

정전용량을 이용한 산물벼의 함수율 측정에 관한 기초연구

Research of development of a capacitance type moisture meter for rough rice

조성인* 정창호* 김청월**
정희원 정희원
S. I. Cho C. H. Chung C. W. Kim

1. 서 론

벼 생산 및 유통을 계열화하고 노동력절감과 다양한 소비자의 기호에 부응한 고품질의 지역특산미의 생산공급을 위해 시작된 RPC(Rice Processing Complex)사업은 1991년 이래 1999년까지 194개소가 설치되었고, 건조저장시설은 220개소가 설치되어 있다. RPC에서의 일 반공정은 크게 물벼의 반입, 건조, 저장, 도정 및 포장으로 구분되어 있으며, 이중 물벼의 반 입공정은 곡물내의 이물질을 제거하는 조선기와 반입 물벼의 품질등급을 부여할 수 있는 품 위판정기 및 중량과 수분을 함께 측정하여 농민에게 대금정산을 하도록 구성된 호퍼스케일 러(Hopper Scaler)로 구성된다.

현재 국내에 설치된 RPC는 전수검사 방식의 수분측정을 채택하고 있으며, 수분측정방식 은 정전용량식, 고주파 저항식, 마이크로파식이 주종을 이루고 있다. 한국과 벼의 재배조건 이 비슷한 일본은 이미 오래전에 전수검사 방식의 수분측정기가 개발되어 산물벼의 수매에 서 이용되고 있으나 국내에서는 산물벼의 수분측정에 적합한 수분측정기의 개발이 없어 수 입에 의존하고 있다. 현재 국내에서는 단립식 수분계를 비롯한 정전용량식 함수율 측정기가 일부 개발되어 시판되고 있으며, 벼를 비롯한 미곡의 함수율을 측정하기 위한 수분측정기의 개발에 관한 연구가 진행되고 있다. 이러한 수분 측정방식은 주로 정전용량식, 마이크로파식 수분측정 방식이 주를 이루고 있으며, 주요 선행연구는 다음과 같다. 김우택(1988)은 RC 및 LC 발진기를 설계하고 평행판 샘플홀더를 제작하여 함수율의 차이에 따른 발진주파수의 변 화를 고찰하였다. 그는 LC 발진기를 설계하여 벼의 함수율을 측정하였으며, 결정계수가 0.98정도로 나타나 발진기를 이용한 함수율 측정의 가능성을 제시하였다. 김기복(1997)은 국 내산 주요 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성을 구명하였으며 5MHz의 주파수를 이용하 는 정전용량식 함수율 측정장치를 개발하였다. 그는 이를 이용하여 고춧가루의 함수율 측정 에 관한 연구(1999)를 하였다. 정창호 등(1999)은 함수율 차이에 따른 저주파 임피던스의 차 이를 이용하여 벼의 함수율을 측정하였다. 수분밀도의 개념을 도입하여 함수율을 측정하였 으며, 결정계수 0.98이상의 결과를 얻어 수분측정의 가능성을 제시하였다.

일반적으로 RPC에 반입되는 산물벼는 그 수확조건 및 생육조건에 따라 반입되는 벼의 상태가 매우 다르게 나타난다(그림 1, 그림 2). 아울러 단기간에 많은 양의 물벼가 반입되어 약 60여일간 동안 곡물이 매일 반입되며, 반입되는 물벼의 함수율은 15% ~ 30%대까지 그 분포가 매우 다양하게 나타난다. 화천 화천농협, 서산 인지농협, 군산 옥구농협 RPC에서의

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

** 안동대학교 사범대학 전자공학교육학과

수매기간동안의 전체 평균함수율은 21.8%, 20.1%, 17.3%로 수매농가의 건조기 보유현황, 산물벼 수매의 인지도 및 수매자의 대응 방법에 따라 차이가 있었으며, 전체적으로 벼의 수매가 종료됨에 따라 함수율이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 서산 인지농협에서 9월 24일 ~ 11월 4일동안에 10일간격으로 1일 함수율 분포를 보면 수매 전기간동안 15%대에서 30%이내의 다양한 함수율을 갖는 물벼가 반입되며 특히, 수매 중반에는 함수율의 분포가 15%이하에서 33%이상까지의 물벼가 동시에 반입되는 특성을 나타내었다.

