

저주파 임피던스를 이용한 벼의 함수율 측정장치 개발

정창호 · 조성인 · 김기복 · 박영식

서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

Development of Moisture Meter for Paddy Rice Using Electrical Impedance

Chang Ho Chung, Seong In Cho, Ki Bok Kim and Young Sik Park

Department of Agricultural Machinery Engineering,
College of Agriculture and Life Science, Seoul National University

Abstract

This study was carried out to develop a moisture content(MC) meter using electrical impedance at 1kHz. The MC meter measures phase-shift with specially designed electrode and electrical circuit. Moisture content was estimated from the phase-shift using relationships between moisture content and phase-shift. Correlation models were acquired by regressing the moisture content measured by oven-dry method, on the phase-shift measured by the MC meter. The result implied that precise moisture measurement with a large sample can be possible in a short time using electrical impedance at low frequency.

Key words: moisture content, rice, impedance, phase-shift

서 론

최근까지의 농업기계화 노력으로 우리 나라는 상당히 높은 수준의 기계화를 이루었다. 그러나 이러한 기계화 노력의 대부분이 파종에서 수확까지의 포장작업에 치우쳐져 수확 후 작업은 상대적으로 취약한 것이 사실이다. 수확 후 작업은 곡물의 상품가치를 높이는 과정으로 그 중요도가 높아지고 있다. 정부에서도 미질의 향상과 유통구조의 개선 등을 위하여 미곡종합처리시설을 설치하고 그 수를 계속 늘려 나가고 있다. 또한 농촌노동력 부족을 해소하고, 생산비를 절감하기 위하여 시설의 자동화를 추진하고 있다. 이러한 시설에서 높은 정확도를 갖는 자동화를 요하는 분야 중의 하나가 곡물의 품질을 판별하는 장치이다. 곡물의 함수율은 장기간의 저장 가능 여부, 최대 도정수율을 판단하는 지표일 뿐 아니라, 원료의 가격을 결정하는 기준이 되기 때문에, 곡물의 함수율을 측정하는 장치는 매우 중요한 부분을 차지한다. 현재 국내의 함수율 측정 기술은 외국의 기기를 모방하는 수준에 머물고

있으며, 대부분 수입되어 사용되고 있다. 따라서 국내에서 재배되고 있는 품종에 가장 적합한 함수율 측정 장치의 개발이 시급하게 요구되고 있다.

국내·외에서의 함수율 측정장치의 연구는 오래 전부터 진행되어 왔는데, 특별히 저주파수대를 이용한 함수율 측정연구는 다음과 같다. White와 Matin (1971)은 1, 10, 100 kHz의 주파수에서 감자를 대상으로 하여 임피던스를 측정하였으며, 각 주파수에서의 임피던스와 온도가 임피던스에 미치는 영향을 평가하였다. 그는 주파수를 1 kHz에서 500 kHz까지 증가시키면서 임피던스와 위상차를 측정함으로써 임피던스가 품종과 작물의 상태 및 온도에 따라 그 값이 변화하며, 특별히 온도상승에 따라 임피던스가 증가한다고 보고하였다. Stetson과 Nelson (1972)은 가청주파수대에서 곡물을 대상으로 유전 특성을 규명하였다. 그는 저주파수에서의 유전상수와 손실계수가 고주파수(1~50 MHz)보다 더 크다고 보고하였으며, 밀을 대상으로 실험하였을 때, 함수율의 증가에 따라 유전상수와 손실계수가 지수함수적으로 증가한다고 보고하였다. Nelson과 Stetson (1975)은 250 Hz에서 12 GHz의 주파수 범위에서의 곡물을 대상으로 유전상수, 손실계수, 손실탄젠트 및 전도도에 대한 실험을 하였다. 각

주파수에서의 측정을 통하여 유전상수, loss factor 및 loss tangent는 주파수의 증가에 따라 그 값이 대체로 감소하였으나, 전도도는 주파수의 증가에 따라 증가한다고 보고하였다. 국내에서의 연구로는 김우택(1988), 김기복(1997)은 곡류의 고주파 유전특성을 이용한 온라인 함수율 측정장치에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 온라인 상태에서 결정계수의 값이 0.98이상의 높은 정확도를 가졌다고 보고하였다.

