

가시광선 및 근적외선 스펙트럼을 이용한 도정비율 측정

Measurement of Milling Ratio using the Visible and the Near-Infrared Rays Spectrum

이 용 국* 이 재 현*
정회원 학생회원
Y. K. Lee J. H. Lee

ABSTRACT

This research was carried out to investigate the possibility of real time rice milling ratio measurement using the spectral reflection characteristics. In this study, various methods were compared such as ① using the whiteness meter, ② using the colorimeter, ③ using the Visible and the NIR reflection spectrum. The samples were milled in the domain of 84~96% by 0.5% interval classified by milling ratio. The NMG treatment method required about 20 minutes to determine the milled ratio and r^2 was 0.0028 to 0.7959 that was very low. In case of whiteness meter, r^2 was high but speed of measurement was 5 minutes that was very low. Measurement with the colorimeter required about 5 minutes and r^2 was 0.60 to 0.85 that was low. The reflection spectrum were measured in the range of 400~2,500nm with 2nm interval and the MLR model with six-wavelength obtained from first derivative of spectra gave the best results($r^2 = 0.967$, SEP = 0.729%)

주요용어(Key Words): 근적외선(Near-infrared), 쌀(Rice), 도정비율(Milling ratio)

1. 서 론

고품질의 쌀 생산과 가공비용의 절감을 위해서는 도정과정에서 도정미의 상태를 자동으로 감지하여 제어할 수 있는 자동화된 단위 도정기계의 개발이 필요하며, 이와 같은 자동화장치는 미곡종합처리 시설운영의 무인화 및 자동화에 필수적이다. 즉 쌀의 가공에서 가장 중요한 부분은 도정비율의 실시간 측정이라고 할 수 있다. 그러나 도정도 측정에 관한 연구는 국내에서는 80년대 이후 거의 이루어지지 않고 있었고, 90년대에 들어와서 다시 연구가 활발히 진

행되고 있다. 특히 도정도의 실시간 측정이라는 부분은 김³⁾ 등(1997)에 의한 연구 외에는 거의 없다고 보아도 무방할 것이다. 이에 따라 도정도의 실시간 측정에는 근적외선을 이용한 도정비율의 측정이 정확성과 신속성에 있어서 가장 적합한 방법이라고 생각되었다.

따라서 본 연구에서는 근적외선을 이용한 도정비율 측정의 가능성을 살펴보고 다른 도정비율 측정방법간의 결과를 정확성과 시간에 따라 비교 검토하고 근적외선을 이용한 최적 도정비율 예측 모델을 개발하였다.

* 성균관대학교 생물기전공학과

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

공시재료는 1996년에 수확한 벼로써 각 지역별로 선택한 추청벼(경기도 이천 산), 오대벼(강원도 철원 산), 동진벼(전북 익산 산) 그리고, 30℃ 인큐베이터 (Incubator) 안에서 3개월간 저장한 추청벼(경기도 이천 산)의 4가지 시료를 사용하였다. 인큐베이터 안에서 저장한 시료를 사용한 이유는 단기간 저장의 효과를 알아보기 위한 방법으로 사용하였다.

시료의 장기보관을 위하여 비닐 팩에 밀봉한 후 4℃ 저온저장고에 보관하였다.

나. 시료준비

실험에 앞서 보관중인 시료를 꺼내어 상온에 24시간 동안 노출하여 곡온을 상온으로 평형시켰다. 벼는 실험용 제현기(Satake사. THU-35A. Japan)를 사용하여 제현한 후 1.7mm 테스트링 시브(Testing Sieve)를 사용하여 미숙립과 설미 등을 제거하고 완전립의 현미만을 선별하였다. 선별한 현미는 각 품종별로 200g씩 30~40개의 샘플로 분류한 후 각각의 도정비율에 맞추어 도정(쌍용기계. SY95RAT2400)하였다. 각 시료의 도정비율은 현미의 도정비율을 100%로 하였을 때, 백미의 도정비율 84~96% 범위에서 약 0.5%의 간격이 되도록 하였으며 도정비율은 다음과 같이 정의하였다.

