

초분광 반사광 영상을 이용한 무(*Raphanus sativus* L) 종자의 발아와 불발아 비파괴 판별

안치국¹ · 모창연² · 강점순³ · 조병관^{1*}

¹충남대학교 바이오시스템기계공학과, ²농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부,
³부산대학교 원예생명과학과

Nondestructive Classification of Viable and Non-viable Radish (*Raphanus sativus* L) Seeds using Hyperspectral Reflectance Imaging

Chi Kook Ahn¹, Chang Yeun Mo², Jum-Soon Kang³, Byoung-Kwan Cho^{1*}

¹Department of Biosystems Machinery Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

²National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Suwon, Korea

³Department of Horticultural Bioscience, Pusan National University, Miryang, Korea

Received: November 16th, 2012; Revised: November 27th, 2012; Accepted: December 5th 2012

Abstract

Purpose: Nondestructive evaluation of seed viability is a highly demanded technique in the seed industry. In this study, hyperspectral imaging system was used for discrimination of viable and non-viable radish seeds. **Method:** The spectral data with the range from 400 to 1000 nm measured by hyperspectral reflectance imaging system were used. A calibration and a test models were developed by partial least square discrimination analysis (PLS-DA) for classification of viable and non-viable radish seeds. Either each data set of visible (400~750 nm) and NIR (750~1000 nm) spectra and the spectra of the combined spectral ranges were used for developing models. **Results:** The discrimination accuracy of calibration was 84% for visible range and 76.3% for NIR range. The discrimination accuracy of test was 84.2% for visible range and 75.8% for NIR range. The discrimination accuracies of calibration and test with full range were 92.2% and 92.5%, respectively. The resultant images based on the optimal PLS-DA model showed high performance for the discrimination of the nonviable seeds from the viable seeds with the accuracy of 95%. **Conclusions:** The results showed that hyperspectral reflectance imaging has good potential for discriminating nonviable radish seeds from massive amounts of viable seeds.

Keywords: Radish seed, Seed viability, Nondestructive sorting, Hyperspectral image, Image processing

서론

우리나라 5대 채소 중 하나인 무(*Raphanus sativus* L)는 오래 전부터 다양한 품종으로 분화되어 중국, 한국, 일본 및 유럽의 온대지방 등에서 널리 재배되어 왔다. 특히, 우리나라에서는 식

생활에서 큰 비중을 차지하고 있는 김치의 주원료로서 그 수요가 높다. 국내외적으로 김치의 수요가 증가함에 따라 무 생산량이 증가하고 있다. 무 생산량 향상을 위해 가장 기초적으로 확보되어야 하는 부분이 발아율이 높은 우량종자의 확보이다. 종자 산업에서는 유전자조작 등을 통한 가뭄, 고온 등 기후변화에 강하면서 생산성 높은 고품질 종자 개발이 매우 중요하게 인식되고 있어 개발된 종자의 상품성을 높여려는 노력을 꾸준히 진행하고 있다. 고품질의 종자를 확보하기 위해서 정선 및 종자처리

*Corresponding author: Byoung-Kwan Cho

Tel: +82-42-821-6715; Fax: +82-42-823-6246

E-mail: chobk@cnu.ac.kr

방법을 이용하여 종자 품질향상에 대한 연구가 진행 되어왔다. 종자 정선은 물리적 방법을 이용하여 크기와 무게가 현저히 다른 미성숙 종자를 선별해 내는 방법이며, 종자처리방법은 종자에 프림링 처리를 통해 종자의 활력을 회복시키고(Kang and Choi, 2006), 펠렛 처리를 하여 종자의 보존성을 높여 오랜 기간 보관이 가능하도록 하는 방법이다(Kang et al., 2009). 하지만 이러한 방법을 통해 생산된 건전한 종자라도 장기간 저장하면 활력이 저하되고 파종 전에 이를 선별해 내기는 어렵다. 종자활력의 측정은 직접 발아시켜 판별하는 standard germination test(ISTA)와 tetrazolium test와 같은 화학적 방법, 그리고 전기전도도를 측정하여 종자의 활력을 측정하는 방법 등이 있다. 그러나 이들 방법은 파괴적이거나 정확도가 낮고, 전문가의 활용이 필요하다는 단점이 있다. 이에 따라 우량종자를 비파괴적으로 정확하게 선별할 수 있는 기술이 요구되고 있다. 최근 근적외선 분광기술은 물질의 정량, 정성 분석이 가능한 비파괴 측정 기술로 다양한 농산물의 물리, 화학적 특성 예측에 활용되고 있다. 해바라기씨유 및 옥수수용 사일리지의 화학적 성분을 비파괴적으로 예측함으로써 품질을 향상시키고(Fassio and Cozzolino, 2004), 품질 저하된 호박씨유를 분광분석을 통해 선별할 수 있는 연구가 진행되었다(Ernst et al., 2004). 최근 국내외적으로 근적외선 분광 기술을 이용한 우량종자 선별에 관한 연구가 이루어지고 있는데 배추, 무(Min and Kang, 2008a; Shetty et al., 2011), 박(Min and Kang, 2003), 옥수수(Min and Kang, 2008b), 상추(Ahn et al., 2012) 등의 건전종자와 퇴화종자를 선별하는 연구가 진행되었다. 이러한 연구들은 분광분석을 이용한 비파괴 종자 선별의 가능성은 보여주었지만 개별 종자에 대한 검사만 가능하므로 전수검사에 활용되기에는 한계가 있음이 지적되고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해서는 대량의 종자를 기계적 시각으로 동시에 검사할 수 있는 영상 기술이 도입되어야 하는데 분광분석과 영상기술을 융합한 초분광 영상 기

술이 후보기술로 활용이 가능하다. 초분광 영상기술은 기존의 분광기술과 영상을 동시에 측정 분석할 수 있는 기술로서 가시광 및 근적외선 영역의 연속적인 파장을 선택적으로 조합하여 분석할 수 있어 대상물의 물리적, 생화학적 특성까지 종합적으로 분석이 가능하다(Cho et al., 2007; Kim et al., 2001).

