

식생지수를 이용한 낙동강유역의 순일차생산량 산정

Estimation of Net Primary Production for Nakdong River Basin using Vegetation Index

신 사 철[†] · 권 기 량¹⁾

Shachul Shin · Giryang Kwon

Received: June 30th, 2014; Revised: July 9th, 2014; Accepted: August 12th, 2014

ABSTRACT : This study is to evaluate Net Primary Production (NPP) using NDVI calculated by MODIS in the Nakdong river basin. This study is based on the method of using the fact that NPP is proportional to natural vegetation condition. This method is different from existing one, using remote sensed data. It is known that NPP of natural vegetation is proportional to the absorbed amount of visible light that is proportional to NDVI. Therefore, estimating NPP by using NDVI is one of the most highly useful methods. This method can be used in a wide range of areas where vegetation data can not be obtained easily or where there is not enough meteorological data. This study proposes the estimating method for NPP that is based upon NDVI, which is obtained by MODIS, and verifies by comparing the NPP with empirical results.

Keywords : Nakdong river, MODIS, NPP, NDVI

요 지 : 본 연구는 낙동강유역에 대하여 MODIS 자료로부터 정규화식생지수 NDVI를 계산하여 순일차생산량 NPP를 산정하는 것이다. NPP를 산정함에 있어 기존의 방법을 벗어나 객관적 자료에 의한 자연식생 조건과 NPP 사이에는 선형의 관계가 성립한다는 성질을 이용하고 있다. 자연식생의 NPP는 식물이 흡수하는 가시광선의 양에 비례하며, 또한 이것은 NDVI와 비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 NDVI를 이용한 NPP 산정방법은 대단히 유효하게 이용될 수 있는 하나의 방법이다. 본 연구에서 제안한 방법은 직접 자료획득이 불가능한 넓은 지역 및 기상자료가 충분하지 않은 지역에서 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구에서는 MODIS 센서에 의해 얻어진 NDVI에 근거한 NPP 추정 방안을 제안하고 경험적인 방법에 의해 계산된 값과 비교함으로써 본 연구 성과에 대한 검증 실시하였다.

주요어 : 낙동강, MODIS, 순일차생산량, 정규화식생지수

1. 서 론

인간활동의 다양화 및 광역화와 함께 이들이 지구환경에 미치는 영향은 대단히 크며 이러한 영향이 지구환경에 미치는 현황을 정확히 파악할 필요가 있다. 또한 현황의 파악뿐만 아니라 지구환경에 있어서 자연계의 여러 기구를 규명할 필요가 있으며 이를 통하여 다양한 환경문제의 대책을 강구할 수 있게 된다. 지구에서의 식물환경을 감시함으로써 간접적으로 지구환경을 평가하는 것이 가능하다. 왜냐하면 식생조건이 이 토지의 기후조건, 지리적조건 및 생물학적 조건 등의 여러 조건을 반영하고 있기 때문이다.

식물은 지구상 어느 장소에도 분포하고 있으며 그들을 인간의 손으로 감시하는 것은 대단히 어려운 일이다. 그러나 인공위성은 정기적으로 넓은 지역을 관측하는 것이 가능

하므로 대단히 유효하다. 인공위성 자료를 이용한 지상 관측 정보는 대단히 알기 쉬우며 가시화된 정보를 제공한다. 이러한 인공위성 자료로부터 식생 등의 현존량 및 분포는 파악될 수 있으나 그 토지가 갖는 잠재적인 생산성 및 이용 가능성 등에 대한 정보는 직접 제공하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 정규화식생지수(NDVI; Normalized Difference Vegetation Index)를 이용하여 환경요소를 평가하는 방법을 제안하고자 한다.

대기 중의 이산화탄소가 급증하고 있는 현재 상태에서 그 흡수원으로서 식물의 역할이 크게 대두되고 있다. 식물 생체량(biomass)은 식물의 광합성활동을 통하여 태양에너지가 식물유기물로 변환되어 저장되어진 것이다. 따라서 생체량을 에너지로써 이용한다는 관점에서 동물과 미생물은 양적으로 문제가 되지 않으며, 또한 생물유기물의 변형, 변

† Department of Civil Engineering, Andong National University (Corresponding Author : scshin@andong.ac.kr)

1) Department of Civil Engineering, Andong National University

질물인 화석자원도 포함되지 않는다. 식물생체량은 재생 가능한 자원이며 식물의 광합성 활동에 의하여 매년 생산되어 각종 생태계, 특히 삼림의 식물유기물로서 축적되고 있으며, 육지에서는 삼림, 초원, 경작지가 생체량의 주요 공급원이다. 그러나 식물 생체량은 석유와 석탄자원과는 달리 지구상에서의 분포밀도는 대단히 낮은 편이다. 이와 같이 식물생체량을 에너지원으로 이용하기 위해서는 우선 이들의 이용 가능량을 평가하지 않으면 안 된다. 생태계의 유지, 발전을 고려할 때 대체에너지원으로써 이용 가능한 식물생체량을 평가하기 위해서는 자연식생의 순일차생산량(NPP; Net Primary Production)의 평가가 대단히 중요하다.

