용한 공기압-하중의 조합은 타이어제조회사에서 추천한 조합표에 나타난 것을 정격하중(rated-load)으로 설정했다. 이 조건에서는 토양변형이 일정하게 나타날 것이라고 가정하고 실험용 타이어의 최저공기압에 최대하중을 가한 것을 과대하중(over-load), 반대인 최대공기압에 최소공기압에 대응하는 하중을 가한 것을 과소하중(under-load)이라고 칭했다. 이러한 설정은 공기압이나 하중의 변화에 따른 유의성의 검증에는 무리가 따르지만 공기압의 영향은 충분히 파악할 수 있다고 판단되어 비교해 보았다. 실험용 타이어는 피렐리(Pirelli)제 레이디얼타이어(12.4R28)를 사용하였고, 타이어하중과 공기압의 조합은 3종류(표 1 참조)로 했다. 실험토양은 점토 31.0%, 실트 12.0%, 모래 57.0%로 사질식토로 분류된다. 경운이 반복된 포장에서는 경반이 형성되어 있다고 상정하여 토양표면에서 약 25cm 밑에 경반을 만들었다. 토양조건은 평균함수율 24.2%, 평균건조밀도 1.03g/cm³이었다.

다. 실험방법

3종류의 실험조건에 따라 하중을 가공된 토양에 가한 후 타이어를 들어올려 인공토조의 체도에 그림 2와 같이 각강으로 만든 대차를 걸치고 그 위에 토양변형 측정장치를 설치하고 3차원적으로 형상계측을 했다. 센서의 높이는 지표면상 15cm이다. 그 높이를 기준으로 하여 표면변형의 거리 및 깊

이마다 변형을 기준위치로 비교·산출했다.

이들의 표면형상계측을 x, y축 방향에 각각 거리 10mm마다 연속하여 행하고 타이어자국의 형상을 3차원적으로 파악했다. 계측한 데이터는 x, y축 방향의 좌표와 z축 방향의 거리를 요소로 하는 행렬로 된다. 계측한 형상을 3차원 그래픽으로 표시하고 입체적인 형상을 파악할 수 있도록 하였다. 특히 토양변형의 경계조건을 충분히 만족시키기 위해 x축 방향(접지폭)으로 10mm씩 47회, y축 방향(접지길이)으로 10mm씩 112회 반복했다. 이들의 측정점은 5264점이다. 얻어진 데이터는 시판의 프로그램을 이용하여 3차원 그래픽으로 표시하고 토양변형의 형상전체를 파악할 수 있도록 했다. 또한 타이어를 들어올릴 때, 접촉한 토양이 부서져서 정확한 접지폭 및 접지길이를 구하기 곤란하기 때문에 토양 표면에서 깊이 10mm까지 2mm의 체로 거르고 수분을 조절하여 부서지지 않도록 했다.

4. 결과 및 고찰

그림 3~5는 토양변형 측정장치에 의해 얻어진 각 실험조건에 따른 그래프이다. 현장에서 얻어진 데이터를 그대로 사용했을 때 러그의 형상이 겹쳐져 나타나 바퀴자국 전체의 형상을 판별하기가 어려웠다. 이에 대한 방안으로 러그의 요철을 거꾸로 하여 타이어 형상과 같이 보이도록 했다. 전반적으로 접지폭의 변화는 크게 나타나지 않았다. 과대하중의 접지폭은 33cm이었고 정격하중과 과소하중의 접지폭은 30cm로 나타났다. 이 결과는 매우 의미있는 것으로 비록 3cm의 차이지만 과대하중에서는 카캐스부분(carcass 혹은 side wall)이 많이 부풀어 타이어 변형이 심하다는 것을 알 수 있다. 레이디얼타이어인 경우에 바이어스타이어에 비해 카캐스부분이 많이 보강된 특징을 갖고 있기 때문에 접지폭의 조그마한 차이라도 결국은 접지길이의 변화에 큰 영향을 미친다. 실제로 본 실험에서 얻어진 접지길이를 비교해보면 과대하중이 87cm, 정격하중 74cm, 과소하중 65cm를 나타냈다. 이를 통해 보면 접지면적과 접지길이의 증가율은 거의 유사했다. 또한 그림 6에서 정격하중을 기준으로 과소하중보다 과대하중의 증가율이 크게 나타났다. 이는 타이어 하중보다 공기압의 영향이 크게 작용했다고 유추할 수도 있고 타이어가 펑크

Table 1 Dynamic load and inflation pressure combinations

Treatment	Inflation Pressure (kPa)	Dynamic Load (kN)
Under-load	157	9.3
Rated-load	108	11.8
Over-load	59	14.2

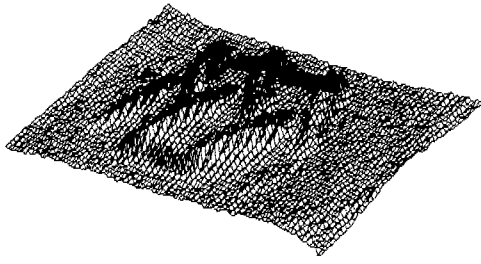


Fig. 3 Three dimensional contact surface for an inflation pressure of 157kPa and a dynamic load of 9.3kN.

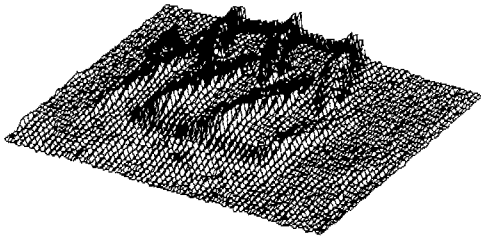


Fig. 4 Three dimensional contact surface for an inflation pressure of 108kPa and a dynamic load of 11.8kN.

