Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 22, No. 2 (2012) pp. 267-277

한반도 · 동아시아 지역의 실시간 가뭄 감시 및 전망 시스템 개발

배덕효[1),*] · 손경환[1)] · 안중배[2)] · 홍자영[2)] · 김광섭[3)] · 정준석[4)] · 정의석[5)] · 김종군[6)]

[1)]세종대학교 건설환경공학과
[2)]부산대학교 지구환경시스템학부
[3)]경북대학교 건축토목공학부
[4)]기상청
[5)](주)헥코리아
[6)]환경예측연구소

(접수: 2011년 12월 19일, 수정: 2012년 1월 9일, 게재확정일: 2012년 1월 20일)

Development of Real-Time Drought Monitoring and Prediction System on Korea & East Asia Region

Deg-Hyo Bae [1),*], Kyung-Hwan Son[1)], Joong-Bae Ahn[2)], Ja-Young Hong[2)], Gwang-Soeb Kim[3)], Jun-Seok Chung[4)], Ui-Seok Jung[5)], and Jong-Khun Kim[6]

[1)]Department of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul
[2)]Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Pusan
[3)]Department of Architecture and Civil Engrg., Kyungbook National University, Daegu
[4)]Korea Meteorological Administration, Seoul
[5)]Hydrology Engineering & Consulting Center, Korea Inc.
[6)]Environmental Prediction Research Inc.

(Received: 19 December 2011, Revised: 19 January 2012, Accepted: 20 January 2012)

Abstract The objectives of this study are to develop a real-time drought monitoring and prediction system on the East Asia domain and to evaluate the performance of the system by using past historical drought records. The system is mainly composed of two parts: drought monitoring for providing current drought indices with meteorological and hydrological conditions; drought outlooks for suggesting future drought indices and future hydrometeorological conditions. Both parts represent the drought conditions on the East Asia domain (latitude 21.15~50.15°, longitude 104.40~149.65°), Korea domain (latitude 30.40~43.15°, longitude 118.65~135.65°) and South Korea domain (latitude 30.40~43.15°, longitude 118.65~135.65°), respectively. The observed meteorological data from ASOS (Automated Surface Observing System) and AWS (Automatic Weather System) of KMA (Korean Meteorological Administration) and model-driven hydrological data from LSM (Land Surface model) are used for the real-time drought monitoring, while the monthly and seasonal weather forecast information from UM (Unified Model) of KMA are utilized for drought outlooks. For the evaluation of the system, past historical drought records occurred in Korea are surveyed and are compared with the application results of the system. The results demonstrated that the selected drought indices such as KMA drought index, SPI (3), SPI (6), PDSI, SRI and SSI are reasonable, especially, the performance of SRI and SSI provides higher accuracy that the others.

*Corresponding Author: Deg-Hyo Bae, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, 98 Gunja-Dong, Gwangjin-Gu, Seoul 143-747, Korea.
Phone : +82-2-3408-3814, Fax : +82-2-3408-4332
E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

Keywords: UM, LSM, Drought Index, East Asia, Drought Monitoring and Prediction

1. 서 론

최근 기후변화로 인한 지구온난화, 엘리뇨 및 라니냐 등의 현상은 과거에 경험하지 못했던 이상 수문기상 및 기상재해를 유발시키고 있으며, 매년 피해규모가 증가하고 있는 추세이다. 그 중 가뭄은 미국 해양기상청 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)이 선정한 20세기 최대의 자연재해 중 상위 5위 안에 랭크될 정도로 그 피해와 영향력은 막대하며, 앞으로도 그 피해가 전 세계적으로 증가할 것이라는 견해가 나오고 있어 이에 대한 대책마련이 시급한 실정이다 (Trenberth *et al.*, 2004).

가뭄은 여러 측면에서 일반 자연재해와 그 성격이 다르다. 즉, 가뭄은 홍수에 비해 점진적이고 광역적이어서 가뭄을 감지하더라도 구체적인 발생 시기, 장소 및 원인을 규명하는 것이 어렵다. 또한, 가뭄은 물 공급 부족에 따른 물수지 불균형 현상으로 수문순환 거동을 총체적으로 다뤄야 할 만큼 해석범위가 광범위하다. 그렇다 보니 해석범위를 기상학적 가뭄, 수문학적 가뭄, 농업가뭄 등으로 구분하고 각 분야별 목적에 맞게 가뭄지수를 활용하여 가뭄을 정량적으로 규명하고 있으나, 상당수가 기상자료에만 의존하여 가뭄을 표현하는 문제가 있다. 따라서, 효율적인 가뭄관리를 위해서는 가뭄의 진행 상황을 감시 및 전망하고 이를 초기에 감지하는 기술 개발이 필요하다. 또한, 가뭄의 해석을 각 분야별 독립적으로 다룰 것이 아니라 대기와 지표 사이에 발생하는 수문순환 해석을 통해 가뭄해석에 필요한 정보를 생산하는 것이 바람직하며, 해석지역도 단순히 지역 또는 유역단위가 아닌 동아시아 등의 인접국가와의 연계가 가능할 정도로 광범위해야 할 것이다.

현재 국외에서는 가뭄에 대한 능동적인 대처를 위해 가뭄 조기경보 시스템을 구축하여 웹상으로 대국민 서비스를 수행하고 있다. 미국 CPC (Climate Prediction Center)에서는 가뭄지수인 Mckee *et al.* (1993)의 표준강수지수 (Standard Precipitation Index, SPI) 및 Palmer (1965)의 파머가뭄지수 (Palmer Drought Severity Index, PDSI)를 이용하여 미국 전역에 실시간 감시 및 전망자료로 제공하고 있으며, 특히, 수문모형을 활용하여 자국 또는 전 세계를 대상으로 수문성분 (유출 및 토양수분 등) 기반의 감시 및 전망 정보를 실시간으로 제공하고 있다. 또한, 국립가뭄경감센터 (National Drought Mitigation Center, NDMC)에서는 각 기관별 수문기상 및 가뭄지수 정보를 수집하고 통합지수를 산정하여 매주 웹상으로 제공하고 있다. 반면 국내의 경우 가뭄 정보를 제공하는 기관이 기상청, 한국수자원공사, 농어촌공사 및 소방방재청이 있으나, 대부분 기상자료 기반의 가뭄지수를 이용하여 감시업무에 국한되어 있는 실정이다. 그 예로 기상청의 경우 2002년 부터 우리나라를 중심으로 각 지역별 가뭄지수를 산정하여 웹 사이트를 통해 가뭄정보를 제공하고 있다 (기상청, 2004). 제공되는 가뭄지수의 경우 가뭄판단지수, PDSI, SPI, 강수량십분위 (Decile), 평균치비율 (Pertile of Normal, PN) 및 강수량효과비 등이 있으며, 각 정보는 일별로 제공된다. 이는 기록된 강수 및 기온 정보만을 이용하여 산정된 결과이며, 예측자료를 활용하여 가뭄을 사전에 대비할 수 있는 가뭄조기경보체제와 성격이 다르다.

