

호퍼형 로터리 이송 구조를 적용한 전기저항식 곡물수분측정기의 개발 및 성능평가

이소영*, 허성필**

Development and Performance Evaluation of an Electrical Resistance - based Grain Moisture Meter Employing a Hopper-Type Rotary Feeding Structure

So-Yeong Lee*, Sung-Phil Heo**

본 논문은 2023년도 중소벤처기업부의 재원으로 중소기업기술정보진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(S3382605)

요 약

곡물의 함수율은 수확 이후 건조, 저장 및 유통 과정 전반에 걸쳐 품질과 경제성에 영향을 미치는 핵심 관리 지표이다. 본 연구에서는 호퍼형 구조와 로터리 이송 방식을 적용한 전기저항식 곡물수분측정기(KM-30)를 개발하고, 곡물 시료를 대상으로 함수율 측정에 대한 성능 평가를 수행하였다. 실험은 이물질을 제거한 50개의 낱알 시료를 이용하여 수행하였으며, 기준 함수율은 전건법에 따라 산출된 값을 사용하였다. ADC 출력과 함수율 간의 관계를 표준곡선으로 분석하고, 회귀모델 기반 함수율 추정 및 민감도(dM/dADC) 특성을 평가하였다. 또한 한국산업기술시험원(KTL)에서 수행한 교정성적서 결과를 바탕으로 측정 성능의 정합성을 확인하였다. 그 결과 KM-30은 함수율 약 14% - 23% 범위에서 기준 함수율 대비 측정 오차가 $\pm 1.0\%$ 이내로 분포함을 확인하였다.

Abstract

Grain moisture content is a key management indicator that affects quality and economic efficiency throughout post-harvest processes such as drying, storage, and distribution. In this study, an electrical resistance - based grain moisture meter (KM-30) employing a hopper-type structure and a rotary feeding mechanism was developed, and its performance in moisture measurement was evaluated using grain samples. Experiments were conducted using 50 cleaned single-kernel samples, and reference moisture content values were obtained according to the oven-dry method. The relationship between ADC output and moisture content was analyzed through standard curve construction, and regression-based moisture estimation and sensitivity (dM/dADC) characteristics were evaluated. In addition, measurement performance consistency was examined based on calibration results issued by the Korea Testing Laboratory (KTL). As a result, the KM-30 exhibited moisture measurement errors within $\pm 1.0\%$ relative to the reference moisture content over a moisture range of approximately 14% - 23%.

Keywords

grain moisture measurement, electrical resistance method, standard curve analysis, performance evaluation

* 국립강릉원주대학교 의료기기융복합학과 석사과정
- ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6822-8283>

** 국립강릉원주대학교 교수(교신저자)
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6786-3300>

• Received: Dec. 19, 2025, Revised: Jan. 08, 2026, Accepted: Jan. 11, 2026

• Corresponding Author: Sung-Phil Heo
Gangneung-Wonju National University, Wonju-si, Gangwon-do, 26403, Korea
Tel.: 82+33-760-8255, Email: spheo@gwnu.ac.kr

1. 서 론

곡물의 함수율은 수확 이후 건조, 저장, 유통 및 가공 전반에 걸쳐 품질과 경제성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 관리 지표이다. 함수율이 적정 범위를 벗어날 경우 저장 중 곰팡이 발생, 품질 저하, 감모율 증가 등의 문제가 발생할 수 있으며, 이는 농산물의 상품성 저하와 경제적 손실로 직결된다. 이러한 수확 후 공정 흐름과 함수율 관리의 중요성은 그림 1에 개략적으로 나타내었다[1]. 이러한 이유로 곡물의 함수율을 정확하게 측정하고 관리하는 것은 수확 후 관리 공정에서 매우 중요한 요소로 인식되고 있다[2].

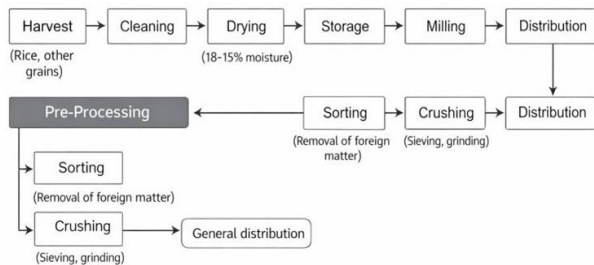


그림 1. 수확 이후 곡물의 건조·저장·가공 공정 흐름과 함수율 관리의 중요성

Fig. 1. Post-harvest grain processing flow and the role of moisture content management

특히 벼와 쌀은 국내 주요 식량 작물로서 함수율 변화에 민감한 특성을 갖는다. 벼의 경우 수확 시 함수율이 높아 적절한 건조 관리가 필수적이며, 건조 및 저장 과정에서의 함수율 편차는 품위 저하와 감모 발생의 주요 원인이 된다. 이러한 특성으로 인해 벼와 쌀은 수확 이후 단계에서 함수율 관리의 중요성이 더욱 강조되는 곡종에 해당한다[3][4].

국내 농업 현장에서는 수확 후 건조 및 저장 공정이 대부분 지역 단위 시설이나 농가 단위에서 수행되고 있으며, 이 과정에서 함수율 측정 결과는 건조 종료 시점 결정, 저장 가능 여부 판단, 수매 기준 설정 등 다양한 의사결정의 기초 자료로 활용된다. 따라서 함수율 측정 결과의 신뢰성은 단순한 계측 정확도를 넘어, 농산물 유통 및 품질 관리 전반에 영향을 미치는 중요한 요소로 작용된다[5].

