저주파 임피던스를 이용한 벼의 함수율 측정장치 개발에 관한 연구

Development of Moisture Meter for Rough Rice using Electrical Impedance at 1kHz

정창호*	김기복*	조성인*	박영식*
정회원	정회원	정회원	정회원
C.H.Chung	K.B.Kim	S.I.Cho	Y.S.Park

1. 서론

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 측정장치의 개발이 시급하게 요구되고 있다.

국내·외에서의 함수율 측정장치의 연구는 오래 전부터 진행되어 왔는데, 특별히 저주파 수대를 이용한 함수율 측정연구는 다음과 같다. White 등(1971)은 1, 10, 100kHz의 주파수에서 감자를 대상으로 하여 임피던스를 측정하였으며, 각 주파수에서의 온도가 임피던스에 미치는 영향을 평가하였다. 그는 주파수를 1kHz에서 500kHz까지 증가시키면서 임피던스와 위상차를 측정함으로써 임피던스가 품종과 작물의 상태 및 온도에 따라 그 값이 변화하며, 특별히 온도상승에 따라 임피던스가 증가한다고 보고하였다. Stetson 등(1972)은 가청주파수대에서 곡물의 유전 특성을 규명하였다. 그는 저주파에서의 유전상수와 loss factor가 고주파(1~50MHz)에서보다 더 크다고 보고하였으며, 밀을 대상으로 실험하였을 때, 함수율의 증가에 따라 유전상수와 loss factor가 지수함수적으로 증가한다고 보고하였다. Nelson 등(1975)

*서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부 농업기계전공

은 250Hz에서 12GHz의 주파수 범위에서 곡물의 유전상수, loss factor, loss tangent 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 김(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 고려하였을 때 교류전원을 이용할 경우, 곡물 내부의 임피던스에 의해 발생하는 위상각은 저항과 리액턴스(커패시턴스 또는 정전용량)의 비로 표현되기 때문에, 위상각은 곡물의 함수율에 따른 저항과 용량을 동시에 포함할 것이라는데 착안하여 위상각 검출회로를 개발하고, 함수율 측정에 이용하고자 하였다.

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

1) 저주파(1kHz)에서 벼의 함수율에 따른 위상각을 검출하기 위한 회로를 개발하고
2) 개발된 위상각 검출 회로와 마이크로 프로세서를 이용한 함수율 측정장치를 개발하고, 그 성능을 평가한다.

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

실험에 사용된 품종은 단립종으로서, 일반적으로 국내에서 많이 재배되고 있는 화성을 선택하여 샘플을 제작하였다. 벼의 초기 함수율이 13%내외로 낮아 함수율이 높은 벼를 만들기 위해 가수하여 함수율을 높였으며, 함수율이 벼 전체에 걸쳐 고르게 분포되도록 4℃의 저온저장고에 2주 이상 보관하여 전체적으로 함수율 평형이 이루도록 하였다.

벼의 함수율 측정 방법은 농산물 검사소 표준방법을 채택하였는데, 각 함수율의 샘플에서 5g씩 3개의 표본을 추출하여 분쇄한 후, 105℃에서 5시간 동안 건조하여 습량기준 함수율을 구하였다. 3개 표본의 함수율을 평균하여 각 샘플의 함수율로 이용하였다. 이때의 벼 함수율은 13% ~ 28%까지 고르게 분포되었다.

2.2 전극판 설계

위상각과 관련 있는 정전용량은 평행판이든지 원통형이든지 상관없이 두 극판 사이에 존재하는 대상물의 유전적인 특성에서 얻어진다. 농산물측정의 정전용량측정에서는 두 개의 극판을 이용하는 것이 일반적이며, 이 때 전극판은 그림 1에서 보는 바와 같이 전기적으로 저항과 콘덴서의 병렬회로로 표현될 수 있다.

