農業機械 要素의 스트레인 게이지 應用에 관한 硏究

Applications of Strain Gages to Farm Machine Elements

柳寬熙* · 鄭昌柱* · 高學均* · 崔在甲* · 劉壽男*

K.H. Ryu, C.J. Chung, H.K. Koh, and J.K. Choi, and S.N. Yoo

Summary

The aim of this study was to promote extensive use of strain gages for accurate measurement in the area of farm machinery research.

The results are summarized as follows.

1. Although many strain gage transducers commercially available such as load-cells, accelerometers and pressure transducers have been used in the area of farm machinery research, many types of transducers had to be developed due to the inadaptability or high cost of commercial transducers, in many instances.

2. A strain-gaged cantilever beam could be used as a good educational material to demonstrate the methods of Wheatstone bridge arrangement, calibration and theoretical computation. A ring type load-cell and shaft torque transducer also could be used for the same purpose.

3. The torque and angular speed transducers for an auto-feed thresher and the displacement and pressure transducers for a rice whitener were made and gave satisfactory results.

4. Based on the above results, it is possible to develop simple and low-cost transducers to measure displacement, angular speed, torque and pressure of farm machine elements.

緖 言

電氣抵抗式 스트레인 게이지(electric resistance strain gauge)가 SR-4라는 商標名으로서 美國에서 市販되기 시작한 것이 1940年부터라고 알려져 있다 본래 스트레인 게이지의 使用目的은 荷重을 받고 있는 構造物部材의 變形(strain)을 測定하는 것이었다. 그후 많은 硏究의 結果로써 變形을 應用한 各種變換器(transducer)와 함께 測定機器도 發展을 거듭하여 初期에는 應力解析用 수단으로써 개발된 接着抵抗式 스트레인 게이지도 힘, 荷重, 加速度, 壓力, 토오크(torque) 및 變位 등 機械量의 精密測定用 수단으로써 널리 利用되고 있다.

그러나 우리나라의 農業機械硏究分野에서는 최근에서야 비로소 스트레인 게이지 測定機器가 導入되었고 이에 대한 理解가 不足하여 극히 少數의 硏究論文을 除外하고는 利用되지 못하고 있다.

따라서 本硏究의 目的은 스트레인 게이지 測定機器를 最大限 活用하고 農業機械硏究分野의 精密計測을 圖謀하기 위하여 스트레인 게이지의 基本原理를 考察하고, 硏究文獻을 통한 農業機械硏究의 스

* 서울大學校 農科大學 農工學科

트레인 게이지 活用度를 調査하며, 敎育材料用 및 農業機械試驗硏究用 變換器의 開發可能性을 提示하는데 있다.

스트레인 게이지의 原理 및 温度補償

1. 스트레인 게이지의 原理

어떤 物體에 가한 外力은 彈性限界內에서는 變形(strain)에 比例하여 나타나게 된다. 그러므로 응력(stress) σ와 스트레인 ε의 관계는 Hook의 法則에 의하여 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{\sigma}{\varepsilon}=E \text{ 또는 } \sigma=\varepsilon E \cdots\cdots(1)$$

위 식으로부터 특정한 物體의 彈性係數 E는 알고 있으므로 스트레인만 測定하면 應力을 決定할 수 있다.

電氣抵抗 스트레인 게이지의 原理는 어떤 試驗片이나 構造物에 外力에 의한 스트레인이 發生하였을 때 接着된 게이지의 抵抗線도 같은 스트레인이 생겨 抵抗값의 變化가 일어나게 되는 性質을 利用한 것이다. 즉 스트레인과 抵抗값의 變化사이의 관계에서 스트레인의 값을 구한다.

스트레인과 抵抗變化와의 理論的인 관계는 다음과 같다.

使用된 게이지의 抵抗을 R, 원래 抵抗의 길이를 l이라면 電氣抵抗은,

$$R=\rho\frac{l}{A} \cdots\cdots(2)$$

로 된다. 여기서 A는 抵抗線의 斷面積, ρ는 抵抗線의 比抵抗이다.

抵抗變化率 $\Delta R/R$을 구하기 위하여 (2)式을 微分하여 양변을 R로 나누면,

$$\frac{\Delta R}{R}=\frac{\Delta\rho}{\rho}+\frac{\Delta l}{l}-\frac{\Delta A}{A} \cdots\cdots(3)$$

이 되고, 이때 抵抗線의 全體積을 V라면,

$$V=A\cdot l$$

로 되고, 윗式의 微分하여 V로 나누면,

$$\frac{\Delta V}{V}=\frac{\Delta A}{A}+\frac{\Delta l}{l} \cdots\cdots(4)$$

로 된다. 여기서 比抵抗의 變化率이 體積의 變化率에 비례한다고 가정하면,

$$\frac{\Delta\rho}{\rho}=m\frac{\Delta V}{V}$$

로 된다. 一般用으로 스트레인 게이지에 使用하는 금속은 $m\fallingdotseq 1$의 값을 갖으므로,

$$\frac{\Delta\rho}{\rho}=\frac{\Delta V}{V} \cdots\cdots(5)$$

로 되며, (4)式과 (5)式의 관계를 (3)式에 代入하면,

$$\frac{\Delta R}{R}=2\frac{\Delta l}{l} \cdots\cdots(6)$$

로 된다. 여기서 $\Delta l/l$은 ε이므로

$$\frac{\Delta R}{R}=2\varepsilon \text{ 또는 } \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}=2 \cdots\cdots(7)$$

로 된다. (7)式의 값을 스트레인感度(strain sensitivity)라 하며 K로 表示하고, 이 값은 스트레인 게이지에 사용되는 抵抗金屬材料에 따라 변하게 된다.

$$\frac{\Delta R}{R}=K\varepsilon \cdots\cdots(8)$$

그러나 실제 K값을 갖는 材料를 써서 스트레인 게이지를 製作하여 $\Delta R/R$과 ε와의 관계를 살펴보면,

$$\frac{\Delta R}{R}=K_S\varepsilon \cdots\cdots(9)$$

가 되며, (6)式과 같은 比例關係가 나온다. 이때 K_S를 게이지率(gage factor)이라 하며, 여러 가지 要因에 의하여 스트레인感度에 대하여 $K_S>K$의 關係가 있다. 그러므로 게이지抵抗의 變化率과 게이지率과의 關係에서 스트레인을 구하고 被測定材料의 E만 알고 있으면 應力을 解析할 수 있다.

2. 測定回路의 原理

게이지 抵抗線의 抵抗變化를 測定하기 위해서는 대개 微小抵抗變化의 測定에 正確度가 높은 Fig. 1과 같은 휘이트스톤 브리지(Wheatstone bridge) 회로가 쓰이며 브리지의 出力側에 負荷가 없는 Open circuit에 대한 原理는 다음과 같다.

R_1이 게이지 抵抗으로 變形에 의하여 $R_1\pm\Delta R$로 變化 하고 나머지 抵抗 R_2, R_3, R_4는 變化하지 않는

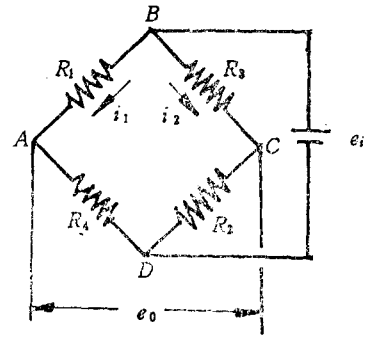

Fig. 1. Basic wheatstone bridge circuit.

다면 이 회로에 入力電壓 e_i를 入力시킬 경우 브리지의 出力端子의 電壓은,

$$e_0=\left[\frac{(R_1\pm\Delta R)}{(R_1\pm\Delta R)+R_4}-\frac{R_3}{R_2+R_3}\right]e_i \cdots(10)$$

로 되고, 만일 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$이라면,

$$e_0=\frac{\pm\Delta R}{2(2R\pm\Delta R)}e_i \cdots(11)$$

로 된다. 이때 $2R\gg\Delta R$이므로 $2R\pm\Delta R\cong 2R$로 되어,

$$e_0\cong\pm\frac{\Delta R}{4R}e_i=\pm\frac{e_i}{4}K\varepsilon \cdots(12)$$

로 된다.

따라서 e_0는 ε에 비례하게 되고 e_0를 측정함으로써 ε를 구할 수가 있다.

3. 스트레인 게이지의 温度補償

接着抵抗 스트레인 게이지를 使用하여 應力을 測定할 경우 温度變化에 의하여 스트레인이 變化하며 精密度에 영향을 미치게 된다. 이의 原因은 온도에 의한 게이지 자체의 傳導抵抗의 변화와 게이지 抵抗의 熱脹膨係數와 게이지가 接着된 試驗片의 熱膨脹係數가 다르기 때문이다. 이에 대한 補償法에는 抵抗變化와 電壓變化를 통해 외부로부터 주어지는 스트레인에 해당하는 것을 熱 스트레인과 相殺시키는 回路에 의한 方法으로서 액티브—더미(active—dummy method), 抵抗温度計와 連結시키는 法, 熱傳帶를 利用하는 方法이 있으며, 스트레인 게이지의 素子 자신의 抵抗温度係數를 제어하므로써 熱스트레인에 대한 感度를 작게 하는 自己補償法이 있다. 이중 가장 基本的이고 많이 使用되는 액티브—더미법은 액티브 게이지를 스트레인을 받는 試驗片에 接着시키고 스트레인을 받지 않는 같은 温度下의 같은 材料위에 더미 게이지를 接着하여 Fig. 2와

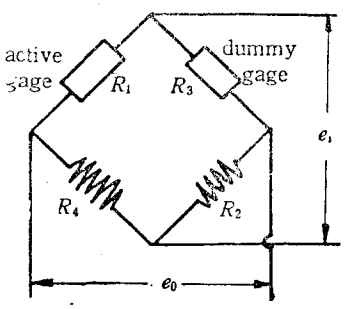

Fig. 2. Temperature compensation arrangment using a dummy gage.