현재 농업 현장에서는 전기저항식 곡물수분측정기가 널리 사용되고 있으며, 해외 상용 장비가 사실

상 표준 장비로 활용되고 있다. 이러한 장비들은 비교적 안정적인 측정 성능을 제공하고 있으나, 장비 도입 및 유지·보수 비용 부담, 국내 재배 품종에 대한 최적화 부족 등의 한계가 지속적으로 지적되고 있다[6]. 또한 시료 투입 및 이송 과정에서의 이물질 걸림, 측정 조건 변화에 따른 반복성 저하 등 구조적 문제 역시 현장 적용 과정에서 개선이 요구되고 있다.

전기저항식 곡물수분측정기는 곡물의 함수율 변화에 따른 전기적 특성 변화를 이용하는 방식으로, 측정 원리가 비교적 단순하고 응답 속도가 빠르다는 장점이 있다. 그러나 함수율과 전기적 특성 간의 관계는 비선형적이며, 함수율 구간에 따라 민감도 및 오차 특성이 상이하게 나타난다[7]. 따라서 측정 성능을 단일 정확도 지표로 평가하기보다는 ADC(Analog Digital Converter) 출력과 함수율 간의 표준곡선 형태, 구간별 오차 분포, 민감도 특성을 종합적으로 분석할 필요가 있다[8].

본 연구는 이러한 배경을 바탕으로 호퍼형 구조와 로터리 이송 방식을 적용한 전기저항식 곡물수분측정기(KM-30)를 개발하고, 해당 장치의 측정 특성을 기존 상용 장비인 기존 해외 곡물수분측정기와 비교·분석하는 것을 목적으로 한다. 특히 현장 적용 과정에서 문제로 지적되어 온 시료 이송의 안정성, 반복 측정 시 신뢰성, 함수율 구간별 응답 특성에 주목하여 장치 구조와 측정 결과 간의 관계를 분석하고자 한다.

아울러 곡물수분측정기의 성능 평가는 단순한 단일 오차 값 비교에 국한되지 않고, 함수율 전 범위에서의 표준곡선 형태, 측정값 분포 특성, 구간별 민감도 변화 등을 종합적으로 고려할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 ADC 출력과 함수율 간의 관계를 표준곡선으로 정리하고, 회귀모델 기반 함수율 추정 결과와 민감도(dM/dADC) 분석을 통해 KM-30의 성능을 다각적으로 평가하고자 한다. 이를 통해 본 연구는 국산 곡물수분측정기의 성능 검증에 대한 정량적 근거를 제시하고, 향후 현장 적용 및 성능 개선을 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목표로 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제II장에서는 곡물 함수율 측정 기술과 관련된 선행 연구를 고찰하고, 기존 연구의 한계와 본 연구의 차별성을 정리한

다. 제Ⅲ장에서는 호퍼형 구조와 로터리 이송 방식을 적용한 KM-30 곡물수분측정기의 시스템 구성과 각 구성 요소의 역할을 설명한다. 제Ⅳ장에서는 실험 시료, 비교 장비, 측정 절차 및 데이터 분석 방법을 포함한 실험 방법을 제시한다. 이후 제Ⅴ장에서는 ADC - 함수를 표준곡선, 오차 분포, 회귀모델 기반 함수를 추정, 민감도 분석 및 교정성적서 기반 성능 고찰을 통해 실험 결과를 분석하고, 제Ⅵ장에서는 연구 결과를 종합하여 결론을 제시한다.

II. 관련 연구

곡물 함수율 측정 기술은 크게 전기저항식, 정전용량식, 근적외선(NIR, Near-Infrared), 마이크로파 방식 등으로 구분된다. 이 중 전기저항식은 곡물의 함수율 변화에 따른 전기적 특성 변화를 이용하는 방식으로, 구조가 비교적 단순하고 측정 응답 속도가 빠르며 현장 적용성이 높다는 장점이 있다. 이러한 특성으로 인해 휴대형 곡물수분측정기 및 현장용 계측 장비에 널리 활용되고 있다.

전기저항식 곡물수분측정기에 관한 선행 연구에서는 함수율과 전기적 신호 간의 비선형 관계를 설명하기 위해 다양한 회귀모델이 적용되어 왔다[8]. 다수의 연구에서는 전극 간 저항 또는 ADC 출력과 기준 함수율 간의 관계를 회귀식으로 근사하고, 이를 통해 함수율을 추정하는 방식을 제안하였다. 특히 표준 건조법(전건법, Oven-dry method)을 기준으로 측정값을 교정하고, 해당 기준 함수율과 계측 신호 간의 상관관계를 분석하는 연구가 다수 보고되었다[9]. 이와 같은 연구들은 전기저항식 측정 방식의 기본적인 유효성을 검증하는 데 기여하였으나, 측정 결과의 해석은 주로 평균 오차나 상관관계 수준에 국한되는 경우가 많았다. 함수율 구간에 따른 응답 특성 변화, 표준곡선의 형태적 특성, 민감도 변화에 대한 정량적 분석은 상대적으로 제한적으로 다루어졌다.

정전용량식 및 근적외선(NIR) 기반 함수율 측정 방식에 대한 연구 역시 활발히 수행되어 왔다[9]. 정전용량식은 비접촉 또는 저접촉 방식으로 측정이 가능하다는 장점이 있으며, 근적외선 방식은 다변량

분석을 통해 비교적 높은 정확도를 확보할 수 있는 것으로 보고되고 있다. 그러나 이러한 방식들은 측정 환경 변화에 민감하거나, 장비 구성 및 비용 측면에서 현장 적용에 제약이 존재하는 한계가 있다. 이에 따라 농업 현장에서는 여전히 전기저항식 방식이 실용적인 대안으로 활용되고 있다[10]. 최근에는 국내 학회에서도 센서 및 계측 시스템을 대상으로 신호 처리 및 측정 성능 분석에 관한 연구가 보고되고 있다[11][12]. 이러한 연구들은 측정 신호의 안정성 확보와 시스템 성능평가 방법론 측면에서 본 연구와 유사한 기술적 맥락을 갖는다.

