MODIS 영상자료를 이용한 관개시기 탐지와 논 피복지도 제작

정승택¹ · 장근창¹ · 홍석영² · 강신규^{1*}

¹국립강원대학교 환경과학과, ²국립농업과학원 토양비료관리과
(2010년 11월 9일 접수; 2011년 6월 20일 수정; 2011년 6월 25일 수락)

Detection of Irrigation Timing and the Mapping of Paddy Cover in Korea Using MODIS Images Data

Seungtaek Jeong¹, Keunchang Jang¹, Seokyeong Hong² and Sinkyu Kang^{1*}

¹Department of Environmental Science, Kangwon National University, Chuncheon 200-701, Korea

²Department of Soil & Fertilizer, National Academy of Agriculture Science, Suwon 441-707, Korea

(Received November 9, 2010; Revised June 20, 2011; Accepted June 25, 2011)

ABSTRACT

Rice is one of the world's staple foods. Paddy rice fields have unique biophysical characteristics that the rice is grown on flooded soils unlike other crops. Information on the spatial distribution of paddy fields and the timing of irrigation are of importance to determine hydrological balance and efficiency of water resource management. In this paper, we detected the timing of irrigation and spatial distribution of paddy fields using the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor onboard the NASA EOS Aqua satellite. The timing of irrigation was detected by the combined use of MODIS-based vegetation index and Land Surface Water Index (LSWI). The detected timing of irrigation showed good agreement with field observations from two flux sites in Korea and Japan. Based on the irrigation detection, a land cover map of paddy fields was generated with subsidiary information on seasonal patterns of MODIS enhanced vegetation index (EVI). When the MODIS-based paddy field map was compared with a land cover map from the Ministry of Environment, Korea, it overestimated the regions with large paddies but underestimated those with small and fragmented paddies. Potential reasons for such spatial discrepancies may be attributed to coarse pixel resolution (500 m) of MODIS images, uncertainty in parameterization of threshold values for discarding forest and water pixels, and the application of LSWI threshold value developed for paddy fields in China. Nevertheless, this study showed that an improved utilization of seasonal patterns of MODIS vegetation and water-related indices could be applied in water resource management and enhanced estimation of evapotranspiration from paddy fields.

Key words: MODIS, Rice paddy, Irrigation, Mapping, Vegetation Index

I. 서 론

벼는 전 세계 주요 식량 자원 중 하나로 세계 작물 생산의 11% 이상을 차지하며(Maclean *et al.*, 2002), 벼를 재배하는 논은 세계 작물 토지피복의 15%를 차

지한다(IRRI, 1993). 특히, 논을 경작하는 나라의 50% 이상이 아시아 지역에 분포하고 있으며, 아시아 지역의 벼 소비량은 전체 작물 소비량의 35% 이상으로 높은 비율을 차지한다(FAO, 2004).

벼를 생산하는 논은 다른 작물지대와는 다른 특성을

* Corresponding Author : Sinkyu Kang
(kangsk@kangwon.ac.kr)

가지고 있다. 벼의 생육 특성 상 모내기 전에 논에 물을 일정기간 가둬두는 담수기간이 존재하며, 이 기간 동안 많은 수자원이 관개에 이용된다. 아시아의 경우, 논에 관개에 사용되는 수자원의 양은 담수의 80%를 차지하며, 일부 국가에서는 담수의 95%가 관개용수로 사용되고 있다(Xiao *et al.*, 2006; FAOSTAT, 2001). 따라서 효율적인 수자원 관리를 위해서는 논에 분포특성 및 관개시기를 파악하는 것이 매우 중요하다. 또한, 담수기간에는 토양 증발이 아닌 자유수면상태의 증발이 발생하며, 벼가 성장하면서 식생의 증산이 추가적으로 발생하게 된다. 증발산(증발과 증산)은 물 수지 분석에 있어 중요한 요소이기 때문에 정확한 관개시기를 파악하는 것이 신뢰도 있는 물 수지 분석을 위해 중요하다.

논에서 관개시기는 기후 조건, 지역의 관개용수 상황, 주변 환경, 벼의 품종, 농기계의 가용성 등에 따라 상이하기 때문에 현장조사를 통해 관개시기를 파악하기에는 많은 시간과 노력이 필요하다. 인공위성 영상을 활용한 원격탐사 기법은 광역 규모의 다양한 생태계와 토지피복에 대한 자료를 획득할 수 있기 때문에 실측자료의 시공간적 한계를 극복하기 위해 많이 활용되고 있다. 인공위성 원격탐사 센서 중 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer(MODIS) 자료는 중위도 지방에서 하루에 최대 4회 정도 획득이 가능한 높은 시간주기성과 250, 500, 1,000m의 다양한 공간해상도, 그리고 36개 밴드에 달하는 다중분광자료를 제공하기 때문에 지표와 대기 하층에서 발생하는 지구구적인 생태계 변화 과정을 연속적으로 감지할 수 있는 장점이 있다. 이 때문에, 최근 MODIS 위성 자료를 기반으로 지역 또는 지구규모의 다양한 생태계 변화와 이에 관련된 많은 연구들이 활발히 진행되고 있으며, 그 중 논에 토지피복 변화 및 관개시기 탐지에 관한 연구 결과들이 보고된 바 있다(Xiao *et al.*, 2005; Sun *et al.*, 2009; Peng *et al.*, 2010).

