

실시간 앙상블 가뭄전망정보 생산 체계 구축 및 평가

배덕효^{1),*} · 안중배²⁾ · 김현경³⁾ · 김현애³⁾ · 손경환¹⁾ · 조세라²⁾ · 정의석⁴⁾

¹⁾세종대학교 건설환경공학과
²⁾부산대학교 지구환경시스템학부
³⁾기상청
⁴⁾(주)핵코리아

(접수: 2012년 12월 28일, 게재확정일: 2013년 1월 25일)

Development & Evaluation of Real-time Ensemble Drought Prediction System

Deg-Hyo Bae^{1),*}, Joong-Bae Ahn²⁾, Hyun-Kyung Kim³⁾, Heon-Ae Kim³⁾,
Kyung-Hwan Son¹⁾, Se-Ra Cho²⁾, Ui-Seok Jung⁴⁾

¹⁾Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

²⁾Division of Earth Environmental System, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

³⁾Korea Meteorological Administration, Seoul 156-725, Korea

⁴⁾Hydrology Engineering & Consulting Center, Korea Inc., Seoul 150-700, Korea

(Received: 2 December 2012, Accepted: 25 January 2013)

Abstract The objective of this study is to develop and evaluate the system to produce the real-time ensemble drought prediction data. Ensemble drought prediction consists of 3 processes (meteorological outlook using the multi-initial conditions, hydrological analysis and drought index calculation) therefore, more processing time and data is required than that of single member. For ensemble drought prediction, data process time is optimized and hardware of existing system is upgraded. Ensemble drought data is estimated for year 2012 and to evaluate the accuracy of drought prediction data by using ROC (Relative Operating Characteristics) analysis. We obtained 5 ensembles as optimal number and predicted drought condition for every tenth day *i.e.* 5th, 15th and 25th of each month. The drought indices used are SPI (Standard Precipitation Index), SRI (Standard Runoff Index), SSI (Standard Soil moisture Index). Drought conditions were determined based on results obtained for each ensemble member. Overall the results showed higher accuracy using ensemble members as compared to single. The ROC score of SRI and SSI showed significant improvement in drought period however SPI was higher in the demise period. The proposed ensemble drought prediction system can be contributed to drought forecasting techniques in Korea.

Key words: Real-time, ensemble drought prediction, Standard Precipitation Index (SPI), Standard Runoff Index (SRI), Standard Soil moisture Index (SSI), Relative Operating Characteristics (ROC)

1. 서 론

*Corresponding Author: Deg-Hyo Bae, Department of Civil and Environmental Engineering, Sejong University, Seoul 143-747, Korea.

Phone : +82-2-3408-3814, Fax : +82-2-3408-4332
E-mail : dhbae@sejong.ac.kr

가뭄은 여러 측면에서 일반 자연재해와 그 성격이 다르다. 가뭄은 홍수와는 달리 단기적으로는 수개월, 장기적으로는 수년간 지속되며, 공간적으로는 광역적으로 분포되는 특성이 있다. 따라서 가뭄을 감지하

더라도 구체적인 발생 시기, 장소 및 원인을 규명하는 것이 어려우며, 가뭄이 해갈된 이후에도 그 과급 효과가 수개월 또는 수년간 나타나기도 한다. 이러한 이유로 기상 및 수자원 전문가들은 가뭄을 판단함에 있어 많은 어려움을 겪는 것이며, 사전 대비가 쉽지 않은 재해로 알려져 있다. 그러나 이런 가뭄의 특징은 가뭄관리에 장점이 되기도 한다. 다시 말해 가뭄은 적시에 경보해야 하는 홍수와 달리 진행속도가 느려 시간적으로 대처할 여유가 다소 있기 때문에 비록 진행 중일지라도 초기에 이를 감지할 수 있다면 피해를 최소화할 수 있다는 것이다. 결국 앞으로의 가뭄 관리 업무는 기상, 수자원 전문가 및 국민들이 가뭄을 사전에 판단할 수 있도록 전환되어야 할 것이며, 이를 위해서는 가뭄을 예보할 수 있는 기술이 개발되어야 할 것이다.

미국과 같은 선진국에서는 기상모델과 수문해석모델의 연계를 통하여 다양한 가뭄전망정보를 생산 및 제공하고 있다. 그 예로 미국 CPC (Climate Prediction Center)에서는 기상수치모델인 CFS (Coupled Forecast System)를 이용하여 30개 이상의 앙상블 멤버를 생산하고 정량화된 정보를 생산하고 있다 (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/Drought/>). 또한, 생산된 정보는 웹 기반으로 국민들이 바로 확인할 수 있도록 관리하고 있으며, 향후 발생할 수 있는 가뭄전망 결과를 가시화하여 제공하고 있다. 이는 전망정보의 생산 및 개선을 위한 지속적인 노력과 가뭄 전망정보가 가지는 가치 및 불확실성을 제시함으로써 사용자에게 이해를 도모하였기 때문에 가능한 것이다.

국내의 가뭄관리 기관으로는 기상청, 소방방재청, 한국수자원공사 및 농어촌공사 등이 있으며, 각 기관 별로 그 목적에 맞게 가뭄정보를 생산 및 제공하고 있다. 그러나 대부분 기상관측자료 기반의 가뭄지수 산정을 통하여 가뭄 감시업무에 국한되어 있는 실정이다. 그 예로 기상청의 경우 2002년부터 우리나라를 중심으로 각 지역별 가뭄지수를 산정하여 웹 사이트를 통해 가뭄정보를 제공하고 있다 (기상청, 2007). 제공되는 가뭄지수의 경우 가뭄판단지수 (Decision Drought Index, DDI), 파머가뭄지수 (Palmer Drought Severity Index, PDSI), 표준강수지수 (Standard Precipitation Index, SPI), 강수량십분위 (Decile), 평균치비율 (Pertile of Normal, PN) 및 강수량효과비 등이 있으며, 각 정보는 일별로 제공된다. 이는 관측된 강수 및 기온 정보만을 이용하여 산정된 결과이며, 기상 예측자료를 활용하여 가뭄을 사전에 대비할 수 있는 가뭄전망체제와는 그 성격이 다르다.