이 전극판에 직류전원이 공급될 때에는 저항값만을 이용하나, 교류전원 공급시에는 저항값과 정전용량값을 이용하게 된다. 이 때의 정전용량은 (식 1)과 같이 표현된다.

$$C = \varepsilon_o \varepsilon_r \frac{A}{d} \qquad \text{(식 1)}$$

여기서, C = 정전용량[F], ε_o = 공기의 유전율[8.854×10^{-12}F/m], ε_r = 상대유전율, A = 극판의 단면적[m^2], d = 극판사이의 거리[m]

전극판에 교류전압이 인가될 때 임피던스는 다음과 같이 표현된다.

$$\text{임피던스}(Z) = R + jX_c \qquad \text{(식 2)}$$

여기서, $X_c = \frac{1}{2\pi fC}$, f = 주파수[Hz],

C = 정전용량[F]

또한 교류가 전극판을 통과할 때 발생하는 정전용량에 의해 위상각이 발생하며 다음 (식 3)에 의해 계산된다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{X}{R}\right) \qquad \text{(식 3)}$$

상기 (식 3)에서 나타난 바와 같이 임피던스항의 각 인자들 즉, 정전용량 및 저항은 함수율과 밀접한 관련이 있기 때문에, 이들의 비로 나타나는 위상각을 이용할 경우 함수율 측정이 가능할 것으로 생각된다.

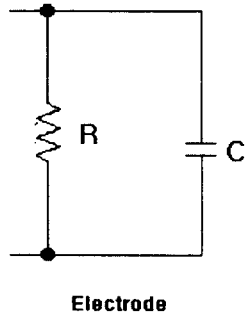


Fig. 1 Representation of equivalent parallel circuit for electrode

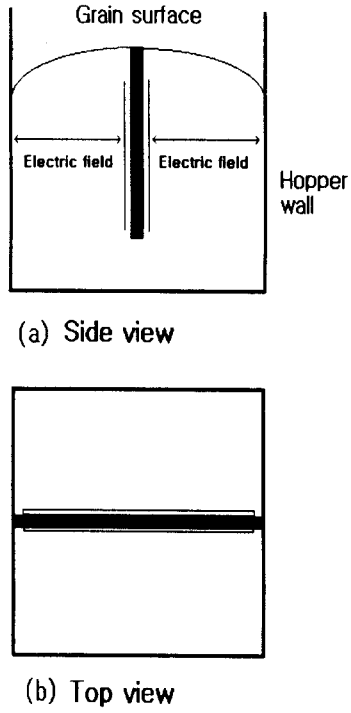


Fig. 2 View of hopper scale

함수율을 측정하기 위한 전극판은 적용대상 및 그 분량에 따라 여러 가지 형상 및 치수로 제작할 수 있으나, 본 연구에서는 간이용 소형 호퍼를 제작하였다. 호퍼에서 측정 가능한 샘플의 중량은 최대로 500g정도이며, 제작된 호퍼 내에 설치된 전극판은 그림 2에서 보는 바와 같이 중앙에 위치한 판이 한 극을 이루고, 호퍼의 좌우 외벽이 또 다른 한 극을 이루어, 함수율 측정 센서부를 구성하였다.

2.3 위상측정 회로

위상각은 전극판 사이에 샘플이 투입될 때 발생하는 정전용량값과 저항값에 의해 결정된다. 이 위상각과 원래 입력신호의 위상각과의 차이를 이용하여 위상각이 천이된 정도를 구할 수 있고, 이 위상각 천이를 이용하여 함수율을 측정한다. 전극판을 통과하여 위상각이

천이된 신호는 증폭된 후 원래의 입력신호와 같이 shimmit trigger를 통과하여 TTL level의 digital 신호로 변환된다. TTL level로 변환된 입력신호와 출력신호가 AND gate를 통과하게 되면, 두 신호가 겹치는 구간만 출력이 되는데, 이 구간이 위상각 천이 구간이다. 따라서 이러한 위상각 천이 구간을 마이크로 프로세서에 입력하여 함수율을 측정하였다. 이렇게 개발된 위상각 측정 회로의 검증을 위하여 여러 가지 용량값을 가지는 표준 콘덴서 소자들에 대하여 LCR 미터(Escort ELC-131D, Taiwan)로 측정한 위상각을, 개발된 회로를 이용하여 측정한 위상각과 비교한 결과 선형적인 관계를 나타내어 개발된 회로의 위상측정 성능이 신뢰할 만한 것으로 판단되었다.