같이 휘이트스톤 브리지 回路의 이웃 변에 오도록 배치시켜 温度補償을 시키는 方法이다.

여기서,

$$\Delta R_1=\Delta R_1{}^{\varepsilon}+\Delta R_1{}^{T},\ \Delta R_3=\Delta R_3{}^{T}$$

$$R_1=R_2=R_3=R_4=R,\ \Delta R_1{}^{T}=\Delta R_3{}^{T}$$

이면, 이때

$\Delta R_1{}^{\varepsilon}$=액티브 게이지 R_1의 스트레인에 의한 抵抗變化率

$\Delta R_1{}^{T}$=액티브 게이지 R_1의 温度에 의한 抵抗變化率

$\Delta R_3{}^{T}$=더미 게이지 R_3의 온도에 의한 抵抗變化率

출력전압 e_0는

$$e_0=\left(\frac{R_1+\Delta R_1}{R_1+\Delta R_1+R_4}-\frac{R_3+\Delta R_3}{R_2+(R_3+\Delta R_3)}\right)e_i$$

$$=\frac{(R_1+\Delta R_1)(R_2+R_3+\Delta R_3)-(R_3+\Delta R_3)(R_1+\Delta R_1+R_4)}{(R_1+\Delta R_1+R_4)(R_2+R_3+\Delta R_3)}e_i$$

$$=\frac{(R+\Delta R_1)(2R+\Delta R_3)-(R+\Delta R_3)(2R+\Delta R_1)}{(2R+\Delta R_1)(2R+\Delta R_3)}e_i$$

$$\cong\frac{R(\Delta R_1-\Delta R_3)}{2R(2R+\Delta R_1+\Delta R_3)}e_i\ (\because\ \Delta R_1,\ \Delta R_3\cong 0)$$

$$=\frac{\Delta R_1{}^{\varepsilon}}{4(R+\frac{1}{2}\Delta R_1{}^{\varepsilon}+\Delta R_1{}^{T})}e_i\ (\because\ \Delta R_1{}^{T}=\Delta R_3{}^{T})$$

$$\cong\frac{\Delta R_1{}^{\varepsilon}}{4R}e_i\ \left(\because R\cong R+\frac{1}{2}\Delta R_1{}^{\varepsilon}+\Delta R_1{}^{T}\right)$$

$$=\frac{K\varepsilon}{4}e_i \cdots(13)$$

로 되어 윗 식으로부터 温度에 의한 抵抗變化 ΔR_1는 相殺됨을 알 수 있다.

또한 R_3가 액티브 게이지인 경우에도 $\Delta R_3=\Delta R_3{}^{\varepsilon}+\Delta R_3{}^{T}$, $\Delta R_1{}^{\varepsilon}=-\Delta R_3{}^{\varepsilon}$, $\Delta R_1{}^{T}=\Delta R_3{}^{T}$로 되어

$$e_0=\frac{R(\Delta R_1-\Delta R_3)}{2R(2R+\Delta R_1+\Delta R_3)}e_i=\frac{2\Delta R_1{}^{\varepsilon}}{4(R+\Delta R_1{}^{T})}e_i$$

$$\cong\frac{\Delta R_1{}^{\varepsilon}}{2R}e_i=\frac{K\varepsilon}{2}e_i \cdots(14)$$

이므로, 온도에 의한 저항변화 $\Delta R_1{}^{T}$, $\Delta R_3{}^{T}$는 相殺할 수 있음을 알 수 있다.

4. 零點調整

브리지를 構成하고 있는 게이지가 스트레인을 받지 않으면 出力電壓이 零이라고 가정하였으나 조금씩 게이지 抵抗이 다를 수 있으므로 브리지에 不平衡(unblance)이 생기게 된다. 스트레인이 零일 때의 브리지 出力을 零點 또는 初期不平衡(initial unblance)이라고 하며 測定器에 따라서는 영점을 측정하여 놓고 스트레인이 發生하였을 때의 측정값에

서 메주는 形式이 있으나, 일반적으로 브리지를 平衡시켜 측정을 하게 된다.

이러한 平衡을 취하기 위하여 可變 브리지 要素 또는 分路抵抗을 사용한다.

調整은 보통 組調整(coarse adjustment)과 微調整(fine adjustment)의 두 단계로 나누어 이루어진다.

農業機械硏究分野의 스트레인 게이지 變換器의 活用度

電氣抵抗式 스트레인 게이지는 適切한 變換器를 選擇 또는 開發함으로써 힘, 荷重, 加速度, 壓力, 토오크, 變位 등의 精密測定에 使用될 수 있다. Table 1은 市販되고 있는 變換器를 農業機械硏究에 利用한 事例를 나타낸 것이며, Table 2는 自體的으로 開發한 變換器의 경우를 分類하여 나타낸 것이다.

教育材料用 變換器의 製作

1. 외팔보型 荷重變換器

(1) 變換器의 構造 및 測定裝置

Fig. 3와 같이 시험편의 윗면에 게이지 R_1, R_2 아랫면에 R_3, R_4를 接着한 다음 荷重 M으로 굽힘응력을 가하였을 때 게이지 R_1, R_2에 나타나는 인장 스트레인과 게이지 R_3, R_4에 나타나는 압축 스트레인을 측정하였다.

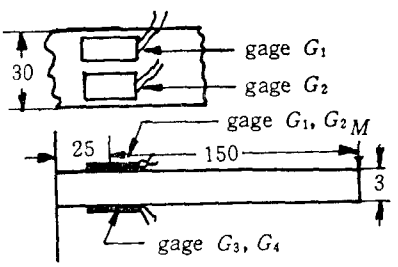

Fig. 3. Cantilever beam with gages mounted to illustrate augmented bridge output.

Fig. 4. Block diagram of instruments used to measure strain in the strain-gaged cantilever beam.

Fig. 4는 측정에 使用된 측정기기의 block diagram을 나타낸 것이다.

(2) 휘이트스톤 브리지(wheatstonebridge)의 構成

Fig. 1의 일반적인 휘이트스톤 브리지로부터 各 支線에 흐르는 전류는

$$i_1=\frac{e_i}{R_1+R_4}$$

$$i_2=\frac{e_i}{R_2+R_3}$$

로 되고, 저항에 의한 電壓강하는

$$e_{AB}=i_1 R_1=\frac{R_1}{R_1+R_4}e_i$$

$$e_{CB}=i_2R_3=\frac{R_3}{R_2+R_3}e_i$$

로 되어 出力電壓은

$$e_0=e_{AB}-e_{CB}=\left(\frac{R_1}{R_1+R_4}-\frac{R_3}{R_2+R_3}\right)e_i$$

로 됨을 알 수 있다.

만일 荷重 M이 作用하지 않고, 또한 $R_1=R_2=R_3=R_4=R$이라면 $e_0=0$가 된다.

그러나 荷重 M이 作用하면 게이지의 抵抗에 變化가 생기게 되어 이들 變化는 액티브 게이지(active gage)의 數에 따라 다음과 같이 3가지 方法으로 測定된다.

① 1—게이지 方法(Quarter-bridge method)

Fig. 5 (a)와 같이 게이지 G_1(또는 G_2, G_3, G_4)을 R_1의 위치에 삽입하면 하중 M에 의하여 R_1만이 인장변형을 받아 저항은 $R+\Delta R$로 변화하게 된다.

따라서, 出力電壓은

$$e_0=\left[\frac{R+\Delta R}{(R+\Delta R)+R}-\frac{R}{R+R}\right]e_i$$

$$=\frac{\Delta R}{4R+2\Delta R}\ e_i$$

로 된다. 그러나 ΔR은 R에 비하여 매우 작으므로,

$$e_0\cong\frac{\Delta R}{4R}\ e_i$$

로 된다.

② 2—게이지 方法(Half-bridge method)

Fig. 5 (b)와 같이 게이지 G_1(또는 G_3)을 R_1의 위치에 또한 게이지 G_2(또는 G_4)를 R_3의 위치에 삽입시키면 하중 M에 의하여 R_1은 인장변형으

Table 1. Illustrations of commercially available strain—gage transducers used in farm machinery research.