본 연구에서는 초분광 반사광 영상을 이용하여 무(*Raphanus sativus* L)의 발아종자와 불발아 종자를 비파괴적으로 구별할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다. 세부 내용으로는 무 종자의 발아여부를 판별할 수 있는 최적의 모델을 개발하고 영상처리 기술을 적용하여 초분광 반사광 영상으로 퇴화종자를 검출할 수 있는 알고리즘을 개발하고자 하였다.

재료 및 방법

가. 공시시료

본 연구에서는 ‘백금주무’ 품종을 사용하였다. 본 실험에서 퇴화종자를 얻기 위해 정상종자를 인위적인 방법으로 퇴화처리 하였다. 퇴화 처리를 위해 온도와 수분을 변화시켜 종자의 흡수율을 20%로 조정 한 후 비닐팩으로 진공 포장하여 45°C의 waterbath에서 완전히 퇴화 할 때까지 72시간 보관하였다. 또한 퇴화처리 후 20°C에서 원래 무게까지 건조시켰으며, 건전종자 또한 흡수율을 퇴화종자와 동일하게 조절 후 다시 원래 무게까지 건조시켰다(Kang, 2008). 외부적으로 건전종자와 퇴화종자 모두 색이나 모양 모두 동일하여 육안으로는 구별 할 수 없었다. 총 일반 건전 종자 144립과 인위적으로 퇴화시킨 144립을 실험에 이용하였다. 모든 시료는 국제종자검정협회(ISTA) 규정에 따라 4°C로 보관하여 실험에 사용하였으며, 실험 전에 실내에 노출시켜 실내온도와 동일하게 맞춘 후 초분광 영상 촬영 및 발아력 검증 실험에 이용하였다.

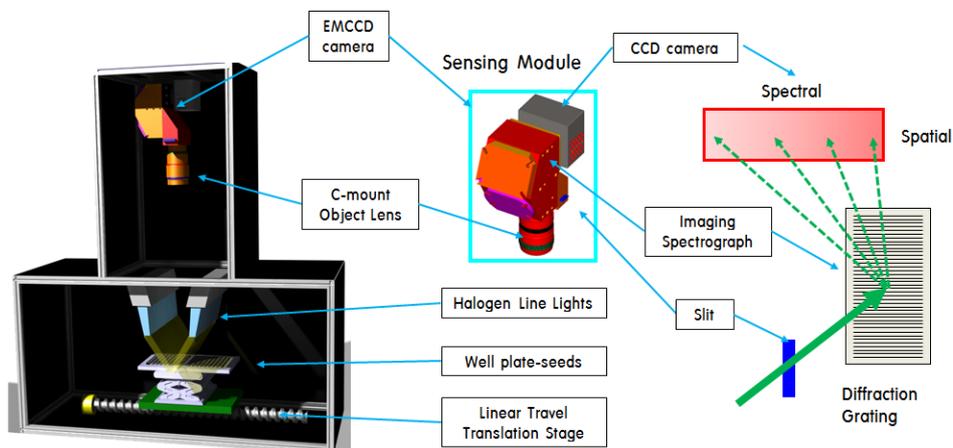


Figure 1. Schematic diagram of the hyperspectral reflectance imaging system.

나. 초분광 영상 시스템 구성 및 획득

본 연구에서 사용한 초분광 영상 시스템은 그림 1과 2(a)와 같다. 시스템은 크게 영상획득부분과 시료이송부분으로 구성되어 있다. 영상획득부분은 line-scan을 위한 slit과 영상획득을 위한 electron multiplying charge-coupled device(EMCCD) camera(Luca RDL-604M, Andor Technology, South Windor CT, USA), 각 파장별 분광을 생성하는 imaging spectrograph(VNIR, Headwll Photonics, Fitchburg, MA, USA)로 구성되어 있으며, 시료이송부분은 step motor, slide assembly, 컨트롤러 등으로 구성되어 있다. 또한 Fig. 2(b)와 같이 광원은 광량 조절이 가능한 100 W급 halogen lamp를 사용하였으며, halogen lamp에 가이드를 설치하여 광의 조사폭 조절이 가능하도록 설계하였다. 가이드는 3개를 1 set로 하였고, 무 종자에 조명을 최적화하기 위해 각 광원 set는 양쪽에서 시료를 비추도록 수직 방향으로 약 15°, 가이드와 가이드 사이는 약 30° 정도 기울여지도록 설치하여 반사광의 공간에 따른 불균일성을 최소화 하였다. 초분광 영상획득을 위해 렌즈의 노출시간을 설정하면 카메라에서 자동으로 step motor의 이송속도와 촬영시간을 계산하여 구동할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 렌즈에 투사된 영상은 25 μ m 두께의 slit을 통과하면서 line-scan되고 spectrograph에 의하여 각 파장별 분광이 생성되게 된다. 분광된 정보는 EMCCD 카메라에 의해 증폭되어 이미지로 저장된다. 본 연구에서는 초분광 영상촬영 시 노출시간(exposure time)은 9.5 ms로 하고 step motor의 이동은 0.1 mm 간격으로 2300 step으로 하며 총 23 cm를 이동하며 502 x 2300 pixel의 해상도로 무 종자의 초분광 영상을 획득하였다. 측정된 스펙트럼 영상의 영역은 400 nm 부터 1000 nm 까지이며, 이를 이용하여 데이터 분석 및 최종 검출 영상을 구축하였다.