상기 내용들을 고려하여 교류전원을 함수율 측정기에 이용할 경우 곡류 내부의 임피던스에 의해 발생하는 위상차는 저항과 리액턴스(커패시턴스, 용량)의 비로 표현되기 때문에 곡물의 함수율에 따른 저항과 용량을 동시에 포함할 것으로 생각되어, 위상검출 회로를 이용하여 함수율 측정에 이용하고자 하였다.

따라서 본 연구의 목적은 저주파(1 kHz)에서 곡물의 임피던스 변화에 따른 위상변화를 검출한 다음 손쉽게 함수율로 변환할 수 있도록 마이크로프로세서 및 저렴한 TTL소자들을 이용하여 함수율 측정장치를 개발하고자 하는 데 있으며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 1) 저주파(1 kHz)에서 비의 함수율에 따른 위상변화를 검출하기 위한 회로를 개발하고
- 2) 개발된 위상검출 회로와 마이크로 프로세서를 이용한 함수율 측정장치를 개발하며
- 3) 이를 이용하여 수분밀도를 이용한 함수율 측정의 가능성을 제시한다.

재료 및 방법

공시재료

실험에 사용된 품종은 단립종으로서, 일반적으로 국내에서 많이 재배되고 있는 화성품종을 선택하여 샘플을 제작하였다. 비의 초기 함수율이 13%내외로 낮아 함수율이 높은 비를 만들기 위해 물을 가수하여 함수율을 높였으며, 함수율이 비 전체에 걸쳐 고르게 분포되도록 4°C의 저온저장고에 2주 이상 보관하여 전체적으로 함수율 평형이 이루어도록 하였다.

비의 함수율 측정 방법은 농산물 검사소 표준방법을 채택하였다. 각 함수율에서 5 g 샘플을 3개씩 선정한 후 분쇄하여, 105°C에서 5시간 건조한 후 습기기준 함수율 방법을 이용하였다. 3개의 샘플의 함수율을 평균하여 각 샘플의 함수율로 이용하였다. 이때의 비 함수율의 분포는 13~28%까지 고르게 분포되었다. 여기서 곡류의 온도는 주위온도(20~24°C)와 같게 유지하여 실험하였다.

전극판 설계

정전용량은 평행판이든지 원통형이든지 상관없이 두 극판 사이에 존재하는 대상물의 유전적인 특성에서 얻어진다. 일반적으로 농산물측정에서 정전용량은 두 개의 극판을 이용하는 것이 일반적이며, 이때 전극판은 Fig. 1에서와 같이 전기적으로 저항과 콘덴서의 병렬회로로 표현될 수 있다.

이 전극판에 교류전원만이 공급될 때는 저항값만의 변화를 측정하나, 교류전원 공급시 저항값과 정전용량의 변화를 측정하게 된다. 이때의 정전용량은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \tag{1}$$

- 여기서, C=정전용량[F]
- ϵ_0 =공기의유전율[8.854×10^{-12} F/m]
- ϵ_r =상대유전율
- A=극판의 단면적[m²]
- d=극판사이의 거리[m]

전극판에 교류전압이 인가될 때 병렬회로에 대한 전체 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$Z = \frac{R X_c}{\sqrt{R^2 + X_c^2}} \tag{2}$$

- 여기서, $X_c = \frac{1}{2\pi f C}$
- Z=임피던스, f=주파수[Hz]
- C=정전용량[F], R=저항[Ω]

또한 교류가 전극판을 통과할 때 전극판의 저항과 콘덴서에 의해 위상차가 발생하며 다음 식 (3)에 의해 계산된다.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{R}{X_c} \right) \tag{3}$$

여기서, θ =위상차

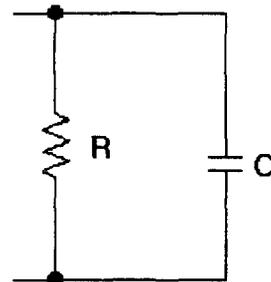


Fig. 1. Representation of equivalent parallel circuit for electrode.

