

고주파 저항방식 함수율계의 보정식 개발 및 특성평가

전홍영 강태환 한충수

Development of Correction Equation and Characteristics Evaluation for Moisture Meter of Microwave Resistance Type

H. Y. Jeon T. H. Kang C. S. Han

Abstract

This study compared moisture content measured by moisture meter of microwave resistance type(MMMRT) and standard moisture content of paddy, and developed the correction equation using linear and curvilinear regression analysis, and to explore its significance test. The correction factor according to the range of moisture content was developed to improve the measurement precision of MMMRT. The results were as followings.

The coefficients of determination of correction equation by linear and curvilinear regression analysis with comparing the MMMRT and standard moisture content were 0.946 and 0.968, respectively. The moisture content error of MMMRT and standard moisture content measured after the MMMRT were corrected by moisture content rate of every 5% using the correction equation by curvilinear regression analysis appeared with 0~0.5% and 0.9~1.8% respectively in the moisture content range of 15~20% and 20~25%.

Keywords : Moisture meter, Microwave resistance type, Paddy, Correction equation, Regression analysis

1. 서론

농산물의 함수율은 건조, 저장, 가공 및 유통공정에 있어서 인위적인 제어가 필요한 중요한 변수 중 하나이다. 최근에는 농산물의 대량 집·출하가 확산 보급되면서 농산물의 함수율을 비접촉, 비파괴적으로 빠르고 정확하게 측정할 수 있는 기술 개발이 크게 요구되고 있다. 특히 벼의 경우, 동일 포장의 물벼래도 수확시기와 이삭의 위치, 주위 조건에 따라 함수율의 변화 폭이 매우 크게 나타난다. 따라서 대량의 원료를 짧은 시기에 반입하여 처리하는 RPC에서는 수확 후 원료 반입 단계부터 벼의 품질과 중량을 산출하기 위해 함수율을 측정하고 있다. 또한 산물벼 반입 후 건조, 저장 및 가공 공정에서도 적절한 함수율 측정이 필요하기 때문에 이에 대한 신속하고 정확한 함수율 측정시스템이 절실히 요구되고 있는 실정이다.

벼의 함수율 측정방식은 함수율에 따른 전기저항을 이용한 간이식 단립수분계로부터 함수율과 성분까지 측정할 수 있는 분광분석법 및 수소자기공명을 이용한 비파괴적 측정방법에 이르기까지 다양한 방법과 기종이 상용화 및 연구 개발되어 왔다(Kim et al., 1998; Cho, 1993; Kim and Noh, 1999). 대량의 산물벼에 대한 함수율 측정방법으로는 크게 정전용량 방식, 고주파식 및 마이크로파 저항방식이 주를 이루고 있다. 그러나 시판 중인 함수율 측정계의 핵심적 부품은 외국에서 개발된 것으로서 국내에 설치·사용되기 전에 국내산 대상물에 대한 함수율측정 정밀도를 평가할 필요가 있다. 따라서 수입에 의존하고 있는 함수율 측정 장비의 국산화를 위한 많은 연구와 기술개발이 수행되어 왔고, 그 대표적인 사례를 살펴보면 다음과 같다. Cho 등(2000)은 산물벼 수매현장에서 사용 가능한 수분측정 장치의 개발로서 벼의 정전용량과 절연

This study was conducted by the research grant of the Chungbuk National University in 2008. The article was submitted for publication on 2010-04-01, reviewed on 2010-05-06, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2010-06-10. The authors are Hong Young Jeon, United States Department of Agriculture Agricultural Research Service, Tae Hwann Kang, KSAM member, Agriculture Science & Technology Research Institute, Chungbuk National University, and Chung Su Han, Professor, Dept. of Biosystems Engineering, Chungbuk National University. Corresponding author: C. S. Han, Professor, Dept. of Biosystems Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 361-763, Korea; Phone: 043-271-2580; Fax: 043-271-4413; E-mail: <hansu@chungbuk.ac.kr>.

