

Ball형 측정기를 이용한 토중 응력 상태의 계측

전 형 규

Soil Stress State Determination Using a Ball-type Transducer

H. G. Jun

ABSTRACT

Soil stresses were measured beneath the centerline of one new 12.4R28 radial-ply tractor tire. The tire was operated with three inflation pressures(59 kPa, 108 kPa and 157 kPa) and a dynamic load of 14.2 kN and 20% slip. Soil stress state transducer(SST) measured the stresses in a hardpan soil profile. The depth of the SST was 250mm from soil surface. Analysis of the original soil stress data showed that the inflation pressure of tire did significantly affect the vertical stress. The major principal stresses calculated were more when the inflation pressure was 108 kPa than when it was 157 kPa. The peak stresses of the major principal stresses presented more than those of the vertical stresses.

Keywords : Soil dynamics, Soil compaction, Stress state, Stress tensor, Radial ply tire.

1. 서 론

토질동력학(soil dynamics)에 관한 연구는 경운이나 건인에 관한 차량성능을 향상시키거나 작업기, 타이어 및 원동기 등의 적절한 크기를 고를 때, 기초지식 및 자료를 제공하기 위한 평가도구로서 발전되어 왔다. 하지만 농업기계분야에서 토질동력학에 관한 보다 체계적인 정리는 아직도 부족한 점이 많다고 본다. 그 원인중의 하나는 토목공학에서 다루어지고 있는 토양역학(soil mechanics)과는 달리 힘의 작용이 아주 짧은 시간에 이루어진다는 것이다. 또한 힘이 토양에 가해졌을 때 토양 내에서 발생하는 문제에 관하여 조사 및 분석이 제대로 이루어져야 하기 때문이다. 즉, machine-soil-plant systems과 같이 유기적인 관계를 연계하여 연구가 되어야만 한다. 토양기계시스템(soil-machine systems)에 관한 연구로서 토양변수나 기계변수 등을 이용한 분석이나 이론식 및 모델의 개발 등이 주로 이루어져 왔다. 최근에는 측정장치의 발달로 계변수들을 직접 측정하여 기존의 이론식을 실험치로서 뒷받침하거나 대체하고는 있다 (Jun, 2004). 토양작물시스템(soil-plant systems)에 관한 연구는 작물의 생장이나 환경적인 조건들이 기계적인 요인이나 혹은 다른 형태의 하중이 토양에 미쳤을 때 어떠한 문제점이 발생하는지를 역학적인 관점에서 풀이해 보는 것이다. 하지만 이러한 연구는 대부분 토양다짐과 관

련하여 다루어져 왔고 주로 생산량을 비교하는 데 그쳤다(Bicki, 1991).

탄성론에 따라 토양 중에 작용하는 힘을 나타내는 응력을 해석하기 위해서는 토양이 등질성(homogeneous), 등방성(isotropic)이고 연속적이면서 선형의 응력-변형률관계를 나타낸다고 가정해야 한다. 이는 토양의 거동을 매우 단순화시키기 위한 것이며 탄성론을 사용하여 구한 결과는 근사치라고 말할 수 있다. 이러한 가설을 토대로 만약 응력의 개념이 토양과 같은 입자물질에서도 타당하다면, 한 점에서의 응력상태는 응력텐서를 나타내는 9개의 성분을 측정함으로써 구할 수 있다(Nichols et al., 1987). 그리고 응력텐서의 분석기술은 토양의 한 점에서 응력상태를 서술하거나 계산하는 데에 유용한 도구가 될 수 있다고 했다(Bailey, 1988a).

토양응력을 체계적으로 측정·분석하려는 시도는 응력-변형률의 관계를 수학적으로 표현하는 구성방정식의 개발로 이어졌다. 이는 주로 실험실에서 3축 압축시험을 이용하여 구성방정식이 개발되었기 때문에 일반 야지나 경지에서의 적합성에는 많은 문제가 있기는 했다. 하지만 구성식의 개발로 인해 유한요소법을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션도 많이 시도되었고 이를 검증하기 위한 수단으로 수많은 토중응력측정기가 개발되기도 했다. 특히 Nichols(1987) 등이 개발한 토양응력측정기(Stress State Transducer)는 영어의 첫 글자를 따서 SST라고 부

The article was submitted for publication in May 2004; reviewed and approved for publication by the editorial board of KSAM in June 2004.

