

MODIS NDVI와 기상자료를 이용한 우리나라 벼 수량 추정

홍석영*[†] · 허지나** · 안중배** · 이지민*** · 민병길*** · 이충근****
· 김이현* · 이경도* · 김선화* · 김건엽* · 심교문*

* 농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부, ** 부산대학교 대기환경과학과

*** 비엔티솔루션, **** 농촌진흥청 국립식량과학원 답작과

Estimating Rice Yield Using MODIS NDVI and Meteorological Data in Korea

Suk Young Hong*[†], Jina Hur**, Joong-Bae Ahn**, Jee-Min Lee***, Byoung-Keol Min***,
Chung-Kuen Lee****, Yihyun Kim*, Kyung Do Lee*, Sun-Hwa Kim*,
Gun Yeob Kim* and Kyo Moon Shim*

* National Academy of Agricultural Science (NAAS), RDA, ** Division of Earth Environmental System, Pusan National University

*** B&T Solutions, **** National Institute of Crop Science (NICS), RDA

Abstract : The objective of this study was to estimate rice yield in Korea using satellite and meteorological data such as sunshine hours or solar radiation, and rainfall. Terra and Aqua MODIS (The MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer) products; MOD13 and MYD13 for NDVI and EVI, MOD15 and MYD15 for LAI, respectively from a NASA web site were used. Relations of NDVI, EVI, and LAI obtained in July and August from 2000 to 2011 with rice yield were investigated to find informative days for rice yield estimation. Weather data of rainfall and sunshine hours (climate data 1) or solar radiation (climate data 2) were selected to correlate rice yield. Aqua NDVI at DOY 233 was chosen to represent maximum vegetative growth of rice canopy. Sunshine hours and solar radiation during rice ripening stage were selected to represent climate condition. Multiple regression based on MODIS NDVI and sunshine hours or solar radiation were conducted to estimate rice yields in Korea. The results showed rice yield of 494.6 kg 10a⁻¹ and 509.7 kg 10a⁻¹ in 2011, respectively and the difference from statistics were 1.1 kg 10a⁻¹ and 14.1 kg 10a⁻¹, respectively. Rice yield distributions from 2002 to 2011 were presented to show spatial variability in the country.

Key Words : Rice yield, Remote sensing, MODIS NDVI, Solar radiation

요약 : 본 연구에서는 농경지의 면적 산정과 다양한 작물의 생산량 추정을 위해 많이 활용되고 있는 MODIS 영상과 기상자료를 이용하여 우리나라의 벼 수량을 추정해보고자 하였다. Terra와 Aqua 위성으로부터 얻어진 시계열 MODIS NDVI 자료를 구축하고 수량과의 상관성이 높은 시기를 선택하여 기상자료와 함께 다중회귀 모형 기반으로 우리나라 벼 수량을 추정하였다. 2002년부터 2010년까지 MODIS 위성 식생 지수 NDVI와 기상자료(일조시간 및 일사량)를 이용하여 우리나라 벼 수량 추정을 위한 다중 회귀모형을 작

접수일(2012년 9월 10일), 수정일(1차 : 2012년 10월 8일, 2차 : 10월 23일), 게재확정일(2012년 10월 24일).

[†] 교신저자: 홍석영(syhong67@korea.kr)

성하였다. MODIS NDVI와 관측소 기상자료 1을 이용한 모형으로 2011년 쌀 수량 추정한 결과 $494.6 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 통계청이 발표한 최종 수량과는 $1.1 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 차이가 나는 것으로 나타났다. MODIS NDVI와 관측소 기상자료 2를 이용한 모형으로 2011년 쌀 수량 추정한 결과 $509.7 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 통계청이 발표한 최종 수량과 $14.1 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 차이가 나는 것으로 나타났다. 2002년부터 2011년까지의 우리나라 쌀 수량 분포도를 작성하였다.

1. 서론

농작물의 작황 추정은 생산량 예측을 통한 수급 조절, 가격 예측, 농가 소득 보전을 위한 정책 수립 등에 중요한 판단 자료로 사용되며, 경제 전반에 미치는 파급 효과로 인해 경제·산업적 중요성이 점점 증가하고 있다. 작황 추정 분야에서 넓은 지역에 대한 객관적인 자료로써 원격탐사 영상 정보의 사용이 점차 확대되고 있으며 작황 추정을 위해서는 해당 지역에 대한 장기간의 촬영 정보가 필요하다. 미국, 유럽, 등 선진국에서는 자체적으로 관측 위성을 발사하여 원격탐사 영상의 획득에 노력하고 전 지구 차원의 작황 모니터링 체계를 구축하여 주요 수출입국 또는 관심국가에 대한 작황을 감시하고 있다.

위성영상을 이용한 농작물의 작황 추정은 농업분야에서 중요하게 여겨지고 있고 많은 나라에서 활발하게 연구되고 있다(Doraiswamy *et al.*, 2005; Rasmussen, 1997; Sun, 2000; Becker-Reshef *et al.*, 2010). 이는 주요 곡물의 재배면적과 생산량 정보가 식량수급 조절, 가격 예측, 농가소득 보전을 위한 정책 수립 등에 중요하게 활용되고 있기 때문이다. 국내뿐만 아니라 곡물 수출입국의 생산량 동향도 정책 판단의 자료가 되므로 수출과 수입 대상 작물에 대한 국외 작황 역시 관심사가 아닐 수 없다. 신흥 산업국의 식량 소비량 증가와 바이오 에너지에 의한 신규 수요 증가로 국제 곡물가격의 지속적 상승이 국내 물가 상승요인으로 작용하고 있다. 이와 같이 세계적으로 에너지 위기, 기후변화 등으로 인한 곡물가 폭등이 잦아지고 있어 선진 각국은 작물 안정 생산과 식량안보를 위한 국내의 작황 추정을 위한 미래기술 개발에 힘을 기울이고 있다.

최근 기후변화와 에너지 위기, 곡물가 폭등 등 국내외 여건에서 주요 식량 수입/수출국에 대한 위성영상 기반 주기적 작황감시 자료 제공은 식량안보를 위해 기본

적으로 필요한 자료이다. 따라서 작물의 안정 생산과 식량안보, 생태계 지속성 평가를 위한 국가차원의 미래기술 개발 노력이 요구되고 있으며, 이에 발맞추어 국산 및 외국 관측위성 자료의 활용이 보편화 되고 자료 취득 및 분석 비용이 저렴해 지는 등 우주개발 기술의 발달로 다양한 정보 취득이 가능한 환경이 조성되고 있다. 특히, 국외 지역과 비접근 지역은 현지조사 자료와 같이 작황 추정을 위한 객관적인 자료가 부족하기 때문에 원격탐사 영상의 사용이 더욱 강조될 수 밖에 없고 안정적인 자료 확보 차원에서 영상정보 DB를 구축하고 축적하는 것이 선행되어야 할 것으로 생각된다. 무엇보다도 중요한 것은 세계적으로 작황감시 분야의 위성영상 활용도가 높아지는 상황에서 독자적인 작황감시 알고리즘 개발에 대한 국내 원천기술 확보가 요구된다는 점이다.

