

### 3차원 계측용 압력센서의 개발

## Development of a transducer to measure three-dimensional pressures

전형규\*

이규승\*

정희원

정희원

H. G. Jun

K. S. Lee

### 1. 서론

농업기계의 분야에서도 공작기계, 로봇, 자동차 등의 분야와 같이 기계에 전자기술을 결합한 메카트로닉스화의 움직임이 현저하게 나타나기 시작했다. 메카트로닉스가 지향하는 것은 작업의 정확화, 신뢰성의 향상, 에너지의 절약, 운전의 용이화, 안전성의 확보 등이다. 이러한 경향은 첫째 비용절감, 둘째 미숙련자의 작업가능 및 재해의 방지, 셋째 작업내용의 정확화 등이 메카트로닉스기술로 실현할 수 있기 때문이다. 농업기계의 종류는 다양하기 때문에 전반적인 미래의 모습을 예상하는 것은 곤란하다. 그러나 현재 이미 제품으로서 충분히 발달되어져 있는 트랙터 등은 에너지의 절약과 운전의 용이화를 지향하고 복잡하게 움직이는 작업기는 안전화와 작업의 정확화 등이 가해져야 하며, 방제기 등과 같은 기계는 완전무인화를 목표로 가야 한다. 이러한 농업기계의 미래상과 연관시켜 보면 계측·제어의 기술이 중요하게 된다. 한편 계측·제어시스템을 기기의 면에서 보면 센서-제어기-구동기(actuator)와 연계된다. 이들 중 제어기는 마이크로컴퓨터 및 마이크로일렉트로닉스의 발달에 따라 급격히 발전하고 있다. 그러나 그 전후를 구성하는 센서와 구동기(actuator)는 비교적 발달이 느리고 농업기계의 제어기술에 대한 연구방향으로 되어 있는 것 같다. 특히 센서에 관해서는 각각의 농업기계마다 별개의 기능이 요구되고 있기 때문에 그 개발이 절실하다. 이 논문에서는 농업기계에 이용될 압력센서의 개발방향을 제시하고 Hatamura(1992)가 제안한 평행평판구조를 이용하여 농업기계에 실질적으로 응용할 수 있는 압력센서의 개발방안을 제시하는 것이다.

### 2. 농업기계에서 압력센서의 개발방향

농업기계에 이용되어지는 압력센서도 일반적인 센서와 같이 감도가 좋아야 하고 이외에 강도, 내충격성, 내기후성, 내구성, 안정성 등이 요구된다. 또한 토양과 접할 경우에는 내마모성과 밀폐성 등이 가해진다. 이를 구체적으로 살펴보면 다음과 같다.

---

\* 성균관대학교

- ① 강도 : 농업기계에 센서를 부착하기 위하여 기계자체의 강도가 감소하거나 센서부분이 약해지면 안된다. 이것은 힘 및 압력을 측정하는 센서의 설치에 특히 문제가 된다.
- ② 내충격성 : 농업기계는 자주식이 많고 그 때문에 연직방향의 충격력을 받기 쉽다. 또 작업기에도 급가감속 및 횡방향에서의 충격력이 가해지는 것이 많아 문제가 된다.
- ③ 내기후성 : 농업기계자체가 악조건적인 환경에서 이용되어지는 경우가 많다. 그 때문에 농업기계에 부착된 센서는 풍우에 대한 방수성, 토사 분진에 대한 방진성, 직사광선에 노출로 생기는 고온에 대한 내열성 등이 요구된다.
- ④ 내마모성 : 농업기계의 작업기에는 직접 토사에 접하는 것이 많다. 그래서 부착된 센서에 심한 마모가 생기기 때문에 내마모성이 요구된다.

### 3. 3차원 계측용 압력센서의 측정원리

그림1은 3차원 계측용 압력센서의 측정부이다. 측정부는 양단고정보의 구조를 하고 있고 보의 양옆에는 구멍이 있는 데 Hatamura(1992)는 평행평판구조(parallel plate structure)라고 했다. 평행평판구조는 고정부(그림1의 거리 a), 변형부(그림1의 거리 t)와 가동부(그림1의 A<sub>2</sub>지점에서 B<sub>1</sub>지점)로 나누어진다. 평행평판구조는 단순한 구조이지만 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

- ① 하중을 받는 가동부가 대략 평행으로 이동하기 때문에 양쪽의 변형부에 의해 각각 인장(고정부과 변형부의 경계)과 압축변형(변형부과 가동부의 경계)을 얻을 수 있다.
- ② 변형부 구멍의 크기를 조절함으로써 임의의 강성을 쉽게 얻을 수 있고 소형 및 정밀을 요하는 압력센서에 적합하다.
- ③ 변형부의 설정으로 횡방향의 강성이 높아서 간섭량을 감소시킬 수 있다.
- ④ 필요한 방향에 변형부를 설정함으로써 각종방향의 힘을 동시에 측정할 수 있다.

