

米穀 常溫通風乾燥의 自動制御用 穀物 含水率 測定센서 開發*

Development of a Grain Moisture Content Measurement Sensor for Automatic Control of Rough Rice Drying by Natural Air

金 太 坤,* 張 東 日,* 金 滿 秀,* 金 太 均,** 洪 淳 昊***

T. K. Kim, D. L. Chang, M. S. Kim, T. K. Kim, S. H. Hong

Summary

This study was conducted to develop a grain moisture content measurement sensor for automatic control of rough rice drying by natural air. For the above objective, the electrode type sensor was designed and tested. The sensor was able to produce electrical resistance which changes with moisture content of grain.

An A/D converter and a micro-computer used for processing measurement data of sensor.

The developed sensor satisfied most design requirements and the results of statistical analysis show that there is no difference between the measurement method of sensor developed and of the dry-oven.

Using the developed sensor and measurement system, we are able to measure moisture content of rough rice automatically in drying by natural air.

1. 緒 論

농산물의 含水率은 작물의 수확과 저장 가능여부 뿐만 아니라 그 품질과 생산자의 소득을 결정하는 가장 중요한 요인중의 하나이다. 이제까지 여러 연구자의 연구결과에 따르면 우리나라의 諸般 여건상 火石燃料의 節減, 米穀의 品質向上등의 장점이 있는 常溫通風乾燥方法이 가장 적합한 米穀乾燥方法임을 알 수 있으나 이러한 상온통풍건조의 문제점 중의 하나는 곡물층 上·下에 따른 乾燥程度가 不均一한 점으로 이러한 불균일한 건조를 방지하기 위해서는 곡물전체의 혼합과 곡물층 전반에 걸친 週期的인 含水率測定이 필요하다고 생각되나¹⁾, 건조

시설의 구조상 含水율측정을 위한 試料採取에는 많은 어려움이 뒤따르게 된다. 특히 米穀 상온통풍건조의 自動制御를 위해서는 試料채취의 어려움을 극복할 수 있는 迅速하고 圓滑한 含水率測定裝置의開發이 필요하다고 생각된다.

곡물의 含水율 측정에는 비교적 많은 방법들이 있으나 상온통풍건조의 자동제어를 위해서는 含水율에 따른 곡물의 電氣抵抗特性 變化를 이용하여 間接的으로 含水율을 측정하는 방법이 적합하다고 생각된다. 그러나 電氣的인 방법은 操作의 簡單하고 測定速度가 빠른 반면 실제현상에서는 곡물의 전기 저항특성은 含水率 뿐만 아니라 다른 몇가지 要因에 의해 영향을 받는다는 측정상의 難點이 있어서

*本 研究는 韓國科學財團의 1987年度 研究費지원에 의해 수행되었음.

*忠南大學校 農科大學 農業機械工學科

**忠南大學校 工科大學 電子計算機工學科

***韓國標準研究所 精密計測機器센터 開發室

이런 요인들에 대한 정확한 補正이 무엇보다도 중요하다 하겠다.

Briggs는 1908년에 구리봉을 소맥이 담겨있는 용기에 설치하고 電壓을 가하여 소맥의 전기저항값을 측정하고 소맥의 含水率과 電氣抵抗값 사이에는 지수 函數 關係가 있다는 것을 발표하여 처음으로 곡물의 含水率에 따른 전기저항의 변화를 이용한 含水率測定이 가능하다는 것을 보고하였다.⁽¹⁴⁾

Gough⁽⁷⁾는 散物狀態의 곡물내부에 電極을 설치하여 含水率의 遠隔測定의 정확성을 조사하였고, Waldie⁽¹¹⁾ 등은 실험결과 電氣抵抗式 센서도 목화씨앗의 乾燥 및 選別시스템의 처리량 조절을 위한 含水率 測定用센서로 쓰일 수 있다고 하였으며, 실험결과 오븐건조방법과의 오차는 3.3% 이내 였다고 보고하였다.

일반적으로 生物體에서는 含水率에 따라 고유저항이 크게 달라지는 경향이 있다. 즉 含水率이 낮아질수록 고유저항이 커져서 전체적인 抵抗값은 증가한다.