국내에서는 곡물 함수율 측정의 기준 확립을 목적으로 전건법에 의한 표준 교정 절차, 곡종별 함수율 환산, 수확 후 감모율 분석 등에 관한 연구가 수행되어 왔다. 또한 곡물수분측정기의 정확도 및 신뢰성 확보를 위한 기술 기준과 교정 절차가 제시되었으나, 이러한 기준을 실제 국산 측정기 개발 과정에서 체계적으로 적용하고, 상용 장비와의 비교를 통해 성능을 종합적으로 평가한 연구는 제한적인 실정이다[13]-[15].

선행연구 고찰 결과, 기존 연구들은 개별 측정 원리의 타당성이나 단일 조건에서의 정확도 검증에 초점을 두는 경향이 있었으며, 표준곡선 형태, 측정값 분포 특성, 함수율 구간별 민감도(dM/dADC) 변화, 교정 결과 등을 종합적으로 고려한 성능평가 연구는 충분히 이루어지지 않았다. 특히 기존 연구들은 개별 측정 원리의 유효성 검증에 초점을 두는 경향이 있었으며, 측정 구조와 시료 이송 방식이 포함된 시스템을 대상으로 표준곡선 형태, 측정값 분포, 민감도 특성 등을 종합적으로 평가한 사례는 상대적으로 부족하였다.

본 연구는 이러한 선행 연구의 한계를 보완하고자, 호퍼형 구조와 로터리 이송 방식을 적용한 전기저항식 곡물수분측정기(KM-30)를 개발하였으며, 개발 제품을 대상으로 기존 해외 곡물수분측정기와의 비교 실험을 수행한다. 또한 ADC - 함수율 표준곡선, 오차 분포, 회귀모델 기반 함수율 추정, 민감도(dM/dADC) 분석을 포함한 다각적인 성능평가를 통해 국산 곡물수분측정기의 측정 특성을 정량적으로 분석하고자 한다.

III. 곡물수분측정기 설계 및 시스템 구성

제안하는 곡물수분측정기는 시료공급부 - 이송부 - 측정부 - 제어부로 구성된 일체형 구조를 갖는다. 본 장치의 설계는 현장 적용성을 고려하여 시료 투입 안정성, 반복 측정 신뢰성 및 측정 조건 재현성 확보를 핵심 목표로 하였다.

3.1 호퍼형 구조의 시료공급부 설계

시료공급부는 곡물 시료를 안정적으로 저장·공급하기 위한 호퍼형 구조로 설계되었으며, 해당 시료 투입 구조는 그림 2에 나타내었다. 중력 기반의 자연 낙하 방식을 적용하여 시료가 이송부로 원활하게 공급되도록 하였으며, 이 과정에서 시료 막힘이나 이물질 걸림 현상을 최소화하는 것을 설계 목표로 하였다. 이러한 구조는 시료 투입 과정에서의 불규칙성을 완화하고, 측정 조건의 일관성을 확보하는데 기여한다.

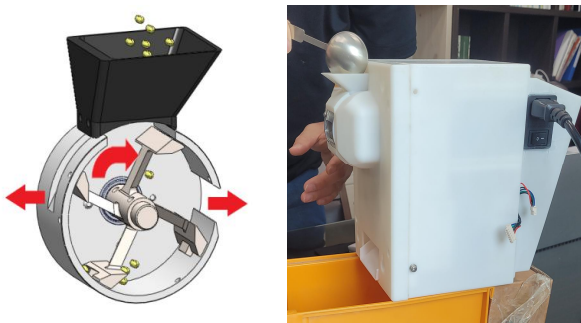


그림 2. 호퍼형 구조 시료 투입구
Fig. 2. Hopper-type sample inlet

3.2 로터리 이송 방식의 이송부 설계

이송부는 로터리 이송 방식을 적용하여 시료를 단일 낱알 단위로 측정부에 공급하도록 설계되었으며, 해당 이송 메커니즘의 개략적인 구조는 그림 3에 나타내었다. 회전 동작을 통해 시료의 중첩을 방지하고, 측정부 유입 시 시료량의 변동을 최소화함으로써 측정 안정성이 확보되도록 하였다. 해당 이송 구조는 연속 측정 환경을 고려하여 설계된 것으로, 반복 측정 시 신호 변동을 완화하는 역할을 수행한다.

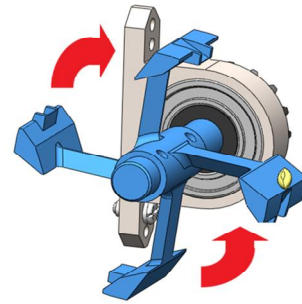


그림 3. 로터리 이송부
Fig. 3. Rotary feeding unit

3.3 전기저항식 함수울 측정부 설계

측정부는 전기저항식 함수울 측정을 위한 핵심 구성 요소로서, 시료를 파쇄하여 전극과 접촉시키는 파쇄 전극 구조를 적용하였다. 시료가 측정부로 유입되면 로터리 이송 과정을 통해 단일 낱알 상태로 공급되며, 이후 측정부 내부에서 낱알이 부분적으로 파쇄된다. 이러한 파쇄 과정은 곡물의 외피 및 내부 구조를 분해하여 전극과의 접촉 조건을 보다 균일하게 형성하고, 시료 상태에 따른 접촉 저항 변동을 완화하는 것을 목적으로 한다. 시료 이송에 따른 파쇄 개념을 그림 4에 나타내었다.

파쇄된 시료는 전극 사이에 안정적으로 위치하게 되며, 이를 통해 측정 과정에서 발생할 수 있는 미끄러짐이나 접촉 불균일로 인한 신호 변동을 감소시킨다. 이러한 구조적 특성은 반복 측정 시 측정값의 재현성을 확보하고, 함수율 구간 전반에서 보다 안정적인 전기적 응답을 획득하기 위한 설계 요소에 해당한다.