한편, 기상청에서는 2011년 “기후변화에 대응하기 위한 기후·수문 조기경보체계 개발 및 평가”의 연구 성과로 실시간 가뭄감시 및 전망 시스템을 개발하

였다. 이 시스템은 국내 최초로 한반도를 포함한 동아시아 지역에 대한 물리적 기반의 기상 및 수문현상 모의를 통하여 가뭄감시와 전망정보를 생산·제공하고 있으며, 앞으로도 지속적인 관심과 투자를 계획하고 있어 향후 국내 가뭄전망에 있어 중추적인 역할을 할 것으로 기대되고 있다 (백덕효 등, 2012). 그러나 현재의 시스템은 개발이 아직 초기 단계여서 모의시간, 자료처리, 표출시간 및 저장용량 등에서 개선해야 할 사항이 많은 실정이다. 시스템에서 생산되는 가뭄정보의 경우 UM (Unified Model)의 단일 기상전망자료와 수문해석모형을 연계하여 가뭄지수를 생산한 것으로 앙상블 체계의 현 기상청 현업에 비해 불확실성이 높으며, 전망정보에 대한 정확도가 평가되지 않아 이 정보에 대한 신뢰성을 가늠할 수 없는 실정이다.

이에 본 연구에서는 기 개발된 시스템의 기술적인 문제점들을 보완하고, 가뭄전망 체제를 단일에서 앙상블 체제로 전환과 생산된 가뭄전망정보에 대한 평가 결과를 제시하고자 한다. 본 연구의 2장에는 현 시스템에 대한 소개 및 최근에 개선된 사항을 기술하고자 한다. 3장에는 가뭄전망 시스템의 단일멤버 체계에서 앙상블멤버 체계로 전환하고 이를 평가 및 검증한 사항에 대해 제시하고, 4장에는 본 연구에서 개발한 주요 연구결과를 요약 제시하고자 한다.

2. 실시간 가뭄감시 및 전망 시스템 개선

2.1. 실시간 가뭄감시 및 전망 시스템

기상청은 기상학적 및 수문학적 가뭄지수를 활용하여 한반도와 동아시아 지역의 가뭄을 감시·전망하고, 유관기관의 물 관리 정책지원을 위한 정보 제공을 목표로 실시간 가뭄감시 및 전망 시스템을 개발하였다.

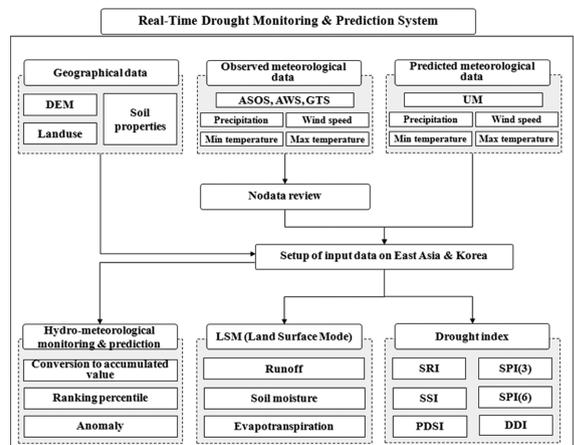


Fig. 1. Flow chart for development of real-time drought monitoring and prediction (Bae et al., 2011).

이 시스템은 크게 기상, 수문 및 가뭄해석 3부분으로 구분되며, 구체적인 자료생산 체계는 Fig. 1과 같다. 우선 기상자료는 기상관측 및 기후예측모델인 UM 모델로부터 생산된 일 단위 강수, 최고기온, 최저기온 및 평균풍속이 활용되며, 수문해석에서는 이러한 기상정보와 기 구축된 지형자료를 LSM (Land Surface Model) 모의를 위해 각 영역별 적정해상도로 변환된다. 여기서, UM은 영국 기상청에 의해 개발된 것으로 현재 우리나라 기상청과 영국 기상청의 공동협력에 의하여 2010년 이후 현업 모형으로 운영되고 있다. 또한, LSM은 동아시아와 같이 넓은 대륙을 대상으로 수문성분을 산정하기 위해 개발된 분포형 전구수문해석모델로서 이미 국내 및 동아시아지역에서도 그 적용성이 검증된 바 있으며 (손경환 등, 2010), 가뭄감시에서도 활용성이 높은 것으로 제시된 바 있다 (손경환 등, 2011). 수문해석으로부터 생산되는 정보로는 일단위 자연유량, 토양수분량 및 증발산량이 있으며, 현재 이 정보들은 안정적인 이미지 생산 및 표출을 위해 시스템 내 모듈을 개발 중에 있다. 가뭄 정보로는 구축된 기상 및 수문정보로부터 기상학적 가뭄지수인 SPI, PDSI, DDI와 수문학적 가뭄지수인 표준유출지수 (Standard Runoff Index, SRI) 및 표준토양수분지수 (Standard Soil moisture Index, SSI)가 생산된다 (손경환 등, 2011).

이 자료들은 모두 대상영역인 한반도 및 동아시아 영역에 제공되며, 영역 구분은 Fig. 2와 같이 동아시아의 경우 동경 104.40°~149.65°, 북위 21.15°~50.15°, 한반도는 동경 118.65°~135.65°, 북위 30.40°~43.15°로 현재 기상청에서 지역의 수치예보에 활용하고 있는 지역통합모형 (Regional Unified Model, RUM)의 경계를 반영하였다. 영역 내에 속한 국가는 러시아 일부를 포함하여 몽골, 중국, 북한, 남한, 대만 및 일본으로 총 7개 국가로 구성되어 있다. 또한, 수문모형의 적정 해상도 범위 (Liang et al., 2004)와 입력자료 구축 및 모의시간 등을 고려하여 해상도 (resolution)를

동아시아 1/4°로, 한반도 1/8°로 구분하였으며, 동아시아 지역 내 총 10,571개, 한반도는 5,038개의 격자별로 자료가 생산된다.