農産物과 같은 흡습성물질의 전기적 특성은 靜電氣容量 C_x 와 電氣抵抗 R_x 가 병렬로 연결된 等價回路로 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

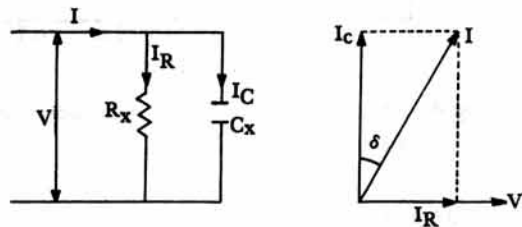


Fig. 1. Equilibrium circuit.

한편 곡물의 含水率 MC와 固有抵抗 ρ 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\log \rho = -aMC + c \dots \dots \dots (1)$$

여기서, a, c=시료의 종류, 온도, 측정시 가하는 압력등에 따라 결정되는 상수

실제측정에 있어서 곡물의 전기저항값은 含水率, 散物密度, 穀物の 溫度, 入力電壓의 크기와 極板間隔등에 따라 변하며 入力電壓의 크기와 極板間隔등을 고정한다면 곡물의 저항값은 含水率, 散物密度, 溫度의 함수로 표시된다. ^(14, 15, 16)

Buksi등은 1960년 소맥을 재료로 含水率에 따른

전기저항값의 변화를 측정한 실험에서 含水率을 8.75%~26.9%, 퇴적깊이를 0.5cm~2.0cm, 곡물에 가한 荷重을 $5 \text{ kg/cm}^2 \sim 15 \text{ kg/cm}^2$ 으로 각각 변화시켰을 때 측정된 저항값은 $39 \text{ K}\Omega \sim 875 \text{ M}\Omega$ 의 범위였으며, 含水率과 荷重이 증가할수록 저항값은 감소하였고, 퇴적깊이가 증가하면 저항값도 증가하는 현상을 나타냈다. Gough⁽⁷⁾의 실험에서는 곡물의 含水率을 10%~20%로 변화시켰을 때 저항값의 범위는 $100 \text{ K}\Omega \sim 1,000 \text{ M}\Omega$ 정도라고 했고 곡물의 含水率과 전기저항값은 指數函數 關係가 있다고 보고하였다. Mori⁽⁸⁾는 벼 및 보리에 대하여 含水率, 荷重, 溫度, 電極間隔, 入力電壓, 測定時間등을 변화시켰을 때 이에 따르는 電氣의 特性的 변화를 규명하였다.

본 연구에서는 米穀 常溫通風乾燥의 自動制御를 위한 전기저항식 含水率 測定센서의 開發을 그 목표로 하였으며, 그 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 1) 측정이론을 基礎로 함수를 측정센서의 形象과 設置方法을 設計하고,
- 2) 常溫通風乾燥中の 벼의 含水率을 측정하여 개발된 센서의 性能試驗을 실시한다.

2. 材料 및 方法

가. 센서 設計基準

상온통풍건조에 이용될 수 있으며 同時에 多測點의 測定이 가능하도록 하고, 測定所要時間을 짧게 하며, 構造 및 操作을 簡單하게 하는데 역점을 두어 다음과 같은 기준에 의하여 설계하였다.

- 1) 벼의 생탈곡에서 수매까지의 含水率을 고려하여 15%~25% (w. b.) 범위의 측정이 가능하게 한다.
- 2) 원하는 시간에 圓滑한 測定이 이루어지며, 시간의 흐름에 따른 오차를 줄이기 위해 가능한 짧은 시간내에 측정이 완료되도록 한다.
- 3) 同時에 三測點이상의 함수율측정이 가능하도록 설계한다.
- 4) 표준방법과 비교하여 가능한 誤差가 $\pm 3\%$ 이내가 되도록 한다.
- 5) 센서의 재료는 국내 조달 가능품을 이용하여 제작한다.

나. 센서設計

Mori⁽⁶⁾는 電極間隔에 따른 穀物의 電氣抵抗 變化를 규명하였는 바, 그의 실험결과 전극간격이 1cm 일 경우는 측정결과가 불량하였고, 2cm 이상에서는 전극간의 간격과 측정된 저항값 사이에 별다른 차이가 없다고 하였다.

