

초분광 반사광 영상을 이용한 상추(*Lactuca sativa* L) 종자의 활력 비파괴측정기술 개발에 관한 연구

Study on Development of Non-Destructive Measurement Technique for Viability of Lettuce Seed (*Lactuca sativa* L) Using Hyperspectral Reflectance Imaging

안치국*, 조병관*[†], 모창연**, Moon S. Kim***

Chi-Kook Ahn*, Byoung-Kwan Cho*[†], Chang Yeun Mo** and Moon S. Kim***

초 록 본 연구에서는 초분광 반사광 영상기술을 이용하여 비파괴적으로 상추의 건전종자와 퇴화종자를 선별하는 기술을 개발하고자 하였다. 750~1000nm의 근적외선 초분광 반사광 영상의 분광데이터를 이용하여 상추의 발아종자와 불발아 종자를 판별하는 PLS-DA 모델을 개발하고 개발된 모델의 성능 평가를 실시하였다. 모델 calibration의 판별 정확도는 81.6%였으며, test의 결과는 81.2%의 판별 정확도를 보였다. 또한 개발된 PLS-DA 모델을 적용한 초분광 반사광 영상을 이용하여 대량의 불발아 종자를 동시에 영상으로 검출 가능한 영상처리 알고리즘을 개발하였다. 초분광 반사광 영상에 PLS-DA 모델이 적용된 영상을 이용한 검출 정확도는 91%로 나타났으며, 이는 초분광 반사광 영상을 이용하여 대량의 상추 종자의 비파괴 품질선별에 이용될 수 있음을 보여 주었다.

주요용어: 상추종자, 종자활력, 비파괴 선별, 초분광 영상, 영상처리

Abstract In this study, the feasibility of hyperspectral reflectance imaging technique was investigated for the discrimination of viable and non-viable lettuce seeds. The spectral data of hyperspectral reflectance images with the spectral range between 750 nm and 1000 nm were used to develop PLS-DA model for the classification of viable and non-viable lettuce seeds. The discrimination accuracy of the calibration set was 81.6% and that of the test set was 81.2%. The image analysis method was developed to construct the discriminant images of non-viable seeds with the developed PLS-DA model. The discrimination accuracy obtained from the resultant image were 91%, which showed the feasibility of hyperspectral reflectance imaging technique for the mass discrimination of non-viable lettuce seeds from viable ones.

Keywords: Lettuce Seed, Seed Viability, Nondestructive Sorting, Hyperspectral Imaging, Image Processing

1. 서 론

최근 육류 소비의 증가와 함께 식단 재료인 상추(*Lactuca sativa* L)의 수요가 지속적으로 증가

하고 있다. 엽채류 채소인 상추는 재배 초기 환경요인에 민감한 종자의 발아 상태가 생산성에 많은 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 상추종자의 발아는 종자 내의 발아촉진물질과 발아억제

[접수일: 2012. 8. 1, 수정일: 2012. 9. 17, 게재확정일: 2012. 9. 26] *충남대학교 바이오시스템 기계공학과, **농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부, ***Environmental Microbial and Food Safety Laboratory, Animal and Natural Resources Institute, Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture, [†]Corresponding Author: College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, 220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-604, Republic of Korea. (E-mail: chobk@cnu.ac.kr)

물질간의 상호작용에 의해 조절된다[1]. 발아억제 물질인 *abscisic acid*(ABA)는 발아에 부적합한 환경 하에서 다른 생장조절물질 및 환경조건 등에 연계되어 휴면 유발 및 유지에 영향을 주는 원인으로 알려져 있다[2]. 또한 상추의 발아능력은 종자 내 *cytokinin*과 *ethylene*의 농도와도 관련되어 있는 것으로 알려져 있다[3].