도정비율(Milling Ratio)

$$= \frac{\text{도정 후 온전한 백미의 무게(g)}}{\text{도정 전 온전한 현미의 무게(g)}} \times 100(\%)$$

도정 직후 백미는 30~60℃의 높은 온도를 지니고 있으므로 30분간 데시케이터에서 방냉하여 시료의 온도가 상온에 도달하도록 하였다. 상온에 도달한

시료는 쇠미정선기(Satake사. TRCO5A. Japan)를 사용하여 정립만을 선별하여 여타의 도정도 측정에 시료로 사용하였다.

다. 실험순서

백도계(Kett. C-300-3. Japan)를 사용하여 백도값을 측정한 후, 동일시료를 사용하여 근적외선 분광광도계(NIRSystem. Model-6500, USA)로 반사스펙트럼을 측정한 후, 색차계(Minolta. CR-300, Japan)로 각각의 L, a, b 값을 측정하고 마지막으로 NMG 시약으로 발색시킨 후 색차계를 사용하여 L, a, b 값을 측정하였다. 여기서, L 값은 명도값으로서 값이 작아질수록 검은색을 띠게 되고, a 값은 적색도로서 값이 작아질수록 녹색을 띠게 되며, b 값은 황색도로서 값이 작아질수록 청색을 띠게 된다.

라. 시료의 스펙트럼 측정

본 실험에 사용한 근적외선 분광광도계는 400~2,500nm의 파장영역에서 2nm 간격으로 반사 및 투과 스펙트럼을 측정할 수 있으며, 파장의 정밀도는 ±0.3nm이다. 하나의 스펙트럼은 32회 주사하여 측정한 후 평균한 것을 사용하였으며, 기준 스펙트럼은 항상 일정한 흡광도를 나타내는 세라믹판을 이용하였다. 본 광도계는 벌크상태, 분말상태, 단립 시료의 측정이 가능하지만 본 연구에서는 벌크상태의 시료를 측정하기 위하여 시료이송장치를 광도계에 부착하여 측정하였다. 그림 1에 장치의 개략도를 보여주고 있다. 시료를 한 번에 100~130g 씩 직육면체의 시료셀에 넣어 한 번에 한 개의 시료셀을 측정한다. 따라서 넓은 면적의 스펙트럼을 측정할 수 있으므로 시료채취시의 오차를 줄이고 다량의 시료로 대표성이 향상되며 시료의 전처리시의 오차를 줄일 수 있다.

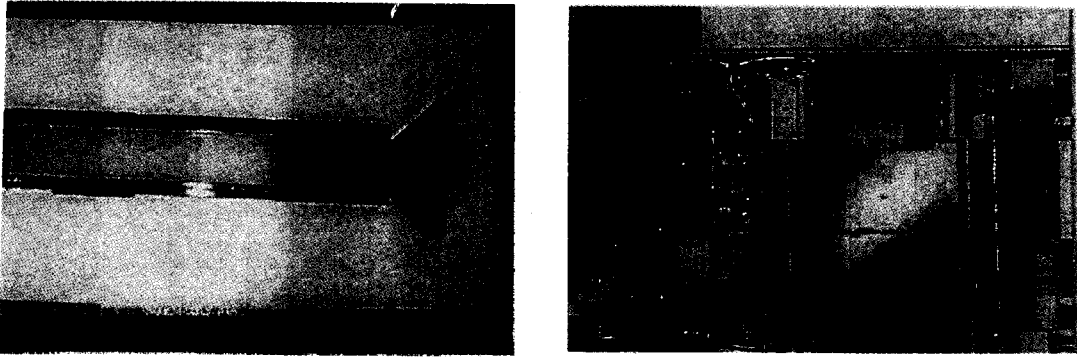


Fig. 1 Figure of NIRSystem for measurement of bulk sample.

