

분광특성 분석에 의한 논 잡초 검출의 기초연구

A Fundamental Study on Detection of Weeds in Paddy Field using Spectrophotometric Analysis

서규현	서상룡	성제훈
정희원	정희원	정희원
K. H. Suh	S. R. Suh	J. H. Sung

ABSTRACT

This is a fundamental study to develop a sensor to detect weeds in paddy field using machine vision adopted spectralphotometric technique in order to use the sensor to spread herbicide selectively. A set of spectral reflectance data was collected from dry and wet soil and leaves of rice and 6 kinds of weed to select desirable wavelengths to classify soil, rice and weeds. Stepwise variable selection method of discriminant analysis was applied to the data set and wavelengths of 680 and 802 nm were selected to distinguish plants (including rice and weeds) from dry and wet soil, respectively. And wavelengths of 580 and 680 nm were selected to classify rice and weeds by the same method. Validity of the wavelengths to distinguish the plants from soil was tested by cross-validation test with built discriminant function to prove that all of soil and plants were classified correctly without any failure. Validity of the wavelengths for classification of rice and weeds was tested by the same method and the test resulted that 98% of rice and 83% of weeds were classified correctly.

Feasibility of CCD color camera to detect weeds in paddy field was tested with the spectral reflectance data by the same statistical method as above. Central wavelengths of RGB frame of color camera were tried as the effective wavelengths to distinguish plants from soil and weeds from plants. The trial resulted that 100% and 96% of plants in dry soil and wet soil, respectively, were classified correctly by the central wavelength of R frame only, and 95% of rice and 85% of weeds were classified correctly by the central wavelengths of RGB frames. As a result, it was concluded that CCD color camera has good potential to be used to detect weeds in paddy field.

Keywords : Weed detection, Rice field, Spectral reflectance, Discriminant analysis.

This study was financially supported by Chonnam National University in the program, 1999 and Technology Development Program for Agriculture and Forestry in 2000, Ministry of Agriculture and Forestry, Republic of Korea. This article was submitted for publication in March 2002; reviewed and approved for publication by the editor board of KSAM in April 2002. The authors are Kyu-Hyun Suh, Researcher, and Sang-Ryong Suh, Professor, Dept. of Bio-Systems & Agric. Engineering, Institute of Agricultural Science and Technology, Chonnam National University, Gwangju, Korea, and Jae-Hoon Sung, Researcher, National Agric. Mechanization Research Institute, Suwon, Korea. The corresponding author is Sang-Ryong Suh, Professor, Dept. of Bio-Systems & Agric. Engineering, Institute of Agricultural Science and Technology, Chonnam National University, Gwangju 500-757, Korea. E-mail:<srsuh@chonnam.ac.kr>.

1. 서 론

그 동안 농업은 증산을 목적으로 비료나 농약 등 농자재를 과도하게 투입하여 화학비료성분의 토양 내 누적 현상이나 방제용 약제의 과용에 따른 환경오염, 병해충과 잡초의 내성 증가, 생태계 파괴 등의 문제점들이 크게 부각되고 있다. 따라서, 앞으로 농업은 농자재의 투입량을 줄임으로서 환경을 보존하며 소비자의 친환경 농산물 선호에 부응하면서도 비용 대 효과 면에서 보다 효율적인 영농 방안이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 구미에서는 10여년 전부터 농경지에 농자재를 일률적으로 일정량 투입하는 관행의 영농방법을 탈피하고 농경지의 토양 특성과 작물 생육상태나 과거 수확량을 고려하여 소단위 면적별로 적정량의 농자재를 투입하는 정밀농업(precision farming 또는 site-specific agriculture) 관련 기술을 개발하여 왔다.

이러한 정밀농업 기술은 잡초 방제작업에 대해서도 관련 기술이 개발되고 있는데, 이러한 기술의 공통점은 경지(주로 밭) 내 잡초 존재 여부를 판단한 다음 잡초발생지역에 한하여 선택적으로 제초제를 살포하는 것이다. 본 연구는 이러한 기술을 우리 나라 농업의 주종인 벼농사에 적용하기 위한 것으로서, 벼 재배 중 후기 잡초 방제작업인 경엽 제초제 살포작업을 대상으로 하여 제초제 살포를 필요로 하는 잡초의 위치를 효과적으로 검출하는 센서의 개발이 필수적이다.

제초제 살포를 위한 경지 내 잡초의 실시간 검출이 요구되고, 따라서 이를 위한 센서는 비접촉형인 광학(optical) 센서가 바람직하다(Suh 등, 2001). 경지에서 자라고 있는 잡초는 작물재배 전 토양에서 자라는 것과 재배 작물과 함께 자라는 것으로 구분할 수 있는데, 작물재배 전 토양의 잡초는 분광분석 기법을 응용하여 토양과 녹색 식물을 구분할 수 있는 550 nm 전후 녹색 파장의 광반사도로부터 용이하게 검출할 수 있다.