Box et al.(1989)은 년 NDVI와 현지 측정 자료인 순일차생산량과의 관계를 지수함수로 표시하여 NDVI로부터 순일차생산량을 추정하였다. Shin & Beak(2008)은 NOAA/AVHRR로부터 얻어진 NDVI를 이용하여 금강유역의 순일차생산량을 추정하기도 하였다. 또한 Choi et al.(2011)은 우리나라 지역의 순일차생산량과 연 강수량과의 상관성에 관한 연구를 실시하였다. Jung et al.(2011)은 실측자료와 비교하여 MODIS GPP의 신뢰성과 활용성을 평가하였다. 본 연구에서는 우리나라의 낙동강유역을 대상으로 MODIS에 의해 얻어진 NDVI에 근거한 NPP 추정을 위한 간편 법을 제안하고 경험적인 방법에 의해 계산된 값과 비교하여 검증을 실시하였다.

2. 연구방법

2.1 MODIS

MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer)는 미국 항공우주국(NASA)에서 발사한 Terra 위성(1999년 10월 발사)과 Aqua 위성(2002년 5월 발사)에 탑재된 지구

Table 1. MODIS technical specifications

Orbit	705 km, 10:30 a.m. descending node (Terra) 1:30 p.m. ascending node (Aqua) sun-synchronous, near-polar, circular
Scan Rate	20.3 rpm, cross track
Swath Dimension	2,330 km (cross track) by 10 km (along track at nadir)
Telescope	17.78 cm diam. off-axis, afocal (collimated), with intermediate field stop
Quantization	12 bits
Spatial Resolution	250 m (bands 1-2) 500 m (bands 3-7) 1,000 m (bands 8-36)
Design Life	6 years

관측 센서이다. MODIS 센서는 Terra와 Aqua 위성이 동일하게 가지고 있는 센서로 해양, 육상, 대기에 사용될 수 있는 다목적 센서이다. 이 센서는 0.405 μm ~14.385 μm 까지 가시광선, 근적외선, 중적외선, 열적외선 이라는 파장영역을 가지고 있으며, 36개의 밴드를 가지고 있다. 공간해상력은 0.25 km, 0.5 km, 1 km의 3가지 해상력을 가지고 있다. 이 센서는 1일~2일 만에 지구 전체에 대한 영상을 제공할 수 있다. MODIS 센서에 대한 일반적인 특징은 Table 1과 같다. NASA에서는 MODIS의 총 39개의 영상 산출물을 제공하고 있다. MODIS 영상 자료의 공급은 EOS 게이트웨이(<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome/>)에서 제공하고 있으며, 무료로 Product를 획득할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 MODIS 자료를 이용하여 분석을 실시하였다.

2.2 식생지수

식생지수는 식생의 분포와 상태를 나타내는 지수이다. 이러한 식물들에 대한 정확한 정보들은 인간생활에 대하여 밀접한 연관이 있다. 현장조사방법으로 식생지수의 정보를 수집하는 방법은 비용이 많이 들고 시간이 많이 걸리므로 정확한 식생지수를 산정한다는 것은 거의 불가능하다. 그렇기 때문에 원격탐사를 이용한 식생도의 작성은 상당히 효율적이며 경제적이다. 이러한 식생지수는 일반적으로 식물의 생체량, 생산량, 엽면적지수 및 광합성량 등과 밀접한 관계를 가진 지수로 알려져 있다.

녹색 식물의 반사특성은 다른 물질들과는 달리 가시광선 영역과 근적외선 영역 사이에서 큰 차이를 보이는 반면에 식물이 아닌 토양 등은 뚜렷한 차이를 보이지 않는다. 또한 근적외선 파장영역에서의 식물의 반사특성은 식물의 종류, 엽량, 수관밀도 등에 따라 크게 좌우되기 때문에 식물의 이러한 특성도 식생지수에 잘 나타날 수 있다. 식물의 반사특성을 구체적으로 살펴보면 엽록소, 카로티노이드 및 크산토펜을 포함하는 광합성색소의 작용이 활발한 건강한 식물은 일반적으로 가시광선영역에서는 입사된 태양에너지의 80~90%를 흡수하므로 이 영역에서의 반사율은 아주 낮게 나타나는 반면, 노화된 식생은 가시광선 파장에서 건강한 식생보다 높은 반사도를 나타내게 된다. 건강한 식물은 근적외선 영역(0.7~1.1 μm)에서 입사광선의 40~50%를 반사하는 반면 가시영역(0.4~0.7 μm)에서는 식물의 엽록소에서 입사광선의 80~90%를 흡수한다. 고사했거나 노화하고 있는 식물의 경우 가시영역(0.4~0.7 μm)에서 건강한 식물보다 많은 양을 반사하고 근적외선 영역에서는 더 적은 양의 빛을 반사한다. 대부분의 식생지수는 이러한 차이에 기반하고 있다.

지표면으로부터 반사되는 태양광선의 강도를 관측하는 장비를 광학 센서라 부른다. 1959년 미국에서 Explore 6호가 발사되면서 인공위성에 탑재된 기기를 이용하여 지구를 관측한 자료가 지상으로 송신되기 시작하였다. 1970년에는 기상위성 NOAA가 발사되면서 전 지구를 항시 관측하는 것이 가능해졌다. 1960년대 이래 이러한 원격탐사 자료를 이용하여 식생지수를 개발하고 지상의 식물의 특성을 밝혀내고자 하는 노력이 이루어져 왔다. 현재까지 약 20여 종류의 식생지수가 제안되고 있으나 대부분의 식생지수는 기능적인 면에서 유사하며 몇몇 식생지수는 나름대로 독특한 정보를 제공하기도 한다. 최초의 식생지수는 식물의 반사특성을 이용한 적색과 근적외선 영역에서의 반사 값을 나눈 단순 식생지수로 알려져 있다.

$$SR = \frac{NIR}{Red} \quad (1)$$

여기서 NIR은 근적외밴드의 분광반사도이며, Red는 적밴드의 분광반사도이다.