마. 도정비율 예측모델 개발 방법

백미의 도정비율별로 각 품종에 대하여 33개씩의 반사 스펙트럼을 측정하여 총 132개를 측정하였다. 이 중 교정부(Calibration) 89개와 검증부(Validation) 43개로 분류하였으며, 교정부의 스펙트럼은 모델의 개발단계에서 계속 사용하였고, 검증부의 스펙트럼은 예측 모델 개발의 최종평가에 사용되었다. 도정비율 예측 모델은 김 등(1997)의 연구에 의거하여 다중회귀분석법(Multiple Linear Regression:MLR)을 이용하여 개발하였다.

바. 다중회귀분석법(MLR)을 이용한 예측모델

다중회귀 모델은 변수증감법(Stepwise)의 방법으로 모델을 개발하였으며, 최대 6개의 파장을 선택할 수 있도록 설정하였다. 이 때 최적의 모델은 실측치와 예측치 사이의 결정계수가 높고, 검증부의 표준오차(Standard Error of Prediction : SEP)가 낮으며, 최소의 파장수를 가진 모델로 결정하였다. 이 때 SEC (Standard Error of Calibration) 및 SEP는 아래의 식에 의거하여 구하였다. 각 모델의 개발에는 원시 스펙트럼과 분할간격(gap)을 변화시킨 1차 및 2차 미분 스펙트럼을 사용하였다. 이들 스펙트럼은 빛의 산란

효과를 제거하기 위한 전처리로서 다분산보정 (Multiple Scatter Correction : MSC)과 표준정규화 (Standard Normal Variate & Detrending : SNV & Dtr.)를 적용시킨 스펙트럼과 전처리를 실시하지 않은 스펙트럼으로 분리하여 분석하였다.

$$SEP = \sqrt{\frac{\sum (Y_k - Y_p)^2}{n}}$$

$$SEC = \sqrt{\frac{\sum (Y_k - Y_p)^2}{n - f - 1}}$$

Y_k : Measured milling ratio

Y_p : Predicted milling ratio

n : Number of samples

f : Number of wavelengths(nm)

3. 결과 및 고찰

가. NMG 시약을 이용한 도정비율 측정

NMG 시약을 이용한 방법은 현재 국내에서 쓰이고 있는 백미의 도정도 표준 감정도법으로 시약 처리에 의해 강층의 박리 정도를 표준품과 대비하여

감정하는 방법이다. 그러나 이 발색 정도에 의한 감정은 검사자의 주관적인 견해가 들어갈 수 있으므로 정확한 도정도 측정이 이루어지기 힘들다고 판단하였다. 따라서 발색 정도를 색차계를 이용하여 측정하였다. 아래의 표 1은 각 시료를 도정비율 별로 NMG 시약으로 발색시킨 후 색차계를 이용하여 각각의 L, a, b 값을 측정된 결과값이다.

각 시료에 대해서 NMG 시약으로 발색을 한 후 다시 색차계로 각각의 L, a, b 값을 측정하는 경우에 발색에 소요되는 시간이 약 15분 정도 측정에 소요되는 5분 정도 따라서 약 20분 정도의 시간이 소요되며, 표 1에서 알 수 있듯이 결과는 대부분의 경우에 결정계수가 0.5 이하로 상관관계가 거의 없음을 알

수 있다. 따라서 NMG 시약을 발색하여 측정된 L, a, b 값으로 실시간에 도정비율을 측정하기에는 불가능하다고 판단되었다.

나. 백도계를 이용한 도정비율 측정

다음의 표 2는 각각의 도정비율에 대하여 백도계로 측정된 결과값을 나타낸 것이다.