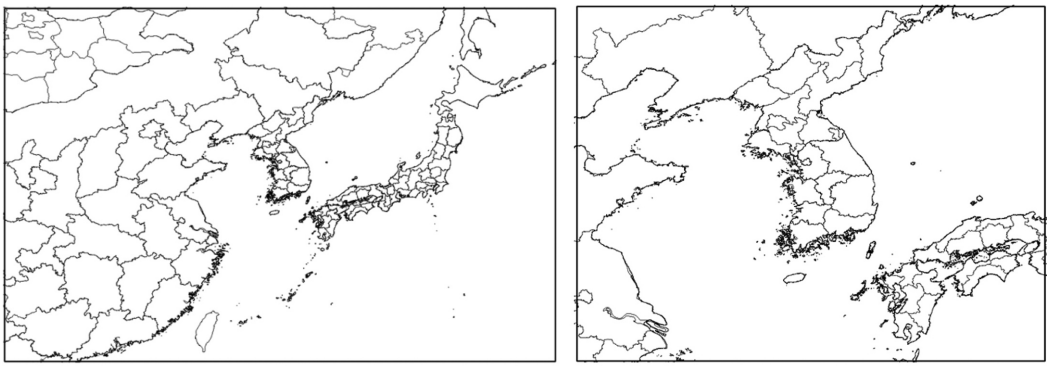
이에 본 연구에서는 기상관측 및 장기 기상예측정보를 이용한 동아시아한반도 수문정보 생산기술 개발과 실시간 가뭄 감시 및 전망 시스템 구축에 관한 기법을 제시하고자 한다. 본 연구의 2절에서는 시스템 구축에 대한 주요 기술들을 언급하고 3절에서는 시스템 구성 및 주요 기능에 대해 기술하고자 한다. 4절에서는 구축된 시스템으로부터 생산된 가뭄정보를 평가 및 검증한 사항에 대해 제시하고, 5절에서는 본 연구에서 개발한 주요 연구결과를 요약 제시하고자 한다.

2. 수문기상 및 가뭄정보 생산 기술

2.1. 대상영역 및 해상도

본 연구의 목적은 우리나라와 같이 몬순의 영향을 받는 동아시아 지역에 대한 물리적 기반의 기상 및 수문현상 모의를 통하여 가뭄 관리를 위한 정보를 실시간으로 제공할 수 있는 시스템을 개발하는데 있다. 이에 영역을 동아시아 및 한반도로 구분하였으며, 선정된 영역의 범위는 동아시아의 경우 위도 21.15~50.15°, 경도 104.40~149.65°, 한반도는 위도 30.40~43.15°, 경도 118.65~135.65° 위치한다. Fig. 1은 본 연구에서 채택된 영역을 도시한 것이다. 여기서, 동아시아 영역은 현재 기상청에서 수치예보에 활용하고 있는 전지구 통합모형인 UM (United Model)의 경계를 반영하였으며, 영역 내에 속한 국가는 러시아 일부를 포함하여 몽골, 중국, 북한, 남한, 대만 및 일본으로 총 7개 국가로 구성되어 있다.

해상도 결정은 기상 및 수문해석의 기초과정에 속하며, 특히, 여러 입력자료 구축에 있어 기준이 되는 중요한 사항이다. 이에 본 연구에서는 다음 절에 언



a) East Asia b) Korea Region

Fig. 1. East Asia and Korea Regions for Drought Monitoring & Prediction.

Table 1. The details of Regional UM configuration.

	East Asia	Korea
Horizontal dimensions	180 × 150	186 × 184
Horizontal resolution	0.246°	0.082°
Latitude of start point	–20.172°	–8.20°
Longitude of start point	335.40°	352.62°

급할 수문모형의 적정 해상도 범위 (Liang *et al*., 2004)와 입력자료 구축 및 모의시간 등을 고려하여 동아시아를 1/4°, 한반도를 1/8° 구분하였으며, 동아시아 지역내 총 10,571개, 한반도는 5,038개의 격자를 생산하였다.

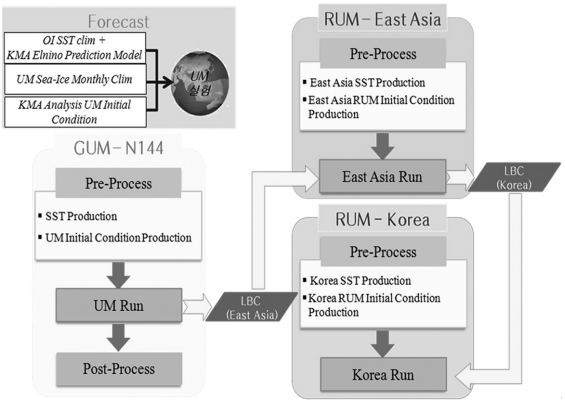


Fig. 2. Flow chart for Regional UM experiment.

2.2. 기상전망자료 생산

기상청은 영국 기상청과의 공동협력에 의하여 영국 기상청에 의해 개발된 수치예보 및 기후예측 모형인 UM (Unified Model)을 도입하였으며, 2010년 이후 현업 모형으로 운영하고 있다. 본 연구를 위하여 기상청에 구축되어 있는 전구 수평해상도 N144 (1.25 × 0.83°), 연직해상도 L38 (약 39 km)인 UM v7.4를 기반으로 동아시아와 한반도 영역에 대해 지역 규모 UM (Regional UM, RUM) v6.6을 기상청 슈퍼컴퓨터 3호기에 구축하였다. RUM의 영역 및 격자 정보는 Table 1과 같다. 영국 기상청에서 사용 중인 UM의 수평해상도는 4 km (악기상)이기 때문에 본 연구에서 설정한 한반도 지역에 대한 9 km 해상도 적분은 충분히 타당하다고 판단하였다.