다. 발아력 검증 실험

무의 건전종자와 퇴화종자의 초분광 영상을 획득한 후 개별 종자에 대해 발아 여부를 확인하기 위해 국제종자검정협회(ISTA) 규정에 따라 발아실험을 실시 하였다. 발아 실험은 종이 위에 치상하는 TP법으로 12립씩 25°C 조건으로 10일간 발아 실험을 실시하였다. 일반적으로 무 종자는 5일 이내에 발아가 완료되는 것으로 확인 되었다.

라. 무의 발아종자와 불발아 종자 판별 모델 개발

일반종자 144립과 인위적으로 퇴화시킨 144립을 이용하여 초분광 영상촬영 후 발아력 실험을 통해 발아종자와 불발아 종자 식별을 위한 분석을 실시하였다. 초분광 영상 시스템을 통해 획득한 초분광 반사광 영상에서 수동으로 종자 영상 영역을 선택하여 각 픽셀에 대한 스펙트럼을 추출 하였다. 발아력 실험을 통해 식별된 발아종자와 불발아 종자의 획득된 전체 픽셀 수는 발아종자는 68,204개이며 불발아 종자는 73,865개 이었으며, 이 중 무작위로 30%를 선택하여 분석에 사용하였다. 분석에 사용된 픽셀 수는 발아종자 24,936개와 불발아 종자 25,808개 이었으며 70%는 calibration 그룹으로 판별 예측 모델 개발에 사용하였고 나머지 30%는 test 그룹으로 구성하여 개발된 모델의 검증에 활용하였다. 무의 발아종자와 불발아 종자를 판별하기 위한 예측 모델은 부분 최소 제곱 회귀판별분석법(Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA)을 적용하여 개발하였다. 최적의 모델을 개발하기 위해 가시광선 영역의 400-750 nm와 750-1000 nm의 근적외선 영역으로 구분하여 모델을 개발하였으며, 전체영역인 400-1000 nm의 스펙트럼 모두를 이용해 개발된 모델과 비교하여 최적의 모델을 선정하였다. 개발된 최적의 모델은 퇴화종자 검출 영상을 구축하는데

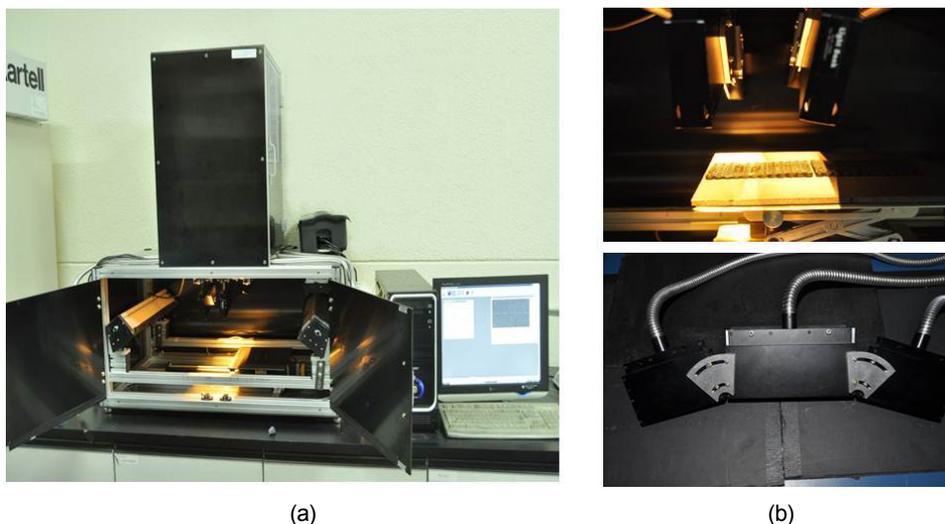


Figure 2. Photo of (a) the hyperspectral reflectance imaging system and (b) the lighting sources.

이용하였다. 무의 발아종자와 불발아 종자를 판별하는 기준은 PLS-DA 모델에서 발아종자의 스펙트럼 그룹을 가상변수 '1'로, 불발아 종자의 스펙트럼 그룹은 '2'로 설정하여 모델을 개발하였고 그 중간값인 1.5를 발아여부의 기준으로 설정하였다. 따라서 개발된 모델에 의해 예측한 결과값이 1.5보다 낮으면 발아종자로, 1.5보다 높으면 불발아 종자로 판별되도록 하였다(Lim et al., 2011). 발아종자의 예측 결과값이 1에 가깝고 불발아 종자의 예측결과 값이 2에 가까울수록 우수한 성능의 모델이라고 할 수 있다.