Xiao *et al.*(2005)은 중국 남부지역의 넓은 논에 대해 식생지수로 널리 사용되는 Normalized Difference Vegetation Index(NDVI)와 Enhanced Vegetation Index(EVI), 지표의 수분 함량 및 변화를 추정하기 위한 지표 수분지수(Land Surface Water Index, LSWI)간의 관계를 이용하여 MODIS 기반의 관개시기 탐지 알고리즘을 개발하였다. Sun *et al.*(2009)은 Xiao *et al.*(2005)의 방법을 개선하여 중국 전역에 대한 논 탐

지에 관한 연구 결과를 보고하였다. 또한 Peng *et al.*(2010)은 복잡 토지피복에서 논 만을 추출하기 위해 동일한 방법을 응용하여 연구를 진행한 바 있다. 국내의 논은 상대적으로 균일한 평야지대의 토지피복에서부터 곡간지의 소규모 계단식 논에 이르기까지 경작지의 규모, 분절화, 타 토지피복 유형과의 인접성, 그리고 지형적 복잡성 등이 MODIS를 이용한 관개시기 탐지와 논 탐지에 있어서 복합적인 오차요인으로 작용한다. 이러한 오차요인을 규명하고 이를 반영하여 국내의 논에 대한 관개시기 탐지에 적합한 알고리즘을 개발하기 위해서는 우선적으로 기존에 제시된 알고리즘을 적용하고, 그 결과를 가용한 관개시기 현장자료와 공인된 환경부 토지피복지도 등과 비교하는 절차가 필요하다.

이 연구에서는 Xiao *et al.*(2005)에 의해 제안된 MODIS 자료 기반의 식생지수인 EVI와 LSWI를 이용한 관개시기 탐지 알고리즘을 플렉스 관측 타워가 설치되어 있는 한국과 일본의 논에 적용하여 알고리즘에 대한 평가를 실시하였다. MODIS로부터 탐지한 관개시기 결과를 바탕으로, 전국의 논을 탐지하였고 이 결과를 환경부 중분류 토지피복도의 논과 비교 검토함으로써 알고리즘의 오차 요인을 논의하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 연구 대상지역

관개시기 지상관측 자료가 있는 두 곳의 플렉스 타워 연구지에 대해 MODIS 기반의 관개시기 알고리즘을 평가한 후, 한국을 대상으로 관개시기 지도를 제작하였으며, 관개시기 탐지 결과를 이용해 한국의 논 분포 지도를 제작하였다.

한국은 연평균 기온이 10~16°C, 연평균 강수량은 1,100~1,800mm이며, 연 강수량의 50~60%가 여름철에 집중된다. 전체 토지피복 중 농경지가 18.3%로서, 논이 11%, 밭이 7.3%를 차지한다(Kim and Gwon, 2008). 연구에 사용한 플렉스 타워 연구지는 한국 이천 플렉스 타워와 일본 Mase 플렉스 타워 연구지이다(Fig. 1). 아울러 관개시기 자료는 없지만 관개시기가 다를 것으로 예상되는 한국 남부 김해 지역의 논 중 임의의 한 곳을 연구지로 선정하였다. 국립농업과학원이 운영하는 이천 연구지는 경기도 남동부(37°18'20.34"N, 127°30'40.46"E)에 위치하고 있으며, 토지 피복이 균

Fig. 1. Locations of study area.

질하고 경사가 거의 없는 평탄한 지형이다. 기후는 대륙성기후의 성격을 띠며, 연평균 기온은 11.2°C이고 연평균 강수량은 약 1,329mm 이다(Lee *et al.*, 2005). 토지 피복은 균질한 성격을 가지며 지형은 경사가 거의 없이 평탄하다. Mase 연구지는 AsiaFlux에 등재되어 있으며 일본 동부 Ibaraki Tsukuba(36°03'14.3"N, 140°01'36.9"E)에 위치하고 있다. 연 평균 기온은 약 13.7°C, 연 평균 강수량은 약 1,200mm이며 경사가 거의 없는 평평한 지형이다. 김해 연구지(35°11'23.93"N, 128°51'13.52"E)는 북쪽의 높은 산이 겨울에 강한 북서풍을 막아주고, 한국 남해 바다와 낙동강의 영향을 크게 받아 연 평균 기온이 약 15°C 내외로 온화한 기후를 가지며, 연 평균 강수량은 약 1,400mm 이다.

2.2. 환경부 토지피복 지도

MODIS 기반의 한국의 토지피복에 대한 평가자료로서 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복 지도를 이용했다(Fig. 2). 환경부 토지피복 지도는 Landsat 7, 1/5,000 과 1/25,000 수치지도, 식생도, 임상도, DEM 자료 등을 이용해 제작되었다(<http://egis.me.go.kr>).