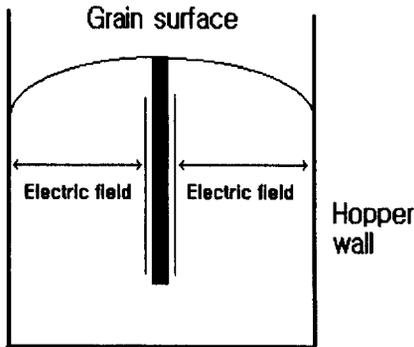


Fig. 2. View of hopper scale.

상기 식 (3)에서 나타난 바와 같이 함수율 변화에 따라 임피던스 항들의 각 인자들 즉, 용량 및 저항은 함수율에 밀접한 관련이 있기 때문에, 이들의 비로 나타나는 위상변화를 이용할 경우 함수율 측정이 가능할 것으로 생각된다.

함수율을 측정하기 위한 전극판은 적용대상 및 그 크기에 따라 여러 가지 형상 및 치수로 제작할 수 있으나, 본 연구에서는 간이용 소형 호퍼를 제작하였다. 호퍼에서 측정 가능한 샘플의 질량은 대략 400 g 정도이며, 제작된 호퍼 내에 설치된 전극판은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 중앙에 위치하여 한 극을 이루고, 다른 전극은 호퍼의 좌우 외벽을 이용하여 함수율 측정 센서부를 구성하였다.

위상측정 회로

위상차는 전극판에 샘플이 투입될 때 전극판 사이에 정전용량의 변화와 저항의 변화에 따라 발생된다. 위상이 변화된 신호는 증폭된 후 기준신호와 같이 schmitt trigger를 통과하여 TTL 수준의 디지털 신호로 변환된다. TTL 수준으로 변환된 기준신호와 출력신호를 AND 연산하면 입력이 'high'인 구간만 출력되는데, 이 신호는 함수율의 변화에 선형적으로 비례하게 되어 함수율 측정이 가능하다. 따라서 이러한 함수율에 따른 TTL신호를 마이크로 프로세서에 입력하여 함수율 검출에 이용하였다.

마이크로 프로세서를 이용하여 개발된 함수율 측정 장치의 개요도는 Fig. 3에서 보는 바와 같다.

마이크로프로세서를 이용한 제어보드는 기준신호를 발생하고 증폭하는 부분과 이를 기준신호로 출력신호와 비교, 위상검출하는 부분, 위상차를 입력받은 후 변환하여 함수율을 내부에서 계산하고 온도를 보상하여 출력하는 부분으로 구성되었다.

기준신호 발생회로는 안정적인 신호원을 발생시키

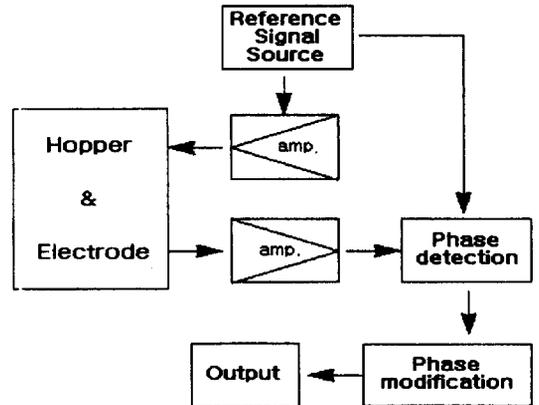


Fig. 3. Block diagram of the phase shift measurement system.

도록 수정발진자를 이용하여 기준 주파수를 발생시킨 후 필터를 이용하여 온도변화에 안정적인 sine파 신호를 발생시켰다. 따라서 신호원을 변경하더라도 고주파에서도 안정적인 신호원으로 사용될 수 있도록 제작되었다.

함수율측정을 위한 제어 및 출력은 8751 원칩 마이크로 프로세서를 이용하였으며, 출력신호는 7-segment를 이용하여 출력하도록 구성하였다. 함수율측정을 위한 제어 프로그램은 연속적이고 반복적으로 함수율 값을 측정할 수 있도록 프로그램되어 있다.

결과 및 고찰

구성된 장치를 이용하여 벼의 함수율을 측정하였다. 샘플은 호퍼내에 있는 전극판을 완전히 덮을 수 있는 분량을 투입한 후, 산물 밀도의 변동을 최소화하였으며 산물밀도는 저밀도와 고밀도의 두 그룹으로 분류하여 각각에 대하여 위상차와 함수율의 관계를 분석하였다.