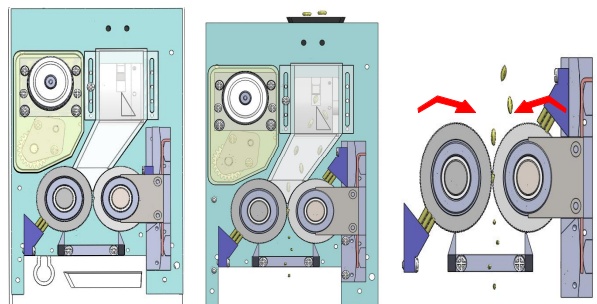


그림 4. 시료 이송에 따른 파쇄 개념
Fig. 4. Concept of fragmentation due to sample transfer

3.4 인터페이스 및 제어·표시부 설계

제어·표시부는 측정부에서 획득된 전기적 신호를 처리하고, 함수율 측정 결과를 사용자에게 직관적으로 제공하기 위한 구성 요소이다. 본 장치는 마이크로컨트롤러 기반 제어 구조를 적용하여 측정 시퀀스 제어, 데이터 획득 및 연산 처리를 수행하도록 설계되었다. 측정 결과는 제어·표시부를 통해 실시간으로 사용자에게 제공되며, 본 연구에서 구현한 인터페이스 디스플레이 표시부의 구성은 그림 5에 나타내었다.

측정 과정에서 파쇄 전극 구조를 통해 획득된 전기적 신호는 ADC 변환 과정을 거쳐 디지털 데이터로 저장되며, 해당 데이터는 사전에 설정된 함수율 변환 절차에 따라 처리된다. 제어부는 측정 조건의 일관성을 유지하기 위해 측정 시작 및 종료 시점을 제어하고, 반복 측정 시 동일한 동작 순서가 유지되도록 구성하였다.

표시부는 처리된 함수율 결과를 실시간으로 출력하는 역할을 하며, 측정 결과 확인 및 장치 운용의 편의성을 확보하기 위한 인터페이스로 활용된다. 이를 통해 사용자는 별도의 외부 장비 없이도 측정 결과를 즉시 확인할 수 있으며, 현장 환경에서의 활용성을 고려한 사용자 중심의 구조를 갖는다.

이와 같은 제어·표시부의 구성은 KM-30 곡물수분측정기의 측정 과정 전반을 안정적으로 관리하고, 반복 측정 시 측정 조건 재현성을 확보하는 데 기여하는 요소에 해당한다.



그림 5. 인터페이스 디스플레이 표시부

Fig. 5. Interface display unit

IV. 실험 방법

4.1 실험 시료 및 조건

본 연구에서는 KM-30 곡물수분측정기의 측정 특성을 평가하기 위하여 국내 주요 곡종인 백미(쌀)를 주요 실험 시료로 선정하였다. 시료는 측정 전 이물질을 제거한 후 총 50개의 낱알 시료를 확보하여 준비하였으며, 이러한 시료 수는 기존 전기저항식 곡물수분측정기에서 일반적으로 적용되는 표준적인 측정 조건에 해당하며, 개발 중인 제품 또한 기존 상용 장비와의 비교 가능성을 확보하기 위해 동일한 기준을 적용하였다. 이를 통해 본 연구에서는 백미를 대상으로 한 전기저항식 함수율 측정에서, 측정 구조 및 이송 방식이 반영된 시스템의 기본적인 응답 특성을 기존 운용 관행과 동일한 조건에서 평가하고자 하였다.

기준 함수율은 표준 건조법(Oven-dry method)에 따라 산출된 값을 사용하였다. 해당 방법은 곡물 시료를 일정 조건에서 건조한 후 건조 전·후 중량 차이를 이용하여 함수율을 산출하는 방식으로, 본 연구에서는 함수율 비교 및 표준곡선 구성의 기준값으로 활용하였다[9]. 전기저항식 곡물수분측정기는 측정 온도에 따라 전기적 특성이 영향을 받을 수 있는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 온도 변화를 포함한 외부 환경 변수의 영향을 배제한 상태에서 측정 구조 및 신호 응답 특성을 평가하기 위하여, 모든 실험을 동일한 환경 조건 하에서 수행하였다. 따라서 본 논문에서 제시한 실험 결과는 동일한 온도 조건에서의 ADC - 함수율 관계 및 측정 응답 특성을 나타내며, 온도 변화에 따른 측정 특성 및 보정 기법에 대한 정량적 분석은 향후 연구를 통해 추가적으로 검토할 필요가 있다.

4.2 비교 장비 및 측정 절차

KM-30의 성능을 객관적으로 평가하기 위하여 기존 해외 곡물수분측정기를 비교 기준 장비로 선정하였다. 기존 해외 곡물수분측정기(일본 KETT사)는 농업 현장에서 널리 사용되고 있는 장비로써, 기존

연구 및 현장 적용 사례를 고려하여 본 연구의 비교 기준 장비로 적합하다고 판단하여 선정하였다.

측정 절차는 동일 시료에 대해 KM-30과 기존 해외 곡물수분측정기를 이용하여 순차적으로 측정을 수행하는 방식으로 진행하였다. 시료는 각 장비의 측정 구조에 맞게 투입되었으며, 각 측정 과정에서 획득된 데이터는 ADC 출력값과 함수율 값으로 기록하였다. 측정을 통해 측정값의 분산을 확인하고, 측정 순서에 따른 영향이 최소화되도록 절차를 구성하였다.

4.3 데이터 처리 및 분석 방법

수집된 실험 데이터는 ADC 출력과 기준 함수율 간의 관계를 도시하여 ADC - 함수율 표준곡선으로 정리하였다. 이를 통해 KM-30과 기존 해외 곡물수분측정기의 측정 응답 특성과 곡선 형태를 비교하고, 함수율 구간에 따른 측정값 분포 특성을 분석하였다.