ABA나 *cytokinin*, *ethylene* 모두 종자 내 생 *auxin*에 영향을 미치며, *auxin*은 종자 내 세포팽창과 관련된 구조적 조성물질로써 발아에 관여한다[4]. 현재 이러한 내부 물질 성분의 변화를 비파괴적으로 검출할 수 있는 기술로는 근적외선 분광분석법이 주로 이용되고 있다. 근적외선 분광분석은 780~2500 nm의 파장영역에서 주로 C-H, N-H, O-H 등의 작용기를 가지는 물질을 정량, 정성 분석할 수 있어 농업뿐만 아니라 식품, 화학, 제약 등 다양한 분야에서 응용되고 있는데, 최근 이를 이용하여 우량종자 선별에 관한 연구가 이루어지고 있다. 배추, 무와 같은 십자화과 종자를 비파괴적으로 측정하여 퇴화 및 공동에 의한 불량종자를 판별할 수 있음이 보고되었으며[5], 또한 본 실험에서 사용한 상추종자의 활력도를 근적외선 분광법으로 측정가능하다고 보고되었다. 근래 근적외선 분광법을 이용하여 판별하는 분석방법으로 부분최소제곱 회귀 판별분석법(*partial least square-discriminant analysis*, *PLS-DA*)과 같은 수치해적인 방법으로 모델을 개발하여 미지의 시료를 예측하는 분석법이 많이 이용되고 있다[5,6]. 하지만 이러한 근적외선 분광분석기술은 많은 종자를 동시에 선별할 수 없고 개별 종자에 대해서만 검사를 수행할 수 있어 대량으로 종자를 선별하기에는 한계가 있다. 실용적인 비파괴 종자 선별을 위해서는 대량으로 종자를 선별할 수 있는 기술이 필요하며, 최근 농산물 비파괴검사에서 활발히 연구되고 있는 초분광 영상 기술이 이러한 한계를 극복할 수 있는 후보 기술이라 할 수 있다.

초분광 영상기술은 기존의 분광 기술과 영상 기술을 융합하여 가시광 및 근적외선 영역의 연속적인 파장을 선택적으로 조합하여 구성할 수 있는 첨단 영상기술로서 대상물의 물리적 특성뿐만 아니라 생화학적 특성까지 종합적인 분석이 가능하다. 최근 초분광 영상 기술을 이용하여 농산물 안전성과 품질의 비파괴 측정 연구가 증가

하고 있다[7,8].

본 연구에서는 초분광 반사광 영상을 이용하여 상추 종자(*Lactuca sativa* L)의 발아 여부를 비파괴적으로 판단할 수 있는 알고리즘을 개발하고 이를 이용하여 퇴화종자를 기계시각으로 검출할 수 있는 기술을 개발하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 공시재료

본 연구에 사용한 상추종자는 H사에서 제공된 ‘열강적치마’ 품종이다. 실험에 발아종자와 퇴화종자를 식별하기 위해 정상종자를 인위적으로 퇴화시켰다. 퇴화처리하는 온도와 수분을 변화시켜 종자의 함수율을 20%로 조정 한 후 45℃의 조건에서 72시간 실시하였다. 또한 수분의 영향을 최소화하기 위해 퇴화처리 후 20℃에서 원래 무게까지 건조시켰으며, 정상종자 또한 함수율을 퇴화종자와 동일하게 조절 후 다시 원래 무게까지 건조시켰다[9]. 외부적으로는 건전종자와 퇴화종자의 색과 모양 모두 동일하여 육안으로는 구별할 수 없었다. 시료는 국제종자검정협회(ISTA) 규정에 따라 4℃로 보관하였으며 실험 전에 실내 공기에 노출시켜 실내 온도와 동일하게 맞춘 후 초분광 영상 촬영 및 발아력 검증 실험에 이용하였다.

2.2. 실험 방법 및 데이터 분석

2.2.1. 초분광 영상시스템 및 스펙트럼 측정

Fig. 1과 2는 본 연구에서 사용한 초분광 영상 시스템과 계략도를 나타낸 것이다.