測定項目	變換機의 名稱	利用例〔 ( )는 문헌 번호임〕
force(힘)	load cell (하중 변환기)	○ 곡물의 動 마찰계수 산출에 필요한 水平力(1) ○ Soil bin의 견인력 측정 (2) ○ 동력 경운기 트레일러의 헛치에 작용하는 3방향 분력 측정 (5) ○ 감귤의 기계수확을 위한 꼭지의 전단력과 마찰계수 측정 (14) ○ 실험실용 extrusion macerator의 extrusion pressure 측정 (43) ○ Soil bin에서의 트랙터 rigid wheel의 lug force 측정 (49) ○ 농산물의 기계적 특성 시험장치 개발 (52) ○ 농산물의 역학적 성질을 조사하기 위한 낙하 시험 장치 개발 (52) ○ 로타리 경운기 시험용 경심 측정 (54) ○ 과일의 힘과 변형의 관계 측정 (56) ○ hopper, 콘베어, 벨트 계량 장치의 연속적인 무게 측정 (57) ○ cherry수확기계에 의해 나무에 가해진 동력 측정 (59) ○ 양파의 굴취 시험장치 (61) ○ 고무 타이어의 마찰계수 측정 (65) ○ 트랙터 뒷 타이어의 표면에 작용하는 힘 측정 (69), (70) ○ 과채류의 relaxation spectrum측정 (71) ○ 고구마의 동적인 구조 특성 조사 (73) ○ 트랙터 의자 위의 운전자의 무게 중심 측정 (76) ○ 옥수수 줄기의 압축력·인장력에 대한 측정 (79) ○ 담배 줄기의 물리적 특성(탄성계수·하중—변형관계)조사 (84) ○ 감자 저장고의 수평·수직 방향 압력 측정 (93)
acceleration (가속도)	accelerometer (가속도 변환기)	○ 진동 탄환식 암거 착공기의 진동 조사 (3) ○ 휴대용 chain saw의 rigid—body vibration측정 (51) ○ 과실 및 과채류의 기계적 공명(resonance) (55) ○ 로타리 틸러의 3방향 가속도 측정 (56) ○ 트랙터 frame의 구조강도 연구를 위한 압축·뒷축의 수직 방향 가속도 측정 (57) ○ 버찌 기계 수확에서의 vibration amplitude (59) ○ 트랙터의 진동과 그 전달 특성을 연구하기 위하여 진동하는 의자와 인체의 진동 분석 (62) ○ 트랙타 운전자의 진동 연구 (63) ○ 수송중의 진동 및 충격 방지를 위한 사과의 충격 가속도 측정 (70) ○ 고구마의 동적 구조 특성 조사 (73) ○ 입제 농약 살포기 모형의 충격 진동의 진폭 및 주파수 측정 (78) ○ 파종기의 진동 측정 (80) ○ 옥수수 곡립의 물리적 손상에 관련된 충격 인자의 실험적 분석 (83) ○ 진동식 subsoiler의 토양에 대한 동적 반응 조사 (86)
pressure (압력)	pressure transducer (압력 변환기)	○ 농용 디이젤 기관에의 乳化연료에 적응성 연구를 위한 엔진 실린더 내의 압력 측정 (16) ○ 이앙기 float의 접지 압력 측정 (25) ○ 결구형 상치의 포장시 체적 변화와 포장 압력 측정 (54) ○ rigid wheel 밑의 압력 분포 측정 (60) ○ organic slurry의 점성 측정을 위한 파이프 내의 압력 강하 측정 (72) ○ soil tensiometer의 기록용 (76)

測定項目	變換機의 名稱	利用例〔 ( )는 문헌 번호임〕
		○ bulk compresion 측정 장치의 압축실 내 압력 측정 (90)
angular displacement (각 변위)		○ 옥수수 곡립의 물리적 손상에 관련된 충격 인자의 실험적 분석 (33)
angular acceleration (각 가속도)		○트랙터의 roll 및 pitch acceleration측정 (94)
displacement (변위)		○ 농산물의 bulk modulus 및 압축성 측정을 위한 bulk compression 장치의 횡변위 측정 (90)

Table 2. Illustrations of strain—gage transducers specially developed for farm machinery research

測定項目	變換機 形狀	用 途
force(힘)	cantilever	○ 진동 탄환식 암거 착공기의 탄환 지지대에 작용하는 모우멘트 측정 (3) ○ 소형 트랙터 제초 작업기에 관한 연구 (6) ○ 트랙터의 3점 hitch용 견인력計의 試作 (8,9) ○ 곡립 유량計 개발 (11) ○ soil bin에서의 grousered plate의 slip—sinkage 현상 연구 (20) ○ 롤러식 현미기의 탈부 작용력 측정 (28) ○ 벼의 탈립성 시험장치 (38) ○ 바인더 결속장치의 가이드 파이프 내의 끈의 장력 (39) ○ 바인더 결속장치의 가이드 핀에 걸리는 힘의 측정 (39) ○ 농산물 bulk 압축성 시험기의 浮力 측정 (46) ○ 입제 농약 살포기의 균일성 측정 시험을 위한 샘플의 계량 (58) ○ 샘플의 자동 계량 장치 개발 (78) ○ Soil bin에서의 토양과 경운 부재의 마찰력 측정 (81) ○ 건조 실험용 자동 무게 측정 장치 (81) ○ 감자 저장고에서의 수직·수평 방향의 압력 측정 (92)
	beam	○ 진동 탄환식 암거 착공기의 견인력 산출을 위한 트랙터 하부링크에 작용하는 굽힘 모우멘트 측정 (3) ○ 도정기의 精白室 radial force 측정 (4) ○ 각종 경운작업 비교를 위한 토압계 개발 (12) ○ 타이어의 skidding 현상 연구를 위한 횡방향 마찰력 측정 (31) ○ 소형 트랙터의 plow bottom에 걸리는 하중 측정 (32) ○ 소형 트랙터의 차륜 하중 및 견인력 측정 (32) ○ driven wheel의 수평·수직 방향의 힘 측정 (37) ○ 현미의 인장 및 압축 강도 측정 (38) ○ flail knife mower의 절단력 측정 (44) ○ ballast 트랙터의 안정성에 미치는 영향을 연구하기 위한 수직방향 합력 측정 (52) ○ 청예 수확기의 절단력 측정 (64) ○ 옥수수 줄기의 stiffness 측정 (77) ○ 무게 측정에 이용될 수 있음을 보여 주기 위한 모형 (82) ○ 진동식 subsoilor의 토양에 대한 동적 반응 조사 (86)
	column or bar	○ 차량 하중계 개발 (13) ○ 감귤 꼭지에 작용하는 압축력 인장력 측정 (15)

測定項目	變換機 形狀	用 途
force (힘)	column or bar	○실외 soil bin 에서 소형 트랙터용 작업기의 견인 저항의 6分力 측정 (24) ○ 식물체의 압축 실험 장치 중 실린더에 걸리는 횡방향 압력 측정(40, 42)
	proving ring	○ 현미의 압축 시험 장치 개발 (18) ○ 포장에서 건초 적재기 등의 중량 측정을 위한 휴대용 계량기 개발 (66) ○ 트랙터 작업기의 견인력 측정 (68) ○ 트랙터의 top link에 작용하는 압축력 측정 (74)
	octagonal ring	○ 진동 탄환식 암거 착공기의 견인력 산출을 위한 트랙터의 top link에 작용하는 압축력 측정 (3) ○ 장궤형 트랙터의 견인력 측정 (7) ○ 트랙터의 견인력 측정 (82) ○ 진동식 subsoiler의 토양에 대한 동적 반응 조사 (86) ○ 견인력 성분의 직접적인 측정 (95)
	기 타	○ 토양의 전단응력, 수직응력, 침하 및 수직 방향의 변위를 동시에 측정할 수 있는 장치 개발 (85)
displacement or velocity (변위 및 속도)	cantilever	○ soil bin의 평균 이동 속도 측정 (2) ○ 현미기의 압축 시험장치 중 변위 측정 (18) ○ 식물체의 압축 실험 장치의 피스톤 변위 측정 (40) ○ hay pelleting 장치의 piston변위 측정 (46)
torque 토 오 크	shaft	○ 소형 트랙터의 차축의 소요동력 측정 (6) ○ 로터리 tiller 축의 토오크 측정 (21) ○ 바인더의 예취기구, 결속기구 및 반송기구의 토오크를 동시에 측정 (23) ○ 프로그램 제어 부하 변동 장치를 이용한 윤활유 첨가제의 농용 엔진오일의 저질화 시험 (29) ○ 로타리 경운기 날의 토오크 특성 (33, 34) ○ 콤바인 등의 포장 작업시 각종 동력 전달축에서의 토오크 측정 (45)
	bar	○ 밀 경도 시험기의 grinding energy 산출을 위한 토오크 측정 (48)
	rod	○ 퇴비 살포기의 주요 구동축의 토오크 측정 (67)
	tube	○ 묘 솎는 기계의 토양 절단 날의 가속, 감속시 발생하는 impulsive 토오크 측정 (71)
	기 타	○ 로우터리 축의 토오크 측정 (2)
static torque 靜的토오크	beam	○ 옥수수 줄기의 비틀림 힘에 대한 저항 측정 (79)
pressure (압력)	piston rod	○ hay pelleting 장치의 실린더 내 압력 (46)
	diaphragm	○ volumeter의 체적 변화 측정 (53) ○ 토양 샘플의 체적 변화 측정 (62)
	beam	○ flexible sphere 내에 비압축성 유체를 넣고 pressure cell에 sensing beam을 설치하여 압력 측정 (87)
	metal plate	○ 건조 citrus pulp 퇴적 탱크의 밑바닥에 작용하는 압력 측정 (91)

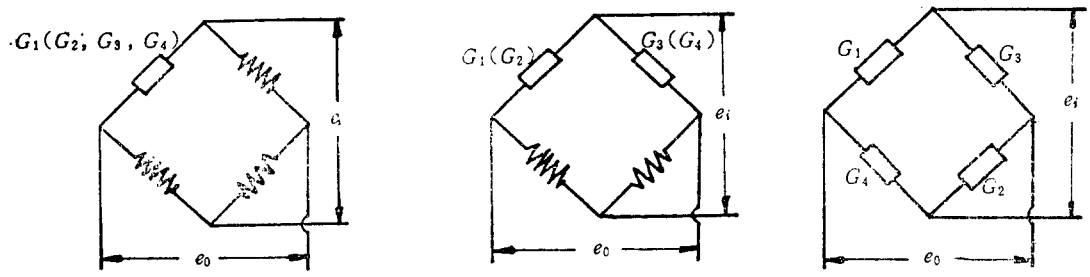

Fig. 5. Three methods of bridge arrangement for the strain-gaged cantilever beam.