그러나 경엽 제초제 살포작업과 같이 재배 작물과 같이 자라는 잡초를 검출하기 위해서는 색깔이

서로 비슷한 재배 작물과 잡초를 구분해야하는 어려움이 있다. 이러한 문제에 접근하는 방법으로서 Cho 등(2000)은 기계시각(machine vision)을 사용하여 재배 작물과 잡초의 외형적(morphological) 차이를 찾는 방법을 시도하였으나 이 방법을 엽가의 기계시각을 사용하여 실시간으로 처리하는데는 어려움이 있다. 재배 작물과 잡초를 구별하기 위한 다른 방법은 분광분석방법인데, 이는 여러 가지 방법이 모색되고 있으나 그 중 광학 필터를 부착한 광 트랜지스터와 같은 광전자 센서(photoelectric sensor)를 사용하는 방법(Wang 등, 2000)과 기계시각을 이용하는 두 가지 방법이 실용가능성이 높은 것으로 판단된다. 이 두 가지 방법을 비교하면, 기계시각이 잡초의 위치 파악에 있어 보다 우수할 것으로 판단되어 정밀농업을 위한 센서로서 좀더 바람직하다. 이는 센서의 공간 위치포착(positioning) 능력이 기계시각의 경우 수 개 화소(pixel) 정도로서 한 화면에 있어서도 세분화된 위치 포착이 가능하지만 광전자 센서의 경우는 센서의 감지영역이 센서의 조망 영역(field of view; FOV)이므로 이의 위치포착능력은 기계시각에 비하여 낮기 때문이다.

기계시각의 분광분석에 의한 잡초 검출방법은 CCD 컬러 카메라를 사용하거나 CCD 흑백 카메라에 특정의 필터를 장착하여 수행하는 방법이 있다. CCD 컬러 카메라를 사용하여 잡초를 검출한 연구를 보면, Woebbecke 등(1995)은 잡초 검출에 효과적인 컬러 카메라의 RGB 세 가지 영상정보 조합 방법을 제시한 바 있다. Steward와 Tian(1998)은 컬러 카메라를 사용하여 조건 영역(inter-row area)에서 식생하는 식물의 밀집도를 실시간으로 파악하는 연구를 수행하였고, 이어 Tang 등(2000)은 이를 엽가의 카메라로서 구현하는 방법을 제시한 바 있다. El-Faki 등(2000)은 CCD 컬러 카메라를 사용하여 콩과 밀밭의 잡초를 검출하는데 유용한 컬러 index를 구한 후 이를 판별분석(discriminant analysis) 기법과 신경망 회로(neural network) 기법의 유용성을 양자간 비교한 결과 판별 분석법이 좀더 효과적임을 찾은 바 있다.

CCD 흑백 카메라를 사용한 연구를 보면, Borregaard 등(2000)은 line scan(1차원) 형식으로 slit을 통하여 받아들인 빛을 프리즘으로 분광시켜 2차원의 흑백 CCD 소자로서 그 강도를 측정하는 방법으로 분광 분석하는 카메라를 사용하여 사탕무와 감자 밭의 잡초를 검출한 결과 90% 이상의 잡초를 찾아낸 바 있으며, Vrindts 등(2002)은 보통의 2차원 CCD 흑백 카메라에 중심파장이 555, 675, 815, 1265, 1455, 1665 nm인 대역통과 필터를 사용하여 사탕무와 옥수수 밭의 잡초를 검출하여 90% 이상의 정확도까지 가능함을 보고한 바 있다.

본 연구는 이상의 선행 연구 결과를 고려하여 벼 재배작업 중 제초제 경엽처리를 효과적으로 수행하는데 필요한 잡초 검출을 광학적 방법으로 수행하는 장치를 개발하기 위한 기초연구로 수행하였다. 즉, 본 연구는 광학적 특성을 응용하여 먼저 식물체(벼와 잡초)와 토양을 구분한 다음 벼와 잡초를 구분할 수 있는 광 파장을 선정하고, 선정한 광 파장을 이용하여 토양과 식물체 그리고 벼와 잡초를 효과적으로 구분할 수 있는 판별함수를 구한 후 이 판별함수에 의한 구분의 정확도를 분석하며, 비슷한 방법을 CCD 컬러 카메라에 적용할 경우 그 구분의 정확도를 파악할 목적으로 수행하였다.