초분광 영상은 물질에 빛을 조사하여 이에 대한 물질이 가지고 있는 분광 정보를 얻는 기존의 분광기술과 같은 맥락이지만 한 점에 대한 정보가 아닌 2차원의 공간 영상 정보와 각 화소의 분광 정보를 동시에 획득하여 3차원의 데이터를 구성하게 된다. 각 화소의 분광정보 이용하여 물질이 가지고 있는 고유의 광학적 성질을 통해 물리적 및 생화학적 특징을 분석하고 이를 시각화 할 수 있다. 본 연구에서 종자 선별을 위한 초분광 영상 시스템은 영상 획득을 위한 *electron multiplying*

charge-coupled device(EMCCD) camera(Luca RDL-604M, Andor Technology, South Windor CT, USA) 와 imaging spectrograph(VNIR, Headwll Photonics, Fitchburg, MA, USA), 그리고 step motor로 구동되는 시료이송부로 구성하였다. 또한 광원은 광량 조절이 가능한 100W급 halogen lamp를 이용하였으며, halogen lamp에 가이드를 설치하여 광의 조사폭 조절이 가능하도록 설계하였다. 가이드는 3개를 1 set로 하였고, 상추종자에 조명을 고르게 조사하기 위해 각 광원 set는 양쪽에서 시료를 비추도록 수직 방향으로 약 15°, 가이드와 가이드 사이는 약 30°정도 기울어지도록 설치하여 반사광의 공간에 따른 불균일성을 최소화하였다(Fig. 3).

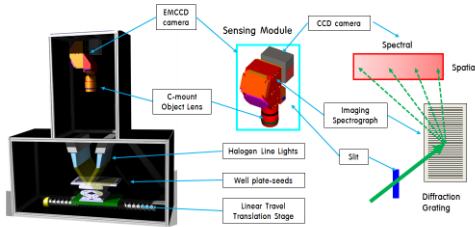


Fig. 1 Schematic of the hyperspectral reflectance imaging system

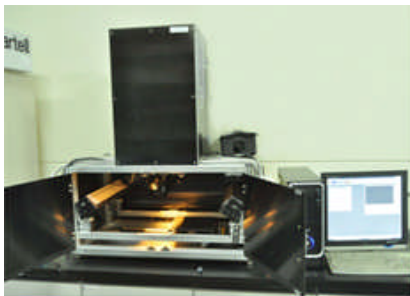


Fig. 2 Photo of the hyperspectral reflectance imaging system

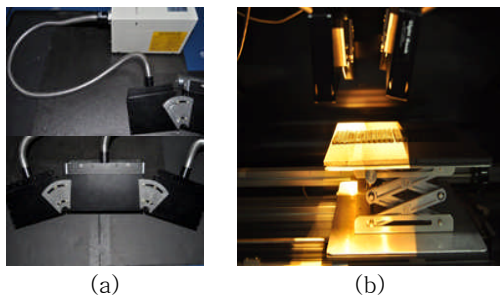


Fig. 3 Photos of (a) a lighting source and (b) the halogen lamp illumination for seed samples

초분광 영상 시스템은 Visual Basic software를 이용하여 제어하였으며, 렌즈의 노출시간을 설정하면 카메라에서 자동으로 step motor의 이송속도 및 촬영시간을 계산하여 구동 할 수 있도록 하였다. 렌즈에 투사된 영상은 25 μ m두께의 slit을 통과하면서 line-scan된 1차원의 정보가 spectrograph에 의하여 각 파장별 분광이 생성하여 2차원의 정보로 변환된다. 분광된 정보는 EMCCD 카메라에 의해 증폭되어 이미지로 저장된다. 이러한 영상들은 Fig. 4에서 보는 것과 같이 3D hypercube를 구성하게 되며, 2차원의 영상정보와 각 픽셀별 스펙트럼 정보를 동시에 가지게 된다. 초분광 영상에 대한 자세한 원리는 여러 연구문헌에 자세히 나타나 있다[10,11]. 본 연구에서는 초분광 영상촬영 시 노출시간(exposure time)은 9.5 msec로 하고 step motor의 이동은 0.1 mm 간격으로 2300 step으로 하며 총 23 cm를 이동하여 상추종자의 초분광 영상을 획득하였다. 측정된 스펙트럼 영상의 범위는 400~1000 nm 이었으며, 이중 가시광선의 영역을 제외한 750~1000 nm 범위의 근적외선 스펙트럼 데이터를 분석과 결과 영상 구축에 이용하였다.