또한 KM-30의 ADC - 함수율 관계를 보다 정량적으로 표현하기 위하여 회귀모델을 적용하여 근사식을 도출하였다[10]. 도출된 회귀식은 함수율 추정 성능 분석에 활용되었으며, 해당 회귀식의 미분을 통해 민감도(dM/dADC)를 계산함으로써 함수율 구간별 응답 특성을 평가하였다. 이러한 분석을 통해 단일 오차 지표뿐 아니라, 측정 구간 전반에서의 성능 특성을 종합적으로 검토하고자 하였다.

V. 실험 결과 및 고찰

제시한 실험 방법을 바탕으로 획득한 측정 데이터를 분석하고, 쌀을 대상으로 한 KM-30 곡물수분측정기의 성능 특성을 기존 해외 곡물수분측정기와 비교하여 고찰한다. 성능 평가는 ADC - 함수율 표준곡선 특성, 측정 오차 분포, 회귀모델 기반 함수율 추정 결과, 민감도(dM/dADC) 분석을 중심으로 수행하였다.

5.1 ADC - 함수율 표준곡선 특성 비교

그림 6은 쌀 시료에 대해 KM-30과 기존 해외 곡물수분측정기로부터 획득한 측정 데이터를 바탕으

로 ADC 출력과 기준 함수율 간의 관계를 표준곡선 형태로 나타낸 것이다. 두 장비 모두 함수율 증가에 따라 ADC 출력이 단조적으로 변화하는 경향을 보였으며, 전기저항식 측정 방식에서 일반적으로 나타나는 비선형 특성이 확인되었다[8].

KM-30의 표준곡선은 함수율 전 구간에서 비교적 연속적인 곡선 형태를 유지하였으며, 특정 함수율 구간에서의 급격한 기울기 변화나 불연속적 거동은 관찰되지 않았다. 특히 함수율 약 12%~24%의 중간 구간에서는 ADC 출력값의 변화가 상대적으로 완만하게 나타나는데, 이는 전기저항식 함수율 측정 원리상 중간 함수율 영역에서 저항 변화율이 감소하는 특성에 기인한다. 그럼에도 불구하고 해당 구간에서도 ADC 출력값은 함수율 증가에 따라 단조 증가 특성을 유지하였으며, 표준곡선은 함수율 전 범위에서 일관된 함수율 - ADC 매핑을 제공하는 기준선으로서의 의미를 갖는다.

KM-30과 기존 해외 곡물수분측정기의 곡선 형태는 전반적으로 유사하나, 동일 ADC 값 기준에서 KM-30이 약 0.6 - 1.0% 높은 함수율을 나타내는 수직적 편차(vertical offset)가 확인되었다. 특히 중간 함수율 구간에서는 데이터 점들이 표준곡선 주변에 비교적 밀집되어 분포하는 특성을 보였다. 반면, 기존 해외 곡물수분측정기의 표준곡선은 함수율 약 12%~14% 구간에서 곡선 기울기의 변화 폭이 상대적으로 크게 나타났으며, 측정값 분포 또한 구간에 따라 다소 분산되는 경향을 보였다.

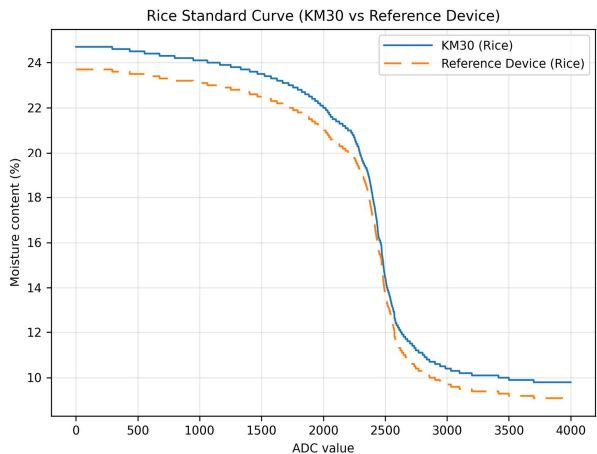


그림 6. 쌀 표준곡선(KM-30 vs Reference device)
Fig. 6. Standard curve of rice(KM-30 vs. Reference device)

아울러 표준곡선을 기준으로 산출한 측정 오차 분포를 함께 도시한 결과는 그림 7과 같이 KM-30의 측정값은 함수율 전 구간에서 특정 방향으로 편향되지 않고 표준곡선 주변에 비교적 균일하게 분포하는 특성을 나타냈다. 중간 함수율 구간에서는 오차 값의 변동이 관찰되었으나, 전반적으로 제한된 범위 내에서 분포하는 경향을 보였다. 기존 해외 곡물수분측정기의 표준곡선은 일부 함수율 구간에서 곡선 기울기의 변화 폭이 상대적으로 크게 나타났으며, 측정값 분포 또한 구간에 따라 다소 분산되는 경향을 보였다.