이상과 같은 물벼 수매조건에 부합되는 함수율측정기를 개발하려하면 정확한 수분측정은 물론 저함수율부터 고태수율의 물벼까지 안정적으로 수분 측정이 가능하여야 한다. 또한 60여일이상 장시간 연속작동이 가능하여야 하며, 물벼의 반입에 따른 벼의 연속적인 충격에 견딜 수 있도록 측정 센서를 제작하여야 한다.

이에 본 연구는 산물 수매시에 적용가능한 정전용량식 수분측정기에 관한 기초연구를 목적으로 진행되었으며, 구체적인 목적은 다음과 같다.

- ① 전수검사에 적합한 함수율 측정장치의 구조를 결정하고, 정전용량과 절연저항을 측정하여 함수율에 따른 유전특성을 구명하며
- ② 정전용량식 함수율측정기의 하드웨어를 설계하여 함수율 측정가능성을 제시하고
- ③ 밀도 및 중량의 함수율 측정 영향을 평가하는데 있다.

2. 재료 및 방법

2.1 이론적 고찰

그림 3은 일정한 공간내에 놓인 농산물의 정전용량을 측정하기 위한 기본회로로서 C_p 와 R_p 는 농산물의 전기적 특성을 나타내는 등가회로이다. 농산물의 정전용량을 측정하기 위해서는 농산물내로 입력되는 전류(I_s)의 정확한 크기를 측정하여야 하며, I_s 는 콘덴서 성분과 저항성분의 임피던스차에 의해 각각 I_c 와 I_r 로 나누어지며, 이때의 농산물 양단의 전압은 V_p 로 나타낼 수 있다. I_c 와 I_r 의 차에 의해 손실계수가 계산되며 손실계수와 입력전류 I_s 를 이용하면 농산물에 충전되는 순전류 I_c 를 계산할 수 있고, 이를 이용하여 농산물의 정전용량(C_p)을 계산할 수 있다.

이를 수식으로 전개하면 다음과 같다.

먼저, 전류 I_s 는 다음과 같이 계산된다.

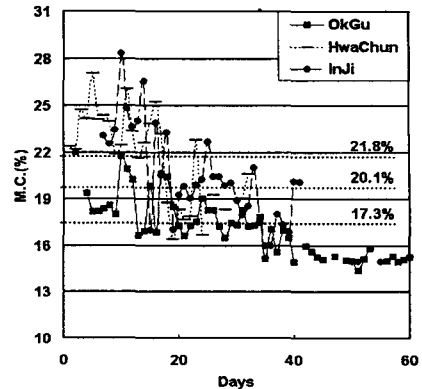


Fig. 1 Distribution of moisture contents with days

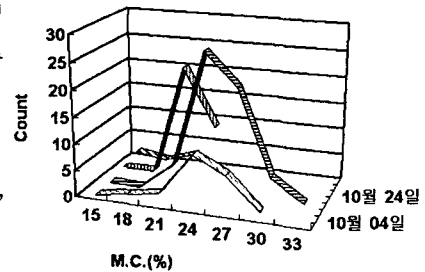


Fig. 2 Distribution of moisture contents in a day

$$\begin{aligned}
I_s &= \frac{V_p}{Z_p} = \left(\frac{1}{R_p} + j\omega C_p \right) V_p \\
&= \omega C_p V_c \left(\frac{1}{\omega R_p C_p} + j \right) \\
&= \omega C_p V_c (\tan \delta + j) \\
\text{여기서, } \tan \delta &= \frac{1}{\omega R_p C_p} = \frac{1}{2\pi f R_p C_p}
\end{aligned}$$

전류의 절대값을 구하면,

$$|I_s| = \omega C_p V_p \sqrt{\tan^2 \delta + 1}$$

이 되고, 이때의 전류 I_s 는 콘덴서성분과 저항성분에 흐르는 전류의 합이다.

따라서 농산물의 정전용량 C_p 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$C_p = \frac{I_s}{\omega V_p \sqrt{\tan^2 \delta + 1}}$$

병렬저항분 R_p 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R_p = \frac{1}{\omega C_p \tan \delta}$$

농산물의 정전용량을 측정하기 위한 실제의 경우는 유전체로 작용하는 농산물만 병렬로 표현되고 측정 케이블, shunt 저항, 전극판등은 직렬저항으로 작용하게 되어 실제 측정의 경우는 이론값과 차이를 보이게 되므로, 이를 회로에서 최소화하여야 한다.