이 시스템은 동아시아 및 한반도 영역에 대한 수문 기상변수 및 가뭄지수 정보를 기반으로 가뭄을 판단할 수 있는 정보를 제공하며, 웹 기반으로 시스템이 구축되어 사용자가 가뭄에 대한 현재 상황과 앞으로의 전망을 신속하고 명확하게 판단할 수 있도록 관련된 모든 정보를 데이터베이스화 및 이미지화하는 동시에 테이블로도 제공한다. 시스템 구성은 현재와 미래의 가뭄 정보를 영역별로 제공하기 위해 가뭄지수의 항목들을 크게 감시와 전망으로 구분되며, 영역은 동아시아, 한반도 및 남한으로 분류된다. 자료생산 시간은 감시와 전망 모두 매일 생산되며, 정보표출 시간단위는 감시의 경우 현재, 1개월 전, 2개월 전 및 3개월 전으로, 전망은 1개월 후, 2개월 후 및 3개월 후로 구분된다. Fig. 2는 본 시스템에서 제공하는 주요 정보들 중 메인화면과 개별가뭄지수 (전망) 화면을 예로써 나타낸 것이다. 우선 메인화면에서는 기상청 대표 가뭄지수인 DDI를 기반으로 동아시아와 한반도 및 남한 영역에서의 유역 혹은 행정구역별 현재시점의 지수정보를 분포도, 그래프, 테이블 등의 다양한 형식으로 제공하고 있다. 그림 좌상단의 분포도는 가뭄의 정도에 따라 1.0 이상에서 -2.0 미만까지의 범례를 제시하여 선택 영역에 대한 가뭄의 정도와 습윤의 정도를 한눈에 확인할 수 있도록 개발하였으며, 좌하단은 선택 영역에서 가뭄의 정도에 따라 차지하는 면적비 (%)를 파이그래프로 제공하여 현재 가뭄의 현황을 판단할 수 있도록 개발하였다. 우상단은 유역 및 행정구역별 지수의 평균값을 나타낸 것이며, 마지막 우하단에는 향후 3개월까지의 가뭄척도별 면적비 (%)를 시계열 그래프로 정보를 제공하여 사용자가 현재의 가뭄의 진행상황을 신속하고 정확하게 판단하고 대비할 수 있도록 개발하였다. 또한, 하단에 지수별 전망

a) Main page



b) Individual drought index

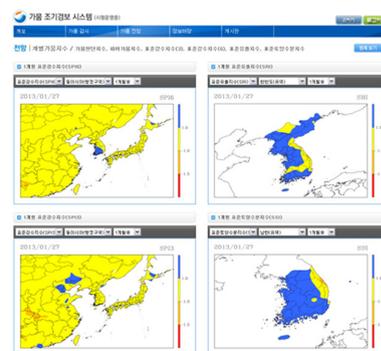


Fig. 2. Main information on the developed system.

바로가기 버튼을 만들어 사용자가 신속하게 가뭄전망 정보를 확인할 수 있도록 편의성을 높였다. 지역별 가뭄지수에서는 동아시아, 한반도 및 남한 영역에 대한 유역 혹은 행정구역별 가뭄지수들을 선택하면 사용자는 범례에 따른 분포도 및 가뭄면적비 (%), 파이그래프를 모두 한눈에 확인할 수 있도록 개발하였다. 또한, 각 가뭄지수에 대한 범례보기 버튼을 모든 웹 페이지마다 제공하여 사용자가 팝업창의 범례를 보면서 각각의 지수를 분석하고 이해할 수 있도록 하였다.

2.2. 시스템 개선

본 연구에서는 기 개발된 시스템에서 앙상블 체계의 가뭄전망정보 생산체계 구축 및 평가를 위해 보다 신속 및 정확하고 향상된 실시간 시스템 개발에 그 목적을 두고 있다. 현 시스템은 정보를 생산하는 측면에서는 활용에 큰 문제가 없었으나, 기상 및 수문 정보 생산 모형의 모의시간, 자료처리, 표출시간 및 저장용량 등에서 개선되어야 한다. 자료처리 부분에서 감시의 경우 기상청에서 제공하는 기상관측자료의 품질 보정을 수행한 후, 본 서버로부터 매일 오전 10시 15분에 현 시스템으로 전송이 완료되나 수문해석 및 가뭄정보 산출 및 표출까지 약 10시간이 소요되어 실무자들은 업무시간 이후에 정보 확인이 가능하다. 생산된 정보를 이미지로 저장하고 있어 사용자가 원하는 시점에서 값을 확인하고 직접 표출하는 데 한계

가 있으며, 시스템의 사양을 개선하고 모의시간을 단축하는 등 몇몇 개선 및 보완 업무가 요구된다. 또한, 현재 단일멤버 형식의 가뭄전망 체계에서 다수 멤버 체계로 전환하고 정확도 평가기술을 도입하고자 한다면, 기존 시스템의 사양을 향상 시키고 원활한 운영관리 체계를 구축하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 시스템의 자료처리 시간 단축을 위해 시스템 내 시간소요가 가장 많은 입력자료 생산 및 가뭄정보 표출과 관련된 코드를 수정 및 보완하였다. 여기서의 입력자료는 Fig. 1과 같이 기상 및 수문정보를 뜻하며, 기본 일 단위의 형태로 매일 기상청 본 서버로부터 시스템에 전송된다. 가뭄해석을 위해 이 자료는 해당일을 기준으로 과거 30년간 기간별 누적값으로 변환되며, 현 시스템에서는 이를 자동으로 매일 생산하고 있다. 문제는 자료의 양이 30년 이상의 일 단위이고, 동아시아 영역 내 각 격자마다 계산됨에 따라 프로그램에서 이를 읽고 처리하는 데 많은 시간이 소요되었다. 본 연구에서는 한번에 여러 입력자료를 계산할 수 있도록 프로그램을 수정하였으며, 이미지도 여러 이미지들을 한번에 표출할 수 있도록 모듈을 보완하였다. 개선된 결과는 Table 1과 같으며, 감시의 경우 기존에는 총 11시간 20분이 소요되었으나, 금회 개선 이후 5시간 30분 이내로 총 6시간을 단축하였다. 가뭄 전망의 경우 기존대비 3시간을 단축하였으며, 모든 결과를 이미지가 아닌 DB로 저장

Table 1. Data processing time before and after the system improvement.

