

## NOAA/AVHRR NDVI를 이용한 북한지역 봄가뭄 분석

## Analysis of Spring Drought Using NOAA/AVHRR NDVI for North Korea

장민원\* · 유승환\*\* · 최진용\*\*\*†

Jang, Min-Won · Yoo, Seung-Hwan · Choi, Jin-Yong

**Abstract**

Different vegetation indices from satellite images have been used for monitoring drought damages, and this study aimed to develop a drought index using NOAA/AVHRR NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) and to analyze the temporal and spatial distribution of spring drought severity in North Korea from 1998 to 2001. A new drought index, DevNDVI(Deviation of NDVI), was defined as the difference between a monthly NDVI and average monthly NDVI at the same cover area, and the DevNDVI images at all years except for 2001 demonstrated the drought-damaged areas referred from various domestic and foreign publications. The vegetation of 2001 showed high vitality despite the least amount of rainfall among the target years, and the reason was investigated that higher temperature above normal average would shift the growing stages of plants ahead. Therefore, complementary methods like plant growth models or ground survey data should be adopted in order to evaluate drought-induced plant stress using satellite-based NDVI and to make up for the distortion induced by other environments than lack of precipitation.

**Keywords :** 가뭄, 북한, NDVI, AVHRR

**I. 서론**

한반도의 경우 특히 봄가뭄이 빈번한데 이는 영농 활동의 시작에 큰 걸림돌이 되어 왔다. 북한의 지리 기후학적 특성상 작물의 냉해를 피하기 위해서는 논 농사의 경우 5월에 모내기가 대부분이 완료되어야 한다. 그런데 봄가뭄이 발생하면 영농 초기에 필요한 용수공급이 충분하지 않아 기한에 맞추어 모내기를

완료하기 어렵고 특히 취약한 어린 작물은 심각한 피해를 입을 우려가 높다. 북한의 경우 각종 매체와 국제기구의 보고에 따르면 1999년, 2000년, 2001년에 심각한 가뭄을 겪었다. 1999년과 2000년에는 전 지구적인 온난화 현상이 북한에 직접적으로 영향을 미쳤고, 2001년에도 4월 후반부터 강수량이 부족하여 가뭄을 겪었다는 기록을 찾을 수 있다. 그러나 우리와 바로 인접한 북한이지만 우리가 가질 수 있는 정보는 매우 제한적이다. 우리가 알 수 있는 북한 내 가뭄 피해 정보는 매우 제한적이고 그나마도 북한 내부에서 작성되었거나 외국의 정보에 의존하는 실정이다. 북한지역에서의 가뭄의 발생과 그 피해에 대한 정보는 주로 북한에서 방송, 발간되는 매체나 ADB,

\* 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원

\*\* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

\*\*\* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 조교수

† Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4583

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: iamchoi@snu.ac.kr

UNDP, UNEP, FAO, OAS 등의 국제기구의 보고서 등에 주로 의존하고 있다. 우리와 이해관계가 깊은 북한이기에 가뭄과 같은 재해에 대하여 독자적으로 신속한 정보를 취득, 분석할 수 있는 능력을 확보하는 것은 반드시 필요하다. 지역별 재해 발생과 피해 유형에 대한 이해가 바탕이 되어야만 향후 농업부문에 대한 대북한 지원과 통일 후를 대비한 농업정책의 수립이 가능할 것이기 때문이다. 북한의 기상자료를 통해서 직접 북한의 가뭄을 분석할 수도 있으나 가뭄에 의한 피해의 정도와 그 공간적 분포를 파악하기는 어렵다. 최근 널리 사용되고 있는 위성영상을 이용한 원격탐사 기술은 광범위한 지역에서의 식생 변화를 관측함으로써 가뭄의 공간적 특성을 파악하고 가뭄발생 이력을 추적하는데 유효하게 사용되어 왔다. 특히 접근이 용이하지 못한 북한 지역의 경우에 주기적인 관측이 가능하다는 점에서 위성영상의 활용 필요성이 크다고 할 수 있다.

위성영상을 이용한 식생의 평가는 식물 분광반사값의 간단한 연산에 의한 식생지수로서 나타내는데 50여개 이상의 식생지수들이 알려져 있다. Kogan(1997)은 식생 스트레스의 정도에 따른 식생상태지수 VCI(Vegetation Condition Index)를 만들어 농작물과 식생에 영향을 주는 가뭄을 효율적으로 파악하고 넓은 지역에 유리한 연구임을 보인 바 있다. Prasad 등(2006)은 인도지역에 대하여 매년의 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)를 평균 NDVI에 대한 백분율로 가뭄심도를 평가하였고, Anyamba와 Tucker(2005)는 1982년부터 2003년까지 AVHRR 영상을 이용하여 사하라 사막 남부 사헬(Sahel)지역에서 1982~1985년의 대가뭄 이후로 느리지만 점진적으로 가뭄상태가 완화된 것을 증명하였다. Tedesse 등(2005)은 미 중부 평원지역에 대하여 2주 간격으로 수집한 NDVI로부터 SG(seasonal greenness) 지수를 산정하고 이를 가뭄지수(VegDRI, Vegetation Drought Response Index)로 이용하였다. McVicar와 Bierwirth(2001)는 Papua New Guinea의 1997년 가뭄심도를 평가하는데 위성영상에 의한 지표면온도, NDVI와 누적강우량이 서로 높은 상관성을 갖는 것을 보여주었다. Ji와 Peters(2003)은 미국의 4개주에 대하

여 월평균 NDVI와 가뭄지수로 사용하는 SPI 사이에 밀접한 상관성이 있다고 하였다. Unganai와 Kogan(1998)은 NDVI로는 관측하기 어려웠던 식생변화도 모니터링 할 수 있기 위하여 아프리카 남부지역에서 NDVI를 이용한 VCI(Vegetation Condition Index)와 BI(Brightness Index)를 조합하여 TCI(Temperature Condition Index)를 제안하였다. Amoli 등(2004)은 이란의 지역별 가뭄 모니터링을 위하여 1997년부터 2001년까지 NOAA/AVHRR의 월별 NDVI와 가뭄과의 상관성을 증명한 바 있다. 국내의 최근 연구사례를 살펴보면, 신사철과 어민선(2004)은 NOAA/AVHRR로부터 얻어진 식생지수(NDVI)와 이로부터 얻을 수 있는 식생상태지수(VCI)를 이용하여 가뭄분석을 실시하였으며, 광역적인 가뭄분석을 위해 위성자료를 이용하여 기후학적 물수지에 근거하는 간편한 방법을 제안하였다. 박종화와 류정식(2005)은 벼의 성장단계별 분광반사 특성을 현장조사와 함께 NOAA/AVHRR NDVI의 월별자료를 이용하여 정리하였다. 월별 식생 분포의 변화를 구하기 위하여 식생이 가장 적은 달의 식생조건을 기준으로 대상 NDVI를 비교하고 그 차이를 계산하였다. 박은주 등(2002)은 Landsat ETM+ 영상에서 Tasseled cap 변환으로 얻은 습윤도(Wetness map)와 NDVI를 이용하여 가뭄우심지역을 판별하고 국지적 가뭄관리의 가능성을 보여주었다. 김천과 박승환(2003)은 산림 수분상태의 시계열 변화를 분석하는데 정규식생지수(NDVI)와 Tasseled Cap transformation의 수분지수(WI)를 이용하여 식생건조지수(Vegetation Dryness Index : VDI)를 제안하였다.