電極面積에 관한 연구는 거의 없었으며, 전극면적을 고정시켜 실험한 내용이 대부분 이었다. 본 연구에서는 곡물의 전기저항 측정센서의材質은 구리로 하였으며, 形象을 決定하기 위한 실험결과 전극간

격이 2cm 이상에서는 곡물의 전기 저항값이 200M Ω 이상으로 함수율계측을 위해서는 너무 큰값이어서 현재 국내에서 생산되고 있는 利用可能한 PVC와 이프의 가장 작은 직경치수를 기준으로 하여 전극간격을 1.8cm로 고정하고, 電極面積을 15cm², 20cm², 30cm², 含水率을 15%~25% (w. b.)로 변화시켜가면서 荷重을 가하지 않은 상태에서 퇴적깊이 10cm인 곡물내부에 전극을 설치하여 실험한 결과 전극면적이 작아질수록 측정 저항값은 커지나 면적이 20cm² 일때 測定精度가 가장 좋았다. Fig. 2와 Fig. 3 에는 각각 극판면적에 따른 저항값의 변화와 개발된 센서의 저항측정실험 결과를 나타냈으며, Fig. 4 에는 하중을 가했을때 극판에 작용하는 하중에 대한

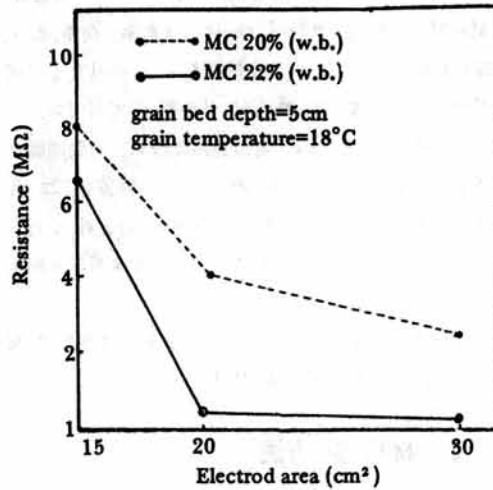


Fig. 2. Effect of electrode area of sensor on electrical resistance of grain.

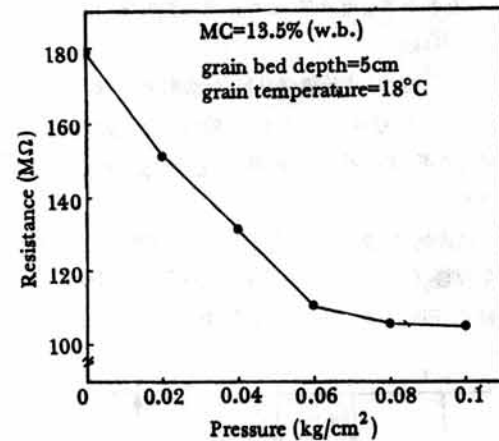


Fig. 4. Effect of pressure of rice upon sensor on electrical resistance of grain.

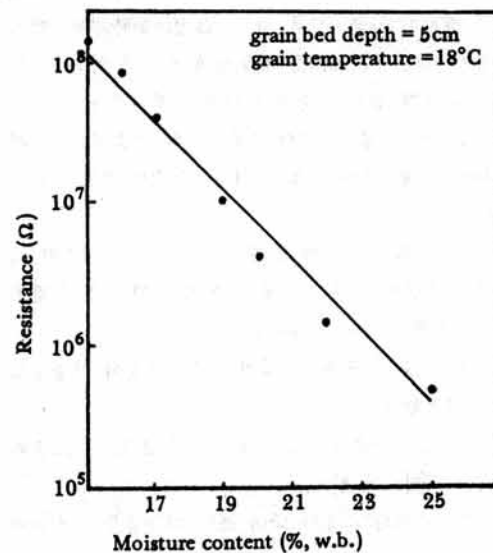


Fig. 3. Effect of moisture content on electrical resistance of grain.

저항값의 변화를 표시했다.

