

## 수문학적 가뭄전망을 위한 GloSea5의 활용체계 구축 및 예측성 평가

손경환<sup>1)</sup> · 배덕효<sup>1),\*</sup> · 정현숙<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>세종대학교 건설환경공학과, <sup>2)</sup>기상청

(접수일: 2015년 2월 26일, 수정일: 2015년 4월 16일, 게재확정일: 2015년 5월 20일)

### Construction & Evaluation of GloSea5-Based Hydrological Drought Outlook System

Kyung-Hwan Son<sup>1)</sup>, Deg-Hyo Bae<sup>1),\*</sup>, and Hyun-Sook Cheong<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong University, Seoul, Korea

<sup>2)</sup>Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

(Manuscript received 26 February 2015; revised 16 April 2015; accepted 20 May 2015)

**Abstract** The objectives of this study are to develop a hydrological drought outlook system using GloSea5 (Global Seasonal forecasting system 5) which has recently been used by KMA (Korea Meteorological Association) and to evaluate the forecasting capability. For drought analysis, the bilinear interpolation method was applied to spatially downscale the low-resolution outputs of GloSea5 and PR (Predicted Runoff) was produced for different lead times (i.e., 1-, 2-, 3-month) running LSM (Land Surface Model). The behavior of PR anomaly was similar to that of HR (Historical Runoff) and the estimated values were negative up to lead times of 1- and 2-month. For the evaluation of drought outlook, SRI (Standardized Runoff Index) was selected and PR\_SRI estimated using PR. ROC score was 0.83, 0.71, 0.60 for 1-, 2- and 3-month lead times, respectively. It also showed the hit rate is high and false alarm rate is low as shorter lead time. The temporal Correlation Coefficient (CC) was 0.82, 0.60, 0.31 and Root Mean Square Error (RMSE) was 0.52, 0.86, 1.20 for 1-, 2-, 3-month lead time, respectively. The accuracy of PR\_SRI was high up to 1- and 2-month lead time on local regions except the Gyeonggi and Gangwon province. It can be concluded that GloSea5 has high applicability for hydrological drought outlook.

**Key words:** Drought outlook, GloSea5, LSM, predicted runoff, SRI

## 1. 서 론

최근 기후변화에 따른 지구온난화, 엘니뇨 및 라니냐 등의 현상으로 과거에 경험하지 못한 규모의 가뭄 피해가 빈번히 발생하고 있다. 국내에서는 1994, 1995 및 2001년 대가뭄 피해에 이어 2008, 2009, 2012, 2013 그리고 2014년 가뭄을 경험해 왔으며, 앞으로도 가뭄

발생이 더욱 심화될 것으로 전망되어 이에 대한 대처가 시급한 실정이다(Son et al., 2013).

가뭄은 강수량 부족에 따른 물수지 불균형 현상으로 장기간 넓은 지역에서 발생한다. 이로 인해 가뭄을 감지하더라도 구체적인 발생 시기, 장소 및 원인을 규명하는 것이 어렵고 장기간 지속될 경우 수자원, 농업 및 인문·사회 분야에까지 막대한 피해를 초래한다. 다만, 가뭄은 상당한 시간을 갖고 발생하므로 홍수와 달리 대처할 여유가 있기 때문에 초기에 이를 감지한다면 그 피해를 최소화 할 수 있다.

가뭄전망은 가뭄대비에 있어 첫 시발점으로 가뭄관리의 성패를 좌우할 정도로 매우 중요하다. 이로 인

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

해 수문기상 선진국들은 가뭄전망을 위한 여러 기술들을 개발해 왔다. 가뭄전망은 통계적(statistical) 및 물리적(physical) 방법으로 구분된다. 통계적 방법은 과거 수문기상 현상이 미래에도 재현될 수 있다는 전제하에 미래 가뭄상황을 전망하는 방법이다. 그러나 이 방법은 예측된 결과들이 모두 과거의 경향에 국한됨에 따라 최근에 급변하는 수문기상의 특성을 고려하는데 한계가 있다(Trenberth, 1984). 역학적 방법은 주어진 초기 수문기상 조건으로부터 역학적 알고리즘이 탑재된 기후 및 수문모델의 연계모의를 통해 미래 가뭄을 전망하는 방법이다. 통계적 방법과는 달리 최근 물 순환의 변화 예측이 가능하다는 장점이 있어 그동안 많은 연구가 수행되어 왔다. 또한, 다양한 가뭄상황을 전망하기 위해 기상학적 가뭄지수뿐만 아니라 여러 수문학적 또는 농업적 가뭄지수들을 생산 및 활용하는 추세이며, 주요 선행연구 내용은 다음과 같다.

미국의 CPC (Climate Prediction Center)에서는 MRF (Medium Range Forecast) 모델과 MOM3 (Modular Ocean Model version3) 모델을 결합한 CFS (Climate Forecast System)를 2002년부터 사용해 왔으며, 이를 이용하여 기상학적 가뭄지수인 PDSI (Palmer Drought Severity Index), CMI (Crop Moisture Index)를 제공해 왔다. 최근에는 지면모델(Land Surface Model, LSM)과 연계해석하여 미국 및 전세계에 대한 수문전망 정보를 산정하고 각 정보를 백분위로 가공하여 기간별(6~10일, 8~14일, 월, 계절) 가뭄전망 정보를 제공하고 있다. Yuan et al. (2011)은 기존 CFS에서 업그레이드된 CFSv2 (Climate Forecast System version2) 모델에 대한 가뭄예보의 활용성을 평가하였다. Princeton University는 CFS의 앙상블 기상전망정보를 LSM에 적용한 후 자연유량, 토양수분 정보로부터 가뭄지수를 산정하여 매주 전망정보를 제공하고 있다. 최근에는 CFS와 유럽연합의 Development of a European Multi-model Ensemble system for seasonal to inter-annual prediction 프로젝트에서 생산한 다수의 기후전망자료를 수문모델에 연계하여 가뭄전망 정보를 생산하는 통합 앙상블(integrated ensemble)체제로 전환하였으며, 이 기술은 미국의 Environmental Modeling Center에 적용 및 활용되고 있다(lavers et al., 2009). Yuan et al. (2013)은 아프리카 전역에 CFSv2와 지면모델의 연계해석에 따른 가뭄전망 시스템을 구축하였으며, 가뭄지수인 SPI (Standardized Precipitation Index)와 토양수분백분위를 생산하고 활용성을 평가하였다.

국내의 경우 가뭄관리 기관인 기상청, 한국수자원공사 및 한국농어촌공사 등에서 그 동안 여러 가뭄정보를 생산 및 제공해 왔다. 주요 정보로는 PDSI, SPI, MSWSI (Modified Surface Water Supply Index), SMI (Soil Moisture Index) 및 저수율 지수 등이 있다. 그

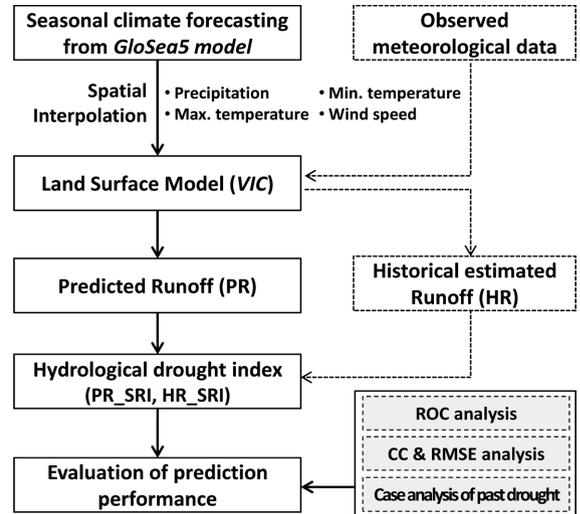


Fig. 1. Flowchart of hydrological drought outlook and evaluation using GloSea5.

