

분광 반사 특성을 이용한 대두의 외관품질 판별인자 구명

Identification of External Quality Classification Factors of Soybean Seed Using Spectral Reflectance

김 현 룡*

H. Y. Kim

노 상 하*

정희원

S. H. Noh

1. 서론

콩의 소비량은 해마다 꾸준히 증가하여 96년 현재 국내 소비량은 163만 톤으로 쌀 소비량의 25%에 이르고 있다. 그러나 경작면적의 감소로 인해 국내 생산량은 16만톤으로 자급률이 10% 정도에 불과하며 거의 대부분을 수입에 의존하고 있다. 콩의 수입 의존도가 높은 이유는 콩의 낮은 수익성과 높은 생산비로 인해 수입콩에 비해 가격 경쟁력이 떨어지기 때문이다. 따라서 최소한의 자급도를 유지하고 국제 경쟁력을 향상시키기 위해서는 기계화를 통한 생산비 절감이 필요하다. 특히 국내에서 생산되는 콩은 수입콩에 비해 품질이 우수하다는 점을 고려할 때, 품질이 우수한 국내콩을 값싼 수입콩과 차별화함으로써 국제 경쟁력을 향상시키기 위한 수확 후 선별작업의 기계화가 절실히 요구되고 있다. 그러나 현행 수확 후 선별작업은 단순한 크기 선별을 제외하면 전적으로 인력에 의존하고 있는 실정이다.

미국을 비롯한 선진국에서는 10여 년 전부터 영상처리와 분광반사 특성을 이용한 콩의 선별에 관한 연구가 진행되고 있다. Gunasekaran 등(1988)은 수확이나 탈곡 시에 발생하는 콩의 껍질과 자엽의 크랙(crack)을 검출하기 위해 흑백영상처리를 이용하였으며, Paulsen 등(1989)은 칼라 영상처리를 이용하여 콩의 품질인자를 찾는 연구를 수행하였다. 그 결과 건전립과 피해립은 98%의 정확도로 3초만에 판별이 가능하며 피해립 내에서 피해립의 종류를 판별하는 데에는 99%의 정확도로 25초가 소요된다고 보고하였다. Casady 등(1993)은 건전립, 미숙립, 각종 피해립의 300~850nm의 분광반사 특성을 조사하여 판별에 유의한 파장을 선정하고자 하였다.

본 연구는 광센서를 이용한 콩의 외부품질 판정 시스템의 선별센서부 설계에 필요한 기초 자료를 제시하기 위해 400~1100nm 파장대역의 분광반사 특성을 분석하여 외부품질을 판정하기 위한 판별인자를 제시하고, 그 판별인자를 이용한 모의실험을 통해 실용화 가능성을 구명하고자 하였다.

* 이 연구는 한국학술진흥재단에서 지원한 "농산물의 광학적 특성 구명 및 선별센서 개발을 위한 기초연구"로 수행되었음

* 서울대학교 농업생명과학대학 생물자원공학부

2. 재료 및 방법

가. 공시재료

96년 전남 해남에서 생산된 대두 중 1차 크기 선별을 거친 것을 경기도 정남농협에서 구입하여 실험재료로 사용하였다. 콩은 육안에 의해 건전립, 미숙립, 갈색립, 자색립, 충해립, 병해립의 6종류로 분류하였으며, 판별분석용 시료와 판별분석에서 선정한 판별인자를 이용하여 판별정도를 검정하고 모의실험을 통해 실용화 가능성을 구명하기 위한 검정용 시료의 개수는 클래스당 각각 30개였다.

나. 분광반사 스펙트럼 측정

시료의 분광반사 스펙트럼은 서울대학교 농업과학공동기기센터에 있는 분광광도계(Model 6500, NIRSystems Inc., USA)를 사용하여 400~1100nm의 파장 영역에서 2nm 간격으로 측정하였다. 단립상태로 콩의 분광반사 스펙트럼을 측정하기 위하여 그림 1에서 보는 바와 같은 샘플홀더를 제작하였다. 무광택 흑색 페인트로 칠한 두께 0.5mm의 스테인레스 철판에 지름 6mm의 구멍을 뚫어 입사광이 조사되도록 하였다. 이 때, 구멍 주위에 흑색 고무스펀지를 부착하여 반사광의 누광과 불필요한 광의 유입을 막았으며 클램프로 콩을 고정시킨 상태에서 스펙트럼을 측정하였다.