저밀도에서의 함수율 측정

호퍼에 300 g 정도의 샘플을 넣은 후 위상의 변화를 관찰하였다. Fig. 4에서와 같이 함수율이 증가함에 따라 위상이 감소하는 경향을 나타내었으며, 3차 회귀방정식을 구하였을 때 결정계수는 0.990로 가장 높은 값을 나타내었다. 한편 Fig. 5는 매회의 실험시 호퍼 내에 존재하는 벼의 충전밀도가 다르기 때문에, 밀도에 따른 차이를 보정하기 위하여 김기복(1997)이 제시한 수분밀도값을 구한 후 이것을 위상차와 비교한 결과로 수분밀도의 증가에 따라서 위상이 감소하였으며,

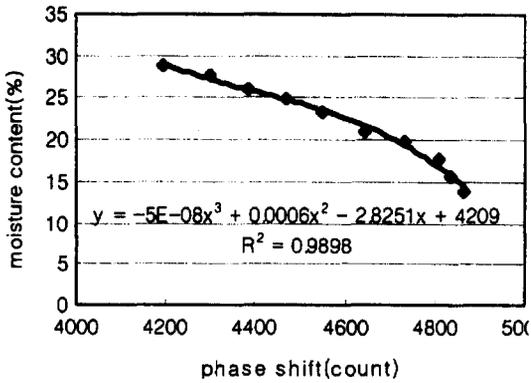


Fig. 4. Relationship between phase shift and moisture content at low density.

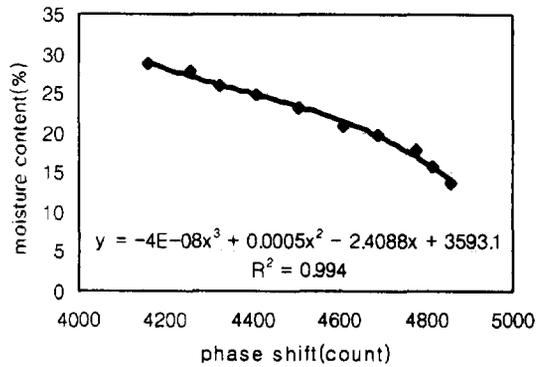


Fig. 6. Relationship between phase shift and moisture content at high density.

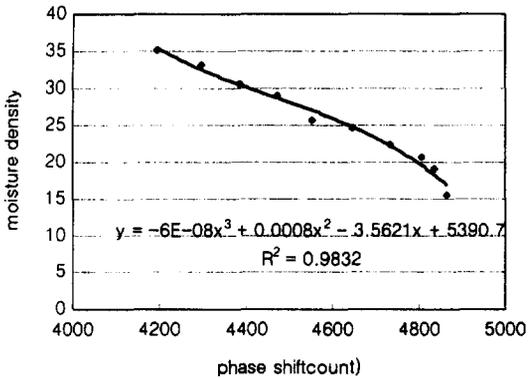


Fig. 5. Relationship between phase shift and moisture density at low density.

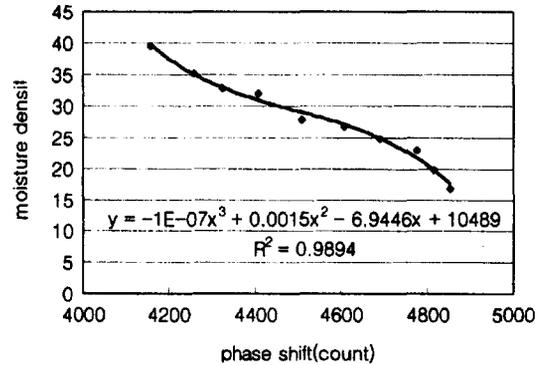


Fig. 7. Relationship between phase shift and moisture density at high density.

결정계수는 0.983로 나타났다.

고밀도에서의 함수율 측정

호퍼에 400 g 정도의 샘플을 넣은 후, 위상의 변화를 관찰하였다. 호퍼에 샘플이 투입된 후, 호퍼에 일정한 충격을 가함으로 호퍼에 투입되는 양을 조절하여 밀도를 증가시켰다. 높은 밀도에서도 Fig. 6과 같이 함수율이 증가함에 따라 위상이 감소하는 경향을 나타내었으며, 수분밀도를 이용하여 측정하였을 때도 동일하게 수분밀도가 증가함에 따라 위상이 감소하였다. 이 때 각각의 결정계수는 0.994, 0.990으로 높게 나타나 정확한 함수율 측정이 가능한 것으로 판단되었다.