2.4 마이크로 프로세서를 이용한 함수율 측정장치

마이크로 프로세서를 이용하여 개발된 함수율 측정장치의 개요도는 그림 3에서 보는 바와 같다.

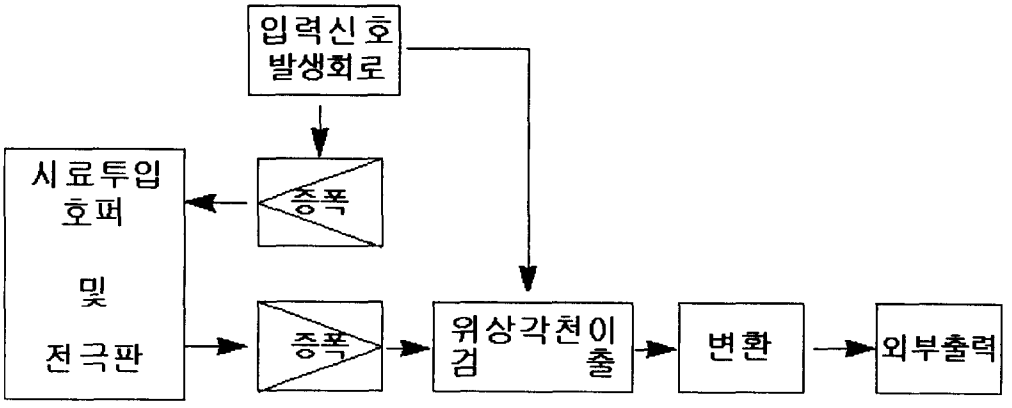


Fig. 3 Block diagram of the phase shift measurement system

마이크로 프로세서를 이용한 제어보드는 입력신호를 발생하고 증폭하는 부분과 이를 기준으로 출력신호와 비교, 위상각 천이를 검출하는 부분, 위상각 천이를 입력받아 변환한 후 내부에서 계산하여 함수율을 구하고, 출력하는 부분으로 구성되었다.

수정발진자에서 발생된 사각파를 필터를 이용하여, 온도변화에 안정적인 sine파 신호를 발생시켜 입력신호로 이용하였다. 따라서 수정발진자를 교체하면 고주파 신호를 발생하더라도 안정적인 신호원으로 사용될 수 있도록 제작하였다.

함수율측정을 위한 제어 및 출력은 8751 원칩 마이컴을 이용하였으며, 제어보드내에는 정확한 함수율 측정을 위하여 측정 곡물의 종류를 선정하는 선택키를 내장하였다.

함수율이 온도에 따라 그 값이 변화하는 경향이 있으므로, 제어보드내에 pt-100을 이용한 온도측정회로를 내장하였으며, 출력신호는 7-segment를 이용하여 출력하도록 구성하였다.

또한 외부 컴퓨터나 마이컴에 RS-232 직렬 통신 포트를 통하여 그 결과값을 출력할 수 있도록 하였으며, 외부에서 제어보드를 원격으로 제어할 수 있도록 프로그램을 개발하였다.

함수율측정을 위한 제어프로그램은 변환된 위상각 천이가 입력된면, 곡물의 종류와 온도에 따라 이미 입력된 함수에 대입하여 함수율을 구한다. 이러한 과정을 10회 반복하여 구해진 값들의 평균값을 출력한다. 흐름도는 그림 4에서 보는 바와 같다.

