

# 수소핵자기공명을 이용한 비파괴적 벼 함수율 측정장치 개발

## Development of a Nondestructive Moisture Sensor using Proton NMR

|           |         |
|-----------|---------|
| 정창호*      | 조성인*    |
| 정희원       | 정희원     |
| C.H.Chung | S.I.Cho |

### 1. 서론

현재 국내의 벼의 생탈곡 규모는 수확 과정에서의 농업 기계화로 점차 증가하고 있으며, 아울러 미곡종합처리장에서의 건조 규모도 증가하고 있다. 미곡종합처리장에서 건조시 책정되는 건조 비용은 건조 직전에 측정된 함수율과 건조후 측정된 함수율의 차이에 의해 건조 비용이 책정된다. 정확한 건조 비용은 정확한 함수율 측정기의 전제하에 가능하며, 농산물을 다량으로 취급하는 미곡종합처리장, 곡물 수출입상 또는 농민들에게 약간의 함수율 차로 인하여 절대적인 비용에서는 큰 차이가 나게 되므로 정확한 함수율 측정이 요구된다.

NMR(핵자기공명)은 1945년에 공명 현상이 발견된 후에 발전을 거듭하다가, 1970년대의 전자 공학, 컴퓨터, 전기공학의 발전과 아울러 장치의 획기적인 발전이 가능해졌다. 현재 NMR은 이·화학뿐만 아니라 의학에 이용되고 있으며, 물질의 정성분석, 정량분석에 이용되고 있으나 측정 장치가 고가여서 사용이 제한되어 왔다. 그러나, 최근에는 고자장의 NMR대신 저자장의 비교적 저렴한 NMR 기기를 이용하여 농업과 식품 산업에서 시료의 지방의 측정과 함수율의 측정에 대한 연구가 진행되고 있다.

이에 본 연구는 핵자기공명을 이용하여 비파괴적인 함수율 측정 장치를 개발하고자 하며 구체적인 목적은 다음과 같다.

- 1) 벼의 비파괴적 함수율 측정을 위한 핵자기공명장치를 구성한다.
- 2) 함수율 측정을 위한 알고리즘을 개발한다.
- 3) 곡물의 수확 시기, 온도, 품종, 밀도, 상태 등이 함수율 측정에 미치는 영향을 규명한다.
- 4) 온도, 품종, 밀도에 무관한 함수율 측정 알고리즘을 개발한다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 NMR 함수율측정 장치 구성

NMR 장치는 공명 주파수를 발생시키는 RF Switch, 원하는 주기의 신호를 발생시키는 Pulse Programmer(PPG), 공명 신호를 증폭하는 RF Amplifier, 증폭된 공명 신호를 Probe에 전송하고 Probe에서 발생된 신호를 구분해 내는 T/R Network, 샘플이 위치하게 되어 신호를 전송하고 감지하는 Probe, 감지된 신호를 선별하고 증폭하는 Receiver, 최종 신호를 디지털 값으로 변경하는 Digitizer, 그리고 Magnet으로 구성된다. Digitizer, Magnet, Probe를 제외한 Hardware는 실험용 NMR을 제작하고 있는 미국의 SwRI회사에서 제작되었으며 Digitizer는 디지털 오실로스코프(FLUKE PM33882A, 미국)를 사용하였다. 그림 2-1은 시스템의 운용도이다.

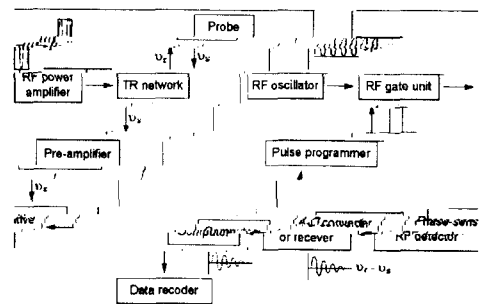


Fig. 2-1 NMR moisture sensors.

\* 서울대학교 농업생명과학대학 농공학(농업기계)학과

### 2.1.1 동조 회로 및 코일 제작

동조 회로는 RF 코일과 콘덴서의 조합으로 구성된다. RF 코일은 RF 교류 신호를 받아 영구 자석과 직각 방향으로 자장을 형성하며, RF 교류 신호가 차단된 후 샘플에서 발산하는 에너지를 감지하는 코일이다. RF코일은 콘덴서와 직렬 또는 병렬로 연결되어 공명 신호를 전달하는 일종의 filter로 구성된다. 공진 순간의 이상적인 임피던스는 0Ω이 되고, 동조 회로 전단이 50Ω으로 설정되어 있으므로 전력을 최대로 전달할 수 있다.