2.3. MODIS 자료

MODIS는 1999년과 2002년에 발사된 미항공우주국(National Aeronautics and Space Administration, NASA) 지구관측시스템위성(Earth Observation System, EOS)인 Terra와 Aqua 위성에 탑재되었으며, 중위도의 경우 하루에 동일 지점을 4회 이상 지나간다. 36개의 분광 밴드와 250, 500, 1,000m의 공간 해상도를 가지며 자료는 모두 Land Processes Distributed Active Archive Center(LPDAAC)(<http://lpdaac.usgs.gov>)에서 이용 가능하다.

이 연구에서 사용된 MODIS Surface Reflectance Product(MYD09A1)는 7개의 분광 밴드 자료를 제공하며 각 밴드의 범위는 다음과 같다: 청색(459~479nm), 녹색(545~565nm), 적색(620~670nm), 근적외선(NIR₁: 841~875, NIR₂: 1,230~1,250nm), 단파적외선(SWIR₁: 1,628~1,652, SWIR₂: 2,105~2,155nm). MYD09A1 자료는 500m의 공간해상도와 8일 단위의 합성 자료로서, 지표반사율에 대한 정보와 Quality Assessment(QA) 정보, 그리고 8일 중 오차가 가장 작은 날짜에 대한 정보를 함께 제공한다. QA 자료는 각 픽셀에 대해 구름 또는 구름에 의한 그림자, 에어로졸, 낮은 시야

각 등에 의한 자료의 불확도를 제공한다(<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/surfrad.htm>). 본 연구에서는 오차를 최소화하기 위해 MODIS 자료 처리 시 QA 정보를 적용했다.

2.4. MODIS 기반의 관개시기 탐지 알고리즘

이 연구에서는 관개시기를 탐지하기 위한 방법으로 Xiao *et al.*(2005)에 의해 제안된 MODIS 기반의 관개시기 탐지 방법을 적용하였으며, 이 때 이용되는 각 지수는 다음의 계산식을 통해 산출 할 수 있다.

$$EVI = 2.5 \times \frac{\rho_{nir} - \rho_{red}}{\rho_{nir} + 6 \times \rho_{red} - 7.5 \times \rho_{blue} + 1} \quad (1)$$

$$LSWI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (2)$$

여기서, ρ_{red} , ρ_{blue} , ρ_{nir} , ρ_{swir} 은 각각 적색, 청색, 근적외선, 단파적외선 밴드에서의 반사도를 의미한다. EVI는 NDVI의 개량 식생지수로서 식물의 반사에 영향을 주는 토양의 반사 효과가 분리되고, 식생이 많은 지역에 대한 민감도가 개선되고, 대기에서 에어로졸 산란에 대한 오차가 감소된 향상된 식생 모니터링을 가능하게 한다. 지표 수분지수 LSWI는 근적외선 밴드와 단파적외선 밴드를 이용하여 계산되며, 식생 수분 함량 및 토양 수분 함량에 민감하게 반응하는 단파적외선 영역의 반사특성을 이용하여 지표의 수분 함량을 추정하는데 활용 된다(Xiao *et al.*, 2005; Peng *et al.*, 2010). LSWI는 건조상태에서 식생지수보다 수분에 대해 빠른 반응을 나타내기 때문에 건조 및 가뭄 모니터링에 활용되기도 한다(Park *et al.*, 2006).

일반적으로 식생이 분포한 지역에서 LSWI는 EVI에 비해 낮은 값을 갖는다. 하지만 논에서는 관개 전 경운에 의해 식생이 감소하고, 관개 후 지표의 수분 함량이 일시적으로 높아지기 때문에 LSWI와 식생지수가 역전되는 현상이 나타난다. Xiao *et al.*(2002)은 논에서 LSWI가 NDVI보다 높은 시기를 관개 및 모내기 시기라 정의했으며, 중국 장수지역의 5개 연구 지역에 대하여 Spot-4 Vegetation(VGT) 센서를 이용하여 알고리즘에 대한 검증을 실시하였다. Xiao *et al.*(2005)은 선행 연구를 토대로 관개시기 탐지 알고리즘을 MODIS에 적용시켰으며, EVI 식생지수를 추가로 활용하여 LSWI가 NDVI(또는 EVI)보다 큰 시기를 관개시기라 판단하고 중국 남부 지역으로 연구 지역을 확장시켜 적용하였다. 하지만 MODIS에 관개시

기 탐지 알고리즘을 적용 시 탐지되지 않는 논 지역이 일부 존재하기 때문에 관개시기 탐지 조건을 완화하기 위해 LSWI에 임계값 +0.05를 적용했다(Xiao *et al.*, 2005). 자세한 내용은 Xiao *et al.*(2005)에 기술되어 있다.