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

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)과 같이 PLS-DA 모델의 beta coefficient를 초분광 영상에 적용하여 각 파장 영상의 선형조합으로 PLS 영상을 구성하고 이 영상을 이용하여 퇴화종자를 검출 하기 위한 영상 처리 알고리즘을 개발하였다. 모든 데이터 분석은 MATLAB (version 7.0.4, The Mathworks, Natick, MA, USA) 프로그램을 이용하였다.

결과 및 고찰

가. 발아력 실험 결과

Table 1은 건전종자와 퇴화종자 각 144립에 대한 발아테스트 결과를 보여준다. 일반 건전종자는 5일이내 발아가 완료되는 것으로 나타났다. 실험에 사용한 무 종자는 91.6%의 발아율을 보였으며 퇴화 처리한 종자는 모두 발아되지 않았다.

나. 무의 발아종자와 불발아 종자의 스펙트럼 분석

총 288립 중 132립의 발아종자와 156립의 불발아 종자를 분석에 이용하였다. Figure 3은 두 그룹의 평균 스펙트럼을 나타낸다. 외관상 동일하여 육안으로는 판별하기 어려웠으며, 스펙트럼도 비슷한 패턴으로 나타났다. 평균 스펙트럼 중 500-700 nm 부분과 800-950 nm 에서 다소 차이가 보였으며 이 영역에서의 차이는 무 종자가 퇴화하는 과정에서 색소나 성분물질의 변화 때문으로 판단된다. 하지만 이들의 편차가 심하여 소수의 파장만으로 두 그룹을 구별하기는 어려움이 있어 PLS-DA를 적용해 정확한 분석을 실시하고자 하였다.

다. 무의 발아종자와 불발아 종자 판별 예측 모델 및 성능평가

발아력 실험 후 식별된 무의 발아종자와 불발아 종자의 스펙트럼에 PLS-DA를 적용하여 발아력 판별예측 모델을 개발하였

Table 1. Results of germination test during 10 days

	Total	day1	day2	day3	day4	day5	day6	day7	day8	day9	day10	No germination
Viable	144	0	5	85	93	132	132	132	132	132	132	12
Non-viable	144	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	144

*Unit : EA

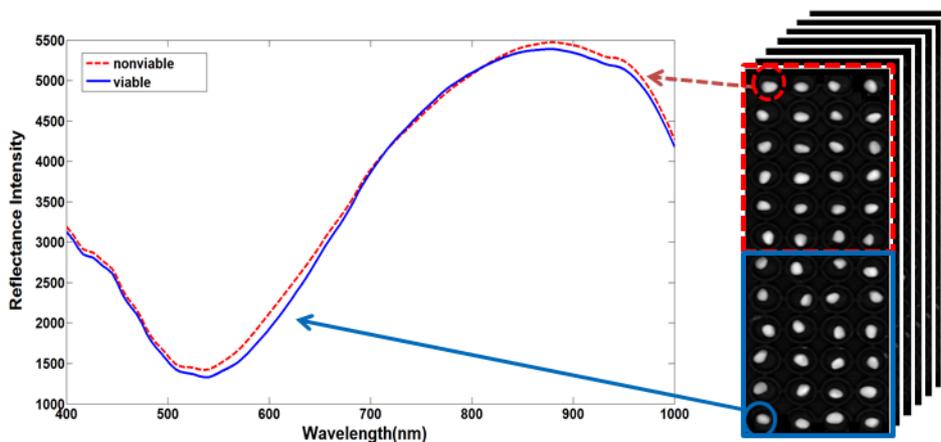


Figure 3. Mean spectra of viable and non-viable radish seeds and their hyperspectral reflectance image.

다. 400-750 nm 까지의 가시광선의 영역만을 이용하여 개발된 모델에 중요한 영향을 미친 파장대를 확인하기 위해 beta coefficient를 계산하였다(Fig. 4). 가장 중요한 영향을 미친 파장은 550 nm, 600 nm, 635 nm, 675 nm, 690 nm, 730 nm 이었으며 이들은 모두 가시광 영역으로 종자가 퇴화하는 과정에서 사람의 육안으로 판별하기 어려운 미세한 색소의 차이가 스펙트럼에 반영된 결과이며 특히 675 nm 부근의 영역은 chlorophyll의 대표적인 흡수파장 영역대(Anatoly et al., 1999)로 무와 같은 십자화과 종자가 퇴화하는 과정에서 발생하는 chlorophyll의 변화가 반영된 결과라 사료된다(Henk et al., 1998). Calibration 그룹의 분류 정확도는 발아종자 84.4%, 불발아 종자 83.6%로

나타났으며 전체적으로 84%의 정확도를 보였다. 또한 모델 개발에 사용하지 않은 test 그룹의 분류 정확도는 발아종자 84.6%, 불발아 종자 83.9%로 전체 84.2%의 정확도로 나타났다.