2. 재료 및 방법

가. 실험재료

기계 이앙에 의한 벼 재배의 경우 잡초는 보통 이앙 후 10일 정도면 그 잎이 발생하기 시작한다. 이러한 잡초의 방제를 위하여 농민은 통상 이앙 후 15~20일 경에 무논 전면에서 입제 형태의 제초제를 살포하고 물에 용해시켜 더 이상의 잡초 성장을 막는다(토양처리). 그럼에도 불구하고 이앙 후 25~30일 이후에 잡초가 발생하면 액제 형태의 제초제를 살포(경엽처리)한다. 이 시기에 농민은 벼의 활착을 도와 자생능력을 증대시키기 위하여 논물을 완전히 빼고 채우기를 수차례 반복하는 경화

(hardening)작업을 실시하는데, 배수상태의 논은 잡초를 경엽처리의 방법으로 방제하는데 바람직하다.

본 연구에서는 이 시기에 선택적인 잡초 방제를 위하여 벼와 잡초의 분광반사율을 조사하였다. 벼와 잡초의 분광반사율을 측정하는데 사용한 시료로서 벼는 2001년 6월 16일 이앙한 벼(품종: 동진)를 대상으로 하였으며, 잡초는 최근에 우리나라 벼 농사에 많이 발생하는 잡초로서 피, 물달개비, 한련초, 여뀌바늘, 발톱외풀, 가막사리 등 6종의 잡초였다. 벼와 잡초의 식물체를 대상으로 분광반사율을 측정하는데 있어서 각 식물체의 측정은 잎을 대상으로 하였다. 그 이유는 잡초 검출을 위한 센서를 사용할 경우 센서는 일반적으로 수직방향으로 대상체를 내려다보는 것이 용이하며 이 경우 센서의 감지영역에서 벼와 잡초를 비롯한 식물체의 대부분은 잎이 차지하기 때문이다.

토양으로부터 벼와 잡초를 구분하기 위하여 토양의 분광반사율을 측정하였는데, 이는 배수 상태의 다습 토양(wet soil)과 마른 논토양의 마른 토양(dry soil)별 자료를 수집하기 위하여 논 토양의 함수율을 달리하여 분광반사율을 측정하였다. 측정된 각 토양별 함수율의 범위는 0~77%로서, 완전건조 상태의 마른 토양은 0%였고, 축축할 정도로 충분히 다습한 토양은 77%이었다.

나. 실험기기와 측정시기

벼 잡초 토양의 분광반사율은 근적외선 분광분석기(model 6500, Foss-NIRSystem Co.)와 동 기기 제작회사에서 제공한 NSAS 프로그램을 사용하여 구하였다. 본 기기 사용시 감지부로서 reflectance probe를 사용하였는데, 이는 광섬유를 사용하여 기기 본체의 광원으로부터 특정 강도의 빛을 본 기기 외부에 있는 피측정체에 조사하도록 하고 피측정체의 반사광 역시 광섬유를 통하여 기기 본체로 전송하여 분광분석하는 기기이다. 본 기기는 광파장 400~2500 nm 범위에서 2 nm 간격으로 분광분석 정보를 수집할 수 있는 기기이나, 본 연구에

서는 수집한 분광반사율 자료 분석에 있어 가시광선과 근적외선 영역인 400~900 nm의 파장영역만의 자료를 사용하였는데 그 이유는 차후 본 연구 결과를 이용하여 잡초검출 장치를 구성하는데 있어 비교적 저가의 영상처리장치나 분광분석장치 혹은 컬러 CCD 카메라를 사용할 수 있도록 하기 위함이었다.

벼와 잡초의 분광반사율 측정에 사용한 시료는 벼 이앙 후 32일과 38일인 7월 18일과 24일에 전남대학교 농과대학 시험포에서 채취한 것으로서 모든 시료는 채취 후 바로 실험실에서 측정하였다.

다. 잡초 검출에 유용한 파장 결정과 검증

벼 잡초 토양에 대해 수집한 분광반사율 자료는 400~900 nm 파장 영역내의 251 가지 파장(변수)에 대한 반사율인데, 이 범위 내 파장 중 벼 잡초 토양을 효과적으로 구분할 수 있는 파장(변수)을 결정하기 위하여 본 연구에서는 다변량통계분석법(multi-variate analysis)의 하나인 판별분석(discriminant analysis) 중 단계적 변수선택법(stepwise variable selection method)을 이용하였다. 단계적 변수선택법은 일정한 선택 혹은 제외 기준에 따라 각 단계에서 주요 변수를 선택하는데, 일단 선택된 변수도 다음 단계에서 분류의 설명력을 높이기 위하여 제외될 수 있는 특징이 있다. 본 분석은 통계용 패키지 프로그램인 SAS(version 6.12)를 사용하여 수행하였다.

