

ESP 기법을 이용한 수문학적 가뭄전망의 활용성 평가

Applicability Assessment of Hydrological Drought Outlook Using ESP Method

손 경 환* / 배 덕 효**

Son, Kyung Hwan / Bae, Deg Hyo

Abstract

This study constructs the drought outlook system using ESP (Ensemble Streamflow Prediction) method and evaluates its utilization for drought prediction. Historical Runoff (HR) was estimated by employing LSM (Land Surface Model) and the observed meteorological, hydrological and topographical data in South Korea. Also Predicted Runoff (PR) was produced for different lead times (i.e. 1-, 2-, 3-month) using 30-year past meteorological data and the initial soil moisture condition. The HR accuracy was higher during MAM, DJF than JJA, SON, and the prediction accuracy was highly decreased after 1 month outlook. SRI (Standardized Runoff Index) verified for the feasibility of domestic drought analysis was used for drought outlook, and PR_SRI was evaluated. The accuracy of PR_SRI with lead times of 1- and 2-month was highly increased as it considered the accumulated 1- and 2-month HR, respectively. The Correlation Coefficient (CC) was 0.71, 0.48, 0.00, and Root Mean Square Error (RMSE) was 0.46, 0.76, 1.01 for 1-, 2- and 3-month lead times, respectively, and the accuracy was higher in arid season. It is concluded that ESP method is applicable to domestic drought prediction up to 1- and 2-month lead times.

Keywords : drought outlook, ESP method, LSM, predicted runoff, SRI

요 지

본 연구에서는 ESP (Ensemble Streamflow Prediction) 기법을 활용한 가뭄전망 체계를 구축하고 가뭄예보에 있어 활용성을 평가하였다. 과거 관측 수문기상 및 지형정보를 이용하여 우리나라 전역에 지면모델(Land Surface Model, LSM)을 구축하고 유출량(Historical Runoff, HR)을 생산하였다. 또한, 모의기간 동안 과거 30개 기상자료와 초기 토양수분량을 이용하여 선행시간별(1, 2, 3개월) 전망된 유출량(Predicted Runoff, PR)을 생산하였다. 평가결과 여름 및 가을철 보다 봄철 및 겨울철에 정확도가 높았으며, 1개월 전망 이후로는 정확도가 낮게 나타났다. 가뭄지수는 국내 가뭄해석에 있어 검증된 표준유출지수(Standardized Runoff Index, SRI)를 활용하였으며, PR_SRI를 산정 및 평가하였다. 1, 2개월 전망에서는 과거 HR이 고려되어 ESP HR에 비해 정확도가 크게 개선됨을 알 수 있었다. 선행시간별 상관계수는 평균 0.71, 0.48, 0.00, 평균제곱근오차는 0.46, 0.76, 1.01로 나타났으며, 건조기에 정확도가 높게 나타나 1, 2개월 전망까지는 ESP를 활용한 국내 가뭄예보의 활용성이 높다고 판단된다.

핵심용어 : 가뭄전망, ESP 기법, LSM, 유출전망, SRI

* 세종대학교 물자원연구소 · 건설환경공학과 공학박사 (e-mail: skhdr@hanmail.net)
Ph.D., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

** 교신저자, 세종대학교 물자원연구소 · 건설환경공학과 교수 (e-mail: dhbae@sejong.ac.kr, Tel: 82-2-3408-3814)
Corresponding Author, Prof. Dept. of Civil and Environmental Engrg., Sejong Univ, Seoul 143-747, Korea

1. 서 론

가뭄은 강수량 부족에 따른 물수지 불균형 현상으로, 시작과 끝을 알기 어렵고 홍수와 달리 장기간 넓은 지역에서 피해가 발생한다(Maliva and Missimer, 2012). 이로 인해 가뭄해석은 물 순환의 거동을 총체적으로 다뤄야할 만큼 해석범위가 넓고, 대처가 어려운 재해로 알려져 있다. 통상 가뭄을 해석하기 위한 도구로는 가뭄지수가 활용된다. 가뭄지수는 가뭄을 정량화하고 객관적으로 판단하기 위해 개발된 정보로 해석관점 및 가용되는 입력자료(강수, 유출, 토양수분 등)에 따라 기상학적, 수문학적 및 농업적 가뭄지수 등으로 분류된다. 현재 국내 가뭄관리 기관에서는 가뭄지수를 이용하여 그 목적에 맞게 가뭄 상황을 판단해 왔다(KMA, 2012; NEMA, 2013). 다만, 기상학적 가뭄지수에 대한 의존도가 높은 실정이라서 가뭄을 판단하는데 상당히 제한적이다. 기상학적 가뭄지수는 계산이 비교적 간단하고 가뭄 시작을 감지하는데 용이하다는 장점이 있지만 상대적으로 지표에 대한 가뭄상황을 적절히 표현하지 못하는 문제가 있다. 따라서 가뭄관리에 수문학적 및 농업적 가뭄지수의 활용도 필요하며, 그 중 물 사용과 직결되는 수문학적 가뭄지수의 활용이 중요한 요소로 꼽힌다(Shukla and Wood, 2008).

적시에 경보해야하는 홍수와 달리 가뭄은 진행속도가 느려 시간적으로 대처할 여유가 많기 때문에 비록 진행중인 지라도 초기에 감지할 수 있다면 피해를 최소화 할 수 있다. 이미 수문기상 선진국에서는 가뭄전망을 위한 연구를 수행해 왔으며, 특히 물리적기반의 기후모델과 수문모델의 연계해석을 통한 수문학적 가뭄전망에 관해 여러 기술들이 개발되어 왔다(Shukla and Lettenmaier, 2011; Yuan et al., 2011; Mo et al., 2012; Trambauer et al., 2014). 대표적으로 미국 CPC (Climate Prediction Center)와 PU (Princeton University)에서는 기상모델인 CFS (Climate Forecast System)와 수문모델인 LSM의 연계해석을 통해 수문전망정보를 생산하고, 이를 가뭄지수로 변환하여 웹 기반으로 제공하고 있다. 그러나 기후모델의 불확실성, 기상전망자료의 획득 및 처리, 수문모델과의 연계해석 문제로 수자원 관리자 입장에서 이를 활용하는데 많은 어려움이 야기되어 왔다(Landsea and Knaff, 2000; Coelho et al., 2002).

한편, 수자원 분야에서는 물공급전망 및 확률예보를 목적으로 1970년대 NWS (National Weather Service)에서 개발한 ESP (Ensemble Streamflow Prediction) 기법을 주로 활용해 왔다. ESP는 예측 당시의 초기 수문조건(Initial

Hydrological Condition, IHC)을 설정하고 장래에 발생 가능한 과거 기상자료를 조합하여 장기 유출을 모의한 후, 그 결과물로 다수의 유출량 시나리오를 발생시키는 기법이며(Lee et al., 2011), 전 세계적으로도 활용도가 높다. Smith et al. (1992)은 미국 동남부 지역에 대한 ESP 기법을 적용하고 활용성을 평가하였으며, Franz et al. (2005)은 콜로라도 유역을 대상으로 물공급을 위한 ESP 결과를 평가하였다. Wood et al. (2002)은 ESP 해석에 있어 IHC와 과거 기상자료의 역할과 활용범위를 규명하였으며, Wood and Lettenmaier (2007)은 ESP 기법을 활용한 장기수문전망정보 제공 시스템을 구축 및 평가한 바 있다.