미국, 유럽연합 등 선진국은 원격탐사 기술과 작물 생육모형을 이용하여 경지면적, 생산량, 질소수지, 토양 유기탄소 변화를 정기적으로 예측하고 모니터링 하는 시스템을 구축하여 웹을 통하여 식량생산과 농업 생산 환경 정보를 주기적 보고하고 있고, 이를 정책적으로 활용하고 있다.

국제연합 식량농업기구(UN-FAO)는 작황 조기예보 시스템(GIEW, Global Information and Early Warning System)을 구축하여 전지구적 규모로 국가 단위 및 지역단위의 식량 정책결정자를 위해 곡물 수출 가격, 세계 생산량, 요구량, 무역, 추가 등 식량안보관련 모니터링 자료를 적시에 제공하는 정보체계를 가동하고 있다(<http://www.fao.org/gIEWS/english/index.htm>). 미국 농무성의 외국농업청(USDA FAS)은 세계 농업 수요·공급 추정(WAOB, World Agricultural Supply and Demand Estimates) 보고서를 매달 발간하여 관련 공공기관 및 산업체에 자료를 공급하고 있다(<http://www.pecad.fas.usda.gov/cropeexplorer/>). 유럽연합(EC, European Commission, [-510-](http://www.</p>
</div>
<div data-bbox=)

marsop.info/marsop3/)은 원격탐사를 이용한 농업모니터링 과제(MARS, Monitoring Agriculture Using Remote Sensing Techniques)를 초석으로 유럽의 일반 농업정책 관리를 위한 작황예측, 기후변화 영향에 대한 표준관리 방법, 토지관리 정보를 제공하고 있으며 유럽의 식량안보 프로그램에 따라 세계 농업 모니터링을 하고 있다.

홍석영 등(2009)은 MODIS NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)와 벼 생산량 통계자료를 이용하여 벼 이삭이 패기 전에 한반도 북부에 대한 벼 수량과 생산량에 대한 예상량 추정을 시도한 바 있다. Chang *et al.*(2007)은 시계열 MODIS 영상을 이용하여 회귀나무(regression tree) 분석 등 통계적 방법에 의해 콩과 옥수수의 면적을 산정하여 카운티(county)와 주(state) 단위 통계자료와 비교 한 바 아이오와와 일리노이와 같이 콩과 옥수수 재배면적이 가장 넓은 지역에서 다른 지역보다 결정계수 값이 높게 나타났다고 보고하였다. Doraiswamy *et al.*(2005)은 MODIS 유래 LAI(엽면적지수, leaf area index; 이하 LAI)를 작물 모형 입력변수의 재보정(Re-calibration)에 사용하여 콩과 옥수수 수량을 추정한 바 미국내 통계자료와 비교하였을 때 10% 이내의 차이를 나타내었다고 보고하였다. Ren *et al.* (2008)은 중국 산둥반도의 겨울 밀 수량 추정을 위해 MODIS NDVI를 활용하였고 그 결과를 농업기후 모형을 이용한 수량 추정 결과와 비교한 바 MODIS 자료를 이용한 결과가 모형을 사용하여 얻은 결과에 비해 실측값과의 오차가 적게 나타났다는 결과를 얻었다. 한편 MODIS의 가시광선과 열적외선 영역의 파장을 이용하여 각각 일사량과 온도를 구하여 증발산량을 구하고, 벼의 초장과 엽면적 자료를 토대로 필요한 관개량을 제시하는 연구가 태국에서 수행되었다(Narongrit and Chankao, 2009).

이와 같이 MODIS 영상은 농경지의 면적 산정과 다양한 작물의 생산량 추정을 위해 많이 활용되고 있는데, 본 연구에서는 Terra와 Aqua 위성으로부터 얻어진 시계열 MODIS NDVI 자료와 기상자료 및 생육조사 자료를 수집하여 수량과의 상관성을 분석하고 위성정보를 기반으로 우리나라의 벼 수량을 추정하는 것을 목적으로 하였다.

2. 재료 및 방법

1) MODIS NDVI 자료취득 및 영상처리

MODIS는 영상보정, 대기, 육지, 극지, 해양 등의 관측에 중요한 약 40개의 자료(MOD1~MOD40)를 생산하는데, 다중 데이터의 유형을 지원할 수 있고 간편하고 구현이 쉬운 HDF_EOS(Hierarchical Data Format) 형태로 제공된다. NASA에서는 MODIS 자료를 무료로 제공하는데 level 1, 2, 3으로 나뉜다. 대부분의 level 1 과 모든 level 2 자료는 위성으로부터 약 5분 단위로 연속적으로 얻어지는 자료를 granule로 저장한다. 본 연구에서는 이들 자료들 중 Terra와 Aqua 위성으로부터 육지(land) 연구를 위하여 만들어진 MOD13 및 MYD13 (Vegetation indices) NDVI 및 EVI(Enhanced Vegetation Index, 이하 EVI), MOD15 및 MYD15의 LAI 자료를 이용하였다. 16일 단위로 작성된 NDVI 및 EVI 자료는 250 m, 1 km, 25 km 세 종류의 공간해상도로 제공되는데, 본 연구에서는 250 m 자료를 사용하였다. LAI 자료는 1 km 자료를 이용하였다. NASA의 WIST(The Warehouse Inventory Search Tool) 사이트에서 연구 대상 영상을 검색한 후 자료를 요청하였다. NDVI 자료는 연간 22~23개의 파일이 저장되는데, 한반도를 포함하는 h27v04, h27v05, h28v05 세 개의 granule 자료를 Terra 위성으로부터는 2000년 2월 19일, Aqua 위성으로부터는 2002년 7월 4일부터 2011년 10월까지 다운로드 받았다. Fig. 1에서 나타난 전처리 과정과 같이 NDVI 레이어와 QC/QA 레이어를 import 하고 각 granule을 영상접합(Mosaic) 한 후 USGS의 MRT(MODIS Reprojection Tool)을 이용하여 영상자료 배포 좌표계인 WGS-84 Sinusoidal을 경위도 좌표로 재투영(Reproject) 하였다. 보정계수를 적용하여 영상자료가 데이터 값으로 표현되도록 자료를 변환하여 자료 분석에 사용하였다.