Fig. 2는 UM 예측 적분 흐름도이다. UM의 예측을 위해서 경계조건으로 사용되는 SST (Sea surface temperature) 는 National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Earth System Research Laboratory (ESRL)에서 제공하는 OI (Optimal Interpolation) SST 월평균 기후값에 기상청 엘니뇨 예측모델에 의해 생산된 SST 아노말리를 더한 값을 사용하였다. 해빙자료는 UM Sea-Ice 월별 기후값 자료를 사용하였다. 초기장은 기상청 분석 UM 초기장을 입수하여 장기예측용 UM 초기자료로 재구성하여 사용하였다. 기상청 엘니뇨 예측모델 SST 아노말리 자료가 생산되어 있지 않은 경우에는 적분개시 전 달의 SST 아노말리 자료를 이용하도록 하였다. 그리고 전구 UM (Global UM, GUM) 적분을 위해 1° × 1° 생산되어 있는 SST는 N144 해상도에 맞게 변환하여 생성했다. RUM을 위한 SST 생성은 전구와 유사한 방식으로 전구 1° × 1° 자료를 동아시아와 한반도 영역으로 해상도를 변환하고 내삽하며, 초기장 생성 또한 전구와 동일한 방식으로 장기예측용 RUM 초기자료로 재구성하여 사용하였다. GUM과 RUM-East Asia 적분 수행 중에 각각 RUM-East Asia와 RUM-Korea의 측면경계조건 (Lateral Boundary Condition, LBC)이 생산된다. GUM과 RUM 모두 5개월 예측자료를

생산하며, GUM은 15분, RUM은 3분의 적분 간격 (time step)을 적용하였다. 수문모형의 입력자료로 사용되는 최고기온, 최저기온, 강수, 10 m 풍속 예측자료는 opengrads를 이용하여 수문모형의 격자에 맞게 내삽 처리된다.

2.3. 수문해석정보 생산

국외 지역에 대한 수문성분을 산정하기 위해서는 국가규모의 수문해석이 가능한 지표수문해석모형 (Land Surface Model, LSM)이 필요하다. 본 연구에서는 전 세계적으로 국가별 수문해석에 있어 그 적용성이 검증된 VIC (Variable Infiltration Capacity)모형을 선택하였다 (Liang, 1994). VIC 모형은 1994년 미국 University of Washington의 Dennis Lettenmaier 박사 연구팀에 의해 개발되었으며, 이미 국내에서도 그 적용성이 검증된바 있다 (손경환 등, 2010).

동아시아 및 한반도에 대한 LSM을 구축하기 위해서는 국내뿐만 아니라 국외지역에 대한 지형 및 장기간의 기상자료가 구축되어야 한다. 손경환 등 (2010)은 국내자료와의 비교분석을 통해 전지구 지형 및 기상자료의 가용여부를 평가한 바 있으며, 국내 자료와 비교할 경우 자료의 불확실성은 있으나, 기간별 (월, 계절 등) 해석을 수행한다면 활용성은 충분하다고 제시한 바 있다. 본 연구에서는 기존 연구 성과를 토대로 동아시아 지역에 대한 전지구 지형 및 기상자료를 수집하였으며, 수집된 자료는 DEM, 토지피복도, 토양도, 최고기온, 최저기온, 평균풍속 및 강수 자료이다. 여기서 DEM은 미국지질조사국 (United States Geological Survey, USGS)에서 제공하는 30" × 30" 간격의 자료, 토양자료는 국제연합식량농업기구 (Food Agriculture Organization, FAO)에서 제공하는 5' × 5' 해상도 기반의 자료, 토지피복도는 전지구를 대상으로 1 km 간격의 토지피복도를 제공하는 University of Maryland (UMD)의 토지피복 (Land cover) 자료를 활용하였다. 기상자료의 경우 세계기상통신망 (Global Telecommunication System, GTS)의 자료를 활용하였으며, 수집된 국외 기상관측소의 경우 러시아 47개소, 몽골 18개소, 중국 246개소, 북한 27개소, 일본 133개소 및 대만 6개소이다. 남한의 경우 국내 기상청 (Korea Meteorological Administration, KMA)에서 제공하는 ASOS (Automated Surface Observing System) 및 AWS (Automatic Weather System) 자료를 활용하였다.

수문해석을 통해 생산되는 수문정보는 자연유량, 증발산량 및 토양수분량 등이 있으며, 이는 구조물 또는 인간의 인위적인 영향을 받지 않은 자연 상태에서 생산되는 정보를 뜻한다. 모의 기간은 토양수분의 Warm Up 기간을 고려하여 1982년부터 모의가 시작되며, 각 격자별로 일단위 수문성분 값들이 생산된다.

2.4. 가뭄지수 생산

가뭄지수는 가뭄을 평가하는 비구조적인 수단 중의 하나로써 가뭄의 정도를 시·공간적으로 표현하고 그 크기와 강도를 정량적인 수치로 표현하기 위해 개발된 정보이다. 본 연구에서는 앞서 기술한 수문기상정보를 토대로 동아시아 및 한반도 영역에 가뭄지수를 생산하고자 하며, 특히, 자연 상태에서 발생하는 가뭄을 표현하고자 한다. 가용 가뭄지수로는 현재 기상청에서 제공하는 가뭄지수들 중에서 국내 적용성이 높은 기상청 가뭄판단지수 (Drought Decesion Index, DDI)와 SPI 및 PDSI를 선정하였으며 (기상청, 2007 ; 류재희 등, 2002), 기존에 손경환 등 (2011)이 개발한 수문성분 기반의 가뭄지수인 표준유출지수 (Standard Runoff Index, SRI)와 표준토양수분지수 (Standard Soil moisture Index, SSI)를 선정하였다. Table 2 는 각 가뭄지수의 범위별 가뭄심도를 종합하여 나타낸 것이다. 여기서, SPI 는 해당기간의 강수량 부족에 대한 확률적 특성을 적용하여 산정되는 지수이며, PDSI는 월단위 강수 및 온도자료를 활용하여 실제 수분공급이 기후적으로 필요한 수분공급보다 많고 적음의 기준으로 가뭄상태를 평가한다. 가뭄판단지수는 SPI, PDSI 및 평년치비율과 무강수 일수를 활용하여 가뭄을 판단하는 지수이며, 마지막 SRI와 SSI는 지표수문해석모형에서 산정되는 유출 및 토양수분량을 확률분석을 통해 생산되는 지수이다. 각 지수별 이론 및 구체적인 산정 방법에 대해서는 기상청 (2007) 및 손경환 등 (2011)을 참조하기 바란다.

Table 2. Classification of Drought Severity for the Range of Indices Values.