최근에는 기상전망정보와의 결합을 통해 ESP 예측성을 개선하는 연구도 활발히 진행되어 있다. Croley (2000)은 확률론적 기상 예측자료를 이용하여 재현 가능한 하천 유출량 앙상블에 가중치를 부여할 수 있는 연구를 수행하였고, Maurer et al. (2004)은 주성분 분석을 이용하여 기후학적 패턴을 고려한 ESP의 예측수문전망정보의 보정기술을 개발하였다. Warner et al. (2005)은 중기 기상 앙상블 자료를 입력으로하는 ESP 기법의 적용성을 제안한 바 있다. 국내에서도 Jung and Kim (2002)은 기상 예측자료를 이용한 PDF-ratio 가중치 부여법을 통해 충주댐 월 유입량 예측에 관한 연구를 수행하였고, Kim and Bae (2006)는 기상청 GDAPS 중기 기상수치예보자료를 활용한 ESP 기법을 개발하여 미래 발생할 수 있는 댐 유입량의 확률예측방법을 개발하였다. 또한, ESP 기법은 가뭄예보에도 활용되어 있는데 Mo (2008)는 미국 전역에 물리적 기후모델과 ESP 기법으로부터 가뭄지수를 생산하고 장단점을 분석한 바 있으며, UW (University of Washington)에서는 ESP를 이용하여 웹기반 가뭄전망정보를 생산 및 제공하는 체계를 구축하였다(<http://www.hydro.washington.edu/forecast/sarp/>).

이처럼 ESP 기법에 관한 연구가 국내외적으로 활발히 수행되어 왔음을 알 수 있다. 그러나 아직까지 ESP 기법을 이용하여 가뭄을 전망하고 평가한 사례는 미흡한 실정이라 이에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 ESP 기법을 이용한 수문학적 가뭄전망정보를 생산하고 국내 가뭄예보에 있어 활용성을 평가하고자 한다. 이를 위해 ESP 기법의 유출전망정보의 경우 어떠한 보정절차 없이 가뭄전망에 바로 활용하고자 한다. 본 논문의 2장에서는 ESP 기본 개념 및 본 연구를 위해 구축된 ESP 기법을 설명하고, 수문학적 가뭄지수 산정 및 가뭄전망정보에 대한 평가방법에 대해 기술하였다. 3장에서는 ESP 기법으로부터 생산된 유출전망정보의 정확도 평가내용을 기술하였다. 4장에서는 유출전망정보로부터 가뭄지수를 계산하고 이를

평가 및 검증한 사항에 대해 제시하고, 5장에는 본 연구에서 개발한 주요 연구결과를 요약 기술하였다.

2. 연구방법

ESP를 활용한 수문학적 가뭄전망체계 구축 및 평가 절차는 Fig. 1과 같다. 우리나라 전역을 대상으로 예보시점의 초기수문조건, 선행시간별 과거 30년 관측된 일단위 기상 정보들을 앙상블로 적용한 후, 지면모델을 구동하여 유출 전망정보(Predicted Runoff, PR)를 생산한다. 또한 매 해의 관측기상자료로부터 유출해석정보(Historical estimated Runoff, HR)를 생산한다. 수문학적 가뭄전망을 위해 가뭄 지수인 SRI (Standardized Runoff Index)를 선정하였으며, PR_SRI 및 HR_SRI를 각각 산정한다. PR_SRI의 예측 성능 검증하고자 시계열 분석, 상관관계수 및 RMSE (Root Mean Square Error) 분석을 통해 가뭄전망의 활용성을 평가한다.

2.1 ESP 기법

ESP는 Fig. 2와 같이 과거의 기상조건이 미래에 재현될 수 있다는 전제하에 예보시점의 토양수분량, 유출량, 증발산량 및 적설량 등 유역의 IHC와 미래에 재현 가능한 과거 기상자료를 결합하여 경험적 예측을 수행하는 기법이다. 즉, ESP 기법을 통해 미래에 발생할 가능성이 있는 모든 기상시나리오를 수문모델에 입력하여 다수의 수문 시나리오를 얻을 수 있다. 수문모델의 초기조건은 예측하는 시점에 따라 변하므로 동일한 기상시나리오를 사용한다 하더라도 대상지역의 초기수문조건에 의해 다르게 생산된다. 이와 같은 이유로 ESP는 조건부 모의로 간주되기도 한다(Kim and Bae, 2006).

ESP 해석을 위한 수문모델로는 국내외적으로 대륙 규모의 유출해석에 있어 그 활용성이 검증된바 있는 VIC

(Variable Infiltration Capacity) 모델을 선정하였다(Liang et al., 1996; Son et al., 2010). 이 모델은 대기와 식생 그리고 토양의 상호작용 등의 수문과정을 기반으로 물과 에너지의 유동(water & energy flux)을 모의하는 분포형 모형으로써 크게 물수지(Water balance), 하도추적(channel routing), 에너지수지(energy balance) 등으로 구성되어 있으며, 각 모듈은 독립적으로 수행된다. 모델에서 적용 가능한 격자의 범위는 $1/8^{\circ} \sim 2^{\circ}$ 정도로 다양한 공간분해능이 가능하여 기상모델(Global Climate Model, GCM)과의 직접적인 연계에 용이하다(Liang et al., 1996). 또한, 과거 기상자료의 활용 기간은 문헌마다 다소 상이하지만 주로 과거 30년을 이용하였으며, 30년은 WMO (World Meteorological Organization)에서 제시한 기후값(Climatology) 계산을 위해 활용되는 기간이다.

본 연구에서 구축한 ESP 기법은 과거 30년 동안의 격자별 일단위 기상(강수량, 최고기온, 최저기온 및 평균풍속) 자료를 LSM에 입력하여 앙상블 유출전망정보를 산출하는 과정으로 이뤄진다. 예를 들어, 2010년 3월 1일에 향후 3개월 동안의 유출전망정보를 과거 30년 기상자료로

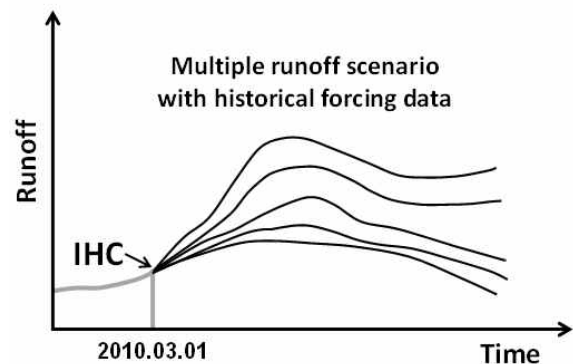


Fig. 2. Conception of Runoff Outlook using ESP Method

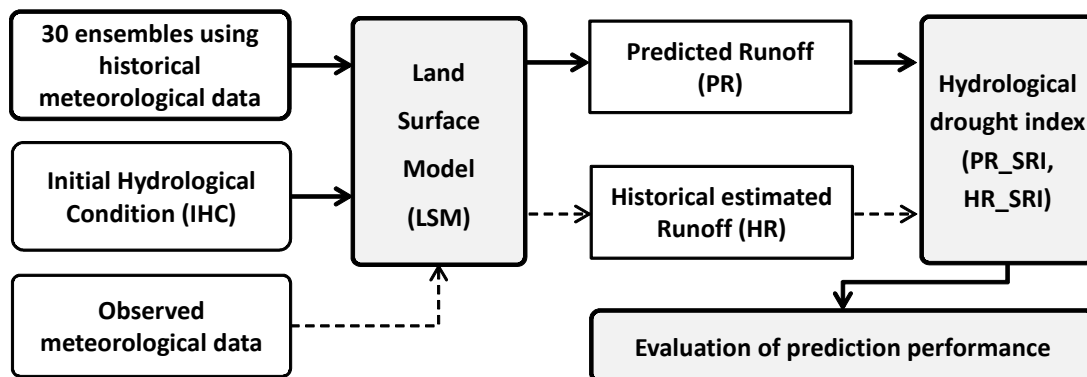


Fig. 1. Flowchart of Hydrological Drought Outlook and Evaluation Using Esp Method

부터 얻고자 한다면, 1980~2009년 동안 관측된 3~5월 일단위 강수 및 기상 자료와 예보시점에서의 IHC를 LSM에 입력하여 30개의 앙상블 유출량을 생산하는 것이다. 모델의 초기조건은 예보시점까지 관측 기상자료로부터 모의된 토양수분량 자료를 이용하였으며, 최종 예측값은 각 멤버를 대표하는 평균 유출량을 활용하였다. 또한, 모의기간은 1996~2010년으로 선정하였으며, 매월 예측선행시간(1, 2, 3개월)별 유출전망정보(Predicted Runoff, PR)를 생산하였다. ESP 기법은 앙상블 PR 생산이 가능하여 확률론적 예보에 주로 활용되어 왔으며, 최근에는 정확도 개선을 위해 다양한 정보로부터 적정 멤버 선정 및 가중치 추정에 관한 연구가 다수 수행되어 왔다. 다만, 본 연구에서 이와 같은 보정 방법을 고려하지 않은 연유는 가뭄진망에 있어 ESP 기법의 순수 예측성 및 활용성을 제시하기 위함이며, 특히 평균 PR은 기존 연구에서 유출전망을 위해 몇 차례 이용된바 있어 활용에는 큰 무리가 없다고 판단된다(Luo et al., 2008; Wood and Lettenmaier 2008).