2.2 공시재료 및 수분측정방법

국내에서 재배되는 단립종 벼의 품종은 토양, 기후 및 생산자의 품질기준에 따라 재배작물이 차이가 있으나, 동진과 추청을 비롯한 10여 품종이 전국적으로 많이 재배되는 품종으로 나타났다. 이에 따라 공시재료로는 1999년산 강원도 화천에서 재배된 추청(초기 함수율 : 28%)과 1999년산 전남 순천에서 재배된 동진(초기 함수율 : 30%)의 샘플을 이용하였다. 다양한 함수율의 벼를 만들기 위해 자연건조 시켜 함수율을 조절하였으며 20%이하에서는 열풍건조기를 이용하여 12%대까지 건조하였다.

함수율측정 방법으로는 국립농산물 검사소의 표준검사방법인 5g 샘플 분쇄 - 105℃ 5시간 건조 - 습량기준 함수율 적용법을 이용하였다. 측정 대상물의 정확한 함수율을 측정하고 함수율의 편차를 최소화하기 위해 7개의 샘플을 제작하여 함수율을 측정하였으며, 최대 및 최소 함수율을 제외한 5개의 함수율값을 평균하여 표준 함수율값으로 선정하였다. 아울러 측정의 신뢰도를 평가하기 위해 상업용으로 사용되고 있는 단립식 함수율측정기(KETT, K305, JAPAN), 적외선식 함수율측정기(KETT, PQ500, JAPAN), 고주파 정전용량식 함수율측정기(KETT, PM700, JAPAN)를 이용하여 함수율을 측정후 비교하였다. 측정 당시의 주위 환경의 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 였다.

2.3 정전용량 측정 hopper 설계

곡물의 정전용량은 연속적으로 곡물이 이동하는 가운데 측정될 수도 있으나, 정확한 측정

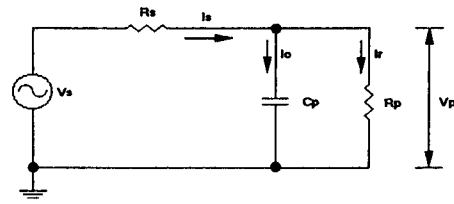


Fig. 3 Basic circuit of the capacitance moisture meter

을 위해서는 일정한 공간내에 일정한 시간동안 정지한 채로 있어야 된다. 산물처리시 1시간에 20t이상의 곡물에 대한 함수율을 측정하기 위해서는 정전용량을 측정하기 위한 hopper의 크기가 클수록 좋으나 hopper의 크기가 크면 전체적인 기기의 크기가 커지므로 1회 측정시 곡물의 처리용량이 100kg이상을 안정적으로 처리할 수 있는 크기가 적당할 것으로 판단된다. 그림 4는 실제 실험에 이용된 hopper의 구조이다. 실험에 이용된 Hopper의 용량은 245154[cm³]이며, 벽의 경우 함수율에 따라 그 밀도가 다르지만 0.6[g/cm³]라고 가정하였을 때, 150kg정도의 곡물의 중량을 측정할 수 있다. 곡물의 정전용량은 hopper내에서 측정되므로 hopper내에 그림 4와 같이 정전용량 측정을 위한 전극판을 설치하였다. 먼저 hopper 중앙에 hopper의 단면적에 준하는 크기의 전극판을 설치하여 hopper를 2등분 하였으며, 중앙에 설치된 전극판을 hopper와 연결시켜 hopper 외부와 중앙판이 한 극을 이루도록 구성하였다. 2등분 된 hopper 내부의 중앙에 전극판을 각각 설치하였으며, 호퍼 외부와 절연하여 한 극을 이루었다. Hopper내에 설치된 전극판에 의한 이론적인 정전용량은 15.65pF이나 전극판내에 연속적으로 쌓이는 이물질의 증가 및 송수신 회로의 동축케이블을 비롯한 주변장치에 의해 실제 정전용량값은 이론값보다 큰 84pF으로 나타났다.

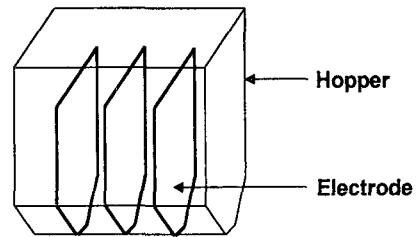


Fig. 4 Structure of hopper and arrangement of electrodes

3. 결과 및 고찰

3.1 정전용량 측정 및 절연저항 측정

제작된 hopper내에 함수율에 따른 곡물의 정전용량 및 절연저항을 측정하였다. 정전용량은 LCR meter(HP4277A, USA)를 이용하여 측정 주파수를 10kHz, 20kHz, 30kHz로 가변시키면서 측정하였다. 절연저항은 hopper 내의 극판 사이의 직류저항치로서 절연저항계(HS-5104, Korea)의 측정단자를 연결한 후 그 지시계의 값이 안정된 후의 값을 취하였다.