다. 판별분석 방법

(1) 판별인자(변수)

본 연구에서는 장치구현의 간소화를 위해 판별인자로 단일파장에서의 반사도(R_λ), 두 파장에서의 반사도의 차($R_{\lambda i} - R_{\lambda j}$) 및 비($R_{\lambda i} / R_{\lambda j}$), 세 파장에서의 반사도의 정규화된 차(normalized difference)(($R_{\lambda i} - R_{\lambda j}$)/ $R_{\lambda k}$)로 제한하였으며, 판별분석은 10nm 파장간격으로 수행하였다. 차는 스펙트럼의 모양을 강조하고 기준선(baseline)의 이동을 제거하는 장점이 있으며, 비는 무차원수로서 광학 선별시스템에서 조명의 영향을 감소시키는 이점이 있다.

(2) 파장 선택 방법

판별분석은 미지의 개체에 클래스를 부여하기 위해 판별변수 $\mathbf{x}^T = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ 가 다변량 정규분포를 따른다는 가정 하에 미지의 개체와 각 클래스(class) 평균과의 마할라노비스 거리(Mahalanobis distance)를 계산하여 가장 가까운 클래스에 귀속시키는 것이다. 미지의 개체와 i 번째 클래스 평균과의 마할라노비스 거리 D^2 은 식 1과 같이 정의된다.

$$D^2 = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)^T \Sigma_i^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i) \quad (1)$$

여기서, \mathbf{x} = 미지의 개체 x 의 위치 벡터

$\bar{\mathbf{x}}_i$ = i 번째 클래스의 평균의 위치 벡터

Σ_i = i 번째 클래스의 분산-공분산 행렬

판별인자에 포함된 파장은 원칙적으로 식 2의 값을 최소로 하는 파장으로 선택하였으나, 모든 파장의 선택은 그래프나 분포도를 그려 안정적인 파장을 선택하고자 하였다.

$$\text{Criterion}(\lambda) = \sum_{i=1}^P \sum_{j \neq i} \frac{1}{D_{ij}^2(\lambda)} \quad (2)$$

여기서, $D_{ij}^2(\lambda) =$ 특정파장 λ 에서 i 번째와 j 번째 클래스 평균간의 Mahalanobis 거리
 $P =$ 판별하고자 하는 클래스의 수

라. 모의실험 방법

광센서를 이용한 선별시스템의 선별정도를 모의실험을 통해 검증하기 위해서 그림 2에서 보는 바와 같은 선별시스템을 구상하였다. 모의실험에서의 가정은 다음과 같다.

- ① 콩에서의 표면반사(specular reflection)는 무시한다.
- ② 반사의 강도는 광원의 방향에 관계없이 모든 방향에 대해 균일하다.
- ③ 콩은 구로 가정하며 유효면적은 모든 콩에 대해 일정하다.

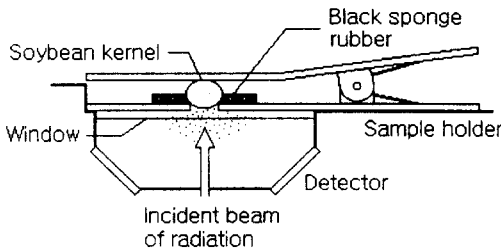


Fig. 1. Sample holder for reflectance measurements on a single kernel.

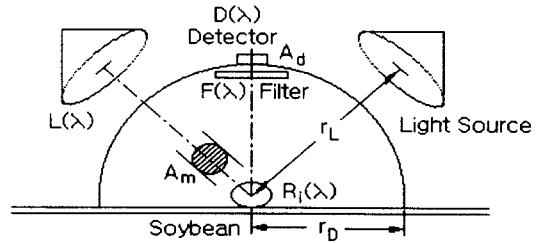


Fig. 2. Simulation model for verifying the accuracy of classification in the optical system using photodiode.

광센서의 출력신호를 계산하기 위해 광원의 파장별 복사에너지, 콩의 분광반사도, 필터의 투과도 및 광센서의 감도를 고려하였다(Shearer, 1996). 광원의 수를 n , 콩의 광원에 대한 유효단면적을 A_m , 광원에서 콩의 중심까지의 거리를 r_L , 콩과 광센서 사이의 거리를 r_D , 광센서의 유효면적을 A_d , 단위거리에 대한 단위면적당 복사에너지를 $L(\lambda)$, i 번째 콩의 분광반사 특성을 $R_i(\lambda)$, 필터의 투과특성을 $F(\lambda)$, 광센서의 감도 특성을 $D(\lambda)$ 라고 할 때, i 번째 콩에 의해 발생하는 광센서의 총 출력전류 $O_i(\lambda)$ 는 식 3과 같이 계산되며, 이렇게 계산된 출력전류를 이용하여 선별시스템의 실용화 가능성을 검토하였다.