코일의 주재료는 일반적으로 구리선을 선택하는데 전기 전도도가 우수하며 투자율(Permeability)이 높아 영구자석 내에 있어도 자장을 감소시키지 않는다. 제작된 솔레노이드 코일의 지름은 3.2mm이며 코일과 코일 사이의 간격은 3mm정도를 유지하여 자체 용량을 최소화하였다. 제작된 코일의 인덕턴스는 10.7 μH였다.

### 2.1.2 운용 프로그램 개발

구입된 시스템을 운용하고 원하는 주기의 신호를 발생하기 위한 프로그램이 개발되었다. 프로그램 상에서 대역(Bandwidth), 감쇠(Attenuation), 원하는 주기와 반복 횟수를 설정한 다음, 설정된 값은 DIO Board를 통해서 대역과 감쇠 정도는 Receiver로 전송하고, 주기와 반복 횟수는 PPG에 전송한다.

전송된 프로그램은 PPG 자체 내에 있는 RAM에 일시 저장하였다가 PC에서 발생하는 Enable 신호에 의해 PPG내에서 프로그램이 순차적으로 실행되어 원하는 주기의 신호가 발생된다.

## 2.2 함수율 측정 알고리즘 개발

개발된 운용 프로그램을 이용하여 FID(Free Induction Decay)신호를 탐색하였다. FID신호는 RF 코일에서 영구 자장의 자기장 방향과 90° 방향으로 전기적 에너지를 입사하면, 원자의 회전축이 자기장 방향으로부터 90°로 회전하였다가 입사 신호가 끝나면 외부로 자체 내의 에너지를 발산하는 현상이며, 90°로 회전하였을 때가 가장 강한 신호를 발산한다. 실험을 통하여 65 μs일 때 FID 현상이 관찰되었다.

구성된 장치를 이용하여 FID신호를 획득한 후 신호를 변환 및 처리하여 변수를 선택하였다. 신호 처리 순서 및 변수 선택방법은 다음과 같다.

|        |                       |   |          |   |                      |   |            |   |                |
|--------|-----------------------|---|----------|---|----------------------|---|------------|---|----------------|
| 데이터 처리 | Oscilloscope<br>신호 획득 | → | Raw Data | → | Envelope             | → | Log Scaled | → | Smoothing      |
| 변수 선택  |                       |   |          |   | 면적합<br>(Integration) |   |            |   | Decaying slope |

## 2.3 시료 구입 및 샘플 제작

실험에 사용한 벼는 단립종(장축길이 5.5mm이하)과 중립종(장축길이 5.51~6.6mm 이하)으로 구분하여 구입하였다. 단립종으로 일품, 화성을, 중립종으로 남풍을 선택하여 서울대학교 부속 농장에서 구입하였다.

함수율의 측정 범위를 넓게 하기 위해서 가능한 30%이내의 함수율 함량을 갖는 시료를 구입하였다. 남풍 1, 3차 수확은 동일한 포장에서, 2차 수확은 인접한 포장에서 시료를 채취하였고, 화성은 수확 시기를 달리하여 동일한 포장에서 수확하였다. 수확된 시료의 함수율은 최고 33%였으며,

구입된 시료의 전체적인 함수율 평형을 위해 4℃에서 2일간 보관하였다.

구입된 시료를 가지고 각기 다른 함수율을 가진 샘플을 제작하기 위해서 일정량의 시료를 채취한 후 130℃에서 5분 간격으로 건조 시간을 늘려 건조시킨 후 건조된 샘플을 밀폐된 플라스틱 용기에 넣어 4℃에서 1주일 정도 저장하여 용기내 샘플의 함수율을 동일하게 유지되도록 하였다.

샘플을 제작하기 위해 저장된 샘플을 꺼내 실내에서 2시간 정도 Tempering을 거친 후, 직경 30mm시험관(길이 200mm)에 1차적으로 시료를 자연스럽게 쏟아 부은 후, 10회정도 다져서 샘플을 제작하였다.

샘플 시험관의 크기에 따른 신호의 향상을 보기 위해 시험관의 크기를 40mm로 설정하여 동일한 방법으로 샘플을 제작하였다.