가장 널리 이용되고 있는 식생지수는 Rouse 등(1974)이 제안했던 정규식생지수 NDVI이며, 가시광선대와 근적외선대의 반사값으로부터 계산한다(박종화와 류정식, 2005). 가뭄이 발생하면 식물이 스트레스를 받게 되고 식생의 활력이 떨어지기 때문에 NDVI값이 낮게 산출되게 된다. 그러나 식생지수를 직접 가뭄평가의 객관적 기준으로 사용하기 어려운데, 똑같은 식생 일지라도 영상별 계절별로 다르고 동일한 영상에서도 지역에 따라 동일한 식생이 다르게 평가될 수 있기 때문이다. NDVI는 위성영상 각 파장대별 반사값의 수학적 조합으로 계산되는 것이므로 위성센서의 종류,

촬영시기, 태양방위각, 태양고도, 대기조건 등에 따라 영향을 받는다. 그러므로 가뭄 평가에 식생지수를 이용하기 위해서는 지역별 시기별 식생 수준을 객관화할 수 있는 기준이 필요하다. 특정 지역의 평균적인 식생지수를 기준으로 식생지수의 대소를 비교함으로써 기준 식생지수보다 낮을 경우엔 식생이 덜 발달한 것으로 간주하고 가뭄으로 평가한다. 이와 같이 지역별 시기별 식생 특징을 대표하는 기준 NDVI와 분석 시기의 NDVI를 비교하여 가뭄을 평가하는 것은 기존의 기후 및 가뭄 패턴을 반영하고 식생의 성장에 따른 가뭄의 영향을 평가할 수 있다는 점에서 합리적인 가뭄평가 방법이다. 이와 같은 접근법을 통하여 본 연구는 위성영상을 이용한 가뭄 모니터링 기법을 활용하여 북한 지역에서 발생한 봄가뭄의 강도와 공간적 분포를 분석하고자 하였고, 이를 위해 NOAA/AVHRR 위성영상으로 1998년부터 2001년까지 북한 전역의 NDVI를 분석함으로써 가뭄평가를 수행하고 식생지수를 활용한 가뭄평가 방법의 기준과 한계를 정리하였다.

## II. 가뭄평가방법

### 1. 기본개념

정규식생지수 NDVI는 식생과 바이오매스를 나타내는 지수로서 작물생산량을 추정하거나 지구기상학적 모델링의 주요한 입력항목으로 사용되고 있다. 특히 특정 기간 동안의 다년간의 평균 NDVI를 알고 있으면 동일 기간, 임의 년도의 NDVI와 비교하여 식생의 이상 변화를 관찰할 수 있다(Prasad 등, 2006). NDVI는 근적외선 밴드와 가시광선 밴드의 반사값의 조합으로 산정하는데 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)의 AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometer)센서를 이용하는 경우 NDVI는 다음 식 (1)과 같이 계산된다.

$$NDVI = \frac{Ch2 - Ch1}{Ch2 + Ch1} \quad (1)$$

식생이 발달한 지역은 근적외선 파장대(Ch2)에서

는 반사값이 높은 반면, 가시광선 파장대(Ch1)에서는 낮은 반사값을 보이고, 암석이나 식생이 없는 토양의 경우에는 두 개 채널의 반사값이 거의 비슷하기 때문에 0에 가까운 NDVI값이 계산된다. 이러한 장점 때문에 이를 주기적으로 작성하여 서비스하는 프로그램들이 운영되고 있다. NOAA는 위성활용의 증진을 위하여 8 km 해상도의 PAL(Pathfinder AVHRR Land data)이란 자료를 작성하여 NDVI와 함께 무료로 배포하고 있다. 낮은 공간해상도 때문에 주로 전 지구적 모델링이나 지역 규모의 연구에 사용되고 있다. 국내에선 한국건설기술연구원 공공원격탐사센터에서 일본 농림수산성 농업정보자원시스템에서 제공하는 NOAA Global 10day NDVI 영상(공간해상도 4 km)에 대해서 10일 간격으로 MVC(Maximum Value Composite)를 수행한 결과와 미국 NASA(National aeronautics and Space Administration)의 EOS Data Gateway에서 다운받은 250 m 해상도의 16 day Composite MODIS NDVI 영상들을 이용하여 남한지역의 가뭄현황을 대략적으로나마 추정할 수 있도록 서비스(<http://krsc.kict.re.kr>)를 하고 있다.

### 2. 평가방법

위성영상 NDVI를 이용한 가뭄평가 방법은 Fig. 1의 절차를 따른다. 식생지수를 이용하여 가뭄을 평가하기 위해서는 먼저 대상지역에 걸쳐 식생 활력을 모니터링 할 수 있는 적절한 영상자료의 확보가 필요하고, 식생의 발달 단계별로 가뭄에 의한 식생 스트레스의 상대적 크기를 평가할 수 있는 방법을 마련하여야 한다. 위성영상으로부터 식생지수를 계산하는 것은 일반적인 영상처리 절차에 따라 자료변환과 기하보정 등의 전처리과정을 밟고, 다음 식 (1)을 이용하여 각 영상별 NDVI 이미지를 작성한다. 같은 계절, 같은 지역에서 촬영됐을지라도 하루 중 영상의 촬영시간, 대기조건, 태양경사 등에 따라 매 영상의 NDVI는 많은 편차를 보이게 되고, 연무와 구름 등과 같은 기상에 의한 영향이나 그림자 효과도 포함하고 있다. 이들 효과를 최소화하고 특정 월의 식생 활력을 대표하는 영상을 얻기 위해서 해당 월의 영상들에서 NDVI 최대값만을 선택하게 되는데, 이때의 영상을 MNDVI

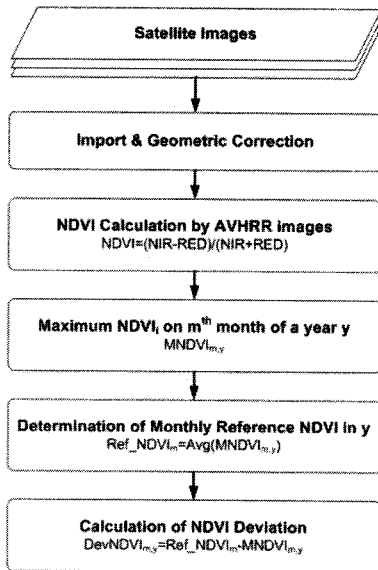


Fig. 1 Flowchart of drought evaluation using AVHRR/NDVI

(Maximum NDVI)라 명명하였다. 그리고 가용한 위성 영상 자료의 성격에 따라 같은 월이라도 다양한 NDVI 특성을 나타내게 되는데 매년 반복되는 식생 활력의 기준의 정하기 위해서 임의의 월의 연도별 MNDVI를 평균한 것으로 그 월의 기준 NDVI(RefNDVI: Referenced NDVI)를 결정하였다. 가뭄의 평가는 월별 RefNDVI와 대상 NDVI와의 차이로써 나타내게 되는데 평균적인 식생수준을 나타내는 RefNDVI보다 높은 NDVI를 나타내는 경우는 가뭄스트레스가 없는 것으로 간주할 수 있고, 역으로 낮은 NDVI를 나타내는 것은 평균적인 식생 활력 수준이 미달하는 것이므로 가뭄에 의한 영향이 있는 것으로 판단할 수 있다. 본 연구에서는 이 차이를 식 (2)와 같이 DevNDVI(Deviation of NDVI)로 정의하였다.

$$DevNDVI_{m,y} = RefNDVI_m - MNDVI_{m,y} \quad (2)$$

여기서, m은 대상 월이고 y는 대상 연도이다.

이론적으로 DevNDVI는 최대 +2.0에서 -2.0까지의 값을 가진다. DevNDVI가 높은 양의 값을 갖을수록 가뭄심도가 큰 것으로 평가하고, 음의 값을 갖는 경우는 기준보다도 식생이 왕성하고 가뭄의 영향을 받지 않는 것으로 간주한다.

