유전율방식 수분측정기의 안테나 설계
Antenna Design for a Dielectric Moisture Meter

조성인* 정창호* 신동준*
정회원 정회원 정회원
S.I.Cho C.H.Chung D.J.Shin

1. 서론

최근에는 벼 수확 후 처리에 있어서 생산비 절감과 고품질미 생산을 통한 쌀의 경쟁력 강화와 노동력 절감을 위해서 미곡종합처리장이 설치·운영되고 있다. 이러한 미곡종합처리장을 운영하기 위해서는 많은 시설이 필요한데, 국내의 미곡종합처리장은 국외·국내의 기술을 바탕으로 그 시설을 수입 또는 국내 제작을 통해 현대화 및 자동화하고 있다.

곡류의 수확후 처리에 있어서 높은 정확도와 자동화를 요하는 분야중의 하나는 건조와 저장단계에서의 자동수분측정 분야로서, 곡물내 함수율은 농산물의 품질평가, 건조, 가공 및 저장시 중요한 요인으로서 정확하고도 신속한 측정이 절실히 요구된다 그러나, 아직까지는 국내에서 개발되어 현장에 적용된 수분측정기가 거의 없어 수분측정에 어려움을 겪고 있다. 현재 이용되고 있는 수분측정방법은 전체 측정대상에서 샘플을 일정량 채취하여 곡류의 함수율을 측정하거나, 수입되고 있는 측정 기기를 이용하여 on-line으로 함수율을 측정하고 있으나 국내에는 on-line에 의한 수분측정에 대하여 축적된 기술이 전혀 없는 것이 사실이다.

함수율 측정 방법은 크게 나누어 직접법과 간접법으로 나눌 수 있다. 직접법은 시료를 채취하여 건조를 통하여 건조 전·후의 질량을 비교하여 수분을 측정하는 방법으로 정확하지만 시간이 많이 걸린다는 단점 때문에 산업현장에서는 전기적 물성을 이용하는 간접법이 많이 사용되고 있다. 이중 유전율식 수분측정기는 비교적 저렴한 가격으로 시료를 분쇄하지 않고도 on-line화하는 것이 가능하여 미국과 일본에서 자동수분 측정기에 응용되어 광범위하게 사용되고 있다.

따라서, 본 연구는 유전율식 온라인 함수율 측정장치를 이용하여 on-line 및 전수검사를 위한 수분측정 안테나 설계의 최적설계를 목적으로 하여 연구가 수행되었으며 구체적인 목적은 다음과 같다.

1) 곡류의 산물밀도에 따른 유전특성을 구명하며
2) 시료의 양과 안테나의 크기를 최적화하고
3) 시료의 온도에 따른 수분함량 변화량을 검출하며
4) 호퍼(hopper)의 안테나 설치 방법에 따른 함수율 변이를 검토하여,

연구결과를 바탕으로 유전율식 함수율 측정장치의 수분측정 안테나를 제시한다.

---

* 서울대학교 농업생명과학대학 농공(기계)학과

2. 재료 및 방법

2.1 이론적 배경

그림 1은 일반적으로 사용되고 있는 유전율 측정을 위한 등가회로이다. 등가 회로에서 주파수 ω의 교류전압을 가하면 전류 I는 전압 V보다도 위상(phase)이 θ만큼 앞서고, 그 전류 I는 전압 V와 같은 위상의 전류 I_r와 위상이 $\pi/2$ 앞선 전류 I_c로 나뉘어진다. I_r는 저항 R에 의해 소비되는 손실전류이고 I_c는 C에 대한 무손실 충전전류이다.

그림 1에서 S를 처음에 S가 열려있는 상태에서 C값을 이용하여 회로를 공진시킨 후 S를 연결시키고 샘플을 측정하면 회로의 공진상태가 변화게 되고 입력신호와 출력신호의 위상차이가 나게된다. 이 위상차이는 샘플의 유전상수와 비례하여 수분측정이 가능하게 된다. 또한 신호의 감쇠를 통해서는 Q값을 측정할 수 있어 Q meter로도 이용이 가능하다.