원격탐사를 이용한 식생에 대한 연구는 근적외선과 가시광선 영역의 복사 또는 반사율에 기초한 식생지수(VI; vegetation indices)가 흔히 이용된다. 식생지수는 식생의 녹색도의 상대적인 양과 활력의 지표로서 단위가 없는 방사학적(Radiometric) 측정값이다. 식생지수는 바이오매스, 엽면적지수, 수량 등 작물의 생물리학

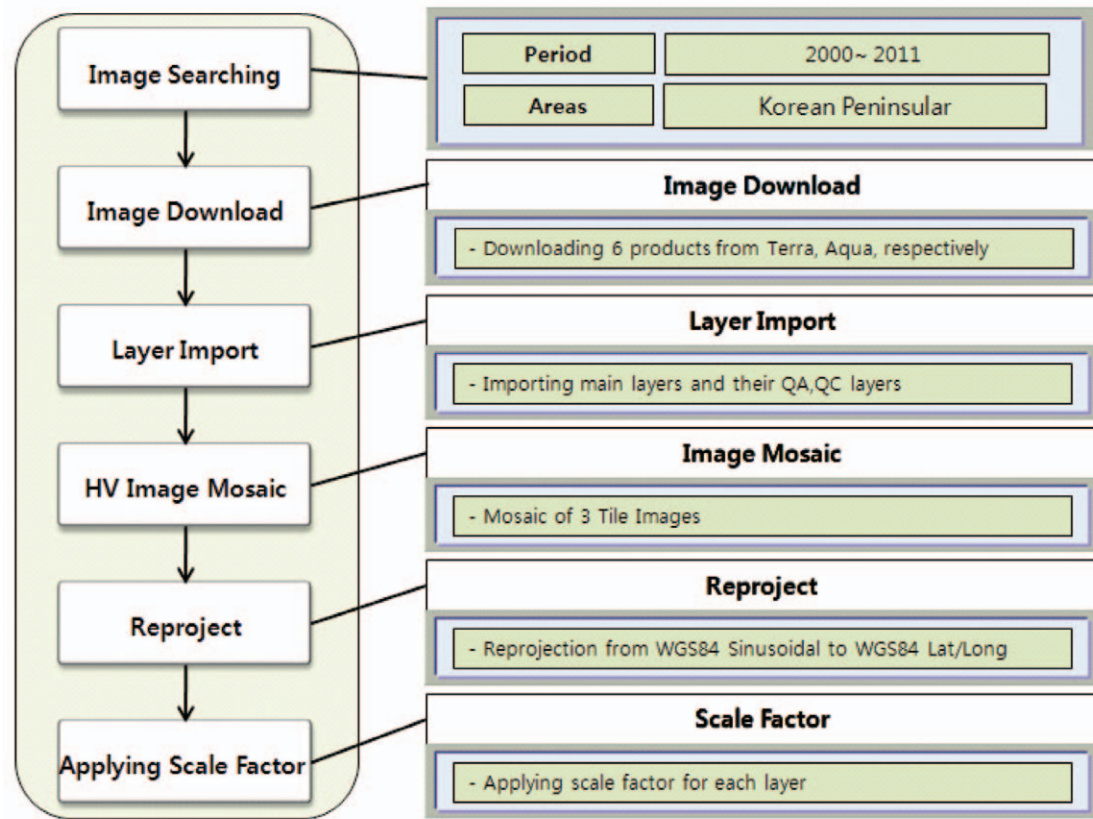


Fig. 1. Flow chart of MODIS data preprocessing.

적 매개변수(Biophysical parameter)에 민감하게 반응한다. 한편 근각 하부의 변이와 같은 내부적인 효과와 태양고도, 관측각, 대기와 같은 외부 효과를 정규화 하여야 한다. 근적외선과 가시광선 파장의 분광특성을 이용하는 식생지수는 경험적인 실증에 기초하여 식생의 생산성과 활력을 추정하는데 널리 이용되고 있다. 근적외선과 가시광선의 비율에 기초하여 가장 먼저 사용되기 시작한 식생지수는 RVI(Ratio vegetation index; Jordan, 1969)이고, 이를 정규화·선형화하여 가장 많이 쓰이는 식생지수는 NDVI(Rouse *et al.*, 1973)이다. NDVI는 -1에서 1사이의 값을 가지며 식생은 대개 0.2 이상에서 1에 가까운 값을 갖게 된다(Eq. 1).

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad (-1 \leq NDVI \leq 1) \quad (1)$$

MOD13과 MYD13의 NDVI 자료는 구름의 영향을 제거하기 위해, 매일 취득한 영상을 16일씩 중첩하여 조건별로 최대한 값을 계산하는 MVC(Maximum value

composite; 이하 MVC) 방법으로 산정한 16일 단위의 영상(level 3)을 제공하고 본 연구에서는 Level 3 영상을 사용하였다(MODIS Web, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/land_atbd.php, Data-Algorithms, atbd_mod13.pdf). NASA는 MOD15와 MYD15의 LAI 자료의 경우 Myneni *et al.*(1992)의 3차원 복사전달모형을 이용한 알고리즘을 이용하여 biome에 따라 LAI를 산출하고 8일 단위 영상을 제공한다(MODIS Web, http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/land_atbd.php, Data-Algorithms, atbd_mod15.pdf).

2) 기상자료 수집 및 처리

기상청에서 관측 및 제공하고 있는 70개 지점의 관측소에서 수집된 일별 관측 자료를 전국 평균한 1차원의 등속기 온도, 누적 강수량, 누적 일조시간 자료를 산술 평균하여 전국 평균값을 산정하여 '기상자료 1'로 명명

하고, 수량과의 상관성 분석과 회귀식 작성에 사용하였다. 이 때 기상관측소의 지점은 논에 위치하고 있기 보다는 관리가 용이한 도심지에 있는 경우가 대부분이다.

한편 대단히 비선형적이고 지형적인 영향을 많이 받는 기상변수들의 특징을 고려할 때, '기상자료 1'과 같이 도심지에 위치한 70개 관측 지점의 평균값을 수량 추정을 위한 기상 대푯값으로 사용하기에는 무리가 있다. 따라서 지형적 특성이 반영된 2차원의 상세 기상 자료를 추가적으로 사용하여 수량을 추정하고 비교하고자 하였다. 이를 위해 기상청에서 제공하는 89개 지점의 관측소 및 599개 지점의 자동 기상관측 장치(Automatic Weather Station; 이하 AWS)에서 관측된 일별 기상 자료('00~'11)를 수집하고, Cressman 기법을 이용하여 3 km의 격자간격을 가지도록 객관 분석을 수행하였다(안중배 등, 2010; Cressman, 1959). 경위도로 투영된 3 km 상세 기후자료를 import 하여 IDL(Interactive Data Language)를 이용하여 일별 강수량 및 일사량으로 각각 매핑하여 위성자료와의 비교 및 공간분석이 가능한 2차원 격자자료로 변환하여 '기상자료 2'로 명명하고 수량과의 상관성 분석과 회귀식 작성에 사용하였다.