가시광선의 영역을 제외한 근적외선 750-1000 nm 영역만을 이용하여 개발된 모델의 beta coefficients는 Figure 5와 같다. 모델 개발에 중요한 영향을 미치는 파장대는 760 nm, 770-800 nm, 830-840 nm, 880-890 nm, 960-970 nm로 나타났다. 이러한 파장대들은 C-H structure third overtone와 O-H structure second overtone의 진동모드 영역인데, C-H 결합에 의한 화학적 작용기 및 O-H 결합에 의한 수분과 밀접한 관련이 있다(Chung and Kim, 2000). 또한 이 파장대는 CH₃ 등의 화학적 작용기와 관련이 되는데 유리기(free radicals)에 의해 발생한 과산화지질은 종자가 퇴화하는 동안 종자의 배를 둘러싸고 있는 종피의 세포막을 파괴해서 노화의 주된 원인이 되는 것으로 보고되고 있다(Shetty et al., 2011). 따라서 퇴화과정 동안 종자 내 세포에서 구조적 조성물질의 변화가 발생되어 스펙트럼에 반영되는 것으로 사료된다. 근적외선만을 이용하여 개발된 모델의 정확도는 발아종자 73.4%, 불발아 종자 79.1%로 전체적으로 76.3%의 정확도를 보였다. 또한 개발된 모델의 검증을 위한 test 그룹의 정확도는 발아종자 73.4%, 불발아 종자 78.1%로 전체 75.8%로 가시광선을 이용한 모델에 비해 다소 낮은 정확도를 보였다.

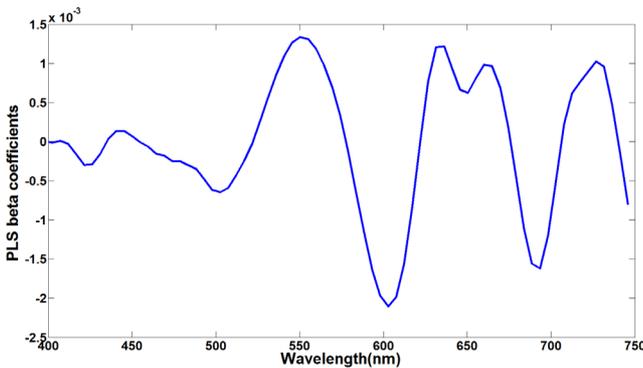


Figure 4. Beta coefficients of the developed PLS model by using visible spectra (400-750 nm).

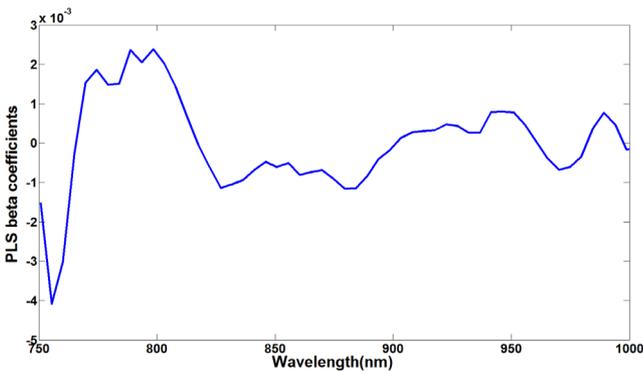


Figure 5. Beta coefficients of the developed PLS model by using NIR spectra (750-1000 nm).

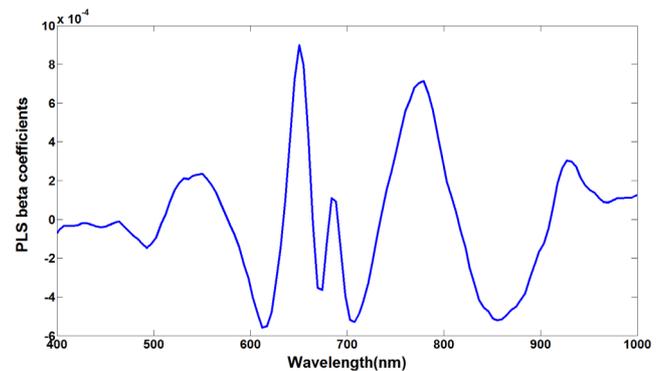


Figure 6. Beta coefficients of the PLS model developed with the spectra of the entire spectral range.

Table 2. Calibration results of PLS-DA model for viable and non-viable radish seeds for each spectral group

Wavelength (nm)	Viable			Non-Viable			Total Accuracy (%)
	Correct*	Incorrect*	Accuracy (%)	Correct*	Incorrect*	Accuracy (%)	
400-750	16838	3112	84.4	17252	3393	83.6	84
750-1000	14642	5308	73.4	16337	4308	79.1	76.3
400-1000	18283	1667	91.6	19154	1491	92.8	92.2

*Number of pixels

과 근적외선 전 영역의 스펙트럼을 이용하여 개발된 모델의 **beta coefficients**를 나타낸다. 모델 개발에 영향을 미친 파장대들은 앞에서 언급한 부분들과 유사하며 발아종자 91.6%, 불발아종자 92.8%의 정확도를 보였고 전체적으로 92.2%의 높은 정확도를 보였다(Table 2). 또한 Test 그룹을 이용하여 개발된 모델의 검증 결과 발아종자 92.4%, 불발아종자 92.6%로 전체 92.5%의 높은 정확도를 나타냈다(Table 3). 이러한 사실은 종자의 퇴화하는 과정에서 발생하는 chlorophyll과 같은 미세한 색소의 차이와 종자 내 세포 구조적 조성물질의 변화를 동시에 고려하는 것이 퇴화종자 검출을 위해 더 유리하다는 것을 의미한다. 영상을 이용한 종자검출을 위해서 가장 정확도가 높은 400-1000 nm의 범위를 스펙트럼을 이용한 PLS 영상을 사용하였다.