SPI, SRI, SSI, KMA Drought Index		PDSI	
Values	Drought Category	Values	Drought Category
$1.0 < Z$	Wet	$0.5 < Z$	Wet
$-1.0 < Z \le 1.0$	Normal	$-0.5 < Z \le 0.5$	Normal
$-1.5 < Z \le -1.0$	Moderate Drought	$-3.0 < Z \le -0.5$	Moderate Drought
$-2.0 > Z$	Severe Drought	$-3.0 > Z$	Severe Drought
$2.00 \ge Z$	Extremely wet	$4.00 \le Z$	Extremely wet

3. 실시간 가뭄 감시 및 전망 시스템

3.1. 시스템 구성

본 연구에서는 이전 절에서 기술된 주요 기술들을 토대로 실시간 가뭄 감시 및 전망 시스템을 개발하였다. 그 중 동아시아 영역에 대한 수문기상 및 가뭄 감시 · 전망 정보 생산 기술은 본 시스템의 가장 핵심적인 기술이며 국내에서는 최초로 개발되었다. 본 시스템은 동아시아 및 한반도 영역에 대한 수문기상 및 가뭄지수 정보를 기반으로 가뭄을 판단할 수 있는 정보를 제공하며, 웹 기반으로 시스템에 구축되어 사용자가 가뭄에 대한 현재의 상황과 앞으로의 전망을 신속하고 명확하게 판단할 수 있도록 관련된 모든 정보를 데이터베이스화 및 이미지화 하는 동시에 테이블로도 제공한다.

시스템 구성은 현재와 미래의 가뭄 정보를 영역별로 제공하기 위해 수문기상 및 가뭄지수 항목들을 크게 감시와 전망으로 구분되며, 영역은 동아시아, 한반도 및 남한으로 분류된다. 시스템에서의 자료 생산 및 활용 체계는 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 우선 기상자료는 일단위 강수, 최고기온, 최저기온 및 평균풍속이 활용되며, 감시에서는 기상관측 자료를, 전망에서는 UM모델로부터 생산된 예측자료를 활용하게 된다. 수문해석에서는 실시간으로 수집된 기상정보와 지형자료를 LSM 모의를 위해 각 영역별 적정 해상도로 변환되며, 생산되는 정보로는 일단위 자연유량, 토양수분량 및 증발산량이 있다. 가뭄정보로는 가뭄지수인 SPI (3), SPI (6), PDSI, SRI, SSI 및 가뭄판단지수가 있으며, 감시에서는 기상관측 및 LSM 결과를, 전망에서는 UM 및 LSM 전망 결과를 활용하여 산정된다.

자료생산 시간은 감시와 전망 모두 매일 생산되며,

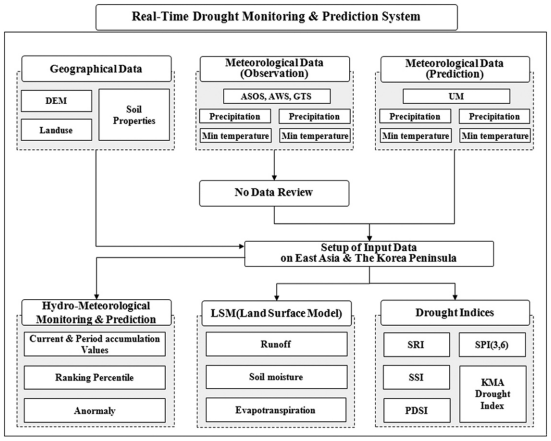


Fig. 3. Flow Chart for Development of Real-Time Drought Monitoring and Prediction System.

정보표출 시간단위는 감시의 경우 현재, 1개월 전, 2개월 전 및 3개월 전으로, 전망은 1개월 후, 2개월 후 및 3개월 후로 구분된다. 또한, 각 시간단위 별로 누적 및 평균 수문기상 및 가뭄지수 값들이 제공되며, 특히, 수문기상의 경우 평년비교 (아노말리 및 평년대비)값을 제시함으로써 현재의 가뭄 상황을 가뭄지수와 같이 볼 수 있도록 구현하였다.

3.2. 주요 표출 정보 및 기능

시스템 메뉴는 크게 가뭄의 개요, 가뭄감시/전망, 수문기상감시/전망 및 정보마당으로 구분된다. 가뭄의 개요는 가뭄의 정의와 가뭄지수들의 이론에 대한 항목을 포함한다. 가뭄감시/전망에는 가뭄감시 및 가뭄전망으로 구분되며, 각 항목별로 통합가뭄지수, 개별가뭄지수 및 지역별가뭄지수 정보를 포함한다. 수문기상 감시/전망에서도 크게는 수문기상감시 및 수문기상전망으로 구분되며, 통합보기, 자연유량, 토양수분량, 증발산량, 강수량, 최고기온 및 최저기온 정보를 포함한다. 정보마당은 시스템 개요, 국내외 가뭄관련기관 사이트 및 지형자료 등의 여러 기타 정보들을 제공한다. Fig. 4는 본 시스템에서 제공하는 주요 정보를 나타낸 것이며, 각 구성 별 설명은 다음과 같다.

Fig. 4(a)는 실시간 가뭄 감시 및 전망 시스템의 메인 화면으로써 4개의 이미지가 표출된다. 좌상단 그림은 현재의 가뭄판단지수, 좌하단은 현재의 자연유량, 우상단은 1개월 및 3개월 후의 가뭄판단지수, 우하단에는 예측자연유량를 의미한다. 이는 가뭄 및 수문기상의 상황을 동시에 제공함에 따라 사용자가 현재 및 앞으로의 가뭄상태를 메인 화면에서 전반적인 상황을 판단할 수 있도록 구성한 것이며, 각 이미지의 우측에는 기간 및 영역설정 버튼을 두어 사용자가 원하는 기간 및 영역선택을 할 수 있도록 되어 있다. Fig. 4(b)는 가뭄감시/전망의 개별가뭄지수 항목으로 가뭄을 판단할 수 있는 모든 지수정보인 가뭄판단지수, SPI (3), SPI (6), SRI, SSI 및 PDSI를 선택 영역에 대하여 한눈에 확인이 가능하다는 특징이 있다. 따라서 사용자가 원하는 가뭄 지수를 선택하면 현재의 가뭄 정도를 분포도로 확인이 가능하며, 원하는 영역을 선택할 경우 해당 영역에 대한 가뭄정보가 표출된다. Fig. 4(c)는 가뭄감시/전망의 지역별가뭄지수 항목으로 선택한 영역에 대하여 현재의 가뭄정보와 특정 날짜의 과거 가뭄정보를 비교 및 분석하기 위하여 범례에 따른 분포도, 가뭄면적비 (%) 그래프, 시계열 테이블을 모두 제공하는 항목이다. 또한, 정보표출 영역을 동아시아, 한반도, 남한에서 유역 및 행정구역별로 구분하여 보다 세분화된 지역을 대상으로 분석이 가능하도록 하였다. Fig. 4(d) 수문기상 감시/전망에 수문기상 감시의 통합보기 항목으로 좌측에는 자연