사용한 단계적 변수선택법은 주요변수를 선택한 후 구분 대상체(여기서는 벼, 잡초, 토양) 들을 집단화하여 각 집단을 효과적으로 구분할 수 있는 판별함수(discriminant function)를 제공한다. 본 연구에서는 단계적 변수선택법에 의해 선택된 파장의 정당성을, 변수선택 후 얻은 선형 판별함수를 사용하여 판별분석을 실시(대상체의 분광반사율을 입력데이터로 하여 수행)하고 그 결과를 확인하는 방법으로 검사하였다. 본 연구에서 판별함수에 의한 선택변수의 정당성 검증은 교차검증법(cross-validation)을 적용하여 SAS를 사용하여 수행하였다.

라. 컬러 카메라 사용을 고려한 분류모형과 검증

농경지에 발생하는 잡초를 검출하는 광학적 방법은 위에서 논의한 바와 같이 여러 가지 방법이 있으나 그 중 실용성이 높은 방법의 하나는 CCD 컬러 카메라를 사용하는 방법임은 여러 연구자(Woebbecke 등; 1995, Steward와 Tian; 1998, Tang 등; 2000, El-Faki 등; 2000)에 의해 보고된 바 있다. 본 연구에서는 논 잡초 검출에 있어서도 CCD 컬러 카메라가 유용할 것으로 예상되어 그 가능성을 판단하고자 하였다. 이는 CCD 컬러 카메라의 RGB 세 화면에 있어 각 화면이 민감하게 반응하는 광파장 영역의 중심 파장을 결정한 후, 이 중심 파장을 이용하여 토양과 식물체 그리고 벼와 잡초를 구분하는 판별함수를 구하고, 이를 적용하여 토양, 벼, 잡초의 분광반사율을 입력데이터로 하여 구분한 결과를 통해 CCD 컬러 카메라에 의한 잡초 검출능력을 검사하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 잡초 검출에 유용한 파장 결정

논에서 자라는 잡초를 분광반사 특성으로부터 검출하기 위해 본 연구에서는 먼저 토양으로부터 벼와 잡초(식물체)를 구분한 후 벼와 잡초를 구분하고자 하였으며, 이러한 두 단계에 있어 유용한 광파장을 각각 구하였다.

(1) 토양과 식물체 구분을 위한 파장 결정

본 연구에서 측정한 다습한 토양과 마른 토양의 반사율을 벼와 잡초의 반사율과 비교하기 위하여 그 측정 결과를 보인 것은 그림 1과 같다. 벼와 잡초의 광반사율 스펙트럼의 일반적인 특징은 그림과 같이 가시광선 영역인 파장 400~700 nm의 영역에서 반사율은 대체로 7% 내외이나 파장 550 nm인 녹색 근처에서는 반사율이 10~20% 정도의 범위로 약간 높게 나타났으며, 700~750 nm 영역에서는 반사율이 40% 내외 수준으로 급상승한 다

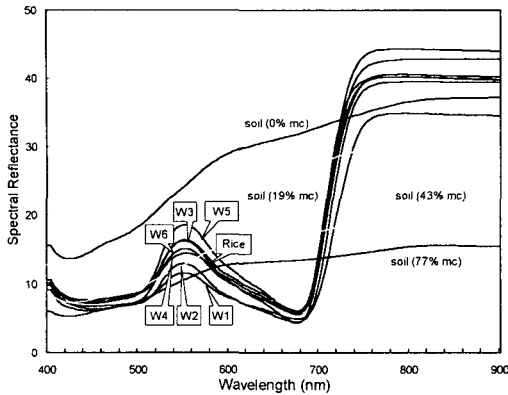


Fig. 1 Typical spectral reflectance spectra of soil of various moisture contents (mc) and leaves of rice and weeds (W₁; rice cockspur, W₂; monochoria, W₃; eclipta, W₄; waterprimrose, W₅; common falsepimpernel, W₆; bur beggarticks).

음 750nm 이상에서는 40%로서 대체로 일정한 수준이었다.

토양 분광반사율의 일반적 특성은 토양을 구성하고 있는 광물질에 의해 가시광선 영역에서 적외선 영역에 이르기 까지 광반사율이 조금씩 증가하며, 동일한 토양에서도 함수율의 차이에 따라 단계적으로 높거나 낮아진다. 본 연구에서 얻은 실험 결과를 보면 그림과 같이 토양의 반사율은 토양의 함수율에 따라 상당한 큰 차이를 보였으며, 함수율이 높을 수록 반사율이 단계적으로 감소함을 알 수 있었다. 파장 400~900 nm 범위에서 토양의 반사율과 벼와 잡초의 반사율을 비교하면 토양의 반사율은 습한 토양의 경우는 620~680 nm와 720~900 nm, 그리고 마른 토양의 경우는 700 nm 이하의 대역에서는 구분대상인 벼나 잡초와 뚜렷이 큰 차이를 보이고 있어서 토양과 식물체를 구분하는 것은 어렵지 않을 것으로 판단되었다.