	Existing system		Revised system	
	Monitoring	Prediction	Monitoring	Prediction
• Run Unified Model		-1day 12 UTC ~Dday 01:30		-1day 12 UTC ~Dday 01:30
• Observed meteorological data (AWS, ASOS, GTS)	-1day: 00:00~24:00		-1day: 00:00~24:00	
• Quality control of observed meteorological data	Dday : 01:00~09:00		Dday: 01:00~09:00	
• Collect the meteorological observation & prediction data	10:1010:15	02:0003:30	10:0010:15	02:0003:30
• Estimate the meteorological drought indices	10:1510:30	03:4004:00	10:1510:18	03:3003:48
• Create the meteorological drought index images	10:3011:30	04:0005:00	10:1810:24	03:4803:59
• Estimate hydrological data using LSM on Korean region	11:3013:10	05:0005:50	10:3010:56	03:0003:37
• Estimate hydrological data using LSM on East Asian region	13:1015:00	05:5007:30	10:5612:06	03:3704:04
• Estimate the hydrological drought indices on Korean region	15:0016:20	07:3009:10	12:0612:35	04:0406:53
• Estimate the hydrological drought indices on East Asian region	16:2019:00	09:1012:00	12:1512:35	06:5308:49
• Create the hydrological drought index images	19:0019:30	12:0012:40	13:0013:30	08:4909:37

하여 사용자가 원하는 시점에 값을 확인할 수 있도록 조치하였다. 이와 같은 개선을 통해 실무자가 업무시간에 새로 업데이트된 정보 확인이 가능하게 되었다.

앙상블 정보생산에 따른 시스템의 안정화를 위해 CPU 성능 향상 및 네트워크 성능이 뛰어난 하드웨어를 선정하고 데이터의 안정성을 도모하고자 대용량 저장장치 및 백업 체계를 마련하였다. 또한, 향후의 확장성을 고려하여 외부에 공개되는 웹 서버와 데이터베이스를 분리하여 데이터베이스 처리에서 집중되는 부하를 분산하고 기상예측모델 및 수문해석모델 처리 서버에서의 로드 밸런싱을 하였다. 시스템 구성은 대규모 DB운용 및 온라인 트랜잭션 처리에 적합하고 뛰어난 확장성과 성능을 갖춘 데이터베이스 서버와 고도의 신뢰성, 가용성, 서비스성 및 네트워크 및 프로세싱 성능이 뛰어난 웹 서버 및 다수의 모델 처리 서버를 각각 구축하여 시스템의 부하를 최소한으로 줄였다. 소프트웨어 구성은 웹 서버 연동이 가능하고 동시접속 사용자 요청 처리가 가능한 Servlet Engine로 변환하였다.

3. 앙상블 가뭄전망정보 생산 및 평가

3.1. 앙상블 가뭄전망정보의 생산

본 연구에서는 실시간 가뭄감시 및 전망 시스템의 단일멤버 중심 가뭄전망정보 생산 체계에서 앙상블 체계로 전환하고자 하며, 이를 위한 연구수행 방법은 Fig. 3과 같다. 우선 기상전망정보 생산의 경우 모형은 UM v7.4를 이용하였으며, 크게 GUM (Global Unified Model)에서 동아시아 RUM (RUM for East Asia)과 한반도 RUM (RUM for Korea)으로 2단계의 역학적 상세화를 거쳐 생산된다. 가용되는 입력자료는 경계조건인 해수면온도 (Sea Surface Temperature, SST), 해빙온도 (Sea-Ice) 및 초기조건 (Initial Condition, IC)으로 구성되며, SST는 NOAA의 Earth System Research Laboratory (ESRL)에서 제공하는 OI (Optimal

Interpolation) 월평균 값을 기상청 기후예측과에서 다루는 엘니뇨 예측모델에 의해 생산된 SST 아노말리를 더한 값을 사용하였다. 해빙온도는 UM에서 해상도 1° 기반의 기본적으로 제공하는 월평균 기후값을 사용하였으며, 자료기간은 1995~2009년까지이다. 초기장은 기상청 분석 UM 초기장으로 변환된 자료를 활용하며, 지상 및 대기의 바람장, 습윤장, 온도장 등을 추출하여 사용한다. 이 자료는 위경도 1.5°의 해상도를 가지며, 6시간 간격으로 일 4회 자료가 제공된다. 본 연구에서는 앙상블 기상전망정보 생산을 위해 예보 시작일을 기준으로 매 12 UTC 마다의 다수 초기장을 이용하여 UM 모형을 모의하고 GUM에서 RUM까지의 역학적 다운스케일을 통해 국내 전역의 앙상블 기상전망정보를 생산한다. 이 방법은 시간지연법으로 불리며, 예를 들어 예보일이 6월 20일이고 앙상블 개수가 10개라면 6월 11일에서 20일까지의 초기장으로부터 생산된 결과를 뜻한다. 또한, 가뭄해석은 평년 조건이 요구되며, 본 연구에서는 과거 2000년 3월부터 예보일 전까지의 UM의 과거예측자료(hindcast)를 활용하고자 한다. 기상전망정보는 수문모형인 LSM의 입력정보로 변환되고 hindcast 자료와 예보일에서 생산된 앙상블 개수별로 수문해석을 수행한다. 생산된 수문정보는 유출, 토양수분 및 증발산량으로 구성되며, 이 수문전망정보는 기상전망정보와 함께 가뭄지수의 입력자료로 활용된다. 본 연구에서는 가뭄지수인 SPI, SRI, SSI 및 DDI 등의 해석모델을 이용하여 예보기간 동안의 앙상블 가뭄전망정보를 생산하였다.