$$O_i = \sum_{\lambda=\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} f L(\lambda) R_i(\lambda) F(\lambda) D(\lambda) \Delta\lambda \quad (3)$$

여기서, $f = \frac{nA_m A_d}{4\pi r_D^2}$, 모의실험 상수(simulation constant)

Table 1. Simulation constant and variables affecting it

Item	Variable	Value
No. of light sources	n	4
Distance between light source and soybean kernel	r _L	0.5m
Distance between detector and soybean kernel	r _D	5mm
Effective projected area of soybean kernel	A _m	50mm ²
Effective area of detector	A _d	13mm ²
Simulation constant	f	8.3

식 3의 f 는 모의실험에 사용된 변수들에 의해 결정되는 상수로서 본 연구에서 사용한 변수들의 값은 표 1에서 보는 바와 같다.

광원으로는 100W 텅스텐 할로겐 램프를, 광센서로는 실리콘 포토다이오드를 사용하였으며, 필터의 분광투과 특성은 피이크 파장과 유효밴드폭에 의해서 결정되는 식 4와 같은 함수를 정의하여 사용하였다.

$$F(\lambda) = \frac{T_0}{\exp[a(\lambda - \lambda_p)^2]} \quad (4)$$

여기서, T_0 = 피이크 파장 λ_p 에서의 필터 투과도

$$a = \frac{4 \ln 2}{EBW^2}$$

모의실험에 사용한 필터는 대역통과 필터로서 유효밴드폭(EBW: effective bandwidth)은 2, 20, 40, 80, 160nm였다. 여기서 2nm는 실제 광학필터의 유효밴드폭이라기보다는 분광광도계를 정밀한 필터로 가정하여 모의실험한 것이다. 모의실험에서 필터의 밴드폭이 변하더라도 $T_0=0.5$ 로 일정하게 하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 판별분석 결과

대체로 건전립의 반사도는 불량립보다 높게 나타났으며 건전립과 불량립의 판별에 적합한 파장은 500~700nm의 가시광선 영역으로 근적외선 영역에서는 판별이 어려운 것으로 나타났다.

판별분석은 건전립과 불량립(미숙립, 갈색립, 자색립, 충해립, 병해립)의 두 부류에 대해서 수행하였으며 불량립끼리의 판별분석은 하지 않았다. 표 2는 판별인자에 따라 총 180개의 검정용 시료 중에서 잘못 분류된 시료의 개수를 나타낸 것이다. 표에서 알 수 있듯이 R_{580}/R_{990} 과 $(R_{590} - R_{820})/R_{990}$ 을 판별인자로 사용하는 경우 판별정도가 가장 높게 나타났다. 그리고 불량립 중에서 가장 판별이 곤란한 것은 충해립으로 분석되었다.

Table 2. Classification results of the sound and the defective samples depending on the discrimination factor

Factor	No. misclassified among 30 samples/class						Error(%)
	Sound	Immature	Brown	Violet	Inset d.	Diseased	
R_{640}	0	2	1	2	1	1	3.9
$R_{600} - R_{820}$	1	1	0	0	4	0	3.3
R_{580} / R_{990}	0	1	0	0	4	0	2.8
$(R_{590} - R_{820}) / R_{990}$	0	1	0	0	4	0	2.8

나. 모의실험 결과

판별분석을 통해 선정된 판별인자를 사용하여 필터의 유효밴드폭을 변화시키면서 그림 2에서 보는 바와 같은 선별센서부를 구성한 다음 모의실험을 수행한 결과는 표 3에서 보는 바와 같다. 판별분석 결과와는 달리 차가 포함된 판별인자 $R_{600} - R_{820}$ 과 $(R_{590} - R_{820}) / R_{990}$ 을 사용할 경우에는 단일과장에서의 반사도 R_{640} 을 사용하는 경우보다 오히려 선별정도가 감소하였다. 판별인자 R_{640} 과 $R_{600} - R_{820}$ 을 사용했을 때의 광센서의 출력신호는 필터의 밴드폭에 비례하여 증가하는 경향이 있었으나 비가 포함된 판별인자 R_{580} / R_{990} 과 $(R_{590} - R_{820}) / R_{990}$ 을 사용할 때에는 필터의 밴드폭에 관계없이 거의 일정한 신호를 출력하는 것으로 나타났다. 또한 선별정도가 가장 낮은 불량립은 판별분석에서와 마찬가지로 층해립으로 나타났다.