이 연구에서는 관개시기 탐지 시 일반적으로 식생지역에서 EVI가 NDVI 보다 낮은 값을 보이며, 관개시기에 토양이 많이 드러나기 때문에 토양의 반사효과를 고려한 식생 지수 EVI를 사용하는 것이 적합하다고 판단하였다. 따라서 LSWI가 EVI보다 큰 시점을 관개시기라고 판단하였으며, Xiao *et al.*(2005)이 제안한 LSWI 임계값 0.05를 적용했다. LSWI의 임계값 0.05는 아시아 지역을 대상으로 진행되었던 선행연구들에서(Sakamoto *et al.*, 2007; Sun *et al.*, 2009; Islam *et al.*, 2010) 가장 많이 사용되었으며, Sun *et al.*(2009)은 이 임계값을 전구 임계값이라 언급한바 있다.

$$LSWI + 0.05 \geq EVI \quad (3)$$

2.5. MODIS 기반의 논 탐지

MODIS를 기반으로 논을 탐지하기 위해 산림, 강·호수 지역을 제거하여 논 탐지 시에 나타날 수 있는 오차를 최소화하였다. 이 요소들을 제거하기 위해 Peng *et al.*(2010)이 제안한 EVI 임계값을 활용한 간단한 조건을 이용했다. Peng *et al.*(2010)은 강·호수에서는 EVI가 낮은 반면 논에서는 출수 기간에는 높은 EVI가 높기 때문에, 출수 기간 동안 최대 EVI가 0.55를 넘지 않는 경우를 강·호수라고 판단했다. 또한 논은 산림과 달리 수확 전 단 몇 주만이 EVI가 높은 값을 나타낸다. 그러나 산림은 논과 달리 식생의 성장 기간에도 EVI가 높게 나타나기 때문에, Peng *et al.*(2010)은 성장기간 동안 EVI가 0.45 이상인 경우가 3개월 이상 지속 될 경우를 산림으로 판단했다. Peng *et al.*(2010)이 제안한 EVI 임계값들은 한국 토지피복의 특성에 적합하지 않기 때문에, 이 연구에서는 EVI 임계값에 대한 모수화 과정을 통해 한국 토지피복에 적합한 임계값을 산출하였다. 즉, Peng *et al.*(2010)이 제안한 EVI 임계값을 0.01 단위로 증가 또는 감소시키면서 환경부 토지피복 지도의 강·호수와 산림의 면적을 각각 비교하여 오차가 가장 작은 EVI 임계값을 산정하였다. 산림의 경우 EVI 임계값이 지속되는 기간에도 변경시켜가면서 모수화 과정을 실시했

다. 이 과정을 통해 출수기간 동안 최대 EVI가 0.35를 넘지 못할 경우 강·호수라 판단하였으며, 식생의 성장기간 동안 EVI가 0.35 이상 지속되는 기간이 약 4개월 이상일 경우 산림이라고 판단하였다.

MODIS 기반의 논 탐지를 위해 앞서 기술한 관개시기 탐지 알고리즘에서 관개시기가 한번이라도 탐지된 지역을 선별하였다. 이들 선별된 지역에서 강·호수와 같이 물이 지속적으로 존재하는 픽셀을 제거하였으며, 이 과정에서 도시, 도로, 나지 등도 함께 제외했다. 이후 남은 관개지역 중에서 산림 픽셀을 제외하였다. 위의 세 단계 선별과정을 모두 통과한 픽셀만을 논으로 판단하였고, 논 분류결과의 정확도 평가를 위해 환경부의 중분류 토지피복지도에 나타난 논과 비교하였다. 또한 MODIS 기반의 논 지도의 오차를 파악하기 위해 환경부 논 지도와 MODIS 논 지도가 일치, 과대평가 또는 과소평가하는 경우의 3 가지 경우로 분류해서 오차지도를 제작하였다.

III. 결과 및 고찰

3.1. MODIS 관개시기 탐지 알고리즘 평가

Xiao *et al.*(2005)이 제안한 MODIS 기반의 관개시기 탐지 알고리즘을 한국 이천과 일본 Mase 플릭스 연구지에 적용하여 알고리즘 평가를 실시하였다.

이천 연구지의 경우, Lee *et al.*(2005)의 보고에 의하면 관개기간은 2003년 5월 10일(day of year, DOY 130)부터 2003년 6월 20일(DOY 171) 까지였다. Mase 연구지의 경우, Ecosystem Database(<http://ecomdb.niaes.affrc.go.jp>) 홈페이지에 공개된 자료에 의하면, 관개 시작일은 2001년 4월 23일(DOY 113)이었고, 2001년 5월 2일(DOY 122)에 모내기를 시작했다. MODIS로부터 EVI와 LSWI를 이용하여 관개시기를 추정한 결과 이천 연구지에서는 2003년 5월 11일(DOY 131)로 실측 자료의 모내기 시작 기간과 1일 정도 차이를 보였으며, Mase 연구 지역에서는 2001년 5월 1일(DOY 121)로 실측 자료와 8일 정도의 차이를 보였다(Fig. 3). MODIS MYD09A1 자료의 시간 해상도가 8일이기 때문에 1일 단위의 정확한 추정은 어렵지만 MODIS의 시간 해상도를 고려해 볼 때 신뢰도 있는 결과를 보였다고 사료된다.