The author is Hyung-gyu Jun, Instructor, S&A improvement Lab., Silim 3 Dong 612-4, Seoul, 151-879, Korea; E-mail: <gladjun@yahoo.co.kr>.

른다. SST의 가장 큰 특징은 하중이 가해지는 동안 측정기가 움직이거나 회전을 하더라도 응력상태의 크기는 정확하게 그대로 남아 있고, 응력상태의 방향만 잃는다는 것이다. 지금까지 SST를 이용한 대부분의 연구(Bailey(1988a), Bailey(1988b), Block(1994), Harris(1994), Jun(1997), Nichols(1987), Way(1995a), Way(1995b))는 주로 경반위에 SST를 얹어서 거의 움직이지 않도록 SST의 위치를 고정시키는 것이었다. 이는 안정된 실험값을 얻기 위한 목적도 있지만 실험의 재현성을 확보하는 것이 더욱 더 큰 목적이었기 때문이다.

이번 실험의 목적은 가능한 한 토양입자에 가까운 SST를 제작하여 소성유동과 같은 토양의 움직임이 발생했을 때 토양체와 연동하여 보다 근접한 측정값을 얻는 것이다. 이를 위해 SST의 자세가 변하여도 측정점에서의 응력상태는 변하지 않는다는 특성을 살리기 위하여 지름 40mm의 완전한 구형으로 경반에 구속되지 않고 자유롭게 측정할 수 있는 SST를 개발했다.

2. 토중응력상태

Bailey 등(1988b)은 토양 중 1점의 응력상태(stress state)를 표현하기 위해서는 응력텐서를 분석하는 것이 효과적일 수 있다고 했다. 우선, 하중이 가해지는 토양의 1점을 xyz 의 좌표계로 설정한 극한의 미소입방체로 가정한다. 좌표면과 입방체의 측면을 평행하도록 하면 각각의 좌표면에 가해지는 응력은 3개씩 존재한다. 평면에 수직인 성분인 수직응력(σ_x, σ_y 및 σ_z)과 평면에 접하면서 접선방향의 성분인 2개의 전단응력($\tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}, \tau_{zx}$ 및 τ_{zx})으로 나눌 수 있다(Jun, 1997). 이 9개 성분은 한 개의 행렬로 정리된다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

위의 행렬을 응력 텐서라고 불리고 몇 가지 성질도 갖고 있다. 행렬(1)을 수직응력성분 σ 에 관하여 나타내면 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} &\sigma^3 - (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)\sigma^2 + (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z \\ &+ \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2)\sigma - \sigma_x\sigma_y\sigma_z + \sigma_x\tau_{yz}^2 \\ &+ \sigma_y\tau_{xz}^2 + \sigma_z\tau_{xy}^2 - 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

또, 응력텐서의 3번째 성질로서 어떠한 경우에도 전단 응력 전부를 동시에 0이 되도록 하는 좌표계를 선정할

수 있고 이에 대응하는 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (3)$$

σ_1, σ_2 및 σ_3 는 주응력이라고 불리고, $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ 라고 고하면 각각 최대, 중간, 최소 주응력이 된다.