3) 벼논의 NDVI 및 기상자료 특성 추출

벼논 지역에 대한 NDVI 및 기상자료 값을 추출하기 위하여 2011년 상반기를 기준으로 하여 지적도상 지목이 논인 지역을 추출하여 벡터 자료인 상태로 접합(Merge)한 후 90 m 격자 영상으로 변환하여 전국을 대상으로 한 논 마스크(Mask) 영상을 작성하였다(Fig. 2).

작성된 논 마스크 영상을 이용하여 Fig. 3과 같이 MODIS NDVI 및 일별 기상자료의 레이어로부터 논 지역의 해당 값을 추출하여 논 지역에 대한 평균 NDVI 및 기상자료 값을 산정하여 자료 분석에 사용하였다. 논 마스크 영상의 화소 수는 총 1,473,114개이고 90 m 격자 면적을 곱하면 총 1,193,222 ha 를 나타내고 있다. 지적도 상의 논이 실제 토지피복 상의 논이 아닌 경우의 오차를 포함하고 있다. 30 m급의 환경부 토지피복분류도도 이용하였으나 통계분석 결과가 지적도 기반과 같게 나타났다(Data not shown). 지적도와 토지피복분류도의 논 면적을 비교해 본 결과 지적도의 논 면적이 토지피복분류도의 논 면적 보다 농업통계 경지면적(논)과



Fig. 2. Parcel map based paddy mask(90 m).

차이가 작게 나타나 이후의 자료 분석에는 지적도를 활용하였다.

4) 벼 수량 통계자료 수집과 통계 분석

전국 벼 수량 통계 자료는 통계청 국가통계포털에서 제공하는 농림어업 통계자료 중 농작물 생산조사 자료('00~'10)를 수집하여 사용하였다(Table 1). 수량과의 상관성 분석과 회귀모형 작성을 위해서 JMP 9(SAS Institute Inc., USA) 통계 소프트웨어를 사용하였다. 벼 수량은 영양생장기에 얼마나 잘 자랐는지에 대한 열매 그릇의 크기와 그릇이 생겨난 후 성숙기 동안 햇빛을 얼마나 많이 받았는가에 의해 결정된다는 생각으로 작물생리 및 농학적 개념을 적용한 통계모형 작성을 목표로 하였다. 이때 위성정보로부터 추출한 논 지역의 출수기 NDVI(x1)와 등숙기 기상자료(x2)를 각각 독립변수로 하여 쌀 수량 추정을 위한 단순 중회귀 모형(쌀 수량=a*출수기 NDVI + b*등숙기 기상자료 + c)을 작성하였다.

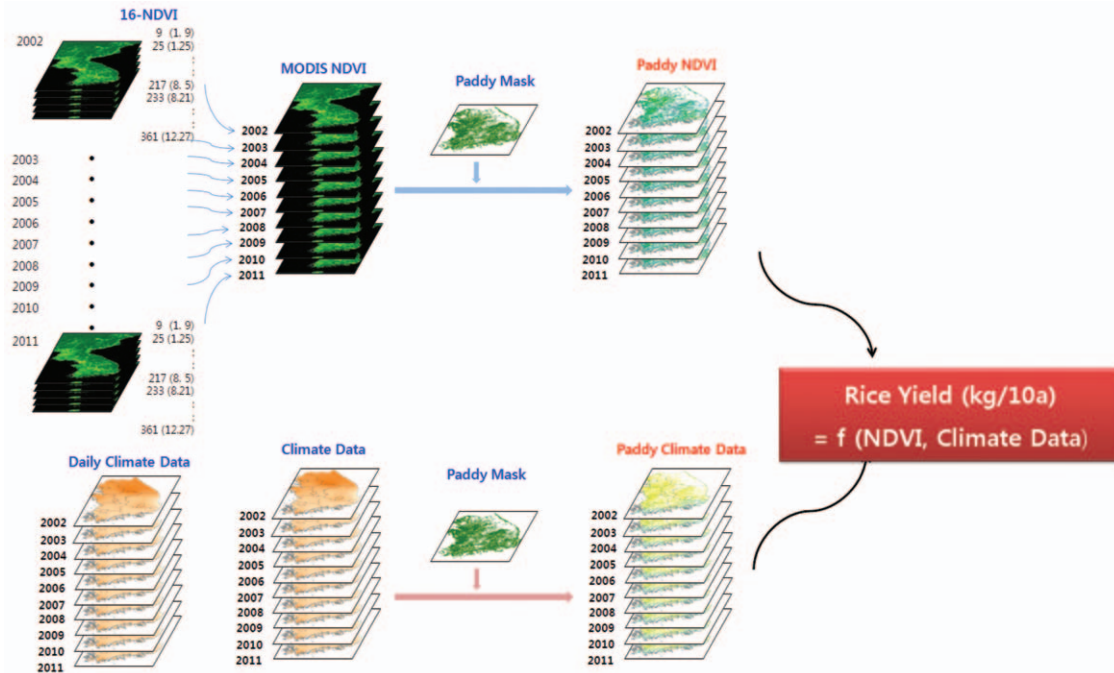


Fig. 3. Rice yield prediction schema using MODIS NDVI and climate data.

Table 1. Yield statistics of Korea (Statistics Korea, <http://kosis.kr>)

Year	Unhulled rice	Milled rice
	Yield(kg 10a ⁻¹)	
2000	675	497
2001	693	516
2002	639	471
2003	609	441
2004	679	504
2005	661	490
2006	664	491
2007	630	466
2008	694	520
2009	706	534
2010	653	483

3. 결과 및 고찰

1) 시기별 MODIS NDVI 및 등숙기 기상 자료와 벼 수량과의 상관성

농촌진흥청에서 분광계를 이용하여 수행했던 지상 실측 결과, 벼의 생육기간 중 측정된 NDVI와 최종 수량과의 상관성은 유수형성기, 개화기, 출수기 사이에 가장 높은 것으로 알려져 왔다(Hong *et al.*, 1997; 김이현

등, 2007). 따라서 NDVI 값과 쌀 수량과의 상관성 분석을 위해 Terra 위성의 MODIS NDVI 및 EVI는 연중일(DOY, Day Of Year) 209(7월 28일)과 225(8월 13일) 영상을 각각 이용하였고 Aqua 위성의 MODIS NDVI 및 EVI는 연중일 201(7월 20일), 217(8월 5일), 233(8월 21일) 영상을 각각 이용하였다. LAI 영상은 8일 자료로 제공되고 있어 Terra 및 Aqua 모두 연중일 201, 209, 217, 225, 233, 241 영상을 쌀 수량과의 상관성 분석에 사용하였다(Table 2).