2.2 수문학적 가뭄지수

ESP 기법을 이용한 수문학적 가뭄진망을 위해 가뭄지수인 SRI (Standardized Runoff Index)를 선정하였다. 이 지수는 지표 및 지하수 유출과 융설 등의 영향이 고려된 유출량이 활용되며, 다양한 지속기간 구분(1, 3, 6, 9 및 12개월 등)이 가능하여 장단기 수문학적 가뭄해석에 있어 매우 유용하다(Shukla and Wood, 2008; Wang et al., 2011; Jung and Chang, 2012). Son et al. (2011)은 과거 가뭄피해사례와의 비교분석을 통해 SRI가 기상학적 가뭄지수인 SPI 및 PDSI에 비해 국내 가뭄상황을 보다 잘 재현함을 제시한바 있다. SRI 산정절차는 해당 시점을 기준으로 지속기간별 누가 시계열값 산정, 빈도해석, 매개변수 추정, 적합도 검정 그리고 누가확률값에 대한 표준화 순으로 이루어지며, Table 1과 같이 지수의 범위에 따라 심도가 구분된다.

Table 1. Classification of Drought Severity for the Range of SRI Values (Shukla and Wood 2008)

| 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 | $-2.00 \geq Z$ |

본 연구에서는 SRI의 산정을 위해 격자별 일단위 유출량으로부터 해당시점을 기준으로 과거 특정 지속기간에 따른 연도별 누적 유출량값을 산정하였다. 여기서 유출량의 경우 Fig. 3과 같이 예보시점까지는 과거 관측기상정보로부터 모의된 HR, 이후에는 PR을 이용하였다. 또한, 지속기간은 기존 문헌에서와 같이 국내 가뭄특성을 고려하여 3개월을 활용하였으며(Ryu et al., 2002; Son et al., 2011), 매월 예보시점을 기준으로 1, 2개월 전망은 과거 2개월 및 1개월, 3개월 전망은 미래 3개월의 HR 값을 이용하였다. 누가확률값 산정을 위해 빈도해석이 수행되며, 적정 확률분포형으로는 Log-Pearson type-3을 선정하였다(Son et al., 2011). 확률분포형의 매개변수 결정은 기존 국내에서 갈수유량자료에 대한 빈도해석 시 활용된 L-moment 법(Hosking and Wallis, 1993)을 적용하였으며, 추정된 분포의 적합도를 검정하였다. 마지막으로 해당기간에 대한 누가확률값을 계산하고 이를 표준정규분포와 동일한 누가확률값의 변수(Z)로 변환하여 최종 가뭄지수를 산정하였다.

2.3 전망결과 분석 및 평가방법

ESP 결과는 초기조건에 영향을 미치지 못할 정도로 시간규모가 커질 경우 과거 기상자료의 영향에 지배되며, 변동성이 높은 만큼 정확도는 낮아지게 된다. 본 연구에서는 예보시점을 기준으로 시간규모에 따른 입력자료(IHC 및 과거 30년 기상자료)의 영향을 검토하기 위해 모의기간(1996~2010년) 동안 예보시점별 30개의 강수량과 전망된 지표유출량 및 기저유출량의 변동성을 분석하고자 하며, 이를 위해 Eq. (1)의 변동계수(Coefficient of Variance, CV)를 이용하였다.

$$CV_t = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{30} (x_{t,i} - \bar{x}_t)^2}{30}}}{\bar{x}_t} \quad (1)$$

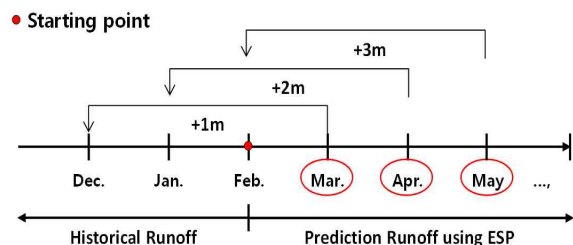


Fig. 3. Schematic of Runoff Data Utilization to Estimate Future SRI for Different Lead Times

여기서, t 는 예측 일, $x_{t,i}$ 는 t 시간의 i 번째 강수량, 지표 유출량 또는 기저유출량, \bar{x}_t 는 t 시간의 앙상블 평균값을 의미한다.

가뭄예보에 있어 PR_SRI의 활용성 평가를 위해 본 연구에서는 상관계수(Correlation Coefficient, CC)와 평균 제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)를 이용하였다. RMSE는 자료의 개수에 무관하고 차원이 해석하고자 하는 변량과 같은 차원을 갖는 지표로 전망정보와의 평균적으로 어느 정도의 오차가 발생하는지를 나타내는 일종의 평균치라 할 수 있다. CC는 -1과 +1사이의 값을 가지는 무차원계수로써 표준편차의 비율을 이용하여 전망과 관측의 크기, 모양의 일치 정도를 동시에 파악할 수 있는 지표이다. RMSE가 0에 가까울수록, CC가 +1에 가까울수록 전망결과가 관측에 잘 일치한다고 평가된다. 본 연구에서는 PR_SRI 및 HR_SRI를 이용하여 두 통계치를 계산하고자 하며, 선행시간에 따라 이를 월별 및 계절별로 제시하고자 한다. 여기서, 계절별 평가는 해당 계절에 속한 각 월별 통계치들의 평균값을 의미한다.

3. ESP 기법을 이용한 유출전망 및 평가

3.1 VIC 모델 구축 및 평가

본 연구에서는 우리나라 전역에 대해 VIC 모델을 구축하고자 입력자료인 지형정보와 기상정보를 수집하였다. 지형정보는 국토교통부에서 제공하는 100m 간격의 DEM (Digital Elevation Model)과 환경부에서 제공하는 100m 간격의 토지피복도를 이용하였으며, 농업과학기술원으로부터 정밀도양도(1:25000)와 토양 속성자료를 제공받아 토양특성인자를 산정하였다. 최대 및 최저기온과 평균풍속은 기상청 ASOS (Automated Synoptic Observing System)

59개소, 강수량은 ASOS 59개소와 AWS (Automatic Weather System) 461개소, 국토교통부 350개소로 총 1976~2009년 동안의 자료를 수집하였다. 이 중 강수량의 경우 해당 기간 동안에 관측소별로 관측시작 시기가 다르고 중간에 운영을 중단하는 경우가 발생함에 따라 10년 마다 관측소를 업데이트하여 자료를 구축하였다. VIC 모델은 분포형 모델로서 격자별 입력정보 구축이 필요하다. 따라서 수집된 자료는 모델에서 요구하는 적정해상도인 1/8°(약 12.5 km)로 전환해야하며(Liang, 2004), 본 연구에서는 남한전체를 1/8° 해상도로 구분하여 총 586개 격자에 대한 기상 및 지형정보를 격자에 맞게 재구성 하였다.

가뭄해석에 유출량을 활용하기 위해서는 모델의 매개변수를 추정하여 모의 유출량을 생산하고 관측된 유출량과의 비교 및 검증이 선행되어야 한다. Son et al. (2010)은 2004년까지 8개 댐유역(소양, 충주, 괴산, 임하, 안동, 합천, 대청, 섬진강댐)별 관측된 유출량으로부터 VIC 모델의 매개변수를 추정하고 남한 전역을 대표할 수 있는 대표매개변수를 산정 및 검증한 바 있다. 본 연구에서는 모의 기간을 2010년까지 확장하고 기존 연구에서의 매개변수를 이용하여 격자별 유출량을 생산하였다. 각 댐별 통계분석 결과는 Table 2와 같다. 분석 결과 CC와 모형효율성계수(ME)의 경우 각각 0.83~0.89, 0.70~0.80, RMSE는 3.26~3.80 mm/day, 유출용적오차(VE)는 -9.87~9.47%의 범위로 나타나 활용성이 높은 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 산정된 매개변수를 토대로 가뭄해석을 위한 남한 전역의 유출정보를 생산하였다.