3. 재료 및 방법

가. 실험장치

1) 토중응력측정기(STT)의 제작

Fig. 1에서 왼쪽의 SST는 Jun(1997)이 개발하여 사용했던 것이다. 헤드부와 대좌부로 구성되어 있고 6개의 압력센서(PS-10KB, Kyowa, Japan)를 장착했다. 재질은 탄소강으로 만들었다. 재질의 특성상 표면이 거칠며 수분이 많은 토양 중에 오랜 기간 사용할 경우 부식되기 쉽고 이로 인해 압력센서에 손상을 줄 수밖에 없었다. 그래서 에나멜로 도장했지만 실험 중에 큰 하중을 받기 때문에 쉽게 벗겨졌다. 이 SST에서 헤드부(SST의 윗부분)는 Nichols(1987)가 개발한 SST와 똑같은 계측원리로 만들었다. 대좌부(SST의 밑부분)의 설치목적은 차륜이 SST 위를 통과할 때 소성유동에 의해 경반위에서 미끄러지는 것을 방지하고 SST의 침하도 고려해야 하므로 안정적이면서 데이터의 수집에 악영향을 되도록 피할 목적으로 설치했다. 또한 SST의 침하시 원추표면에 토과의 부착을 방지하기 위하여 원추관입 시험장치의 원추각도와 같은 30°로 설정했다.

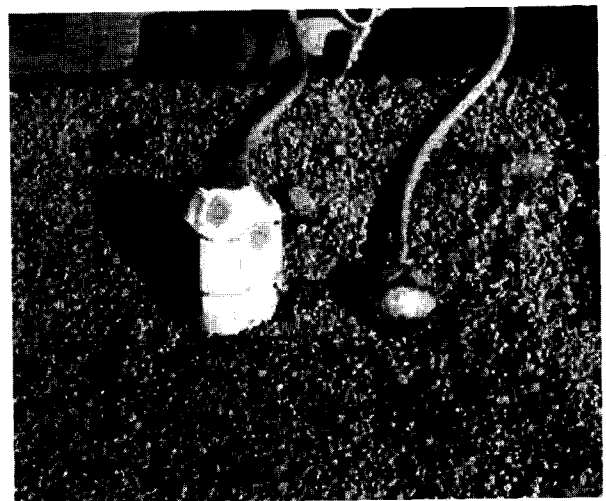


Fig. 1 Soil stress state transducers(SSTs)(Left: old SST, Right: new SST).

새로 제작한 SST의 설계 및 계측원리는 Jun(1997)에 자세히 소개되어져 있다. 단지 그들이 개발한 SST(Fig. 1의 오른쪽)에서 발생한 문제점들을 해결하는 것이 본 연구에서 다루어질 내용이다. 이를 위해 토양입자에 가깝게 접근하려는 점들을 고려하여 크기와 형상 및 재질을 변화시켰다. 우선 토중응력상태는 토양입자 1개를 상징한 것이기 때문에 측정기의 크기를 되도록 줄였다. 또한 경반에 고정시키는 것보다 토양의 움직임과 연동할 수 있는 구조를 선택했다. 식 (1)을 유도하기 위한 가설에서 토양의 1점을 극한의 미소입방체로 가정했다. 하지만 실제 토양 중에서 측정기의 형상이 구에 가까울수록 주변 입자와의 적응성 및 연동성에 효과적이라는 것을 고려했다. 이에 따라 SST의 형상을 공과 같은 구(ball)로 설정했다. 크기는 압력센서(Table 1 참조) 자체의 크기와 6개의 압력센서를 정확한 위치에 부착시키고 배선과 같은 작업을 최소한 할 수 있는 공간 등을 고려하여 정했다. 우선 Jun(1997)이 개발한 SST의 헤드부의 지름인 60 mm인 점을 참고로 하여 같은 크기의 구형 SST($\phi 60$ mm)를 만들었다. 하지만 보다 크기가 작은 SST의 개발을 목적으로 했기 때문에 지름 40 mm인 SST($\phi 40$ mm)의 제작을 하게 되었다. 재질은 가공의 어려움은 있지만 내식성이 우수하고 도장 및 도색 등의 표면처리를 행하지 않고도 고유의 표면을 살려서 사용할 수 있는 스테인레스강을 사용했다.

실험전후의 SST에 부착된 압력센서의 감도를 체크하기 위해 특수제작한 교정장치를 만들어 수시로 검사했다. SST에 부착된 시판용 압력센서는 공장에서 교정이 정밀하게 이뤄졌기 때문에 따로 교정을 위한 작업이 필요하지 않았다. 단, 실험 전후에 압력센서가 파손됐거나 정밀도에 이상이 있는 지를 확인하기 위하여 교정장치를 이용했다. 본 실험에서 사용된 압력센서는 지표부근에서의 측정도 고려하여 약 980 kPa의 용량을 갖는 것을 택했다. 또한 SST에 부착된 압력센서를 보호하기 위해 고무수지를 도포했다.