백도값을 측정하는 경우에 계측기의 예열에 약 20분, 측정에 보통 10~15초 정도 소요된다. 결정계수는 대부분의 경우에 0.9 이상이였으나, 시간이 오래 걸려 실시간에 도정비율을 측정하기에는 부적합한 것으로 판단되었다.

Table 1 Prediction of milling ratio by NMG treatment

Samples	Regression Equation		R ²
<i>Chuchung</i>	L	$Y = -0.4383 X + 79.672$	0.3371
	a	$Y = -1.3297 X + 140.71$	0.6613
	b	$Y = 0.1063 X - 19.585$	0.0278
<i>Ohdae</i>	L	$Y = -0.0582 X + 44.127$	0.0685
	a	$Y = -0.1892 X + 22.777$	0.6775
	b	$Y = 0.0207 X - 11.257$	0.0981
<i>Dongjin</i>	L	$Y = -0.9154 X + 117.26$	0.3466
	a	$Y = -1.0122 X + 109.26$	0.6625
	b	$Y = 0.0267 X - 10.643$	0.0028
<i>Chuchung (30°C, 3m)</i>	L	$Y = -0.2175 X + 44.549$	0.6193
	a	$Y = -0.3294 X + 24.19$	0.7959
	b	$Y = 0.0507 X - 12.604$	0.0431

Table 2 Prediction of milling ratio by whiteness meter

Sample	Regression Equation	R ²
<i>Chuchung</i>	$Y = -1.6038 X + 180.13$	0.9485
<i>Ohdae</i>	$Y = -1.8358 X + 201.59$	0.9918
<i>Dongjin</i>	$Y = -1.7628 X + 197.92$	0.9676
<i>Chuchung (30°C, 3m)</i>	$Y = -1.9778 X + 215.51$	0.9898

다. 색차계를 이용한 도정비율 측정

다음의 표 3은 각 시료에 대해 NMG 시약 처리를 생략하고 색차계를 이용하여 측정한 L, a, b 값을 나타낸 결과이다.

색차계를 이용하여 도정도별 L, a, b 값을 측정하는 경우에 발색없이 측정에 약 5분 정도 시간이 소요되었다. 또한 표 3에서 알 수 있듯이 각 시료의 도정비율에 따라 색차계를 이용하여 측정한 L, a, b 값은 NMG 시약으로 발색한 후 측정된 결과보다 도정비율과 높은 상관관계를 나타내었으나 역시 결정계수가 0.9 이하로 실시간에 도정비율을 측정하기에는 부적합한 것으로 판단되었다.

라. 도정비율별 분광반사 특성

본 연구에서는 각 시료에 대하여 현미의 도정비율을 100%로 하였을 때, 백미의 도정비율을 84~96%로 약 0.5% 간격으로 도정을 실시한 후 400~2,500 nm 영역에서 2nm 간격으로 반사 스펙트럼을 측정하였다.

도정비율별 원시 스펙트럼을 분석한 결과, 가시광선 영역에서는 현미의 흡광도가 가장 높게 나타났고, 도정비율이 감소할수록 흡광도는 감소하였다. 근적외선 영역에서는 현미의 흡광도가 가장 낮았으며 흡광도 분포는 도정비율의 변화에 따라 유사한 패턴을 나타내었다.

마. 가시광선 및 근적외선 스펙트럼을 이용한 도정비율 측정

본 연구에서 추청벼의 경우, 전 파장 영역에서 표준정규화(SNV & Dtr.)로 전처리 하고 분할간격을 10nm로 하여 2차 미분한 후 6개의 파장을 선택하였을 때, 이 때 F-Value를 고려하였고, 가장 좋은 모델을 구할 수 있었다. 이 때 사용된 파장은 2,076, 1,708, 434, 732, 1,032, 962nm였다. 이 모델에서 교정부의 결정계수는 0.998, 표준오차(SEC)는 0.183%로 나타났으며, 검증부의 결정계수는 0.967, 검증부 오차(SEP)는 0.690%, bias는 0.242였다.