라. 무의 불발아 종자 검출 영상처리 알고리즘 개발

개발된 최적 모델의 **beta coefficients**를 적용한 PLS 영상을 이용하여 무의 불발아 종자를 검출하기 위한 영상처리 과정은

Figure 7과 같다. 837 nm의 파장영상을 이용하여 종자 영역은 1, 나머지 배경영역은 0의 값을 가지도록 이진화하여 배경을 제거한 **masking image**를 만들었다. 그 후 **beta coefficients**를 적용한 PLS 영상을 구성한 후 **masking image**에 곱하기 연산하여 PLS 영상에서 배경부분을 제거하였다. 마지막으로 무의 발아종자와 불발아 종자를 판별하는 기준인 1.5의 임계값을 적용하여 이진화 영상을 구성하여 불발아 종자만 검출하는 영상을 구성하였다. 하지만 임계값을 적용하면 발아종자 부분에 모든 픽셀 값이 발아종자의 예측값인 1이 되지는 못하므로 오검출 픽셀이 남게 된다. 이러한 오검출 픽셀은 무종자의 평균 크기 즉 평균 픽셀 수와 판별 정확도를 고려하여 불발아 종자만 검출하도록 하는 알고리즘을 식 (2)와 같이 개발하여 적용하였다.

$$Y = (X - 3\sigma) \times A \tag{2}$$

where,

Y : Pixel number for detection

Table 3. Test results of PLS-DA model for viable and non-viable radish seeds for each spectral group

Wavelength (nm)	Viable			Non-Viable			Total Accuracy (%)
	Correct*	Incorrect*	Accuracy (%)	Correct*	Incorrect*	Accuracy (%)	
400-750	4219	767	84.6	4331	832	83.9	84.2
750-1000	3658	1328	73.4	4032	1131	78.1	75.8
400-1000	4605	381	92.4	4780	383	92.6	92.5

*Number of pixels

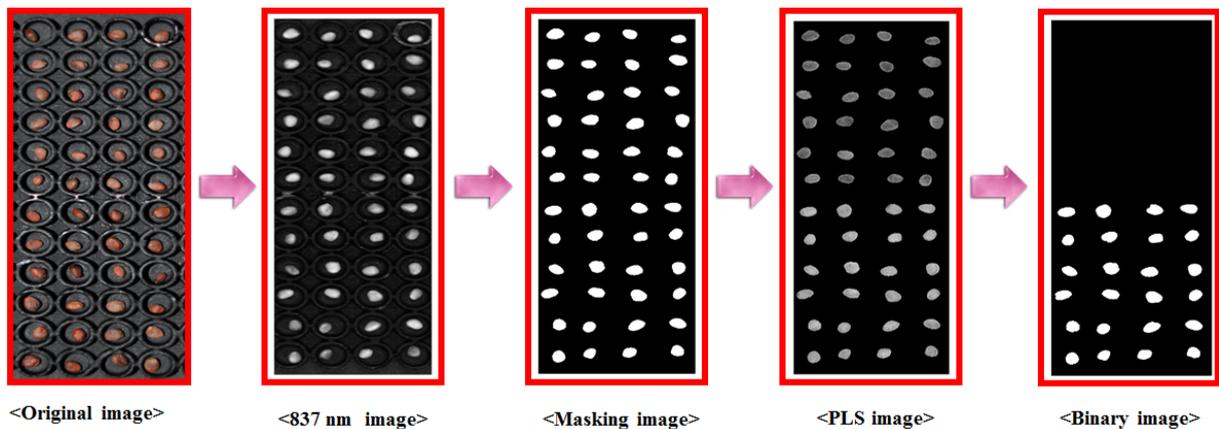


Figure 7. Image processing for detecting nonviable radish seeds.

Table 4. Classification results of viable and non-viable radish seeds using resultant optimal PLS-DA image