단계적 변수선택법에 의해 토양과 식물체를 구분하는데 효과적인 파장을 두 실험시기(이앙 후 32일, 38일)에 있어 토양상태(습한 토양, 마른 토양)에 대해 각각 구한 결과는 표 1과 같다. 표와 같이 두 종류의 토양에 있어 선택된 파장은 2~3

Table 1 Selected effective wavelengths (nm) to discriminate plants from soil background

Days After Transplant	Dry soil	Wet soil
32	498	
	542 - 560	554 - 556
	674 - 684	610 - 612
		802
38	498	
	674 - 684	554 - 556
		610 - 612
		802

개의 파장(또는 파장 대역)이나 이러한 파장에서 토양과 식물체의 반사 특성은 그림 1과 같이 모두 명백한 차이를 보이므로 이러한 결과를 실제의 잡초 검출장치에 적용하여 토양과 식물체를 구분할 경우 하나의 파장 자료로 충분할 것으로 판단되었다. 선택된 파장 중 가장 효과적인 하나의 파장을 그림 1로부터 토양별로 구하면 습한 토양과 마른 토양에 있어 각각 802 nm, 680 nm로서, 토양 표면이 상당히 축축할 정도로 젖은 상태이면 802 nm 파장을 사용하는 것이 효과적일 것이나 일반적으로 제초제 경엽처리 시 논은 배수상태로서 토양 표면이 약간 건조한 상태이므로 마른 토양에 효과적인 680 nm 파장이 토양과 식물체를 구분하는데 적당한 것으로 판단되었다.

(2) 벼와 잡초 구분을 위한 파장 결정

벼와 잡초를 구분하는데 효과적인 파장을 단계적 변수선택 방법으로 얻은 결과는 표 2와 같다. 이러한 파장과 위에서 구한 식물체와 토양을 구분하는데 효과적인 파장을 Wang 등(2000)이 토양과 밀과 잡초를 구분하기 위해 선정한 주요파장인 496 nm, 546 nm, 614 nm, 676 nm, 752 nm과 비교하면 이 중 496 nm, 546 nm, 614 nm, 676 nm는 본 연구에서 토양과 식물체를 구분하기 위해 구한 파장(표 1)과 비슷한 파장임을 알 수 있었다. 그러나 Wang 등(2000)이 선정한 파장을 본 연구에서

Table 2 Selected wavelength to discriminate between rice and weed leaves

Days After Transplant	Selected wavelength (nm)					
32	526	574 - 584	608	650	676 - 678	806 - 814
38	526	574 - 584	608		676 - 678	806 - 814

벼와 잡초를 구분하기 위해 구한 파장(표 2)과는 별로 일치하지 않은 것으로 나타났는데, 이는 비교 대상 작물이 서로 상이하기 때문인 것으로 판단되었다.

표와 같이 벼와 잡초를 구분하는데 있어 유용한 파장(또는 파장 대역)의 수는 5~6개이지만 개발하고자 하는 잡초 검출장치를 낮은 오분류율을 유지하면서도 구조적으로 간단한 장치로 하기 위해서는 고려할 파장수를 가능한 최소로 하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 선택된 파장(또는 파장 대역) 중 대역으로 나타난 574~584 nm, 676~678 nm, 806~814 nm를 주요 파장으로 선택하였으며, 이 주요 파장대역을 각각 대표하는 3종의 파장의 중심파장인 580 nm, 680 nm, 810 nm를 우선 검토대상인 주요파장으로 결정하였다.

우선 검토대상으로 선택한 3 종의 파장에 대하여, 본 연구에서는, 각각의 단일 파장, 2개 파장 조합, 3개의 파장을 모두 사용하는 경우에 대하여 각각 판별분석을 통해 가장 우수한 분류능력을 보이는 파장 혹은 파장조합을 선택하였다. 이 최종 선택 시 판단의 기준인 분류능력은 판별분석 시 얻을 수 있는 오분류율(error count estimation)로부터 판단하였다.

이러한 파장 조합의 판별분석으로부터 얻은 오분류율은 표 3과 같다. 표와 같이 580 nm와 680 nm를 사용한 경우가 3종 파장을 모두 사용한 경우와 비슷한 수준의 오분류율을 보였다. 비슷한 수준의 오분류율인 경우 보다 적은 수의 파장을 사용하는 것이 구조적으로 간단한 잡초검출 장치를 구성할 수 있으므로, 목적으로 하는 벼와 잡초의 구분을 위해 최종적으로 580 nm와 680 nm 파장을 선택하였다.

나. 각 대상체의 판별

(1) 토양과 식물의 구별

마른 토양과 습한 토양의 경우 각각 680 nm와 802 nm의 광반사율을 이용하여 판별분석을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 판별분석은 토양과 식물을 구별하는 목적으로 선택한 주요 파장에서 토양과 식물의 광반사율을 SAS 프로그램의 입력자료로 수행하며, 그 결과 판별함수(discriminant function)를 얻고 이 판별함수를 이용하여 판별결과를 얻는 일련의 연속과정이다.