수분밀도를 이용한 함수율 보정

호퍼에 들어가는 곡물의 양과 그 밀도는 임의적이므로, 밀도보정을 하여야 한다. 호퍼내의 밀도를 측정하기 위해서 질량을 측정하였다. Fig. 8은 수분밀도를

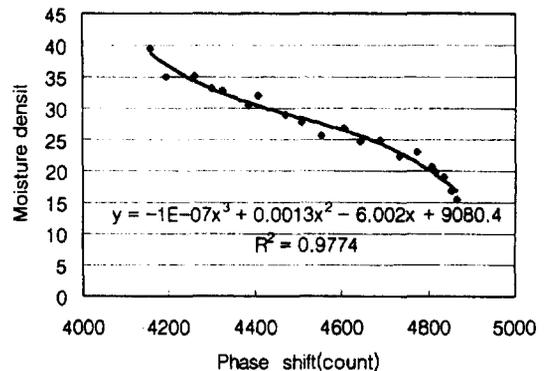


Fig. 8. Relationship between phase shift and moisture density.

이용하여 저밀도의 데이터와 고밀도의 데이터를 함께 나타내었으며, 그림에서와 같이 결정계수의 값이 0.977, SEC값이 0.719%로 나타나 수분밀도를 이용한 밀도보정의 가능성을 확인할 수 있었다.

요약 및 결론

본 연구는 저주파 임피던스를 이용한 함수율 측정 장치를 개발하기 위하여 수행되었다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 기초실험장치를 구성하고, 함수율에 따른 위상차를 측정함으로써 저주파 임피던스를 이용한 함수율 측정의 가능성을 검증하였으며, 마이크로 프로세서를 이용하여 실제 장치를 구성하고, 시료의 함수율을 측정함으로써 그 성능을 평가하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 1 kHz에서의 함수율 변화에 따른 위상변화를 검출하기 위한 회로를 개발하였으며, 마이크로 프로세서를 이용한 함수율 측정 장치를 개발하였다.

2) 개발된 함수율 측정 장치를 이용하여 함수율 측정 가능성을 검토한 결과, 위상차와 함수율과의 결정계수는 저밀도, 고밀도에서 각각 0.990, 0.994로 나타났으며, 수분밀도와 위상차와의 경우 결정계수가 저밀도, 고밀도에서 각각 0.983, 0.990으로 나타나, 수분밀도를 이용해 함수율 측정에서 동일한 측정결과를 얻을 수 있었다.

3) 밀도차이에 따른 수분값의 차이를 보상하기 위해 저밀도와 저밀도 샘플을 수분밀도값을 이용하여 함수율을 측정하였으며, 수분밀도와 위상차와의 결정

계수는 0.977, SEC는 0.719%로 나타났다.

본 연구결과를 이용하면 정확하며, 전체 샘플을 대상으로 함수율을 측정할 수 있는 측정장치의 개발이 가능할 것으로 판단되며, 추후로 저수분대에서의 분해능을 높이기 위한 추가연구가 필요하다.

문헌

- 김우택. 1988. 콘텐서식 곡물 수분측정기 개선에 관한 연구. 서울대학교 농학석사 학위논문
- 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문
- Corcoran, P. T., S. O. Nelsol, L. E. Stetson and C. W. Schlaphoff. 1970. Determining dielectric properties of grain and seed in the audio frequency range. *Transactions of the ASAE* 13(2): 348-351
- Nelson, S. O. and L. E. Stetson. 1975. 250-Hz to 12-GHz dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the ASAE* 18(3): 714-715, 718
- Stetson, L. E. and S. O. Nelson. 1972. Audio frequency dielectric properties of grain and seed. *Transactions of the ASAE* 15(1): 180-184, 188
- White, G. M. and D. C. Martin. 1971. Electrical impedance of potato tubers in the 1 to 100 kHz frequency range. *Transactions of the ASAE* 14(3): 871-874