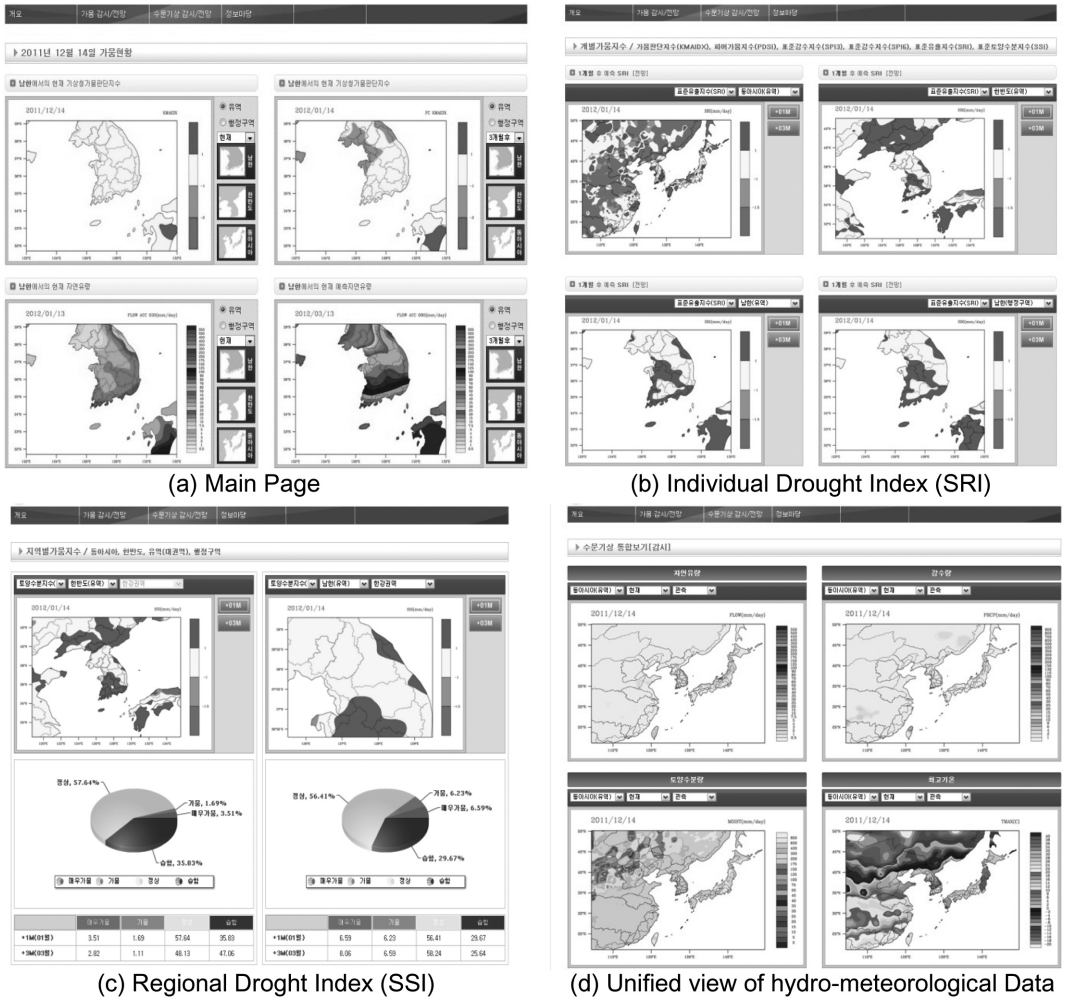


Fig. 4. The Main Information on the Developed System.

유량, 토양수분량 및 증발산량, 우측에는 강수량, 최고기온 및 최저기온 순으로 정보가 제공된다. 감시의 경우 현재의 수문기상 값과 과거 3개월 이전의 누적값이 표출되며, 특히 해당기간의 과거 30년 이상의 자료와의 비교를 통해 아노말리 및 평년대비 값을 각 항목 및 기간별로 제공한다. 따라서 사용자가 선택하는 정보에 따라 각 기간별 대상영역에 대한 정보가 변경된다. 전망에서는 기본 1개월 및 3개월 이후로 구분되며, 정보제공의 형식은 감시와 동일하다. 또한, 상세 팝업창을 통해 수문기상 정보의 세부적인 정보를 확인 할 수 있도록 하였으며, 선택영역에 대한 분포도, 시계열 그래프 및 테이블로 권역별 수문기상 정보를 제공하고 있다.

이와 같은 각 해석 정보들은 모두 데이터베이스 기반으로 입력되며 매일 갱신된다. 시스템을 통하여 사용자는 웹 브라우저를 통해 시스템에 접속하여 실시간으로 표출된 수문기상 및 가뭄 자료를 검색할 수 있다.

4. 가뭄정보 생산 및 검증

4.1. 과거 가뭄기록 조사

가뭄피해의 경우 그 특성상 시작과 끝을 알기가 힘들뿐 아니라 피해지역을 정량적으로 제시하기가 어려워 평가에 많은 불확실성이 따르게 된다. 이로 인해 가뭄평가의 경우 여러 가뭄지수를 산정하고 과거 피해사례와의 비교를 통해 해당 가뭄지수의 재현정도를 분석하는 방법이 주로 활용된다. 본 연구에서는 그동안 국내에서 발생한 가뭄기록을 수집하였으며, 1990년부터 2009년까지 신문 또는 메스컴 자료와 “가뭄기록 조사 보고서” (건설교통부, 1995), “2001 가뭄기록 조

Table 3. Drought Impact Period and Province (19912009).