2.2.2. 발아력 실험

상추 종자의 초분광 영상을 획득한 후 개별종자에 대한 발아종자와 불발아 종자를 식별하기 위해 국제종자검정협회(ISTA) 규정에 따라 발아 실험을 실시하였다. 발아법은 TP법으로 16립씩 20℃ 조건으로 10일간 발아력 실험을 실시하였는데, 일반적으로 상추종자는 3일 이내에 발아가 끝나는 것으로 확인되었다.

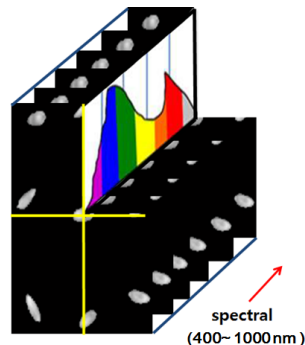


Fig. 4 Structure of a representative 3D hypercube

2.2.3. 퇴화종자 판별 예측 모델 개발

상추의 발아종자와 불발아종자를 판별하는 위한 예측 모델은 부분최소제곱판별법(partial least square-discriminant analysis, PLS-DA)를 이용하여 개발 하였다. 건전종자 144립과 퇴화종자 144립에 대해 초분광 반사광 영상 측정을 실시한 후 발아력 실험을 통해 발아종자와 불발아종자로 구분하여 분석을 실시하였다. 종자의 스펙트럼 데이터는 초분광 영상시스템을 통해 획득한 초분광 반사광 영상에서 수동으로 영역을 선정하여 추출하였으며, 분석에 이용된 스펙트럼 데이터 수는 발아종자 스펙트럼 18,139개와 불발아종자 27,550개 이었다. 이 중 75%에 해당하는 발아종자의 13,604개의 스펙트럼과 불발아종자의 20,662개의 스펙트럼을 calibration 그룹으로 설정하고 이를 모델 개발에 사용하였다. 또한 모델 개발에 사용하지 않은 25%의 발아종자 스펙트럼 4,535개와 불발아 종자 스펙트럼 6,888개를 test 그룹으로 설정하여 개발된 모델을 검증하였다. PLS 모델은 종속변수인 실제 측정된 농도의 정보를 이용하여 독립변수인 스펙트럼의 정보와의 선형 회귀 모델을 개발하는 방법이다. 그러나 PLS-DA는 종속변수로 농도의 값 대신에 판별하고자 하는 그룹들을 가상 변수로 지정하여 회귀 모델을 개발한다.

본 연구에서는 상추의 건전종자와 퇴화종자를 판별하는 기준은 PLS-DA 모델 개발시 발아종자의 스펙트럼 그룹을 가상 변수 '1'로, 불발아 종자의 스펙트럼 그룹은 '2'로 설정하여 모델을 개발하였으며 그 중간값인 1.5를 발아여부 문턱값으로 설정하여 판별하였다. 이로써 개발된 모델에 의한 예측 결과값이 1.5보다 낮으면 발아종자, 1.5보다 높으면 불발아 종자로 판단하였다[12]. 따라서 발아종자의 예측결과값이 1에 가깝고 불발아 종자의 스펙트럼 예측결과 값이 2에 근접할 수록 모델의 판별 성능이 우수하다고 볼 수 있다.

$$PLS \text{ 영상} = \sum_{i=1}^n W_i H_i + constant \quad (1)$$

where W_i : beta coefficients
 H_i : the image at i_{th} wavelength of a total of n spectral images
 Constant : beta coefficients constant

또한 식(1)에 의해 개발된 PLS 모델의 계수와 상

수인 beta coefficient를[13] 초분광 영상에 적용하여 각 파장 영상의 선형조합으로 PLS 영상을 구성하고 이 영상을 이용하여 퇴화종자를 검출하기 위한 영상처리 알고리즘을 개발하였다. 모든 데이터 분석은 MATLAB(version 7.0.4, The Mathworks, Natick, MA, USA) 프로그램을 이용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 스펙트럼 분석

측정된 초분광 영상에서 상추종자 영역의 스펙트럼을 추출하였는데 상추의 발아종자와 불발아종자의 평균스펙트럼은 Fig. 5와 같이 비슷한 패턴을 보였으나 전체적으로 발아종자의 반사광 정도가 높게 나타났다. 이는 퇴화하는 과정에서 발생하는 색소나 성분물질의 변화에 기인한 것으로 판단되지만 이들의 편차가 심하여 단일과장이나 일부 과장으로는 건전종자와 퇴화종자를 분류하기란 어려움이 있다. 건전종자와 퇴화종자 두 그룹별로 차이를 나타내는 정확한 과장영역의 분석은 PLS-DA 방법을 통해 분석하였다.