3.2 유출전망정보 생산 및 평가

ESP 기법을 통해 매월 예보시점 마다 PR을 생산하였으며, 이를 선행시간별(1, 2, 3개월) 누적값으로 변환하였

Table 2. Statistical Results at Each Dam Site

| Dam Site | CC | RMSE (mm/day) | ME | VE (%) |
|-----------|------|---------------|------|--------|
| Soyang | 0.89 | 3.38 | 0.80 | -5.97 |
| Chungju | 0.87 | 3.50 | 0.75 | -9.87 |
| Guesan | 0.86 | 3.33 | 0.72 | -2.98 |
| Imha | 0.84 | 3.26 | 0.70 | -5.53 |
| Andong | 0.87 | 2.78 | 0.75 | 0.98 |
| Habcheon | 0.88 | 2.80 | 0.76 | 9.47 |
| Daecheong | 0.86 | 2.60 | 0.75 | 7.45 |
| Seomjin | 0.83 | 3.74 | 0.70 | 2.41 |

Percent error in Volume (VE) = $100 \times (\sum S_t - \sum O_t) / \sum O_t$, Root mean square error (RMSE) = $\sqrt{\sum (O_t - S_t)^2 / n}$, where n is a number of data, Nash-Sutcliffe efficiency (ME) = $1 - \frac{\sum (O_t - \bar{O})^2 - \sum (O_t - S_t)^2}{\sum (O_t - \bar{O})^2}$, Correlation coefficient (CORR-C) = $\frac{\sum (O_t - \bar{O})(S_t - \bar{S})}{\sqrt{\sum (O_t - \bar{O})^2 \sum (S_t - \bar{S})^2}}$, $\bar{O} = \sum O_t / n$, $\bar{S} = \sum S_t / n$, Where, O is observed runoff and S is simulated runoff.

다. 또한, 매년 산정된 PR 및 HR로부터 상관계수를 추정하여 예측성능을 평가하였다. Fig. 4는 계절에 따른 586개 격자별 PR의 상관계수를 Box-whisker 그래프로 나타낸 것이며, PR과의 비교를 위해 예측에 활용된 강수량에 대한 상관계수도 함께 제시하였다. 진한 검은색 선은 Weathington et al. (2012)이 제시한 유의수준($\rho=0.10$)에 해당하는 상관계수 임계값(0.43)을 의미하며, 격자별 추정된 상관계수가 0.43 이상일 경우 유의수준을 만족하고 이하일 경우 만족하지 못한 것으로 해석된다.

1개월 전망의 경우 봄철(MAM)에는 강수량 0.11~-0.10, 유출량 0.30~0.49, 중간값은 0.00, 0.40으로 각각 나타났으며, 여름철(JJA)에는 강수량 -0.32~-0.11, 유출량 -0.22~0.00 중간값은 -0.26, -0.12, 가을철(SON)은 -0.32~-0.21, 0.01~0.22, -0.27, 0.11, 겨울철(DJF)은 -0.26~-0.04, 0.29~-0.51, -0.17, 0.45로 확인되었다. 2개월 전망에서는 강수량 상관계수의 중간값이 MAM -0.05, JJA -0.23, SON

-0.35, DJF -0.23, 유출량은 0.08, 0.02, -0.08, 0.14로 나타났으며, 3개월 전망에서는 강수량이 -0.06, -0.26, -0.34 및 -0.23, 유출량은 0.13, -0.02, -0.20, 0.01로 유출량의 상관계수가 강수량에 비해 모두 높게 산정되었다. 또한, 강수량의 상관계수는 선행시간별로 차이가 미비하였으나 유출량의 경우 MAM, SON 및 DJF 기간에서 선행시간이 늘어날수록 상관계수가 낮게 나타났으며, 그 중 1개월 전망의 MAM 및 DJF의 상관성이 높은 것으로 확인되었다. 또한, 격자평균 상관계수에 대한 유의수준을 검토한 결과 강수량의 경우 본 연구에서 선정한 유의수준을 모두 만족하지 못한 것으로 나타났다. 유출량은 DJF 1개월 전망에서는 유의수준을 만족하였으나, 그 외 계절에서는 모두 만족하지 못한 것으로 확인되었다.

통상 유출량의 거동은 강수량에 영향을 받기 때문에 상관성은 유사할 것으로 판단되지만 본 연구의 경우 1개월 전망에선 MAM과 DJF를 중심으로 강수량보다 유출량의

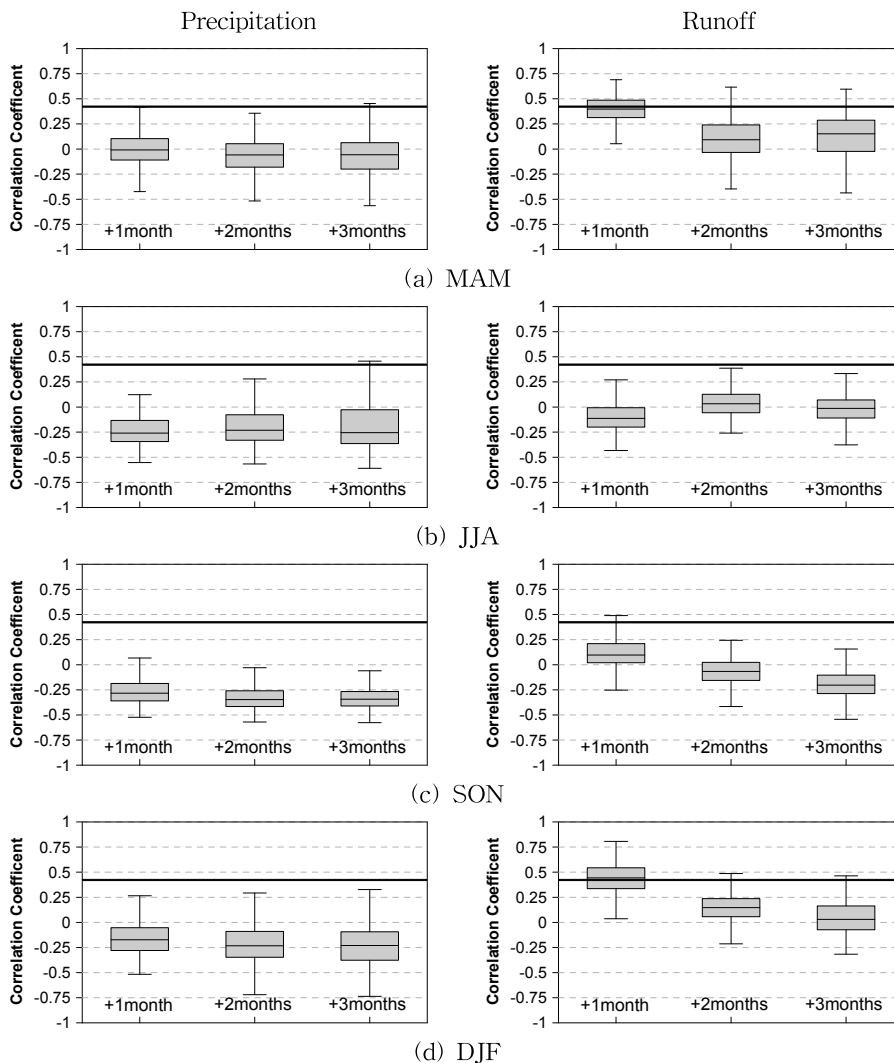


Fig. 4. Seasonal Correlation Coefficient for Precipitation and Runoff Data

정확도가 모두 높게 나타났다. Li et al. (2009)은 이를 LSM에 입력되는 IHC의 영향에 의한 것임을 주장하였으며, Wood and Lettenmaier (2008)은 건조기에 IHC의 영향이 더 민감하여 비록 강수량 전망결과가 불확실하여도 유출량의 정확도는 더욱 높게 나타난다고 하였다. VIC 모델의 유출량은 지표유출량 및 기저유출량으로 구분되며, 지표유출량은 강수량, 기저유출량은 상부토층에서의 침투량과 하부 토양층에서 보유한 토양수분량으로부터 계산된다. 이로 인해 유출량의 거동은 습윤기에 ESP의 강수량, 건조기에 IHC에 더 민감하게 반응하게 된다.