오대벼의 경우, 전처리 없이 분할간격을 20nm로 하여 2차 미분한 후 최대 6개의 파장을 선택하였을

Table 3 Regression equations between milling ratio and values of L, a, b

Samples	Regression Equation		R ²
Chuchung	L	Y = -0.73 X + 129.6	0.7413
	a	Y = 0.2108 X - 20.045	0.7242
	b	Y = 0.6217 X - 43.531	0.8411
Ohdae	L	Y = -0.3156 X + 72.083	0.8116
	a	Y = 0.0533 X - 2.3351	0.7233
	b	Y = 0.1791 X + 11.014	0.8221
Dongjin	L	Y = -1.0784 X + 162.66	0.8498
	a	Y = 0.0806 X - 8.6923	0.4885
	b	Y = 0.339 X - 18.711	0.6095
Chuchung (30°C, 3m)	L	Y = -0.5348 X + 75.775	0.8528
	a	Y = 0.0739 X - 2.2072	0.8156
	b	Y = 0.2114 X + 10.378	0.7872

때 가장 적합한 모델을 구할 수 있었다. 이 때 사용된 파장은 2,326, 632, 834, 1,228, 2,390, 2,264nm였다. 이 모델에서 교정부의 결정계수는 0.996, 표준오차는 0.242%로 나타났으며, 검증부의 결정계수는 0.890, 검증부 오차는 1.167%, bias는 0.214로 나타났다.

동진벼의 경우, 다분산보정(MSC)으로 전처리 하고 분할간격을 10nm로 하여 2차 미분한 후 6개의 파장을 선택하였을 때 가장 좋은 모델을 구할 수 있었다. 이 때 사용된 파장은 2,256, 2,224, 1,716, 1,268, 2,142, 2,112nm였다. 여기서 교정부의 결정계수는 0.999, 표준오차는 0.043%로 나타났고, 검증부의 결정계수는 0.986, 표준오차는 0.515%, bias는 0.231로 나타났다.

30℃에서 3개월간 저장한 추청벼의 경우, 다분산보정으로 전처리 하고 분할간격을 10nm로 하여 2차 미분한 후 6개의 파장을 선택하였을 때 가장 좋은 모델을 구할 수 있었다. 이 때 사용된 파장은 2,178, 2,460, 496, 540, 848, 538nm였다. 이 모델에서 교정부의 결정계수는 0.999, 표준오차는 0.088%로 나타났고, 검증부의 결정계수는 0.993, 표준오차는 0.414

%, bias는 -0.171로 나타났다.

마지막으로 전체 시료들을 섞은 132개의 스펙트럼 중에서 89개를 교정부로 사용하고 나머지 43개를 검증부로 사용하여 다중회귀 분석을 실시하였다. 이 때 전처리 없이 분할간격을 8nm로 하여 1차 미분한 후 6개의 파장을 선택하였을 때 가장 좋은 모델을 구할 수 있었다. 이 때 사용된 파장은 1,386, 802, 1,848, 426, 1,490, 1,928nm였다. 이 모델에서 교정부의 결정계수는 0.986, 표준오차는 0.442%로 나타났고, 검증부의 결정계수는 0.967, 표준오차는 0.729%, bias는 0.246로 나타났다. 다음의 표 4는 다중회귀 분석을 이용하여 모델을 개발한 결과이고, 그림 2는 검증부에서 측정치와 예측치의 상관관계를 나타낸 것이다. 가시광선 및 근적외선을 이용하여 도정비율 측정에 소요된 시간은 시료셀의 준비에 약 5분정도 측정에 약 0.7~1.5초 정도의 시간이 소요되었고, 결과들도 다른 방법들에 비해 월등히 좋은 것으로 나타났다. 따라서 그 정확성이나 실시간 측정의 목적에 비추어 볼 때 도정비율을 측정하기에는 가장 적합한 방법으로 판단되었다.