저항을 측정하여 함수율에 따른 유전특성 구명하였고, 밀도 및 중량이 함수율 측정에 미치는 영향을 평가하였다. Kim 등(1999)은 고주파 임피던스를 이용한 곡류의 함수율 측정에 관한 연구에서 곡류의 전기적 특성을 구명하였고, 마이크로파 X 밴드 중심주파수인 10.5 GHz를 이용한 마이크로파 송수신 장치를 설계·제작하여 함수율 측정장치의 개발 가능성을 검토하였다. Chung 등(1999)은 함수율 차이에 따른 저주파 임피던스의 차이를 이용하여 함수율을 측정하였다. 그러나 고주파 저항방식 함수율계에 대한 연구와 정밀도 분석에 대한 실증 자료는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 고주파 저항방식 함수율계의 측정 정밀도를 분석하여 함수율 보정식을 개발하고, 보정계수를 산출하여 함수율 측정의 신뢰도를 높이는 데 그 목적이 있다.

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

공시재료는 경기도 수원에서 재배한 일품(초기함수율 25.2%, w.b.(이후 %로만 표시)) 및 다산(초기함수율 30.5%)과, 충청북도 청원군에서 재배한 추청(초기함수율 19.2%, 19.6%, 20.2%)을 사용하였다. 고주파 저항방식 함수율계에 의한 함수율 측정은 물벼를 자연 건조시키면서 함수율이 $1 \pm 0.5\%$ 정도 감소할 때마다 측정하였고, 최종 함수율 11% 내외까지 측정하였다.

나. 고주파 저항방식 함수율계의 측정 원리

고주파 저항방식 함수율계는 전량측정방식으로서 물벼전체에 대한 균일한 평균함수율을 얻을 수 있으며, 측정원리는 다음과 같다.

수분을 함유한 물질은 전극 측에서 보면, 그림 1과 같은 전기저항(R)과 정전용량(C)의 병렬회로와 같다고 할 수 있다. 따라서 전기저항 또는 정전용량을 측정하면 함수율을 알 수 있다. 일반적으로 수분은 피측정물질(곡류, 목재, 종이 등)에 비해 고유저항이 현저히 낮기 때문에 수분의 함유량에 따라 물질의 전기저항이 크게 변화한다. 그러므로 전기저항을 측정하면 물질의 함수율 측정이 가능하다. 고주파의 경우 전기

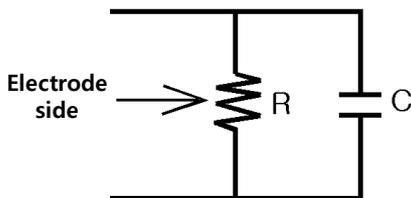


Fig. 1 Equivalent circuit.

저항과 정전용량은 상호 밀접한 관계가 있어, 전기저항(R)을 측정하는 경우, 정전용량(C)의 영향을 받지 않는 형태의 측정방법을 선택해야 한다.

그림 2는 rLC 병렬회로에 의한 함수율 검지원리도와 감쇠진동특성을 나타낸 것이다.

그림 2에서 나타낸 바와 같이 스위치 S를 닫으면, 코일 L에 전류 $I(=E/R)$ 가 흘러 안정되고, 코일에 전기에너지($=1/2 \cdot LI^2$)가 저장된다. S를 열면 코일의 전자에너지는 rLC에 의해 그림 3과 같은 진동을 일으키고, r에 의해서 에너지가 소비되기 때문에 서서히 진폭이 작아지는 감쇠특성이 나타난다. 여기서 r 대신 전극을 접속하고, 물질의 정전용량 C_x 로부터 회로정수 C를 $C \gg C_x$ 라고 하면, 감쇠파형은 물질의 전기저항 r_x 에 의해 특성이 변화한다.

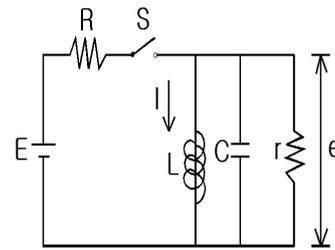
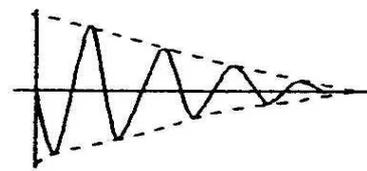
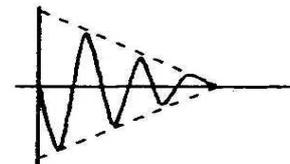


Fig. 2 Principle circuit of moisture content detecting.