그 후 현재 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)로 알려진 정규화 식생지수가 개발되었으며 식생분석을 위하여 널리 이용되고 있다(Justice et al., 1985; Townshend & Justice, 1986; Benedetti et al., 1994).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (2)$$

NDVI는 현재 식생분석을 위해 가장 보편적으로 사용되고 있으며, 최초로 Landsat MSS 영상자료에 적용되었다. 이러한 NDVI가 식생조사에 널리 사용되고 있는 이유는 식물 고유의 분광반사 특성 때문이다. 이와 같은 적밴드에서의 강한 흡수와 근적외밴드에서의 강한 반사를 갖는 특수성에 의해 가시, 근적외 영역이 식생조사에 이용되고 있다. 따라서 식생 영역에 있어서는 NDVI가 높게 되며, 구름, 물, 눈에 대해서는 근적외 영역에 비해서 가시영역의 파장이 강하게 반사되어 NDVI는 음(-)의 값을 갖게 된다. 암반 및 나지면에 대해서는 두 파장의 반사율이 거의 같아지게 되어 그 결과 0에 가까운 값을 갖게 된다.

또한 어느 기간 동안 NDVI의 총량을 정량적으로 표시하기 위해 NDVI를 합산한 iNDVI(integrated NDVI)가 이용되기도 한다. Rasmussen(1992)은 iNDVI와 농작물 수확량과의 비례관계를 보고하였으며, 순일차생산량(Net Primary Production, NPP)의 평가도 발표되었다(Lo Seen Chong et al., 1993). 본 연구에서는 MODIS 자료로부터 산정된 NDVI

를 이용하여 NPP를 산정하는 방법을 제안하고자 한다.

2.3 순일차생산량(NPP)과 경험적 평가

2.3.1 순일차생산량

일차생산성(primary productivity) 혹은 일차생산량(primary production)은 일정 기간 동안 일정 면적에서 독립 영양 생물들에 의해서 고정되는 유기물의 양을 지칭하는데 사용되는 용어이다. 일차생산은 녹색식물의 광합성에 의해 이루어진다. 단위 토지면적에 있어서 단위시간 내의 녹색식물에 의한 유기물 생산량을 총일차생산량(Gross Primary Production, GPP)이라 한다. 일반적으로 하루 또는 일 년에 얼마만큼 생산되었는가 보여주는 생산율로서 표현된다.

또한 식물은 호흡에 의해 자기 자신이 생산한 유기물을 소비한다. 순일차생산량(Net Primary Production, NPP)은 그 자신의 호흡에 쓰이는 양을 빼고 식물에 저장되는 양이다. 그러므로 순일차생산량의 부분은 잠재적으로 종속영양 생물들에게 이용될 수 있다. 마지막으로 소비자 수준에서 일어나는 에너지 저장은 이차생산량(secondary production)이라 일컫는다. 순일차생산량(NPP)은 총일차생산량(GPP)으로부터 호흡에 의한 소비량(R)을 뺀 나머지를 계산할 수 있다. 이것은 보통 1년 단위로 취급되어 건조중량/ $km^2/year$ (이하 $DW/km^2/year$ 로 표시)로 표시된다. 이상의 관계는 Eq. (3)에 의해 표시된다.

$$NPP = GPP - R \quad (3)$$

동물 혹은 인간이 먹거나 이용 가능한 것이 순일차생산량이다. NPP는 삼림에서 가장 크며 다음으로 농경지, 초원, 나지 순으로, 주어진 지역의 NPP는 그 토지의 기후 및 토양 등 자연조건을 잘 반영하고 있다.

2.3.2 순일차생산량의 경험적 평가 방법

단위토지면적에서 1년간의 식물유기물생산량인 NPP의 합계인 TNP(Total Net Production)는 NPP에 그 토지면적을 곱하여 계산할 수 있다. 식물 생체량을 이용하는 실제적 측면에서 이 TNP의 전부가 이용 가능한 것은 아니지만, 이용 가능량의 평가를 위해 TNP를 구하는 것은 필수 불가결하다.

TNP의 평가에 기초가 되는 NPP의 계산을 위해 Uchijima & Seino(1985)에 의한 방법을 이용하였다. 이 방법은 식물의 광합성과 증산에 의한 탄산가스와 수증기 흐름의 이론적 고찰을 근거로 지하부를 포함한 자연식생(주로 삼림)의 NPP를 기상자료로부터 평가하기 위하여 유도되어진 경험식이다.

$$NPP = 0.29 [\exp\{-0.216(RDI)^2\}] Rn \quad (4)$$

여기서 RDI(Radiative Dryness Index)는 방사건조도로써 순방사량 Rn과 연 강수량 r(mm) 및 증발잠열 l (J/g)을 이용하여 Eq. (5)로 표시된다.