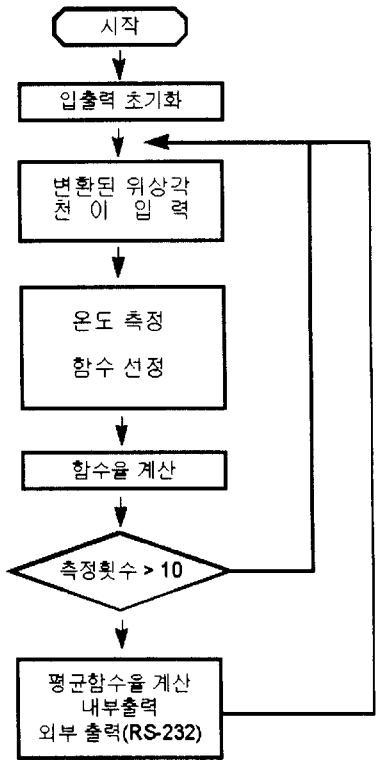


Fig. 4 Flow chart of the moisture meter operations

2.5 함수율 측정실험

구성된 장치를 이용하여 벼의 함수율을 측정하였다. 제작된 실험장치는 상하 2개의 호퍼를 설치하였고, 상부 호퍼는 항상 일정한 낙하높이를 유지하도록 구성하였다. 샘플은 하부 호퍼내에 있는 전극판을 완전히 덮을 수 있는 분량을 투입하였으며, 산물밀도는 저밀도와 고밀도의 두 그룹으로 분류하여 산물밀도의 변동을 최소화하여, 각각에 대하여 위상각 천이를 측정하였다. 저밀도는 약 300g, 고밀도는 약 400g의 샘플을 투입하였다.

이때 곡물의 온도는 주위온도(실온, 20~24℃)와 같게 유지되도록 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 저밀도에서의 위상차와 함수율과의 관계

그림 5에서와 같이 함수율이 증가함에 따라 위상각 천이가 감소하는 경향을 나타내었으며. 3차 회귀방정식을 구하였을 때 결정계수는 0.990로 가장 높은 값을 나타내었다. 한편 그림 6은 함수율에 따라 하부호퍼 내에 쌓이는 벼의 충진밀도가 다르기 때문에 김(1997) 등이 개발한 수분밀도를 위상각 천이와 비교한 결과로, 수분밀도의 증가에 따라 위상이 감소하였으며, 결정계수는 0.983로 나타났다.

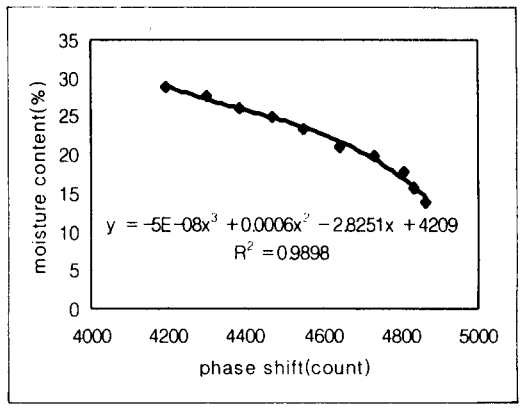


Fig. 5 Relationship between phase shift counted and moisture content

3.2 고밀도에서의 위상차와 함수율과의 관계

밀도가 높을 경우에도 그림 7에서 보는 바와 같이 함수율이 증가함에 따라 위상각 천이가 감소하는 경향을 나타내었으며, 수분밀도를 이용하여 분석한 경우에도 동일하게 수분밀도가 증가함에 따라 위상각 천이가 감소하는 경향을 그림 8에서 볼 수 있다. 이 때 각각의 결정계수는 0.994, 0.990으로 높게 나타나 정확도가 높은 함수율 측정이 가능한 것으로 판단되었다