3.2. 가뭄전망정보의 평가기법

가뭄전망정보의 정확도 평가를 위해서는 다수의 앙상블 멤버에 대한 각 가뭄지수별 가뭄의 여부가 전망되어야 한다. 통상 가뭄에 대한 판단은 가뭄지수를 산정한 후, 아래 Table 2와 같이 지수별로 다양하게 구분된 심도로부터 결정된다. 다만, 가뭄전망에 있어서는 가뭄의 심도보다는 가뭄의 발생 유무가 중요하며, 각 심도마다의 평가는 전망결과의 높은 불확실성을 초래할 수 있다. 따라서 가뭄전망에 대한 평가는 가뭄 또는 해갈 상태의 사건 발생 유 (yes)/무 (no)에 초점을 맞추는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 가뭄의 여부를 결정하기 위해 우선 앙상블 멤버별 산정된 가뭄지수 값을 이용하여 각 지수의 심도로부터 가뭄의 유무를 구분하고, 다수의 멤버가 가리키는 가뭄상태에 따라 가뭄의 여부를 결정하였다. 최종 가뭄지수값은 선택된 가뭄의 조건에서 그 멤버의 평균값을 사용하였다.

가뭄은 홍수와 달리 정량화된 관측값이 없는 실정이다. 이로 인해 가뭄지수는 과거 가뭄사례를 위주로 시

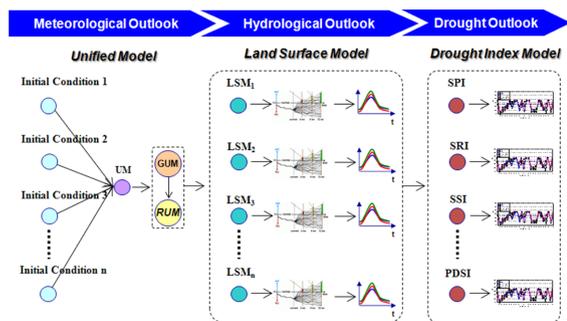


Fig. 3. Estimation method of ensemble drought prediction data.

Table 2. Classification of drought severity for the range of index values.

SPI, SRI, SSI, DDI		PDSI	
Values	Drought category	Values	Drought category
$1.0 < Z$	Wet	$0.5 < Z$	Wet
$-1.0 < Z \leq 1.0$	Normal	$-0.5 < Z \leq 0.5$	Normal
$-1.5 < Z \leq -1.0$	Moderate Drought	$-3.0 < Z \leq -0.5$	Moderate Drought
$-2.0 > Z$	Severe Drought	$-3.0 > Z$	Severe Drought
$2.00 \leq Z$	Extremely Wet	$4.00 \leq Z$	Extremely Wet

Table 3. General 2 × 2 contingency table.

$HR = (H + N)/(H + F + M + N)$ $FAR = (F + M)/(H + F + M + N)$		Observation	
		Yes	No
Prediction	Yes	Hit (H)	False (F)
	No	Missing (M)	Negative hit (N)

계열 및 지역별 분석을 거쳐 평가되지만 (이주현 등, 2006; 손경환 등, 2011), 평가방법이 다소 주관적이어서 객관적인 가뭄정보 평가는 미흡한 실정이었다. 한편, 김광섭과 이준원 (2012)은 가뭄지수의 객관적인 평가를 위해 확률론적 평가방법인 ROC (Relative Operating Characteristics) 분석을 제시하고 검증한 바 있다. 이 ROC 분석은 주로 기상분야에서 확률예보의 정성적 검증에 활용되는 기법이며 (Mason, 1982; 기상청, 2010), 특정한 수치를 X좌표와 Y좌표로 나타내고 이를 확률적 근거를 통해 가장 높은 확률을 가지는 분류를 찾아내는 방법이다. ROC 분석은 Table 3과 같이 기본적으로 “관측된 결과 (Observed value)”와 “예보 결과 (Prediction value)”로 나누어지며, “진실 (Yes)”과 “거짓 (No)”에 의해서 각각 2가지씩 분류된다. 실제 어떠한 사건이 발생한다고 관측될 경우 예보 결과에서도 사건이 발생한다면 “성공 (Hit, H)”, 그렇지 않다면 “잘못된 경고 (Missing, M)”로 나타난다. 반면에, 실제 사건이 발생하지 않을 경우 예보 결과에서 사건이 발생한다면 “실패 (False, F)”, 그렇지 않다면 “음의 성공 (Negative hit, N)”으로 나타난다. 이 중 Hit와 Negative hit의 경우는 각각 ‘Yes’와 ‘No’로만 이루어진 참의 값으로 판단하고, False와 Missing은 거짓의 값으로 받아들인다.

확률적 분포로 분류된 4가지의 요소를 이용하여 적중률 (Hit rate, HR)과 비적중률 (False Alarm Rate, FAR)을 산정할 수 있으며, ROC 좌표계 (space) 내에 하나의 점으로 표현함으로써 ROC 곡선 (curve)을 구성할 수 있다. 값의 범위는 0에서 1 사이의 값을 가지며, 완벽한 예보일 때 $HR = 1, FAR = 0$ ($M = 0$ & $F = 0$)이다 (기상청, 2010). ROC 곡선은 적중률을 표현하는 HR과 비적중률을 나타내는 FAR의 분포도를

구해서 한 그래프 곡선에 나타낸다. $HR = 1$ 이고 $FAR = 0$ 일 때가 가장 완벽한 예보이므로 ROC 곡선이 좌측상단으로 가까이 위치할수록 예보의 수행능력이 좋다고 할 수 있다. 그러나 ROC의 적중률과 비적중률은 지역 또는 기간구분에 따라 그 차이를 명확히 제시하지 못하는 경우가 있다. 즉, ROC 분석 결과를 다른 개체와 비교하는 데 있어서는 어떤 개체의 정확도가 높은지를 판단하기가 어렵다. Wilk (2006)은 적중률과 비적중률의 결과를 대표하는 값을 산정하기 위해 ROC 곡선의 면적 값인 ROC score를 산정한 바 있다. 완벽한 예보인 경우에는 ROC score가 1.0이고, 예보의 기술이 없을 경우에는 0.5 이하이다.