Classification	Total	Correct	Incorrect	Accuracy
Total	288	274	14	95.1

Number of sample

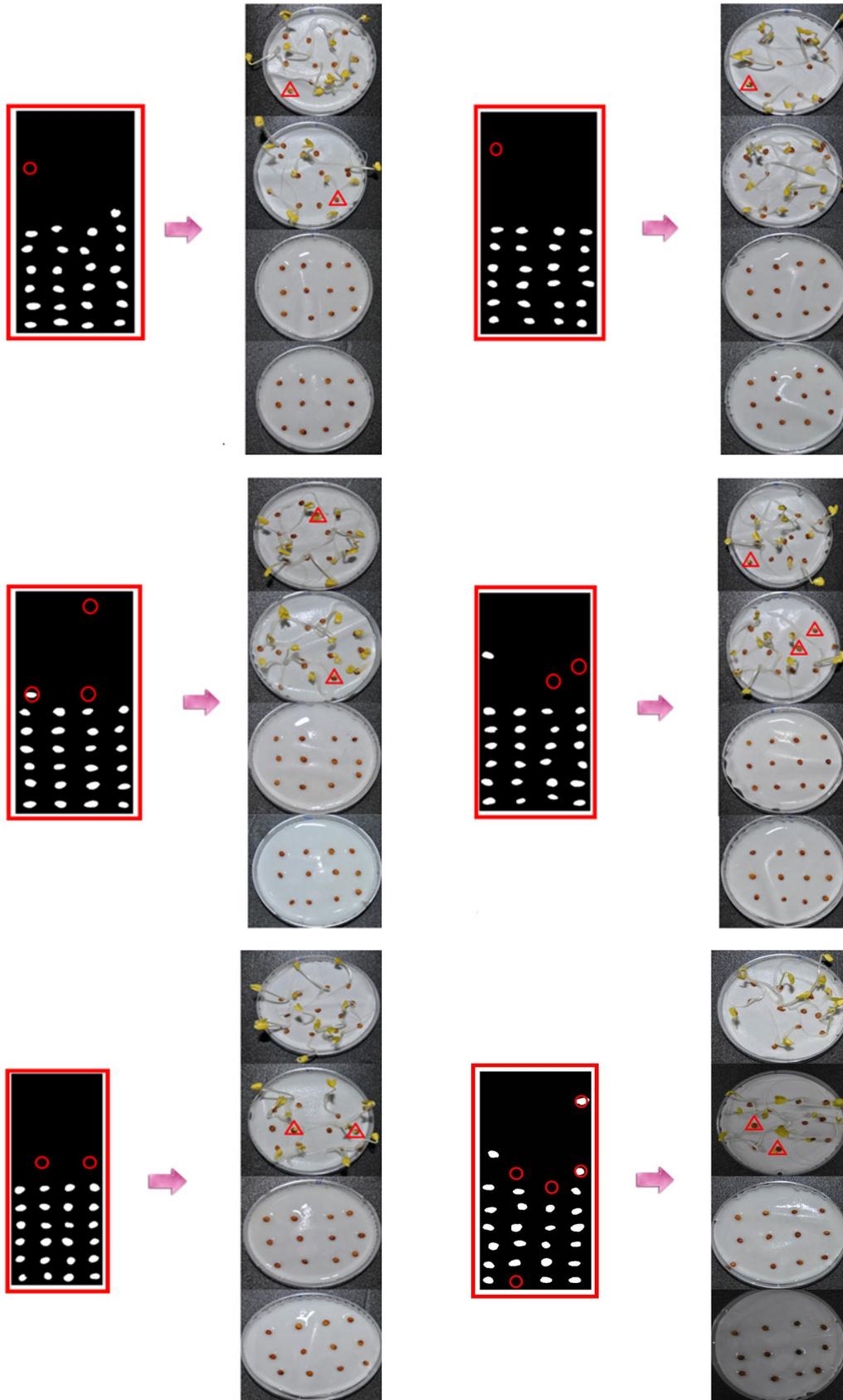


Figure 8. Detecting results of viable and non-viable radish seeds with the germination tests (circle: misclassification, triangle: not germinated).

X : Mean pixel number of a seed area
 σ : Standard deviation of a seed area in pixel number
A : Classification accuracy of PLS model

식 (2)는 최종적으로 검출되는 무 종자의 픽셀을 결정하는 식으로 평균 무 종자의 픽셀 수에 표준편차를 이용한 3시그마법을 적용하여 무 종자의 평균 크기, 픽셀 수를 결정하고 여기에 개발된 모델의 정확도를 곱하여 최종적으로 검출되는 픽셀 수를 구하였다. 실제로 검출되는 무 종자의 픽셀들 중 식 (2)에 의해 계산된 픽셀 수보다 클 경우만 검출되도록 개발하였다. 또한 최종 검출된 영상에 열기 닫기 영상처리 연산을 이용하여 노이즈를 제거한 최종적인 불발아 종자 검출 영상을 얻었다. Table 4는 본 연구에서 실시한 전체 무의 발아종자와 불발아 종자 판별 정확도를 나타내며, Figure 8은 전체 검출 영상 및 발아테스트 결과를 보여준다. 최종 검출 영상과 발아실험 실시 후 사진의 위치를 일치 시켜 비교한 것이다. 최종 검출영상에서 원으로 표시된 부분이 불발아 종자를 검출하지 못한 오검출과 발아되어 검출하지 않아야 하지만 검출된 오검출이며 발아사진에 세모로 표시한 부분이 발아 되어야 할 건전종자가 발아되지 않은 부분이다. 불발아된 종자와 최종 검출 영상을 확인하여 불발아 종자의 검출 정확도를 계산하였다. 검출 정확도는 288립 중 14립이 오분류 되어 95.1%의 정확도를 보였다. 기존의 분광 스펙트럼을 이용하여 무의 발아종자와 불발아 종자의 연구에서 높은 판별률을 나타냈다. 하지만 이러한 기술들은 개별종자에 대한 검수만 가능하다. 하지만 본 연구의 초분광 반사광 영상 기술을 이용한 판별 결과를 살펴보면 대량의 종자를 동시에 비파괴적으로 검사가 가능함을 확인 할 수 있었다. 차후 실시간 선별을 위한 연구는 본 연구에서 확인한 선별 가능성을 토대로 특징적인 소수의 파장만을 이용하는 다분광 영상 기술로 처리속도를 감소시켜 선별 속도를 향상시킬 수 있는 기술을 개발이 필요하다.

결론

본 연구에서는 초분광 반사광 영상을 이용하여 무의 발아종자와 불발아 종자를 비파괴적으로 선별하는 기술을 개발하고자 하였다. 무의 발아종자와 불발아 종자를 분류하기 위한 최적의 분광분석 모델을 개발하고 이를 이용한 영상을 이용하여 퇴화 종자를 검출하기 위한 영상처리 알고리즘을 제시하였다. 본 논문의 전체적인 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 초분광 반사광 영상에서 획득한 반사광 스펙트럼 중 가시광선의 영역(400-750 nm)와 근적외선 영역(750-1000 nm)을 분류하여 PLS-DA 모델을 개발하고 성능을 평가하였다. 가시광선 영역의 calibration의 분류 정

확도는 84%, test의 분류 정확도는 84.2%이었고, 근적외선 영역의 calibration의 분류 정확도는 76.3%, test의 분류 정확도는 75.8%로 가시광선 영역의 모델이 상대적으로 더 우수한 모델로 나타났다.