### 3. 기본 전제와 한계

본 연구에서 제안한 평가 방법을 적용하는데 있어서 크게 두 가지 가정이 전제되었다. 첫째, 토지피복의 변화는 고려하지 않는다. 원칙적으로는 식생의 활력을 평가하는 식생지수는 시가지, 구조물, 수계 등의 토지피복조건에서는 가뭄을 평가하는데 영향을 미치지 않는다. 특히 수계의 확대 혹은 축소, 도시화 등의 토지피복의 변화는 가뭄과 상관없이 NDVI 값을 급격히 떨어뜨려 심각한 가뭄상황으로 오인될 수 있다. 그러므로 원칙적으로 매 영상에서 이러한 토지피복의 변화를 고려하여야 한다. 그러나 현실적으로 영상의 획득시기에 맞추어 토지피복정보를 갱신하기 어려운 뿐만 아니라 대상지역이 북한이라는 특성상 신뢰할만한 토지피복정보를 얻기 힘들므로 본 연구에서는 고정된 토지피복조건을 전제로 가뭄평가를 수행하였다. 둘째 가정은 동일한 시기에는 동일한 식생 발달 단계를 갖는다는 것이다. 예를 들어 식생의 개화가 예년보다 늦게 혹은 빠르게 진행되었거나 농사가 늦게 시작되었거나 하여 원래 식생의 생육 단계가 분석 기간에 벗어난 시기에 일어나는 경우에는 가뭄의 영향을 왜곡할 수도 있다.

## III. 식생지수 산정

### 1. 대상영상의 수집과 전처리

기상현상과 식생변화 관측에 사용되는 극궤도 위성위성의 AVHRR센서는 전 지구적인 탐사가 가능하고 자료의 질이 좋을 뿐만 아니라 동일한 센서가 장기간 운용되고 있어 연구와 실무에 가장 널리 활용되고 있다(기상연구소, 2002). NOAA/AVHRR 영상은 회전주기가 102분으로 하루에 14.1회 지구를 돌기 때문에 동일지역은 하루에 두 번의 자료취득이 가능하고 데이터 취득 비용이 적어 한반도 전역에 걸쳐 NDVI를 산정하기 쉬운 장점을 가진다. 또 식생지수를 산정할 수 있는 근적외선과 가시광선 채널을 가지고 있고, 공간해상도가 1.1 km로 전국의 가뭄모니터링에 무리가 없으며, 기상청으로부터 자료를 쉽게 확보할 수 있는 장점도 있다. 본 연구에서는 북한지역 가

Table 1 Collected AVHRR images

Year	Number of data	Acquisition date(MMDDHHMM)
1998	4	0505xxxx, 05130541, 05230458, 05300554
1999	5	05040642, 0506xxxx, 0508xxxx, 0512xxxx, 05210854
2000	5	05032324, 05062357, 05070710, 05072335, 05230725
2001	5	05120456, 05120820, 05130445, 05170404, 05282315

x: undefined information

물분석을 위해 이러한 장점들을 가진 NOAA/AVHRR 영상을 선정하였고, 기상청으로부터 1998년부터 2001년까지의 약 180여개의 5월 영상을 검토하여 비교적 청명한 날에 촬영한 것으로서 지상관측이 가능한 총 19개의 영상을 선별하였다(Table 1). 기상청에서 제공하는 NOAA/AVHRR 영상의 자료는 imagine(\*.img) 형식으로 변환되었고, 남북한 행정경계도의 해안선을 따라 20개의 GCP(Ground Control Point)를 선정하여 영상의 등록(rectification)을 완료하였다. 좌표체계는 베셀(Bessel) 타원체를 사용하는 기존 TM(Traverse Mercator)좌표계를 채용하였고, 각 영상의 RMSE(Root Mean Square Error)는 0.6에서 0.8 픽셀(pixel) 사이를 만족하도록 하였으며 공간해상도는 1.1 km를 유지하였다.

## 2. MNDVI<sub>5</sub> 산정

먼저 NOAA/AVHRR 영상의 Ch2와 Ch1으로부터 식 (1)을 이용하여 각 영상의 NDVI를 산출하였다. 다음 연도별로 각 NDVI 이미지에서 픽셀별 최대값으로 5월의 MNDVI<sub>5</sub>를 작성하였다. Fig. 2를 보면, 1999년과 2000년은 북한 전체에 걸쳐 식생지수가 낮게 평가되었고 상대적으로 1998년과 2001년의 경우에는 주로 논농사 지역을 중심으로 식생지수가 낮게 산정된 것 이외에 삼림을 비롯한 나머지 지역에서는 비교적 높은 값을 보였다. 5월은 논농사가 시작하는 시기이고 모내기가 이뤄지므로 모든 년도에서 농지의 식생지수가 낮게 평가된 것은 타당한 것으로 판단된다. 개마고원이 위치한 고지대에서의 식생도 산림이 발달한 강원도, 자강도, 함경남도 에 비하면 NDVI가 높지 않았다. 연도별로 보면 1998년보다는 1999년이, 1999년보다는 2000년 5월의 NDVI값이 더 낮았는데, NDVI가 낮은 것은 식생이 발달하지 못하고 식

Table 2 Statistics of MNDVI<sub>5</sub> from 1998 to 2001

MNDVI <sub>5</sub>	1998	1999	2000	2001
Max	+0.97	+0.45	+0.35	+0.65
Min	-0.16	-0.12	-0.14	-0.16
Mean	+0.27	+0.12	+0.11	+0.31
Std dev	0.11	0.07	0.07	0.13

생이 스트레스를 받는 상태를 나타내는 것이므로 이로부터 2000년 5월에 이 지역에 가뭄의 영향이 있었음을 추정할 수 있었다. 각 MNDVI<sub>5</sub> 영상별 NDVI의 통계 특성은 Table 2와 같다. 극심한 가뭄기록이 남아있는 2000년의 경우에 NDVI 평균은 약 0.11로 대상 연도 중 가장 낮은 값을 보였고 2001년의 경우에 평균 NDVI는 0.31로 가장 컸으나 최소 NDVI는 2000년보다도 더 낮고 NDVI의 폭(range)이 0.81, 표준편차가 0.13으로 지역별 편차가 컸었던 것으로 나타났다. 1999년에도 2000년과 비슷하게 0.12의 평균을 보였고 최소값은 -0.12를 보였다. 1999년에 남한지역에서는 가뭄에 대한 기록이 없으나, 그 해에 심각한 지구온난화현상의 영향으로 전 지구적으로 심각한 대기오염이 발생하였고, 북한도 가뭄으로 농산물의 소출량이 대폭 줄어든 것으로 알려져 있다.

## 3. RefNDVI<sub>5</sub> 산정

기존 NDVI, RefNDVI<sub>5</sub>는 Fig. 2의 각 연도별 5월 MNDVI<sub>5</sub>를 평균한 값으로 결정하였다(Fig. 3). 대상 NDVI가 RefNDVI를 넘는 경우는 식생이 상대적으로 왕성하고 가뭄스트레스를 받지 않은 상태이며, 반대로 NDVI가 RefNDVI보다 작은 경우에는 식생발달 수준이 평균에 미치지 못하고 식생이 가뭄스트레스를 받고 있는 것으로 간주한다. Fig. 3을 보면 전반적으로 서해안의 논농사 지역과 개마고원 등의 내륙 고도 지역에서 식생지수가 낮게 결정되고, 강원도와 함경남도, 그리고 자강도 등의 산림지역에서 비교적 높은 식생지수를 보여주었다. 그러나 영상에 따라서는 병충해, 산불, 토지이용변화 등 토지피복의 변화와 구름, 황사 등 대기의 영향도 간과할 수 없기 때문에 해석에 주의가 필요하다. 또한 RefNDVI는 평균적인 식생발달 기준을 정하기 위한 것이므로 사용하는 자료 영상들이 식생지수 경향이 한쪽으로 편향되어 있다면