이러한 판별분석을 이용하여 교차검증법에 의해 그 분류능력을 실험한 결과 수집한 390개(마른 토

Table 3 Error count estimation(%) of various combinations of the selected wavelengths to discriminate weeds from rice plants by the discriminant analysis (DAT; Days After Transplant)

Wavelength (nm)	580	680	810	580, 680	580, 810	680, 810	580, 680, 810
32 DAT	37.1	27.9	56.3	5.8	35.0	29.6	5.8
38 DAT	41.4	22.8	45.3	10.3	41.1	18.3	9.7

양과 습한 토양 각각 30개와 벼와 잡초 360개)의 모든 관측치의 경우 토양과 식물은 완전히 구분되는 것으로 나타났다. 따라서 마른 토양과 습한 토양에서 각각 주요 파장으로 결정된 680 nm와 802 nm와 본 연구에서 시도한 판별분석 기법은 차후 잡초검출 장치를 구성하여 토양으로부터 식물체를 구분하는데 효과적으로 사용될 것임을 알 수 있었다.

판별분석 과정에서 얻는 판별함수는 토양과 식물체를 위에서 선택한 파장에서의 광반사율로 구분하기 위한 함수이다. 이러한 분광 반사율 특성을 응용하여 토양과 식물체를 구분하기 위해서는 본 연구에서 얻은 실험자료와 같이 기초실험 기기로부터 측정된 반사율 정보가 아닌 저가의 감지장치로 관찰한 토양과 식물체의 상대적인 반사율 정보, 예를 들면 기계시각의 화소값이 사용될 것이다. 따라서, 차후 실용적인 잡초검출장치의 개발에 있어서는 사용하는 감지장치의 특성을 고려하여야 할 것으로 판단되었다.

(2) 벼와 잡초의 구별

벼와 잡초를 구분하기 위하여 본 연구에서 구한 주요 파장인 580 nm와 680 nm를 이용하여 위와 같은 판별분석을 통해 벼와 잡초를 구분하도록 하였다. 이러한 판별분석 결과에 대하여 교차검증법으로 벼와 잡초의 분류능력을 검증한 결과는 표 4와 같다. 표와 같이 벼의 경우는 60개의 관측치 중 하나만이 잡초로 오분류되어 분류정확도는 98%로 나타났다. 잡초의 경우는 300개의 관측치 중 51개의 관측치가 벼로 오분류되어 분류정확도는 83%로 나타나 본 연구에서 벼와 잡초를 구분하기 위해 구한 주요 파장과 그를 이용하여 구한 판별분석의 기능은 대체로 우수한 것으로 판단되었다.

다. 컬러 기계시각을 고려한 판별 결과

대부분 컬러 기계시각의 영상자료는 RGB 3개 화면의 영상자료인데 각 화면의 영상자료는 각각의 광학 대역필터를 통과한 빛의 강도를 나타낸

Table 4 Classification result by the constructed classification model for rice and weeds (number in parenthesis is number of trials)

Original \ Classified	Rice	Weeds
Rice	98% (59)	2% (1)
Weeds	17% (51)	83% (249)

것으로서 결과적으로 각 화면은 각각의 대역통과 파장을 갖는 셈이다. 이러한 대역통과 파장은 그 중심 파장으로서 그 화면의 특성을 나타낸다. 이러한 중심파장은 카메라에 따라 약간씩 차이가 있으나 대체로 비슷하며, 이를 조사한 결과 R, G, B 각 화면에서 각각 630 nm, 530 nm, 450 nm 내외임을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이 3종의 파장을 이용한 잡초 검출의 가능성을 앞에서 설명한 방법과 같은 방법으로 그 판별함수를 구하고, 그 함수와 본 연구에서 얻은 관측치를 사용하여 판별한 다음, 오분류율을 구하고 비교함으로서 컬러 카메라에 의한 잡초 검출의 가능성을 판단하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 토양과 식물의 구별

토양과 식물체를 구분하는 판별함수는 위에서 설명한 토양-식물 구별의 주요 파장인 680 nm에 가까운 R화면의 중심 파장인 630 nm를 사용하여 구하였다. 이 함수를 사용하여 토양과 식물체의 관측치를 구분한 결과를 마른 토양과 습한 토양별로 나타낸 것은 각각 표 5와 6과 같다. 마른 토양의 경우는 표 5와 같이 토양과 식물체를 완전히 구분하는 것으로 나타났으며, 습한 토양 경우는 표 6과 같이 식물체는 96%, 토양은 100% 구별이 가능한 것으로 나타났다. 습한 토양의 경우 토양-식물체 구별 능력이 마른 토양의 경우보다 낮게 나타난 이유는 630 nm에서 습한 토양의 분광반사율이 그림 1과 같이 식물체의 분광반사율에 근접하기 때문인 것으로 판단되었다.