Table 4 Results of calibration and validation to develop MLR model

Calibration					Validation			
Math. ^{a)}	Preprocessing	n ^{b)}	R ²	SEC	n	R ²	SEP	Bias
None	RAW	83	0.977	0.563	42	0.947	0.900	-0.200
	MSC	86	0.973	0.649	41	0.958	0.803	0.233
	SNV & Dtr.	86	0.981	0.549	42	0.965	0.675	0.136
1st (8)	RAW	80	0.986	0.442	42	0.953	0.803	0.167
	MSC	82	0.984	0.495	42	0.950	0.833	0.127
	SNV & Dtr.	86	0.972	0.656	42	0.967	0.729	0.246
2nd (20)	RAW	80	0.983	0.487	42	0.959	0.773	0.277
	MSC	83	0.967	0.695	40	0.957	0.689	0.093
	SNV & Dtr.	85	0.971	0.647	42	0.952	0.850	0.189

^{a)} Math : Mathematical treatment.

^{b)} n : Number of samples.

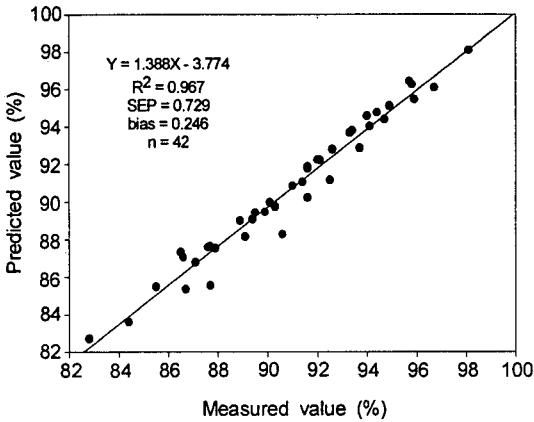


Fig. 2 Comparison of measured and predicted milling ratios by NIR Spectroscopy.

Model conditions : 1st derivative (gap = 8nm), SNV & Dtr. : 400~2,500nm.
 Wavelength : 1,386, 802, 1,848, 426, 1,490, 1,928nm.

바. 도정비율 측정방법간 비교

다음 표 5는 각각의 도정비율 측정방법들의 최종적인 결과들을 비교 검토한 것이다.

표 5를 살펴보면 NMG 시약을 이용하여 L, a, b 값을 측정된 결과는 결정계수 0.003~0.796에서 알 수 있듯이 도정비율을 측정하기에는 부적합한 것으로 판단되었다. 그리고 백도값을 이용한 결과와 분광광도계를 이용한 결과는 모두 양호하였으나, 백도계의

경우 신속성이 떨어지므로 사용하기에는 부적합한 것으로 판단되었다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 도정공정 자동화의 선결요건인 도정도의 실시간 측정을 위하여 분광반사특성을 이용한 도정도 측정 모델을 구하기 위한 실험을 수행하였다. 시료는 1996년산 추청벼(경기도 이천산), 오대벼(강원도 철원산), 동진벼(전북 익산산), 그리고 30℃의 인큐베이터에서 3개월간 저장한 추청벼(경기도 이천산)를 사용하였고, 도정비율 84%~96% 사이에서 약 0.5% 간격으로 도정하여 시료를 만든 후 실험에 사용하였다.

1) 백도계를 이용하는 경우 결정계수(R²)는 높게 나타났지만, 측정기의 예열 및 측정에 약 10~15초 정도의 시간이 소요되므로 실시간 측정에 부적합하였다.

2) 시료를 NMG 시약으로 발색시킨 후 각 L, a, b 값을 측정된 경우에 결정계수도 크지 않고, 발색 및 측정에 약 20분 정도의 시간이 소요되어 실시간 측정에 적합하지 않았다.