Fig. 3에서 보면 개발된 센서를 이용하여 측정된 저항값도 이미 발표된 연구결과^(7,8)와 같이 穀物의 含水率과 지수 函數의 관계가 있었으며, 함수율 15%~25%일때 저항값은 150.07M Ω ~0.476M Ω 범위로 Gough⁽⁷⁾의 실험범위를 만족했다. 荷重에 대한 실험에서도 Mori⁽⁶⁾의 실험결과와 같이 荷重을 增加시킬수록 곡물의 전기저항은 減少하였다. 이상의 실험결과에 의해 설계된 含水率 測定센서의 규격은 Fig. 5와 같다.

다. 센서의 性能試驗方法

1) 센서를 이용한 米穀의 含水率測定시스템設計
본 연구에서는 함수율계측을 위하여 함수율에 따

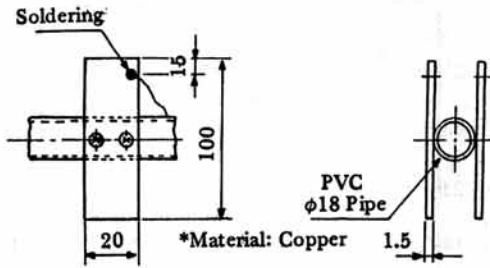


Fig. 5. Specification of moisture sensor.

른 電氣抵抗의 變化를 측정하여 間接的으로 含水率을 測定하는 方法을 채택하였으며, 그 이유는 다음과 같다.

가) 同時에 여러지점의 測定과 이의 분석을 위한 컴퓨터 인터페이스 (computer interfacing)이 비교적 쉽고,

나) 상온통풍건조의 자동제어를 위한 遠隔測定이 가능하며,

다) 곡물의 誘電特性을 이용하는 方法에 비해 調整 (adjustment)이 쉽고 構造가 簡單하여 自動計測 및 制御시스템에 適用하기에 유리하다.

본 연구에는 "APPLE II Plus" 기종의 마이크로컴퓨터와 변환소자로 ADC0817을 사용한 8 bit의 분해능을 갖는 A/D변환기를 이용하였다.

함수율 계측을 위한 회로도는 Fig. 6와 같으며, 회로에서 R_1 은 건조빈 내부에 설치된 곡물의 전기 저항 측정센서의 極板사이에서 充填되어 있는 곡물의

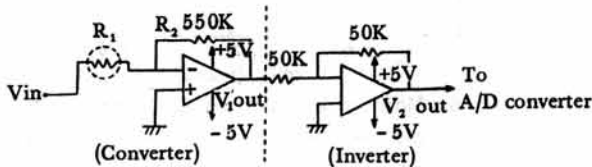


Fig. 6. Circuit diagram of moisture content measurement by sensor developed.

저항이고 R_2 는 증폭조정저항이다.

함수율 15%로 건조된 벼의 저항은 거의 $\infty \Omega$ 이고, 25%이상에서는 벼의 저항이 $500K\Omega$ 이하이므로 벼의 함수율에 따른 出力電壓은 수mV에서 +5V까지 변하게 된다. 이 출력값은 A/D변환기에 의해 0~255의 디지털값으로 바뀐다.

2) 測度設定

곡물의 전기저항값을 변화시키는 요인은 함수率뿐만 아니라 溫度, 散物密度등이 複合的으로 영향을 미친다. 본 연구에서는 예비실험을 통하여 溫度, 散物密度, 함수率의 變化를 同時에 測定하고, 이의 變化에 따른 곡물의 전기저항값을 측정한 결과 곡물퇴적층의 一定한 位置에서는 散物密度의 變化가 무시할 수 있을 정도로 작았기 때문에 溫度와 電氣抵抗값을 獨立變數로 하고, 함수率을 從屬變數로 하는 回歸方程式을 구하여 함수率計測의 測度로 設定하였다.

회귀분석 결과 A/D변환기 출력값을 2배로 증폭한 값의 자연대수 (natural log)에 대하여 함수率과 穀物溫度의 1次項, 이들의 交互作用項으로 표시하였을 때의 回歸方程式은 (3)식과 같은 模型으로 표시되었으며, Table 1에는 곡물퇴적깊이 10cm, 45cm, 80cm에 각각 설치되어 있는 센서의 回歸式을 나타냈다.

$$\ln(V) = a_0 + a_1(MC) + a_2(T) + a_3(MC \cdot T) \dots (2)$$

여기서, MC=곡물의 함수率, % (w. b.)