Year	Month	Damaged Province	Remarks
1992	06	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
	07	entire region	
	08	-	×
1994	07	entire region	○
1995	05	-	×
1995	07	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam Chungbook, Chungnam	○
	08	Jeonbook, Chungbook, Chungnam, Kyunggi	
	09	-	×
1996	11	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
1997	03	-	×
1997	10	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
	12	-	×
2000	02	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	○
	06	-	×
2001	04	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam	
	05	Kyunggi, Chungbook, Chungnam, Gangwon	○
	06	entire region	
	06	-	×
2001	09	Kyunggi, Chungbook, Chungnam, Gangwon	○
	12	-	×
2006	11	entire region	○
2007	01	-	×
2008	09	Jeonbook, Jeonnam, Kyungbook, Kyungnam Gangwon	○
2009	04	-	×

(○) : Drought Occurrence, (×) Drought End

사 보고서“ (건설교통부, 2002) 자료를 토대로 조사하였다. Table 3은 연도별 피해기간, 피해지역, 가뭄발생 및 해갈에 대해 각각 구분하여 나타낸 것이다. 가뭄사례를 수집하는 과정에서 문헌 및 신문기사에서 가뭄을 표현하는 방법 대부분이 행정구역별로 피해지역을 나타냄에 따라 본 연구에서도 기록과 유사한 행정구역 단위로 가뭄피해지역을 구분하여 사용하였다. 수집된 가뭄기록들을 살펴보면 국내의 경우 평균 2년에 한번 주기로 지역별 또는 전국적으로 크고 작은 가뭄을 겪고 있는 것으로 나타났으며, 그 중에서 대표적인 가뭄사상으로는 1990년대의 경우 1994, 1995년, 2000년대에는 2001, 2008, 2009년으로 나타났다.

4.2. 가뭄정보 생산 및 평가

4.2.1. 시계열 평가

본 연구에서는 시스템에서 생산된 지수들을 중심으로 시계열에 따라 기록된 가뭄사상을 적절히 반영하는가에 대해 평가하였다. 또한, 해당 기간에 수문기상 정보들 중 가뭄 발생과 관계가 깊은 강수, 유출 및 토양수분자료를 토대로 평년대비 값을 산정하여 가뭄정보로의 활용성을 평가하였다. Fig. 5는 1991년부터 2009년까지 월별로 산정된 가뭄판단지수, SPI (3), SPI (6), PDSI, SRI 및 SSI와 강수, 유출 및 토양수분 값을 시계열에 따라 도시한 것이며, 그림에서 ○와 ×는 Table 3에 제시한 실제 기록된 가뭄사상에서의 가뭄발생(○) 및 해갈(×)을 의미한다. 또한, 강수, 유출 및 토양수분 그림에서의 회색 점은 각 월별 평년값을 의미하며, 가뭄지수 그림에서 회색 실선은 각 지수별 가뭄 기준선을 뜻한다.

우선, 수문기상 정보인 월별 강수, 유출 및 토양수분 결과를 살펴보면 각 사상별로 가뭄 기간에서는 각각의 성분들이 평년 이하로 나타났으며, 특히 가뭄해갈에서는 평년보다 높아 가뭄관리에 있어 적용성이

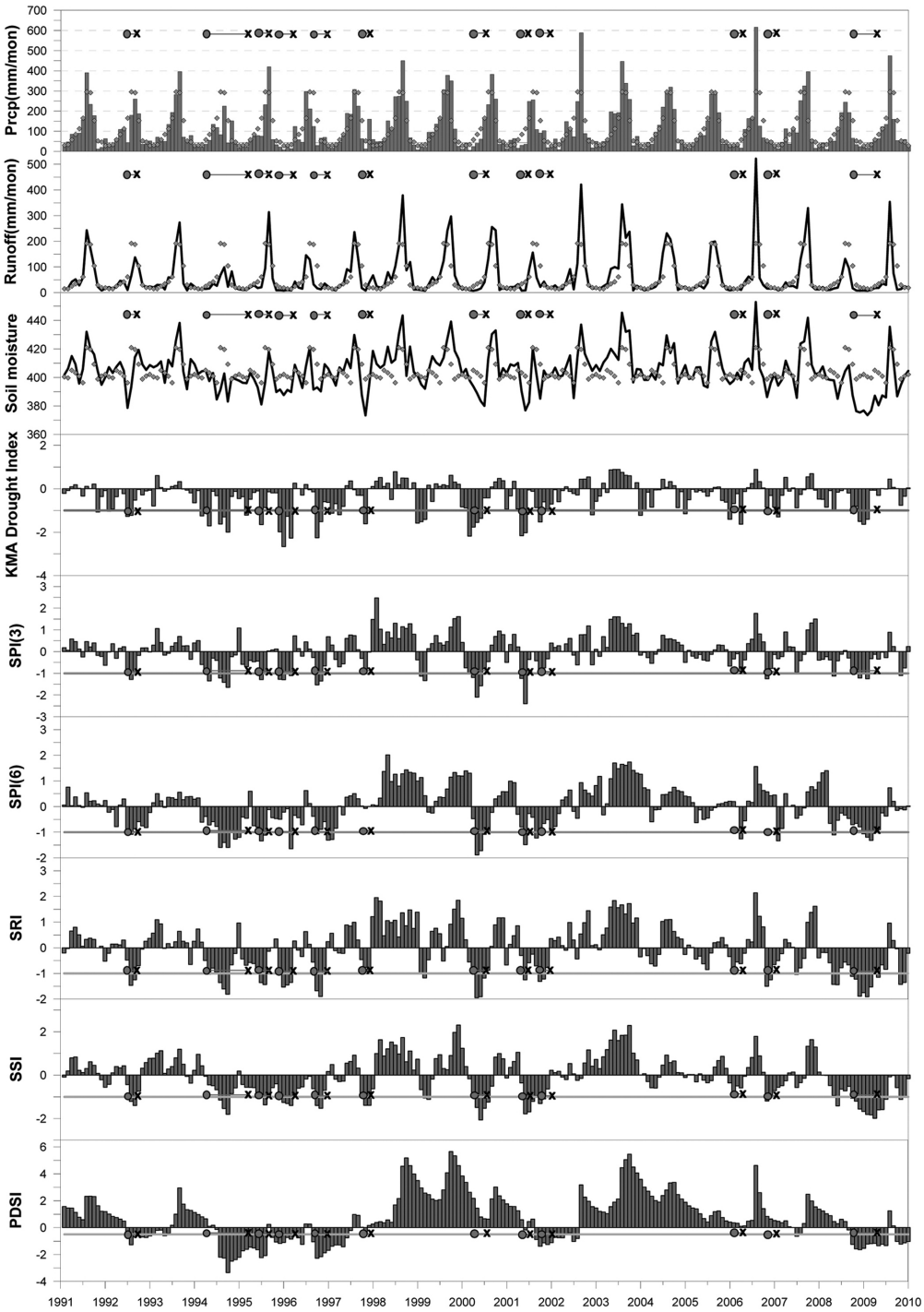


Fig. 5. Temporal Analysis of Drought Indices (1991~2009 year)**.**

높은 것으로 나타났다. 6개 가뭄지수에 대한 평가에서는 SPI (3), SRI 및 SSI가 1994~1995년 사상을 제외하고는 가뭄을 적절히 재현하는 것을 볼 수 있다. 그 중 SRI의 경우 단기가뭄 사상인 2001년과 2008~

Table 4. Drought Indices and Hydro-Meteorological Data for Each Drought Year.