3) 시료를 Colorimeter로 L, a, b 값을 측정할 때, 정확성은 백도계를 사용하는 경우보다 떨어졌다. 시간은 약 5분 정도 소요되었으므로 실시간에 정확하게 측정하기에는 부적합한 것으로 판단되었다.

4) 가시광선 및 근적외선 영역 400~2,500nm에서

Table 5 Comparison of measurement methods of milling ratio

Rice Varieties	R ²			Whiteness meter	NIR Spectroscopy
	L	a	b		
Chuchung	0.7413	0.7242	0.8411	0.949	0.967
Ohdae	0.8116	0.7233	0.8221	0.992	0.890
Dongjin	0.8498	0.4885	0.6095	0.968	0.986
Chuchung (30℃, 3months)	0.8528	0.8156	0.7872	0.990	0.993

2nm 간격으로 반사 스펙트럼을 측정한 결과는 가시광선 영역에서는 현미의 흡광도가 가장 높았고 도정비율이 감소함에 따라 흡광도는 감소하였다. 근적외선 영역에서 현미와 백미의 스펙트럼은 가시광선 영역과는 전혀 다른 경향을 나타내었으며 현미의 흡광도가 가장 낮았고 도정비율에 따라서는 유사한 경향의 흡광도 분포를 나타내었다.

5) 시료를 근적외선 분광분석기를 이용하여 측정할 때 약 0.7~1.5초 정도 소요되었으며, 그 결과의 정확성은 백도계를 사용한 경우와 비슷하거나 더 좋았다. 근적외선 분광분석법은 시료에 관계없이 표준 정규화법으로 전처리를 하고 난 후, 분할간격을 8nm로 하여 1차 미분한 값을 사용하는 것이 가장 적합하다고 판단되었으며, 이 때 사용된 파장은 1,386, 802, 1,848, 426, 1,490, 1,928nm이었다.

6) 추청벼의 경우 저온저장고(4℃)에서 저장한 시료와 30℃ 인큐베이터 안에서 3개월간 저장한 시료 중 30℃ 인큐베이터에 저장한 시료의 결과가 더 좋았다. 그 이유는 인큐베이터의 경우 온도조절 범위가 ±0.5℃로 저온저장고의 ±5℃에 비해 균일한 온도가 유지된 때문으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 김영배, 하덕모, 김창식. 1990. 우리나라 쌀의 도정 품위특성. 식품과학 22(2):199-205.
2. 김영봉. 1996. 식품의 성분 분석을 위한 근적외선(NIR)의 이용(I). 식품기술 9(1):24-35.
3. 김재민, 민봉기, 최창현. 1997. 가시광선/근적외선을 이용한 쌀의 정백수율 측정. 한국농업기계학회지. 22(3):333-342.
4. 노상하, 也田善郎, 山下律也. 1990. 벼의 분광반사특성과 이를 이용한 정백미의 백도 측정기 개발. 한국농업기계학회지 15(1):33-43.
5. 조승용 외 2인. 1994. 근적외선 분광분석법에 의한 밥의 노화도 측정. 한국식품과학회지 36(5):579-584.
6. 한충수, 夏賀元康. 1996. 근적외선 분석계를 이용한 국내산 쌀의 성분예측모델 개발(I). 한국농업기계학회지 21(2):198-210.
7. Bhattacharya, K. R., C. M. Sowbhagya and Y. M. Indudhara Swamy. 1972. Some Physical Properties of Paddy and Rice and their Interrelations. J. Sci. Fd. Agric. 23(3):171-186.
8. Casady, W. W., M. R. Paulsen and J. B. Sinclair. 1993. Optical Properties of Damaged Soybean Seeds. Transactions of the ASAE 36(3):943-947.
9. Chen, P. and Z. Sun. 1985. A Review of Non-destructive Methods for Quality Evaluation and Sorting of Agricultural. J. agric. Engng. Res. 49(2):85-98.