로 $R+\Delta R$로 변하고 R_3는 압축변형으로 $R-\Delta R$로 변한다.

따라서 出力電壓은

$$e_0=\left[\frac{(R+\Delta R)}{(R+\Delta R+R)}-\frac{(R-\Delta R)}{R+(R-\Delta R)}\right]e_i$$

$$=\frac{2R\ \Delta R}{4R^2-\Delta R^2}\ e_i$$

로 되나 ΔR^2는 $4R^2$에 비하여 매우 작으므로

$$e_0\cong\frac{\Delta R}{2R}\ e_i$$

로 된다.

여기서 2-게이지 方法은 1-게이지 方法에 비하여 약 2배의 출력을 얻을 수 있으며 앞서 기술한 바와 같이 온도보상의 효과도 얻을 수 있다.

③ 4-게이지 方法(Full-bridge method)

Fig. 5 (c)와 같이 게이지 G_1, G_2, G_3, G_4를 각각 R_1, R_2, R_3, R_4의 위치에 삽입시키면 荷重 M에 의한 인장변형으로 R_1과 R_2는 각각 $R+\Delta R$로, 압축변형으로 R_3, R_4는 각각 $R-\Delta R$로 변한다.

따라서 出力電壓은

$$e_0=\left[\frac{R+\Delta R}{(R+\Delta R)+(R-\Delta R)}-\frac{R-\Delta R}{(R+\Delta R)+(R-\Delta R)}\right]e_i$$

$$=\frac{\Delta R}{R}\ e_i$$

로 된다.

여기서 4-게이지 方法은 1-게이지 方法과 2-게이지 方法에 비하여 각각 약 4배와 2배의 출력을 얻을 수 있음을 알 수 있고, 아울러 온도보상의 효과도 얻을 수 있음은 전술한 바와 같다.

(3) 許容最大荷重의 決定

보의 휨응력은,

$$\sigma=\frac{MC}{I}$$

로 표시되며, 휨모우멘트는

$$M=Fl$$

이므로

$$F=\frac{\sigma I}{Cl}$$

로 표시된다.

여기서 σ : 허용휨응력(강철의 경우 2,800~4,200 kg/cm²)

$$I=\frac{bh_3}{12}=\frac{3(0.3)^3}{12}=6.75\times10^{-3}$$

$$C=\frac{h}{2}=\frac{0.3}{2}=0.15$$

Table 3. Comparison of the measured and theoretical strain for the 4-gage method of the cantilever beam

load(kg)	strain(x10⁻⁶)	theoretical strain*(x10⁻⁶)
0.5	310	317.5
1	653	634.9
1.5	980	952.4
2	1278	1,269.8
2.5	1,600	1,587.3
3	1,960	1,904.8
3.5	2,285	2,222.2
4	2,585	2,539.7
4.5	2,910	2,857.1
5	3,273	3,174.6

* 理論値의 算出方法

$$\sigma=\frac{MC}{I}=E\cdot\varepsilon,\ M=F\cdot l$$

$$\varepsilon=\frac{F\cdot l\cdot C}{E\cdot I}=\frac{F(15)(0.15)}{(2.1\times10^6)(6.75\times10^{-3})}$$

$$\varepsilon=1.5873\times10^{-4}F$$

4게이지법의 경우에는 출력이 4배가 되므로

$$\varepsilon=6.3492\times10^{-4}F$$

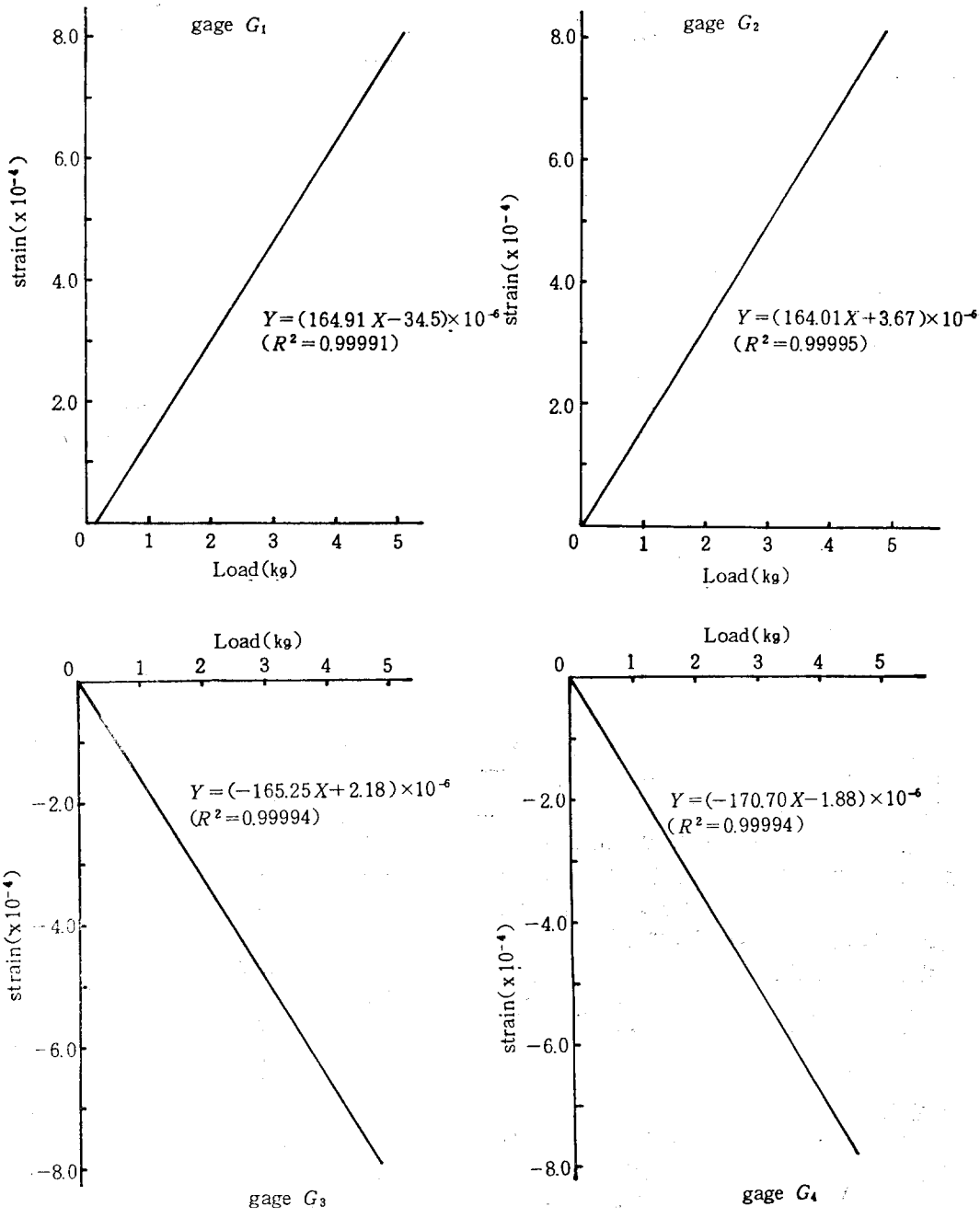

Fig. 6. Load vs strain output for the quarter-bridge method.

$l=15$cm이므로

이를 代入하면 許用最大荷重은

$$F=\frac{(2,800)(6.75\times 10^{-3})}{(0.15)(15)}=8.4(\text{kg})$$

으로 산출된다.