T=곡물의 溫度, $^{\circ}C$

V=함수率에 따른 A/D변환기 출력값
(1 \approx 0.01V)

a_0, a_1, a_2, a_3 =回歸常數

3) 컴퓨터 프로그램

함수率測定을 위한 컴퓨터 프로그램을 開發하였으며, 主 프로그램은 베이직언어를 사용하여 작성

Table 5. Regression equations of the voltage as a function of moisture content and temperature

Model Position	$\ln(V) = a_0 + a_1(MC) + a_2(T) + a_3(MC \cdot T)$				R^2
	a_0	a_1	a_2	a_3	
Top	0.7884	0.0887	-0.2867	0.02	0.9432
Medium	5.054	-0.0942	-0.5165	0.031	0.9626
Bottom	16.1994	-0.7204	-1.3223	0.0782	0.9051

하였고, 각 센서로부터 A/D변환기를 통하여 측정값을 읽어들이는 프로그램은 기계어(machine language)를 이용하여 작성하였다. 측정값들은 건조빈의 퇴적깊이 10cm, 45cm, 80cm에서 1시간 간격으로 수집되도록 하였으며, 수집간격은 프로그램상에서 조절할 수 있도록 하였다.

4) 實驗設計 및 評價方法

본실험 시작전 함수율이 22%정도로 조절된 50kg의 공시벼를 한개의 건조빈에 채우고 최상층부의 함수율이 15%에 이를때까지 건조하고 豫備實驗을 실시하여 센서의 測度를 設定하고, 適正動作과 安全性을 검토한 후 未備點을 補完하여 본실험을 수행하였다.

본실험은 개발된 계측시스템의 正確性을 조사하기 위해 개발된 함수율 측정센서를 이용한 컴퓨터에 의한 측정과 기존의 오븐건조법(105℃,24시간)⁴⁾에 의해 한개의 건조빈에서 同時에 測定하였다.

본실험은 다음과 같이 실시하였다.

- 1) 공시벼 : 일반계 1 품종(아까바래)
- 2) 실험기간 : 약 30일간
- 3) 실험건조량 : 50kg

건조빈은 두께, 직경, 높이가 각각 0.2cm, 36cm, 140cm인 鐵製圓筒으로 30cm높이에 눈의 크기가 0.2cm인 철망을 설치하였다. 건조빈의 벽면에서 철망으로 부터 각각 10cm, 45cm, 80cm높이에 시료채취를 위한 試料採取口를 만들었고, 건조빈의 중앙에는 같은 높이에 직경 1.8cm인 플라스틱 파이프를 이용하여 개발된 함수율 측정센서를 설치하여 穀物堆積層깊이에 따른 含水率을 측정할 수 있게 하였다. 이와같이 제작된 건조빈의 곡물퇴적깊이와 부피는 각각 90cm, 0.09m³이었다. 건조빈에 공급되는 送風量은 張⁵⁾등의 연구결과에 따라 손실을 고려하여 약 6 m³ / min-t이 되도록 하였다.

한편 개발된 함수율 측정센서를 이용한 함수율측정을 위해 오븐건조방법과 개발된 센서를 이용한 측정방법과의 방법간의 차이를 t-檢定 통계방법으로 分析하였다.

4. 結果 및 考察

開發된 含水率 計測센서의 性能分析을 위해 개발된 센서를 이용한 컴퓨터에 의한 측정과 오븐건조방법(105℃, 24시간)에 의해 한개의 건조빈에서 동

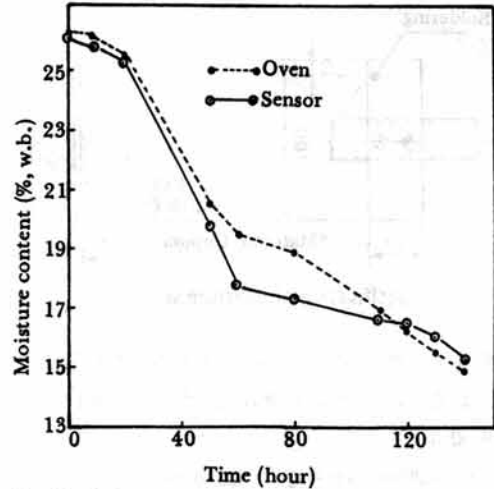


Fig. 7. Moisture measurement data measured by dry-oven method and sensor developed of top layer.