러나 모두 과거 관측된 기상 및 수문정보만을 이용하여 산정된 실황정보이며, 수문기상 연계해석기술의 부족 및 정확도 문제로 가뭄전망정보를 제시하지 못하는 실정이다. 가뭄전망에 관한 연구로는 Bae et al. (2013a)이 UM (Unified Model)과 지면모델을 연계해석하여 국내 최초로 기상, 수문 및 농업적 가뭄전망 정보의 생산체계를 구축한 바 있으나, 전망 정보의 활용범위 및 수준에 대해 명확히 제시하지 않았다.

한편, 기상청에서는 최근 잦아진 이상기후로 인한 피해 경감과 고품질 장기에보자료를 활용한 효율적 정책수립을 지원하기 위해 영국으로부터 대기 및 해양-해빙 모델을 접합한 GloSea5 (Global Seasonal forecasting system version 5) 모델을 도입하였다(KMA, 2012). 그리고 기후예측 활용을 위한 모델 평가 및 검증을 통해 UM의 후속 현업예보 모델로 최종 선정된 바 있다. 수자원 또는 가뭄 관리자 입장에서는 기상청에서 제공할 GloSea5 정보에 대해 가뭄예보를 목적으로 활용할 수 있는 기술이 요구되는 바이다. 다만, 아직까지 가뭄예보를 목적으로 GloSea5에 대한 평가사례는 전무하여 본 연구에서는 GloSea5 기반의 수문학적 가뭄전망 체계를 구축하고 국내 가뭄예보에 있어 활용성을 평가하고자 한다.

## 2. 연구방법

GloSea5를 활용한 수문학적 가뭄전망체계 구축 및 평가 절차는 Fig. 1과 같다. 예보시점에서 GloSea5로부터 전망된 일단위 기상정보를 중 강수, 최고 및 최

**Table 1.** Characteristics and information of GloSea5.

		Major characteristics and informations
Composition of model	Atmosphere	▪ UM(v8.0)
	Ocean	▪ NEMO(v3.2)-CICE(v4.1)
	Copuler	▪ OASIS3
Spatial resolution	Atmosphere	▪ N216(0.83° × 0.56°)
	Ocean	▪ ORCA tri-polar grid at 0.25°
Initial input data	Atmosphere	▪ Hindcast : ERA interim ▪ Forecast : KMA numerical analysis field
	Ocean	▪ Hindcast : Seasonal ODA reanalysis ▪ Forecast : NEMO VAR
Production period of data and ensemble number		▪ Hindcast : - Fixed start dates of 1st, 9th, 17th, 25th of each month - 3 members run per start date ▪ Forecast : - 2 members run each day

저기온, 평균풍속 자료를 수집한다. 내삽 기법을 통해 공간적 상세화를 수행하고, 관측기상자료와 같이 지면모델의 입력자료로 활용한다. 우리나라 전역을 대상으로 지면모델을 구동하여 GloSea5에 의한 유출전망정보(Predicted Runoff, PR), 지상관측기상자료에 의한 유출해석정보(Historical estimated Runoff, HR)를 생산한다. 수문학적 가뭄전망을 위해 가뭄지수인 SRI (Standardized Runoff Index)를 선정하였으며, PR\_SRI 및 HR\_SRI를 각각 산정한다. HR\_SRI과의 비교를 통해 PR\_SRI의 예측성능 검증하고자 하며, 평가기법인 ROC (Relative Operating Characteristics) 분석, 상관계수 및 RMSE (Root Mean Square Error)분석을 수행한다. 또한, 과거 가뭄사례를 대상으로 시계열 분석을 통해 가뭄전망의 적절성을 평가한다.

**2.1 GloSea5 모델**

기상청은 2010년 6월 영국 기상청과 계절예측시스템의 공동구축 및 운영에 관한 협정을 체결하였으며, 현업 예보를 위해 기후예측 모델인 GloSea5를 도입하여 현재 운영 중에 있다. 이 모델은 영국 기상청의 최신 계절예측시스템에 사용되고 있으며, 영국 기상청 기후 모델인 HadGEM3 (Hadley Centre Global Environment Model version 3)에 기초해서 구축되었다. HadGEM3는 대기, 해양, 해빙, 지표면 모델들이 하나로 합쳐진 전지구 결합 모델(Coupled General Circulation Model, CGCM)로써 UM을 대기 모델로 사용하고, MOSES (Met Office Surface Exchange Scheme)가 지표 모델로 결합되어 있다(Essery et al., 2003). 해양과 해빙 모델은 각각 NEMO (Nucleus for

European Modelling of the Ocean), CICE (Los Alamos sea ice model) 모델이 사용된다(Madec, 2008; Hunke and Lipscomb, 2008). 그리고 각 모델들은 대기-해양 플럭스 교환을 위해 Valcke (2011)이 개발한 OASIS 커플러에 의해 결합되어 있다. 대기 모델의 수평해상도는 0.83° × 0.56°, 해양 모델의 수평 해상도는 tri-polar 격자에서 0.25°(약 25 km)이고, 연직으로는 L75의 해상도를 가진다. Table 1은 GloSea5에 대한 주요 특징을 나타낸 것이다. GloSea5의 Hindcast (HCST) 자료는 매달 1일, 9일, 17일, 25일마다 초기장을 입력하여 생산되며, 각 출발일에는 모델의 물리과정을 달리하는 방법으로 확률적 운동에너지 후방 산란법 (Stochastic Kinetic Energy Backscatter2, SKEB2) (Bowler et al., 2009)을 이용하여 대기 분석장과 해양 및 해빙 초기장으로부터 3개의 앙상블 멤버를 생산한다. 자료생산 기간은 1996년부터 2009년(총 14년)이며, 각 앙상블 멤버당 7개월간 모델적분이 진행된다. Forecast (FCST)는 HCST와 동일한 방식으로 매일 적분이 진행되며 매 초기장마다 2개의 앙상블 멤버가 생산된다. 본 연구에서는 GloSea5의 가뭄예보 활용성 평가를 위해 과거 14년 동안의 HCST 자료를 활용하고자 한다.