(4) 測定結果

Table 3는 4-게이지 方法에 의한 測定結果를 理論値와 比較하여 나타낸 것이며, 測定値와 理論値

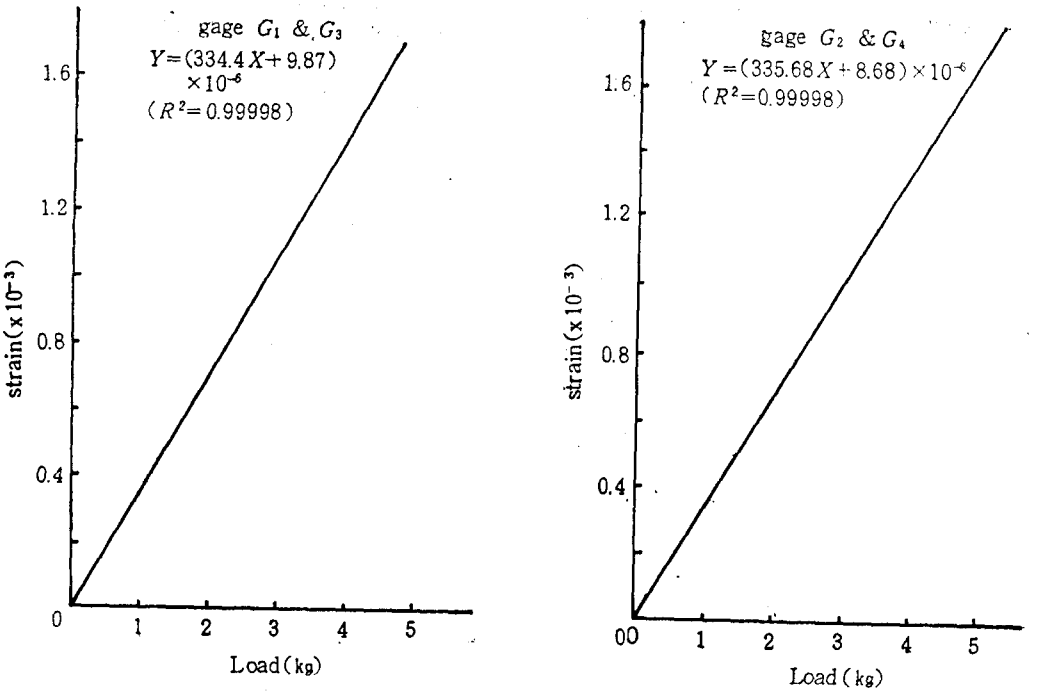

Fig. 7. Load vs strain output for the half-bridge method.

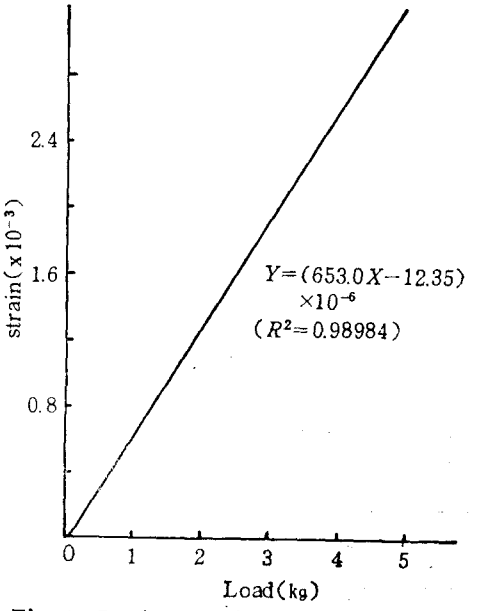

Fig. 8. Load vs strain output for the full bridge method.

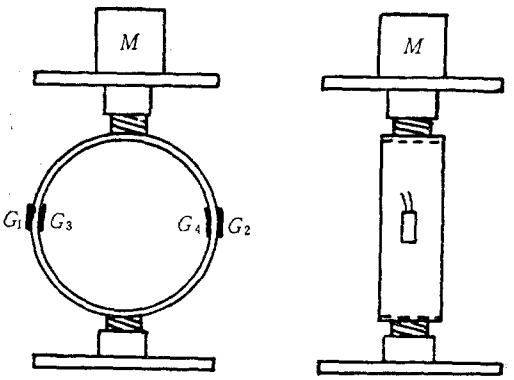

Fig. 9. Schematic diagram of the ring type load cell.

간의 差異는 주로 試驗片의 値數와 測定上의 誤差에 基因하는 것이다.

또한 各各의 브리지 構成方法에 따른 결과는 Fig 6, 7, 8에 나타난 바와 같으며 앞서 설명한 바와같이 액티브 게이지의 數에 따라 스트레인이 대략적으로 比例하여 나타남을 알 수 있다.

2. Ring型 荷重 變換器

荷重 變換器의 다른 형태로서 Fig. 9와 같은 ring 모양의 荷重 變換器를 製作하여 게이지 G_1, G_2는 각각 인장 스트레인을, 게이지 G_3, G_4는 각각 압축스트레인을 받도록 그림에서와 같이 부착하였으며,

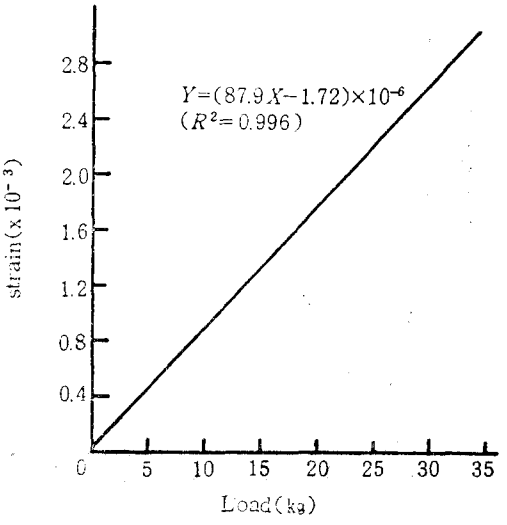

Fig. 10. Load vs strain output for the ring type load cell.

높은 出力을 얻고 温度에 의한 영향을 제거하고져 Fig.5(c)와 같은 4—게이지법의 Wheatstone bridge를 구성시켰으며, 사용된 측정기기의 구성은 Fig. 4의 외팔보 하중 변환기와 같다.

Fig. 10은 calibration의 결과로서, ring型 荷重 變換器의 荷重과 스트레인과의 관계를 나타낸 것이다.

3. 토오크 變換器

토오크 變換器의 원리는 Fig. 11과 같이 軸에 스트레인 게이지를 부착하여 게이지로 하여금 剪斷應力(Shear stress)을 檢出하여 토오크를 측정하는 것으로서 베어링 사이에 게이지 접착부를 두어 굽힘 모멘트에 의한 영향을 최소로 하였다. 또한 Fig. 5 (c)와 같은 브리지 回路를 구성함으로써 온도의 영향 및 軸方向의 힘과 굽힘 모멘트에 의한 영향을 제거하도록 하였다. 靜的 calibration은 Fig. 4와같은 측정기기로써 軸의 한 쪽에 arm을 부착시켜 여기에 荷重을 附加하여 旣知의 토오크에 대한 스트레인을 측정함으로써 이루어졌다. 그 결과는 Fig 12와 같다.

또한 이 토오크 변환기로서 脫穀機의 所要 토오크를 측정하기 위하여 Fig. 11과 같이 軸의 한 쪽

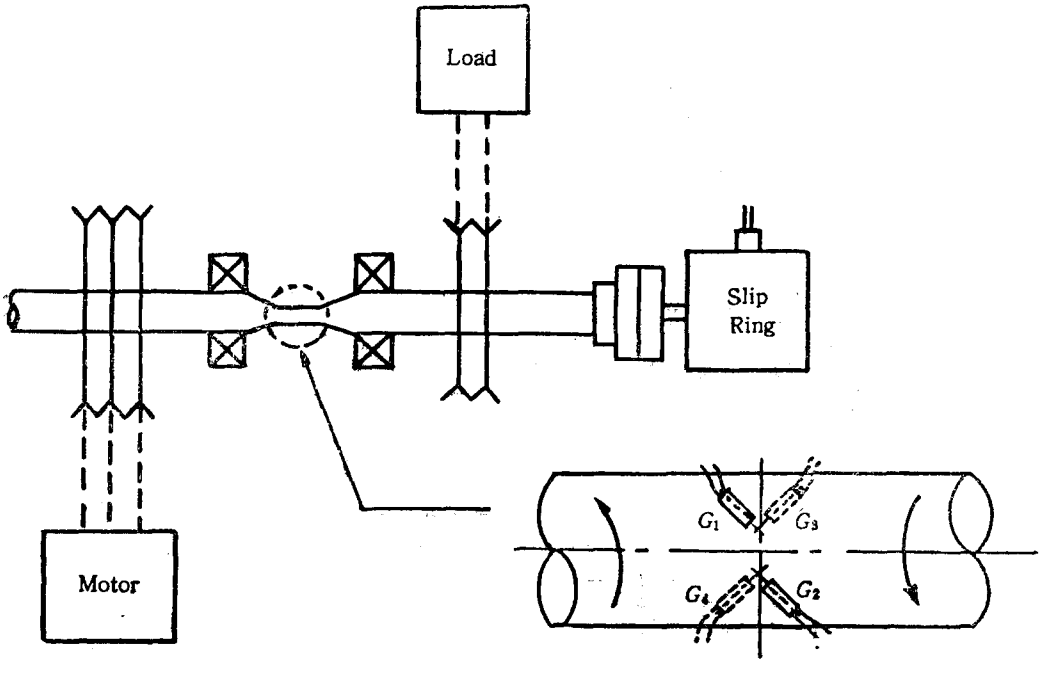

Fig. 11. Schematic diagram of the shaft torque transducer and its installation

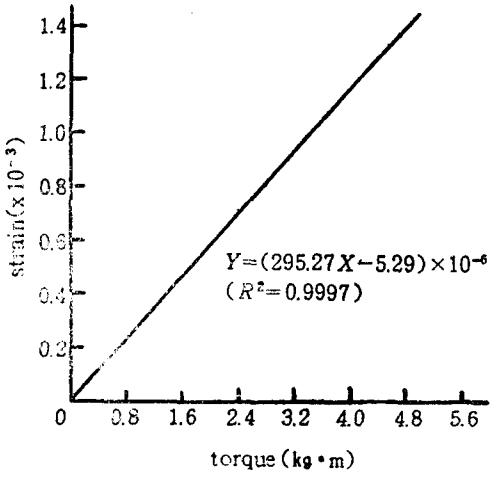

Fig. 12. Torque vs strain output for the shaft torque transducer.