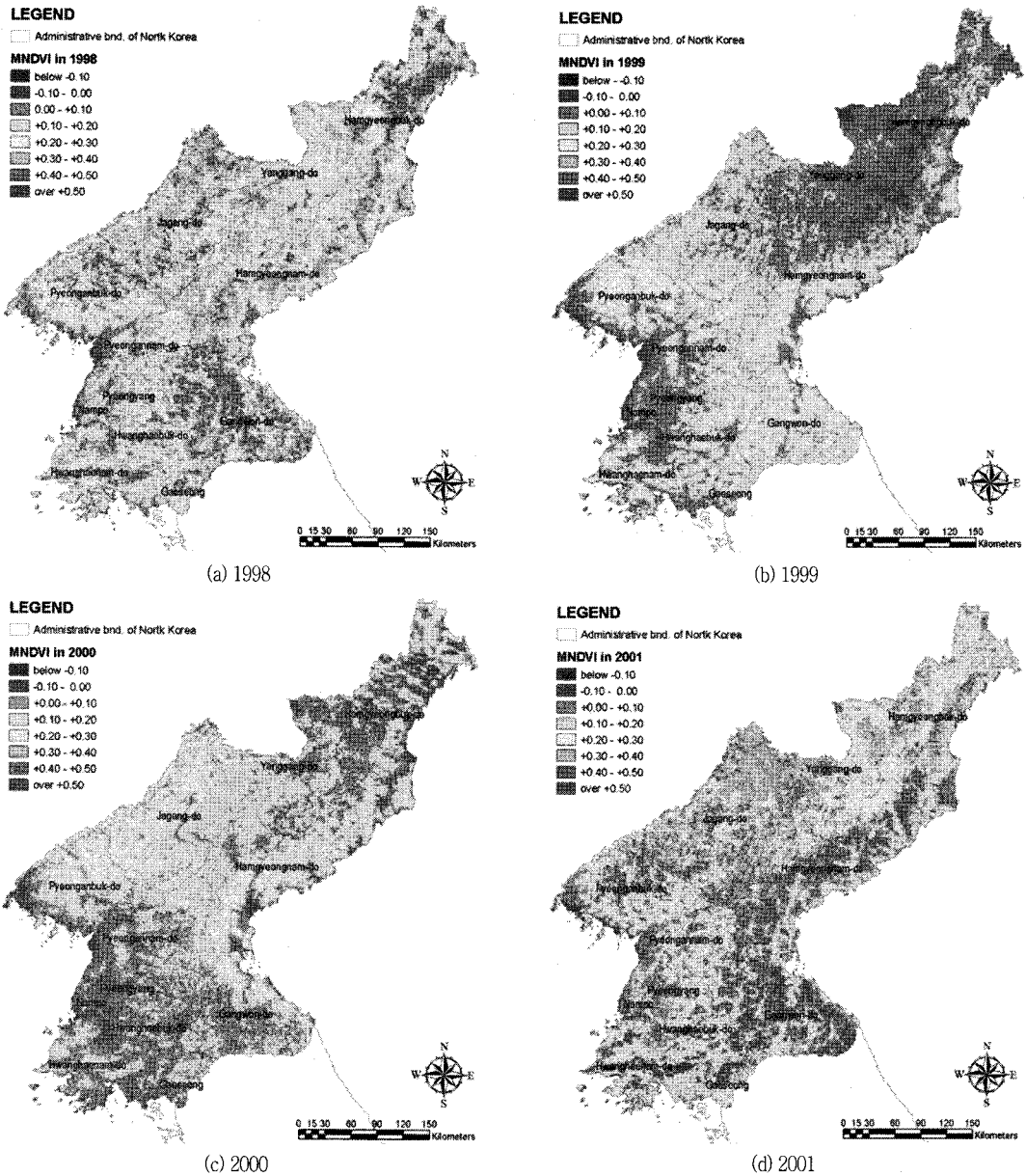


Fig. 2 MNDVI<sub>5</sub> of May from 1998 to 2001

잘못된 기준이 될 수 있다. 본 연구에서는 4년간의 19개 영상만을 사용하였으나 보다 장기간 동안 축적된 양질의 영상을 사용한다면 RefNDVI의 신뢰성을 보다 높일 수 있을 것이다.

#### IV. 가뭄평가

##### 1. 북한 가뭄 기록

먼저 북한의 기상개황을 정리하면, 연평균 강수량은 남한에 비하여 20% 정도 적은 1,000 mm 내외이고 북쪽으로 갈수록 감소하나 지리적 위치에 편차가 매우 큰 특성을 나타낸다. 연간 강수량은 청천강과 원산만 일대에서 가장 크고, 개마고원과 주변의 고원지

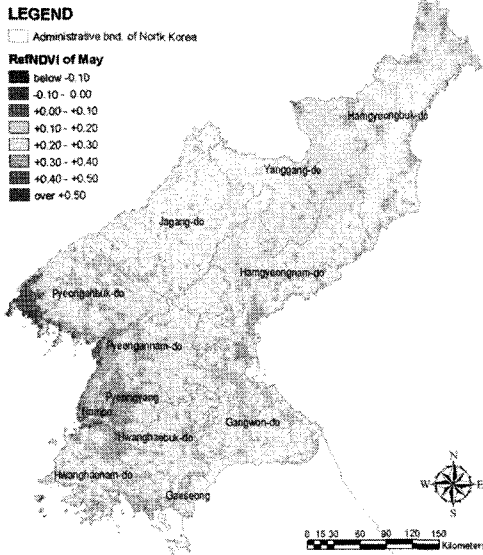


Fig. 3 RefNDVI of May derived from MNDVI images during four years(1998 ~ 2001)

대에선 강우량이 가장 적은 편이다. 겨울철 기온을 보면 증가진, 후창, 자성, 강계 등과 개마고원 지역에서 가장 낮는데 개마고원의 경우엔 3월에도  $-6^{\circ}\text{C}$  내외의 저온을 보이고 일최저기온이  $0^{\circ}\text{C}$  이하인 날이 140일 이상 계속된다. 또 태백산맥과 함경산맥이 찬 북서계절풍을 막아 뒤편(Foehn)현상이 발생하여 겨울기온도 내륙지방과 해안지방간에 차이가 현격하다. 작물의 생육과 관계된 일평균기온이  $0^{\circ}\text{C}$  가 되는 날은 남한 남부지역에 비하여 2개월 정도 늦고, 내륙보다는 동해안지역에서 더 빠르다. 북한에서 하천수의 형성은 강우, 융설수, 지하수의 유입으로 대부분 결정되며, 북부지대와 동해안지대에서 융설수와 지하수의 비중이 높다(한국환경정책평가연구원, 2001).

북한에서의 가뭄이나 홍수 등의 재해발생 기록은 국내에서는 북한의 중앙방송과 중앙통신, 그리고 이들 기사내용을 분석한 국가정보원, 국방부, 통일부, 외교통상부 등 정부기관의 간행물들, 농어촌연구원, 수자원연구원, 통일학연구소, 세종연구소 등의 연구보고서들을 통해 참고할 수 있고, 해외에서는 UNDP, UNEP, FAO, WFO, ADB 등의 국제기구와 국방부, USDA 등 미 정부기구, 그리고 CNN, Washington Post, Times, AP 등의 해외미디어들에서 보고된다. 그리

나 북한의 대외 폐쇄정책으로 인하여 정보량이 매우 제한되고 그나마도 중복되는 경우가 많고 일부 정보는 일반에 공개되지 않는 것도 있다. 제한적이지만 본 연구에서는 1998년부터 2001년까지 통일부에서 발간하는 '주간 북한동향'과 USDA FAS(Foreign Agricultural Service) 보고서를 중심으로 가뭄 발생 기록을 참고하였다. 통일부는 북한의 방송매체를 모니터링 하여 주요 내용을 매주 정리해서 발표하고 있는데, 대외원조의 필요성 때문에 가뭄이나 홍수 문제에 대하여 북한 정부에 의한 과장이 많다는 비판은 있으나 재해 피해현황에 대한 북한의 자발적인 내부 정보의 공개라는 점에서 주요하였다. 또한 FAS는 미 농무부 산하로 전 세계의 농업관련 정보를 서비스하고 있는데 주요 기상변화 이슈와 그에 따른 국가별 식량사정을 안내하고 있다.