그림 5는 10kHz, 20kHz, 30kHz에서의 정전용량값이다. 측정결과 함수율이 증가함에 따라 정전용량값은 지수적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 주파수가 증가함에 따라 측정되는 정전용량값은 감소하는 것으로 나타났다. 정전용량의 증가는 함수율이 증가함에 따라 수분의 양이 증가하고 유전상수가 증가하기 때문이며, 지수적으로 증가하는 것은 곡물 표면의 수분의 영향이 서서히 크게 나타나기 때문으로 분석된다. 그림 6은 전극판 양단에서의 절연저항값이다. 그림과 같이 함수율이 증가함에 따라 절연저항도 지수적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 함수율이 증가함에 따라 표면의 수분에 의한 저항감소 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

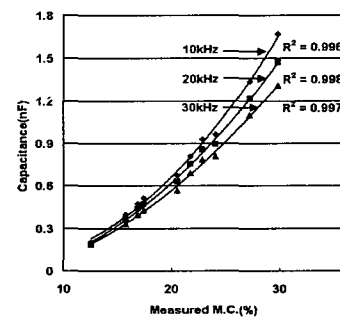


Fig. 5 Capacitance on different moisture contents

그림 5와 6에서 정전용량값과 절연저항값은 함수율의 증가에 따라 일정한 경향을 가지고 있으므로 이를 이용하면 함수율의 측정이 가능함을 알 수 있다. 실제의 회로에서는 정전용량값이 직접 측정되지 않으므로 손실각의 측정과 임피던스의 변화에 따른 신호크기를 측정함으로써 함수율을 측정할 수 있다.

3.2 정전용량측정 회로설계 및 개발

정전용량을 측정하기 위한 회로를 구현하기 위해 그림 7과 같이 4개의 주요한 부분으로 회로를 나누어서 설계하였다.

기준 신호는 온도를 비롯한 주위 여건의 변화에도 그 주파수가 변하지 않는 10kHz의 오실레이터를 이용하여 항상 일정한 주파수를 발생시켰으며, low pass filter를 이용하여 sine파 신호를 발생시켰다.

송신회로는 측정 대상물인 곡물이 유전체로서 작용하므로 곡물에 전류를 충전·방전시킬 수 있도록 높은 slew rate를 갖는 current buffer를 이용하였다. 회로와 hopper 사이는 동축케이블을 이용하여 신호를 송신하게 되고, 여기에 동축케이블 자체의 분포용량이 존재하므로 이를 최소화하기 위한 위상 보상회로를 설계하였다. 수신부에 입력되는 신호는 hopper내에 놓여 있는 곡물을 통과하여 수신되므로 다양한 외부 noise가 포함된 신호로 회로에 입력된다. 따라서 수신케이블 자체의 분포용량 및 noise를 제거하기 위한 회로를 설계하였다.

획득된 신호내에 포함된 noise를 band-pass filter를 이용하여 제거하였으며 입력된 신호의 신호의 크기 및 기준신호와 비교하여 위상의 변화 및 신호의 절대값을 검출하였다. 각각의 신호는 평균화회로를 이용하여 DC level의 신호로 변환되었다.

DC level로 변환된 신호는 ADC를 통하여 수치값으로 변환되었으며, 변환된 값은 MPU(Intel 89C52)에서 함수율 측정 알고리즘에 의해 함수율값으로 변환되었다.

3.3 함수율 측정 알고리즘 개발

측정 알고리즘을 개발하기 위해 12% ~ 29%대의 함수율에서 6종류의 물벼를 이용하였다. 측정 중량은 $100\text{kg} \pm 1\text{kg}$ 이내로 조정하였으며, 표준 함수율 측정법은 오븐법을 이용하였다. 각 함수율대에서의 오븐법의 표준편차는 0.3%이내에 분포하였으나 28.9%의 시료에서는 표준편차가 1.5%로 고함수율에서는 함수율의 편차가 매우 크게 나타났다. 그림 8은 산물