두 플릭스 연구지와 관개시기가 다를 것으로 예상되는 한국 남부 지역 중 임의로 한 곳의 논을 선정하여

다른 두 곳의 연구지와 비교했다. 일반적으로 한국 남부 지방은 중부 지방에 비해 기온이 높고 더욱 온화한 기후를 띠기 때문에 짧은 기간에도 벼의 생육 조건이 충족되어 관개를 늦게 하는 경향이 있다. 본 연구에서는 논이 잘 발달된 김해 지역을 연구지로 선정하였다. 김해 연구지에 대한 MODIS기반의 관개시기 탐지 결과, 2003년 5월 23일(DOY 143)로 다른 2곳의 연구지 보다 늦었다. 김해 연구지는 관개시기에 대한 관측자료가 없기 때문에 MODIS로부터 탐지된 관개시기 결과의 신뢰도를 평가할 수는 없었으나, Xiao *et al.*(2005)에 의해 보고된, 논에서 나타나는 LSWI와 EVI의 시계열 패턴이 분명하게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 본 연구에서는 나타내지 않았지만 다른 지역의 논에서도 LSWI와 EVI의 시계열 패턴이 마찬가지로 유사하게 나타났다.

따라서 Xiao *et al.*(2005)의 방법은 한국 논에 대한 MODIS 기반의 관개시기 탐지에 적합한 알고리즘으로 판단된다. 다만 예상되는 문제점은 이천 연구지에서 볼 수 있듯이, 관개시기 전후로 LSWI가 EVI보다 큰 시점이 뚜렷이 나타나지 않는 경우이다. 이는 MODIS 자료의 500m 공간해상도 안에서 발생하는 토지피복의 이질성에 의한 영향으로 보인다. MODIS 500m 픽셀 내에 논 이외의 다른 토지피복이 혼재해 있을 경우 관개시기에 물에 대한 MODIS LSWI의 민감도가 낮을 수 있기 때문이다. 관개시기 판단 과정에서 픽셀 내의 토지피복의 이질성이 클 것으로 예상되는 산악지역에 분포한 논에서 관개시기가 탐지되지 않는 경우가 다수 발견되었다. Xiao *et al.*(2005)은 중국의 논을 대상으로 LSWI에 임계값 0.05를 더하여 NDVI 또는 EVI와 비교하는 방식을 제안하였는데, Peng *et al.*(2010), Sun *et al.*(2009) 등의 연구에 따르면 이 값은 토지피복의 이질성에 따라 달리 적용될 수 있다. 따라서 향후 MODIS 기반의 관개시기 탐지 알고리즘의 신뢰도를 높이기 위해서는 연구지역의 토지피복 특성을 반영하도록 알고리즘을 개선할 필요가 있다.

3.2. MODIS 관개시기 지도 제작

MODIS 관개시기 탐지 알고리즘을 한국에 적용시켜 각 픽셀 별로 관개여부와 관개시기를 탐지하였다. 관개 탐지된 지역을 환경부 중분류 토지피복도에서 추출한 논 피복지도에 중첩하여 관개시기의 공간분포를

Fig. 2. Land cover map developed by Ministry of Environment.

가시화하였다(Fig. 4). 이를 바탕으로 군 단위의 평균 관개시기 지도를 제작하여 한국 지역별 관개시기의 공간적 분포 특성을 분석하였다(Fig. 5).

그 결과, 한국 중부 지역에서는 약 5월 30일(DOY 150) 이전에 대부분 관개가 된 것으로 나타났으며, 남부 지역에선 대부분 5월 30일(DOY 150) 이후에 관개가 시작되었다. 관개시기는 관개 용수의 상황, 벼 품종, 기후조건, 농기계의 가용성 등에 따라 다르기 때문에 실제 공간적 분포 특성을 파악하기 어렵지만, 전반적으로 남부 지역에서는 관개시기가 늦은 지역이 많음을 확인할 수 있다. 앞서 언급한 바와 같이 남부 지역이 기온이 높고, 온화하기 때문에 짧은 기간에도 벼의 생육 조건이 충족되어 관개시기가 늦은 경향이 있을 수 있다. 또한 일부 지역에서는 다른 작물과 함께 이모작을 하는 경작지들이 있어서, 동계 작물을 수확한 후에 관개를 하기 때문에 그 시기가 늦을 수 있다.

관개시기 지도는 담수에 의한 증발이 발생하는 시기를 파악할 수 있다. 이를 통해 신뢰도 있는 논지의 증발산량 추정이 가능하며 논지의 물 수지 분석에도 활용될 수 있다. 또한 지역의 관개용수 현황에 대한 모니터링을 통해 효율적인 수자원 관리를 위한 연구에 활

Fig. 3. The seasonal variations of MODIS derived EVI and LSWI in three rice paddy fields: (a) Icheon in year 2003, (b) Mase in 2001, (c) Gimhae in 2003. The circle expresses the timing of irrigation detected by a condition, $LSWI + 0.05 > EVI$.

용될 수 있을 것으로 판단된다.