Table 1 Specifications of a Pressure Sensor

Model	PS-10KB
Rated Pressure	0 to 10 kgf/cm ² (0 to 980.7 kPa)
Diameter	6 mm
Thickness	0.6 mm
Company	KYOWA, Japan

2) 측정장비

Fig. 2는 동력계(dynamometer-car)와 타이어 시험기를 나타내고 있다. 동력계는 대형 토양조에 설치되어 있다. 토양조는 전장 100m, 폭 4.2m, 깊이 1m로 실험토양이 충전되어 있다. 토양조의 양측에는 동력계의 주행용 레일이 깔려있다. 동력계는 104 kW의 디젤엔진이 탑재되어 있고, 실험타이어의 구동 및 하중의 제어에 충분한 출력을 갖고 있다. 타이어 테스트는 트랙터 타이어 1개만을 실험할 수 있는 형태를 하고 있고, 동력계에 접속하여 사용한다. 타이어의 구동 및 타이어 하중의 조정은 동력계의 유압에 따라 제어한다. 타이어 하중의 최대 허용 하중은 24.5kN이다.

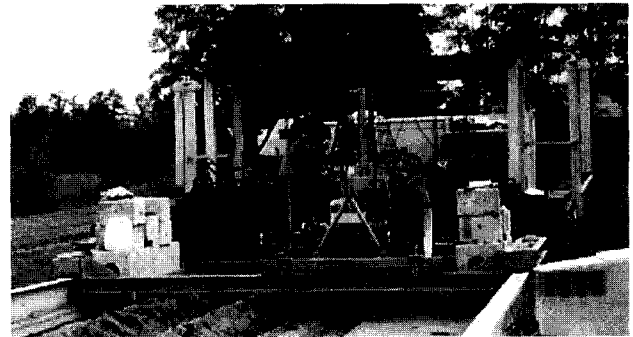


Fig. 2 Tire tester and dynamometer car.

나. 실험조건 및 실험방법

1) 실험조건

가. 토양조건

실험토양은 화산재 토양(점토, 31.0%, 실트 12.0%, 모래 57.0%)으로서 국제토양학회법에 따른 구분에서는 사질식토이다. 경운이 반복적으로 실시되는 포장의 특성상 경반이 형성된다는 것을 고려하여 토양표면에서 약 250mm 밑에 경반을 만들었다. 실험토양은 로터리 경운 작업을 했고 토양조건은 함수율 22.8%, 습윤밀도 1.19 g/cm³이다.

나. 실험타이어

실험타이어의 사이즈는 12.4R28PR8(Good Year제)의 래디얼 타이어이다. 타이어공기압의 선정은 최대하중 14.2 kN(타이어회사의 추천값)에 대응하는 적정압력 157 kPa, 극저압의 조건으로서 59 kPa 및 중간값으로서 108 kPa로 했다. 즉, 공기압(kPa) - 하중(kN)에 따라 재정리하면 ① 59 kPa - 14.2 kN, ② 108 kPa - 14.2 kN, ③ 157 kPa - 14.2 kN으로 나뉠 수 있고 4회 반복

실험을 했다. 공기압 59 kPa의 채택은 굉장히 조심스럽지만 최근에 생산되는 레이디얼 타이어는 카캐스부분이 보강되었기 때문에 낮은 공기압에서 충분히 운용될 수 있다. 일부 레이디얼 타이어에서는 최저공기압이 40 kPa까지 사용이 가능하게 되어졌다. 이는 바이어스 타이어가 최저공기압이 80 kPa인 것과 비교하면 극저압에서 사용할 수 있는 특성을 갖고 있다. 또한 59 kPa에 대한 정격하중은 약 8 kN정도인 데 14.2 kN의 하중을 적용시키는 것은 자칫 타이어의 변형을 극대화시킬 수 있다. 또한 타이어의 모서리에 변형을 크게 하여 림(rim) 부위에 응력집중이 발생할 수 있다. 하지만 낮은 공기압에서의 데이터 수집도 연구의 한 목적이기 때문에 실험을 했다. 또한 구동차륜을 상정하여 슬립은 20%로 했고 통과 횟수는 1회로 한정했다. 이는 20% 이상의 슬립과 다수의 통과횟수는 토중응력상태에 거의 영향을 미치지 않는다는 Bailey(1988b)의 보고를 참고했다.