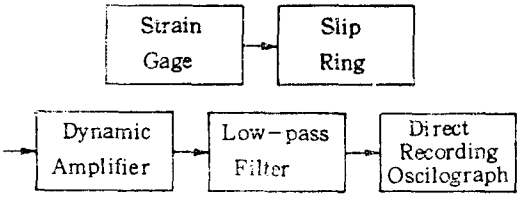

Fig. 13. Block diagram for instruments used to measure strain in the shaft torque transducer.

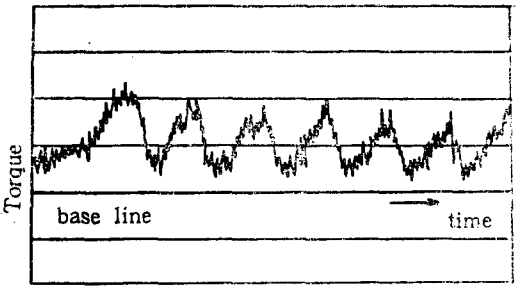

Fig. 14. A typical torque curve of the shaft torque transducer when it was used to measure the torque of an auto-feed thresher.

끝에 slip ring을 연결하고 게이지로부터의 lead線을 軸에 판 홈을 따라 slip ring의 端子에 연결하였으며, Fig. 13과 같은 측정기기의 구성으로 토오크를 측정하였다. 대표적인 토오크 곡선은 Fig. 14와 같다.

農業機械 試驗用 變換器의 製作

1. 脫穀機의 所要 動力 測定

脫穀機의 所要 動力을 측정하기 위하여 다음과 같이 동력경운기 엔진 축의 토오크와 회전속도를측정하였다.

(1) 脫穀機의 소요 토오크 측정

Fig. 15와 같이 원통형 파이프의 안 쪽에 스트레

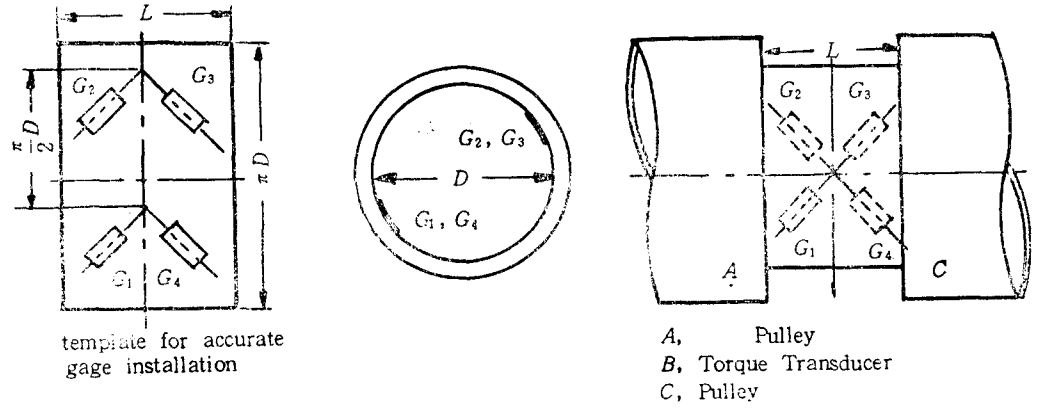

Fig 15. Schmatic diagram of the torque transducer installed on the engine shaft of a power tiller.

인 게이지를 부착하여 토오크에 의한 스트레인을 測定하였다. 이때 게이지의 부착 위치를 정확히 하기 위하여 그림과 같은 종이본(template)에 標線을 긋고 게이지의 위치를 표시하여 파이프의 안쪽에붙인 다음 게이지를 부착하였다.

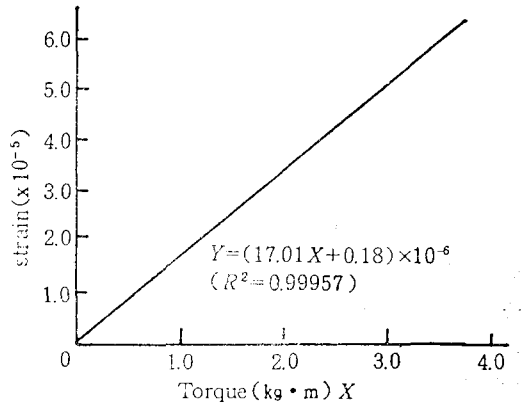

Fig. 16. Torque vs strain output for the torque transducer installed on the engine shaft when it was used to measure torque of an auto-feed thresher.

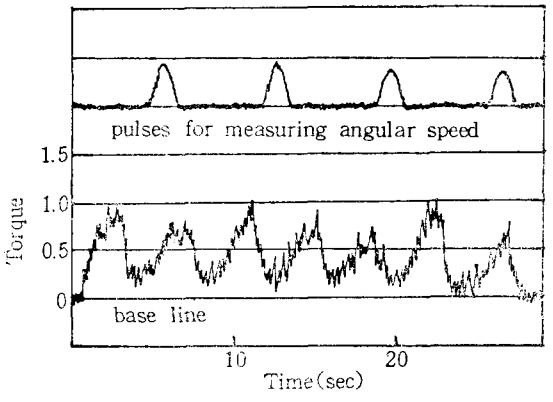

Fig. 17. Typical torque curve and strain pulses for measuring angular speed (rpm) of the engine shaft.

靜的 calibration 方法은 앞에서 기술한 shaft 토오크 변환기와 같으며, 그 결과는 Fig. 16과 같다. 이 變換器를 동력 경운기 엔진軸의 車軸 동력 전달용 V—풀리와 脫穀機 동력 전달용 平풀리 사이에 연결한 후 slip ring을 사용하여 토오크를 측정하였다. 토오크 측정을 위한 브리지 구성 및 측정기기

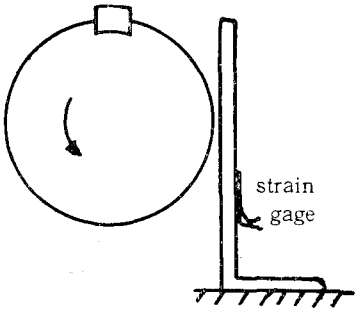

Fig. 18. Schematic diagram of the transducer for measuring angular speed (rpm).

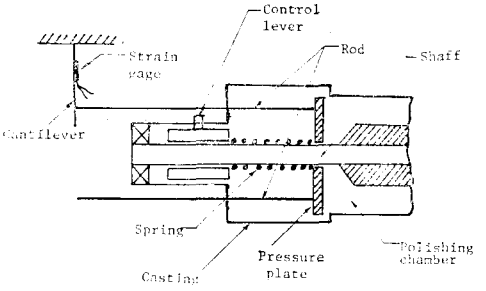

Fig. 19. Schematic digram of the displacement transducer for measuring counter pressure of a rice polisher.

는 각각 Fig. 5 (c), Fig. 13과 같으며 대표적인 토오크 측정의 결과는 Fig. 17과 같다.

(2) 엔진 回轉速度 測定

Fig. 18과 같이 回轉軸의 回轉速度를 측정하기 위하여 탄성이 좋은 철판을 사용하여 여기에 스트레인 게이지를 부착시키고 每 회전마다 돌기가 철판을 움직여서 스트레인의 펄스(pulse)를 나타내게 하여 單位時間當 펄스의 수를 산출하여 회전속도를 결정하였다. 그러나 동력 경운기 軸의 경우 회전속도가 빨라 기록지의 이동속도를 매우 빠르게 하지 않으면 안되기 때문에 동력 경운기의 PTO軸으로부터 체인으로 減速 기어박스에 연결시켜 減速(1/20)시킨 後 감속 기어박스의 出力軸에서 펄스의 數를 測定하였다. 回轉速度 測定을 위한 펄스는 Fig. 17에 나타난 바와 같으며, 엔진 回轉速度는 記錄紙上에서의 單位時間當 펄스의 數와 PTO軸의 減速 比率에 의하여 算出하였다.

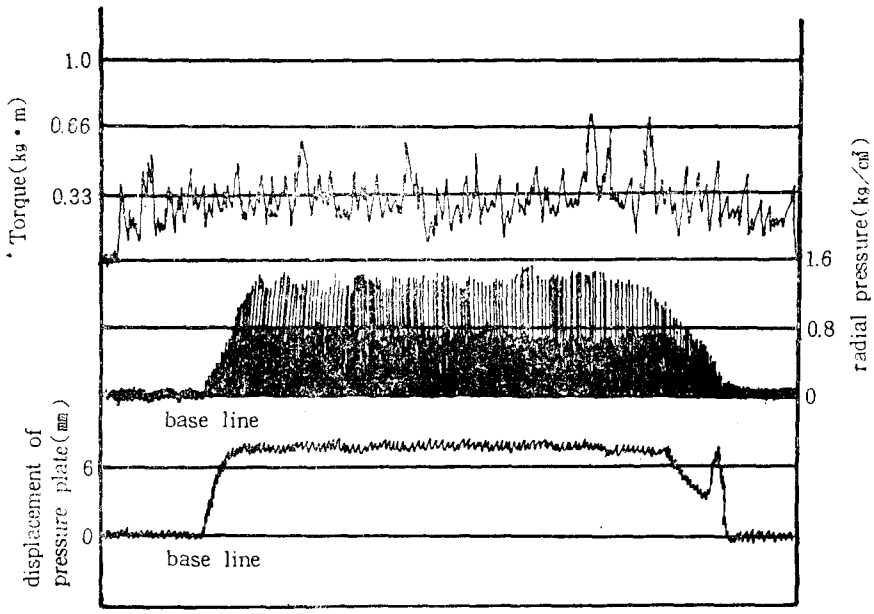

Fig. 20. Typical curves of troque, radial pressure and pressure-plate displecement from an rice polishing experiment.