필터의 유효밴드폭이 좁을수록 광전류가 작아지고 잡음의 영향을 크게 받기 때문에 복잡한 신호조절장치와 고감도의 검출기가 필요하게 되어 하드웨어의 비용이 증가하게 된다. 반면 필터의 유효밴드폭이 증가하면 필터를 사용하는 의미가 없어져 선별정도가 떨어지는 경향이 있다. 특히 미숙립의 반사도 스펙트럼은 건전립의 반사도 스펙트럼과 비교할 때 670nm를 전후한 좁은 과장영역에서의 차이를 제외하면 거의 일치하는 경향이 있었기 때문에 필터의 유효밴드폭이 80nm 이상에서는 선별정도가 두드러지게 감소하기 시작하였다.

이상의 결과를 통해 높은 선별정도를 유지하면서 필터의 유효밴드폭을 가능한 한 크게 하고, 조명을 비롯한 주변환경의 영향을 감소시키기 위해서는 밴드폭이 80nm인 필터와 판

Table 3. Simulation results of the sound and the defective samples depending on the discrimination factors and the bandwidths of filter

Factor	Error(%)				
	2nm	20nm	40nm	80nm	160nm
R_{640}	3.9	3.9	3.9	3.9	5.6
$R_{600} - R_{820}$	14.4	13.3	13.3	15.0	18.9
R_{580} / R_{990}	2.8	2.8	2.8	2.8	3.3
$(R_{590} - R_{820}) / R_{990}$	11.1	11.1	12.2	11.7	11.1

별인자로 R_{580}/R_{990} 을 사용하는 것이 콩 선별시스템의 설계에 있어서 가장 적합할 것으로 판단되며, 이 때 본 연구에서 제시한 모의실험 모델에 의하면 높은 선별 정확도를 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 광센서나 카메라를 이용한 콩의 외부품질 판정시스템의 선별센서부 설계를 위한 기초 연구로서 콩의 분광반사 특성을 이용하여 선별에 유의한 판별인자와 파장을 제시하고 실용화 가능성을 구명하기 위해서 수행되었다.

콩은 건전립, 미숙립, 갈색립, 자색립, 충해립, 병해립의 6개 클래스로 분류하고 400~1100nm 파장영역에서 반사도 스펙트럼을 측정된 후 마할라노비스 거리를 이용하여 판별분석을 수행하였다. 판별인자로선 단일파장에서의 반사도 R_{λ} , 두 파장에서의 반사도의 차 $R_{\lambda i} - R_{\lambda j}$ 와 비 $R_{\lambda i}/R_{\lambda j}$, 세 파장에서의 반사도의 정규화된 차 $(R_{\lambda i} - R_{\lambda j})/R_{\lambda k}$ 를 사용하였다.

또한 판별분석 결과를 이용하여 광원의 복사에너지, 콩의 분광반사도, 필터의 분광투과 특성 및 광센서의 감도 특성을 고려한 모의실험을 수행하였다. 광원은 텅스텐 할로겐 램프, 광센서는 실리콘 포토다이오드, 필터는 유효밴드폭이 2, 20, 40, 80, 160nm인 대역통과 필터를 사용하였으며 모의실험 결과를 통해 선별시스템의 선별정도와 실용화의 가능성을 구명하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 반사도의 비와 정규화된 차를 판별인자로 사용할 때 판별정도가 97.2%로 가장 높았으며, 가장 판별이 어려운 불량립은 충해립으로 나타났다.
2. 모의실험 결과 판별인자로 R_{580}/R_{990} 을 사용하고 필터의 유효밴드폭이 2, 20, 40, 80nm일 때 97.2%로 가장 높은 선별정도를 나타내었다. 따라서 콩 선별시스템의 구성을 위해서는 판별인자로 반사도의 비 R_{580}/R_{990} 을 사용하고 밴드폭이 80nm인 필터를 사용하는 것이 가장 적합할 것으로 판단되며, 본 연구에서 제시한 모의실험 모델에 의하면 높은 선별 정확도를 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

5. 참고문헌

1. Casady W. W., M. R. Paulsen and J. B. Sinclair, 1993, Optical properties of damaged soybean seeds, Trans. of ASAE 36(3): 943-947.
2. Gunasekaran S., T. M. Cooper and A. G. Berlage, 1988, Soybean seed coat and cotyledon crack detection by image processing, J. Agri. Eng. Res. 41: 139-148.
3. Paulsen M. R., W. D. Wigger, J. B. Litchfield and J. B. Sinclair, 1989, Computer image analyses for detection of maize and soybean kernel quality factors, J. Agri.
4. Shearer S. A., J. A. Thomasson and S. G. McNeill, 1996, Filter selection for NIR sensing of plant and soil materials, Trans. of ASAE 39(3): 1209-1214.