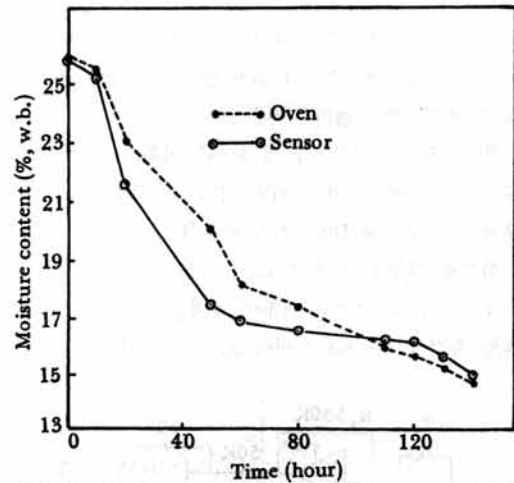


Fig. 8. Moisture measurement data measured by dry-oven method and sensor developed of medium layer.

시에 含水率을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 7, 8, 9에 나타냈다. 그림에서 보면 개발된 센서를 이용한 함수율 측정값이 오븐건조방법에 의한 측정값에 비해 건조초기에 낮게, 건조후기에 높게 나타났는데, 이 경향은 穀物表面의 水分含量에 의해 측정값이 크게 영향을 받는 電氣抵抗式 測定方法의 특징이라 할 수 있다.^{8,10)}

즉, 건조초기에는 곡물표면의 수분이 제거되기 때문에 전기저항식 측정법은 곡물전체의 수분함량을

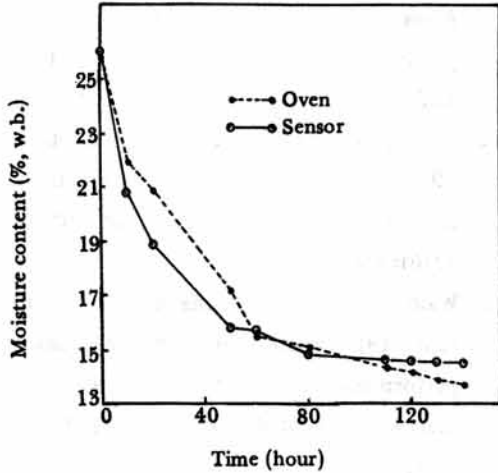


Fig. 9. Moisture measurement data measured by dry-oven method and sensor developed of bottom layer.

측정하는 오븐건조방법에 비해 상대적으로 측정값이 작게 나타나며, 건조후기에는 곡물 내·외의 수분의 양이 어느정도 均衡을 이루므로 센서를 이용하여 계측한 값과 오븐건조방법에 의한 측정값간의 誤差가 비교적 작았다. 오븐건조방법과 센서를 이용한 함수율 계측값간의 차는 -3%~+1%의 범위를 나타냈으며, 비교적 表面水가 신속히 제거되는 곡물퇴적깊이 80cm에 설치되어 있는 센서의 계측값이 오차가 가장 작게 나타났다.

오븐건조방법과 개발된 센서를 이용한 계측방법과의 方法間의 差異를 檢定하기 위해 Fig. 7, 8, 9의 자료를 이용하여 t-檢定을 해본 결과 5% 有意水準에서 함수율 계측방법간의 차이는 없다고 분석되었다.

한편, 센서의 설계기준을 고려하여 볼때 개발된 센서는 대체로 설계기준을 만족하였으며, 그 구조도 두개의 자항으로 되어있는 간단한 구조이고, 측정소요 시간도 40초 정도로 비교적 짧은 시간에 측정이 이루어 진다고 할 수 있으며, 원하는 시간에 측정이 될 수 있도록 컴퓨터 프로그램상에서 측정시간 조절이 가능하도록 하였다. 또한 센서의 수와 계측시스템의 조정장치의 수를 증가시킨다면 3측점 이상의 계측도 가능하며, 전체 시스템에 사용된 부품들도 국내에서 손쉽게 구할 수 있는 것들 이었다. 측정가능한 含水率범위 및 오차범위도 각각 15%~25%, -3%~+1%로 설계기준을 만족하였다.