**2.2 GloSea5와 LSM 연계해석**

유출해석을 위한 지면모델로 VIC (Variable Infiltration Capacity) 모델을 선정하였다(Liang et al., 1994). 이 모델은 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 물과 에너지의 유동(water & energy flux)을 모의하는 분포형 모형으로써 크게 물수지(water

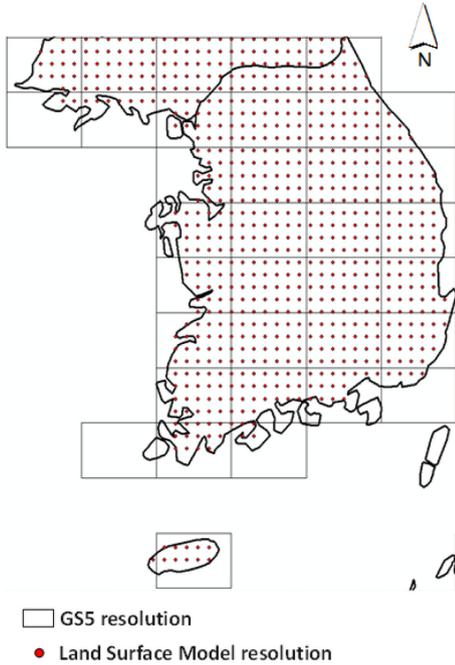


Fig. 2. Spatial resolution for GloSea5 and LSM model.

balance), 하도추적(channel routing), 에너지수지(energy balance) 등으로 구성되어 있으며, 각 모듈은 독립적으로 수행된다. 다양한 공간분해능이 가능하여 기상 모델(Global Climate Model, GCM; Regional Climate Model, RCM)과의 직접적인 연계가 용이하며, 모형을 통해 산정된 수문성분들은 이미 대륙 또는 국가규모의 가뭄해석에 있어 그 활용성이 검증된 바 있다 (Sheffield et al., 2008; Son et al., 2011). Son et al. (2010)은 우리나라 전역에 VIC 모델을 구축하고 적용성을 평가한 바 있다.

VIC 모델의 최적 공간 해상도는 1/8°(약 12.5 km)로 알려져 있으며, 이미 여러 문헌에서 그 활용성을 몇 차례 검증한 바 있다(Liang et al., 2004; Son et al., 2011). 다만, GloSea5의 경우 Fig. 2와 같이 해상도가 0.83°(약 85 km) × 0.56°(약 55 km)로 낮은 편이어서 LSM에 이를 적용할 경우 유출해석결과의 신뢰성이 낮아지게 된다(Liang et al., 2004). 또한, 국내에 포함되는 격자수가 33개 정도여서 지역별 가뭄상황을 상세히 표현하는 데에도 한계가 있다.

본 연구에서는 이중선형보간(bilinear interpolation) 기법(Singh, 1996)을 이용하여 GloSea5의 해상도를 1/8°에 맞게 재조정 하였다. 이 기법은 Fig. 3과 같이 격자의 네 끝점( $P_1, P_2, P_3, P_4$ )에서의 값이 주어졌을 때, 격자 내부의 임의의 점에 의해 구분된 면적( $A_1, A_2, A_3, A_4$ )에 비를 고려하여 임의의 값( $P_x$ )을 보간하는 방법이

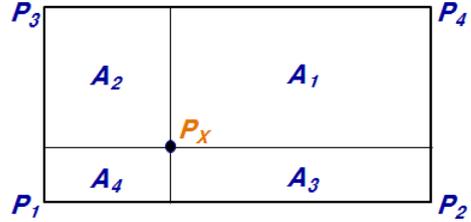


Fig. 3. Spatial downscaling using bilinear interpolation.

Table 2. Classification of drought severity.

Drought Category	SRI Values
Extremely wet	$2.00 \leq Z$
Very wet	$1.99 \sim 1.50$
Moderately wet	$1.49 \sim 1.00$
Near normal	$0.99 \sim -0.99$
Moderate Drought	$-1.00 \sim -1.49$
Severe Drought	$-1.50 \sim -1.99$
Extreme Drought	$-2.00 \geq Z$

며(Eq. 1), 수문분야에서의 활용도가 높다(Yoon et al., 2012; APN, 2013).

$$P_x = \frac{P_1A_1 + P_2A_2 + P_3A_3 + P_4A_4}{\sum_{i=1}^4 A_i} \quad (1)$$

### 2.3 가뭄지수

SRI는 확률론적 해석을 기반으로 자연유량(지표 및 지하수 유출, 용설 등)의 과잉 또는 부족에 따른 지면의 가뭄상황을 나타내며, 이미 가뭄해석과 감시에 있어 여러 차례 검증된바 있다(KMA, 2011; Bae et al., 2013b). 산정절차는 빈도해석에 의한 과거 유출량으로부터 적정 확률분포형 결정, 해당 시점의 수문성분에 대한 누가확률값 추정 및 표준화로 진행되며, Table 2와 같이 지수의 범위에 따라 심도가 구분된다. 또한 다양한 지속기간 구분(1, 3, 6, 9 및 12개월 등)이 가능하여 장단기 가뭄해석에 활용될 수 있다(Shukla and Wood, 2008; Wang et al., 2011).

국내에서는 SRI의 확률분포형으로 Log Pearson type3를 주로 활용해 왔으며, 지속기간은 국내 가뭄발생 기간이 비교적 짧아(월 또는 계절) 주로 3개월 누적유출량값을 활용해 왔다(Son et al., 2011). 그러나 가뭄전망에서는 해당 시점이 미래이기 때문에 지속기간에 대한 누적 값을 계산하기 위한 방안이 요구된다. 또한, 자료 기간도 과거 30년 이상의 유출량 자료를 필요로 하지만 GloSea5의 경우 HCST 기간이 14년(1996년~2009년)으로 가뭄지수를 산정하기에는 기간이 짧고 가뭄감시와도 자료기간이 달라 이를 처리할 수 있

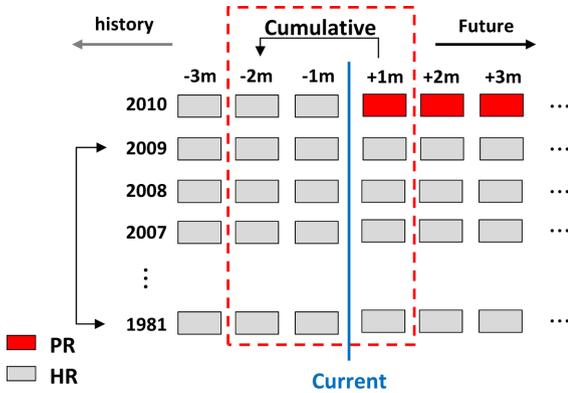


Fig. 4. Utilization method of input data for drought outlook.

는 방법이 필요하다.

한편, Yoon et al. (2012)은 SPI를 활용한 가뭄전망을 위해 기후모델로부터 강수량의 아노말리를 계산하고 과거 관측 강수량의 평균값에 이를 더하여 최종 활용하였다. 그리고 지속기간에 따른 누적 강수량을 계산하기 위해 예보시점까지는 과거 관측 강수량, 그 이후로는 예측값을 활용하였다. 과거 관측 자료의 활용은 가뭄전망의 정확도를 향상시키는 주요 요인이 되며, 여러 문헌에서 제시한바 있다(Yuan et al., 2013; Son, 2015). 따라서 본 연구에서는 기존 방법을 SRI 산정에 활용하였으며, 주요 산정 식은 Eq. (2) 및 Eq. (3)과 같다. 만약 1월에 대한 PR을 생산하고자 한다면 Eq. (2)를 통해 과거 HCST로부터 1월 PR의 14년 평균( $GS5\_R_{ave}$ )과 금회 예보된  $GS5\_R$ 의 아노말리(Anomaly)를 계산한다. 그리고 Eq. (3)과 같이 과거 1월 30년 평균 HR값( $HR_{ave}$ )에 더하여 최종 유출전망정보(PR)를 계산한다.

$$Anomaly = GS5\_R - GS5\_R_{ave}, \tag{2}$$

$$PR = HR_{ave} + Anomaly. \tag{3}$$

Figure 4는 지속기간 고려를 위한 PR의 활용방법을 도시한 것이다. 예를 들어 지속기간이 3개월이고 특정 월에 대한 1개월 전망의 가뭄지수를 산정하고자 하면 예보 시점을 기준으로 과거 2달은 HR, 이후 1달은 PR, 2개월 전망에서는 과거 1달이 HR, 이후 2달은 PR이 활용된다. 본 연구에서는 선행시간별로 PR 및 HR로부터 지속기간 3개월 유출량을 계산하여 예보시점마다 가뭄지수(PR\_SRI)를 산정하고자 한다.