그림 3에 물질의 전기저항 r_x 에 의한 감쇠파형 특성을 나타내었다. 그림 3에서 알 수 있듯이 함수율이 낮고 저항값 r_x 가 크면 감쇠파형은 완만하게 되고, 함수율이 높고 저항값이 작으면 급한 감쇠파형이 된다.



(a) Low moisture content (r_x is big)



(b) High moisture content (r_x is small)

Fig. 3 Attenuation vibration by electric resistance of moisture content.

그림 4는 본 실험에 사용한 고주파 저항방식 함수율계(PA-1700, SANKO, Japan)에 내장된 검출회로를 나타낸 것이다. 앞에서 설명한 스위치(S)대신에 트랜지스터(Tr1)를 이용한

구동신호에 의해 코일 L1에 흐르는 전류를 어떤 일정한 주기로 단속하고 있다.

TOME-56의 검출회로는 RCL 병렬회로이고, L1, C1, R1, r_x , C_x 로 구성되어 있다. 여기서 L1 = 89 μ , C1 = 560P, R1 = 200K, C_x = 2~3pF, r_x = 430K(155%), 200K(20%)인 정수이고, 검출회로의 발진 주파수는 약 700 kHz 이었다.

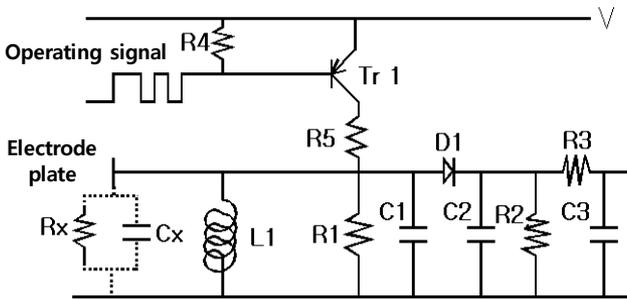


Fig. 4 Basic circuit of microwave resistance moisture meter.

다. 실험 방법

1) 고주파 저항방식 함수율계 정밀도

고주파 저항방식 함수율계의 정밀도를 알아보기 위해 드라이오븐법인 표준함수율(비교구)과 고주파 저항방식 함수율계(시험구)로 측정된 함수율을 비교하였다.

정밀도는 고주파 저항방식 함수율계로 측정된 함수율과 드라이오븐법(135°C-24h-10 g)으로 측정된 함수율을 비교하였다. 드라이오븐법은 고주파 저항방식 함수율계로 측정된 원료로부터 500 g의 시료를 채취하여 10±0.5 g을 칭량한 후 실험용건조기(SACO-31, SANCHEON CO., KOREA)에서 24 시간 건조하여 건조 전후의 무게비로 습량기준함수율(M_{135} , %)을 계산하였다. 또한 이 값을 105°C 표준함수율 보정식(1)을 이용하여 표준함수율(M_{105} , %)로 환산하였다.

$$M_{105} = 100 - 1.0121(100 - M_{135}) \quad (1)$$

where, M_{105} : Wet-basis moisture content converted into 10°C method

M_{135} : Wet-basis moisture content measured by 13°C method

2) 고주파 저항방식 함수율계의 보정식 개발

고주파 저항방식 함수율계의 함수율 보정식 개발은 함수율 별로 공시재료 80±10 kg을 호퍼에 투입하여 3~5회 반복으로 함수율을 측정하였다. 함수율 측정 간격은 함수율이 1±0.5% 감소할 때마다 측정하였으며, 동시에 표준함수율 측정방법으로도 함수율을 측정하였다. 함수율 측정은 고주파 저항방식

함수율계의 측정값이 11±0.5%가 될 때까지 측정하였고, 보정식은 고주파 저항방식 함수율계로 측정된 함수율과 표준함수율 측정법으로 측정된 함수율을 이용하여 선형 및 비선형 회귀식을 개발하였다.

3) 보정 후 검정실험

고주파 저항방식 함수율계의 정밀도 검정은 보정식을 고주파 저항방식 함수율계에 입력하여 함수율을 측정·비교해야 하지만, 본 실험에서는 장치의 특성상 보정식을 입력할 수 없기 때문에 함수율을 5% 간격으로 보정하는 방법을 사용하였다.