본 연구에서는 IHC 영향을 구체적으로 분석하고자 건조기, 습윤기에 속한 1월 및 6월을 예보시점으로 선정하고, Eq. (1)을 이용하여 강수량, 지표유출량 및 기저유출량으로부터 변동계수를 계산하였다. Fig. 5는 14년 평균 CV_t 값을 각 성분별로 도시한 것이다. 두 결과에서 강수량 CV_t 의 범위는 1.8~3.5이며, 6월 예보의 CV_t 가 1월 예보에 비해 높은 것으로 나타났다. 지표유출량은 강수량의 CV_t 와 거동이 유사하였으나, 값은 더 높게 산정되었다. 기저유출량의 CV_t 는 두 성분들에 비해 대체로 낮고, 예보시점에서는 거의 변화가 없는 것으로 확인되었다. 1월 예보에서 18일 전까지 CV_t 가 0.0~1.0으로 점차 증가하다가 30일 이후로는 1.0~3.0의 범위 내에 위치하였으며, 6월 예보에서는 초반 3일을 제외하고는 모두 1.0 이상으로 강수량 CV_t 와 근접한 것으로 나타났다. 즉, 습윤기에는 1, 2, 3개월 전망 모두 ESP 강수량, 건조기에는 1개월까지 IHC가 유출량 변화에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있다.

4. 가뭄전망 및 활용성 평가

4.1 시계열 가뭄전망정보의 거동분석

본 연구에서는 모의기간 동안에 PR을 이용하여 월별 PR_SRI를 계산하였으며, HR_SRI와 비교평가 하였다. 여기서 PR은 지속기간 3개월의 누적값을 의미하며, 1, 2개월 전망의 경우 예보시점 이전까지는 HR이 고려되었다. Fig. 6은 매년 5월, 8월, 11월 및 2월을 대상으로 선행시간별 전망된 격자 전체 SRI를 평균하여 나타낸 것이다. 그림에서 X축은 연도, 회색 막대는 HR_SRI, 진한회색 막대는 PR_SRI를 의미한다. HR_SRI는 2000년, 2001년 및 2008년 5월(May), 1996년, 1997년, 2001년, 2006년, 2008년 및 2009년 11월(Nov.), 1996년, 1999년, 2009년 2월(Feb.)을 -1.0 이하인 가뭄 상태로 해석하였으며, 이는 기존 MOLIT (2002) 및 KMA (2011)이 제시한 과거 기록된 가뭄피해기간과 동일한 것으로 확인되었다. PR_SRI의 경우 1개월 전망에서는 2000년 및 2008년 5월, 1996년, 1997년, 2006년, 2008년 및 2009년 11월, 1996년 및 2009년 2월을 HR_SRI와 같이 -1.0 이하인 가뭄상태로 나타났으며, 특히 11월 및 2월에서의 결과가 HR_SRI와 거의 유사한 것으로 확인되었다. 8월(Aug.)에는 모의기간동안 가뭄이 해석되지 않았으나, 일부 연도에서 두 지수의 거동이 상이하게 나타나 예측성이 낮은 것으로 판단된다. 한편, 2개월 전망에서는 5월 및 8월에 대한 결과가 1개월 전망에 비해 HR_SRI의 차이가 컸으며, 2000년 5월, 1997년, 2001년, 2006년 및 2008년 11월 그리고 1996년, 1998년 및 2009년 2월에는 유사한 것으로 나타났다. 3개월 전망에서는 2개

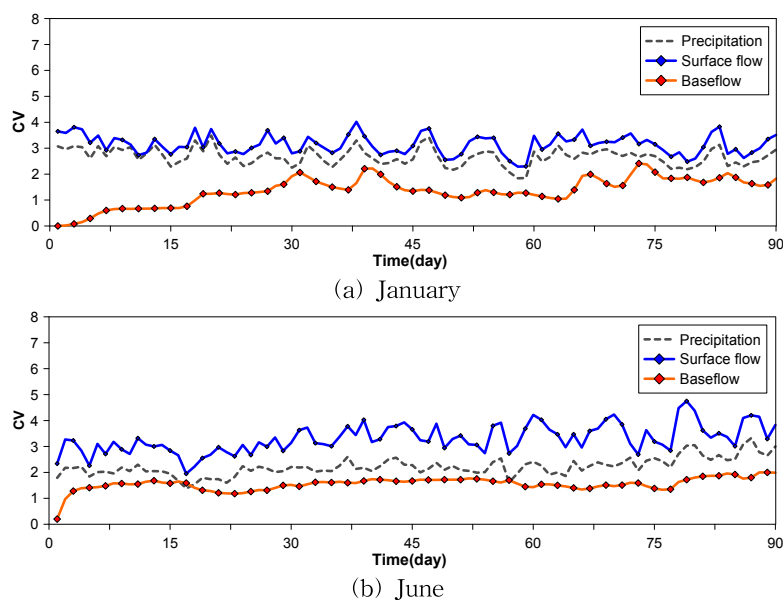


Fig. 5. Analysis of CV_t in Dry and Wet Periods

월 전망보다도 그 차이가 크게 나타나 모든 월에서 예측성이 거의 없는 것으로 확인되었다.

4.2 월별 및 계절별 가뭄예측성능 평가

선행시간에 따라 격자별 산정된 PR_SRI에 대한 CC, RMSE를 추정 및 평가하였으며, 이를 월별 및 계절별로 구분하여 Table 3에 명시하였다. 표에서 *는 유의수준 ($\rho = 0.10$)을 만족하는 상관계수를 의미한다. 월별 상관계수의 범위를 살펴보면 1개월 전망의 경우 건조기인 1~5월, 10~12월에 0.66~0.90으로 11월(0.90)이 가장 높고 4월(0.65)이 가장 낮은 것으로 나타났으며, 습윤기인 6~9월에는 0.48~0.66으로 건조기에 비해 평균 0.20 정도 낮은 것으로 확인되었다. 2개월 전망에서는 건조기에 0.33~0.86으로 11월과 2월에 대한 결과가 0.70 이상으로 높지만 3월, 4월 및 5월은 0.38 이하로 1개월 전망에 비해 상관계

수가 절반정도 낮아졌으며, 습윤기인 8월 및 9월의 경우 0.18, 0.23으로 산정되어 예측성능이 거의 없는 것으로 확인되었다. 3개월 전망의 경우 모든 월에서의 상관계수의 범위가 -0.35~0.40으로 산정되어 예보의 활용성이 낮은 것으로 판단된다. 계절별 전망에서는 4계절 중 겨울철의 상관계수가 높고 여름철이 낮게 산정되었으며, 이러한 특징은 2개월 전망에서도 동일하게 나타났다. 유의성 분석에서는 1개월 전망 상관계수의 경우 모두 임계치(0.43) 이상으로 산정되었으며, 2개월 전망에서는 1월, 2월, 10월, 11월 및 12월에서 임계치 이상의 값이 산정되었다. 그러나 3개월 전망에서는 모두 유의수준을 만족하지 못한 것으로 나타났다. RMSE 결과에서는 1개월 전망의 경우 건조기 0.15~0.64, 습윤기 0.64~0.77로 건조기의 값이 더 낮게 산정되었으며, 이 중, 가을철 및 겨울철의 RMSE가 0.31, 0.30으로 예측성능이 높은 것으로 확인되었다. 2개월