#### 2.4 가뭄전망정보 평가 방법

본 연구에서는 PR\_SRI에 대한 정량적 평가를 위해 HR로부터 산정된 SRI (HR\_SRI)를 활용하였으며, 평

PR_SRI	HR_SRI	
	Yes	No
Yes	Hit (H)	False (F)
No	Missing (M)	Negative hit (N)

Fig. 5. ROC Table.

가방법은 Wilks (2006)이 제시한 ROC 분석을 이용하였다. ROC 분석은 특정 수치를 X좌표와 Y좌표로 나타내고 이를 확률적 근거를 통해 가장 높은 확률을 가지는 분류를 찾아내는 방법으로 주로 기상분야에서 확률예보의 정성적 검증에 활용되는 기법이다(Mason, 1982). ROC 분석은 Fig. 5와 같이 HR\_SRI와 PR\_SRI로 나누어지며, “진실(Yes)”과 “거짓(No)”에 의해서 각각 2가지씩 세부 분류된다. 만약 HR\_SRI가 가뭄이고 PR\_SRI도 가뭄이라면 “성공(Hit, H)”, 그렇지 않다면 “잘못된 경고(Missing, M)”로 나타낸다. 반면, HR\_SRI가 가뭄이 아닌데 PR\_SRI가 가뭄이라면 “실패(False, F)”, 모두 가뭄이 아니면 “음의 성공(Negative hit, N)”으로 나타낸다. 이 중 Hit와 Negative hit의 경우는 각각 “Yes”와 “No”로만 이루어진 참의 값으로 판단하고, False와 Missing은 거짓 값으로 받아들인다.

Figure 5와 같이 분류된 4가지의 요소를 이용하여 Eq. (4)의 적중률(Hit Rate)과 Eq. (5)의 비적중률(False alarm rate)을 산정할 수 있다. 값의 범위는 0에서 1 사이의 값을 가지며, 완벽한 예보일 때 적중률은 1, 비적중률은 0 (M=0 & F=0)이다. 다만, ROC의 적중률과 비적중률은 지역 또는 기간구분에 따라 그 차이를 명확히 제시하지 못하는 경우가 있다. 따라서 Wilks (2006)은 적중률과 비적중률의 결과를 대표하는 값을 제시하고자 ROC 곡선의 면적 값인 ROC score를 산정한 바 있으며, ROC score가 1.0일 경우 완벽한 예보, 0.5 이하이면 예보 기술이 없다고 간주한다.

$$Hit\ rate = H/(H + M), \tag{4}$$

$$False\ alarm\ rate = F/(F + N). \tag{5}$$

ROC 분석은 가뭄 발생 및 해갈의 유무만을 고려하기 때문에 가뭄지수 값에 대한 정량적인 평가가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 가뭄지수 값의 평균적 차이 및 거동을 평가하고자 RMSE, CC (temporal Correlation Coefficient)를 이용하였다. RMSE는 자료의 개수에 무관하고 해석하고자 하는 변량과 같은 차원을 갖는 지표로 전망정보와의 평균적으로 어느 정도의 오차가 발생하는지를 나타내는 일종의 평균치라 할 수 있다. CC는 -1과 +1 사이의 값을 가지는 무차원계수로써 표준편차의 비율을 이용하여 전망과 관측의 크기와 모양의 일치 정도를 동시에 파악할 수 있는 지표이다. RMSE가 0에 가까울수록, CC가 +1에

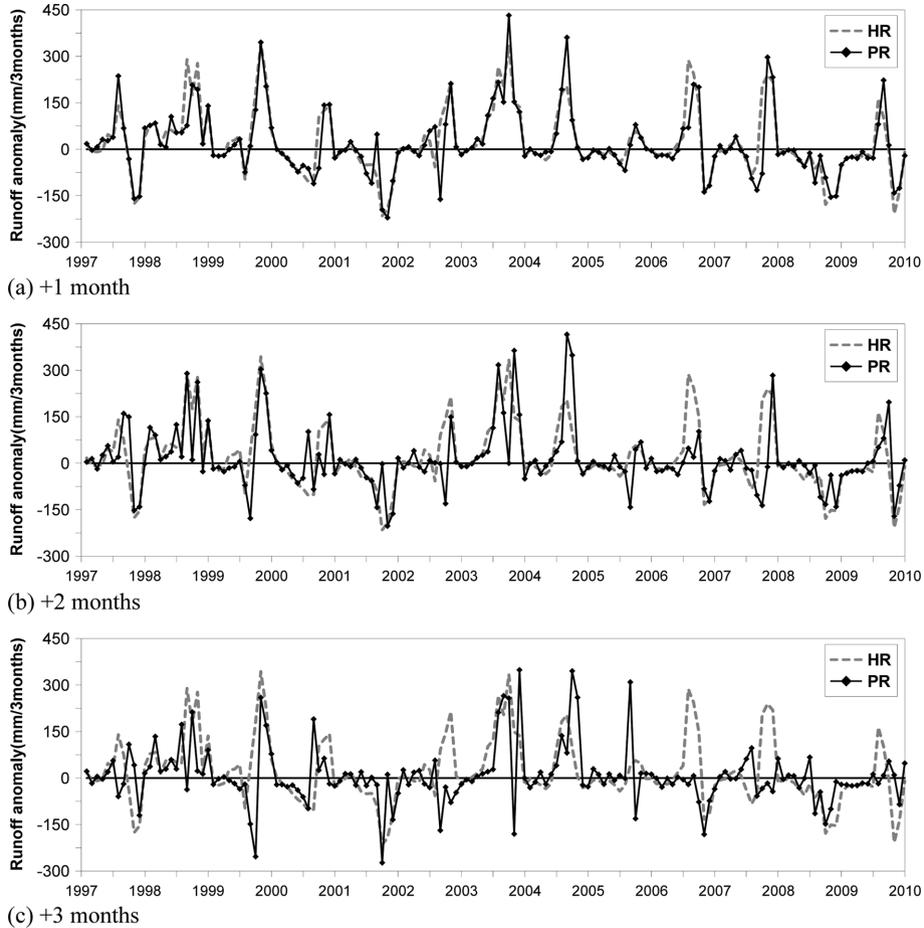


Fig. 6. Comparative results between PR and HR anomalies over forecasting lead time.