한편, 벼가 익는 시기인 등숙기의 기상은 출수기 이후 쌀의 수량을 결정하는 가장 중요한 환경 요인이다(Cock and Yoshida, 1972). 예비시험 차원에서 온도, 강수량, 일사량과 수량과의 상관성을 살펴본 결과 평균 및 적산온도 모두 수량과의 상관성이 낮거나 없게 나타나 기상자료 1과 2에서 등숙기 누적 강수량 및 누적 일사량 평균 및 합을 사용하여 분석하였다(Table 2).

본 연구에서는 벼의 생육이 왕성할 때의 작황과 최종 수량이 상관성이 높다는 점과 등숙기의 기상이 쌀 수량에 많은 영향을 미친다는 점에 착안하여 출수기의 NDVI와 등숙기의 기상자료 두 가지를 변수로 하여 쌀 수량을 추정하는 회귀모형을 작성하고자 하였다. 그에

Table 2. Correlation coefficient between rice yield and MODIS products

MODIS products		Correlation Coefficient	
		'00~'11	'02~'11
Terra	TNDVI209 (7.28)	-0.25	-0.33
	TNDVI225 (8.13)	-0.04	-0.04
	TEVI209 (7.28)	-0.27	-0.40
	TEVI225 (8.13)	-0.38	-0.43
	TLAI201 (7.20)	-0.05	0.01
	TLAI209 (7.28)	-0.15	-0.24
	TLAI217 (8.5)	0.23	0.30
	TLAI225 (8.13)	-0.05	-0.11
	TLAI233 (8.21)	0.41	0.33
Aqua	TLAI241 (8.28)	0.63	0.62
	ANDVI201 (7.20)		-0.25
	ANDVI217 (8.5)		0.28
	ANDVI233 (8.21)		0.62
	AEVI201 (7.20)		0.50
	AEVI217 (8.5)		0.18
	AEVI233 (8.21)		-0.23
	ALAI201 (7.20)		-0.17
	ALAI209 (7.28)		0.14
	ALAI217 (8.5)		0.26
	ALAI225 (8.13)		0.41
ALAI233 (8.21)		0.30	
ALAI241 (8.28)		0.73	
rainfall (1 [†])	-0.71	-0.83	
sunshine hours (1)	0.63	0.70	
rainfall (2 [†])*	-0.64	-0.79	
solar radiation (2)	0.73	0.86	

A: Aqua, T: Terra, [†] 1, 2: Meteorological data 1, 2, * '00-'10(n=11) or '02-'10(n=9)

따라 최종 수량과 상관성 높은 시기의 MODIS 식생지수와 등속기의 기상 요인 중 수량 추정에 사용할 변수를 선택하기 위해 각 요인과 최종 수량과의 상관성을 각각 분석하였다.

Table 2는 해당 일의 NDVI, EVI, LAI, 등속기의 강수량 및 일조시간/일사량과 쌀 수량과의 상관계수를 나타내고 있다. Terra 자료는 2000년부터 2011년까지 12년 동안의 데이터 셋과 2002년부터 2011년까지 10년 동안의 데이터 셋, 두 가지로 나누어 상관분석 하였다. 12년 동안의 자료를 이용한 경우에 비해 최근 10년 동안의 자료를 이용했을 때 대개 상관성이 높게 나타났다.

포장 단위에서 실측한 경우 유수형성기에서 출수기

사이에 얻어진 식생지수는 최종 수량과 양의 상관성이 높게 나타남에도 불구하고(Hong *et al.*, 1997; 김이현 등, 2007), 전국 벼는 지역으로부터 추출한 식생지수는 최종 수량과 양의 상관성을 갖지 않고 상관성이 없거나 음의 상관계수를 갖는 경우도 많게 나타났다(Table 2). 이와 같은 결과는 여름철 날씨로 인해 MODIS 위성영상이 구름이나 수증기로 인한 자료 값의 오차가 크다는 점, 논 마스크 자료에서 실제 논이 아닌 지역의 자료 값이 포함되었을 수 있다는 점, 논 마스크 영상과 MODIS 식생지수 또는 LAI 자료의 해상도가 다르고 영상 간 위치의 불일치가 있을 수 있다는 점 등에 기인한 것으로 생각된다.

유수형성기에서 출수기 사이에 얻어진 식생지수와 최종 수량은 양의 상관계수가 높은 시기를 택하는 것이 중요하다. 그러한 관점에서 10년간의 자료 분석 결과 최종 수량과의 상관계수가 0.62로 가장 높게 나타났다는 점과 우리나라에서 가장 많이 재배되고 있는 중만생종 벼의 대표 출수기가 8월 20일이라는 점을 고려할 때 Aqua MODIS 8월 21일(연중일 233) NDVI가 적합한 것으로 생각되었다.

기상자료 1과 2의 등속기 누적 강수량과 쌀 수량은 음의 상관성을, 누적 일사량은 양의 상관성을 나타내었다(Table 2). 2000년에서 2010년까지 11년 자료를 이용한 것 보다 2002년부터 2010년까지 9년 자료를 이용한 경우 쌀 수량과의 상관성이 기상자료 1과 2 모두에서 높게 나타났다. 기상자료 1에서는 강수량과 쌀 수량과의 상관계수가 높게 나타났고 기상자료 2에서는 일사량과의 상관계수가 더 높게 나타났다. 작물의 수량은 광합성의 결과이고 광이용 효율에 따라 생육과 수량이 크게 좌우된다는 점과 토양수분이 대부분의 작물에서는 매우 중요한 생육제한 인자이나 벼는 물이 제한 요인으로 작용하지 않는다는 점에서 쌀 수량과 상관성에 간접적으로 영향을 미쳤을 것으로 판단하여 일조시간/일사량을 쌀 수량 추정을 위한 주요 기상 요인으로 선택하였다. 즉, 우리나라 대표 출수기인 8월 20일을 기준으로 기상자료 1과 2 모두, 출수 후 35일의 누적 평균 일조시간/일사량 또는 누적 평균 강수량을 두 번째 변수로 사용하여 벼 수량 추정 회귀모형을 작성하였다.