북한지역의 가뭄발생 기록은 1999년, 2000년, 2001년에 나타나고 있다(Table 3). 1999년엔 남한지역에 대해서는 가뭄발생 기록이 없으나 북한 중앙통신(통일부, '주간 북한동향')에 의하면 그 해 1월부터 5월까지 가뭄이 심하였고 6월의 경우에도 평년대비 강수량이 평양은 27%, 평안남북도, 황해남북도, 강원도 등에선 25~34%, 그리고 자강도와 함경남북도에서는 50%에 그친 것으로 나타났다. 남한지역에서도 극심한 가뭄이 발생했던 2000년엔 북한의 주요 곡창지대인 연백평야와 열두삼천리평야가 있는 황해남도 배천군, 개풍군, 판문군과 평안남도 문덕군, 순천군에서 가뭄이 극심하다고 발표되었다. 서해안 지역의 경우 5월의 강수량이 평년의 40~50%에 그쳤고 특히 고온현상까지 겹쳐서 가뭄스트레스가 가중된 것으로 알려져 있다. 2000년의 가뭄은 5월과 7월에 집중되었고 이때의 강수량이 평년의 60% 수준이었다. 2001년에 북한 중앙통신과 중앙방송은 6월에 90일째 계속되는 가뭄으로 북한 전 농경지의 72%가 피해를 입고 있다고 발표하였다. 또한 서해안 지역은 강풍과 평년보다  $10\sim 13^{\circ}\text{C}$  높은 고온현상을 동반하였고, 5월 중순엔 황해도, 평안남도, 강원도, 남포시 일대에서 함경북도 북쪽으로 가뭄발생지역이 확대되고 있다고 하였다. 그리고 WFP/FAO(2001)의 보고서에 따르면 2000년에 이어 2001년에 연속된 가뭄으로 북한 농경

Table 3 Drought damage records and DevNDVI<sub>5</sub> from 1998 to 2001

Year	Drought Damages	DevNDVI <sub>5</sub>	Remarks
1998	○ Drought: enough rainfall ○ Damage: no record ○ Yield: maize: 3.04MT/ha, rice: 2.33MT/ha	-0.80 ~ +0.24 (average -0.07)	- USDA FAS
1999	○ Drought: little rainfall from Jan. ~ May ○ Damage: (by normal rainfall of June) - Pyeongyang: 26% - Pyeongan-do, Hwanghae-do, Gangwon-do: 25 ~ 34% - Jagang-do, Hamkyeong-do: 50% ○ Yield: maize: 2.78MT/ha, rice: 2.67MT/ha	-0.18 ~ +0.33 (average +0.09)	- Korean Ministry of Unification, the Weekly North Korea(No.466) - USDA FAS
2000	○ Drought: little rainfall from May to July(just 60% of normal rainfall) ○ Damage: - struggling with high temperature - below 50% of normal rainfall of May - Yeonbaek plain, Yeoldoosamcheolli plain ○ Yield: maize: 2.57MT/ha, rice: 2.36MT/ha	-0.15 ~ +0.38 (average +0.09)	- Korean Ministry of Unification, the Weekly North Korea(No.490, No.492, No.499) - USDA FAS
2001	○ Drought: little rainfall from March to June ○ Damage: - struggling with high temperature(10 ~ 13°C higher than normal) - 72% of cultivation land damaged - cultivation abandonment at 10% of farmlands - drought-damaged area spreading to northern regions for May: from Nampo to Hamkyeongbuk-do ○ Yield: maize: 2.88MT/ha, rice: 2.45MT/ha	-0.41 ~ +0.26 (average -0.10)	- Korean Ministry of Unification, the Weekly North Korea(No.542, No.593) - WFP/FAO(2001) - USDA FAS

지의 10%가 경작을 포기한 것으로 알려져 있다.

## 2. DevNDVI<sub>5</sub> 산정

RefNDVI<sub>5</sub>와 Fig. 2의 5월 연도별 MNDVI<sub>5</sub>를 이용하여 식 (2)의 가뭄지수 DevNDVI<sub>5</sub>를 산정하였다. DevNDVI<sub>5</sub>의 최대치는 2000년 영상에서 나타났고 평균으로는 1999년과 2000년 모두 +0.09로 동일한 수준의 가뭄스트레스를 받는 것으로 나타났다. Fig. 2에서 농번기가 시작 전이거나 막 시작되었을 평야지대에서는 연도에 상관없이 대부분 가장 낮은 NDVI<sub>5</sub>를 보였지만 Fig. 4에서 DevNDVI<sub>5</sub>는 1998년과 1999년엔 산림 등 다른 토지이용 지역에 비해 높게, 1999년과 2000년엔 상대적으로 낮게 나타났다. 이것은 NDVI는 토지이용조건에 따라 공간적으로 민감한 지수인 반면에 DevNDVI는 토지이용조건이 바뀌지 않는다는 전제하에서 한 지점의 평균 NDVI와 현재 NDVI의 차이를 이용한 것으로 동일 위치에서의 시기적인 변화만을 고려하기 때문이다. 5월은 농작물의 생육이 시작되려는 시기로 농경지는 대부분 식생이

거의 없이 나지나 수채와 비슷한 피복 상태이기 때문에 매우 낮은 NDVI를 보이고 해가 달라져도 차이가 크게 변하지 않는데, 산림과 같이 평균적으로 식생지수가 높은 지역에서는 기상을 비롯한 자연환경의 영향에 따라 같은 계절이라도 해에 따라 식생 활력의 변화가 클 수 있다. 그러므로 Fig. 4는 본 연구에서 사용한 DevNDVI의 개념이 토지이용조건에 따른 식생지수의 차이를 배제하면서 가뭄의 영향을 평가하고 시공간적인 비교가 가능하기 위해서 유용하다는 점을 잘 보여준다.

## 3. 가뭄평가와 해석

가뭄강도를 해석하기 위하여 Fig. 4의 DevNDVI<sub>5</sub>를 레벨 I ~ 레벨 V의 5단계로 구분하고 각각을 심한가뭄(severe drought), 약한가뭄(moderate drought), 보통(normal), 약간습윤(moderate wet), 매우습윤(pretty wet)으로 정의하였다. 연도별로 각 가뭄단계별 면적분포를 정리하면, 2000년에 가장 극심한 가뭄이 발생하였고 2001년은 전국적으로 가뭄스트레스