그림 1의 회로를 이용하여 농산물의 수분을 측정하기 위해 전극을 설치하고 전극의 양단에 교류전압을 인가하면 측정 대상은 전기적으로 저항과 콘덴서로 구성된 등가회로의 특성을 나타낸다. 이때 평판 사이의 정전용량은 시료의 유전율과 다음의 관계가 있으며 다음 식에 의해서 정전용량이 결정된다.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \tag{1}$$

여기서, ε는 시료의 유전율, A는 평판의 면적, d는 평판사이의 거리

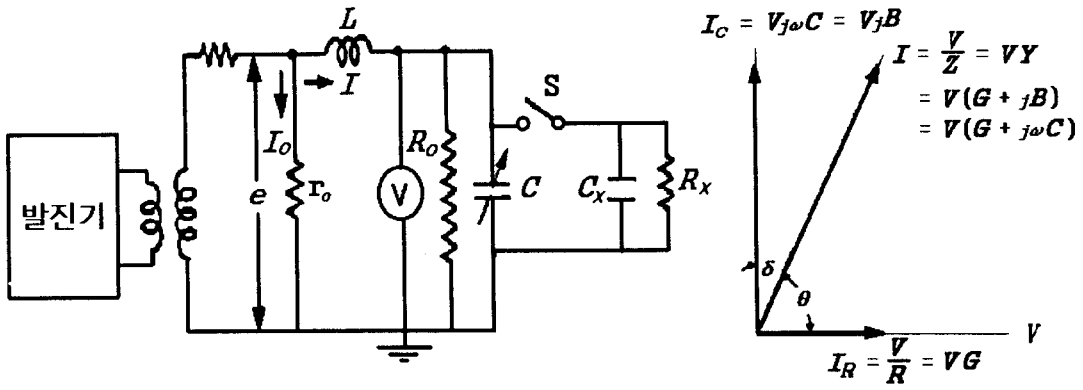

Fig. 1 Parallel equivalent moisture-meter circuit and phasor diagram

농산물의 유전특성은 시료의 함수율, 온도, 적용 주파수, 산물 밀도에 영향을 받으므로, 유전특성을 이용하는 수분측정기는 이와 같은 영향을 최소화하기 위한 방법들이 적용되어야 된다.

2.2 시료 구입 및 샘플 제작

본 연구에서 사용한 시료는 96년에 재배한 화성벼를 구입하여 실험에 이용하였다. 구입한 벼는 함수율이 약 14%내외로 건조된 상태였다. 샘플의 질량을 100kg을 기준으로 하여 4개의 샘플을 제작하였으며, 14%보다 높은 함수율의 샘플은 증류수를 가수처리 하여 함수율을

조절하였다. 제작된 샘플은 전체적인 함수율 평형을 위하여 4℃ 저온저장고내에서 2주일동안 보관하여 샘플 내에서의 함수율이 평형이 되도록 하였다.

샘플의 함수율을 정확히 측정하기 전에 샘플을 담아 건조시킬 칭량용기를 130℃에서 1시간 건조시킨 후 데시케이터(desicator)에서 tempering을 실시한 다음 칭량용기의 무게를 측정하였다.

각각의 샘플에서 200g의 샘플을 채취한 후 상온 통풍 130℃에서 24시간 건조하였으며, 건조된 샘플은 데시케이터에 넣어 tempering 후 상온에서 ±0.001g 오차 내의 저울로 측정하였다.

2.3 장치 구성

본 연구에서 이용하는 수분측정기는 미국 Applied instrument사에서 수입된 정전용량식 함수율 측정기기로 저주파수대역인 10kHz~100kHz의 주파수를 이용하는 수분측정기이다. 현재 이용된 수분측정기는 10kHz 주파수를 이용하여 10~30%의 비교적 넓은 수분측정범위를 가지고 있는 수분측정기이다.