$$RDI = 10^4 Rn / (lr) \quad (5)$$

식물의 생육은 태양에너지와 강수량 및 그 둘의 상대적 비율로서 정의되는 방사건조도(RDI)에 의해 결정된다. 방사건조도가 1.0 이상이면 삼림이 형성되지 못하며 초원을 이루게 된다. 또한 2.0 이상이 되면 반사막, 3.0 이상이면 사막이 된다. 방사건조도가 1.0 이하인 지역에서는 식물의 생육에 필요한 수분이 충분히 존재하여 열량에 의해 식생의 종류가 결정된다. 방사건조도가 현저히 작고 순방사량이 적은 곳에서는 툰드라 지대가 형성된다. 순방사량 Rn은 Eq. (6)을 이용하였다.

$$R_n = (1 - \rho) S_t - \sigma T_a^4 [286.18 + 202.6 B_1 - (45.24 + 10.92 B_1) \sqrt{e_a}] \quad (6)$$

Table 2. Production efficiency by land cover used by Seino

Land cover	Production efficiency (E _j)
Forest	1.00
Orchard	0.80
Cropland	0.81
Grassland	0.625

여기서 ρ는 지표면 albedo이며, B₁은 일사율(= S_t/S₀), S_t는 월평균 일사량(J/cm²), S₀는 월평균 대기 외 일사량(J/cm²), e_a는 월평균 수증기압(hPa), σ는 Stefan-Boltzmann의 상수, T_a는 월평균기온(K)이다.

Uchijima & Seino(1985)는 NPP의 평균치로부터 그 지역의 TNP를 Eq. (7)에 의해 구하였다.

$$TNP_i = \sum_{j=1}^4 (A_{ij} \times \overline{NPP}_i \times E_j) \quad (7)$$

여기서 \overline{NPP}_i 는 i번째 대상지역의 평균 NPP이며, A_{ij}는 i번째 대상지역의 j번째 피복면적, E_j는 j번째 피복상황의 생산효율이다. 또한 생산능력이 있는 피복상황으로서 삼림, 과수원, 경작지, 초지를 선정하고 있으며 이들의 생산효율 E_j의 값을 Table 2와 같이 정하고 있다.

3. 적용 및 결과

3.1 대상유역

본 연구에서는 낙동강유역을 대상으로 순일차생산량을 산정한다. 낙동강유역에 대하여 순일차생산량을 산정하기 위해서는 강우량을 비롯한 평균기온 등의 기상자료가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기상청의 자료 중에서 낙동강유역에 위치하고 있는 기상관측소 15개소의 자료를 수집하여 NPP의 계산에 활용하였다. NPP의 계산을 위해 필요한

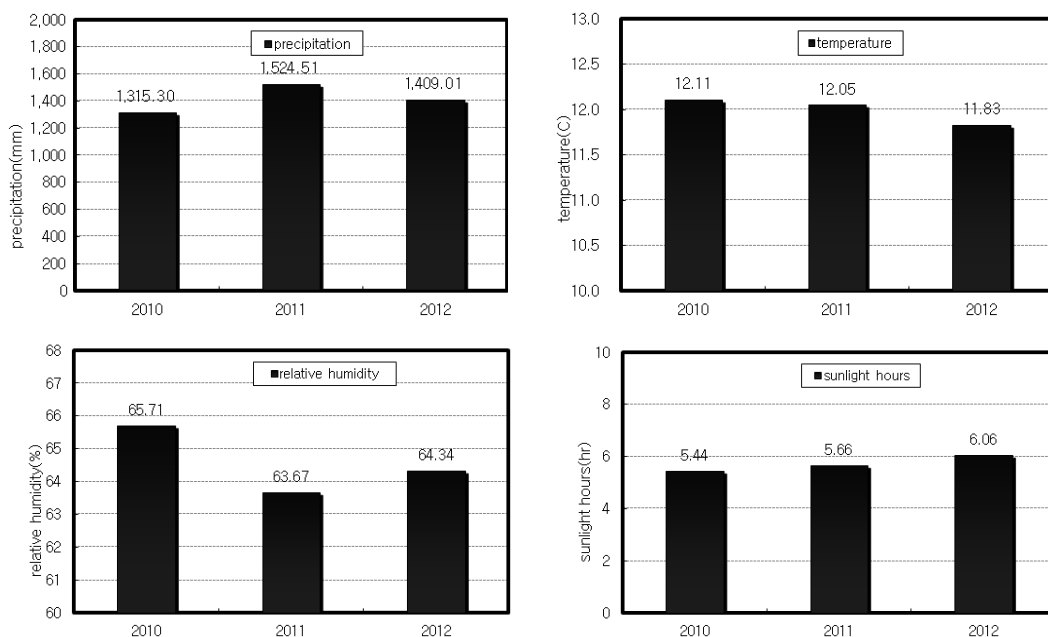


Fig. 1. Meteorological conditions for Nakdong river basin

낙동강유역의 강우량, 평균기온, 상대습도 및 일조시간에 대한 기상특성을 Fig. 1에 표시하였다.