3.2. 발아력 실험 결과

개별 종자의 발아 여부를 식별하기위해 실시한 발아력 실험 결과 일반적인 건전종자는 3일 이내에 발아가 완료되는 것을 확인할 수 있었다. 이 기간 내에 퇴화처리 하지 않은 건전종자는 95%의 발아율을 보였으며, 72시간 퇴화 처리한 종자는 모두 발아되지 않았다. 발아력 실험을 통해 검증된 총 288립 중 137립의 발아종자와 151립의 불발아 종자 그룹 정보는 발아력 실험 전에 측정된 초분광 반사광 영상 데이터의 분석에 사용되었다.

3.3. 발아종자와 불발아종자 판별 예측 모델 및 성능평가

발아력 실험 후 식별된 상추의 발아 종자와 불발아 종자의 스펙트럼을 이용하여 PLS-DA를 적용한 발아력 판별예측 모델을 개발하였다. 발아종자와 퇴화종자 구분을 위해 제안된 최적 모델의 beta coefficient를 계산하여 두 그룹의 판별에 많은 영향을 미친 영역을 확인하였다. Fig 6은 개발된

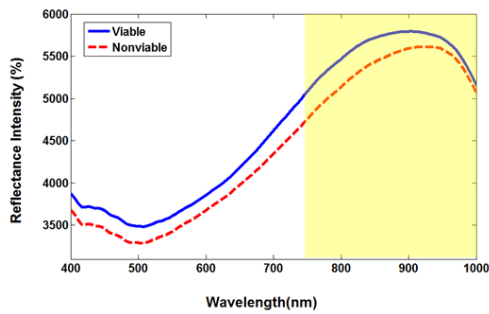


Fig. 5 Mean spectra of viable and non-viable of lettuce seeds

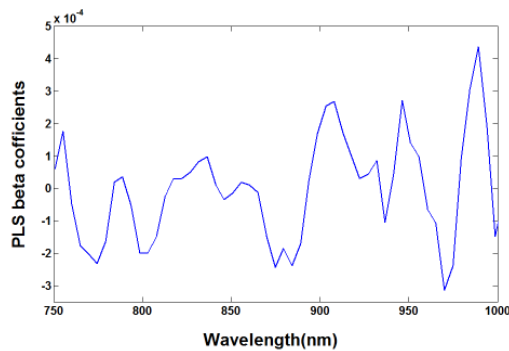


Fig. 6 Beta coefficients of the developed PLS model

모델의 beta coefficient를 나타낸 것이다. 이 값의 절대값이 클수록 해당 영역의 파장이 PLS 모델 개발에 영향을 많이 미친 파장으로 해석할 수 있다. 870~880 nm, 910~915 nm, 935~950 nm 970 nm, 990 nm 파장대가 모델 개발에 주된 영향을 미친 것으로 나타났다. 870~880 nm, 910~915 nm, 935~950 nm 영역대는 C-H structure third overtone의 진동모드에 의한 영향으로 사료되며 이는 CH₃ 및 protein 등 모두 C-H 결합에 의한 화학적 작용기와 관련이 있다.

또한 970 nm 와 990 nm 파장대는 O-H structure second overtone의 진동모드에 영향을 받는 파장대로 O-H 결합으로 이루어진 수분과 밀접한 관련이 있다[14]. 특히 C-H 작용기와 관련된 상추 종자의 발아 억제 물질인 abscisic acid(ABA)나 cytokinin, ethylene 등은 종자 내 세포 구조적 조성물질의 변화에 기인하여 발생한 것으로 상추 종자의 발아 여부 검사에 중요한 영향을 미치는 것으로 사료된다. Table 1은 개발된 PLS-DA모델의 calibration 그룹의 정확도 결과를 보여준다.