샘플의 함수율을 측정하기 전에 샘플을 담아 건조시킬 칭량용기를 130±1℃에서 1시간 건조시킨 후 데시케이터(Desiccator)에서 Tempering을 실시하고 나서 칭량용기의 무게를 측정하였다.

각각의 샘플에 고유 번호를 부여하고 10g의 샘플을 채취한 후 상온 통풍 130℃±1℃에서 20시간 동안 건조하였다.

건조된 샘플은 데시케이터에 넣어져 상온으로 샘플의 온도를 상승시킨 후 ±0.001g 오차 내의 저울로 측정하였다.

함수율은 식(1)과 같이 습량기준 함수율을 구하였다.

$$MC = \frac{W_m}{W_t} \times 100 = \frac{W_m}{W_m + W_d} \times 100$$

MC = 습량기준 함수율(%)

$W_m$  = 시료 내에 포함되어 있는 수분의 질량(g)

$W_d$  = 완전히 건조된 시료의 질량(g)

$W_t$  = 시료의 총 질량(g)

(1)

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 자석 상자 균일도 분석

유한 요소 프로그램인 ANSYS Package를 이용하여 설계된 자석의 자기장 분석을 하였다. 자석의 온도는 20℃로 설정하였으며, 중심의 자장의 세기는 985gauss였고, 중심을 기준으로 6cm내에서의 자장의 균일도는 330ppm인 것으로 나타났다.

제작된 자석 상자의 자장 세기와 균일도를 Simulation 결과와 비교하기 위해서, 자석 상자의 XY 평면에서 중심으로부터 직경 5cm이내의 영역에 대하여 1cm간격으로 각 위치에서 자장의 강도를 측정하였다. 측정 평균값은 978.5gauss였으며 균일도는 2044.9ppm 이었다.

#### 3.2 자석 온도 조정

영구자석은 온도에 따라 자장이 변하는 단점이 있으므로, 온도보정 장치가 필요하다. 시스템 공명 주파수인 4.1MHz에 해당하는 963gauss로 설정하고, 온도 변화를 최소화하기 위해 항은 상자를 제작하였다. 자석을 둘러싸는 육면체의 나무상자를 만들고, 샘플이 통과할 수 있는 중앙 부분을 제외하고 밀폐한 후 단열하였다.

#### 3.3 수확 시기별 함수율 측정

수확 시기를 달리하였을 때의 함수율 측정의 차이를 검증하기 위하여 화성 품종에 대하여 초기 적분 값을 변수로 취하여 함수율을 측정하였다. 각각의 결정 계수는 0.974, 0.966이었으며, 두 실험식을 그림 3-1에서 비교하였다. 그림에서와 같이 수확 시기를 달리하였을 때의 함수율 측정의 차이는 미소한 것으로 나타났다.

### 3.4 샘플 튜브 크기에 따른 신호 양상

코일에 샘플이 차지하는 부피의 비로 나타낼 수 있는 총적 계수를 높이기 위해 시험관의 크기는 30mm에서 40mm로 키웠을 때의 신호의 향상 정도를 보기 위해 동일한 함수율을 갖는 두 샘플을 제작하여 실험하였다. 제작된 샘플의 평균 질량은 105g이었으며 실내 온도 및 샘플의 온도는 21℃였다.

전체적인 신호의 균일도는 40mm 시험관을 사용했을 때 높게 나와 변수의 선택 폭이 넓어졌으나, 신호의 감쇠는 30mm 시험관에 비해 다소 짧게 나타났다.

40mm 시험관으로 화성과 남풍 샘플에 대한 함수율 측정 실험을 하였으며, 각각의 결정 계수는 0.987, 0.987이었다.

시험관의 용적이 증가하여 전체적인 신호 강도의 상승으로 S/N이 높은 신호가 획득되어 30mm 시험관에 비해 측정의 정확도가 향상되었다.

### 3.5 곡물 온도 변화에 따른 함수율 측정

곡물의 온도의 변화가 측정에 어떤 영향을 미치는 가를 규명하기 위해 일품벼에 대하여 10개의 샘플을 제작하였다. 제작된 샘플의 평균 질량은 100g, 실내온도 및 샘플의 온도는 21℃, 함수율은 13.3% ~ 24.5%내에 고르게 분포하였다.