가까울수록 전망결과가 관측에 잘 일치한다고 평가된다. 각 통계치들은 모의기간(1996년~2009년) 동안 임의의 연도 및 월에 대해서 계산된 HR\_SRI 및 PR\_SRI로부터 계산하게 되며, 객관적인 결과 도출을 위해 “leave one out cross-validation기법” (Wilks, 1995)이 사용된다. 또한, 본 연구의 자유도에서의 통계적으로 유의한 상관계수의 값이 0.532 ( $\alpha = 0.05$ )이며, 이의 만족 여부를 분석하고자 한다.

### 3. 유출전망의 아노말리 분석

가뭄전망에 대한 평가에 앞서 지속기간 3개월의 HR 및 PR에 대한 아노말리를 계산하여 그 거동을 분석하였다. 여기서, PR은 1, 2개월 전망에선 과거 2개월 및 1개월 HR 값이 고려된 것이며, 유출아노말리는 예보시점에서의 HR 및 PR과  $HR_{ave}$ 의 차이를 의미한다. Figure 6은 모의기간 동안 격자 평균 HR 및 PR 아노

말리 값을 선행시간에 따라 시계열로 도시한 것이다. 1개월 전망의 경우 PR의 거동이 HR과 거의 유사한 것으로 볼 수 있다. 그 중 2000년, 2001년, 2006년, 2007년, 2008년 및 2009년의 경우 실제 가뭄이 발생한 연도로 PR은 HR과 같이 특정 기간에서 모두 음의 값으로 산정되어 정상상태보다 낮은 유출 상황을 적절히 고려함을 알 수 있다. 2개월 전망에서는 1개월 전망에 비해 일부 연도에서 PR과 HR의 거동 차이가 높게 나타남을 볼 수 있다. 특히 2000년 6월, 2001년 9월, 2008년 10월에는 HR의 아노말리가 0 이하로 값이 낮게 산정되었지만 PR은 0 이상 또는 이에 근접한 것으로 나타나 해당 기간의 유출의 상황을 적절히 고려하지 못한 것으로 확인되었다. 3개월 전망의 경우 모든 월에서 HR 및 PR의 거동 차이가 크게 나타남을 볼 수 있으며, 2001년, 2006년 및 2008년을 제외하고는 가뭄기간의 유출량이 모두 0에 근접하거나 그 이상으로 산정되었다. 또한, 1999년, 2002년, 2003

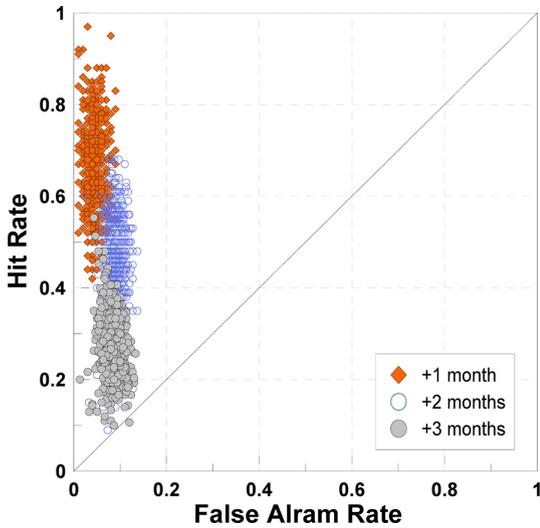


Fig. 7. ROC analysis results.

년, 2006년 및 2009년에 HR이 0 이상 또는 이하일 경우 반대의 거동을 보이는 것으로 나타나, 선행시간 중에서 예측의 정확도가 가장 낮은 것으로 확인되었다.

#### 4. 가뭄전망 및 예측성능 평가

##### 4.1 ROC 분석

선행시간별 PR\_SRI 및 HR\_SRI로부터 ROC 분석을 수행하였다. 이를 위해 각 격자별로 Eq. (4), Eq. (5)를 통해 적중률과 비적중률을 산정한 후, Fig. 7과 같이 ROC 곡선상에 도시하였다. 그림에서 완벽한 ROC는 X축의 값이 0이고 Y축의 값이 1인 좌표의 좌상단에 위치할 경우 성립된다. 1, 2 및 3개월 전망 모두 비적중률이 평균 0.05, 0.07, 0.08, 적중률은 0.71, 0.45, 0.28로 산정되었으며, 선행시간이 짧을수록 비적중률이 낮고 적중률이 높은 것으로 확인되었다.

선행시간별 적중률과 비적중률로부터 ROC score를 산정하였으며, 이를 지역적으로 분포시켜 Fig. 8에 나타내었다. 1개월 전망에서는 경기도, 강원도 및 경상북도 일부 지역이 0.70~0.80로 나타났으며, 이를 제외하고는 score가 모두 0.80 이상으로 높게 나타나 가뭄예보의 정확도가 높다고 판단된다. 2개월 전망에선 경기도 북부, 강원도 일부 지역이 0.50~0.60으로 산정되었으나, 그 외 지역에서는 0.60~0.80으로 특히 충청도 및 전라도 지역에서 score가 높게 나타났다. 3개월 전망의 경우 서해지역, 전라남도 및 경상남도에서 0.60~0.70의 범위를 보였고 그 외에는 0.50~0.60으로 분포하여 정확도가 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다.

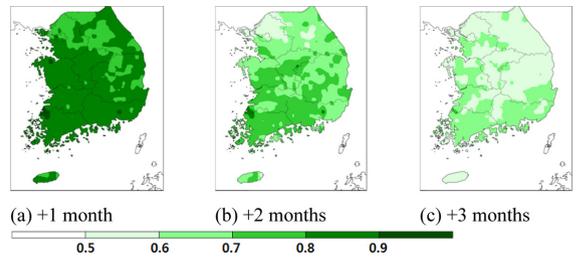


Fig. 8. Regional ROC score for the PR\_SRI.

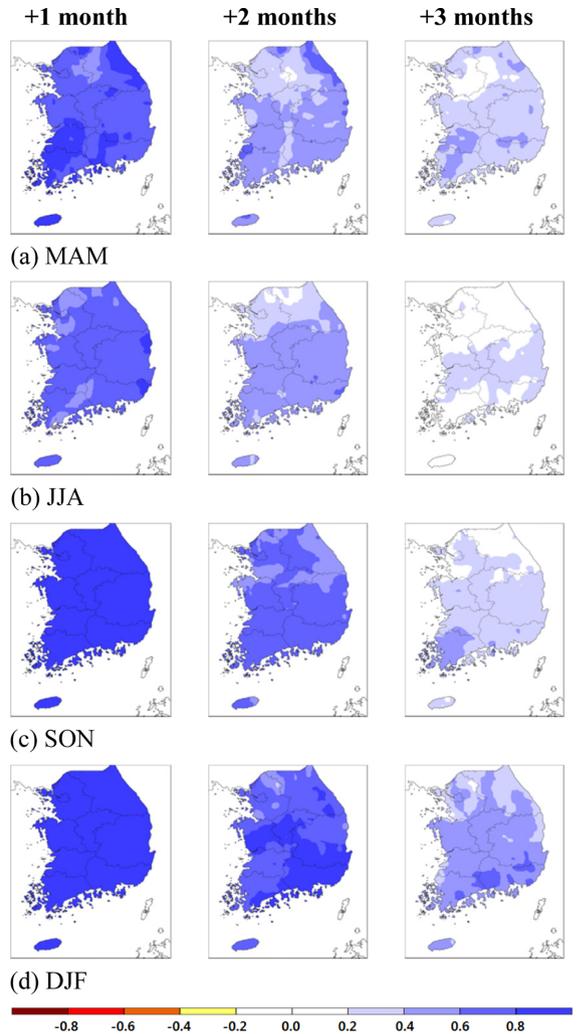


Fig. 9. Seasonal CC for the PR\_SRI.