가뭄평가는 가뭄 또는 해갈 상태의 사건 발생 유 (yes)/무 (no)에 따라 나타내는 2분위 해석을 적용하는 것이 바람직하며, 이를 위해서는 가뭄의 시작 또는 해갈을 적절히 평가할 수 있는 방법이 활용되어야 할 것이다. ROC 분석은 이러한 2분위 해석에 있어 활용성이 높으며, 본 연구에서는 전망된 가뭄지수의 평가에 활용하고자 한다.

3.3. 2012년 사례연구

3.3.1. 2012년 가뭄특성 조사

본 연구에서는 2012년부터 기존의 단일멤버의 가뭄전망 체계를 앙상블 체계로 전환하였으며, 자료의 지속적인 DB화를 통해 앙상블 전망정보의 정확도를 평가하였다. 2012년에는 5월 중순부터 6월 말까지 강우량의 부족으로 서울, 경기, 충청 및 전라지역은 심한 봄 가뭄을 겪은 바 있다. 연일 언론보도를 통해 바닥 드러낸 농업용 저수지와 메마른 농지를 볼 수 있었으며, 이에 따른 가뭄의 체감은 더욱 컸다. 중앙재해대책본부에서 집계한 6월 7일 기준 가뭄 면적은

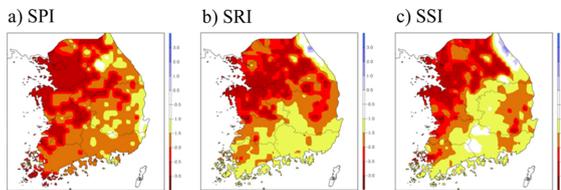


Fig. 4. Drought status by drought indices in June 25, 2012.

19,700 ha, 6월 27일 기준으로는 48,000 ha를 기록하였으며, 본 시스템에서의 가뭄감시 자료인 SPI, SRI 및 SSI에서도 가뭄 피해지역에서의 가뭄심도가 -1.5이하를 나타내 가뭄의 심각성을 잘 알 수 있다 (Fig. 4). 이 봄 가뭄은 2001년 가뭄과 같이 약 2~3개월 정도의 단기간 강우량 부족으로 발생한 가뭄이라 볼 수 있다. 2012년 5월부터 6월까지의 전국 57개 기상관측소의 평균 강우량은 71.2 mm로 평년 (248.2 mm)의 28.7%에 불과한 수준이다. 6월 27일 이후, 29일과 30일에 걸친 30~110 mm의 전국적 강우량으로 인해 대부분 가뭄지역의 강우량 부족이 해소되었다.

3.3.2. 앙상블 멤버 결정

앙상블 가뭄전망정보 생산 및 평가를 위해서는 우선 적정 앙상블의 개수가 선정되어야 한다. 본 연구에서는 앙상블 개수를 선정하기 위해 매월 (3~11월) 전망자료와 관측자료와의 평균제곱근오차비 (Root Mean Square Error Ratio, RMSER)와 표준편차비 (Standard Deviation Ratio, SDR)를 산정하였다. RMSER은 앙상블 개수에 따른 RMSE 값을 단일멤버에서의 RMSE 값으로 나눈 것으로, Eq. (1)과 같다. RMSER이 1이면 단일멤버와 정확도가 같음을, 높다면 단일멤버에 비해 앙상블멤버의 정확도가 낮음을, 낮다면 단일멤버에 비해 앙상블멤버 결과가 정확하다는 의미를 가진다. SDR은 전망정보의 표준편차를 관측자료

의 표준편차로 나눈 것으로, Eq. (2)와 같다. 앙상블 개수에 따라 SDR이 1이면, 전망자료와 관측자료의 표준편차가 같음을, 1 이상이거나 이하이면 전망자료의 표준편차가 관측에 비해 높거나 낮음을 의미하며, 1에 가까울수록 정확도가 높다.

$$RMSER = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - o_{ij})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - o_{ij})^2}} \quad (1)$$

$$SDR = \frac{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (o_j - \bar{o})^2}} \quad (2)$$

여기서, m 은 앙상블 개수, n 은 시계열을 뜻하며, X 는 전망자료, O 는 관측자료를 의미한다.

앙상블 개수는 최소 단일에서 최대 20개까지로 지정하였으며, 본 연구에서는 각 멤버별 RMSER 및 SDR을 산정하여 결과의 적절성을 검토하였다. Fig. 5는 본 시스템의 가뭄지수 입력자료인 강수 (Prcp), 기온 (Temp), 유출 (Runoff) 및 토양수분 (Soil) 자료의 앙상블 개수에 따른 두 통계치 결과를 도시한 것이다. 분석결과 대체로 RMSER은 앙상블 개수가 많을수록 정확도가 높아지는 것으로 나타났으며, 5~10개 이상으로는 그 차이가 매우 미미한 것을 알 수 있다. 예를 들어 강수 및 유출의 경우 RMSE ratio의 앙상블 5개와 20개의 결과가 약 0.15, 기온 및 토양수분은 0.05 정도로 차이가 났으며, 효율성으로 보았을 때 큰 차이가 나지 않은 것으로 나타났다. 또한, 관측과 전망의 표준편차비를 산정한 결과 강수 및 유출의 경우 앙상