함수율을 5% 간격으로 보정하기 위한 보정계수의 결정은 고주파 저항방식 함수율계로 측정 가능한 범위의 함수율을 1% 단위로 보정식에 대입하여 함수율을 예측하고, 고주파 저항방식 함수율계로 측정 가능한 범위의 함수율과 예측된 함수율과의 차이를 구하여 5% 간격으로 산술평균한 값을 보정계수로 하였다. 보정을 실시한 후 전술한 바와 같이 원료비의 함수율을 낮춰가면서 고주파 저항방식 함수율계로 함수율을 측정하고, 표준함수율과 비교 분석하였다.

4) 통계적 검증

고주파 저항방식 함수율계로 측정된 함수율과 표준함수율과의 관계를 선형 및 비선형회귀보정식과 그에 따른 상관계수를 구하였다(Baek et al., 1994). 개발된 회귀보정식의 회귀계수에 대해서는 F-검정을 실시하였고, 유의성 검정은 t 검정을 실시하였다(Sumi, 1987). 통계분석은 SAS Release 9.0을 사용하였다(Kim, 2004).

3. 결과 및 고찰

가. 고주파 저항방식 함수율계의 측정 정밀도

표 1은 보정을 하지 않은 고주파 저항방식 함수율계로 측정된 함수율과 표준함수율과의 오차분포를 나타낸 것이다. 표 1에서의 오차분포 값은 전체 측정횟수 216회에 대하여 비의 초기함수율과 측정오차에 따라 측정오차가 발생한 횟수를 나타낸 것이다.

표 1에서 알 수 있듯이 표준함수율이 15% 이상인 경우에는 측정오차가 큰 것으로 나타났고, 표준함수율 15% 미만에서는 적은 것으로 나타났다.

보정하지 않은 고주파 저항방식 함수율계로 측정된 함수율과 표준함수율과의 측정오차가 4% 이상인 경우는 전체의 17.6%를 차지하였고, 3~4%의 오차를 나타낸 경우는 21.8%이었으며, 함수율 오차가 각각 2~3%, 1~2%, 0.5~1%, 0~0.5% 발생하는 경우는 각각 28.7%, 19.9%, 6.5%, 3.2%로 나타났다.

Table 1 Error distribution of moisture content measured by standard oven method and MMMRT not corrected

Error of Standard moisture content and MMMRT (%)	5~6	4~5	3~4	2~3	1~2	0.5~1	0~0.5
Standard moisture content (%)							
25~30	7	7	3	8	6	6	7
20~25	-	7	9	16	16	7	-
15~20	2	15	31	32	16	1	-
10~15	-	-	4	6	5	-	-
Total	9	29	47	62	43	14	7
Error occurrence ratio (%)	4.2	13.4	21.8	28.7	19.9	6.5	3.2

이것은 보정계수에 의해 고주파 저항방식 함수율계를 보정하지 않고 함수율을 측정하였기 때문이라 사료되고, 보정계수를 결정하여 고주파 저항방식 함수율계를 보정하면 표준함수율과의 오차를 줄일 수 있다고 판단된다. 따라서 보정하지 않은 고주파 저항방식 함수율계의 함수율 측정결과와 표준함수율 측정결과와의 오차를 줄이기 위한 회귀보정식 개발은 다음과 같이 선형 및 비선형회귀분석으로 실시하였다.

나. 고주파 저항방식 함수율계의 함수율 보정식 개발

1) 선형회귀분석

그림 5는 고주파 저항방식 함수율계로 측정한 함수율과 표준함수율과의 관계를 나타낸 것이다.

그림 5에서와 같이 고주파 저항방식 함수율계로 측정한 함수율과 표준함수율에 대하여 선형회귀분석을 한 결과, 상관계수와 결정계수는 각각 0.973과 0.946으로 매우 높은 정밀도를 나타내었으나, 함수율이 12% 이하에서는 오차가 크게 발생하므로 다음 절에서 비선형 회귀분석을 실시하였다. 식 (2)는 선형회귀분석으로부터 개발된 보정식을 나타낸 것이다.

$$Y = 0.642X + 8.347 \quad (2)$$

표 2에 선형회귀에 의한 분산분석결과를 나타내었다.