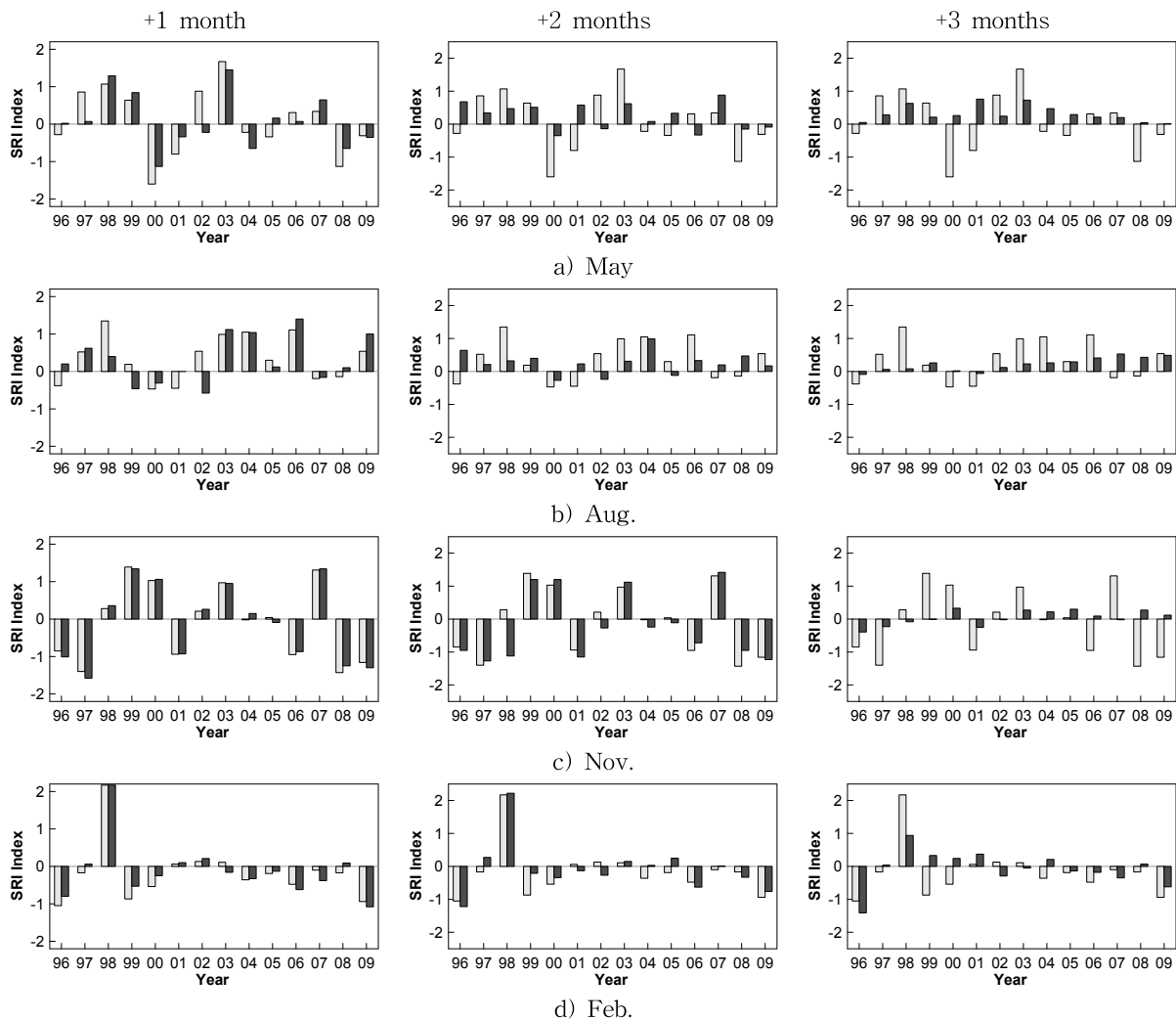


Fig. 6. Comparative Results between HR_SRI and PR_SRI over Forecasting Lead Time (□ HR_SRI, ■ PR_SRI)

전망에서는 모든 월 또는 계절의 RMSE가 0.50 이상, 3개월 전망에서는 0.80 이상으로 나타나 예측성능이 낮은 것으로 판단된다.

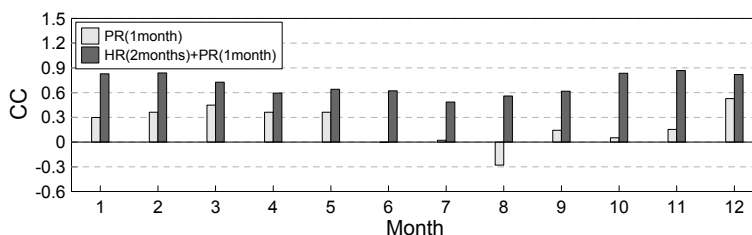
IHC와 더불어 HR의 활용은 1, 2개월 가뭄 전망의 정확도에 영향을 미친다. 그 예로 Table 3의 계절별 상관계수의 경우 Fig. 4의 결과에 비해 더 높게 산정됨을 볼 수 있으며, 가을철이 봄철 보다 상관성이 더 높은 것도 이의 영향 때문이다. 본 연구에서는 HR의 영향을 분석하고자

Fig. 7과 같이 HR 활용 유무에 따른 PR의 상관계수 변화를 월별로 분석하였다. Fig. 7(a)의 1개월 전망의 경우 1개월 누적 PR의 상관계수는 평균 0.50, 과거 2달 HR이 포함된 HR은 0.81로 약 0.30 정도 증가하였으며, 상관계수가 낮은 6~9월에서도 평균 -0.03에서 0.57로 높아졌다. 또한, 10월 및 11월의 경우 다른 월에 비해 HR의 영향으로 기존 (0.05, 0.15)에 비해 크게 높아졌는데 이는 3개월에 속한 월들 중 PR 보다 상대적으로 많은 8월, 9월, 10월 HR의

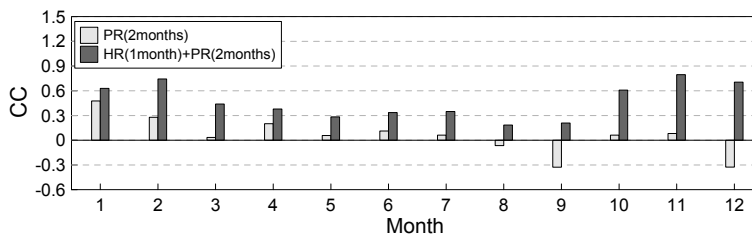
Table 3. Statistical Results between HR_SRI and PR_SRI (1996~2009)

| Target Periods | | Correlation Coefficient | | | Root Mean Square Error | | |
|----------------|------|-------------------------|-----------|-----------|------------------------|-----------|-----------|
| | | +1 month | +2 months | +3 months | +1 month | +2 months | +3 months |
| Monthly | Jan. | 0.83* | 0.66* | -0.20 | 0.27 | 0.60 | 1.21 |
| | Feb. | 0.82* | 0.70* | 0.40 | 0.29 | 0.52 | 0.81 |
| | Mar. | 0.69* | 0.38 | 0.23 | 0.45 | 0.74 | 0.80 |
| | Apr. | 0.65* | 0.36 | -0.03 | 0.58 | 0.83 | 1.00 |
| | May | 0.66* | 0.33 | 0.16 | 0.64 | 0.96 | 1.06 |
| | Jun. | 0.66* | 0.39 | -0.04 | 0.67 | 0.94 | 1.11 |
| | Jul. | 0.48* | 0.37 | 0.09 | 0.77 | 0.85 | 0.96 |
| | Aug. | 0.56* | 0.18 | -0.05 | 0.64 | 0.85 | 0.89 |
| | Sep. | 0.63* | 0.23 | -0.24 | 0.58 | 0.90 | 0.95 |
| | Oct. | 0.85* | 0.62* | -0.35 | 0.21 | 0.70 | 1.12 |
| | Nov. | 0.90* | 0.86* | 0.10 | 0.15 | 0.49 | 1.11 |
| | Dec. | 0.81* | 0.62* | -0.04 | 0.35 | 0.70 | 1.11 |
| Seasonal | MAM | 0.67* | 0.36 | 0.12 | 0.56 | 0.84 | 0.95 |
| | JJA | 0.57* | 0.31 | 0.00 | 0.69 | 0.88 | 0.99 |
| | SON | 0.78* | 0.54* | -0.16 | 0.31 | 0.70 | 1.06 |
| | DJF | 0.82* | 0.66* | 0.06 | 0.30 | 0.61 | 1.04 |

* Correlation Coefficient above the 0.1 significance level.