그림1에 나타난 측정부의 측정원리는 기본적으로 평행평판구조의 원리를 이용하지만 스트레인게이지의 부착위치, 구멍의 모양 및 크기, 센서의 적용대상에 따라 응용방법이 다를 수 있다. 이 논문에서는 트랙터타이어의 접지압을 측정대상으로 하여 개발방향을 설정했고 이에 따른 측정원리를 정리했다. 우선 측정부는 양단고정보의 구조로서 양쪽 끝이 고정되어 있고 하중은 보의 중간( $\frac{l}{2}$ ) 부분에서 받도록 설정되었다.

양단고정보에서 스트레인게이지를 부착한 A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>과 B<sub>2</sub>지점의 굽힘모멘트는 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$M_{A1} = R_{Aa} - M_A \quad (1)$$

$$M_{A2} = R_{Ab} - M_A \quad (2)$$

$$M_{B1} = R_A(l - b) - M_A - W\left(\frac{l}{2} - b\right) \quad (3)$$

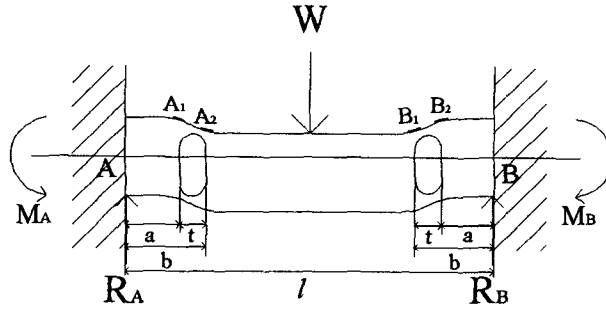


Fig.1 Parallel plate structure

$$M_{B2} = R_A(l-a) - M_A - W\left(\frac{l}{2} - a\right) \quad (4)$$

여기서

$W$ : 집중하중(N)

$l$  : 양단고정보의 길이

$a$  : 고정부에서  $A_1$  및  $B_2$ 까지 거리

$b$  : 고정부에서  $A_2$  및  $B_1$ 까지 거리

$M_A$  : A점에서의 고정모멘트

$R_A$  : A점에서의 집중반력

고정모멘트 및 집중반력은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$M_A = \frac{l}{8} W \quad (5)$$

$$R_A = \frac{l}{2} W \quad (6)$$

$A_1, A_2, B_1$ 과  $B_2$ 지점의 굽힘모멘트 및 집중반력의 식(5)과 (6)을 식(1)~ (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$M_{A1} = \frac{W}{8}(4a-l) \quad (7)$$

$$M_{A2} = \frac{W}{8}(4b-l) \quad (8)$$

$$M_{B1} = \frac{W}{8}(4b-l) \quad (9)$$

$$M_{B2} = \frac{W}{8}(4a-l) \quad (10)$$

일반적으로 보에서 굽힘모멘트가 발생했을 때 보의 변형율은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{M}{E \times Z} \quad (11)$$

$\epsilon$  : 변형율(strain)

$Z$  : 단면계수

$E$  : 종탄성계수

$M$  : 굽힘모멘트

스트레인게이지를 부착한  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ 과  $B_2$ 지점의 변형율은 식(11)에 식(7)~(10)을 대입함으로써 얻을 수 있다.

$$\epsilon_{A1} = \frac{M_{A1}}{E \times Z} = \frac{W(4a-d)}{8(E \times Z)} \quad (12)$$

$$\epsilon_{A2} = \frac{M_{A2}}{E \times Z} = \frac{W(4b-d)}{8(E \times Z)} \quad (13)$$

$$\epsilon_{B1} = \frac{M_{B1}}{E \times Z} = \frac{W(4b-d)}{8(E \times Z)} \quad (14)$$

$$\epsilon_{B2} = \frac{M_{B2}}{E \times Z} = \frac{W(4a-d)}{8(E \times Z)} \quad (15)$$

인장변형이 발생하는  $A_1$ 과  $B_2$ 부분의 변형율  $\epsilon_{A1}$ 과  $\epsilon_{B2}$ 이 플러스일 때, 압축변형이 발생하는  $A_2$ 과  $B_1$ 의 변형율  $\epsilon_{A2}$ 과  $\epsilon_{B1}$ 은 마이너스가 된다.