2. 搗精機의 精白室 出口 壓力 및 토오크 測定

(1) 精白室의 出口 壓力

사용된 搗精機의 精白室 出口 抵抗은 압력핸들을 움직여서 스프링을 압축시킴으로써 발생하나, 搗精作業 中 출구 저항판은 쌀의 吐出에 의하여 밀려나게 되어 더욱 스프링을 압축시키게 된다. 따라서 搗精試驗 中 정확한 出口 抵抗 壓力을 算出하려면 압력 핸들에 의한 스프링의 수축변위와 출구 저항판의 변위를 측정하지 않으면 안된다. 출구 저항판의 변위를 측정하기 위하여 Fig. 19와 같이 철봉을 저항판에 고정시켜서 이 철봉이 매우 탄성이 좋은 cantilever(출구저항에 미치는 영향이 적어야 하기 때문임)을 움직여서 變形(strain)을 일으키도록 하였다. 搗精試驗時 대표적인 출구 저항판의 변위는 Fig. 20에 나타난 바와 같다.

(2) 精白室 內의 橫方向 壓力

搗精作業 中 精白室 內의 橫方向 壓力을 측정하기 위하여 盧·崔(4)가 開發한 形態의 變換器를 만들어 사용하였으며 그 대표적인 측정결과는 Fig. 20에 나타난 바와 같다.

(3) 搗精機의 所素 토오크

搗精機 內의 所要 動力을 測定하기 위하여 토오크 變換器(Kyowa製 TP-100 KMC, 용량=100kg · m)를 Fig. 21과 같이 연결하였으며 그 대표적인 측정결과는 Fig. 20과 같다.

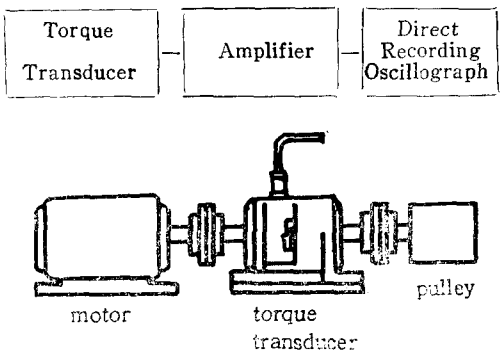

Fig. 21. Installation of a commercial torque transducer and block diagrams for instruments used to measure torque.

摘 要

스트레인 게이지를 農業機械分野의 精密計測에活

用하기 위한 硏究結果는 다음과 같다.

1. 市販用 變換器 中 荷重變換器. 加速度變換器 및 壓力變器는 이미 先進國에서 農業機械硏究의 수단으로서 널리 使用되어 왔으나 많은 연구에 있어서 特殊한 測定目的上 또는 비용절약을 위하여 加速度變換器를 除外한 여러 형태의 變換器를 獨自的으로 開發하여 使用하지 않으면 안되었다.

2. 외팔보형 荷重變換器는 여러가지 bridge의 構成方法, calibration方法 및 理論的 산출을 예시할 수 있는 좋은 교육보조재료였으며, ring형 荷重變換器의 軸型 토오크 변환기도 같은 目的으로 使用될 수 있었다.

3. 脫穀機의 소요동력 측정을 위한 토오크 변환기 및 회전수 측정을 위한 스트레인 게이지 변환기와 搗精機의 作動要因實驗을 위한 출구저항 측정용 變位, 變換器, 橫方向壓力變換器 등을 製作하여 만족스러운 實驗結果를 얻을 수 있었다.

4. 上記 結果를 토대로 基本的인 스트레인 게이지 측정기기만 있으면 간단하며 값이 싼 變換器를 제작하여 農業機械의 各 構成要素의 變位, 回轉速度, torque, 壓力 등의 精密測定에 널리 利用 할 수 있다.

引 用 文 獻

1. 金滿秀, 李鍾湖, 1976, 穀物의 動摩擦係數 測定에 관한 硏究, 韓國農業機械學會誌, 1(1)
2. 金聲來外, 1979, 로우터리 麥類 播種機 耕耘날의 改良試驗, 韓國農業機械學會誌, 4(1)
3. 金容煥外, 1977, 平衡式 振動彈丸 暗渠穿孔機의 硏究(Ⅳ, Ⅴ), 韓國農業機械學會誌, 2(1)
4. 盧祥夏, 崔在甲, 1976, 精米機의 能率에 미치는 機械的 要因 및 作動條件에 관한 硏究, 韓國農業機械學會誌 1(1)
5. 宋鉉甲, 鄭昌柱, 1977, 動力耕耘機의 傾斜地 牽引 및 走行特性에 관한 硏究(第1報), 韓國農業機械學會誌, 2(1)
6. 吉池奉天外, 1969, 小型 トラクタ用 ウイ｜ダに關する 硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 31(1), pp. 3～11
7. 笈田 昭, 1976, 裝軌 トラクタの けん引性能 解析(第3報), 日本農業機械學會, 38(1), pp. 34～40
8. 吉田富穗, 1970, トラクタ 3點 ヒツチ用 けん引力計の 試作硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 31(4), pp. 275～280.
9. 吉田富穗外, 1970, トラクタ 3點 ヒツチ用 けん引力計の 試作硏究(第2報), 日本農業機械學會誌 32(2), pp. 96～103.
10. 吉付靖生, 守島正太郎, 1973, アニユラー 試驗による 土壤常數の 動測定に 關する 基礎的 硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 35(3), pp. 245～252.
11. 梅田重夫, 瀧川 博, 1968, 試作 穀粒流量計について, 日本農業機械學會誌, 29(4), pp.231～232.
12. 木谷 , 1965, 各種 耕耘裝置 比較の 左めの 基礎的 硏究(第7報), 日本農業機械學會誌, 27(1), pp. 24～27.
13. 寺尾日出男, 1974, 車輛 荷重計の 試作, 日本農業機械學會誌, 35(4), pp. 345～352.
14. 山本博昭, 1976, 甘橋の 機械收穫に 關する 基礎硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 37(4), pp. 577～583.
15. 山木博昭, 川村 登, 1976, 甘橋の 機械收穫に關する 基礎硏究(第2報), 日本農業機械學會誌, 38(1), pp. 53～62.
16. 石井征亞, 竹內龍三, 1974, 農用 ディーゼル機關への 乳化燃料の 適應性に 關する 硏究(第2報), 日本農業機械學會誌, 36(2), pp. 186～192.
17. 小島孝之, 石橋貞人, 1970, 農產食品の 力學的性質に 關する 硏究(第3報), 日本農業機械學會誌, 32(2), pp. 145～149.
18. 小林 一外, 1976, 籾乾燥中における 玄米の乾燥歪と 胴割に 關する 硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 37(4), pp. 551～556.
19. 小松 實, 田中孝, 1973, ロータリ 耕うん機による 整地耕うん(第2報), 日本農業機械學會誌, 35(1), pp. 21～24.
20. 小中俊雄, W.F. ゼニツクレ, 1968, モデルプレ｜トによる スリツプ 沈下の 硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 30(1), pp. 5～12.
21. 小池正之外, 1974, ロータリ つめ軸の ねじり振動に 關する 硏究, 日本農業機械學會誌, 36(2) pp. 213～220.
22. 小池正之, 甲中 孝, 1976, トラクタ フレームの構造强度に 關する 解析(第2報), 日本農業機械學會誌, 38(1), pp. 19～24.
23. 松尾昌樹外, 1970, バインダの 硏究(第1報) 日本農業機械學會誌, 32(1), pp. 36～42.