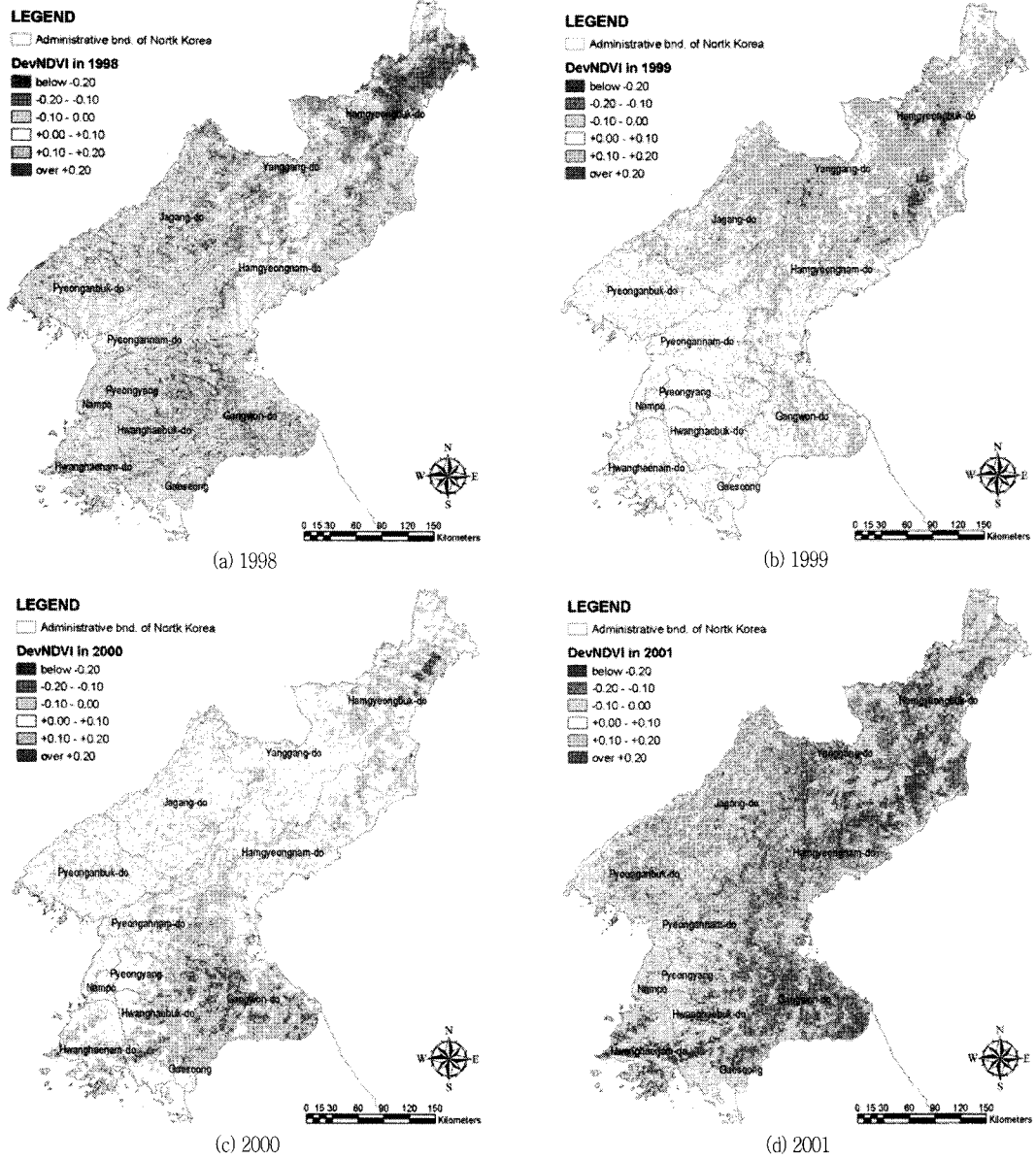


Fig. 4 DevNDVI<sub>5</sub> of May from 1998 to 2001

Table 4 Area distribution by DevNDVI<sub>5</sub> ranges (unit: km<sup>2</sup>)

Class	DevNDVI <sub>5</sub>	1998	1999	2000	2001
I	+0.2 ~ +2.0	4 (0.0%)	1,859 (1.5%)	4,715 (3.9%)	12 (0.0%)
II	+0.1 ~ +0.2	75 (0.1%)	48,723 (40.1%)	42,326 (34.8%)	92 (0.1%)
III	-0.1 ~ +0.1	85,449 (70.3%)	70,904 (58.4%)	74,419 (61.3%)	56,922 (46.9%)
IV	-0.2 ~ -0.1	33,152 (27.3%)	12 (0.0%)	38 (0.0%)	56,307 (46.3%)
V	-2.0 ~ -0.2	2,818 (2.3%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	8,164 (6.7%)

가 거의 없었던 것으로 분석되었다(Table 4). 오히려 2001년의 식생 활력이 가뭄기록이 없는 1998년보다도 높은 것으로 분석되어 남북한 모두에서 극심한 가뭄이 발생했던 사실과 상당한 괴리를 보였다. 1998년과 2001년과 같이 식생지수만으로 볼 때 가뭄에 의한 스트레스가 나타나지 않을 때는 5월이 본격적인 논농사가 시작되기 전이나 혹은 이앙기 등 생육초기인 경우이므로 산림지역보다 주로 서해안 평야지대에서 상대적으로 DevNDVI<sub>5</sub>가 높았다. 그러나 심한 가뭄이 나타난 1999년과 2001년의 경우는 평야지대의 DevNDVI<sub>5</sub>가 낮은 반면 산림이 발달한 지역에서 가뭄심도가 크게 나타났는데 이는 논농사가 시작되는 5월의 경우 일반적으로 식생수준이 원래 낮기 때문에 가뭄에 의한 영향이 쉽게 드러나지 않은 반면 식생 군락이 큰 산림의 경우엔 환경변화에 보다 민감하기 때문인 것으로 추정된다. 한편, 북한 169개 시군 행정구역별로 DevNDVI<sub>5</sub>의 평균값을 계산하고 지역간 차이가 분명하게 드러나도록 10단계로 나뉜 가뭄지역을 비교하였다(Fig. 5). 분석기간 4개년 중에 가장 가뭄 스트레스가 심하게 나타난 지역은 2000년에 강원도 법동군(0.189), 판교군(0.181)과 황해북도 신평군(0.182) 등이었고, 식생 활력이 가장 높았던 지역은 1998년 함경북도 부령군(-0.183), 선봉시(-0.172)와 강원도 법동군(-0.169) 등이었다.

#### 가. 1998년

가뭄발생 기록이 없는 1998년은 북한 대부분이 평균 이상의 식생 활력 상태를 보여줬다. 북한 전체 면적의 약 97%가 레벨 III와 레벨 IV단계에 있었고 식생 지수의 저하가 커서 레벨 I과 II로 분류된 지역은 0.1%에 지나지 않았다. 그나마 0.1%의 면적도 가뭄에 의한 것이라기보다는 토지이용변화 등 다른 이유에서 찾는 것이 합리적이다.

#### 나. 1999년

1998년에 반하여 1999년은 레벨 I 혹은 레벨 II의 가뭄발생 지역이 북한 전체 면적의 41% 이상을 차지하였다. 한국에선 심한 가뭄피해 기록이 없지만 1999년은 전 세계적으로 지구온난화에 의한 이상기후현상으로 가뭄과 홍수 등 자연재해가 심각했던 시기이다.

북한지역도 그 해 1월부터 5월까지 강우량이 지역에 따라 평년보다도 적게는 약 30여 mm, 많게는 약 100여 mm 이상 줄어서 심각한 가뭄피해를 경험하였다(국방일보, 1999). Fig. 4(b)는 전반적으로 양(+ )의 DevNDVI<sub>5</sub>를 보여주었고, 특히 평안북도 신미도, 길주군, 무산군과 양강도 김정숙군, 김형직군 등 동쪽과 북동쪽에 이르는 고지대 산림지역을 중심으로 식생 활력 저하가 뚜렷하였다. 평안남북도와 자강도, 황해북도 등 논농사 지역들에서도 식생 저하가 나타났는데 기본적으로 낮은 NDVI를 기준하여 DevNDVI<sub>5</sub>가 계산된 것이므로 실제 영향은 매우 컸을 것이라 추정할 수 있다. 통일부 주간북한동향(제466호)은 평년에 25~34%에 지나지 않은 강우량 때문에 이 지역 농업에 큰 피해가 있었다고 보도하였다.

#### 다. 2000년

2000년에 남한은 극심한 가뭄을 겪었다. 기록을 살펴보면 북한과 접한 경기도와 강원도 등 중부지방을 중심으로 2000년에 극심한 가뭄이 있었다(국가수자원관리종합정보시스템 <http://www.wamis.go.kr>). 북한도 대부분의 지역에서 양(+ )의 DevNDVI<sub>5</sub>를 나타냈고 공간적으로는 북부나 서부의 주요 곡창지대인 평안남북도, 황해남도, 자강도 등 보다는 황해북도, 강원도, 개성 등에서 심각한 가뭄상태를 보였다(Fig. 4(c)). 1999년과 비교하여 레벨 II 이상인 면적이 약 38.7%로 약간 적지만 심한가뭄인 레벨 I의 면적이 4,715 km<sup>2</sup>로 전년도 1,859 km<sup>2</sup>보다 2.5배 이상 늘었다. 특히 주로 양강도와 함경남북도 등 북부지역에서 심한 가뭄이 나타난 1999년과 달리 2000년은 극심한 가뭄을 겪은 남한의 경기도, 강원도와 인접한 남부지역에서 DevNDVI<sub>5</sub>가 크게 나타났다.