Table 3. Rice yield prediction model based on Aqua NDVI₂₃₃(x₁) and sunshine hours 1(x₂) or rainfall 1(x₂) of ripening stage('02~'10, n=9)

Yield Prediction Model	2011 Rice Yield predicted(kg/10a)
Rice Yield = (NDVI ₂₃₃ (x ₁), sunshine hours 1(x ₂)) P=0.0274 RSq=0.70* RMSE=17.9 kg 10a ⁻¹	494.6
Rice Yield = (NDVI ₂₃₃ (x ₁), rainfall 1(x ₂)) P=0.0054 RSq=0.82* RMSE=13.7 kg 10a ⁻¹	515.5

Table 4. Rice yield prediction model based on Aqua NDVI₂₃₃(x₁) and insolation 2(x₂) or rainfall 2(x₂) of ripening stage('02~'10, n=9)

Yield Prediction Model	2011 Rice Yield predicted(kg/10a)
Rice Yield = (NDVI ₂₃₃ (x ₁), solar radiation 2(x ₂)) P=0.0103 RSq=0.78* RMSE=15.2 kg 10a ⁻¹	509.7
Rice Yield = (NDVI ₂₃₃ (x ₁), rainfall 2(x ₂)) P=0.0078 RSq=0.80* RMSE=14.5 kg 10a ⁻¹	515.0

2) MODIS NDVI와 등속기 기상 자료를 이용한 우리나라 쌀 수량 추정

시기별 MODIS NDVI 및 등속기 기상자료와 수량과의 상관성 분석 결과 식생지수는 8월 21일 Aqua MODIS NDVI를, 기상자료는 점관측 누적 일조시간/강수량 자료(기상자료 1)와 객관 분석 적용 후 논 지역의 자료값만 추출한 누적 평균 일조시간/일사량 또는 누적 평균 강수량 자료(기상자료 2)를 각각 이용하여 우리나라 쌀 수량 모형을 각각 작성하였다(Table 3, Table 4).

기상자료 1을 이용한 경우, 식생지수와 일조시간을

이용한 다중회귀 모형의 결정계수가 0.70*이고 RMSE가 17.9 kg 10a⁻¹ 이었다(Table 3). 이 모형에 기반하여 2011년 우리나라 쌀 수량을 추정했을 때 추정값이 494.6 kg 10a⁻¹ 였다. 2011년도 통계청이 발표했던 쌀 예상 수량은 495 kg 10a⁻¹였고 최종수량 495.6 kg 10a⁻¹ 였던 것에 비추어 볼 때 1.0 kg 10a⁻¹ 차이로 거의 일치하는 결과를 나타내었다.

기상자료 2를 이용한 경우, 식생지수와 일사량을 이용한 다중회귀 모형의 결정계수가 0.78*이고 RMSE가 15.2 kg 10a⁻¹로 나타났다(Table 4). 기상변수 1을 이용한 경우보다 결정계수가 높고 RMSE가 낮은 것으로

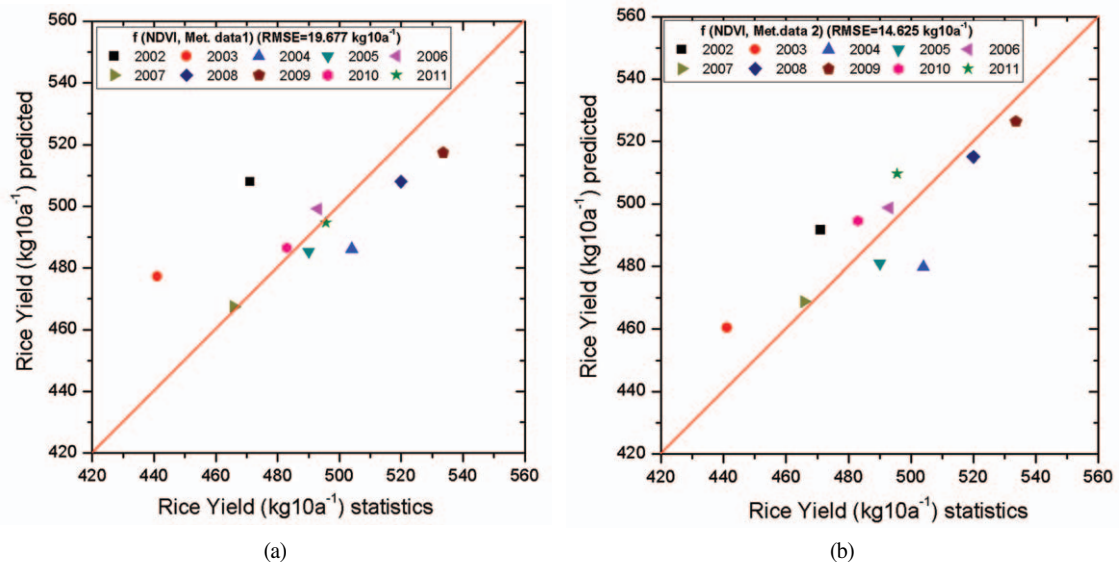


Fig. 4. Comparison of predicted rice yield based on MODIS NDVI and sunshine hours 1 (a) and MODIS NDVI and solar radiation 2 (b) and rice yield statistics from 2002 to 2011.

나타났다. 이 모형에 기반하여 2011년 우리나라 쌀 수량을 추정했을 때 추정값이 $509.7 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 으로 통계청에서 발표한 최종 수량에 비해 $14.1 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 높게 추정되었다.

Fig. 4는 2002년에서 2010년 MODIS NDVI와 일조시간 1, MODIS NDVI와 일사량 2를 이용하여 각각 추정한 연도별 쌀 수량과 통계청 쌀 수량 통계 자료를 비교한 결과이다. MODIS NDVI와 일조시간 1(a)을 이용하여 추정한 모형의 RMSE가 $19.677 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 이고 MODIS NDVI와 일사량 2(b)를 이용한 경우 RMSE가 $14.625 \text{ kg } 10\text{a}^{-1}$ 로 더 낮게 나타났고 전반적으로 1:1선에

에 더 근접한 것으로 나타났다.

3) MODIS NDVI와 일사량 2를 이용한 우리나라 쌀 수량 지도 작성

우리나라 쌀 수량 분포도 작성을 위해서는 식생 및 기상자료 각각 지도의 형태로 표현이 가능한 자료형태이어야 하는데, 기상자료 1은 점 관측값에 의한 산술평균값으로만 계산되므로 지도 작성에 활용할 수가 없다. 따라서 MODIS NDVI 자료와 일사량 2를 이용하여 2002년부터 2011년까지의 우리나라 쌀 수량 지도를 각각 제작하였다(Fig. 5).