##### 4.2 상관계수 및 RMSE 분석

Figure 9는 PR\_SRI에 대한 계절적 가뭄예측성능을 평가하기 위해 상관계수를 계절별로 계산하고 이를

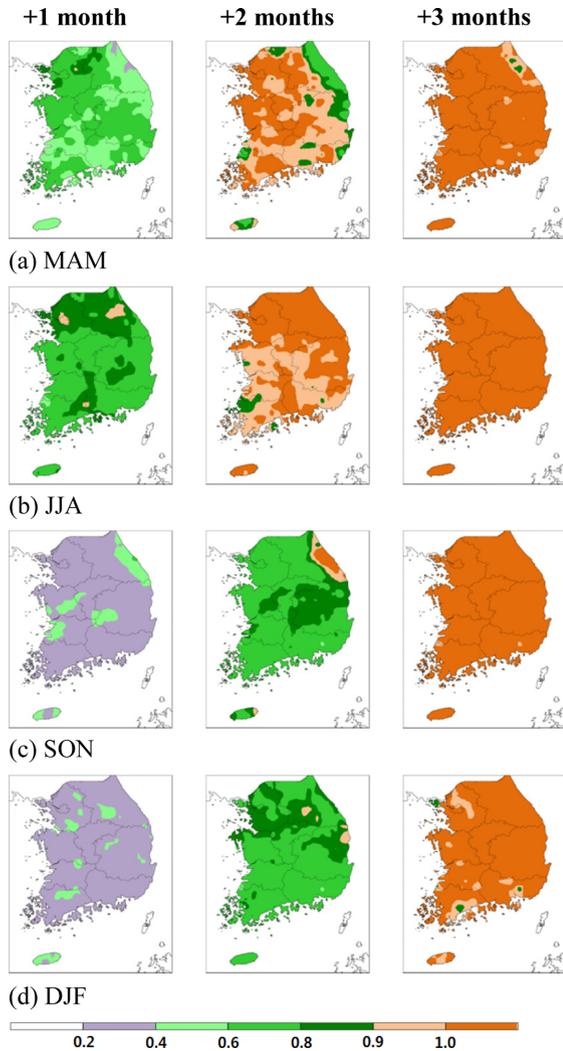


Fig. 10. Seasonal RMSE for the PR\_SRI.

공간분포로 나타낸 그림이다. 봄철(MAM) 1개월 전망의 경우 상관계수가 0.76으로 높게 산정되었으며, 경기도 및 강원도 일부 지역(0.40~0.60)을 제외하고는 모두 0.60 이상으로 나타났다. 2개월 전망에서는 남부지방이 0.20~0.60, 중부지방은 강원도 동해를 제외하고는 0.10~0.40으로 1개월 전망에 비해 값이 낮게 분포하였으며, 이와 같은 특징은 3개월 전망에서도 유사하게 나타났다. 여름철(JJA)에는 경기도 및 전라남도 일부 지역을 제외한 모든 지역이 0.40~0.60의 범위를 보였으며, 봄철과 같이 주로 경기도 및 강원도에서의 예측성이 낮게 나타났다. 가을철(SON) 및 겨울철(DJF)의 경우 1개월 전망의 상관계수가 평균 0.88, 0.94, 2개월 전망은 0.76, 0.64, 3개월 전망은 0.47, 0.29로 각각 산정되었으며, 주로 강원지역의 예측성이 낮

은 것으로 나타났다. 선행시간이 늘어날수록 값의 분포가 낮아짐을 볼 수 있으며, 예측성은 4계절 중 여름철이 낮고 겨울철이 가장 높은 것으로 확인되었다. 1개월 전망에서는 전국에 상관계수가 통계적 유의수준을 모두 만족하였고, 2개월에서는 봄철 및 여름철 중부지방을 제외하고는 유의한 결과를 보였다. 3개월 전망에서는 3개월 겨울철 남부지방을 제외하고는 유의수준을 만족하지 못하였다.

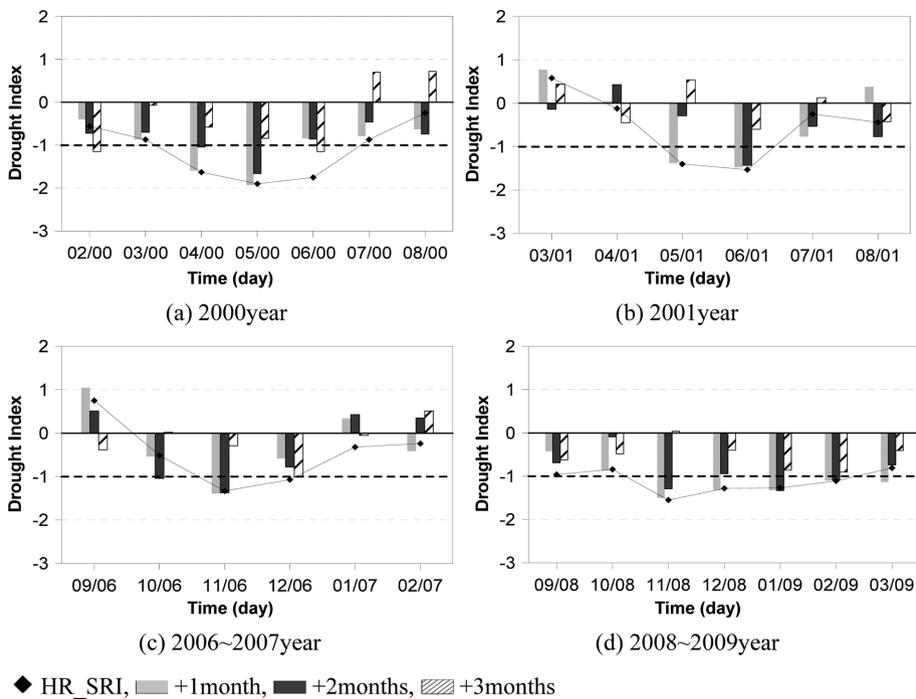
Figure 10은 계절별 PR\_SRI에 대한 RMSE를 공간적으로 분포시킨 것이다. 1개월 전망에서는 가을철 및 겨울철 RMSE가 0.20~0.40, 봄철은 0.40~0.70, 여름철은 0.60~0.90으로 상관계수와 같이 겨울, 가을 봄 및 여름철 순으로 겨울철 예측성이 높게 나타났다. 또한, 봄철에는 강원도 동해 지역에서의 RMSE가 높고 가을철에는 낮게 산정되었으며, 이는 2개월 전망에서 뚜렷하게 나타났다. 3개월 전망에서는 모든 계절 및 지역에서 RMSE가 1.00 이상으로 나타나 예측성이 낮은 것으로 판단된다.