Table 5 Classification result by the constructed classification model for dry soil and plants (numbers in parenthesis are number of observations)

Classified \ Original	Plants	Soil
Plants	100% (360)	0% (0)
Soil	0% (0)	100% (30)

Table 6 Classification result by the constructed classification model for wet soil (number in parenthesis is number of observation)

Classified \ Original	Plants	Soil
Plants	96% (346)	4% (14)
Soil	0% (0)	100% (30)

(2) 벼와 잡초의 구별

컬러 카메라의 3가지 RGB 중심파장에 대해서도 이들 각각의 단일 파장, 2개 파장 조합, 3개의 파장을 모두 사용하는 경우에 대하여 각각 판별분석을 통해 가장 우수한 분류능력을 보이는 파장 혹은 파장조합을 찾고자 하였다. 분류 능력의 비교는 앞에서와 마찬가지로 여러 가지 파장조합으로 판별분석한 후 오분류율을 조사하는 과정으로 수행하였으며 그 결과는 표 7과 같다.

표와 같이 3종의 화면의 중심파장을 이용하여 실험시기별로 벼와 잡초를 구분한 결과, 450, 530, 630 nm의 파장을 모두 판별함수에 사용한 경우 오분류율이 가장 낮았고, 그 다음이 530 nm와 630 nm의 파장조합을 사용한 경우로서 이는 3개 파장을 모두 사용한 경우보다 오분류율은 높지만 10% 내외의 오분류율을 허용하는 것으로 가정하고, 차후 보다 간단한 잡초검출 장치를 구현할 수 있다는 장점을 고려한다면 530 nm와 630 nm의 파장조합도 선택할 수 있을 것으로 판단하였다. 이에 따라 본 연구에서는 벼와 잡초를 구분하기 위한 파장조합으로서 530, 630 nm와 450, 530, 630 nm의 조합을 선택하였다.

이상의 두 가지 파장 조합으로 구성된 벼와 잡초의 판별함수에 대해 교차검증법을 적용하여 그 판별성능을 조사한 결과는 표 8과 9와 같다. 표와 같이 컬러 카메라의 R과 G화면을 이용한 경우를 가정한 경우로서 파장 530 nm와 630 nm의 반사율을 이용하여 벼와 잡초를 구분한 결과, 벼는 모두 정확히 구분하였지만 잡초는 79%만이 잡초로 인식하고 21%는 벼로 오분류한 결과를 보였다. 반면 RGB 3종 화면의 정보를 모두 이용한 경우를 가정한 경우로서 파장 450, 530, 630 nm의 반사율을 이용하여 벼와 잡초를 구분한 결과, 벼는 95%가 벼로 구분되었고 5%는 잡초로 오분류되었으며, 잡초는 85%를 잡초로 인식하고 15%는 벼로 오분류한 결과를 보였다.

이상의 두 경우를 비교하면, 3종의 파장(450, 530, 630 nm)을 이용한 경우가 2종의 파장(530, 630 nm)만을 이용한 경우에 비하여 잡초 구분 성

Table 7 Error count estimation(%) of various combinations of the RGB center wavelengths of color camera to discriminate weed leaves from rice by the discriminant analysis (DAT; Days After Transplant)

Wavelength (nm)	450	530	630	450, 530	450, 630	530, 630	450, 530, 630
32 DAT	31.7	27.3	47.5	9.2	12.5	11.7	3.8
38 DAT	19.4	35.9	56.7	19.2	20	10.9	10.9

Table 8 Classification result by the constructed classification model for rice and weeds using 530 and 630 nm wavelengths (number in parenthesis is number of observations)

Original \ Classified	Rice	Weeds
Rice	100% (60)	0% (0)
Weeds	21% (63)	79% (237)

Table 9 Classification result by the constructed classification model for rice and weeds using 450, 530 and 630 nm wavelengths (number in parenthesis is number of observations)

Original \ Classified	Rice	Weeds
Rice	95% (57)	5% (3)
Weeds	15% (45)	85% (255)

능은 6%가 우수하나 벼의 경우 오분류 경우가 5%가 되어 3종 파장을 이용한 경우가 2종 파장을 이용한 경우보다 항상 우수하지는 않은 것으로 나타남으로서 2종의 파장을 사용하는 것도 타당한 것으로 나타났다. 이상의 실험은 컬러 카메라를 직접 이용한 실험이 아니고 일종의 간접 실험이므로 위의 두 경우의 분류 성능은 실제의 실험을 통하여 판단하는 것이 필요한 것으로 판단되었다. 다만 본 간접 실험을 통하여 컬러 카메라를 이용한 잡초 검출은 가능할 것임을 확인할 수 있었다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 벼 농사에서 토양과 식물체의 분광반사특성과 영상처리를 이용한 기계시각 잡초검출 센서를 개발하기 위한 기초연구로서, 구별하고자

하는 대상체들의 분광반사율을 조사하여 구별에 효과적인 파장을 선정하고 선정된 파장을 이용한 판별분석을 통해 각 대상체에 대한 분류의 정확도로서 잡초검출 가능성을 조사하기 위하여 수행하였다.