3.2 NDVI 산정 및 식생분류

본 연구에서 대상으로 하는 기간은 2010년~2012년이며 사용한 위성자료는 이미 기술한 MODIS 자료이다. MODIS의 가시역과 근적외역의 자료는 대상지역이 구름으로 덮여 있는 경우 위성의 센서가 읽는 반사치는 바로 그 구름의 반사치가 되어 구름 아랫부분의 지표면의 반사치는 반영되지 못한다. 이와 같은 구름의 존재는 NDVI를 낮아지게 하여 정확한 관측을 저해한다. 본 연구의 경우처럼 넓은 지역을 대상으로 하는 경우 구름의 영향이 전혀 없는 날의 위성자료를 얻는다는 것은 불가능하다. 그러나 지표면의 물리적 특성을 파악하고자 하는 분석에서는 구름의 영향을 제거한

NDVI를 작성할 필요가 있다. 만약 동일지점의 NDVI가 단기간에 급격하게 저하하는 경우 그 자료는 구름의 영향을 받은 것이라 생각할 수 있다. 반대로 일정기간 동안의 NDVI가 가장 크게 나타난 자료가 가장 구름의 영향을 받지 않은 것이라 생각할 수 있다. 따라서 복수의 NDVI로부터 각 화소별로 최대치를 선택함으로써 구름의 영향을 최소화한 NDVI 자료를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 1개월이라는 시간 간격을 취하여 1개월간의 최대치를 선택하여 월 대표 NDVI를 작성하였다. Fig. 2는 최종적으로 얻어진 3개년(2010~2012)의 NDVI 중에서 지면관계 상 2010년도의 NDVI만을 표시한 것이다.

또한 NDVI를 이용하여 연간 iNDVI를 산정하였으며, 이를 이용하여 식생등급을 분류하였다. 식생등급을 결정하기 위해 개략적인 토지피복분류를 실시한다. 토지피복분류(land

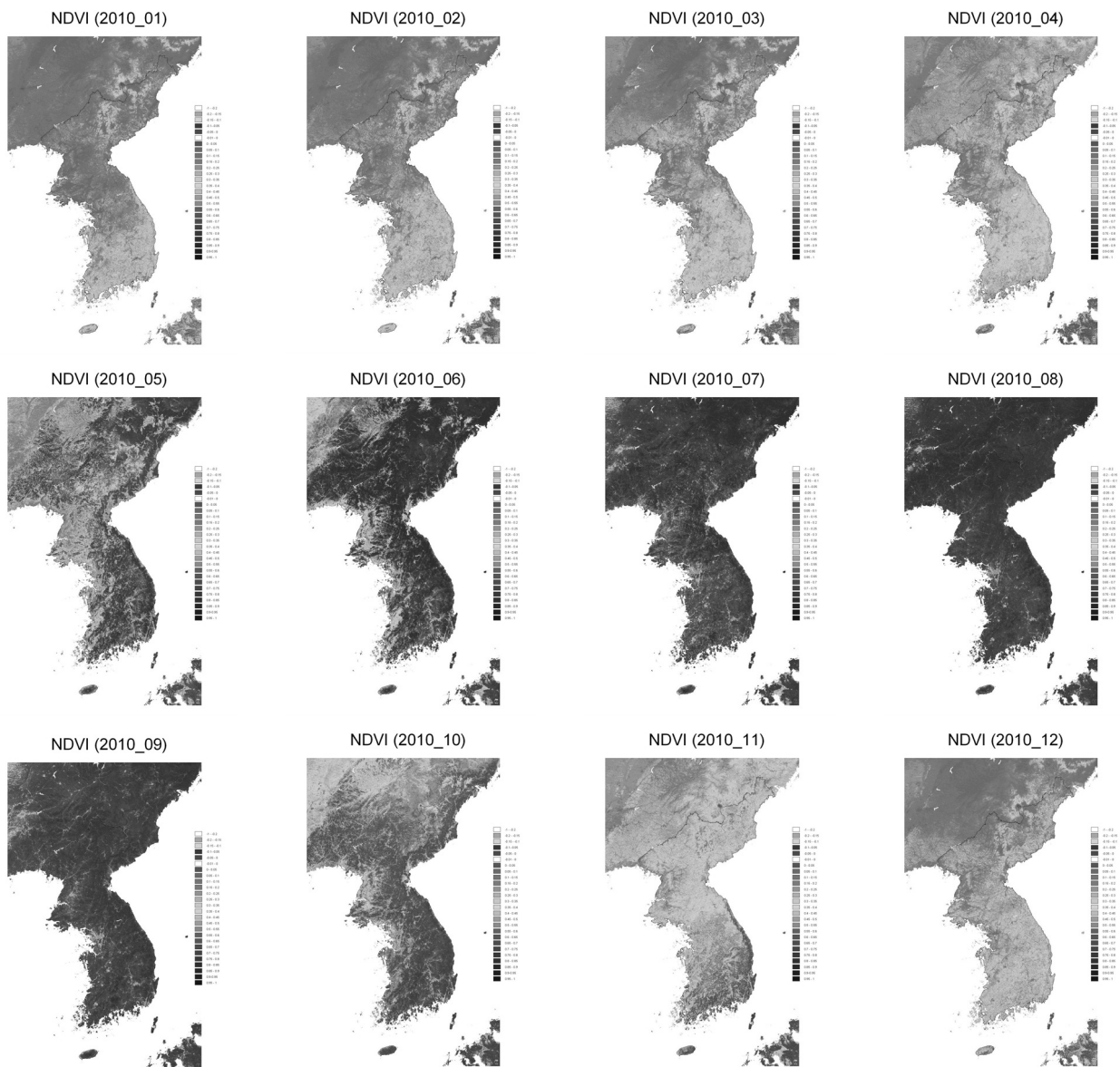


Fig. 2. Monthly NDVI (2010)

cover classification)는 원격탐사 자료의 가장 대표적이고 전형적인 응용방법의 하나로 숲, 초지, 콘크리트 포장과 같은 대지 표면의 물리적 상황을 분류한 것이다. 이것은 원격탐사에서 가장 중요한 분석기법으로 영상을 구성하는 각각의 화소 중 비슷한 분광특성을 갖는 것끼리 집단화시켜주는 방법을 말하는데, 이에 대한 분류방법으로는 일반적으로 영상분석자의 개입 정도에 따라 감독분류(supervised classification)와 무감독분류(unsupervised classification)로 나누어지고 있다.