이 수분측정기를 이용하여 100kg의 샘플의 함수율을 측정하기 위한 호퍼를 제작하고, 호퍼내에 그림 2와 같이 함수율을 측정하기 위한 안테나를 설치하였다. 안테나는 호퍼의 전후, 좌우 대칭으로 4개의 안테나를 설치하였으며, 각 안테나는 300×200(mm)의 평판형으로, 안테나의 설치각에 따른 함수율 측정의 정도를 평가하기 위해 그림 2에 나타난 것과 같이 1~4까지 설치각을 변화시키면서 함수율을 측정하였다.

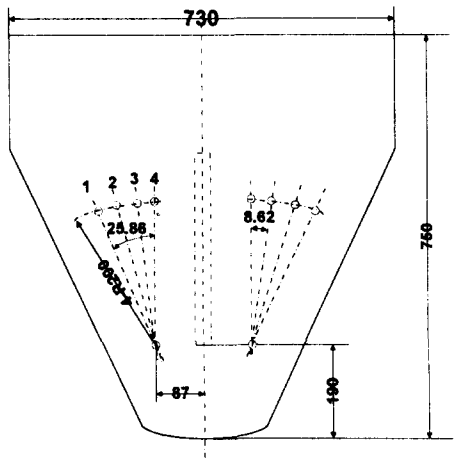

Fig. 2 Hopper scale

3. 결과 및 고찰

3.1 산물밀도 보정

Nelson 등(1988)에 의하면 시료의 산물밀도는 곡류의 유전특성에 영향을 미치는 중요한 인자라고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 일정한 밀도를 유지하기 위해 다음과 같은 실험을 실시하였다.

일정한 밀도를 유지하기 위한 실험으로 샘플이 버킷 엘리베이터를 통해 일정한 높이에서 낙하하도록 설치하였다. 그러나, 샘플이 일정한 높이에서 떨어지나 엘리베이터에 공급되는 샘플의 양에 따라 동일한 샘플에 대하여도 밀도가 일정하게 유지되지 않아 위상(phase)이 매번 달랐다. 산물밀도를 보정하지 않았을 때 16% 함수율의 시료에 대하여 ±3°의 위상차를 나타내었다.

샘플의 밀도를 일정하게 유지시키기 위해 그림 2에 나타나 있는 측정호퍼 위에 같은 크기의

호퍼를 설치하고, 먼저 시료를 위쪽 호퍼에 담고 위쪽 호퍼에서 일시에 샘플이 낙하하게 하여 산물밀도를 일정하게 유지하였으며, 각각의 안테나에 대하여 $\pm 1^{\circ}$의 위상차 이내로 밀도를 보정할 수 있었다.

3.2 샘플 양의 영향

시료의 양에 따른 영향을 구명하기 위하여 시료의 양을 변화시키면서 안테나의 신호를 분석하였다. 실험에서 제작된 안테나는 70kg정도의 샘플이 호퍼에 쌓일 때 완전히 잠기는 것을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 샘플의 양을 60kg부터 100kg까지 변화시켜가면서 샘플의 질량이 위상에 미치는 영향을 평가하였다.

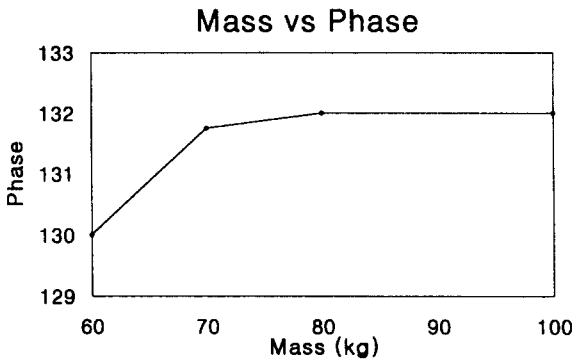

Fig. 3 The effect of sample mass

실험결과 70kg이상의 시료에 대하여는 안테나에서 일정한 신호가 나오는 것을 알 수 있었다. 따라서 70kg이상의 샘플에서는 샘플의 중량에 무관하게 정확한 함수율 측정이 가능함을 알 수 있었다.