- (2) 가시광선과 근적외선을 혼합한 400-1000 nm 영역을 이용하여 개발한 PLS-DA 모델의 정확도는 calibration은 92.2%, test는 92.5%로 개별 가시광선과 근적외선 영역의 스펙트럼을 사용하였을 때보다 정확도가 향상되었다. 이는 종자의 퇴화하는 과정에서 발생하는 가시광 영역의 chlorophyll과 같은 미세한 색소의 차이와 종자 내 세포 구조적 조성물질의 변화를 반영하는 근적외선 영역을 동시에 고려하는 것이 퇴화종자 검출에 더 유리하다는 것을 보여주었다.
- (3) 400-1000 nm 영역의 스펙트럼을 이용한 최적의 판별 모델의 beta coefficients를 적용한 PLS 영상을 이용하여 무의 발아종자와 불발아 종자를 선별한 결과 판별 정확도 95%이었다. 이는 초분광 반사광 영상기술이 대량의 종자를 동시에 비파괴적으로 선별하는데 활용 가능하다는 것을 보여주고 있다.

감사의 글

본 논문은 농림수산식품부기술기획평가원에서 주관하는 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것입니다.

References

- Ahn, C. K., B. K. Cho, J. S. Kang and K. J. Lee. 2012. Study on non-destructive sorting technique for lettuce (*Lactuca sativa* L) seed using Fourier transform near-infrared spectrometer. *CNU Journal of Agricultural Science* 39(1):111-116. (In Korean, with English abstract)
- Anatoly, A. G., C. Buschmann and H. K. Lichtenthaler. 1999. The chlorophyll fluorescence ratio F735/F700 as an accurate measure of the chlorophyll content in plants. *Journal of Remote Sensing Environment* 69(3): 296-302.
- Cho, B. K., Y. R. Chen and M. S. Kim. 2007. Multispectral detection of organic residues on poultry processing plant equipment based on hyperspectral reflectance imaging technique. *Computers and Electronics in Agriculture* 57:177-189.
- Chung, H. I. and H. J. Kim. 2000. Near-infrared spectroscopy: principles. *Journal of Korean Analytical Science & Technology* 13(1):1A-14A. (In Korean)

- Ernst, L., J. Mocak, K. Serdt, B. Balla, T. Wenzl, D. Bandoniene, M. Gfrerer and S. Wagner. 2004. Chemometrical classification of pumpkin seed oils using UV-Vis, NIR and FTIR spectra. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods* 61(1-2):95-106.
- Fassio, A. and D. Cozzolino. 2004. non-destructive prediction of chemical composition in sunflower seeds by near infrared spectroscopy. *Journal of Industrial Crops and Products* 20(3):321-329.
- Henk, J., S. Rob Van der, F. Angela, G. Jaap, P. Van and J. B. Raoul. 1998. Chlorophyll fluorescence of brassica oleracea seeds as a non-destructive marker for seed maturity and seed performance. *Journal of Seed Science Research* 8:437-443.
- Kang, J. S., B. G. Son, Y. W. Choi, Y. J. Lee, W. H. Joo, C. S. Lim and Y. H. Park. 2009. Effects of dehydration methods and storage conditions on germinability of pelleted carrot seeds. *Journal of Life Science* 19(4):526-531. (In Korean, with English abstract)
- Kang, J. S. and I. S. Choi. 2006. Leakage of seed reserve nutrient in artificially aged pepper seeds and enhancement of seed vigor by priming. *Journal of Life Science* 16(2):352-356. (In Korean, with English abstract)
- Kang, W. S. 2008. Nondestructive determination of seed viability by optical methods. PhD diss. Daegu University, Department of Natural Resources.
- Kim, M. S., Y. R. Chen and P. M. Mehl, 2001, Hyperspectral reflectance and fluorescence imaging system for food quality and safety. *Transactions of the ASAE* 44(3): 721-729.
- Lim, J. G., S. W. Kang, K. J. Lee, C. Y. Mo and J. Y. Son. 2011. Identification of foreign objects in soybeans using near-infrared spectroscopy. *Journal of Food Engineering Progress* 15(2):136-142. (In Korean, with English abstract)
- Min, T. G. and W. S. Kang. 2003. Nondestructive separation of viable and non-viable gourd (*Lagenaria siceraria*) seeds using single seed near infrared reflectance spectroscopy. *Journal of Korean Horticultural Science and Technology* 44(5):545-548.
- Min, T. G. and W. S. Kang. 2008(a). Nondestructive classification of viable and nonviable radish (*Raphanus sativus* L.) seeds using single near infrared spectroscopy. *Journal of Horticulture environment and biotechnology* 49(1):42-46.
- Min, T. G. and W. S. Kang. 2008(b). Nondestructive classification between normal and artificially aged corn (*Zea mays* L.) seeds using near infrared spectroscopy. *Korean journal of Crop Science* 53(3):314-319.
- Shetty, N., T. G. Min, M. H. Olesen and B. Boelt. 2011. Optimal sample size for predicting viability of cabbage and radish seeds based on near infrared spectra of single seeds. *Journal of Near Infrared spectroscopy* 19(6):451-461.