표 2에 나타난 값들은 회귀계수 $b=0$ 이라고 가정한 귀무가설에 대해서 기각 또는 수락을 결정하기 위한 것으로 측정된 함수율의 분산비는 3745.51이며, F 분포표에서 자유도(1, 212)인 값을 찾아보면, $F_{212}^1(0.05)=3.89$, $F_{212}^1(0.01)=6.76$ 이다. 따라서 $F \gg F_{212}^1(0.05) \gg F_{212}^1(0.01)$ 이므로, $b=0$ 이라는 귀무가설은 기각되고, 개발한 선형회귀보정식의 기울기가 존재하는 것을 알 수 있다.

표 3에 회귀계수의 통계적 분석을 나타냈다. 측정된 함수율의 선형 회귀보정식에 대한 회귀계수가 $a=0$ 혹은 $b=0$ 일 가능성을 검증하였다. 일반적으로 사용되는 t-검정으로부터

계산된 t값은 $t_a=38.556$, $t_b=61.201$ 이고, t분포표에서 $t_{(212, 0.005)}=2.834$, $t_{(212, 0.001)}=3.332$ 이다. 따라서 표 3에 나타난 회귀계수의 $t_a \gg t_{(212, 0.001)}$, $t_b \gg t_{(212, 0.001)}$ 이므로, 회귀계수 $a=0$ 혹은 $b=0$ 이라는 가설은 기각되고, 회귀계수는 고도의 유의성이 있는 것으로 검증되었다.

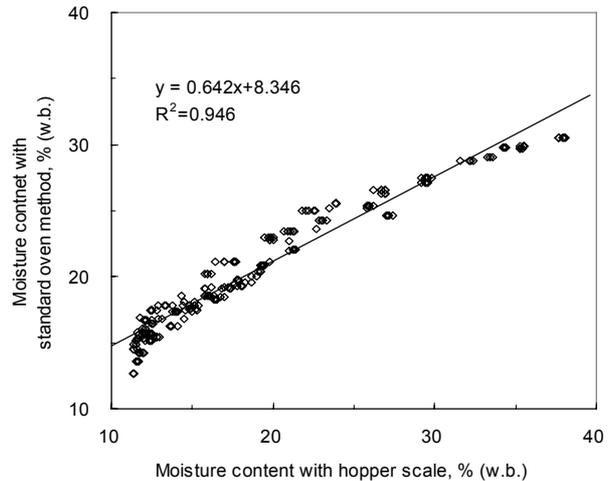


Fig. 5 Comparison of moisture content measured by standard oven method and MMMRT not corrected by linear regression analysis.

Table 2 Analysis of variance by linear regression analysis

Source	DF	Sum of Square	Mean Square	F value
Model	1	4695.41	4695.41	3745.51
Error	212	265.77	1.24	-
C Total	213	4961.17	-	-

Table 3 Regression coefficient of linear regression equation by statistical analysis

Variable	Parameter estimate	Standard error	t value	Confidence limits:95%	
				Upper	Lower
Intercept (a)	8.347	0.217	38.556	8.804	7.951
Slope (b)	0.642	0.010	61.201	0.661	0.620

2) 비선형회귀분석

그림 6은 SAS를 이용하여 고주과 저항방식 함수율계로 측정한 함수율과 표준함수율과의 관계를 비선형회귀 분석한 것이다.

그림 6에서와 같이 고주과 저항방식 함수율계로 측정한 함수율과 표준함수율에 대한 비선형 회귀분석결과 결정계수는 0.968로 전술한 선형회귀 분석결과보다 결정계수가 높게 나타났다. 따라서 고주과 저항방식 함수율계로 함수율 측정시 선형 회귀보정식보다 함수율측정 정밀도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 개발된 비선형 회귀보정식을 식 (3)에 나타내었다.

$$Y = -0.013X^2 + 1.256X + 2.233 \quad (3)$$

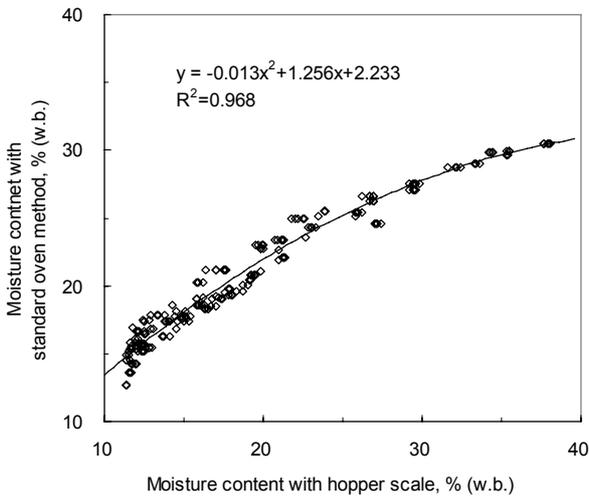


Fig. 6 Comparison of moisture content measured by standard oven method and MMMRT not corrected by nonlinear regression analysis.