곡물의 온도는 14℃, 21℃, 30℃의 3수준으로 설정하였다. 실내 온도를 기준으로 ±10℃이내의 측정 범위에서 측정하기 위해 14℃ 냉장고, 30℃ 오븐에 2시간 동안 샘플을 저장하여 샘플의 온도를 설정하였다. 각각의 곡물 온도에서의 결정 계수는 다음과 같다. 곡물 온도 14℃일 때, 0.990, 21℃ : 0.981, 30℃ : 0.990 였으며 그림 3-2는 3수준의 온도 변화에 따른 실험식을 동

일한 그림에서 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 곡물의 온도가 14℃와 30℃는 약간의 수직 Bias가 있기는 하지만 회귀 곡선의 기울기와 절편이 근사하고 있으며, 곡물의 온도가 21℃일 때 기울기와 절편이 다른 온도와 차이가 있으나, 차이는 미소한 것으로 나타났다.

### 3.6 측정 모델 개발

#### 3.6.1 질량 종속 모델 개발

40mm 시험관을 이용하여 화성과 동일한 단립종인 일품을 사용하여 49개의 샘플을 제작하였다. 샘플의 평균 질량은 105g이었으며, 측정시 실내 온도 및 샘플의 온도는 21℃였다. 측정의 정확도를 높이기 위해 제작된 샘플은 측정 이전에 무게를 재어서 출력 신호를 각각의 무게로 보정함으로써 각 샘플의 출력 신호가 시험관내의 절대수분의 양을 의미하게 하였다.

변수는 초기 면적 값을 이용하였으며, 29개의 샘플을 이용하여 예측 모델을 개발하고 개발한 모델을 토대로 20개의 샘플을 이용하여 그 결과를 검증하였다. 예측 모델의 결정 계수는 0.984, SEC는 0.467%이었으며, 검증 모델의 결정 계수는 결정 계수는 0.985, SEP는 0.513%이다.

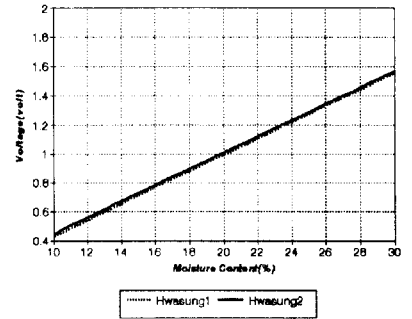


Fig. 3-1 Comparison between the 1st and 2nd curve(Hwasung).

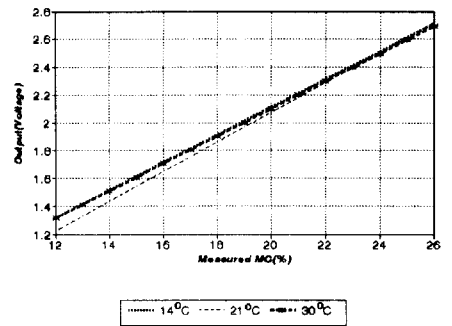


Fig. 3-2 Comparison among three curves(Ilpum).

질량을 측정하고 함수율을 측정하였을 때의 정밀도는 일반적으로 상용화되고 있는 제품의 사양의 정밀도인  $\pm 0.5\%$ 에 근사하였으며, 질량을 정확히 측정하고, 샘플의 상태를 정선하여 샘플 내의 미숙립이나 청사미 등 불량한 샘플을 제거하여 측정한다면 샘플 측정의 정확도를 높일 수 있을 것으로 판단된다.

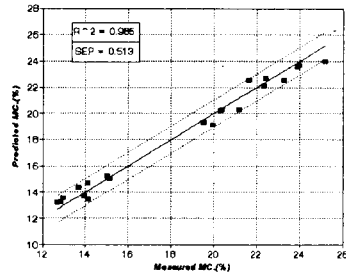
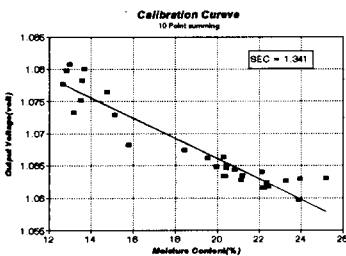


Fig. 3-3 Calibration model dependent on the mass .