Calibration 분류 정확도는 발아종자 72.6%, 불

Table 1 Calibration results of PLS-DA model for viable and non-viable lettuce seeds

Calibration	Total*	Correct*	Incorrect*	Accuracy
Viable	13604	9873	3731	72.6%
Non-viable	20662	18086	2576	87.5%
Total	34266	27959	6307	81.6%

*Number of pixel

Table 2 Test results of PLS-DA model for viable and non-viable lettuce seeds

Test	Total*	Correct*	Incorrect*	Accuracy
Viable	4535	3236	1299	71.4%
Non-viable	6888	6036	852	87.6%
Total	11423	9272	2151	81.2%

*Number of pixel

발아 종자 87.5%로 나타났으며 전체적으로 81.6%의 정확도를 보였다. 또한 Table 2는 개발된 모델의 성능을 평가하기 위해 모델 개발에 사용하지 않은 픽셀 스펙트럼의 test 그룹을 이용하여 분류정확도를 계산한 결과이다. 결과에 따르면 발아종자는 71.4%이고 불발아 종자는 87.6%로 전체적으로 81.2%의 정확도를 보였다.

3.4. 퇴화종자 검출 영상처리 알고리즘

상추의 불발아 종자를 검출하기 위한 영상처리 과정은 Fig. 7과 같다. 먼저 832 nm의 파장 영상을 이용하여 상추 종자 영역은 1, 나머지 영역은 0의 값을 가지도록 이진화 영상을 구성하여 종자를 제외한 나머지 부분은 제거되도록 masking image를 만들었다. PLS 모델의 beta coefficient를 초분광 영상에 적용하여 파장별 선형조합으로 이루어진 PLS 영상을 구성한 후, masking image에 곱하기 연하여 배경부분을 제거하였다. 마지막으로 개발된 PLS 모델의 판별 기준 상수인 1.5를 임계값하여 이진화 영상을 구성하였다. 이때 임계값을 적용하면 사라져야 할 발아종자 부분에 픽셀잔재가 있는 경우가 발생하는데, 이러한 오검출 픽셀은 상추종자의 평균 크기 즉 상추종자 평균 픽셀수와 판별 정확도를 고려하여 퇴화 종자만 검출하도록 하는 알고리즘을 개발하였다. 검출되는 픽셀은 아래의 식(2)에 의해 계산하였다.