3.3. MODIS 기반의 논 탐지

MODIS 관개시기 자료를 기반으로 한국의 논 지도를 제작하여 환경부 중분류 토지피복도에서 논을 추출하여 비교하였다(Fig. 6). MODIS로부터 논 탐지 시 관개가 탐지된 지역으로부터 산림, 호수 및 강, 도시 및 도로 등 논 이외의 토지피복을 제거하기 위해 Peng *et al.*(2010)이 제안한 EVI를 활용한 방법을 사용했다. 그러나 Peng *et al.*(2010)이 제안한 조건은 한국의 토지피복 특성에 적합하지 않기 때문에 본 연구에서는

Fig. 4. Map of irrigation date in paddy fields.

Peng *et al.*(2010)에 의해 제안된 임계값을 조절하여 한국의 토지피복 특성에 가장 적합하다고 판단되는 값을 적용하였다(Table 1). 그 결과, 한국 전체 논 면적에 대해서 MODIS로부터 탐지된 결과가 환경부 토지피복도의 면적에 비해 약 1.8% 과소평가되었다. 그러나 이 결과는 지역에 따른 오차를 반영하지 못하기 때문에 알고리즘의 신뢰도에 대한 정확한 평가라고 보기가 어렵다. 따라서 각 픽셀 별로 논 피복 탐지에 따른 오차를 명확하게 비교하기 위해서 MODIS 논 피복지도와 환경부 토지피복도에서 추출한 논 피복지도 간의 각 픽셀에 따른 오차지도를 제작하였다(Fig. 7). 그 결과, 평야지대의 규모가 큰 논에 대해서 MODIS가 과대평가하였으나 규모가 작고 산재하여 분포하는 논에 대해서는 MODIS가 과소평가하는 경향을 보였다.

Fig. 5. Map of average irrigation date at the level of city and country of Korea.

MODIS로부터 논 탐지 시 과대 또는 과소 평가되는 주요 오차 요인으로 MODIS 자료의 공간해상도에서 기인한 오차와 산림, 도시, 호수 및 강 등을 제거하는 과정에서 적용한 임계값의 오차, 관개지역 탐지 알고리즘에서 발생하는 오차 등을 생각할 수 있다.

MODIS 500m 픽셀이 논으로 판별되었다해도, 500m 픽셀 내에는 농로, 도로, 산림 등의 토지피복들이 혼재해 있으므로, 실제 논 면적을 과대평가할 수 있다. 한편 논이 다수를 차지하지 못해 논으로 판별되지 않는 경우에는 반대로 실제 논 면적이 과소평가된다. 이는 MODIS 픽셀의 공간해상도 문제로서 주로 논이 넓게 분포하는 평야지역에서는 과대평가되고 논이 소규모로 분포하는 산지에서는 과소평가되기 때문

Table 1. Errors of between land cover map of the Ministry of Environment and classifications for permanent water, urban, and forest land covers that were conducted in this study, which were based on the threshold conditions suggested by Peng *et al.*, (2010) and the ones modified in this study

Screening Element	Peng <i>et al.</i> (2010)	Error (%)	Modified condition	Error (%)
Permanent water & Urban	Maximum EVI ≤ 0.55 (heading period)	+ 79.4	Maximum EVI ≤ 0.35 (heading period)	+ 4.2
Forest	EVI ≥ 0.45 (over three month)	- 49.1	EVI ≥ 0.35 (over four month)	+ 3.5

Fig. 6. Comparison of maps between (a) the MODIS-based paddy fields and (b) the paddy field map based on the land cover map from the Ministry of Environment.

Fig. 7. Error distribution of MODIS-based paddy field map with respect to that map from the Ministry of Environment land cover map.

이라 판단된다.

또한 산림, 호수, 강, 도시 및 도로 등 논 이외의 지역을 제거하는 과정에서 관개가 된 것으로 판단되는 픽셀이 함께 제거되어 MODIS 기반의 논이 환경부 토지피복도의 논에 비해 과소평가될 수 있다. 그러나 이 때문에 논 이외의 지역을 제거하기 위한 조건을 완화할 경우 논이 아닌 픽셀이 논으로 탐지되어 MODIS 기반의 논이 과대평가되는 반대 결과를 나타낼 수 있으므로, 최적의 임계값을 찾는 것이 중요하다. 이 연구에서는 Peng *et al.*(2010)이 제안한 임계값을 여러 가지 조합으로 변화하면서 분류의 정확도를 높이는 방식을 취하였다. 결과적으로 분류오차를 산림피복의 경우 -49.1%에서 +3.5%, 강과 경우 +79.4%에서 +4.2%까지 상당히 줄일 수 있었다. 그럼에도 불구하고, 논 이외의 피복을 제거하는 과정에서 산림, 밭 등과 함께 소규모로 산재하는 논 지역이 다수 제거된 것으로 미루어 보아, 분류의 임계값이 아직 불확실하거나 앞서 언급한 픽셀 내의 피복의 이질성이 영향을 미친 것으로 판단된다. 그러나 이 연구는 MODIS 시계열 자료를 이용한 논 피복분류의 가능성을 평가하고 문제점을 논의하는 데에 초점을 두었으므로, 보다 정

교환 논 이외의 피복형에 대한 탐지기법의 향상은 추후 연구과제로 남아 있다.