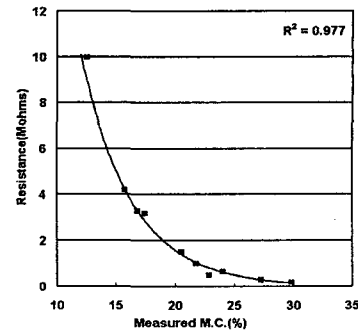


Fig. 6 Resistance on different moisture contents

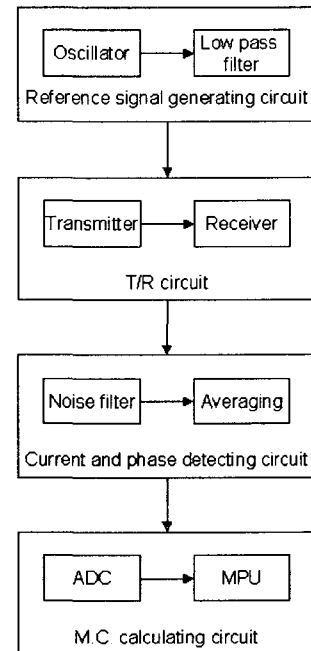


Fig. 7 Block diagram of system for the moisture meter

수매시에 많이 사용되고 있는 수분측정기의 정확도를 상호 평가하기 위해 표준법인 오븐법과 전기저항식, 적외선식, 정전용량식 수분측정기의 수분측정값을 비교하였다. 오븐법과 단립수분계와의 표준오차는 0.382%였고, 적외선수분계와의 표준오차는 0.379%였으며, 고주파 정전용량식 수분계와의 표준오차는 0.583%로 나타나 샘플링을 위해 채취한 시료에서 오븐법과의 차이는 전반적으로 낮게 나타났으나 고주파 정전용량식 수분계는 교정이 필요함을 알 수 있었다. 그림 8에서 오븐법에 의한 함수율과 ADC와의 결정계수는 0.991이었다. 온도보정계수는 기존 연구 결과(김기복, 1997)를 이용하여 1℃ 온도상승에 0.1%로 설정하였으며, 이때의 함수율 예측식은 다음과 같다.

$$M.C.(%) = 7E-5 \times ADC^2 + 0.0211 \times ADC + 4.250 + Temp. \times 0.1$$

그림 9는 서산 인지농협에서 함수율 측정결과를 검증한 결과이다. 12% ~ 26%대에서의 함수율을 측정된 결과 SEC는 0.712%로 나타났다. 15%이하와 23%이상에서 측정의 오차가 다소 높게 나타났으나, 산물측정의 가능성을 제시하였다.

3.4 중량 및 밀도에 따른 함수율 측정 영향 평가

정전용량식 함수율측정기는 밀도 및 중량에 따라 그 측정값이 다르게 나타나므로 이를 보완하여야 한다. 이를 보완하기 위해 중량에 따른 ADC값의 변화 및 밀도의 차이에 따른 함수율 측정의 영향을 평가하였다.

그림 10은 측정 중량에 따른 ADC값의 변화를 나타내었다. 측정 중량이 증가함에 따라 ADC값이 전체적으로 증가하였으며, 각각의 함수율대에서의 중량의 증가에 따른 ADC의 변화는 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 중량에 무관한 수분측정이 가능하려면 중량과 ADC 값을 통계처리하면 가능하나, 일반적으로 산물수매는 80, 100, 150, 200kg으로 그 중량을 고정하는 것이 일반적이므로 각 중량에서 교정곡선을 구하여 함수율 측정에 이용하면 가능할 것으로 판단된다.

그림 11은 함수율에 따른 밀도를 나타내었다. 샘플의 산물밀도는 220㎤의 용기에 직상 10cm 지점에서 자연스럽게 벼를 낙하하여 측정하였으며, 산물밀