정확한 타이어 회전각을 측정하기 위해서는 타이어 제조회사에서 주어진 1 회전시 주행거리가 필요하다. 하지만 Good Year(실험타이어 제조회사)에서 발간한 자료(farm tire handbook)에는 12.4R28PR8과 같은 사이즈의 바이어스 타이어에 관한 정보만 실려 있었다. 여기서 바이어스 타이어기준으로 1 회전시 주행거리는 3751 mm였다. 더구나 이 주행거리에 관한 공기압 - 하중에 대한 정보가 전혀 없었다. 본 실험을 하기 전에 각각의 실험조건에 맞춰서 1 회전시 주행거리를 측정하고 후 SST와 회전각과의 거리를 산정했다. 단, 토양조건과 실험조건에 따라 주행거리는 다르게 나타나는 관계로 단지 참고 자료로만 활용했다. 데이터를 수집하는 최소 구간은 약 60°이고 이를 공시주행거리(3751 mm)로 나누면 약 625 mm로 환산할 수 있다.

2) 실험방법

SST의 측정위치는 타이어축 바로 밑인 트레드면의 중심선상에서 한 곳으로 정했다. 우선, SST를 매설하기 위해 지름 100 mm, 길이 250 mm인 원통을 정해진 위치에 무리한 힘을 주지 않고 경반의 위치까지 넣었다. 모종삽과 같은 작은 도구를 이용하여 원통내의 토양을 퍼올린 후 정해진 위치에 놓고 수분 증발을 가능한 한 막기 위해 비닐로 덮었다. SST를 묻고 따로 두었던 토양을 2mm의 체를 이용하여 정제하고 SST 위에 다시 돌려놓았다. 이때 SST의 z 축의 방향을 토양표면에 대하여 수직으로 향하도록 했다.

실험은 SST의 매설지점에서 진행방향의 후방에 타이

어 회전각 60°(약 625 mm)의 위치에 타이어를 정지했다. 실험타이어에 실험조건인 공기압과 하중을 걸어 동력계를 0.05 m/s의 속도로서 주행하고 슬립 20%에 맞춰서 타이어의 회전속도를 정했다. 타이어가 회전을 시작하면 타이어 회전각 100°에 걸쳐서 6방향 응력과 회전각의 펄스를 컴퓨터에 기록했다. 얻어진 데이터에서 응력상태를 산출하고 주응력을 구했다.

4. 결과 및 고찰

가. 수직응력(σ_z)의 측정값

Fig. 3은 공기압 - 하중의 조합이 157 kPa - 14.2 kN, 108 kPa - 14.2 kN과 59 kPa - 14.2 kN인 3 종류의 실험조건에서 타이어 트레드면의 중심선에 위치한 SST로부터 얻어진 측정치를 나타낸다. x 축은 타이어의 회전각으로 좌측에서 우측으로 주행하고 회전각 0°는 매설된 SST의 바로 위를 나타내며 타이어축이 지나가는 순간을 나타낸다. y 축은 수직응력의 크기인 σ_z 의 값을 나타내고 있다.

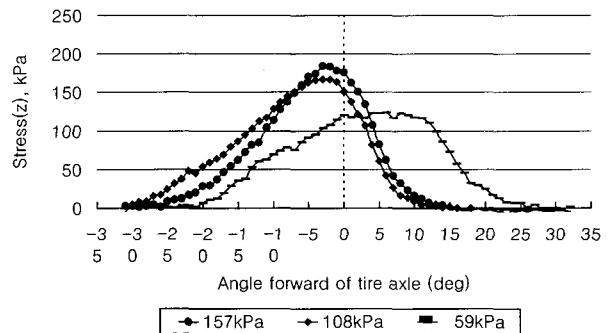


Fig. 3 Vertical stresses(σ_z) measured from an SST on the hardpan at a depth of 250mm.