알고리즘의 오차요인으로는 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에 사용된 LSWI의 임계값(+0.05)이 Xiao *et al.*(2005)에 의해 중국 지역을 대상으로 적용된 값이기 때문에 한국에 적용할 경우 토지피복의 이질성으로 인해 오차를 유발할 수 있다. 토지피복의 특성과 관계없이 모든 지역에 동일한 임계값을 사용했기 때문에 규모가 작은 논에 대해서는 MODIS 500m 격자 내에 다른 토지피복들이 혼재할 경우 LSWI의 물에 대한 민감도가 낮아 관개시기가 탐지되지 않을 수 있다. LSWI의 임계값을 점차 증가시키면서 알고리즘을 적용한 결과 산지의 소규모 논이 판별되는 것을 확인하였으나, 토지피복의 이질성과 임계값 간의 정량적 연관 관계를 도출하기 위해선 보다 심도 깊은 후속연구가 필요하다.

선행 연구들에서 역시 토지피복의 이질성에서 기인하는 오차를 최소화하기 위한 노력으로서 Peng *et al.* (2010)은 복잡한 토지피복 형태를 가지는 지역에서 논만을 추출하기 위한 방안으로 관개시기 탐지 시, 그 연구 지역에 적합한 LSWI의 임계값을 실측 자료로부터 산출하여 적용시켰다. 또한 Sun *et al.*(2009)은 LSWI의 임계값을 대상 연구지에 맞게 적용하는 방법 외에 EVI에도 임계값을 적용하여 MODIS 논 탐지의 신뢰도를 높였다. 이와 같이 지역에 적합한 LSWI의 임계값을 개발하는 방법이 필요하며 나아가서 토지피복 이질성에 따라 각각 다른 임계값을 적용할 수 있는 방법이 필요하다. Xiao *et al.*(2005)은 MODIS의 보조자료로 전천후 고해상도 영상인 SAR 영상자료의 활용의 필요성에 대해 언급한 바 있으며, Sakamoto *et al.*(2007)은 MODIS 기반의 침수지역 탐지에 대한 평가자료로서 SAR 영상자료를 이용하였다. SAR 영상자료는 시간해상도가 MODIS 자료에 비해 주기적이지 않은 단점이 있다. 그러나 지표의 물에 대한 민감도가 높아 관개유무를 판별하는데 용이하며, MODIS에 비해 높은 공간해상도를 가지는 장점이 있다. SAR 영상상 이외에 Landsat, SOPT 등의 MODIS에 비해 고해상도 위성영상을 통해 MODIS 공간해상도 내에 토지피복 이질성에 대한 정보를 정량화하여, 이질성에 따라 각각의 픽셀에 대해 LSWI의 임계값을 다르게 적용할 수 있는 방법을 개발한다면 MODIS 기반의 관개시기탐지 알고리즘을 향상시킬 수 있을 것

으로 판단되며, 이를 통해 신뢰도 있는 논 피복 지도를 제작이 가능할 것으로 사료된다.

IV. 요약 및 결론

이 연구에서는 Xiao *et al.*(2005)이 제안한 MODIS LSWI와 식생지수를 이용한 관개시기 탐지 알고리즘을 한국과 일본의 논 지역에 위치한 플렉스 타워 연구지를 대상으로 검증하고, 한국 전 지역에 적용하였으며, MODIS로부터 추정된 관개시기 결과를 바탕으로 한국 논 분포 탐지도도를 제작하였다.

한국 이천 플렉스 연구지와 일본 Mase 플렉스 연구지에서 MODIS 기반의 알고리즘으로 탐지된 관개시기는 각각 2003년 5월 11일(DOY 131)과, 2001년 5월 1일(DOY 121)이었으며 관측자료와 비교할 때 각각 1일과 8일 정도의 차이를 나타냈다. 이러한 결과는 MODIS 8일 단위 자료의 오차범위 내에 있기 때문에 신뢰도 있는 관개시기 탐지 결과라고 판단된다. 그러나 MODIS 관개시기 탐지 결과를 바탕으로 한국의 논을 탐지하여 환경부 토지피복도와 비교 시 규모가 큰 논에 대해서는 MODIS가 과대평가하는 경향을 보였고 산재된 규모가 작은 논에 대해서는 MODIS가 과소평가하거나 탐지하지 못하는 결과를 보였다. 이는 MODIS 자료의 공간해상도(500m)가 한국 논의 규모를 표현할 수 있을 만큼 세밀하지 못한 점과 산림, 도시, 호수 및 강 등을 제거하는 과정에서 발생한 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 Xiao *et al.* (2005)이 제안한 MODIS 기반의 관개시기 탐지 알고리즘은 중국 논을 대상으로 개발되었기 때문에 한국 논 토지피복 특성을 제대로 잘 반영하지 못하여 오차가 발생할 수도 있다. 한국의 논은 규모가 작고 다른 토지피복이 함께 혼재해 있는 지역이 많아서 MODIS 기반의 관개시기 탐지 알고리즘 개선을 위해, 한국의 토지피복의 이질성을 정량화하고 그 이질성의 정도에 따라 각기 다른 LSWI의 임계값을 개발하여 적용할 필요가 있다. 이 연구의 결과는 향후 논 지역의 물수지 분석 및 효율적인 수자원 관리, 논 증발산 추정 등의 연구에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