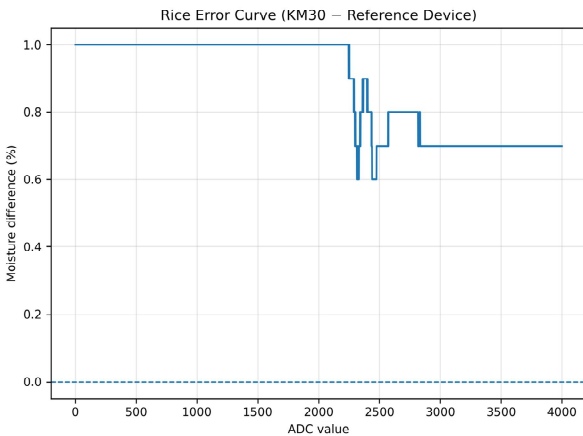


그림 7. 쌀 함수율 오차 곡선(KM30 - Reference device)
Fig. 7. Moisture content error curve for rice(KM-30 - Reference device)

잘 추종하였으며, 전반적인 측정 오차는 표준곡선 기반 측정 오차 범위와 유사한 수준으로 유지되었다. 다만 일부 ADC 구간에서는 함수율 민감도가 낮아 동일한 ADC 변화가 상대적으로 큰 함수율 오차로 나타날 수 있으며, 이는 전기저항식 측정 방식의 한계 특성이 회귀 결과에 반영된 것으로 해석할 수 있다. 특히 데이터가 밀집된 함수율 구간에서는 회귀모델에 의한 추정값이 실측값을 잘 추종하는 특성이 확인되었다. 이러한 결과는 회귀모델이 함수율 추정뿐 아니라 표준곡선 특성 해석을 위한 보조 도구로 활용 가능함을 시사한다.

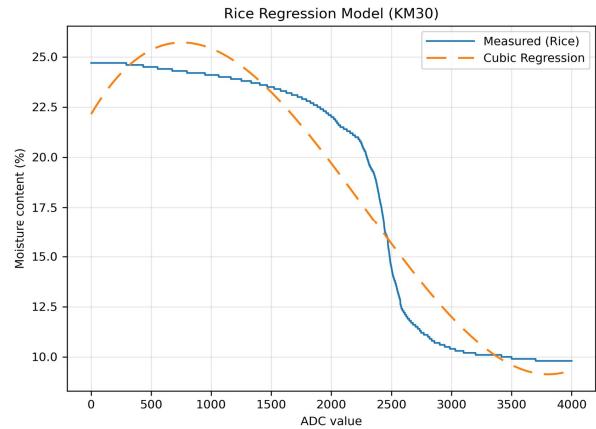


그림 8. KM-30 쌀 표준곡선과 3차 회귀모델 비교
Fig. 8. Comparison of the KM-30 rice standard curve and the cubic regression model

5.2 회귀모델 기반 함수율 추정 결과

그림 8은 KM-30의 ADC - 함수율 관계에 대해 적용한 회귀모델과 실제 측정 데이터의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 ADC 출력값은 전기저항 측정 결과를 12비트 A/D 컨버터를 통해 디지털 신호로 변환한 값으로, 함수율에 따른 전기적 특성을 간접적으로 반영한다. 회귀모델은 실험 데이터의 전반적인 분포 특성을 잘 반영하는 형태로 도출되었으며, 표준곡선의 비선형적 특성을 수식적으로 표현할 수 있었다[16].

회귀식에 의해 추정된 함수율 값과 실제 기준 함수율을 비교한 결과, 전 함수율 구간에서 두 값 간의 차이는 비교적 일정한 경향을 유지하였다. 3차 회귀모델은 중간 함수율 구간에서 실측값을 가장

5.3 민감도(dM/dADC) 분석

그림 9는 회귀모델로부터 도출된 함수율 추정식을 미분하여 계산한 민감도(dM/dADC)를 함수율 구간별로 나타낸 결과이다. 민감도는 함수율 구간에 따라 상이한 분포를 보였으며, 특정 구간에서 ADC 출력 변화에 대한 함수율 변화량이 상대적으로 크게 나타나는 특성이 확인되었다.

KM-30의 민감도 분포는 중간 함수율 구간에서 비교적 완만하고 연속적인 형태를 유지하였으며, 이 구간에서의 ADC 출력 변화에 대한 함수율 응답 특성이 상대적으로 뚜렷하게 나타났다. 특히 ADC 값이 약 2000 부근에 해당하는 중간 함수율 영역에서 민감도가 크게 나타났으며, 이 영역은 함수율 변화에 대한 응답이 상대적으로 뚜렷하게 관찰된 전이

구간에 해당한다. 반면, 저함수율 및 고함수율 영역에서는 민감도 변화 폭이 커지는 경향이 나타났으며, 동일한 ADC 변화가 상대적으로 큰 함수율 오차로 나타날 가능성이 있음을 시사한다. 이러한 민감도 분석 결과는 앞선 표준곡선 및 오차 분포 분석에서 관찰된 함수율 구간별 측정 특성을 정량적으로 해석하는 데 유용한 보조 지표로 활용될 수 있다.

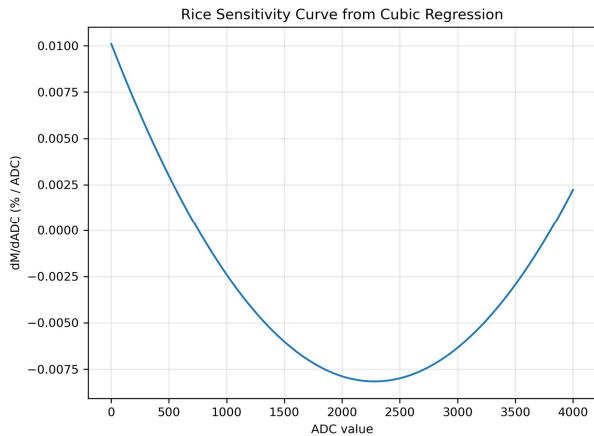


그림 9. 3차 회귀모델 기반 KM-30 쌀 민감도(dM/dADC) 곡선

Fig. 9. Sensitivity curve (dM/dADC) for KM-30 rice based on the cubic regression model

5.4 교정성적서 기반 성능 특성 고찰

표 1은 한국산업기술시험원(KTL)에서 교정을 수행한 KM-30에 대해 발급된 교정성적서에 제시된 교정 결과를 요약한 것으로, 다양한 시료 조건에서의 지시값, 기준값, 보정값 및 측정 불확도를 포함한다. 해당 교정성적서 결과는 장비의 측정 가능 범위와 기본적인 동작성 확인을 목적으로 수행된 공인 교정 시험에 해당하며, 본 연구에서 수행한 표준곡선 분석, 회귀모델 기반 함수율 추정 및 민감도(dM/dADC) 분석과 같은 상세 성능 평가를 모든 곡물에 대해 동일하게 수행하였음을 의미하지는 않는다. 본 논문에서는 백미(쌀)를 대상으로 한 정량적 성능 평가 결과를 중심으로 논의를 전개하였으며, 교정성적서는 이러한 실험 결과를 해석하기 위한 참고 기준 자료로 활용하였다. 곡물별 낱알 크기, 밀도 및 외피 특성 차이에 따른 측정 특성의 비교 분석은 향후 연구를 통해 추가적으로 검토할 필요가 있다.