월별 PR\_SRI에 대한 상관계수 및 RMSE를 산정하였으며, 주요 결과는 Table 3과 같다. 1개월 전망에서는 상관계수가 평균 0.82로 산정되었으며, 그 중 7월(0.62)이 낮고 11월(0.98)이 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 습윤기(6월~9월)에서는 0.62~0.80, 건조기(1월~5월, 10월~12월)에서는 0.65~0.98로 건조기 예측성이 높은 것으로 확인되었다. 2개월 및 3개월 전망에서는 상관계수가 평균 0.60, 0.31로 각각 산정되었으며, 특히 습윤기에서 건조기로 전환되는 9월, 10월 및 11월에 정확도가 크게 증가하였다. RMSE의 경우 건조기에 1개월 전망이 0.42, 습윤기는 0.71로 상관계수와 같이 건조기 정확도가 높게 나타났으며, 이는 2개월 및 3개월 전망에서도 유사하게 나타났다. 다만, 3개월 전망의 경우 모든 월에서 1.00 이상으로 값이 높게 나타나 가뭄예보에 있어 활용성이 상대적으로 낮다고 판단된다.

본 연구의 경우 1개월 전망에선 SON과 DJF를 중심으로 SRI의 정확도가 높게 나타났다. 이는 예보시점에서 유출량 산정을 위해 입력되는 초기수문조건(Initial Hydrological Condition, IHC)인 토양수분량의 영향 때문으로 볼 수 있다(Li et al., 2009). 즉, 강수가 적은 건조기에는 주로 기저유출이 발생하며, 약 1달 동안은 IHC의 영향에 더욱 민감하여 비록 강수량 전망결과가 불확실하여도 유출량의 정확도는 높게 산정된다(Wood and Lettenmaier, 2008). VIC 모델의 유출량은 지표유출량 및 기저유출량으로 구분되며, 지표유출량은 강수량, 기저유출량은 상부토층에서의 침투량과 하부 토양층에서 보유한 토양수분량으로부터 계산된다. 이로 인해 유출량의 거동은 습윤기에 GS5의 강수량, 건조기에 IHC에 더 민감하게 반응하게 된

**Table 3.** Monthly statistical results for HR\_SRI and PR\_SRI (1996~2009).

Month	Correlation Coefficient			Root Mean Square Error		
	+1month	+2months	+3months	+1month	+2months	+3months
Jan.	0.93	0.81	0.32	0.38	0.74	1.15
Feb.	0.94	0.73	0.60	0.27	0.83	1.07
Mar.	0.81	0.46	0.30	0.46	0.82	1.15
Apr.	0.65	0.45	0.33	0.79	0.96	1.04
May	0.83	0.43	0.29	0.62	1.13	1.22
Jun.	0.79	0.57	0.23	0.69	0.94	1.32
Jul.	0.62	0.29	0.25	0.83	1.14	1.20
Aug.	0.64	0.47	0.06	0.79	1.06	1.38
Sep.	0.80	0.30	0.25	0.55	1.13	1.20
Oct.	0.96	0.77	0.10	0.26	0.69	1.39
Nov.	0.98	0.90	0.47	0.22	0.48	1.09
Dec.	0.96	0.75	0.47	0.38	0.71	1.08



**Fig. 11.** SRI behavior analysis for real drought events.

다. 또한, IHC와 더불어 HR의 활용도 건조기 전망 결과의 정확도에 영향을 미친다. 그 예로 1개월 전망에서 가을철이 봄철보다 상관성이 더 높은 것은 3개월에 속한 월들 중 PR보다 상대적으로 많은 8월, 9월, 10월 HR의 영향에 지배되었기 때문이다.

### 4.3 실제가뭄사례 적용 및 분석

Figure 11은 2000년 이후 실제 가뭄기간 내의 피해

지역들에 대한 HR\_SRI 및 PR\_SRI를 평균한 후, 이를 시계열로 도시한 것이다. 가뭄사례는 KMA (2011) 및 So et al. (2014)의 자료를 참조하였다. 2000년 3월~6월 사례에서는 HR\_SRI가 -1.0 이하인 가뭄상태로 나타났으며, 이 때 PR\_SRI의 1개월 및 2개월 전망은 6월을 제외하고는 HR\_SRI과 유사한 거동을 보였다. 그러나 3개월 전망에서는 3월, 4월, 7월 및 8월에 정상 또는 습윤상태로 나타나 가뭄상황을 적절히 전망

하지 못하였다. 2001년 5월~6월 사례의 경우 PR\_SRI의 1개월 전망이 HR\_SRI와 같이 5월, 6월을 심각한 가뭄상태, 7월에는 모두 해갈되는 것으로 나타나 실제 가뭄상황을 잘 재현했다고 판단된다. 다만 2개월 전망에서는 6월만을 가뭄상태로 전망하였고, 특히 3개월 전망에서는 대부분 정상 또는 습윤 상태로 나타나 1개월 전망에 비해 예측성이 낮은 것으로 확인되었다. 2006년 가뭄사례의 경우 1개월 및 2개월 전망에서 1월 전망을 제외하고는 HR\_SRI와 거동이 유사하였지만, 3개월 전망에서는 차이가 높게 나타났다. 2008년 가뭄사례에서는 1개월 전망의 경우 HR\_SRI와 거동이 거의 유사하였으며, 2개월 전망에서는 10월을 정상상태로 전망하였지만 11월 이후로는 HR\_SRI와 같이 가뭄을 적절히 표현하였다. 3개월 전망에서는 모든 월에서 -1.0 이상으로 정상 또는 습윤상태로 나타나 예보의 활용성이 낮은 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 가뭄전망을 위한 GloSea5의 활용체계를 구축하고 예측성능을 평가하였다. 이를 위해 기상청 GloSea5 HCST 자료를 구축하고 지면모델인 VIC 모델에 입력하여 유출전망정보를 생산하였다. 가뭄지수는 국내 활용성이 높은 SRI를 선정하였으며, PR\_SRI를 산정하고 HR\_SRI와 비교분석하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 예보시점별 PR에 대한 아노말리를 계산하고 HR 아노말리와 비교분석 하였다. 1개월 전망의 경우 PR의 거동이 HR과 거의 일치하였으며, 실제 가뭄 기간에서 모두 음의 값이 산정되어 정상상태보다 낮은 유출의 상황을 적절히 고려하였다. 2개월 전망의 경우 일부 연도에서 1개월 전망보다 HR과 거동 차이가 다소 높았으나 대체로 HR 아노말리와 유사하였다. 3개월 전망에선 HR 아노말리와 반대의 거동을 보여 예측성이 낮은 것으로 확인되었다.

2) 선행시간별 ROC 분석을 수행하여 가뭄발생 유무에 따른 HR\_SRI와 PR\_SRI의 일치 여부를 평가하였다. 1, 2, 3개월 전망 모두 비적중률이 평균 0.10 이내, 적중률은 0.68, 0.45, 0.28로 선행시간이 짧을수록 비적중률이 낮고 적중률이 높은 것으로 확인되었다. ROC score는 0.83, 0.71, 0.60으로 나타났으며, 지역적으로는 전라도 및 경상도의 score가 높고 경기도 및 강원도 부근에선 낮게 나타났다.