적 요

벼는 전 세계 주요 식량 자원 중 하나이며, 특히

아시아 지역에서 벼 경작이 활발히 이루어지고 있다. 벼를 경작하기 위한 논은 다른 작물과 달리 모내기 전에 논에 물을 가둬두며, 많은 양의 물이 관개용수로 사용된다. 따라서 신뢰도 있는 관개시기 및 논의 탐지는 효율적인 수자원 관리 및 물 수지 분석을 위해 반드시 필요한 요소이다. 본 연구에서는 MODIS 자료로부터 산출된 개선된 식생지수(Enhanced Vegetation Index, EVI)와 지표수분지수(Land Surface Water Index, LSWI)를 활용하여 관개시기와 논의 공간분포 탐지를 실시했다. 한국의 이천 연구지와 일본 Mase 연구지를 대상으로 MODIS 기반의 관개시기 탐지 결과 관측자료와 각각 1일과 8일정도의 차이를 나타냈다. 이 결과는 MODIS 8일 단위 자료의 오차범위 내에서 신뢰도 있는 관개시기 탐지 결과를 나타낸 것으로 판단된다. 또한 관개시기 탐지 결과를 토대로 한국 전체를 대상으로 MODIS 기반의 논을 탐지하고 환경부 토지피복도의 논과 비교하였다. 그 결과, 논이 넓게 분포한 지역에서는 MODIS가 과대평가하는 결과를 나타냈으며, 규모가 작은 논에 대해서는 과소평가하는 결과를 나타냈다. 이는 MODIS 자료의 공간해상도(500m)가 한국 논의 규모를 표현할 정도로 세밀하지 못한 점과 산림, 도시, 호수 및 강 등을 제거하는 과정에서 오차가 발생했을 것으로 판단된다. 또한 Xiao et al.(2005)이 제안한 LSWI에 대한 임계값(+0.05)은 중국을 대상으로 개발된 값으로, 한국 논 토지피복 복잡성을 잘 반영하지 못하여 오차를 발생시킨 것으로 사료된다. 따라서 신뢰도 있는 관개시기 및 논 탐지를 위해서는 한국 논의 규모 및 토지피복의 이질성을 체계적으로 고려한 LSWI의 임계값을 개발하여 적용할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 국립농업과학원 국책기술개발사업 [과제 번호: C1006455-01-02(120100187)] 지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- FAOSTAT., 2004: Statistical Database of the Food and Agricultural Organization of the United Nations.
- IRRI., 1993: IRRI Rice Almanac. Manila7 International Rice Research Institute.
- Islam, A. S., S. K. Bala and M. A. Haque, 2010: Flood inundation map of Bangladesh using MODIS time-series images. *Journal of Flood Risk Management* **3**, 210-222.
- Lee, J., Y. Lee, G. Kim and K. Shim, 2005: CO₂ and Water Vapor Flux Measurement by Eddy Covariance Method in a Paddy Field in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **7**(1), 45-50.
- Maclean, J. L., D. C. Dawe, B. Hardy and G. P. Hettel, 2002: Rice Almanac: Source Book for the Most Important Economic Activity on Earth. CABI Publishing.
- Park, S. P., K. T. Kim, J. H. Lee and K. S. Lee, 2006: Applicability of Multi-Temporal MODIS Images for Drought Assessment in South Korea, *Geographical Journal of Korea* **9**(4), 176-192.
- Peng, D., A. R. Huete, J. Huang, F. Wang and H. Sun, 2010: Detection and estimation of mixed paddy rice cropping patterns with MODIS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 349.
- Sakamoto, T., N. V. Nguyen, A. Kotera, H. Ohno, N. Ishitsuka and M. Yokozawa, 2007: Detecting temporal changes in the extent of annual flooding within the Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta from MODIS time-series imagery. *Remote Sensing of Environment* **109**, 295-313.
- Sun, H., J. Huang, A. Huete, R., D. Peng and F. Zhang, 2009: Mapping paddy rice with multi-date moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data in China. *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* ISSN 1673-565X, ISSN 1862-1775.
- Xiao, X., S. Boles, J. Liu, D. Zhuang, S. Frolking, C. Li, W. Salas and B. Moore, 2005: Mapping paddy rice agriculture in southern China using multi-temporal MODIS images. *Remote Sensing of Environment* **95**(4), 480-492.
- Xiao, X., S. Boles, S. Frolking, W. Salas, B. Moore and C. Li, 2002: Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data. *International Journal of Remote Sensing* **23**, 3009-3022.
- 김창길과 권태진, 2008: 한반도 자원순환형 친환경농업 발전 방향과 과제. *농촌경제* **31**(1), 1-30.