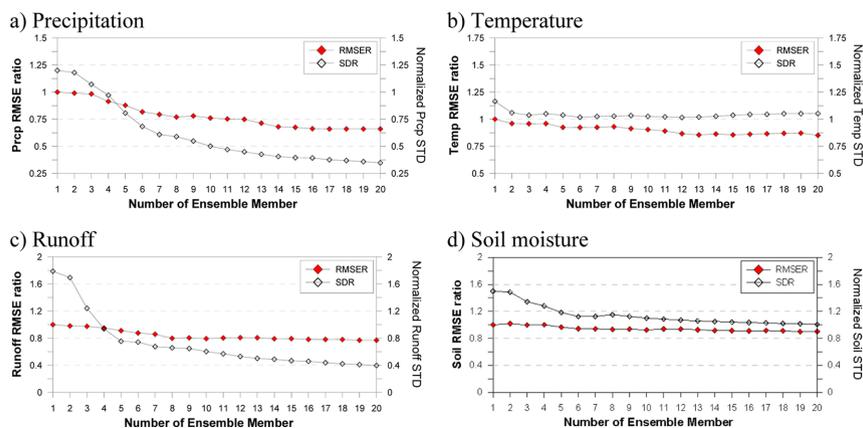


Fig. 5. Results of root mean square error ratio & standard deviation ratio according to ensemble members.

블 멤버가 1~3에서는 1 이상, 5개 이상에서는 1 이하로 정확도가 낮아진 반면, 기온 및 토양수분은 멤버의 개수가 늘어날 수록 1에 가까워지는 것으로 나타났다. 대체로 강수와 유출은 4~5개 구간에서 RMSE와 SDR의 결과가 교차하는 것을 알 수 있으며, 기온 및 토양수분은 5개 이상부터 정확도에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 따라서 앙상블 해석에 요구되는 Run system, 하드웨어적 상황과 Fig. 5의 결과를 고려할 때 5개의 앙상블을 가지는 것이 효율적이며, 예보는 기상청 현업에서의 1개월 전망 예보 (3, 13, 23일)와의 시스템 충돌을 방지하고자 5일, 15일, 25일 순으로 앙상블 전망자료를 생산하고자 한다.

3.3.3. 가뭄전망정보 평가

앙상블 가뭄전망정보에 대한 평가를 수행하기 위해 본 연구에서는 2012년 3월 5일부터 8월 15일까지 UM의 기상전망정보를 생산한 후, LSM 기반의 수문정보와 가뭄지수를 산정하였다. 평가기간은 2012년 5월 5일부터 11월 15일까지이고, 매일 5, 15, 25일에 전망자료를 생산하였다. 또한, 기존 단일멤버에서의 전망과 앙상블 체제에서의 전망결과 비교를 위해 단일 및 앙상블일 경우로 구분하여 정보를 생산하였으며, 각

예보기간에서 산정된 가뭄감시 자료와의 ROC score를 산정하여 정확도를 평가하였다. Fig. 6은 시스템에서 활용되는 여러 가뭄지수들 중 기상, 수문 및 농업학적 가뭄을 대표하는 SPI, SRI 및 SSI에 대한 결과를 예로써 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 예보시작일을 의미하며, 시작일을 기준으로 1개월, 2개월, 3개월 가뭄전망의 ROC 결과를 제시한 것이다. 예를 들어, 4월 5일 (04.05)을 기준으로 가뭄을 전망하였을 때, X축 04.05에 위치한 Y축의 첫 번째 값은 1개월 후 (5월 5일), 점선에 연결된 다음 점은 2개월 후 (6월 5일), 그 다음 점은 3개월 후 (7월 5일)을 뜻하며, 이와 같은 방식으로 4월 5일에서 8월 15일까지의 ROC score를 도시하였다.

전술한 바와 같이 금년 (2012년) 5~7월은 극심한 가뭄을 겪은 바 있다. 따라서 이 기간에서의 가뭄전망은 4, 5, 6월의 전망이 해당된다. ROC score로부터 각 예보기간에서의 단일 및 앙상블 멤버에 대한 결과를 비교해 보면, 앙상블 멤버에서의 정확도가 대체로 높은 것을 알 수 있다. 특히, SPI는 4월, 5월 예보에서 1, 2, 3개월 전망 모두 단일에 비해 score가 높게 나타났으며, 그 외에는 6월 25일 예보를 제외하고는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다. SRI 및 SSI의 경우도 SPI와 유사하게 단일에 비해 앙상블 전망정보의 정확도가 높은 것으로 나타났다. 앙상블 가뭄전망정보에 대한 정확도를 구체적으로 살펴보면, SPI는 4월 5일~5월 5일 예보에서 ROC score가 최소 0.50에서 최대 0.75로 산정되었으나, 5월 15일~6월 25일 예보는 대부분의 전망결과가 0.5이하로 예측능력이 떨어지는 것으로 나타났다. 가뭄기간이 아닌 7월 15일~8월 15일까지의 전망결과는 대부분 0.8 이상으로 나타나, 해당기간에서의 가뭄상황을 적절히 반영한 것으로 판단된다. SRI 및 SSI의 경우 가뭄기간인 5, 6월의 정확도가 SPI에 비해 대체로 높은 것으로 나타났으며, 특히 SSI의 경우 4월 5일~5월 5일에서의 ROC score가 약 0.80 이상으로 2지수에 비해 가장 높은 것으로 나타났다. 반대로, 가뭄해갈기간에서는 SPI, SRI 및 SSI 순으로 SPI가 높은 것으로 나타났다.