5. 結論

본 연구는 米穀 常溫通風乾燥의 自動制御를 위한 穀物含水率 測定센서의 開發을 위해서 수행되었다. 이를 위하여 함수율에 따라 변하는 곡물의 電氣抵抗을 측정할 수 있는 電極形 含水率 測定센서를 개발하였고, 측정자료의 분석을 위하여 A/D변환기와 마이크로컴퓨터를 이용하였다.

위와같은 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

1) 개발된 센서의 材料는 구리판으로 가로, 세로, 두께, 면적은 각각 10cm, 2cm, 0.15cm, 20cm² 이었다.

2) 개발된 센서를 이용하여 측정한 곡물의 電氣抵抗값은 곡물의 含水率과 로그(log)函數 關係가 있었다.

3) 개발된 함수율 측정센서는 설계조건을 充足했으며, 개발된 센서를 사용한 컴퓨터에 의한 含水率 測定값과 오븐건조방법을 이용한 측정값과의 오차범위는 -3%~+1%였으며, 두 방법간의 차이는 없는것으로 分析되었다.

4) 개발된 함수율 측정센서 및 시스템을 이용하여 常溫通風乾燥를 하는 벼의 含水率을 自動測定할 수 있었다.

參考文獻

1. 류관희 외 4인. 1987. 계측 및 마이크로 컴퓨터 활용기술. 한국농업기계학회
2. 센서 인터페이스 No.1. 1986. 기전연구사
3. 윤문숙 외 1인. 1983. APPLE조종법 입문. 청명출판사
4. A.A.C.C. 1962. Cereal Laboratory Methods, 7th ed. Am. Associ. of Cereal Chemists. St. Paul, Minn.
5. Brooker, D.B., F.W. Bakker-Arkema and C.W. Hall, 1974. Drying Cereal Grains, AVI publishing Co., Westport, Conn.
6. Chang, D.I., D.S. Chung and C.L. Hwang. 1983. Nonlinear goal programming for optimizing rice conditioning and storage systems: part I - Modeling. The Journal

- of the KSAM. 8(2): 69-85.
7. Gough, M.C. 1980. Evaluation of a remote moisture sensor for bulk grain. J. Agric. Engng. Res. 25: 339-344.
 8. Mori, K. 1970. The moisture meter of grain for drying control (1) - The factors which influence detector current. J. Soc. Agri. Machinery, Japan. 32(4): 306-321.
 9. Nelson, S.D. 1973. Electrical properties of agricultural products - A critical review. Trans. of the ASAE. 16(2): 384-400.
 10. Nelson, S.O. 1982. Factors affecting the dielectric properties of grain. Trans. of the ASAE 25(4): 1045-1049, 1956.
 11. Suh, S.R., S.K. Lee and Y.W. Kim, 1977. Plans to improve grain drying method. J. Gyeongsang Nat. Univ. No. 16: 165-172.
 12. Thompson, D.R. and Zachariah, G.L. 1970. Dielectric theory and bioelectrical measurements. Trans. of the ASAE 13(6): 891-899.
 13. Waldie, S.E., S.E. Hughs and M.N. Gilum. 1984. Electronic moisture sensor performance in commercial gin environments. Trans. of the ASAE 27(5): 1600-1602.
 14. Young, J.H. 1983. Moisture instrumentation and measurement for environmental sciences. ASAE. Special publication 13-82: 7-01-8-10.



學位取得

姓名：崔相寅
生年月日：1934年 8月 25日
取得學位名：工學博士
學位授與大學：嶺南大學校 大學院
學位取得年月日：1988年 8月 27日
學位論文：LASER 干涉法에 依한 應力擴大係數 測定에 關한 研究
(A Study on the Measurement of Stress Intensity Factor by Laser Interferometry method)
勤務處：尚州農業專門大學 農業機械科