#### 라. 2001년

2001년은 남북한 모두 심각한 가뭄피해 기록이 남아있는 해임에도 불구하고 대상 4개년 중에 가장 낮은 DevNDVI<sub>5</sub> 평균값(-0.105)을 보였다(Fig. 4(d)). 전반적으로 음(-)의 DevNDVI<sub>5</sub>를 나타내기 때문에 이것만으로는 2001년 5월은 가뭄이 발생하지 않았고 식생 활력도 양호하다고 할 수 있다. 에너지경제연구원(2002)에 의하면 실제로 2001년 5월이 2000년보

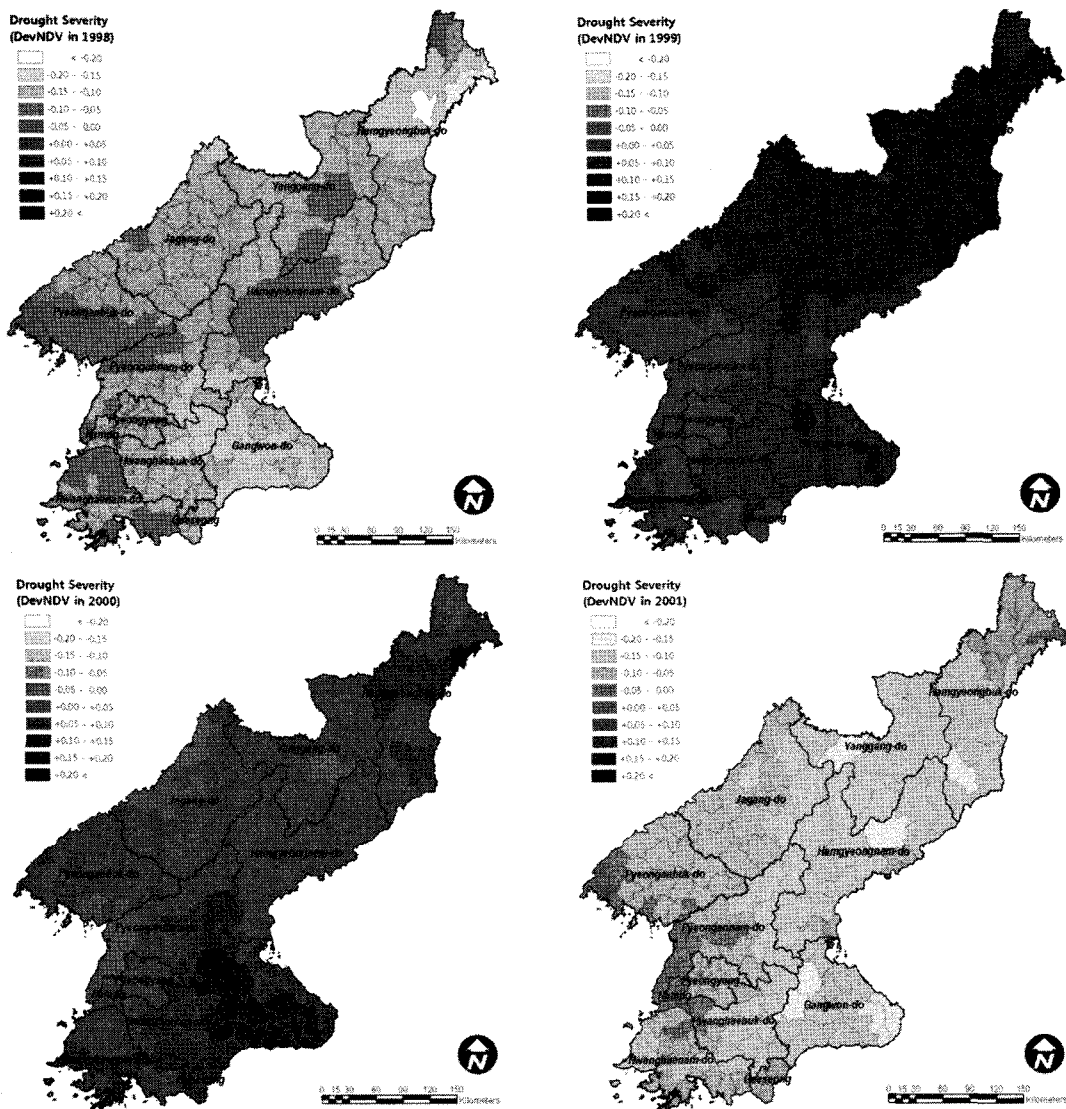


Fig. 5 DevNDVI<sub>5</sub> by administration boundaries(Si or Gun) from 1998 to 2001

다 산림 식생의 성장이 빠르게 진행되었다. 강원도 계방산에서 매년 같은 날짜(5월 9일)에 신갈나무, 복장나무 및 분비나무의 개엽 상황을 조사한 결과 2000년 < 2001년 < 1999년 < 1998년도의 순으로 잎의 길이와 신초의 길이가 크게 나타났고, 그 원인을 지구온난화에 의해 식물의 성장이 빠르게 이뤄졌기 때문이라고 추정하였다. 세계기상통신망 GTS(Global Telecommunication System)로부터 기상청에서 제공하는 북한 기상자료(1976년~2005년)를 분석한 결

과, 2001년 봄의 월평균강수량은 약 19.2 mm/month로 평년의 40%에 지나지 않았으나 일평균기온이 약 8.76℃로 평년(약 8.24℃)보다 0.52℃가량 높았다(Table 5). 이 때문에 식물의 꽃과 잎이 일찍 열리게 되었고 보통의 5월보다 빨라진 식물 성장을 보였을 것이라 판단된다. Table 5에서 북한의 봄철 평균기온이 1998, 2001, 1999, 1998년 순으로 높았는데 에너지경제연구원의 관측 결과를 뒷받침한다. 1999년과 2001년의 순서가 다른 것은 1999년의 평균 일

Table 5 Mean temperature and rainfall of North Korea during Spring season

Meteorologic Data		March			April			May		
		E <sup>1)</sup>	M <sup>2)</sup>	L <sup>3)</sup>	E	M	L	E	M	L
Normal	Mean Temp.(°C)	-0.9	1.7	3.5	6.8	8.9	10.9	12.8	14.3	16.0
	Rainfall(mm)	7.7	6.9	7.1	8.6	16.8	18.5	22.4	25.9	21.3
1998	Mean Temp.(°C)	4.2	3.3	5.3	9.6	12.7	14.4	14.8	16.6	17.2
	Rainfall(mm)	0.1	14.3	1.2	1.3	22.8	8.8	30.9	6.5	8.7
1999	Mean Temp.(°C)	0.0	2.7	1.9	5.2	10.0	13.4	13.4	14.6	15.7
	Rainfall(mm)	10.2	10.3	4.3	26.9	14.9	1.2	10.6	22.8	21.2
2000	Mean Temp.(°C)	-0.4	2.5	4.6	6.1	8.9	9.8	12.0	13.1	17.9
	Rainfall(mm)	0.1	2.5	5.7	4.6	1.3	29.4	29.1	17.6	8.7
2001	Mean Temp.(°C)	-2.9	2.2	2.9	7.9	9.7	11.5	12.4	16.4	18.4
	Rainfall(mm)	9.3	3.4	1.2	1.4	3.0	0.0	23.2	2.0	13.6

1) E: 1~10th 2) M: 11~20th 3) L: 21~30th(or 31th)

기온이 0.19°C 정도 낮았지만 월평균 강수량은 2배 이상 커서 식물 생장에 보다 좋은 환경이었기 때문이다. 결과적으로 2001년의 DevNDVI<sub>5</sub>가 가뭄 상황을 제대로 반영하지 못한 것은 식생이 매년 동일한 성장 주기를 갖는다는 기본 전제를 만족하지 못하고 식생 지수가 비교되었기 때문이라 판단되고 식생지수를 활용한 가뭄평가에서 반드시 고려하여야만 한다.