임의 하중이 가해질 때 측정기에 의한 변형율은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$(\epsilon_{A2} - \epsilon_{A1}) + (\epsilon_{B1} - \epsilon_{B2}) = \left( \frac{W(4b-d)}{8(E \times Z)} - \frac{W(4a-d)}{8(E \times Z)} \right) + \left( \frac{W(4b-d)}{8(E \times Z)} - \frac{W(4a-d)}{8(E \times Z)} \right) \quad (16)$$

$t=b-a$ 이므로, 위의 식을  $W$ 에 관하여 정리하면 다음식과 같이 된다.

$$W = \frac{E \times Z}{t} \{ (\epsilon_{A2} - \epsilon_{A1}) + (\epsilon_{B1} - \epsilon_{B2}) \} \quad (17)$$

하중  $W$ 를 측정기의 접지면적  $A$ 로 나누면 다음식으로 된다.

$$\sigma = \frac{W}{A} \quad (18)$$

#### 4. 트랙터타이어 언더트레이드 접지압센서의 개발과 측정실험

##### (1) 압력센서의 제작

언더트레이드 접지압센서는 접지판, 측정부 및 장착관으로 구성되고 그림2에 측정부의 개략도를 나타냈다. 측정부는 6mm×6mm, 길이 30mm의 4각봉을 직교시킨 십자형을 하고 평행판구조를 이용하여 압력을 측정한다. 접지판의 직경은 30mm이고 접지면에서 받은 임의 방향의 힘을 측정부에 전달하는 것을 목적으로 설계했다. 장착관은 직경35mm이고 측정부의 보호 및 탈착이 쉽도록 설계되었다. 접지판에 임의 방향의 힘이 작용할 경우 접지판에 수직인 법선방향응력과 접지판에 평행한 접선방향응력과 횡방향응력을 각각 동시에 독립하여 검

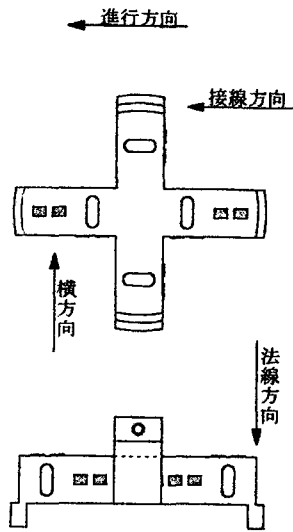


Fig.2 Sensing parts with parallel plate structure

출하도록 했다. 스트레인게이지는 평행평판구조의 양단에 부착하고 4개의 스트레인게이지를 브릿지회로로 조합하는 것에 따라 출력을 얻도록 했다. 스트레인게이지는 共和電業社 (KFR-02N-120-C1-11)로서 그리드(grid)는 길이 0.2mm-폭0.9mm이고 베이스(base)는 길이1.6mm-폭1.2mm이다.

(2) 압력센서의 교정시험

제작한 압력센서의 교정시험결과에 따르면 출력은 직선적으로 높은 상관관계를 나타냈고 간섭량은 횡방향에 대한 법선방향이 5.3%로 나타났다. 간섭량이 다소 높게 나타났지만 스트레인게이지가 작기 때문에 부착과정에서 약간 기울어졌거나 측정부의 각봉이 방향에 따른 변형이 일어났다고 볼 수 있다. 하지만 측정 대상에 따라 간섭량은 센서의 제작과정에서 충분히 감소시킬 수 있고 측정시에 컴퓨터로 보정하여 사용하면 간섭량의 문제는 해소될 수 있다. 히스테리시스 는 어느 방향에 있어서도 2.5%이내의 값을 나타냈다.

(3) 접지압측정실험

실험데이터는 자체제작한 압력센서를 타이어의 언더트레이드에 장착하여 수집했다. 압력센서를 피레리(Pirelli)제 레이디얼타이어(12.4R28pr8)의 바깥쪽측면(sidewall)근방에 장착했다. 접지판은 타이어표면과 같은 상태로 만들기 위하여 고무수지를 도포했다. 실험토양은 로터리경운작업을 했고 토양조건은 함수율 22.8%, 습윤밀도 1.19g/cm<sup>3</sup>이다. 진향저하율은 20%로 했고 공기압 59kPa과 하중 14.2kN으로 비교적 약조건이라고 판단되는 실험조건을 택하여 4회의 반복실험을 하였다.