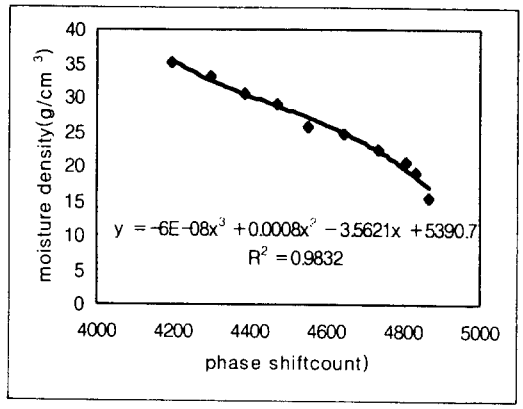


그림 6 Relationship between phase shift counted and moisture density

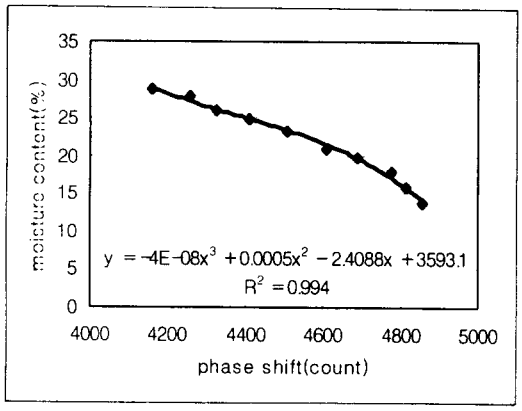
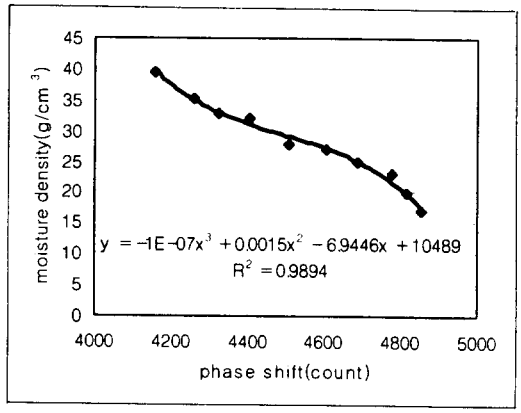


Fig. 7 Relationship between phase shift counted and moisture content



Fig, 8 Relationship between phase shift counted and moisture density

4. 결론 및 요약

본 연구는 저주파 임피던스를 이용한 함수율 측정장치를 개발하기 위하여 수행되었다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 바탕으로 기초실험장치를 구성하고, 함수율에 따른 위상각 천이를 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) 1kHz에서의 함수율 변화에 따른 위상각 천이를 검출하기 위한 회로를 개발하였으며, 마이크로 프로세서를 이용한 함수율 측정장치를 개발하였다.

2) 개발된 함수율 측정장치를 이용하여 함수율 측정 가능성을 검토한 결과, 위상각 천이와 함수율과의 결정계수는 저밀도, 고밀도에서 각각 0.990, 0.994로 나타났으며, 수분밀

도와의 경우 결정계수가 저밀도, 고밀도에서 각각 0.983, 0.990으로 나타났다.

본 연구결과를 이용하면 정확하고, 저가인 함수율 측정장치의 개발이 가능할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 김우택. 1988. 콘덴서식 곡물 수분측정기 개선에 관한 연구. 서울대학교 농학석사 학위논문.
2. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 공학박사 학위논문.
3. Corcoran, P.T., S.O.Nelsol, L.E.Steston and C.W.Schlaphoff. 1970. Determing Dielectric Properties of Grain and Seed in the AudioFrequency Range. *Transactions of the ASAE* Vol.13(2):348-351.
4. Nelson, S. O. and L. E. Stetson. 1975. 250-Hz to 12-GHz Dielectric Properties of Grain and Seed. *Transactions of the ASAE* Vol.18(3):714-715, 718.
5. Stetson, L. E. and S. O. Nelson. 1972. Audiofrequency Dielectric Properties of Grain and Seed. *Transactions of the ASAE* Vol.15(1):180-184, 188.
6. White, G. M. and D. C. Martin. 1971. Electrical Impedance of Potato Tubers in the 1 to 100kHz Frequency Range. *Transactions of the ASAE* Vol.14(3):871-874.