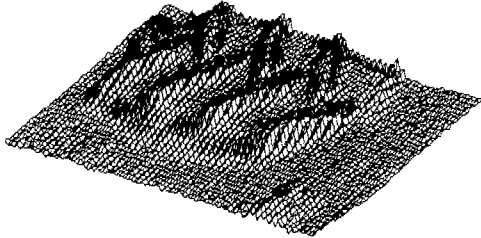


Fig. 5 Three dimensional contact surface for an inflation pressure of 59kPa and a dynamic load of 14.2kN.

상태에 있다고 볼 수도 있다. 하지만 레이디얼 타이어는 40kPa까지 공기압을 낮출 수 있게 제작되어지기 때문에 그림 6의 결과는 공기압이 접지면적에 상대적으로 많은 영향을 미친다고 볼 수 있다. 비록 절대적인 하중과 공기압의 영향을 비교할 수는 없었지만 본 실험을 통해 3차원 토양변형

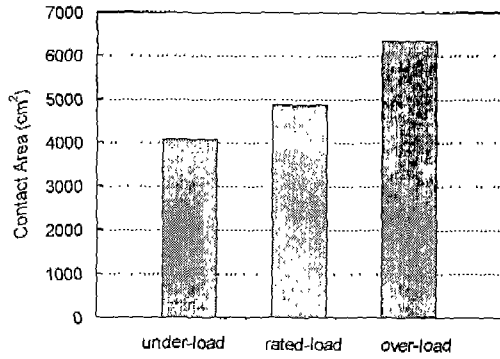


Fig. 6 Contact area vs tire conditions.

을 측정할 수 있는 시스템이 마련됐다는 것과 타이어의 주행성능의 연구에 보다 더 실제적인 데이터의 수집이 가능해 졌다는 것에서 본 실험은 성공적이라고 볼 수 있다.

본 실험에서는 단면형상계측을 x, y축 방향으로 각각 거리 10mm 마다 측정했기 때문에 리그의 형상을 완전히 얻을 수가 없었다. 그러나 PC에 따른 위치제어를 거쳐 3차원적으로 토양변형을 비접촉에 따라 효율적으로 측정할 수 있게 되었기 때문에 데이터 수는 증가하지만 측정간격을 짧게 하는 것에 따라 더욱 더 정확한 토양변형을 측정할 수 있게 되었다. 본 실험에서는 정하중에 의한 토양변형의 계측에 머물렀지만 앞으로 더욱 동하중에 따른 토양의 동향을 측정할 수 있는 장치를 개발할 필요가 있다.

5. 요약 및 결론

본 연구는 레이저센서를 이용하여 토양위의 일정한 위치에서 타이어에 의해 변형된 토양표면까지의 거리를 측정할 수 있는 토양변형측정장치를 개발했다. 또한 측정된 토양변형량을 제안된 접지면적의 계산식을 이용하여 3차원 접지면적을 얻을 수 있었다. 본 연구에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 과대하중에서의 접지면적은 정격하중에 비해 약 1.3배, 과소하중에 비해 약 1.56배 크게 나타났다.
- 2) 공기압-하중의 적절한 조절에 의해 토양변형의 조절도 가능하다는 것을 충분히 보여주었다.

3) 접지폭보다는 접지길이가 접지면적에 보다 더 영향을 미쳤다.

4) 컴퓨터에 의한 위치제어를 거쳐 3차원적으로 토양변형을 비접촉에 따라 효율적으로 측정할 수 있게 되었다.

5) 측정간격을 짧게 함으로써 더욱 정확한 토양 변형을 측정할 수 있게 되었다.

참 고 문 헌

1. Jun, H., T. Taniguchi, K. Ohtomo, T. Kishimoto and T. Ohyama. 1997. Determination of the Three Dimensional Contact Area between Tractor Tire and Soil, J. JSAM 59(5):3-12. (In Japanese)
2. Komandi, G. 1976. The determination of the Deflection, Contact area, Dimension and Load Carrying Capacity for Driven Pneumatic Tires Operating on Concrete Pavement, J. Terramechanics 13(1):15-20.
3. Myhrman, D. 1990. Factors Influencing Rut Formation from Forestry Machines, Proc. 10th International Conference of the ISTVS/Kobe, 467-475.
4. Okhitin, A. A., J. Lipiec, S. Tarkiewicz and A. V. Sudakov. 1991. Deformation of Silty Loam Soil under the Tractors Tyre, Soil & Tillage Research 19:187-195.
5. Porterfield, J. W. and T. G. Carpenter. 1986. Soil Compaction: an Index of Potential Compaction for Agricultural Tires, Transactions of the ASAE 29(4):917-922.
6. Plackett, C. W. 1983. Hard Surface Contact Area Measurement for Agricultural Tyres, Div. Note DN/1200, Natl inst. agri. Engng, Silsoc.
7. Schwanghart, H. 1990. Measurement of Contact Area, Contact Pressure and Compaction under Tires in Soft Soil, Proc. 10th International Conference of the ISTVS/Kobe, 193-204.
8. Wulfsohn, D. and S. K. Upadhyaya. 1993. Prediction of Traction and Soil Compaction Using Three-Dimensional Soil-Tyre Contact Profile. J. Terramechanics 29(6):541-564.