표 4에 비선형 회귀보정식의 분산분석결과를 나타내었다. 표 4에 나타냈듯이 분산비는 3242.78이며, F 분포표에서 자유도(2, 211)인 값을 찾아보면, $F_{211}^2(0.05) = 3.04$, $F_{211}^2(0.01) = 4.72$ 이다. 따라서 $F \gg F_{211}^2(0.05) \gg F_{211}^2(0.01)$ 이므로, 귀무가설은 기각되고, 회귀계수가 존재하는 것으로 설명할 수 있다.

Table 4 Analysis of variance by nonlinear regression analysis

Source	DF	Sum of Square	Mean Square	F value
Model	2	4804.85	2402.43	3242.78
Error	211	156.32	0.74	-
C Total	213	4961.17	-	-

표 5에 비선형 회귀계수의 통계적 분석을 나타냈다. 표 5에 나타난 바와 같이 t값은 $t_a = 4.215$, $t_b = 24.543$, $t_c = -12.154$ 으

로, t분포표에서 $t_{(211, 0.005)} = 2.837$, $t_{(211, 0.001)} = 3.335$ 보다 크기 때문에 귀무가설은 기각되고, 회귀계수는 고도의 유의성이 있는 것으로 검증되었다.

Table 5 Regression coefficient of nonlinear regression equation by statistical analysis

Variable	Parameter estimate	Standard error	t value	Confidence limits:95%	
				Upper	Lower
Intercept (a)	2.233	0.530	4.215	3.277	1.189
Slope (b)	1.256	0.051	24.543	1.356	1.156
Slope (c)	-0.013	0.001	-12.154	-0.011	-0.015

다. 보정 후 검증실험

1) 선형 회귀보정식에 의한 검증

표 6은 보정을 하지 않은 고주과 저항방식 함수율계의 함수율과 선형 회귀보정식을 이용하여 예측한 표준함수율과의 오차를 함수율 5% 단위로 산술 평균하여 보정계수로 나타낸 것이다.

각 구간별 보정계수는 함수율이 11~15%, 16~20%, 21~25%, 26~30%, 30~35%, 35~40% 범위에서 각각 3.7%, 1.9%, 0.1%, -1.7%, -3.5%, -5.3%로 나타났다.

그림 7은 선형 회귀보정식을 이용하여 함수율 5% 단위로 결정된 보정계수로 고주과 저항방식 함수율계를 보정하였을 때 함수율과 표준함수율과의 관계를 나타낸 것이다.

그림 7에 나타냈듯이 고주과 저항방식 함수율계를 보정한 후 측정함수율과 표준함수율과의 오차는 함수율 10~20%의 경우 0.1~1.0%의 오차를 나타냈고, 20~25%의 구간에서는 1.0~1.3%의 오차가 발생하였다.

한편, 이와 같이 보정을 실시함에도 불구하고 오차가 존재하는 이유는 보정을 하지 않은 고주과 저항방식 함수율계의 함수율과 예측한 표준함수율과의 오차를 함수율 5% 단위로 산술 평균하여 보정계수로 입력하였기 때문이다. 따라서 측정정밀도를 높이기 위해서는 5% 단위로 보정하는 것보다 보정식을 입력하거나, 2~3% 단위로 보정계수를 결정하여 함수율을 측정하는 것이 오차를 감소시킬 수 있을 것이라고 사료된다.

(2) 비선형 회귀보정식에 의한 검증

표 7은 보정을 하지 않은 고주과 저항방식 함수율계의 함수율과 비선형 회귀보정식을 이용하여 예측한 표준함수율과의 오차를 함수율 5% 단위로 산술 평균하여 보정계수로 나타낸 것이다.