24. 手塚右門, 小中俊雄, 1961, 小型 ラクタ用 作業機の 牽引抵抗に 關する 硏究(第2報), 日本農業機械學會誌, 22(4), pp. 123~126.
25. 市川眞祐外, 1972, 田植機の 走行性について(第1報), 日本農業機械學會誌, 34(3), pp. 220~227.
26. 岩崎正美, 石原 昻, 1977, 引抜式 掘取機に 關する 硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 39(2), pp. 171~178.
27. 遠藤俊三外, 1973, トラクタの 振動と その 傳達特性(第2報), 日本農業機械學會誌, 35 (3), pp. 232~237.
28. 薗村光雄, 川村 登, 1965, 籾摺 ロールの 脫ぷ作用力に 關する 硏究(第2報), 日本農業機械學會誌, 22(3), pp. 103~106.
29. 伊藤信孝外, 1965, STP 添加時にねける 農用エンヅンオイルの 劣化に 關する 硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 36(4), pp. 469~483.
30. 伊藤信孝, 1974, 車輛用 タイヤゴムの まちつ係數測定 (1), 日本農業機械學會誌, 36(2), pp. 325~331.
31. 中尾清治, 1975, 車輪の 横すべりに 關する 硏究(第3報), 日本農業機械學會誌, 37(1), pp. 13~19.
32. 芝野保德, 1970, 小型 トラクタの 騷動性能に關する 硏究(第2報), 日本農業機械學會誌, 32 (2), pp. 87~95.
33. 柴田安雄, 坂井統, 1978, ロータリ 耕なた刃の 耕うん抗特性, 日本農業機械學會誌, 39(4), pp. 447~457.
34. 柴田安雄, 坂井 純, 1978, ロータリ耕 トラクタの 動特性に 關する 設計論的 硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 40(3), pp. 345~353.
35. 中馬 豊外, 1970, りんごの 衝撃加速度の 測定と群析, 日本農業機械學會誌, 32(1), pp. 47~52.
36. 中馬 豊外, 1969, 果菜類の 緩和 スペクトルの 測定, 日本農業機械學會誌, 31(2), pp. 47~54.
37. 創田和彦, 1978, 農用 運搬・運送手段 關する 硏究(第2)), 日本農業機械學會誌, 40(1), pp. 69~76.
38. 川村 登外, 1968, 籾の 脫粒性と米粒の 引張・壓縮强ちについて, 日本農業機械學會誌, 30(2), pp. 88~92.
39. 梅田重夫, 壽榮松正信, 1971, バインダの 結束に 關する 硏究(第1報), 日本農業機械學會誌, 32(4), pp. 289~295.
40. 川村 登, 洪 隆宜, 1966, 植物體の 壓縮・成形性 について(第1報), 日本農業機械學會誌, 28 (3), pp. 177~182.
41. 太田義信, 伴野達也, 1978, トラクタの 操縱性に 關する 硏究, 日本農業機械學會誌, 40(2), pp. 153~160.
42. 洪 隆宜, 川村 登, 1968, 植物體の 壓縮・成形について(第2報), 日本農業機械學會誌, 29(4), pp. 225~230.
43. Basken, K.E., *et al.*, 1977. Reducing the energy requirements of plant juice protein production, Transactions of ASAE, pp. 1050~1056.
44. Bosworth, D.L., *et al.*, 1966, Dynamic considerations for frail knives, Transactions of ASAE, pp. 777~781.
45. Burrough, D.E., 1953, Power and torque distribution in farm machine drive shafts, Agr. Engg. pp. 382~384.
46. Butler, J.L. and H.F. McColly, 1965, Strain gages determine pressure—displacement relationships, Agr. Engg. pp. 343~344.
47. Chen, P., *et al.*, 1977, A bulk compressibility tester for agricultural products, Transactions of ASAE, pp. 976~978.
48. Chung, C.J. *et al.*, 1977, Comminution parameters for wheat hardness measurement, Transactions of ASAE, pp. 375~379.
49. Gee—Clough, D. and W. Chancellor, 1976, Pull and lift characterstics of single lugs on rigid wheels in wet rice soils, Transactions of ASAE.
50. Cooper, W.D., 1978, Electronic instrumentation and measurement techniques, 2nd. ed. prentice—Hall, Inc. Englewood Cliffs, N.Y.
51. Cundiff, J.S. and C.W. Suggs, 1976, Analytical model for rigid body vibration of a hand—held chain saw. Part I. The gasoline engine, Transactions of ASAE, pp. 647~653.
52. Dahir, A.G. and B.A. Stout, 1965, Effect of liquid and dry ballast in pneumatic tires on stability of tractors of ASAE, pp. 135~137.

53. Dunlap, W.H. and J.A. Weber,1971, Compaction of an unsaturated soil under a general state of stress, Transaction of ASAE, pp. 601~607.

54. Erickson, L. and R.E. Garret, 1977, Crisphead lettuce response to uniform pressure application, Transaction of ASAE, pp. 42~51.

55. Finney, E.E. and K.H. Norris, 1968, Instrumentation for investigating dynamic mechanical properties of fruits and vegetables, Transactions of ASAE, pp. 94~97.

56. Fletcher, S.W., *et al.*, 1965, Mechanical behavior of selected fruits and vegetables under fast rates of loading, Transactions of ASAE, pp. 324~331.

57. Floyd, S. and Michael O'Brien, 1977, Continuous weighing using new techniques, Transactions of ASAE, pp. 534~546.

58. Gunkel, W.W. and A. Hosokawa, 1964, Laboatary device for measuring performance of granular pesticide applicators, Transactions of ASAE, pp. 1~5.

59. Halderson, J.L., 1966, Fundamental factors in mechanical cherry harvesting, Transactions of A AE, pp. 681~684.

60. Hegedus, E., 1955, Pressure distribution under rigidwheels, Transactions of ASAE, pp. 305~311.

61. Hendrick, J.G. and W.F. Buchele, 1963, Tillage energy ofa vibrating tillage tool, Transactions of ASAE, pp. 213~216.

62. Havanesian, J.D., 1964, A recording volumetric transducer, Agr. Engg. pp. 264~265.

63. Huang, B.K. and C.W. Suggs,1967, Vibration studies of tractor operations, Transactions of ASAE, pp. 451~454.

64. Ige, M.T. and M.F. Finner, 1976, Forage harvester knife response to cutting force, Transactions of ASAE, pp. 451~454.

65. Ige, M.T. and M.F. Finner,1976, Optimization of the performance of the cylinder type forage harvester cutterhead, Transactions of ASAE, pp. 455~460.

66. Johnson, C.E., *et al.*, 1977, A weighing system for field use, Transaction of ASAE, pp. 621~622.

67. Kellerby, J.D. and J.L. Smith, 1977, Mechanical manure harvesting from feedlots, Transactions of ASAE, pp. 1033~1036.

68. Lepori, W.A. and H.N. Stapleton, 1965, Event makers for use in field test measurements of power, Agr. Engg. pp. 572~573.

69. Liang, T. and C. Yung, 1965, Tranceducer for surface force measurement, Agr. Engg. pp. 688~691.

70. Liang, T. and C. Yung, 1966, A microscopic study of tractive performance of a lugged tire operating on sand, Transactions of ASAE, pp. 513~515.

71. Miller, P.C.H., 1977, The design and calibration of a torque tranceducer incorporated in a selective seedlingthinning mechanism, J. Agr. Engg. Res. pp. 321~325.

72. Mitchell, B.W. and R.M. Peart, 1968, Measuring apparent viscosity of organic slurries, Transactions of ASAE, pp. 523~525.

73. Mohan Rao, V.N. *et al.*, 1976, Dynamic structural properties of sweet potato, Transactions of ASAE, pp. 771~774.

74. Neuhoff, A.L., 1959, Measuring force in two or more members with one instrument, Agr. Engg. pp. 456~457.

75. Perry, C.C. and H.R. Lissner, 1962, The strain gage primer, 2nd Ed, McGraw-Hill Book Company, New York.

76. Peterson, M. and J.C. Frisby, 1969, A wind Tunnel to simulate weather conditions. Transactions of ASAE, pp. 456~459.

77. Pickett, L.K. *et al.*, 1969, Rheological properties of cornstalks subjected to transverse loading, Transactions of ASAE, pp. 392~396.

78. Price, D.R. and W.W. Gunkel, 1965, Measuring distribution patterns of granular applicators, Transactions of ASAE, pp. 423~425.

79. Prince, R.P. *et al.*, 1969, Shear stress and modulus of elasticity of selected forages, Transactions of ASAE, pp. 426~429.

80. Roming, B.E. and W.F. Miller, 1967, Deter-

mination and simulation of field machine vibrations, Transactions of ASAE, pp. 697~700.

81. Sharma, V.K. *et al.*, 1977, High frequency vibrational effects on soil—metal friction, Transactions of ASAE, pp. 46~51.
82. Sherman, C.H., 1947, Use of strain gages for farm equipment design, Agr. Engg. Nov. pp. 509~516.
83. Srivastava, A.K. *et al.*, 1976, Impact parameters related to physical damage to corn kernel, Transactions of ASAE, pp. 1147~1151.
84. Suggs, C.W. and W.E. Splinter, 1965, Mechanical properties of tobacco stalks, Transactions of ASAE, pp. 361~364.
85. Taylor, J.H., 1967, An annular shear device, Transactions of ASAE, pp. 793~800.
86. Totten, D.S. and L.C. Kaufman, 1971. Dynamic response of a clay soil to an oscillating subsoiler, Transactions of ASAE, pp. 793~800.
87. Verma, B.P. and J.G. Futral, 1976, A pressure transducer, Agr. Engg. pp. 38~39.
88. Wahla, M.T. *et al.*, Direct measurement of bond—slip in reinforced concrete, Transactions of ASAE, pp.762~767.
89. Wells, L.G. and R.W. Skaggs, 1977, Vertica drainage in field cores, Transaction of AS,AE pp. 79~84.
90. White, R.K. and N.N. Mohsein, 1967. Apparatus for determination of bulk modulus and compressibility of materials, Transactions of ASAE, pp. 670~671.
91. Williams, E.J. and I.J. Ross, 1968, vertical buttom pressures of confined stalks of dried citrus pulp, Transactions of ASAE, pp. 868~870.
92. Willits, D.H. and I.J. Ross, 1975, An automatic weighing system for use in drying studies, Transactions of ASAE, pp. 711~713.
93. Yaeger, E.C. and G.L. Pratt, 1977, Instrumentation for measurement of lateral and vertical pressures in potato storages, Transactions of ASAE, pp. 1189~1184.
94. Young, B.E. and C.W. Suggs, 1975, Roll and pitch investigations of off—road vehicles. Transactions of ASAE, pp. 841—44.
95. Zoerb, G.C., 1963, A Strain gage dynamometer for direct horsepower indication, Agr. Engg. Aug. pp. 434~435.