본 연구에서의 식생분류의 목적은 정확한 토지피복상황을 분류하는 것이 아니며 식생정보를 이용하여 그 식생의 성질이 유사한 지역으로 그룹화하는 것이다. 본 연구에서 실시하는 식생등급 분류는 우리나라 전역에 대하여 피복을 간략화하기 위해 몇 개의 등급으로 그룹화하는 것으로 엄밀한 의미의 토지피복분류와는 일치하지 않는다. 분류하는 방법은 일반적인 토지피복분류를 하는 방법과 동일하며, 광범위한 지역을 해상도가 낮은 위성자료를 이용한다는 점에서 정확한 지표면의 정보를 입력 자료로 활용하는 감독분류는 적용상의 문제점이 많으므로 최소의 초기입력 자료만이 요구되는 무감독분류를 실시하였다.

무감독분류를 위해 월 NDVI를 이용할 경우 월별 식생상태는 파악할 수 있으나 장기간에 걸친 평균적인 식생의 상태는 파악할 수 없게 된다. 따라서 연구대상 기간인 3년에 걸친 iNDVI를 작성하여 3년간의 적분치를 표현하도록 하였다. 이러한 iNDVI로부터 5단계 등급으로 식생을 분류하였다. 1등급은 수역에 해당되나 MODIS 자료의 해상도가 250 m로 비교적 화소가 크기 때문에 육지면에 대해서 수역에 해당되는 화소는 그다지 존재하지 않는다. 2등급은 식생이 그다지 존재하지 않는 지역으로 대부분 도시지역에 해당됨을 알 수 있다. 3등급은 대부분 논을 비롯한 농경지에 해당

됨을 알 수 있으며, 4등급과 5등급은 산림지역으로 그중 식생 밀도 및 활성도가 높은 지역을 5등급으로 분류하였다.

이들은 이 방법에 의한 NPP 추정치를 다른 방법에 의한 추정치와 비교한 결과 충분히 신뢰할 수 있는 자료로써 평가하고 있다. 따라서 본 연구에서는 이 방법에 의한 결과를 바탕으로 인공위성자료를 이용한 NPP 추정모형에 대하여 고찰하고자 한다.

3.3 경험적 방법에 의한 순일차생산량 산정

이미 기술한 Uchijima & Seino(1985)에 의한 방법을 이용하여 낙동강유역에 대하여 2010년, 2011년 및 2012년에 대한 3개년에 걸친 순일차생산량을 산정하였다. 여기서 산정된 결과는 iNDVI와 NPP의 관계산정에 필요한 계산값으로 이용된다. 순일차생산량을 구하기 위해서 우선 토지이용상태의 파악이 필요하다. 이미 기술한 바와 MODIS 자료를 이용하여 낙동강유역에 대한 개략적인 피복상황을 분류하였으며 그 결과를 이용하여 각 피복별 생산효율을 결정한다. Uchijima & Seino(1985)에 의해 고려된 생산능력이 있는 토지피복 상황은 산림, 과수원, 경작지 및 초지이다. 그러나 본 연구에서 MODIS로부터 분류된 항목은 약간 차이가 있으므로 본 연구의 분류항목(1~4등급)으로 통일하여 적용하기로 한다. Table 2에서 제시한 Seino에 의한 생산효율에서 피복상태의 기준이 서로 다르므로 약간의 조정이 필요하다. Seino가 과수원으로 분류한 항목은 본 연구의 분류에서는 정확히 분류될 수 없으므로 2등급에 상당한다고 가정하고 생산효율은 0.95로 약간 상향 조정하였다. 본 연구에서 사용한 피복별 생산효율은 Table 3과 같다.

이러한 기상자료, 토지피복 자료 및 식생별 생산효율을 적용하여 낙동강유역에 대하여 NPP와 TNP를 산정하였으며 그 계산 결과를 Table 4에 표시하였다. 최근 3개년간 강우량이 가장 많은 해인 2011년에 방사건조도(RDI)가 가장 낮게 나타났으며, 일조시간이 가장 많은 2012년에 가장 건조한 것으로 나타났으나 2010년과는 거의 유사한 경향을 보이고 있다. 일조시간이 가장 길었던 2012년에 순방사량도 가장 크게 되며 그 결과 NPP는 가장 큰 값을 보이고 있다.