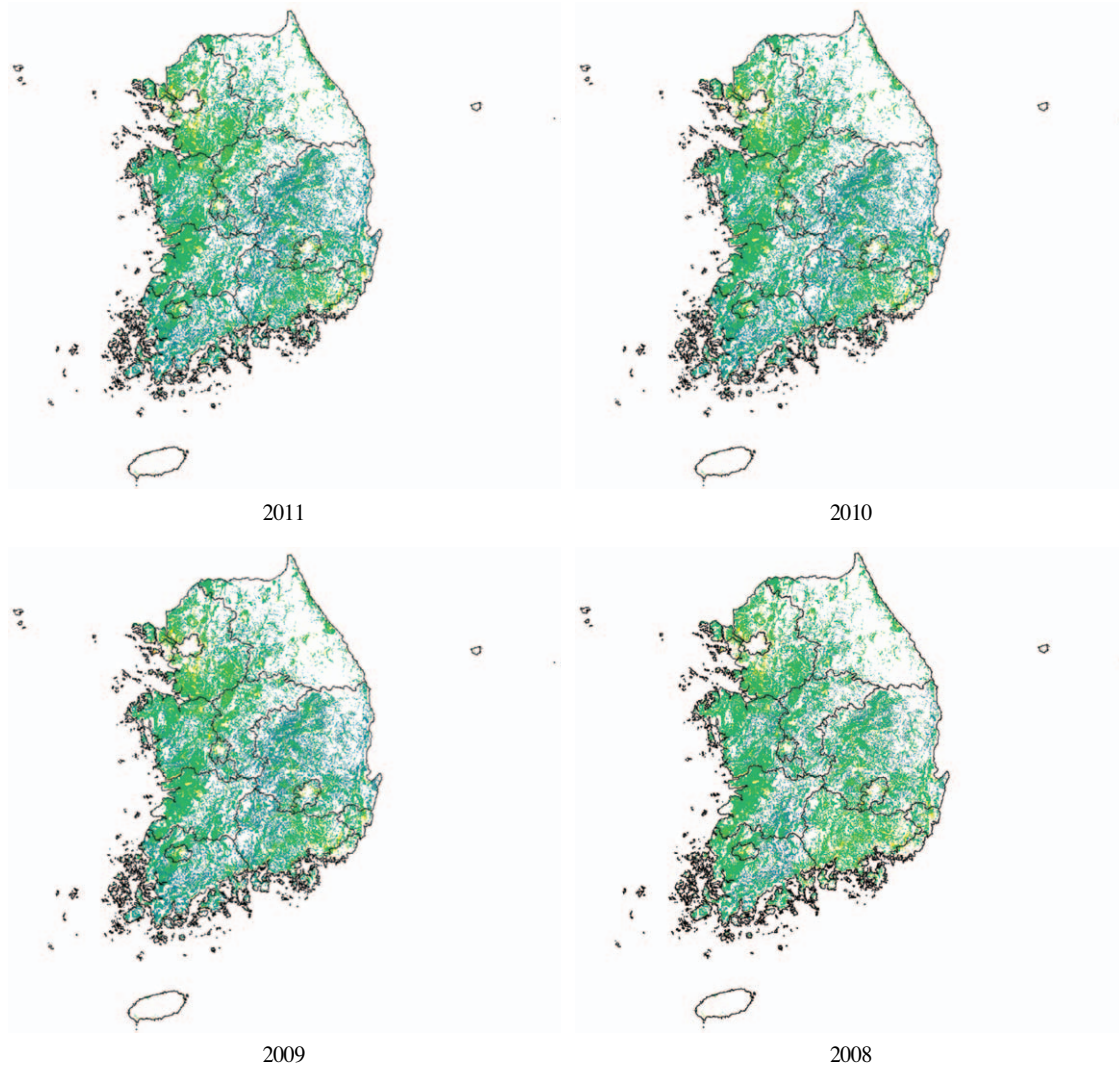


Fig. 5. Rice yield map of Korea from 2002 to 2011.