Drought Period		KMA Drought Index	SPI(3)	SPI(6)	SRI	SSI	PDSI	Precipitation Percentile of Normal year (%)	Runoff Percentile of Normal year (%)	Soil moisture Percentile of Normal year (%)
Year	Month									
2001	03	−0.93	0.22	−0.30	0.86	1.05	1.25	14.25	63.39	54.50
	04	−2.16	−1.23	−0.79	−1.10	−0.35	0.58	16.12	9.47	14.99
	05	−2.03	−2.40	−1.48	−1.25	−1.78	−0.17	17.01	11.21	11.67
	06	−0.05	−0.36	−0.27	−0.58	−1.69	0.45	75.07	62.12	24.49
2008	09	−1.12	−0.79	−0.70	−1.11	−1.06	−1.24	26.67	14.84	18.94
	10	−0.81	−0.85	−0.65	−1.22	−1.20	−1.58	41.73	23.07	19.83
	11	−1.50	−1.21	−0.79	−1.89	−1.56	−1.64	29.55	15.37	16.19
	12	−1.64	−1.00	−1.06	−1.75	−1.67	−1.55	44.15	18.82	17.93
2009	01	−1.41	−1.25	−1.19	−1.91	−1.81	−1.22	28.75	13.47	11.34
	02	−0.07	−0.32	−1.32	−1.53	−1.83	−1.18	61.82	31.05	17.96
	03	−0.07	−0.12	−0.93	−1.01	−1.99	−1.16	52.01	38.50	25.82
	04	−0.30	−0.34	−0.90	−0.67	−1.60	−1.34	36.72	50.72	19.38

Table 5. Drought Division Table on Drought Occur & Termination.

Verifying analysis		Drought Index	
		Occur	Termination
Observed Drought Event	Occur	Z(zero)	F(false)
	Termination	M(miss)	H(hit)

2009년 사상에서 가뭄의 시작과 지속 및 해갈을 적절히 표현하였으며, SPI (3)은 2008~2009년 사상에서 중간에 가뭄이 해갈된 것으로 나타나 보도된 사항과 일치하지 않는 것으로 확인되었다. 가뭄판단지수의 경우 가뭄이 아닌 기간에서도 가뭄이라 표현하는 것으로 나타났으며, SPI (6)는 단기간의 가뭄 사상을 재현하지 못하는 구간이 일부 존재하였다. PDSI는 지수의 특성상 장기간의 가뭄을 감지하는데 유용하였으나 (류재희 등, 2002), 가뭄 해갈을 적절히 표현하지 못하는 단점이 있다.

Table 4는 2000년도 이후 국내에서 극심했던 주요 가뭄사상 (2001년 및 2008~2009년)에 대해 전체 산정 지점별 가뭄심도와 강수, 유출 및 토양수분의 평년대비 값을 평균하여 지속기간별로 나타낸 것이다. 우선 2001년의 경우 가뭄이 4월에 시작하여 6월 중순에 해갈된 사상으로 단기간 발생한 가뭄에 속한다. 이에 가뭄판단지수는 4월에 −2.16에서 6월 −0.05로 가뭄의 발생과 해갈을 적절히 나타냈으며, SPI (3) 및 SRI 모두 동일한 것으로 나타났다. SSI는 5월에 가뭄이 발생하여 6월까지도 지속된다고 하였으며, PDSI는 가뭄을 전혀 감지하지 못한 것으로 나타났다. 2008년 가뭄사상의 경우 피해기간은 2008년 9월을 시작으로 2009년 4월 초에 해갈된 사상으로, SRI 및 SSI 모두 해당기간에 대한 가뭄상황을 적절히 반영하는 것으로 확인되었으며, 가뭄판단지수와 SPI (3)는 가뭄이 11월에 시작하여 2월에 해갈된 것으로 표현하였으며, 가뭄의 시작 및 종료를 적절히 해석하지 못한 것을 알 수 있다. PDSI는 대부분의 값이 −0.5이하로 가뭄임을 나타내었으나, 가뭄이 해갈된 이후에도 가뭄이 지속되어 기록된 사항을 반영하지 못한 것으로 나타났다.

4.2.2. 통계적 평가

본 연구에서는 가뭄지수의 객관적인 평가를 위해 통계적 가뭄지수 평가를 수행하여 시스템에서 생산되는 가뭄지수들의 적용성을 검증하였다. 통계적 가뭄지수 평가 방법은 기존에 강수예보모델의 검증을 위해 강우 분할표에 기초한 강수 발생의 유무에 따라 평가를 수행한 사례가 있으며 (윤성심 등, 2011), 본 연구에서는 이를 가뭄에 적용하여 분석하였다 (Table 5).

평가방법은 정확도 (Acuuracy, ACC) 및 편이 (Bias score, Bias)로 구분되며, ACC는 가뭄발생을 유/무로 했을 경우 실제 관측이 적중한 경우와 그렇지 못한

Table 6. Statistical Analysis Results Using Drought Indices.

Drought Indices	ACC	Bias
KMA Drought Index	0.79	1.10
SPI(3)	0.81	0.66
SPI(6)	0.79	0.65
PDSI	0.77	1.60
SRI	0.85	0.89
SSI	0.84	0.95

경우에 대한 적중평가비율로서 식(1)을 이용하여 산정된다. 산정 시 0에서 1의 값을 가지며 완전한 값은 1을 의미한다. Bias는 관측된 가뭄사상과 가뭄지수를 비교한 것으로 만약 1의 값을 가지면 관측된 가뭄사상과 가뭄지수 모두 동일하지만 동일 시간에서 동시에 발생 하는지는 알 수 없다. 다만, 산정 시 1보다 작을 경우 가뭄지수가 가뭄을 과소 추정한 것으로 판단하며, 1보다 클 경우 과대 추정한 것으로 판단한다. Bias의 산정은 식(2)를 이용하여 산정된다. 본 연구에서는 이 두 가지 검증 스코어와 가뭄분할 표를 기초하여 각 지수별 평가를 수행하였다.