본 연구에서 설정한 잡초검출 방법은 먼저 토양과 식물체(벼와 잡초를 포함)를 구분한 다음, 토양을 배제한 상태에서 벼와 잡초를 구분하는 과정으로 하였다. 따라서 주요 파장은 토양과 식물체 구분을 위한 주요 파장과 벼와 잡초 구분을 위한 주요 파장으로 나누어 조사하였다. 또한 컬러 CCD 카메라를 사용하여 잡초검출 센서를 구성할 경우를 대비하여 RGB 화면의 중심파장인 450, 530, 630 nm의 파장에 대한 분류능력도 시험하였으며, 이상의 실험으로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 토양과 식물체를 구분하는데 효과적인 파장으로서는 마른 토양의 경우 680 nm, 습한 토양에 있어서는 802 nm를 선정하였고, 토양을 배제한 후 벼와 잡초를 구분하는데 효과적인 파장은 580 nm와 680 nm를 선정하였다.

2) 토양과 식물체 구분 목적으로 선정된 파장에 대하여 판별분석을 수행한 다음 그 분류 성능을 확인한 결과, 마른 토양과 습한 토양에 있어 모두 식물체를 완전히 구분 가능한 것으로 나타났다. 벼와 잡초를 구분하기 위한 파장에 대해서도 판별함수를 구한 다음 그 정당성을 검증한 결과, 벼는 98%의 정확도로 구분이 가능하였고, 잡초는 83%의 정확도로 구분하는 것으로 나타났다. 따라서 차후 본 연구에서 선택한 주요 파장과 판별분석을 이용한 센서와 알고리즘을 제작한다면 잡초를 효과적으로 검출할 수 있을 것으로 판단되었다.

3) 컬러 CCD 카메라를 사용하는 경우에 있어 식물체와 토양을 구분하기 위해 R 화면 자료만을 이용한 결과, 식물체와 토양의 구분은 마른 토양에서는 완전히 가능하였고 습한 토양에서는 4%의 식물체가 토양으로 오분류되는 것으로 나타났다. 벼와 잡초 구별을 위해 컬러 카메라의 RGB 3종 화면의 자료를 모두 이용한 경우, 벼의 5%는 잡초로 오분류되었으며, 잡초의 15%는 벼로 오분류된 결과를 보였다. 그러나 이와 같은 실험은 컬러

CCD 카메라를 이용한 것이 아니고 RGB 중심파장에서 광반사율을 이용한 예비실험으로서, 차후 컬러 카메라의 RGB 영상 정보를 이용한 논 잡초검출의 가능성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Borregaard, T., H. Nielsen, L. Norgaard and H. Have. 2000. Crop-weed discrimination by line imaging spectroscopy. *J. agric. Engng Res.* 75: 389-400.
2. Cho, S. I., D. S. Lee and J. Y. Jeong. 2000. Weed detection by machine vision and artificial neural network. *Proceedings of ICAME 2000.* 2:270-278. KSAM.
3. El-Faki, M. S., N. Zhang and D. E. Peterson. 2000. Weed detection using color machine vision. *Trans. of the ASAE.* 43(6):1969-1978.
4. Steward, B. L. and L. F. Tian. 1998. Real-time machine vision weed sensing. ASAE Paper No. 98-3033. ASAE.
5. Suh, S. R., J. H. Sung and G. C. Chung. 2001. Comparison of nutrient deficient stress diagnoses of cucumber plant using non-destructive physiological instruments. *Agric. and Biosystems Engineering.* 2(1):1-6, KSAM.
6. Tang, L., L. Tian and B. Steward. 2000. Development of a low-cost machine vision system for selective sprayer. ASAE Paper No. 003064. ASAE.
7. Vrindts, E., J. De Baerdemaeker and H. Ramon. 2002. Weed detection using canopy reflection. *Precision Agriculture,* 3:63-80.
8. Wang, Ning, N. Zhang, D. E. Peterson and F. E. Dowell. 2000. Testing of a spectral-based weed sensor. ASAE Paper No. 003127. ASAE.
9. Woebbecke, D. M., G. E. Meyer, K. Von Bargen and D. A. Mortensen. 1995. Color indices for weed identification under various soil, residue, and lighting conditions. *Trans. of the ASAE.* 38(1):259-269.