Table 3. Production efficiency by land cover used by this study

Land cover	Production efficiency (E _i)
Class 1	1.00
Class 2	0.95
Class 3	0.81
Class 4	0.625

Table 4. Estimated NPP and TNP for Nakdong river basin

Year	RDI	NPP (tDW/km ² /year)	TNP (ktDW/km ² /year)				
			Class 1	Class 2	Class 3	Class 4	Total
2010	0.596	1,243.073	2,861.068	19,889.63	3,874.669	285.3318	26,910.7
2011	0.529	1,298.693	2,989.085	20,779.58	4,048.039	298.0988	28,114.8
2012	0.609	1,356.773	3,122.763	21,708.88	4,229.075	311.4303	29,372.15
Average	0.578	1,299.513	2,990.972	20,792.7	4,050.595	298.287	28,132.55

3.4 iNDVI에 의한 순일차생산량 추정

NPP는 식물이 흡수하는 가시광선의 양에 비례한다고 알려져 있다. 또한 이것은 NDVI와 비례관계가 성립한다. NDVI는 임의 지점에서 그 토지의 식물 생산량과 비례관계가 있으며 이를 이용하여 원격탐사자료를 이용하여 구해지는 NDVI가 NPP를 산정하는데 유용하게 이용되는 이유이다. 따라서 낙동강유역의 각 항목별 TNP, 각 화소별 각 항목의 면적 및 그 항목의 iNDVI가 주어지면 그들 간에는 Eq. (8)이 성립한다고 생각할 수 있다.

$$TNP_j = \epsilon_j \times \sum A_j \times iNDVI \quad (8)$$

여기서 TNP_j 는 j번째 항목의 TNP이며, ϵ_j 는 j번째 항목의 보정값, A_j 는 j번째 항목의 화소면적이다. 즉 경험적 방법에 의해 산정한 실제의 NPP와 ($\sum A_j \times iNDVI$)의 차이를 ϵ_j 로 보정하는 것이다. 이 식을 각 항목별로 계산하여 최소제곱원리에 의해 보정값 ϵ_j 를 구한다.

NPP는 항목(j)별로 고유의 값을 가지며 iNDVI는 그 NPP와 상관성을 갖게 된다. 따라서 iNDVI를 단위면적당의 양으로 하면 iNDVI에 면적 A_j 와 보정값을 곱함으로써 NPP의 평가가 가능하게 된다. 여기서 우선 각 항목별로 iNDVI와 면적을 곱한다. 즉 iNDVI를 어느 화소의 대푯값으로 하고 단위면적당의 값으로 취하게 된다. 그러나 iNDVI는 표면의 정보만을 표현하기 때문에 산림의 종류는 평가할 수 없다. 따라서 iNDVI가 동일하다하더라도 피복상황에 의해 NPP

Table 5. Correction factors estimated by iNDVI

	Class 1	Class 2	Class 3	Class 4
2010	3.00	3.34	3.31	5.26
2011	3.13	3.49	3.46	5.49
2012	3.27	3.64	3.61	5.74
Average	3.13	3.49	3.46	5.50

Table 6. Comparison of TNP by this study and Seino

		2010		2011		2012	
		TNP	Error (%)	TNP	Error (%)	TNP	Error (%)
Class 1	From Seino	2,861.07	4.98	2,989.09	-5.16	3,122.76	0.17
	From iNDVI	2,725.26		3,151.56		3,117.40	
Class 2	From Seino	19,889.63	-0.04	20,779.58	-6.67	21,708.88	6.72
	From iNDVI	19,898.54		22,265.00		20,342.60	
Class 3	From Seino	3,874.67	-5.88	4,048.04	-8.33	4,229.07	14.22
	From iNDVI	4,116.90		4,416.09		3,702.64	
Class 4	From Seino	285.33	-17.71	298.10	-24.41	311.43	42.13
	From iNDVI	346.75		394.38		219.12	

가 달라지게 된다. 그러므로 단지 iNDVI와 면적을 곱하고 같은 계수를 곱하는 것만으로는 NPP가 평가가 적절하지 않음을 말해준다. 따라서 피복상황에 의한 NPP의 차이를 보정하기 위해 각 항목별로 서로 다른 계수를 곱해줄 필요가 있다.

각 항목별로 보정값 ϵ_j 를 구하였으며 이것을 Table 5에 나타내었다. 항목별로 보면 식생의 활성도가 높은 1등급과 2등급의 경우 보정값이 상당히 안정되어 있음을 알 수 있다. 또한 농경지에 대응하는 3등급의 경우에도 식생지역 못지 않은 안정성을 보여주고 있다. 4등급으로 분류된 도시지역의 경우 식생의 생산력이 빈약하여 보정값 ϵ_j 도 약간 증가하고 있다. 그러나 도시지역으로 분류된 면적은 극히 적으며 식생 생산력이 우수한 1등급과 2등급이 전체 낙동강유역의 81.9%를 점유하고 있어 대부분의 NPP가 iNDVI를 이용하여 산정 가능함을 알 수 있다.

또한 Seino에 의한 경험적 평가에 의한 결과와 본 연구를 통해 얻어진 NPP를 비교하여 나타낸 것이 Table 6과 Fig. 3이다. 식생으로 구성되어 있는 1, 2등급(class 1, 2)의 경우 약 $\pm 5\%$ 전후의 오차로 NPP를 산정할 수 있음을 알 수 있다. 농경지로 구분되는 3등급(class 3)은 약 $\pm 10\%$ 전후의 오차가 발생할 수 있음을 알 수 있다. 논과 밭의 특성상 도시 근방에 분산 분포하고 있으므로 하나의 화소에 농경지뿐