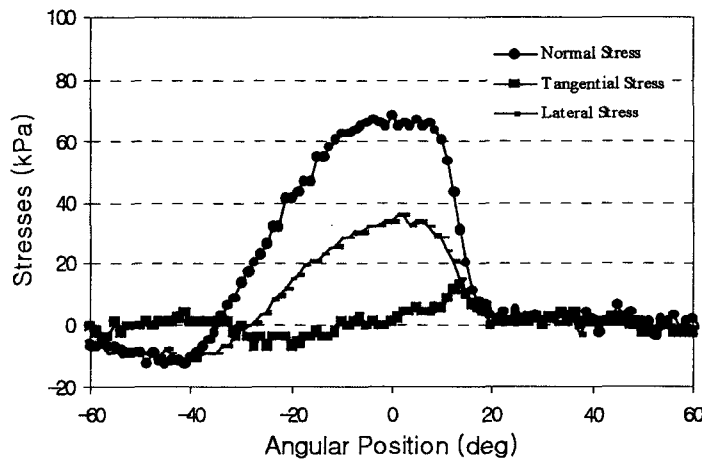


Fig. 3 Variation of stresses vs angular position of a transducer for an inflation pressure of 59kPa and a dynamic load of 14.2 at 20% slip.

#### (4) 실험결과 및 고찰

그림3은 공기압 59kPa, 하중 14.2kN, 진행저하율 20%일 때의 그래프이다. 차륜회전각은 압력센서가 차축의 바로 밑에 있는 점을 0°로 하고 압력센서가 차축의 전방에 있는 위치를 마이너스, 후방에 있는 위치를 플러스로 했다. 또 법선방향에서는 타이어가 압축된 방향을 플러스, 접선방향에서는 타이어회전방향과 반대로 향한 방향을 플러스, 횡방향에서는 진행방향에 대하여 왼쪽방향을 플러스로 했다. 그림3에서 법선방향응력 및 횡방향응력은 -37도 부근에서 플러스의 값으로 되고 20도부근에서 0kPa로 돌아왔다. 접선방향응력은 대략 일정한 파형을 나타냈다. 얻어진 결과는 과거에 보고된 연구결과와 비교적 비슷한 경향을 나타내고 있다(全(1997), Jun(1998), Raper(1995)).

### 5. 결론

농업기계에서의 메카트로닉스를 지향하기 위해서는 이 분야에 맞는 센서의 발전이 확보되어야 한다. 하지만 농업기계에서의 작업환경은 극도로 악조건적인 요소가 많기 때문에 이를 고려한 센서의 개발이 이루어져야 한다. 필자들이 제시한 3차원 계측용 압력센서는 그 중의 일부이며 앞으로도 많은 연구가 이루어져야 한다고 본다.

### 6. 참고문헌

1. 全 亨奎, 谷口哲司, 岸本 正, 吉田 慎, 玉利達人: 3方向応力測定器によるタイヤラグ面接地応力の測定. 日本農業機械學會志. 59(6), 3-10, 1997.
2. Jun, H., T. Kishimoto, T. R. Way, T. Taniguchi, 1998. Three directional contact stress distributions for a pneumatic tractor tire in soft soil, Transactions of the ASAE 41(5): 1237-1242.
3. Jun, Hyung-gyu, T. R. Way, B. Lofgren, M. Landstrom, A. C. Bailey, E. C. Burt, T. P. McDonald, Dynamic Load and Inflation Pressure Effects on Contact Pressures of a Forestry Forwarder Tire, 1998, ASAE Paper No. 98-1059, ASAE, Orland, FL.
4. Raper, R. L., A. C. Bailey, E. C. Burt, T. R. Way, P. Liberati, 1995. Inflation pressure and Dynamic Load Effects on Soil Deformation and Soil-Tire Interface Stresses. Transactions of the ASAE 38(3): 685-689
5. Hatamura, Y. and T. Hanamoto, 1992, Development of a three-directional stress cell and measurement of stress distribution on a backhoe bucket, J. Terramechanics, Vol. 29(1), pp117-124