(a) +1 month Prediction



(b) +2 months Prediction

Fig. 7. CC Analysis of PR according to the HR Utilization

영향에 의한 것으로 확인되었다. Fig. 7(b)의 2개월 전망에서는 과거 1개월 HR만이 활용됨에 따라 Fig. 7(a)의 1개월 전망에 비해서는 상관계수가 모두 낮게 산정되었지만 2개월 누적 PR에 비해서는 모두 높게 나타났다.

4.3 지역별 가뭄예측성능 평가

본 연구에서는 ESP를 활용한 지역별 가뭄전망의 정확도를 분석하고자 앞서 계산된 격자별 상관계수 및 RMSE를 공간적으로 분포시켜 Fig. 8 및 Fig. 9에 도시하였다. 봄철 1개월 전망에서는 경기도, 강원도 및 충청도 일부 지역을 제외하고는 대부분의 지역에서 상관계수의 범위가 0.6~0.8로 높게 나타났다. 여름철에는 강원도, 경상도 동해 지역에서 상관계수가 0.6~0.8, 그 외에는 0.4~0.6으로 낮게 나타났으나, 가을철에는 0.60 이상으로 분포하였으며, 경기도 및 강원도 북부에서 0.80 이상의 높게 나타났다. 겨울철의 경우 거의 모든 지역의 상관계수가 0.80 이상으로 나타나 4계절 중 지역별 가뭄예보의 성능이 가장 우수한 것으로 확인되었다. 그러나 2개월 전망에서는 겨울철을 제외하고는 상관계수가 모두 0.60 이하로 분포하였으며, 그 중 봄철 경기도 및 강원도 여름철 전라도 지역에서 -0.2~0.2의 범위로 가장 낮게 나

타났다. 3개월 전망부터는 모두 상관성이 없거나 음의 상관성을 갖는 지역이 발생하여 예보능성이 매우 낮은 것으로 확인되었다.

봄철 1개월 전망의 RMSE (Fig. 9)는 경기도, 강원도 일부 지역과 충청남도 지역에서 0.60~0.80, 이를 제외한 지역에서는 0.40~0.60으로 나타났다. 여름철에는 모든 지역이 0.60~0.80으로 높게 나타났으나, 가을철에 다시 0.20~0.40으로 값이 낮아졌으며, 특히 강원도 북부지역의 경우 0.20 이하로 정확도가 높은 것으로 확인되었다. 겨울철에는 전라남도 일부 지역을 제외하고는 모두 0.20~0.40으로 나타나 4계절 중 지역별 RMSE가 가장 낮은 것으로 나타났다. 2개월 전망에서는 봄철의 경우 충청도 및 전라도를 중심으로 RMSE가 0.40~1.00의 범위로 분포하였으며, 여름철에는 거의 모든 지역이 0.60~1.30의 범위를 보여 정확도가 가장 낮은 것으로 확인되었다. 가을철에는 경기도 및 강원도 일부를 제외하고는 모든 지역이 0.60~1.00으로 나타났으며, 겨울철에는 경기도, 강원도 및 충청도 일부 지역에서 0.40~0.60, 그 외에는 0.60~0.80으로 확인되었다. 3개월 전망의 경우 모든 계절에서 RMSE가 0.60~1.50으로 나타나 예보의 활용성이 매우 낮은 것으로 판단된다.