3) PR\_SRI에 대한 상관계수 및 RMSE를 산정하였다. 1개월 전망에선 상관계수가 평균 0.82, 2개월 전망은 0.60, 3개월 전망은 0.31로 나타났으며, RMSE는 1개월 전망에서 평균 0.52, 2개월 전망은 0.89, 3개월 전망은 1.20으로 계산되었다. 여름철이 0.42로 가장

낮고 겨울철이 0.72로 높게 산정되었으며, 선행시간이 늘어날수록 HR\_SRI과의 거동 및 심도의 차이가 크게 나타났다. 습윤기보다는 건조기 예측성능이 높게 나타났으며, ROC 분석과 동일하게 경기, 강원도 지역에서의 정확도는 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다.

4) 2000년 이후 과거 가뭄피해 기간 동안에 PR\_SRI 및 HR\_SRI의 거동을 비교분석 하였다. 1개월 전망에서는 대체로 HR\_SRI와 거동이 유사하였으며, 피해기간 동안 -1.0 이하인 가뭄상태로 전망하여 예측성이 높다고 판단된다. 2개월 전망에서는 일부 가뭄기간에 해갈되는 것으로 전망하였으나 2001년 사례를 제외하고는 대부분 HR\_SRI와 유사한 거동을 보였다. 다만, 3개월 전망에서는 가뭄기간에 대부분 정상 또는 습윤상태로 나타내어 예보의 활용성이 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

국내의 경우 홍수에 비해 가뭄예보에 관한 기술개발이 미흡한 실정이다. 본 연구의 결과는 기상과 수문의 연계를 통한 가뭄전망정보를 생산하고 활용성을 구체적으로 제시하였다는 측면에서 의의가 있다. 향후 여러 통계적 보정기법을 적용하여 가뭄예보의 정확도 개선을 위한 연구가 수행된다면 더욱 실효성 높은 가뭄전망정보 생산이 가능할 것이다. 또한, 앙상블 체계의 확률론적 가뭄전망정보 생산 및 제공기술이 개발된다면 다양한 가뭄예보가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 2011년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NO. 2011-0030040)과 한국과학기술정보연구원에서 수행하는 (초고성능컴퓨팅 기반 국가현안 대응체계 구축사업)사업의 위탁연구로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- Asia-Pacific Network (APN) for Global Change Research, 2013: Climate Change Impact Assessment on the Asia-Pacific Water Resources Under AWCI/GEOSS retrieved from <http://www.apn-gcr.org/resources/items/show/1576>.
- Bae, D.-H., K.-H. Son, and H.-A. Kim, 2013b: Derivation & evaluation of drought threshold level considering hydro-meteorological data on South Korea. *Atmosphere*, **46**, 289-300 (in Korean with English abstract).
- \_\_\_\_\_, J.-B. Ahn, H.-K. Kim, H.-A. Kim, K.-H. Son, S.-R. Cho, and U.-S. Jung, 2013a: Development & evaluation of real-time ensemble drought prediction. *Atmosphere*, **23**, 113-121 (in Korean with English

- abstract).
- Bowler, N., A. Arribas, S. Beare, K. E. Mylne, and G. Shutts, 2009: The local ETKF and SKEB: Upgrades to the MOGREPS short-range ensemble prediction system. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **135**, 767-776.
- Essery, R. L. H., M. J. Best, R. A. Betts, P. M. Cox, and C. M. Taylor, 2003: Explicit representation of sub-grid heterogeneity in a GCM land surface scheme. *J. Hydrometeor.*, **4**, 530-543.
- Hunke, E. C., and W. H. Lipscombe, 2008: CICE: the Los Alamos sea ice model documentation and software user's manual, Version 4.0.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2011: Development of hydro-meteorological early warning system for response to climate change.
- Korea Meteorological Administration (KMA), 2012: Construction of the abnormal climate probability forecast system using the joint seasonal forecast system between KAM and Met Office.
- Lavers, D., L. Luo, and E. Wood, 2009: A multiple model assessment of seasonal climate forecast skill for applications. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L23711.
- Li, H., L. Luo, E. F. Wood, and J. Schaake, 2009: The role of initial conditions and forcing uncertainties in seasonal hydrologic forecasting. *J. Geophys. Res.*, **114**, D04114, doi:10.1029/2008JD010969.
- 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. *J. Geophys. Res.*, **99**, 14415-14428.
- \_\_\_\_\_, G. Jianzhong, and L. Ruby Leung, 2004: Assessment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations. *J. Hydrol.*, **298**, 287-310.
- Madec, G., 2008: NEMO ocean engine. *Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL), France*, **27**.
- Mason, I. B., 1982: A model for assessment of weather forecasts. *Aust. Meteor. Mag.*, **30**, 291-303.
- Sheffield, J., and E. F. Wood, 2008: Global trends and variability in soil moisture and drought characteristics, 1950-2000, from observation-driven simulations of the terrestrial hydrologic cycle. *J. Climate*, **21**, 432-458.
- Shukla, S., and A. W. Wood, 2008: Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2007GL032487.
- Singh, V., and Kluwer, 1996: *Geographical information systems in hydrology*. Kluwer Academic Publishers, 175-194.
- So, J.-M., K.-H. Son, and D.-H. Bae, 2014: Estimation and assessment of bivariate joint drought index based on copula functions. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, *KWRA*, **47**, 171-182.
- Son, K.-H., 2015: Enhancement of hydrological drought outlook accuracy using Bayesian method and their real-time prediction applicability. Ph. D. dissertation, Dept. of Civil & Environmental Eng., Sejong Univ. Seoul.
- \_\_\_\_\_, J.-D. Lee, and D.-H. Bae, 2010: The application assessment of global hydrologic analysis models on South Korea. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **43**, 1063-1074.
- \_\_\_\_\_, D.-H. Bae, and J.-S. Jung, 2011: Drought analysis and assessment by using land surface model on South Korea. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **44**, 667-681.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and J.-H. Ahn, 2013: Projection and analysis of drought according to future climate and hydrological information in Korea. *J. Korea Water Resour. Assoc.*, **47**, 71-82.
- Trenberth, K. E., 1984: Some effects of finite sample size and persistence on meteorological statistics. Part II: Potential predictability. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 2369-2379.
- Valcke, S., 2011: OASIS3 user guide (prism 2-5), *Tech. Rep. 3 Programme for integrated earth system modeling (PRISM) support initiative*.
- Wang, D., M. Hejazi, X. Cai, and A. J. Vacocchi, 2011: Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois. *Water Resour. Res.*, **47**, W09527.
- Wilks, D. S., 1995: *Forecast verification*. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Academic Press.
- \_\_\_\_\_, 2006: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. Academic Press.
- Wood, A. W., and D. P. Lettenmaier, 2008: An ensemble approach for attribution of hydrologic prediction uncertainty. *J. Geophys. Res.*, **35**, L14401, doi:10.1029/2008GL034648.
- Yoon, K. H., K. MO, and E. F. Wood, 2012: Dynamic-model-based seasonal prediction of meteorological drought over the contiguous United States. *J. Hydrometeor.*, **13**, 463-482.
- Yuan, X., E. F. Wood, L. Luo, and M. Pan, 2011: A first look at Climate Forecast System version 2 (CFSv2) for hydrological seasonal prediction. *J. Geophys. Res.*, **38**, L13402, doi:10.1029/2011GL047792.
- \_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, N. W. Chaney, J. Sheffield, J. Kam, M. Liang, and K. Guan, 2013: Probabilistic seasonal forecasting of African drought by dynamical models. *J. Hydrometeor.*, **14**, 1706-1720.