3.3 샘플 온도의 영향

시료 온도에 따른 함수율의 변화를 알아보기 위해 14.4%의 함수율을 갖는 균질의 샘플에 대하여 온도를 18~27℃로 변화를 가하면서 온도에 따른 위상차를 측정하였다. 샘플의 온도를 일정한 값으로 유지하기 위해 실험전에 샘플의 온도를 평형상태에서 2시간 이상 유지시켰다. 2시간 후 시료를 충분히 혼합하여 전체의 샘플에 대하여 온도를 일정하게 유지하였다. 안테나와 시료간의 온도 평형을 이루기 위하여 측정호퍼에 시료를 넣고 15분 정도 온도 평형이 될 때까지 기다렸다가 함수율을 측정하였다.

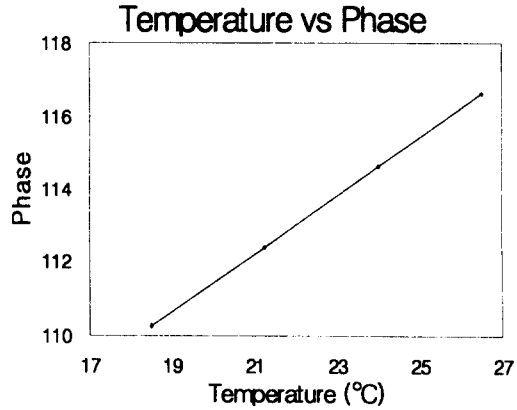

Fig. 4 Temperature dependence of the phase

그림 4에 온도에 따른 위상차와의 관계를 나타내었다. 실험결과 온도가 상승될수록 위상차는 증가하는 경향을 보였는데, 이는 온도가 높을 수록 함수율이 높게 나타나는 기존의 연구결과와 동일하였다. 실험결과 위상차는 1℃상승때마다 0.8정도 위상이 증가하였으며, 이는 0.13%의 수분값의 상승결과를 나타내었다.

3.4 안테나 각도 설정

시료 온도를 8℃로 유지하고, 산물밀도를 보정한 후, 각각의 샘플에 대하여 안테나 각도별

로 함수율을 측정하였다.

그림 2와 같이 안테나 각도를 1~4까지 변화시키면서 실험하였으며, 그 결과는 표 1과 그림 5에 나타내었으며, 표 2과 그림 6에 각각의 r^2값과 표준편차를 나타내었다.

표 2와 같이 r^2값은 0.9895(각도4)~0.9934(각도2)로 나타났고, 표준편차는 0.5974(각도4)~0.4738(각도2)로 나타났다. 따라서, 정확도의 정도는 큰 차이가 없으나 표 2와 같이 각도 2에서 가장 정확한 측정결과를 보였으며, 이는 안테나가 호퍼내의 중간 칸막이와 외벽사이 중간에 설치할 때 표준편차가 가장 낮음을 알 수 있었다.

Table 1 Measured phases of the rough rice according to the antenna angles

함수율	각도1	각도2	각도3	각도4
13.802	101.1	101.0	101.0	103.0
21.295	142.3	142.2	143.0	147.0
21.980	148.3	149.3	152.5	158.0
24.994	159.3	160.8	164.5	170.7