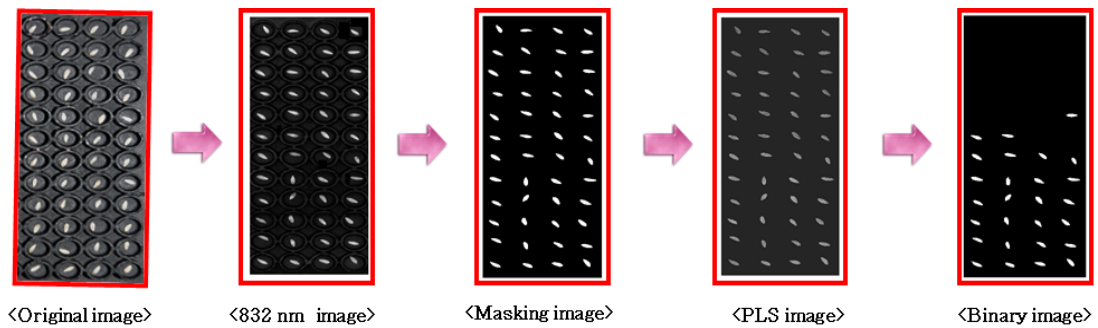


Fig. 7 Procedure of image processing for detecting nonviable lettuce seeds

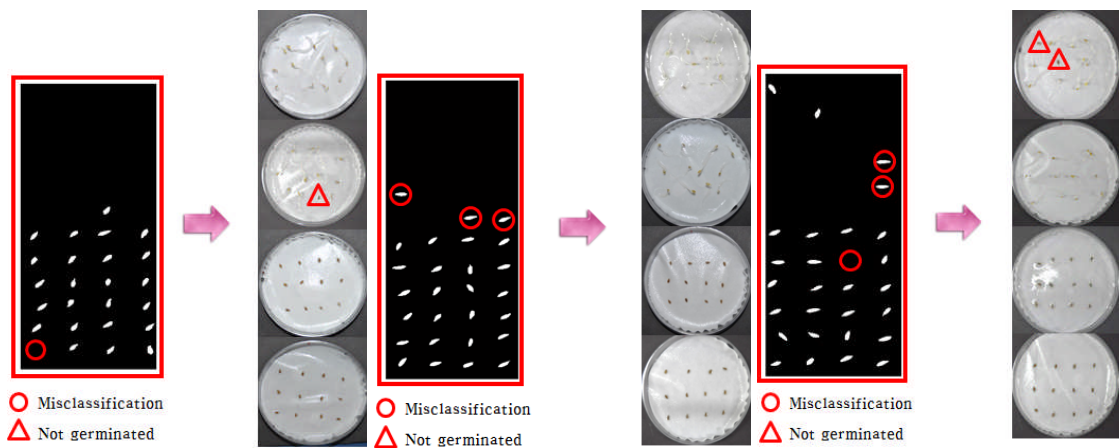


Fig. 8 Verification of the resultant images for viability test of lettuce seeds with the germination tests

$$Y = (X - 3\sigma) \times A \quad (2)$$

where

Y : Detection of pixel

X : Mean of seed size

σ : Standard deviation of seed size

A : Classification accuracy of PLS model

식(2)은 판별기준인 문턱값 1.5를 기준으로 이진화한 영상에서 최종 검출되는 상추종자의 픽셀을 결정하는 식으로 평균 상추종자의 픽셀수에 표준편차를 이용한 3시그마법을 적용하여 상추종자의 평균 픽셀수를 결정하고 여기에 개발된 모델의 판별정확도를 곱하여 최종적으로 검출되는 픽셀수를 구하였다. 각 검출된 상추종자의 픽셀들 중 식(2)에 의해 계산된 픽셀 수보다 클 경우 해당 상추종자의 픽셀은 검출하도록 개발하였다. 또한 최종적으로 퇴화종자만 검출한 후 모폴로지 기법

Table 3 Classification results of viable and non-viable lettuce seeds using resultant PLS-DA images

Classification	Total	Correct	Incorrect	Accuracy
Total	288	262	26	91%

중 영역채우기 기법을 이용하여 종자의 형태대로 검출되도록 하여 최종 결과영상을 구축하였다. Table 3은 본 연구에서 실시한 전체 퇴화종자 검출 정확도를 나타내며, Fig. 8은 전체 퇴화종자 검출 영상 및 발아테스트 결과를 보여준다. 최종 PLS영상에 나타난 상추종자와 발아 실험이 실시된 후의 상추종자 사진의 위치를 일치시켜 비교한 것이다. PLS 영상을 이용한 검출 정확도는 전체 288립 중 26립이 오분류 되어 91%의 정확도를 보였다. 이 결과를 통해 초분광 반사광 영상 기술이 다량의 종자를 동시에 비파괴적으로 검사하는데 이용될 수 있음을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구에서는 750~1000 nm의 근적외선 초분광 반사광 영상시스템을 이용하여 상추의 발아종자와 불발아 종자를 선별하는 기술을 개발하고자 하였다. 초분광 반사광 영상을 이용하여 상추의 발아종자와 불발아 종자를 분류할 수 있는 최적의 반사광 파장 조합을 구명하고 이를 이용하여 구축한 영상에서 퇴화종자를 검출하기 위한 영상처리 알고리즘을 제시하였다. 본 논문의 전체적인 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 초분광 반사광 영상에서 획득한 750~1000 nm의 반사광 스펙트럼을 이용하여 PLS-DA 모델을 개발하고 개발된 모델의 성능을 평가하였다. Calibration의 분류 정확도는 81.6% 이고 test의 분류 정확도는 81.2% 이었다.
- (2) 개발된 모델의 beta coefficients를 통해 상추의 발아종자와 불발아 종자를 분류하는데 중요한 영향을 미치는 파장은 870~880 nm, 910~915 nm, 935~950 nm, 970 nm, 990 nm로 나타났으며, 이는 상추종자의 발아 억제 물질인 abscisic acid(ABA)나 cytokinin, ethylene 등과 수분과 관련성이 높은 것으로 판단되었다.
- (3) 개발된 모델의 beta coefficient를 적용한 PLS 영상을 이용하여 발아종자와 불발아종자를 선별한 결과 판별 정확도 91%로 다량의 종자를 동시에 비파괴적으로 검출 가능함을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 농림수산식품부기술기획평가원에서 주관하는 농림기술개발사업의 일부지원과 농촌진흥청 차세대 바이오그린 21 사업(식물분자육종사업단 과제번호: PJ009078012012)의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