### V. 요약 및 결론

바로 인접한 북한이지만 우리가 가질 수 있는 북한 내 가뭄 정보는 매우 제한적이다. 최근 가뭄과 홍수 등 자연재해가 빈번하게 발생함에 따라 북한 내 피해 정보를 빠르고 정확하게 수집할 필요가 늘어났음에도 우리 자체적으로 자료를 조사하고 정보화하는 수준은 아직도 많은 과제를 안고 있다. 이에 본 연구는 북한 전역에 대하여 가뭄발생과 피해 상황을 직접 모니터링 할 수 있는 방법을 찾고자 하였고, 식생지수를 사용한 기존의 연구들을 참고하여 NOAA/AVHRR NDVI를 이용한 가뭄평가 방법을 제안하였다. 토지 이용조건의 변경을 배제하고 매년 비슷한 식생 발달 단계를 유지한다는 전제하에 다년간의 식생지수로부터 평균적인 식생 활력과 가뭄스트레스를 받는 식생 활력을 비교한 DevNDVI를 정의하고 시간과 공간에 따른 가뭄강도를 비교하였다.

1998년부터 2001년까지 4개년의 5월 영상을 분석한 결과 2000년이 전반적으로 가장 심한 가뭄 상태를 보여주었고 2001년에 식생이 가장 왕성한 것으로 나타났다. DevNDVI<sub>5</sub>에 의하면 1999년과 2000년의 가뭄은 공간적으로 매우 다른 양상을 갖는데 1999년엔 북한의 남부지역보다는 북부지역의 고산 지대에서 가뭄스트레스가 매우 컸으나 2000년엔 남부의 강원도를 중심으로 심한 가뭄심도를 보여주었다. 2001년의 경우엔 기상자로나 가뭄피해기록과 달리 전혀 가뭄스트레스가 없는 결과가 나타났는데 당시의 산림 관측 결과와는 일치하는 것으로 그 이유를 평년보다 높은 기온으로 식생 발달이 빨리 진행되었기 때문인 것으로 추정하였다. 이는 식생지수를 이용한 가뭄평가에 있어 반드시 주의하여야 할 문제점을 시사하는데 강수량 이외의 다른 요인에 의하여 식생의 발달 단계가 달라지는 경우에는 가뭄에 의한 식물의 스트레스를 반영하지 못할 수 있다는 것이다. 봄은 식물체가 뿌리를 내리고 개화와 개엽을 시작하는 등 빠른 성장이 이뤄지는 시기이고 기상조건을 포함한 여러 요인들에 의해 식생 활력의 차이가 커질 수 있기 때문에, 가뭄에 의한 영향을 반영하고 시공간적으로 객관적인 지수를 만들기 위해서는 영상자료 뿐만 아니라 이를 보완할 수 있게 식물생육모형이나 기록 등을 같이 고려하여야 할 것이다. 한편 모든 영상에서 농경지가 많은 평야부의 식생지수가 낮게 산정되었는데 이는 5월의 경우 경지가 나지 상태나 모내기 직후이므로 가뭄에 의한 식물체 스트레스에 상관없이 기본적으로 식생 밀도와 활력이 낮기 때문이다. 게다가 사용된 영상의 공간해상도가 1.1 km로 매우 낮아 연도별 가뭄에 따른 농경지 식생의 변화를 제대로 분류할 수 없었기 때문이다. 그러므로 위성영상의 식생지수를 이용하여 광범위한 지역의 봄철 가뭄을 평가하기 위해서는 적절한 위성영상을 충분히 확보하는 것과 함께 식생지수의 한계를 보완할 수 있는 지상정보와 모형을 고려하는 시스템을 구축하는 것이 반드시 필요하다고 판단되었다.

아직까지는 식생지수를 산정하는데 있어서 외국의 위성영상으로부터 자료를 얻고 있지만 2008년엔 우리나라도 공간해상도 500 m의 통신방송기상위성 1호

기의 발사를 앞두고 있고 한반도를 중심으로 동아시아 전역을 관측할 수 있는 지상위성관측체계를 독자적으로 갖출 수 있게 될 것으로 전망된다. 그리고 이런 하드웨어 기술의 발전에 맞추어 가뭄 모니터링과 평가를 위한 위성영상 활용 기반을 만들고 실용화 하는 연구가 더욱 필요할 것으로 예상된다.

## References

1. 국방일보, 1999, 극심한 가뭄으로 몸살앓는 북한, 국정홍보원, 1999년 7월 25일.
2. 기상연구소, 2002, 위성자료 처리기술(III), 기상연구소 연구보고서, pp.124.
3. 김천, 박승환, 2003, Landsat TM 화상자료를 이용한 시계열 식생건조지수 분석, 한국GIS학회 공동춘계학술대회 논문집, pp.163-169.
4. 박은주, 2002, Landsat ETM+ 영상을 활용한 가뭄민감도 분석, 경희대학교 석사학위 논문.
5. 박종화, 류경식, 2005, AVHRR영상과 분광반사특성을 이용한 식생지수(NDVI)의 변동특성, 한국환경복원녹화기술학회지, 8(2), pp.33-40.
6. 신사철, 어민선, 2004, 인공위성 영상 정보를 이용한 가뭄상황 및 징후분석, 한국방재학회논문집, 4(2), pp.61-69.
7. 에너지경제연구원, 2002, 기후변화협약에 따른 대한민국 국가보고서 초안 작성, 기본연구보고서 02-01, p.156.
8. 한국환경정책평가연구원, 2001, 남북환경포럼, KEI 정책과제 연구보고서, p.93.
9. Amoli, A. A. & M. Morabbi, 2004, Drought Monitoring in Iran by NOAA/AVHRR, UN/I.R. Iran Workshop on the Use of Space Technology for Environmental Security, Disaster Rehabilitation and Sustainable Development, Tehran-Iran.
10. Anyamba, A. & C. J. Tucker, 2005, Analysis of Sahelian vegetation dynamics using NOAA-AVHRR NDVI data from 1981-2003, Journal of Arid Environments, 63, pp.596-614.
11. Ji, L. & A. J. Peters, 2003, Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices, Remote Sensing of Environment, 87, pp.85-98.
12. Kogan, F.N., 1997, "Global Drought Watch from Space", American Meteorological Society, available at <http://orbit-net.nesdis.noaa.gov/crad/sat/surf/vci/>.
13. Prasad, A. K., S. Sarkar, R. P. Singh & M. Kafatos, 2007, Inter-annual variability of vegetation cover and rainfall over india, Advances in Space Research, 39(1), pp.73-78.
14. Unganai, L. S. & F. N. Kogan, 1998, Southern Africa's recent droughts from space, Advanced Space Research, 21(3), pp.507-511.
15. WFP/FAO Joint Report, 2001, Severe Spring Droughts Aggravate North Korea's Food Crisis, available at [http://www.wfp.org/newsroom/in\\_depth/north\\_korea\\_II.asp?section=2&sub\\_section=2](http://www.wfp.org/newsroom/in_depth/north_korea_II.asp?section=2&sub_section=2).
16. WFP/FAO, 2001, FAO/WFP Crop and Food Supply Assessment Mission to Democratic People's Republic of Korea 2001/July/27, FAO Global Information and Early Warning System on Food and Agriculture World Food Programme.
17. McVicar, T. R. & P. N. Bierwirth, 2001, Rapidly Assessing the 1997 Drought in Papua New Guinea Using Composite AVHRR Imagery, International Journal of Remote Sensing, 22, pp.2109-2128.
18. Rouse, J. W, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering & J. C. Harlan, 1974, Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation of Natural Vegetation, NASA/GSFC, Type III, Final Report, Greenbelt, MD, pp.1-371.
19. Tadesse, T., J. F. Brown & M. J. Hayes, 2005, A new approach for predicting drought-related vegetation stress: Integrating satellite, climate, and biophysical data over the U.S. central plains, Photogrammetry and Remote Sensing, 59, pp.244-253.