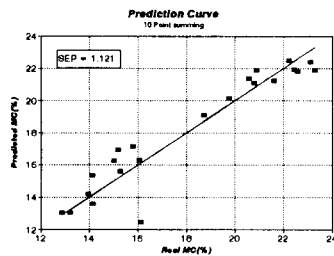
### 3.6.2 질량 독립 모델 개발

획득된 신호의 기울기를 이용하면 질량에 독립적인 모델의 개발이 가능하여 130 $\mu$ s 이후의 두 점에 대한 기울기를 변수로 취하여 질량에 독립적인 모델을 개발하였다. 29개의 데이터로 실험식을 찾고 20개의 데이터를 이용하여 검증하였으며, 실험 당시의 실내 온도 및 샘플의 온도는 20.5 $^{\circ}$ C였다.

개발된 예측 모형의 결정 계수는 0.936, SEC는 0.970%이었으며, 검증 모형의 결정 계수는 0.924, SEP = 1.110%이었다.



3.5 Calibration model independent of the mass .



3.6 Prediction model independent of the mass .

## 4. 요약 및 결론

본 연구는 핵자기공명장치를 구성하여 벼의 함수율 측정 알고리즘을 개발하고 개발된 알고리즘을 이용하여 함수율을 측정하는 것을 목적으로 수행되었다. 세 품종의 벼를 선택하여 수확 시기를 달리하여 함수율을 측정하여 수확 시기에 따른 함수율 측정의 차이와 품종 내에서의 차이에 대해 연구하였다. 또한 샘플의 크기 변화에 따른 신호의 향상과 샘플 온도 변화에 따른 함수율 측정에

대하여 연구하였으며, 질량에 종속된 모델과 기울기 등을 이용하여 질량에 독립적인 함수를 측정 모델에 대하여 연구하였다.

연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 함수를 측정을 위한 핵자기공명장치가 구성되었다.
2. 함수를 측정을 위한 알고리즘이 개발되었다.
3. 수확 시기를 다르게 하여 함수율을 측정하였을 때 동일 품종간의 수확 시기는 함수율 측정에서 차이가 없는 것으로 나타났다.
4. 샘플 튜브의 크기를 2수준으로 실험하였다. 샘플의 질량이 클 때 절대적인 수분이 양의 증가하여 신호의 강도가 증가하였다. 신호의 형태가 균일하게 나타났으며, 변수의 폭이 넓어져 함수율 측정의 정확도가 향상되었다.
5. 곡물의 온도를 3수준으로 변화시켜 함수율을 측정하였으며, 곡물의 온도가 함수율 측정에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다.
6. 동일한 질량으로 환산하여 함수율을 측정하였을 때 함수율 측정의 정확도를 높일 수 있었다. 일품을 대상으로 하여 29개의 샘플에 대하여 함수율 예측 모델을 개발하였으며 결정 계수는 0.983, SEC는 0.467% 였으며, 검증 결과로 결정 계수는 0.985, SEP는 0.513% 이었다.
7. 일품을 대상으로 질량을 측정하기 않고 100 $\mu$ s와 110 $\mu$ s 두 점간의 기울기를 이용하여 질량과 무관한 함수율 측정 예측 모델을 개발하였으며 결정 계수는 결정 계수는 0.936, SEC는 0.970% 였으며, 검증 결과로 결정 계수는 0.924, SEP는 1.100% 였다.

## 5. 참고문헌

1. 고헌균, 1978, 곡물건조의 기초지식, *한국농업기계학회지* 3(1):77-80
2. 고헌균, 1978, 벼의 평형함수율 측정에 관한 연구, *한국농업기계학회지* 3(2):62-68
3. 조성인, 1993, 수소자기공명원리를 이용한 비파괴적 농산물 함수율 측정장치 개발을 위한 기초실험, *한국농업기계학회지* 18(3):252-261
4. 고헌균외 6인, 1990, *농산가공기계학*, p230-250
5. Ernest W.Toller and Yen-Con Hung. 1990. Magnetic resonance for measuring moisture in wheat, corn, soybean, pecans and peanuts. *ASAE Paper NO. 903008*. St.Joseph, MI:ASAE
6. G.H.Brusewitz and M.L.Stone. 1987. Wheat moisture by NMR. *Transactions of the ASAE* 30(3):1086-1090
7. B.L.Miller, M.S.Lee, J.W.Hughes and Y.Pomeranz. 1981. Measuring high moisture content of cereal grains by pulsed nuclear magnetic resonance. *Cereal Chem.* 57(2):126-129
8. Ernest. W. Tollner, W. L. Rollwitz, 1987, Nuclear magnetic resonance for moisture analysis, *ASAE Paper NO. 87-1008*; ASAE; St. Joseph, MI:ASAE