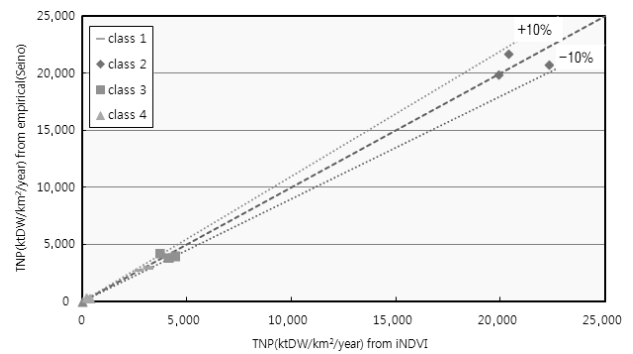


Fig. 3. Differences between the results of the two methods

만 아니라 다른 피복상태(나지 등)도 포함될 가능성이 높으므로 상대적으로 정확성은 약간 저하하는 것으로 생각할 수 있다. 또한 도시지역으로 구성되는 4등급(class 4)의 경우 식생의 비율이 크지 않기 때문에 정확성은 저하한다. 그러나 이 등급이 차지하는 면적은 미소하므로 낙동강유역 전체에 대한 NPP에는 크게 영향을 미치지 않는다.

4. 결 론

본 연구에서는 MODIS 자료를 이용하여 NDVI를 산정하고 이를 활용하는 NPP 산정 방안을 제시하였다. 2010년부터 2012년까지 3개년에 걸친 MODIS 자료를 취득하여 월 대표 NDVI와 평균치인 iNDVI를 산정하여 NPP를 산정하였다. NDVI를 이용하여 구한 NPP와 경험적 방법에 의한 NPP와 차이를 보정하기 위한 보정값을 산정한 결과 상당히 안정된 값을 보이고 있어 본 연구의 절차가 타당함을 보여주고 있다. 특히 식생의 활력이 높은 1, 2등급의 경우 높은 정확도를 보여주고 있다. 본 연구의 결과와 경험적 방법에 의한 결과를 비교해 보면 식생으로 구성되어 있는 1, 2등급의 경우 약 $\pm 5\%$ 전후의 오차가 발생하며, 농경지로 구분되는 3등급은 약 $\pm 10\%$ 전후의 오차로 NPP를 산정할 수 있음을 알 수 있다. 우리나라는 전 국토의 약 70%가 산지로 이루어져 있으므로 식물 생체량을 이용하는 것에 상대적으로 유리한 여건을 갖고 있다. 또한 위성자료에서 얻어지는 식생정보인 NDVI를 활용하여 이들의 식물 생체량을 구할 수 있는 가능성이 크다고 볼 수 있다.

본 연구에서 기준 값으로 이용된 Seino의 방법은 충분히 타당한 결과를 제공한다고 보고되고 있다. 그러나 좀 더 정확한 분석을 위해서는 추후 국내 식생조건에 적합한 방법으로 대체하는 것도 필요할 것이다. MODIS 자료는 한반도 전역의 지표면 정보를 제공하고 있으므로 본 연구의 성과는 기상 및 수문자료가 얻어지는 지역에서의 충분한 검증을 통하여 한반도 전체로 확장될 수 있을 것이다. 이러한 성과는 식물에 의한 탄소순환과 수문순환을 정량적으로 평가하기 위한 자료로 활용될 수 있으며 농업 및 기타 여러 분야에서 넓게 응용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2013학년도 안동대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며 지원에 감사드립니다.

References

1. Benedetti, R., Rossini, P. and Taddei, R. (1994), Vegetation classification in the Middle Mediterranean area by satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 15, No. 3, pp. 583~596.
2. Box, E. O., Holben, B. N. and Kalb, V. (1989), Accuracy of the AVHRR vegetation index as a predictor of biomass, primary productivity and net CO₂ flux, *Vegetation*, Vol. 80, No. 2, pp. 70~89.
3. Choi, D. G., Choi, H. I. and Kim, S. D. (2011), Preliminary analysis of the relationship between annual precipitation and vegetation using MODIS NPP remotely sensed data in Korea, *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 4, pp. 171~178 (in Korean).
4. Jung, C. G., Shin, H. J., Park, M. J., Joh, H. K. and Kim, S. J. (2011), Evaluation of MODIS gross primary production (GPP) by comparing with GPP from CO₂ flux data measured in a mixed forest area, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 53, No. 2, pp. 1~8 (in Korean)
5. Justice, C. O., Townshend, J. R. G., Holben, B. N. and Tucker, C. J. (1985), Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 6, No. 8, pp. 1271~1318.
6. Lo Seen Chong, D., Mougin, E. and Gastelluetchegorry, J. P. (1993), Relating the global vegetation index to net primary productivity and actual evapotranspiration over Africa, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 14, No. 8, pp. 1517~1546.
7. Rasmussen, M. S. (1992), Assessment of millet yields and production in northern burkin faso using integrated NDVI from the AVHRR, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 13, No. 18, pp. 3431~3442.
8. Shin, S. C. and Beak, S. C. (2008), Suggestion of estimating method for net primary production in the Geum river basin using NDVI, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 9, No. 6, pp. 43~51 (in Korean).
9. Townshend, J. R. G. and Justice, C. O. (1986), Analysis of the dynamic of african vegetation using the normalized difference vegetation index, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 7, No. 11, pp. 1435~1446.
10. Uchijima, Z. and Seino, H. (1985), Agroclimatic evaluating of net primary production of natural vegetation, (1) Chikugo model for evaluating net primary productivity, *Journal of Agricultural Meteorology*. Vol. 40, No. 4, pp. 390~398.