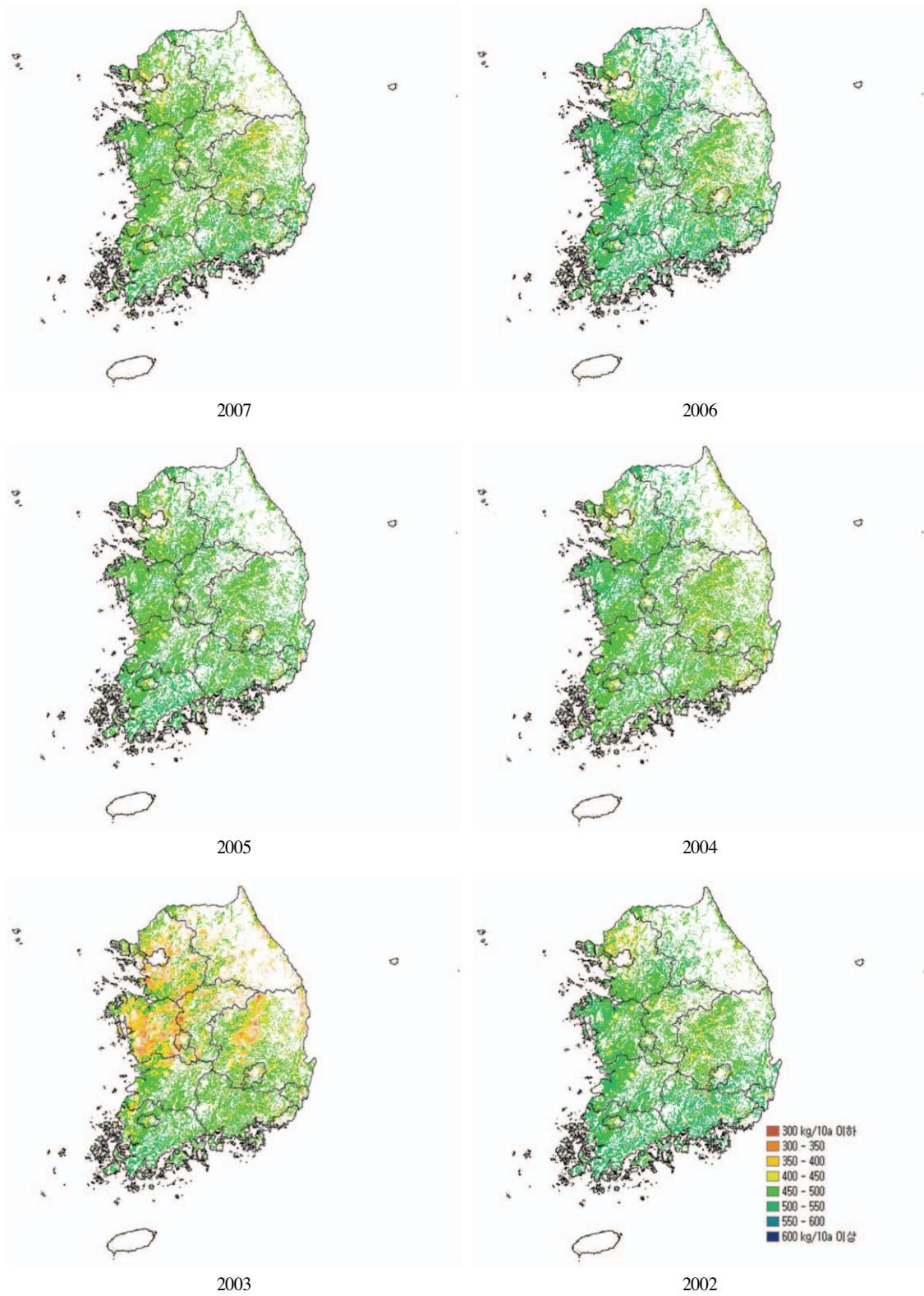


Fig. 5. Continued

4. 결론

본 연구에서는 Terra와 Aqua 위성으로부터 얻어진 시계열 MODIS NDVI 자료를 구축하고 기상자료 및 생육조사 자료를 수집하여 수량과의 상관성을 분석하고 위성정보를 기반으로 우리나라의 벼 수량을 추정하는 것을 목적으로 하였다. 벼 수량은 영양생장기에 얼마나 잘 자랐는지에 대한 열매 그릇의 크기와 그릇이 생겨난 후 성숙기 동안 햇빛을 얼마나 많이 받았는가에 의해 결정된다는 농학적 개념을 적용하였다. 이때 위성정보로부터 추출한 논 지역의 출수기 NDVI(x1)와 기상정보로부터 작성된 등숙기 일사량 자료(x2)를 각각 독립변수로 하여 쌀 수량 추정을 위한 단순 중회귀 모형을 작성하였다.

2002년부터 2010년까지의 MODIS 위성 식생지수 NDVI와 관측소 평균 기상값 및 2차원 기상 관측 자료(일조시간 및 일사량)를 이용하여 우리나라 벼 수량 추정을 위한 다중 회귀모형을 작성하였다. MODIS NDVI와 관측소 기상자료 1을 이용한 모형으로 2011년 쌀 수량 추정 결과 494.6 kg 10a⁻¹로 통계청이 발표한 최종 수량과는 1.1 kg 10a⁻¹ 차이가 나는 것으로 나타났다. MODIS NDVI와 관측소 기상자료 2를 이용한 모형으로 2011년 쌀 수량 추정 결과 509.7 kg 10a⁻¹로 통계청이 발표한 최종 수량과 14.1 kg 10a⁻¹ 차이가 나는 것으로 나타났다. MODIS NDVI와 기상자료 1, MODIS NDVI와 기상자료 2를 이용하여 각각 추정한 연도별 쌀 수량과 통계청 쌀 수량 통계 자료를 비교한 결과 MODIS NDVI와 기상자료 1을 이용하여 추정한 모형의 RMSE가 19.677 kg 10a⁻¹이고 MODIS NDVI와 기상자료 2를 이용한 경우 RMSE가 14.625 kg 10a⁻¹로 더 낮게 나타났고 전반적으로 1:1선에 더 근접한 것으로 나타났다.

이와 같은 결과를 종합하여 볼때, 위성자료를 이용하여 연도별 생육 상태와 수량에 대한 지역별 및 연차간 변화 분석도 가능할 것으로 판단된다. 또한, 고해상도 위성자료를 이용한 남북한 사례지역에 대한 연구 결과(data now shown), 벼 생육기간 중 동일 시기인 경우 우리나라 연구지역의 NDVI가 북한 연구지역보다 항상 높게 나타나 우리나라의 벼 생육량이 더 높은 것으로 판단되나 그 차이 및 수량에 미치는 영향에 대한 정량화

연구가 향후 요구된다.

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ 008546012012)의 지원에 의해 이루어진 것임.

참고문헌

- 김이현, 홍석영, 김명숙, 곽한강, 임상규, 2007. 농촌진흥청 국립농업과학원 농업환경부 시험연구보고서. 광학센서를 이용한 단백질함량 추정법 개발. pp.376-393.
- 미국 농무성 외국농업청(USDA FAS), <http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/>.
- 안중배, 허지나, 심교문, 2010. 수치예보 모형을 이용한 역학적 규모축소 기법을 통한 농업기후지수 모사, 한국농림기상학회지, 12(1): 1-10.
- 홍석영, 최은영, 김진엽, 강신규, 김이현, 장용선, 2009. MODIS NDVI를 이용한 북한의 벼 수량 추정 연구, 2009 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, pp. 116-120.
- Ahn, J.B., C.K. Park, and E.S. Im, 2002. Reproduction of regional scale surface air temperature by estimating systematic bias of mesoscale numerical model, *Journal of Korean Meteorological Society*, 38(1): 69-80.
- Becker-Reshef, I., E. Vermote, M. Lineman, and C. Justice, 2010. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 114: 1312-1323.
- Chang, J., M.C. Hansen, K. Pittman, M. Carroll, and C. DiMiceli, 2007. Corn and soybean mapping in the United States using MODIS time-series data sets, *Agronomy Journal*, 99: 1654-1664.
- Cock, J.H. and S. Yoshida, 1972. Accumulation of

- ¹⁴C-labelled carbohydrate before flowering and its subsequent redistribution and respiration in the rice plant, *Proceedings of the Crop Science Society of Japan*, 41: 226-234.
- Cressman, G.P., 1959: An operational objective analysis system. *Mon. Wea. Rev.*, 87, 367-374.
- Doraiswamy, P.C, T.R. Sinclair, S. Hollinger, B. Akhmedov, A. Stern. and J. Prueger, 2005. Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment, *Remote Sensing of Environment*, 97: 192-202.
- FAO 작황 조기예보시스템 (GIEW), <http://www.fao.org/gIEWS/english/index.htm>
- Hong, S.Y., J.T. Lee, S.K. Rim, and J.S. Shin, 1997. Radiometric estimates of grain yields related to crop aboveground net production (ANP) in paddy rice. *Proc. of 1997 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Singapore, Aug. 3-8, pp. 1793-1795.
- Jordan, C.F., 1969. Derivation of leaf area index from quality of light on the forest floor, *Ecology*, 50: 663-666.
- Myneni, R.B., G. Asrar, and F.G. Hall, 1992. A three dimensional radiative transfer models-algorithms-experiments. *Remote Sensing of Environment*, 51: 3-26.
- Narongrit, C. and K. Chankao, 2009. Development and validation of rice evapotranspiration model based on Terra/MODIS remotely sensed data, *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7: 684-689.
- Rasmussen M.S., 1997. Operational yield forecast using AVHRR NDVI data: reduction of environmental and inter-annual variability, *International Journal of Remote Sensing*, 18(5): 1059-1077.
- Rouse, J.W, R.H. Haas, J.A. Schell, and D.W. Deering, 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ETRA. In third ETRS Symposium, NASA SP-353. U.S. Govt. Printing Office, Washington D.C., 1: 309-317.
- Ren, J., Z. Chen, Q. Zhou, and H. Tang, 2008. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10: 403-413.
- Sun, J., 2000. Dynamic monitoring and yield estimation of crops by mainly using the remote sensing technique in China, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(5): 645-650.