Fig. 3의 실험조건별 파형을 살펴보면 타이어의 공기압이 높을수록 응력값이 높게 나타났다. 단 공기압 157 kPa과 108 kPa의 파형이 유사하게 나타난 것은 타이어변형의 차이가 크지 않다는 것을 의미할 수 있다. 157 kPa의 조건은 다른 실험조건보다 강체륜에 가까워서 러그의 영향 때문에 타이어 중심부에서 응력집중현상이 발생한다고 볼 수도 있다. Way 등(1995a)은 러그높이가 용적밀도에 영향을 미친다고 했는데 슬립이 20%이고 250 mm의 깊이에서 측정된 값이지만 러그의 영향은 무시할 수 없다고 본다. 공기압 59 kPa에서는 피크값이 뚜렷하게 나타나진 않았지만 타이어 축인 회전각 0°을 기준으로 했을 때 타이어의 후방에 나타났다. 공기압 59 kPa

인 조건에서 피크응력값이 다른 실험조건에 비해 낮게 나타난 것은 공기압이 낮을수록 접지폭 및 접지길이의 증가에 따른 접지면적이 증가했기 때문이라고 추정할 수 있다(Jun, 2004). 하지만 가해진 하중인 14.2 kN는 공기압 59 kPa에는 가혹한 조건일 수가 있고 과대한 타이어의 변형을 일으켜 카캐스의 손상을 일으키거나 역할을 방해하여 타이어의 모서리부위의 응력값을 증대시킬 수 는 있다. 하지만 타이어 공기압의 감소에 따른 피크값의 감소는 상당히 바람직하며 타이어의 카캐스가 제 역할을 충분히 할 수만 있다면 극저공기압이 토양의 악영향을 줄이는 대안으로서 생각할 수 있다. 또한 피크값이 토양이나 타이어에 직접적인 영향을 미치지 때문에 피크값을 줄이는 것이 타이어의 개발이나 토양환경을 개선시키는 데 가장 효과적인 방법이라고 여겨진다. 결국은 적절한 공기압의 설정이 타이어와 토양의 악영향을 최소한으로 줄일 수 있는 방안이라고 생각한다면 공기압 - 하중표를 토양특성에 맞게 재설정해야 한다고 생각한다.

나. 최대주응력(σ_1)의 계산값

Fig. 4는 6개의 압력센서로부터 얻어진 값을 이용하여 계산한 최대주응력을 나타낸다. Fig. 3에서처럼 x 축은 타이어의 회전각을 나타내며 주행방향은 왼쪽에서 오른쪽으로 움직이는 것이다. 회전각 0°의 위치는 매설된 SST 바로 위를 나타내며 y 축은 최대주응력인 σ_1 의 값을 나타낸다. 그래프 3과 4에서 나타나는 것처럼 σ_1 과 σ_2 의 파형이 유사하다. 이것은 수직응력이 응력상태에 가장 큰 입력값으로서 최대주응력에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

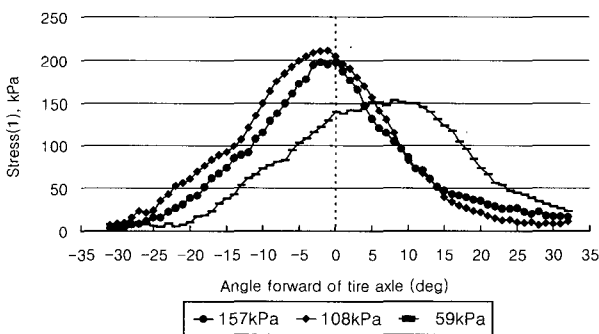


Fig. 4 Major principal stresses(σ_1) calculated from the original soil stress data.