교정성적서에 따르면 지시값과 기준값 간 차이는

대부분 $\pm 0.1\%$ 이내로 나타났으며, 측정 불확도는 신뢰수준 약 95%(k=2) 기준에서 약 0.8~0.9% 범위로 제시되었다. 본 연구에서 쌀(Rice) 시료를 대상으로 수행한 실험 결과에서 관찰된 측정 오차 분포는 이러한 불확도 범위를 벗어나지 않는 수준으로 나타났으며, 이는 본 실험 결과를 통해 개발된 장치는 공인 교정 기준에서 제시된 성능 범위와 정합적인 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있었다.

표 1. 한국산업기술시험원(KTL) 교정성적서 결과
Table 1. Korea Testing Laboratory (KTL) calibration certificate results

Sample type	Reference value	Indicated value	Correction value	Measurement uncertainty (95% confidence level, k = 2)
Paddy(1)	14.4	14.4	0.0	0.8
Paddy(2)	18.3	18.4	-0.1	0.8
Paddy(3)	23.1	23.2	-0.1	0.9
Naked barley	12.4	12.5	-0.1	0.8
Barley	14.0	13.9	0.1	0.8
Wheat	12.3	12.3	0.0	0.8
Sorghum	12.0	12.0	0.0	0.8
Millet	11.9	12.0	-0.1	0.8

한편 표준곡선 비교 과정에서 확인된 함수율 편차가 실사용 환경에서 갖는 영향을 보다 직관적으로 해석하기 위하여, 본 연구에서는 해당 편차를 중량 기준으로 환산하여 고찰하였다. 표 2는 본 연구에서 확인된 함수율 편차 범위(0.6~1.0%)를 기준 중량 1,000 kg에 대해 단순 비례 환산한 결과를 나타낸 것이다. 그 결과 함수율 편차 0.6~1.0%는 중량 기준으로 약 6~10 kg 수준의 변화로 환산될 수 있음을 확인하였다.

표 2. 표준곡선 비교에서 확인된 함수율 편차의 중량 환산 결과

Table 2. Weight-based conversion results of moisture content deviation identified through standard curve comparison

Category	Moisture content deviation(%)	Reference weight (kg)	Converted weight difference (kg)
Minimum deviation	0.6	1,000	6.0
Maximum deviation	1.0	1,000	10.0

이러한 중량 환산 결과는 특정 장비의 실제 손실을 의미하는 것이 아니라, 함수율 측정 오차라는 물리량이 중량 기준에서 갖는 일반적인 영향을 정량적으로 해석하기 위한 것이다. 따라서 본 절에서는 교정성적서에 제시된 성능 범위와 중량 환산 관점에서의 해석을 종합하여, KM-30의 측정 성능이 공인 기준 범위 내에서 안정적으로 유지되고 있음을 정성적으로 파악 할 수 있었다.

아울러 본 연구에서 확인된 0.6~1.0%의 함수율 편차는 기존 해외제품과의 표준곡선 비교 과정에서 나타난 체계적 차이를 의미하며, 이를 기준 중량 1,000 kg에 대해 환산할 경우 중량 기준으로는 약 6~10 kg 수준의 차이로 해석될 수 있다. 이러한 환산 결과는 특정 장비의 실제 손실을 의미하는 것이 아니라, 함수율 편차가 실사용 환경에서 갖는 영향을 정량적으로 이해하기 위한 해석적 지표로 활용되었다.

VI. 결 론

본 연구에서는 호퍼형 구조와 로터리 이송 방식을 적용한 전기저항식 곡물수분측정기(KM-30)를 대상으로, 쌀 시료를 이용하여 ADC - 함수율 표준곡선 분석, 오차 분포 특성, 회귀모델 기반 함수율 추정, 민감도(dM/dADC) 분석을 포함한 성능평가를 수행하였다. 그 결과 KM-30은 함수율 전 범위에서 비교적 연속적이고 안정적인 측정 응답 특성을 나타내었으며, 반복 측정 시에도 일정 수준의 신뢰성을 확보함을 확인하였다.

본 연구에서 제시한 성능평가 접근 방식은 단일 오차 지표 중심의 기존 평가 방식에서 확장하여, 표준곡선 형태, 민감도 분포, 회귀모델 기반 추정 특성을 종합적으로 분석하였다는 점에서 의의를 갖는다. 또한 교정성적서에 제시된 공인 불확도 범위의 정합성 고찰 및 함수율 편차의 중량 환산 관점에서의 해석을 통해, 본 연구 결과가 계측 정확도뿐 아니라 실사용 환경에서도 의미 있는 성능 수준을 갖는 것으로 판단된다. 향후에는 다양한 현장 조건을 고려한 추가 실험을 통해 측정 성능의 일반화 가능성을 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 이물 혼입을 포함한 가혹 조건에서의 이송 안정성 평가를 통해, 제안한 구조의 현장 적용성을 보다 정량적으로 검증할 예정이다.

Acknowledgement

2025년도 한국정보기술학회 추계종합학술대회에서 우수논문상을 수상한 논문(로터리 이송방식을 적용한 이물질 걸림 제로의 호퍼 형상 곡물 수분 측정 장치의 개발 및 성능 평가)을 확장한 것임[17].