구간별 함수율 보정계수는 11~15%, 16~20%, 21~25%, 26~30%, 30~35%, 35~40%의 함수율 범위에서 각각 3.3%,

Table 6 Correction factor calculated by linear regression equation

Range of moisture content (%)	Moisture content of MMMRT A (%)	Estimated moisture content B (%)	Error A-B (%)	Average of correction factor (%)
11~15	11	15.4	4.4	3.7
	12	16.1	4.1	
	13	16.7	3.7	
	14	17.3	3.3	
	15	18.0	3.0	
16~20	16	18.6	2.6	1.9
	17	19.3	2.3	
	18	19.9	1.9	
	19	20.5	1.5	
	20	21.2	1.2	
21~25	21	21.8	0.8	0.1
	22	22.5	0.5	
	23	23.1	0.1	
	24	23.8	-0.2	
	25	24.4	-0.6	
26~30	26	25.0	-1.0	-1.7
	27	25.7	-1.3	
	28	26.3	-1.7	
	29	27.0	-2.0	
	30	27.6	-2.4	
31~35	31	28.3	-2.8	-3.5
	32	28.9	-3.1	
	33	29.5	-3.5	
	34	30.2	-3.8	
	35	30.8	-4.2	
36~40	36	31.4	-4.5	-5.3
	37	32.1	-4.9	
	38	32.7	-5.3	
	39	33.4	-5.6	
	40	34.0	-6.0	

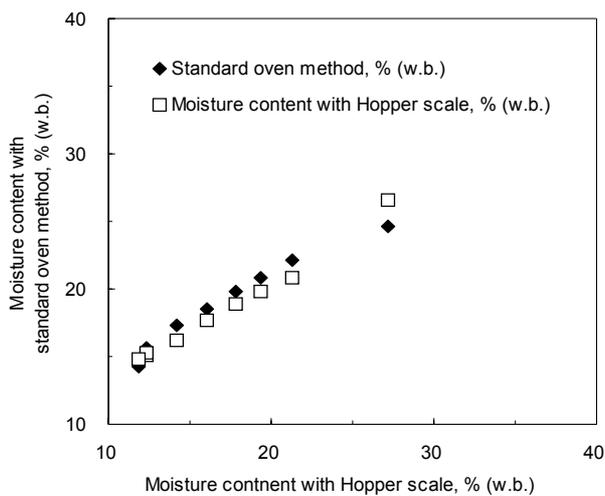


Fig. 7 Comparison of standard moisture content and MMMRT moisture content corrected in 5% by linear regression equation.

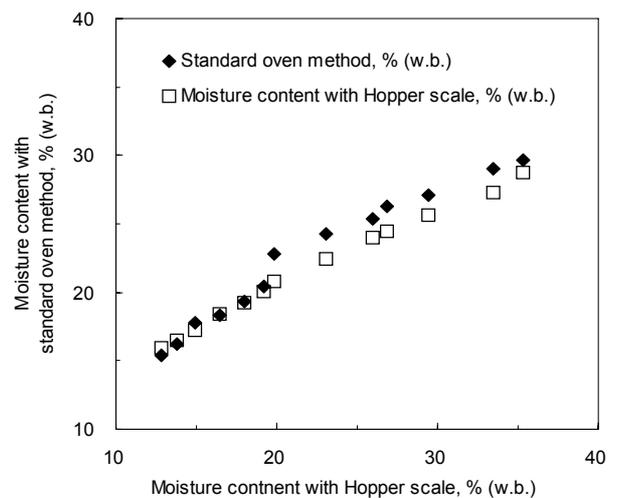


Fig. 8 Comparison of Standard moisture content and MMMRT moisture content corrected in 5% by nonlinear regression equation.

2.4%, 1.0%, -1.2%, -4.0%, -7.5%를 보정하였다.

그림 8은 비선형 회귀보정식에 의해 함수율 5% 단위로 보

정계수를 결정하여 고주파 저항방식 함수율계를 보정한 후 측정함수율과 표준함수율과의 차이를 나타낸 것이다.

그림 8에서와 같이 보정을 실시한 후 표준함수율을 기준으로 하여 함수율 15~20%, 20~30%의 구간에서는 각각 0~0.5%, 0.9~1.8%의 측정오차가 발생하였다. 비선형 회귀보정식을 이용한 보정계수에 의해 보정을 할 경우, 15~20% 범위의 함수율에서 측정 오차는 0.5% 이하로 정밀도가 가장 높게 나타났고, 함수율이 20%를 넘는 경우에는 측정오차가 커지는 경향을 나타냈다.