토질동역학에서 σ_1 에 관해서 자세하게 해석되어진 경우는 드물다. 하지만 일부에서는 토양다짐의 경로를 밝히는 데 이용되기도 한다. 토양에서 응력 - 다짐관계는 응력텐서를 부피변화나 용적밀도(bulk density)와 관련지

어서 개발할 수 있다. 특히 용적밀도는 최대주응력인 σ_1 으로 결정되므로 σ_1 - 용적밀도의 관계가 설정되어진다면 토양다짐분포는 이미 알고 있는 σ_1 에 따라 구할 수가 있다(Harris, 1994). 그래서 σ_1 의 값이 증대하면 토양다짐의 양도 증대했다고 해석할 수 있는 것이다. Fig. 4에서는 Fig. 3과는 달리 타이어의 공기압157 kPa과 108 kPa의 그래프에서 역전이 일어났다. 이러한 역전현상의 원인을 단정적으로 정의내리기는 힘들다. 하지만 주응력은 수직응력값을 포함한 6개의 센서로 측정된 값을 이용하여 응력텐서의 9개성분을 계산한 후 얻어진 값이다. 즉 측정지점에서의 응력상태를 나타내는 것이다. 여기서 수직응력값이 주응력의 최대입력값인 것만은 사실이지만 단지 한 방향(SST의 z 축)의 값에 불과하고 나머지 방향의 측정값이 157 kPa 보다 108 kPa에서 상대적으로 높게 나타났다고 볼 수도 있다.

결국 타이어의 다른 위치(모서리나 언더트레이드)에서는 알 수 없지만 타이어의 중심부위에서는 157 kPa 보다 108 kPa에서 최대주응력의 파형이 높게 나타나서 공기압 108 kPa에서 토양다짐이 더 많이 이루어졌다고 볼 수 있다. 하지만 극저공기압 59kPa에서는 완만한 파형으로 나타나 Fig. 3처럼 공기압의 효과를 잘 보여주고 있다.

다. 수직응력 및 최대주응력의 피크값

Fig. 5는 수직응력과 최대주응력의 피크값을 실험조건에 따라 배열한 것이다. x 축은 타이어 공기압에 따른 실험조건을 나타내고 y 축은 피크응력값을 나타낸다. 토질동역학에서는 짧은 시간에 작용이 발생하므로 측정데이터의 극대치를 무시하지 않고 피크값으로 중요하게 다룬다. Fig. 5의 그래프에 나타난 것처럼 157 kPa, 108 kPa 및 59 kPa 순으로 각각 7%, 27% 및 23% 정도로 최대주응력의 피크값이 수직응력의 피크값보다 높게 나타났다.

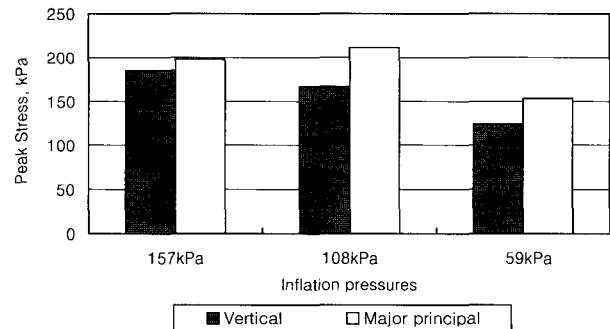


Fig. 5 Peak stresses of vertical stresses and major principal stresses.

Block(1994)은 강체륜을 사용한 토중응력 측정에서 중심선 위치의 깊이 300mm에서 최대주응력의 피크값이 수직응력의 것보다 약간 높게 나타난다고 보고했다. Bailey (1988b)도 σ_1 의 피크값이 σ_z 의 피크값보다 더 크다고 했다. Fig. 5에서도 최대주응력의 피크값이 3개의 실험조건에서 수직응력의 것보다 똑같이 높게 나타나 Block(1994) 및 Bailey(1988b)와 유사한 결과를 보여주고 있다. 즉 σ_1 이 σ_z 보다 다소나마 크게 나타난다는 것이 의미가 있다고 할 수 있다. 이에 대한 정확한 이유를 단정적으로 정의내리기는 어렵다. 하지만 Way(1995b)의 보고에 따르면 최대주응력의 방향은 대체적으로 주행하는 타이어의 축을 향한다고 했다. 이에 반해 수직응력인 σ_z 는 측정기 바로위의 토양표면에 대하여 수직인 방향으로 가해지는 값이다. 이러한 미묘한 차이가 최대주응력의 피크값을 높게 했다고 추정할 수 있다.