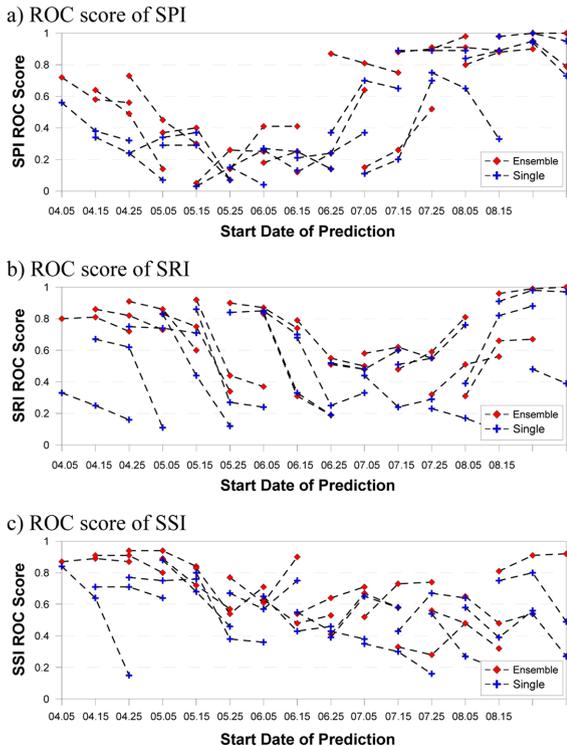


Fig. 6. ROC score of drought indices according to ensemble & single member.

4. 결 론

본 연구에서는 실시간 앙상블 가뭄 감시 및 전망 시스템을 개발하였으며, 2012년 가뭄 사상에 대해 정확도를 평가하였다. 본 연구에서 제시한 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 기 개발된 시스템의 구성, 자료생산과정 및 정보 제공 방안을 제시하였다. 앙상블 가뭄전망 체제로의 전환을 위해 가뭄지수의 입력자료 생산과 이미지 출력 프로그램을 수정 및 보완하여 계산시간을 기존대

비 6시간을 단축하였다. 또한, 생산된 정보를 DB로 저장하여 사용자가 원하는 시점에 값을 확인할 수 있도록 하였다.

2) 기상, 수문, 가뭄전망이 연계된 앙상블 가뭄전망 기법을 제시하였다. 예보 시작일을 기준으로 매 12 UTC마다 다수 초기장을 이용하여 GUM을 모의하고 역학적 다운스케일을 통해 앙상블 기상전망정보를 생산하였다. 기상전망정보는 LSM과 연계되며, 앙상블 개수별로 수문전망정보를 생산하였다. 기상 및 수문 전망정보는 가뭄지수 (SPI, SRI, SSI 및 DDI) 전망에 활용되며, 예보기간 동안의 앙상블 가뭄전망 정보를 생산하였다.

3) 실시간으로 생산되는 앙상블 가뭄전망정보의 평가방법을 제시하였다. 가뭄은 우선 앙상블 멤버별 산정된 가뭄지수 값을 이용하여 각 지수의 심도로부터 가뭄의 유무를 구분하고, 다수의 멤버가 가리키는 가뭄상태에 의해 판단된다. 최종 가뭄지수값은 선택된 가뭄 조건에서 그 멤버의 평균값을 사용하였다. 평가 기법은 ROC 분석을 이용하였다.

4) 극심한 가뭄을 겪었던 2012년을 대상으로 적정 앙상블 개수 결정 및 정확도를 평가하였다. 가뭄평가 이전에 RMSER과 SDR을 이용하여 앙상블 개수를 5개로 결정하였다. SPI, SRI 및 SSI를 이용한 2012년 앙상블 가뭄전망의 정확도를 평가한 결과, 대체로 단일에 비해 정확도가 높은 것으로 나타났다. 또한, SRI 및 SSI의 경우 가뭄기간인 5, 6월의 정확도가 SPI에 비해 대체로 높았으며, 가뭄해갈 기간에서는 두 개의 지수 모두 SPI에 비해 다소 낮게 추정된 것으로 나타났다.

국내에서는 기상전망자료의 불확실성과 활용기술의 부족으로 가뭄예보기술은 아직 초기수준이다. 본 연구에서는 LSM과 연계한 앙상블 가뭄전망정보 생산 체계를 구축하고 정확도 평가 방법을 제안하였다는 측면에서 국내 가뭄전망 기술 개발에 크게 기여할 것이라 기대된다. 다만, 본 연구에서 제시한 가뭄전망정보 평가에서 알 수 있듯이 앙상블 체계로 전환하였을 지라도 불확실성은 높은 실정이다. 미국 CPC의 경우 가뭄전망의 정확도 향상을 위해 앙상블 가뭄전망과

더불어 관측치와 통계적인 보정을 수행하고 있으며, 현재에도 이를 개선하기 위한 지속적인 노력을 기울이고 있다. 국내에서도 이와 관련한 연구가 활발히 수행된다면 가뭄전망의 기술력 향상에 큰 기여를 할 것이라 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기후변화 감시·예측 및 국가정책지원 강화사업 (RACS-2010-3100)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 기상청, 2007: 산업기상지수 산출기술 개발.
- 기상청, 2010: UM 대기모델에 기반한 상세 장기예보기법 연구.
- 김광섭, 이준원, 2012: 관측 자료를 이용한 가뭄지수의 평가. 한국수자원학회논문집, **44(8)**, 639-652.
- 배덕효, 손경환, 안중배, 홍자영, 김광섭, 정준석, 정의석, 김종근, 2012: 한반도/동아시아 지역의 실시간 가뭄 감시 및 전망 시스템 개발. 한국기상학회지, **22(2)**, 267-277.
- 손경환, 이종대, 배덕효, 2010: 전지구 수문해석 모형의 국내 적용성 평가. 한국수자원학회논문집, **43(12)**, 1063-1074.
- 손경환, 배덕효, 정준석, 2011: 지표수문해석모형을 활용한 국내 가뭄해석 적용성 평가. 한국수자원학회논문집, **40(12)**, 1063-1074.
- 이주현, 정상만, 김성준, 이명호, 2006: 가뭄모니터링 시스템 구축: 1. 정량적 가뭄모니터링을 위한 가뭄지수의 적용성 분석. 한국수자원학회논문집, **39(9)**, 787-800.
- Liang, X., G. Jianzhong, and L. Ruby Leung, 2004: Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations. *J. Hydrol.*, **298(1-4)**, 287-310.
- Wilk, D.S., 2006: Statistical method in the atmospheric sciences. *International Geophysics Series*, **91**, 294 pp.