참고문헌

- [1] F. B. Abeles, "Role of ethylene in *Lactuca sativa* cv 'Grand Rapids' seed germination," *Plant Physiology*, Vol. 81, No. 1, pp. 780-787 (1986)
- [2] T. Gonai, S. Kawahara, M. Tougo, S. Satoh, T. Hashiba, N. Hiral, H. Kawaide, Y. Kamiya and T. Yoshioka, "Abscisic acid in the thermoinhibition of lettuce seed germination and enhancement of its catabolism by gibberellin," *Journal of Experimental Botany*, Vol. 55, pp. 111-118 (2004)
- [3] J. R. M. Dunlap and P. W. Morgan, "Reversal of induced dormancy in lettuce by ethylene, kinetin, and gibberellic acid," *Plant Physiology*, Vol. 60, No. 2, pp. 222-224 (1997)
- [4] H. J. Hwang, J. M. Lee, S. Y. Kim and G. W. Choi, "Seed germination in lettuce affected by light quality and plant growth regulators," *Journal of Bio-Environment Control*, Vol. 17, No. 1, pp. 51-59 (2008)
- [5] N. Shetty, T. G. Min, M. H. Olesen and B. Boelt, "Optimal sample size for predicting viability of cabbage and radish seeds based on near infrared spectra of single seeds," *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, Vol. 19, pp. 451-461 (2011)
- [6] C. K. Ahn, B. K. Cho, J. S. Kang and K. J. Lee, "Study on non-destructive sorting technique for lettuce(*Lactuca sativa* L.) seed using Fourier transform near-infrared spectrometer," *CNU Journal of Agricultural Science*, Vol. 39, No. 1, pp. 111-116 (2012)
- [7] Y. L. Liu, Y. R. Chen, M. S. Kim, D. E. Chen and A. M. Lefcourt, "Development of simple algorithms for the detection of fecal contaminants on apples from visible/near infrared hyperspectral reflectance imaging," *Journal of Food Engineering*, Vol. 81, pp. 412-418 (2007)
- [8] B. K. Cho, I. S. Beak, N. G. Lee and C. H. Mo, "Study on bruise detection of 'Fuji' apple using hyperspectral reflectance imagery," *Journal of Biosystems Engineering*, Vol. 36, pp. 484-490 (2011)
- [9] W. S. Kang, "Nondestructive Determination of Seed Viability by Optical Methods," Degree of Doctor of Philosophy, Ph. D. Thesis.

- Daegu University (2008)
- [10] B. K. Cho, Y. R. Chen and M. S. Kim, "Multispectral detection of organic residues on poultry processing plant equipment based on hyperspectral reflectance imaging technique," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 57, pp. 177-189 (2007)
- [11] M. S. Kim, Y. R. Chen and P. M. Mehl, "Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety," *Transactions of the ASAE*, Vol. 44, pp. 721-721 (2001)
- [12] J. G. Lim, S. W. Kang, K. J. Lee, C. Y. Mo and J. Y. Son, "Identification of foreign objects in soybeans using near-infrared spectroscopy," *Journal of Food Engineering Progress*, Vol. 15, pp. 136-142 (2011)
- [13] A. Höskuldsson, "PLS regression methods," *Journal of Chemometrics*, Vol. 2, pp. 211-228 (1988)
- [14] H. I. Chung and H. J. Kim, "Near-infrared spectroscopy: principles," *Journal of Korean Analytical Science & Technology*, Vol. 13, No. 1, pp. 1A-14A (2000)