Table 2 r^2 and standard deviations of the M.C. according to the antenna angles

	r^2	표준편차
각도1	0.9928	0.4927
각도2	0.9934	0.4738
각도3	0.9911	0.5487
각도4	0.9895	0.5974

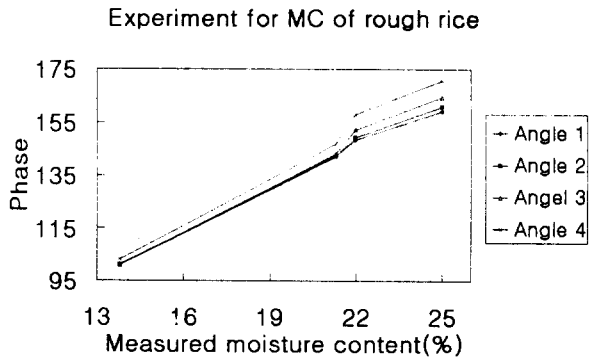

Fig. 5 Phase vs M.C. according to the angles of antenna

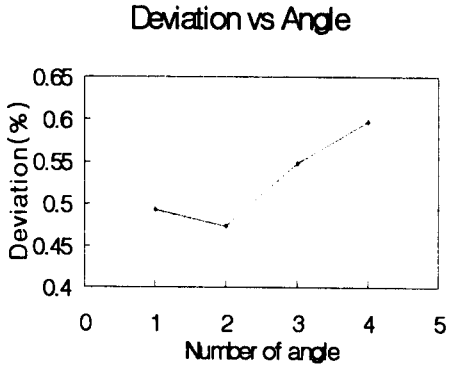

Fig. 6 Standard deviation according to the angles of antenna

4. 요약 및 결론

본 연구는 100kg의 벼를 on-line으로 전수검사할 수 있는 정전용량식 함수율 측정장치의 적정 안테나 설계에 대하여 수행되었다. 안테나 설계의 변수를 찾기위해 시료의 산물밀도와 온도에 의한 측정치 변화를 구명하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 산물밀도에 의한 측정치 변화를 통해 2단의 호퍼를 설치하여 위쪽 호퍼에 미리 시료를 담았다가 일정한 높이에서 시료를 측정호퍼로 떨어지게 함으로써 안테나간의 측정 신호 차이를 ±3 위상차에서 ±1 위상차로 줄일 수 있었다.

2) 시료 양에 따른 측정치 변화를 살펴본 결과 시료가 안테나 전부를 가릴 수 있으면 측정치의 변화가 없었다. 따라서 측정중량에 무관하게 가변적인 측정이 가능함을 보였다.

3) 14.4%의 함수율을 갖는 균질의 샘플에 대하여 온도를 18~27℃로 변화를 주면서 위상차를 측정하였다. 온도가 상승함에 따라 위상차가 증가하였으며, 1℃ 상승할 때 0.13%씩 수분값이 증가하였다.

4) 안테나의 각도를 달리하며 측정오차를 살펴본 결과 호퍼의 중간 칸막이와 외벽사이의 중간에 안테나를 설치하는 것이 표준편차가 적음을 알 수 있다.

정전용량식 수분계는 기타 수분계에 비해 시료의 밀도, 온도, 상태 등에 따라 영향을 받아 이를 보정해야 되는 어려움이 있지만 비교적 저렴하게 측정기를 설계할 수 있고 on-line 측정이 가능하므로 지속적인 연구를 통해 개발할 필요성을 갖는다.

5. 참고문헌

1. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 유전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 박사학위논문.
2. 김우택. 1988. 콘덴서식 곡물수분측정기 개선에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문.
3. Kandala, C.V.K, R.G. Leffler, S.O. Nelson and K.C. Lawrence. 1991. RF impedance instrument for corn kernel moisture measurement. ASAE Paper No. 91-6058.
4. Kandala, C.V.K, S.O. Nelson and K.C. Lawrence. 1992. Nondestructive moisture determination in small samples of popcorn by RF impedance measurement. ASAE Paper No. 92-6064.
5. Lawrence, K.C, S.O. Nelson and A.W. Kraszewski. 1989. Temperature dependence of the dielectric properties of wheat. ASAE Paper No. 89-6013.
6. Lawrence, K.C, S.O. Nelson and A.W. Kraszewski. 1990. Temperature-dependent model for the dielectric constant of soft red winter wheat. ASAE Paper No. 90-6062.
7. Nelson, S.O and K.C. Lawrence. 1993. Nondestructive single-seed moisture determination in soybeans by RF impedance measurements. ASAE Paper No. 93-6002.
8. Sokhansanj, Shahab and S.O. Nelson. 1988. Dependence of dielectric properties of whole-grain wheat on bulk density. J. agric. Engng. Res. 39: 173-179.
9. White, G.M. and D.C.Martin. 1971. Electrical Impedance of Potato Tubers in the 1 to 100kHz Frequency Range. Trans. of ASAE 14(5):871-874