References

- [1] Korea Food Research Institute and Rural Development Administration, "Study on the Factor Analysis and Minimizing Loss of the Post-Harvest Treated Rough Rice", Korea Food Research Institute, Final Research Report, pp. 1-155, Dec. 2013.
- [2] H. M. Fang, M. M. Niu, S. Shi, H. Liu, and J. Zhou, "Effect of Harvesting Methods and Grain Moisture Content on Maize Harvesting Quality", Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, Vol. 35, No. 1, pp. 11-18, Jan. 2019.
- [3] Rural Development Administration, "Rice Quality Enhancement Technology", Rural Development Administration, Agricultural Technology Guidebook No. 157, pp. 1-382, Dec. 2020.
- [4] Y.-B. Kim, G. Yang, and S.-T. Yoon, "Wheat-Rice Double Cropping System in Rice Fields of the Cheonan Area for the Production of Domestic Wheat", Korean Journal of Crop Science, Vol. 64, No. 3, pp. 234-245, Sep. 2019. <https://doi.org/10.7740/kjcs.2019.64.3.234>.
- [5] S. S. Virk, "Development of Moisture Sensor Technology to Enhance Conveyance and Field Distribution of Broiler Litter", M.S. thesis, Auburn University, Auburn, AL, USA, May 2013.
- [6] United States Department of Agriculture (USDA), "Grain Inspection Handbook: Book II - Grain Grading Procedures", U.S. Department of Agriculture, Program Handbook, pp. 1-345, Oct. 2020.
- [7] W. Cao, G. Li, H. Song, B. Quan, and Z. Liu, "Research on Grain Moisture Model Based on Improved SSA-SVR Algorithm", Applied Sciences, Vol. 14, No. 8, Article No. 3171, pp. 1-19, Apr.

2024. <https://doi.org/10.3390/app14083171>.

[8] Z. Mai, C. Li, and B. Wang, "Design and Test of Grain Moisture Online Measuring System Based on Floating Ground Capacitance", Proc. 5th International Conference on Measurement, Instrumentation and Automation (ICMIA 2016), Shenzhen, China, pp. 821-827, Sep. 2016.

[9] J.-H. Kim, "Application of Near-Infrared (NIR) Spectroscopy for Food Composition Analysis (I)", Korean Journal of Food Science and Technology, Vol. 29, No. 3, pp. 24-37, Mar. 1996.

[10] C. Han, Y. Wang, Z. Shi, Y. Xu, S. Qiu, and H. Mao, "The Design and Experimentation of a Corn Moisture Detection Device Based on Double Capacitors", Sensors, Vol. 24, No. 5, Article No. 1408, pp. 1-15, Feb. 2024. <https://doi.org/10.3390/s24051408>.

[11] J. J. Kim, S. Y. Hwang, and S. W. Jang, "Analysis of the relationship between CCTV installation and crime rate using big data", Journal of the Korea Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 24, No. 5, pp. 183-188, Oct. 2024. <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.5.183>.

[12] Y. W. Kim, J. K. Baek, H. D. Chae, and J. H. Joo, "Performance verification of a Ka-band active phased array broadband antenna", Journal of the Korea Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 24, No. 1, pp. 23-30, Feb. 2024. <https://doi.org/10.7236/JIIBC.2024.24.1.23>.

[13] Korea Association of Standards and Testing Organizations (KASTO), "Standard Calibration Procedure for Grain Moisture Meters by the Oven-Drying Method (Revised)", KASTO, Standard Calibration Procedure No. 19-50401-265, pp. 1-25, Dec. 2019.

[14] S. O. Nelson, A. W. Kraszewski, S. Trabelsi, and K. C. Lawrence, "Using Cereal Grain Permittivity for Sensing Moisture Content", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 49, No. 3, pp. 470-475, Jun. 2000.

[15] P. I. Kalandarov, "High-Frequency Moisture Meter

for Measuring the Moisture Content of Grain and Grain Products", Measurement Techniques, Vol. 65, No. 4, pp. 297-303, Apr. 2022.

[16] Z. Liu, T. Yang, P. Li, J. Wang, J. Xu, and C. Jin, "The Design and Experimentation of a Differential Grain Moisture Detection Device for a Combined Harvester", Sensors, Vol. 24, No. 14, Article No. 4551, pp. 1-16, Jul. 2024. <https://doi.org/10.3390/s24144551>.

[17] S. Y. Lee, J. U. Yu, Y. I. Lee, and S. P. Heo, "Development and Performance Evaluation of a Hopper-Type Grain Moisture Meter with Rotary Feeding Mechanism and Zero Foreign Material Clogging", Proc. Korea Information Technology Conference, Jeju, Korea, pp. 678-681, Nov. 2025.

저자소개

이 소 영 (So-Yeong Lee)



2021년 2월 : 한라대학교
메카트로닉스공학과(공학사)
2024년 3월 ~ 현재 :
국립강릉원주대학교 대학원
의료기기융복합학과 석사과정
관심분야 : 인공지능, 기계공학,
사물인터넷, 농업용 계측 시스템

허 성 필 (Sung-Phil Heo)



2004년 3월 : Tohoku University
(공학박사)
1993년 11월 ~ 2014년 5월 : KT
연구소 수석연구원, 팀장, 부장
2014년 7월 ~ 2016년 8월 :
국립금오공과대학 교수
2016년 9월 ~ 2019년 2월 :
경운대학교 무인기공학과 학과장, 부교수,
공용장비지원센터 센터장
2019년 9월 ~ 현재 : 국립강릉원주대학교 교수,
산학융합지구사업단 기획전략센터 센터장
관심분야 : 디지털헬스케어, 스마트팜, 인공지능,
사물인터넷, 멀티미디어검색, 차세대무선통신,
드론기술