$$ACC = \frac{Z+H}{N} \tag{1}$$

$$Bias = \frac{F+H}{M+H} \tag{2}$$

이 두 가지 검증 스코어와 가뭄분할 표를 기초하여 1991년부터 2009년까지 각 지수별 적용성 평가를 수행하였다 (Table 6). 평가결과 ACC는 SRI, SSI 및 SPI(3)가 가장 높게 산정되었다. Bias는 SSI가 가장 1에 근접하였으며, SPI (3)과 SPI (6)는 전체 지수들 중에서 가뭄을 과소 추정하는 경향이 있는 것으로 나타났다. 반면, PDSI는 1.60으로 가장 높았으며, 가뭄을 과대 추정하는 것으로 나타나 전체 지수들 중 활용성이 가장 낮은 것으로 확인되었다. 이와 같이 본 시스템에서 생산되는 가뭄지수들의 활용성을 분석한 결과 SRI, SSI, SPI (3), 가뭄판단지수, SPI (6) 및 PDSI 순으로 나타났다. 수문해석을 통해 산정된 가뭄지수인 SRI 및 SSI가 가장 높은 것으로 나타났으며, 나머지 지수들 또한 활용가치가 있는 것으로 판단된다. 다만, 몇몇 지수가 가뭄을 적절히 재현한다고 해서 이를 절대적인 지표로 결정하기는 힘들며, 추후 이러한 지수들을 대표할 수 있는 통합가뭄지수를 개발에 관한 연구가 수행되어야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구에서는 동아시아 영역을 기반으로 한 실시간 수문기상 및 가뭄 감시 · 전망 시스템을 구축하였으며, 시스템의 주요 기술, 구성 및 기능에 대해 설명하고 생산된 가뭄정보들의 적용성을 평가하였다. 본 연구에서 분석된 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 본 시스템의 핵심 기술인 실시간 동아시아 수문기상 및 가뭄정보 생산 기술을 제공하였다. 시스템에 활용되는 기상자료는 강수, 최고기온, 최저기온 및 평균풍속으로, 가뭄 감시에는 기상관측자료가, 가뭄 전망에는 UM 자료가 활용된다. 수문정보는 지표수문해석모형인 LSM을 활용하였으며, 지형자료 구축 후 동아시아 영역에 대한 유출, 증발산 및 토양수분량을 생산한다. 가뭄정보는 기상청 가뭄판단지수, SPI (3), SPI (6), PDSI 그리고 수문성분인 유출 및 토양수분을 이용하여 산정된 SRI 및 SSI를 활용하였다.

2) 본 연구에서 개발된 시스템에 대한 개요 및 주요 기능을 제시하였다. 시스템 구성은 동아시아, 한반도 및 남한을 대상으로 수문기상 감시 · 전망 및 가뭄 감시 · 전망으로 구분된다. 본 시스템은 웹 기반으로 구축되어 모든 정보를 데이터베이스화 및 이미지화 하는 동시에 테이블로도 제공한다. 주요 기능으로는 메인화면에서 현재 및 미래의 가뭄상태를 객관적으로 판단할 수 있도록 구성하였으며, 각 요소들을 통합 및 지역별로 검색이 가능하도록 제시하였다. 각 정보들은 매일 갱신되며, 사용자는 웹 브라우저를 통해 시스템에 접속하여 실시간으로 표출된 수문기상 및 가뭄자료를 검색할 수 있다.

3) 본 시스템에서 생산되는 가뭄정보의 적용성을 검증하였다. 과거 가뭄기록들을 수집하고 수문기상 정보에서 강수, 유출 및 토양수분량과 6개의 가뭄지수들을 이용하여 적절성을 평가하였다. 평가방법은 시계열 평가 및 통계적 평가를 수행하였으며, 생산된 가뭄지수들 모두 가뭄관리에 적절한 것으로 나타났다. 또한, 수문성분기반의 SRI 및 SSI는 여러 지수들 중에서도 정확도가 가장 높은 것으로 나타났으며, 수문기상 정보의 경우 평년과 비교하였을 경우 가뭄기간에서 평년보다 낮게 표현되어 가뭄 정보로의 활용가치가 충분한 것으로 판단된다.

국내 각 가뭄관리 기관에서는 그 동안 다양한 가뭄정보를 생산 및 제공해 왔으며, 현재도 유용한 정보를 제공하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 본 시스템은 국내 최초로 동아시아 지역에 대한 물리적 기반의 기상 및 수문현상 모의를 통하여 가뭄 감시와 전망 정보까지 실시간으로 제공할 수 있는 시스템을 개발하였다는 측면에서 그 가치가 충분히 높다고 판단된다. 다만, 다양한 가뭄지수들을 대표할 수 있는 통합가뭄지수의 개발은 배제할 수 없는 상황이다. 또한, 현 시스템은 가뭄감시에 대한 적용성 평가는 이루어졌으나 전망에 대해서는 검증되지 않은 실정이며,

UM 전망자료의 지속적인 확보를 통하여 가뭄전망 자료의 실효성을 검증하는 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시 · 예측 및 국가정책지원 강화사업 (RACS_2010-4601)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

건설교통부, 1995: 가뭄기록조사 보고서

_____, 2002: 2001년 가뭄기록조사 보고서

기상청, 2007: 산업기상지수 산출기술 개발

류재희, 이동률, 안재현, 윤용남, 2002: 가뭄평가를 위한 가뭄지수의 비교 연구. *한국수자원학회논문집*, **35(4),** 397-410.

손경환, 이종대, 배덕효, 2010: 전지구 수문해석 모형의 국내 적용성 평가. *한국수자원학회논문집*, **43(12),** 1063-1074.

_____, 배덕효, 정준석, 2011: 지표수문해석모형을 활용한 국내 가뭄해석 적용성 평가. *한국수자원학회논문집*, **40(12),** 1063-1074.

윤성심, 배덕효, 2010: 이류모델을 활용한 초단시간 강우예측의 적용성 평가. *한국수자원학회논문집*, **43(8),** 695-707.

Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges, 1994: A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. Journal of Geophysical Research, **99(7),** 14415-14428.

_____, G. Jianzhong, and L. Ruby Leung, 2004: Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations. *Journal of Hydrology*, **298(1-4),** 287-310.

Mckee, T.B., N. J. Doesken, and J. Kleist, 1993: The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. *8th Conference on Applied Climatology*, 17-22 January, Anaheim, California.

Palmer, W. C., 1965: Meteorological drought, Research paper. **45**, U.S. Weather Bureau.

Trenberth, K. E., J. T. Overpeck, and S. Solomon, 2004: Exploring drought and its implications for the future. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, **85(3),** 27-27.