한편 고주파 저항방식 함수율계를 비선형 회귀보정식에 의하여 보정하였을 때, 측정함수율의 표준오차는 0.87로 선형 회귀보정식에 의한 표준오차보다 0.06% 정도 높은 경향을 보였다. 따라서 측정정밀도를 높이기 위해서는 전술한 바와 같이 회귀 보정식을 직접 이용하거나, 보정계수 결정시 함수율구간을 5%에서 2~3%로 낮추어 평균보정계수를 결정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 고주파 저항방식 함수율계로 측정한 함수율과 표준측정법에 의한 함수율과의 정밀도를 비교하고, 선형 및 비선형 회귀보정식을 개발하여 이에 대한 유의성을 검증하였다. 또한 함수율 구간별 보정계수를 개발하고, 이에 대한 검증 및 함수율 정밀도를 높이는 방안을 제안하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 고주파 저항방식 함수율계를 보정하지 않고 함수율을 측정하였을 경우, 표준함수율과의 측정오차가 4% 이상인 경우는 전체의 17.6%를 차지하였고, 3~4%의 오차를 나타낸 경우는 21.8%이었으며, 함수율 오차가 각각 2~3%, 1~2%, 0.5~1%, 0~0.5% 발생하는 경우는 각각 28.7%, 19.9%, 6.5%, 3.2%로 나타났다.
- (2) 고주파 저항방식 함수율계로 측정한 함수율과 표준함수율에 대한 선형 및 비선형 회귀보정식은 결정계수가 선형 회귀보정식이 0.946, 비선형 회귀보정식이 0.968로 실용상에 있어서 매우 정밀도가 높은 것으로 나타났다.
- (3) 개발된 선형 및 비선형 회귀보정식에 대한 회귀계수는 t 분포에 있어서 0.1% 유의수준의 t 값보다 크기 때문에 고도의 유의성이 있는 것으로 나타났다.

- (4) 함수율 5% 단위로 선형 및 비선형 회귀보정식에 의한 보정계수를 결정하여 고주파 저항방식 함수율계를 보정한 후 측정함수율과 표준함수율과의 오차는 선형회귀의 경우 함수율 10~20%, 20~25%의 구간에서 각각 0.1~1.0%, 1.0~1.3%로 나타났고, 비선형회귀의 경우 함수율 15~20%, 20~30%의 구간에서 각각 0~0.5%, 0.9~1.8%로 나타나 함수율이 낮은 부분에서는 비선형 회귀보정식이 함수율이 높은 부분에서는 선형회귀 보정식이 표준함수율과의 오차가 적은 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Baek, S. B., E. S. Doh, J. C. Koh and G. S. Ho. 1994. Experimental Statistics. Konkuk University Press, Seoul, Korea.
2. Cho, S. I. 1993. Development of nondestructive moisture sensor for agricultural products using hydrogen NMR-feasibility experiments. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 18(3):252-261. (In Korean)
3. Cho, S. I., C. H. Chung and C. W. Kim. 2000. Development of a capacitance type moisture meter for rough rice. Journal of the Food Engineering Progress 4(2):104-109. (In Korean)
4. Chung, C. H., S. I. Cho, K. B. Kim and Y. S. Park. 1999. Development of moisture meter for paddy rice using electrical impedance. Journal of the Food Engineering Progress 3(1):40-44. (In Korean)
5. Kim, C. L. 2004. Statistical Analysis using SAS. Data Research, Seoul, Korea.
6. Kim, J. M., C. H. Choi, B. K. Min and J. H. Kim. 1998. Development of prediction model for moisture and protein content of single kernel rice using spectroscopy. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 23(1):49-56. (In Korean)
7. Kim, K. B. and S. H. Noh. 1999. Measurement of grain moisture content using RF impedance-Electrical properties of grain-. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 24(2):123-134. (In Korean)
8. Kim, K. B., J. H. Kim and S. H. Noh. 1999. Development of moisture content measurement device for paddy rice using microwave free space transmission. Journal of the Korean Society for Agricultural Machinery 24(3):235-242. (In Korean)
9. Sumi, A. 1987. Moisture meter for grain hopper scale. Journal of Senshu Univ., Hokkaido (Nat. Sci.) 20:209-217. (In Japanese)