5. 요약 및 결론

지름이 40mm이고 완전한 구이면서 경반에 구속되지 않고 토양의 움직임과 자유롭게 연동하여 측정할 수 있는 토양응력상태측정기(Stress State Transducer)를 개발했다. 실험조건은 157 kPa - 14.2 kN, 108 kPa - 14.2 kN 과 59 kPa - 14.2 kN인 3종류이고 타이어 중심 선상에서 깊이 250mm의 경반위에 SST를 매설했다.

얻어진 실험결과는 다음과 같다.

(1) 타이어의 공기압이 높을수록 수직응력그래프의 측정값이 높게 나타났고 공기압 157 kPa과 108 kPa의 파형이 유사한 반면 공기압 59 kPa인 조건에서 응력값이 다른 실험조건에 비해 현저히 낮게 나타났다.

(2) σ_1 과 σ_z 의 파형은 유사하게 나타났지만 공기압 108 kPa의 그래프가 157 kPa 그래프보다 높은 σ_1 의 값을 나타냈다. 극저공기압 59 kPa에서는 완만한 파형으로 나타났다.

(3) 실험조건별 157 kPa, 108 kPa 및 59 kPa순으로 각각 7%, 27% 및 23% 정도로 최대주응력의 피크값이 수직응력의 피크값보다 높게 나타났다.

참 고 문 헌

1. Bailey, A. C., T. A. Nichols and C. E. Johnson.

- 1988a. Soil Stress Determination Under Wheel Loads. Transactions of the ASAE 31(5):1309-1314.
2. Bailey, A. C. and E. C. Burt. 1988b. Soil Stress States Under Various Tire Loading. Transactions of the ASAE 31(3):672-677.
3. Bicki, T. J. and J. C. Siemens. 1991. Crop Response to Wheel Traffic Soil Compaction. Transactions of the ASAE 34(3):909-913.
4. Block, W. A., C. E. Johnson, A. C. Bailey, E. C. Burt and R. L. Raper. 1994. Soil Stress Measurement under Rigid Wheel Loading. Transactions of the ASAE 37(6):1753-1756.
5. Harris, H. D. and D.M . Bakker. 1994. A Soil Stress Transducer for Measuring *in Situ* Soil Stresses, Soil & Tillage Research, 29:35-48.
6. Jun, H. G., T. Taniguchi, K. Ohtomo, T. Kishimoto and T. Tamari. 1997. Measurement and Analysis of Six Direction Stresses under Tractors Tire. Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery 59(1): 21-28.
7. Jun, H. G., T. R. Way, B. Löfgren, M. Landström, A. C. Bailey, E. C. Burt and T. P. McDonald. 2004. Dynamic load and inflation pressure effects on contact pressures of a forestry forwarder tire.(in Press) Journal of Terramechanics.
8. Nichols, T. A., A. C. Bailey, C. E. Johnson and R. D. Grisso, 1987, A Stress State Transducer for Soil. Transactions of the ASAE 30(5):1237-1241.
9. Way, T. R., A. C. Bailey, R. L. Raper and E. C. Burt. 1995a. Tire Lug Height Effect on Soil Stresses and Bulk Density. Transactions of the ASAE 38(3): 669-674.
10. Way, T. R., C. E. Johnson, A. C. Bailey, R. L. Raper and E. C. Burt. 1995b. Soil stress state orientation beneath a tire at various loads and inflation pressures. Proceedings of the 5th North American ISTVS Conference/Workshop, Saskatoon, SK, Canada, May 10-12.