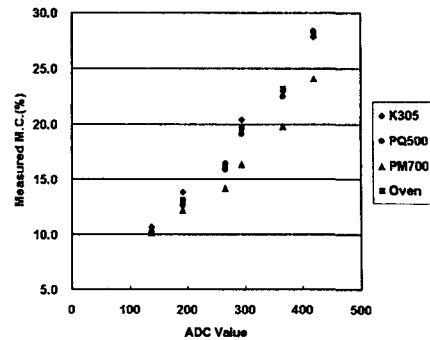


Fig. 8 Prediction model for measuring moisture content of rough rice

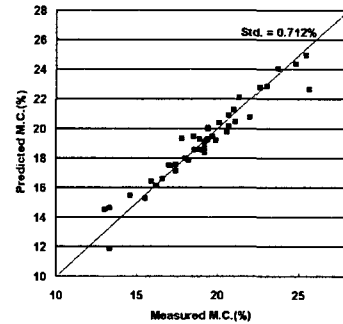


Fig. 9 Validation of the prediction model for measuring M.C. of rough rice

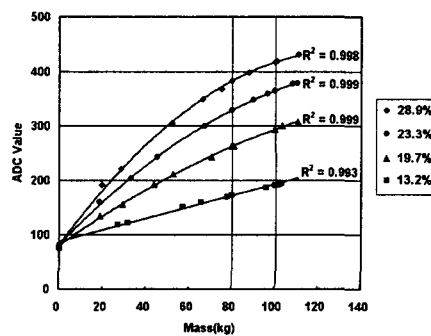


Fig. 10 ADC variation with mass of rough rice

도의 분포는 0.56 ~ 0.69[g/cm³]로 나타났다. 그림 11에서와 같이 함수율의 증가에 따라 산물밀도는 증가하는 경향을 나타내었으나 상관관계는 미약하게 나타났다. 벼의 정선조건과 발육 및 성장조건에 따라 산물밀도는 일정한 경향을 보이지 않았으며, 동일한 밀도를 갖는 샘플간의 함수율이 최대 5%이상까지 변이를 나타내었다. 따라서 동일 품종, 동일 샘플에 밀도가 증가함에 따라 함수율이 증가하는 현상은 기존 연구에서 확인된 바 있으나, 실제 측정에서는 산물밀도의 변화에 따른 함수율측정의 오차가 산물중량의 변화에 따른 함수율의 차이보다 적게 나타나게 되므로, 산물벼를 대상으로 하는 함수율측정기는 중량을 일정하게 유지시키므로써 그 오차를 최소화시킬 수 있을 것으로 분석되었다.

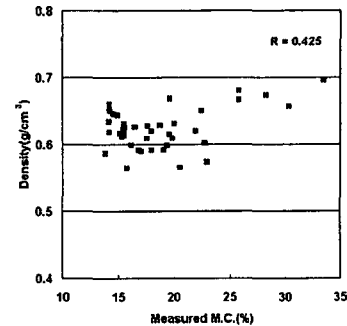


Fig. 11 Density deviation with moisture contents

4. 요약 및 결론

본 연구는 산물벼의 함수율 측정을 위한 기초연구로 정전용량식 측정장치를 개발하고, 이를 현장에 적용함으로써 함수율 측정의 가능성을 검토하기 위해 수행되었다. 일정량의 곡물을 담을 수 있는 hopper와 정전용량을 측정할 수 있는 전극판을 설계하였으며, 12% ~ 30%의 함수율 범위에서의 정전용량과 절연저항을 측정하여 정전용량의 측정을 통한 함수율 측정의 가능성을 검증하였다. 정전용량을 측정하기 위한 측정회로를 설계하였으며, 이를 이용하여 12% ~ 29%대의 함수율의 산물 벼를 대상으로 함수율을 측정한 결과, SEC가 0.712%로 나타났으며, 이를 토대로 산물벼 함수율 측정에 적용가능함을 알 수 있었다. 중량과 밀도에 따른 함수율 측정의 영향을 평가하였다. 산물의 밀도의 변화는 전체적인 함수율 측정에 영향이 미치나 일정한 조건으로 산물벼가 유입되는 조건에서는 중량에 따라 함수율의 변이가 크게 나타나므로 일정한 중량 유지가 정확한 산물벼의 함수율 측정조건으로 분석되었다. 본 연구결과는 산물수매 현장에서 이용가능한 수분측정기 연구에 기초자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

1. 김우택. 1988. 콘덴서식 곡물 수분측정기 개선에 관한 연구. 서울대학교 석사학위논문
2. 김기복. 1997. 곡류의 고주파와 마이크로파 유전특성 및 정전용량식 온라인 함수율 측정장치 개발에 관한 연구. 서울대학교 박사학위 논문
3. 정창호, 조성인, 김기복, 박영식. 1999. 저주파 임피던스를 이용한 벼의 함수율 측정장치 개발. 한국산업식품공학회지 Vol 3(1) : 40 - 44
4. 김기복, 이종환, 노상하. 1999. 고주파 정전용량을 이용한 밀가루와 고춧가루의 수분함량 측정에 관한 연구. 한국농업기계학회 동계학술대회논문집 Vol. 1 : 626 - 631