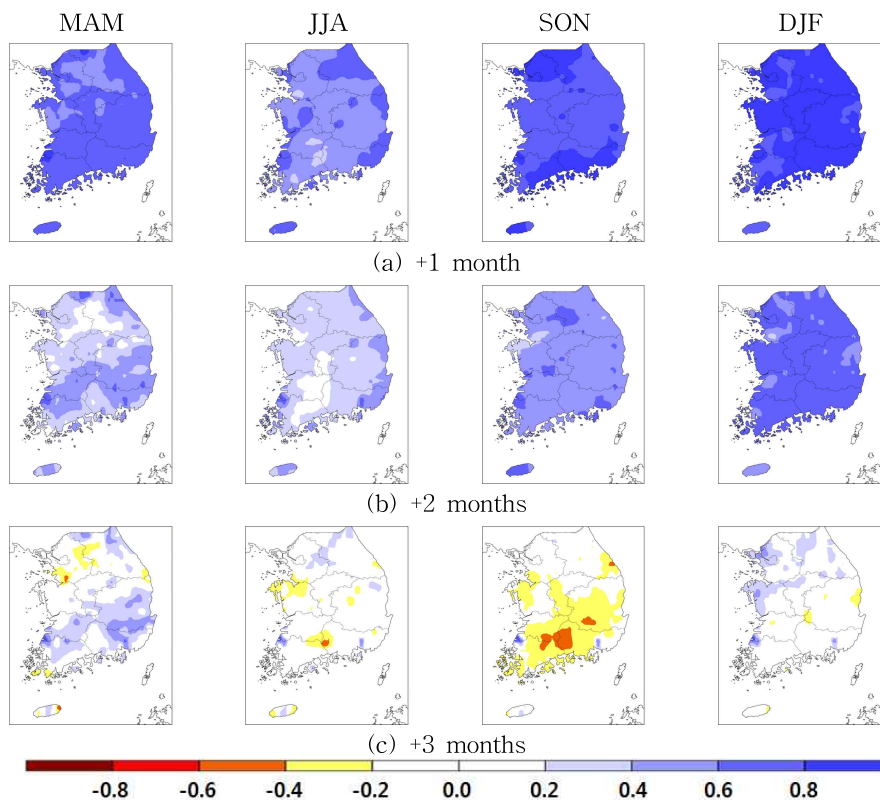


Fig. 8. Regional CC for the PR_SRI

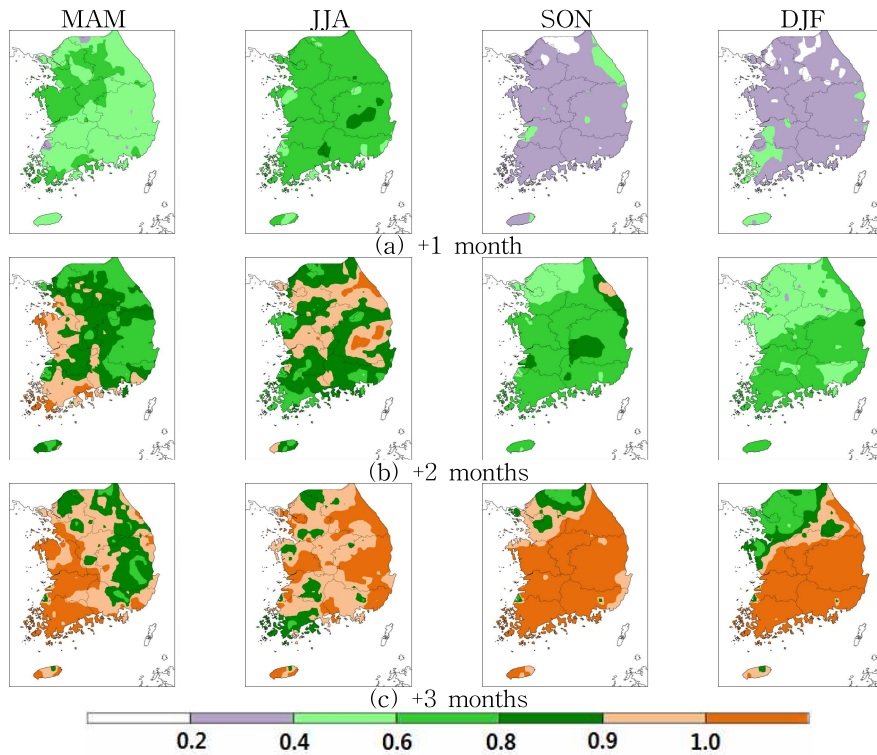


Fig. 9. Regional RMSE for the PR_SRI

5. 결 론

본 연구에서는 ESP 기법을 이용하여 가뭄전망정보를 생산하고 가뭄예보에 있어 활용성을 평가하였다. 수문모델로 VIC 모델을 선정하였으며, 모의기간 동안 과거 30개 기상자료와 예보시점에서의 초기 토양수분량을 이용하여 선행시간별 PR을 생산 및 평가하였다. 가뭄지수는 국내 적용성이 검증된 SRI를 활용하였으며, PR_SRI 및 HR_SRI에 대한 비교분석을 통해 가뭄예보의 성능을 평가하였다. 본 연구의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 우리나라 전역에 관측기상 및 지형자료를 이용하여 VIC 모델을 구축하고 관측 유출량이 존재하는 8개 댐 상류유역에 대한 모의결과의 정확도를 평가하였다. CC 0.83, 모형효율성 계수 0.68 이상, RMSE 3.55 mm/day, 유출용적오차 7.96% 이하로 정확도가 높은 것으로 나타났다.
- 2) 모의기간 동안에 PR을 생산하고 상관계수를 이용하여 ESP 강수량 전망과 예측성능을 비교평가 하였다. 선행시간별(1, 2, 3개월) 강수량의 상관계수는 평균 -0.15, -0.20, -0.20, 유출량은 0.20, 0.03, -0.01로 유출량이 강수량에 비해 정확도가 높게 산정되었다. 또한, 1개월 전망의 건조기인 봄철 및 겨울철의 상관

계수가 0.43으로 높고 여름철은 가장 낮은 것으로 나타났다. 주요 원인은 LSM에 입력되는 IHC인 초기토양수분량과 상대적으로 강수량에 덜 민감한 기저유출의 영향 때문인 것으로 확인되었다. 건조기 가뭄예보의 경우 수문학적 가뭄전망이 기상학적 가뭄전망에 비해 활용성이 더 높음을 알 수 있었다.

- 3) PR_SRI로부터 선행시간에 따른 CC 및 RMSE를 계산하고 월별, 계절별 가뭄예보의 정확도를 평가하였다. SRI의 경우 1, 2개월 전망에서는 과거 HR이 고려되어 기존 ESP 예측에 비해 정확도가 크게 개선됨을 알 수 있었다. 선행시간별 CC는 평균 0.71, 0.48, 0.00, RMSE는 0.46, 0.76, 1.01로 나타났으며, 그 중 1개월 전망의 11월의 상관계수가 0.90으로 가장 높게 산정되었다. 또한 겨울철, 가을철 및 봄철 순으로 건조기 정확도가 높게 나타나 ESP를 활용한 가뭄예보의 활용성은 높다고 판단된다.
- 4) 산정된 CC 및 RMSE를 지역적으로 분포시켜 지역별 예측성능을 평가하였다. 봄철의 경우 1개월 전망에서 경기도, 강원도 및 충청도 일부를 제외하고는 대부분의 지역이 CC 0.60~0.80, RSME 0.40~0.60의 범위를 보였으며, 여름철에는 강원도, 경상도 동해 지역을 제외하고는 모두 CC 0.40~0.60, RSME

0.60~0.80, 가을철에는 거의 모든 지역이 CC 0.60 이상, RSME 0.20~0.40, 겨울철에는 CC 0.80 이상, RSME 0.20~0.40의 범위로 분포하였다. 2개월 전망에서는 CC가 겨울철을 제외하고는 상관계수가 모두 0.60 이하로 분포하였으며, 3개월 전망에서는 모든 지역이 상관성이 없거나 음의 상관성을 갖는 것으로 확인되었다. 또한 RMSE도 2개월 전망 0.40~1.00, 3개월 전망 0.60~1.50으로 나타나 예보의 활용성이 매우 낮은 것으로 확인되었다.

국외와 달리 국내에서는 ESP를 활용한 가뭄전망에 관한 연구가 미미한 실정이다. 본 연구에서는 수문학적 가뭄예보를 위해 ESP 기법을 국내에 처음 도입하고 활용범위를 명확히 제시하였으며, 특히 건조기 1, 2개월 전망에서 활용성이 높게 나타나 연구의 가치가 높다고 판단된다. 다만, 격자별 관측수문자료의 부재로 PR_SRI에 대한 정확도 평가의 경우 HR_SRI만이 활용되었다. 향후 인공 위성 관측자료 등 가용한 여러 관측자료들과 비교분석된다면 해석결과의 신뢰도는 더욱 높아질 것으로 기대된다. 본래 ESP 예측은 본 연구에서와 달리 확률적 정보 제공을 목적으로 활용되어 왔다. 앙상블 체계의 확률론적 가뭄전망정보 생산 및 제공기술이 개발된다면 다양한 가뭄예보가 가능할 것으로 판단된다. 또한, 앙상블 수문성분(강수, 증발산, 유출 및 토양수분량) 산정에서 가뭄예보까지의 불확실성 범위를 정량적으로 분석하고 정확도 개선에 관한 기법들이 적용된다면 보다 우수한 가뭄예보가 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 기상기술개발사업(KMIPA 2015-2070)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Coelho, C.A.S., Uvo, C.B., and Ambrizzi, T. (2002). "Exploring the impacts of the tropical Pacific SST on the precipitation patterns over South America during ENSO periods." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 71 pp.185-197.
- Croley, T.E. (2000). Using meteorology probability forecasts in operational hydrology, ASCE press. pp. 206.
- Franz, K.J., Hartmann, H.C., Sorooshian, S., and Bales, R. (2003). "Verification of National Weather Service Ensemble Streamflow Predictions for Water Supply Forecasting in the Colorado River Basin." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 4, pp. 1105-1118.
- Hosking, J.R.M., and Wallis, J.R. (1993). "Some statistics useful in regional frequency analysis." *Water Resources Research*, Vol. 29, pp. 271-281.
- Jung, D.I., and Kim, Y.O. (2002). "Forecasting Monthly Inflow to Chungju Dam using Ensemble Streamflow Prediction." *Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 22, No. 3, pp. 321-331.
- Jung, I.W., and Chang, H.J. (2012). "Climate change impacts on spatial patterns in drought risk in the willamette River Basin, Oregon, USA." *Theoretical and Applied Climatology*, DOI 10.1007/s00704-011-0531-8.
- Kim, J.H., and Bae, D.H. (2006). "Probabilistic Medium- and Long-Term Reservoir Inflow Forecasts(II) Use of GDAPS for Ensemble Reservoir Inflow Forecasts." *Korea Water Resources Association*, Vol. 39, No. 3, pp. 275-288.
- Korea Meteorological Administration (KMA) (2012). Development of Hydro-meteorological Early Warning System for Response to Climate Change.
- Landsea, C.W., and Knaff, J.A. (2000). "How much skill was there in forecasting the very strong 1997-98 El Nino?" *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 81, pp. 2017-2119.
- Lee, S.J., Jeong, C.S., Kim, J.C., and Hwang, M.H. (2011). "Long-term Streamflow Prediction Using ESP and RDAPS Model." *Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 967-974.
- Li, H., Luo, L., Wood, E.F., and Schaake, J. (2009). "The role of initial conditions and forcing uncertainties in seasonal hydrologic forecasting." *Journal of Geophysical Research*, Vol.114, D04114, doi:10.1029/2008JD010969.
- Liang, X., Jianzhong, G., and Ruby Leung, L. (2004). "Assesment of the effects of spatial resolutions on daily water flux simulations." *Journal of Hydrology*, Vol. 298, Issues. 1-4, pp. 287-310.
- Liang, X., Lettenmainer, D.P., Wood, E.F., and Burges, S.J. (1994). "A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for General Circulation Models." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 99, pp. 14415-14428.
- Liang, X., Wood, E.F., and Lettenmaier, D.P. (1996). "Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L

- model: Evaluation and modifications." *Global Planetary Change*, Vol. 13, pp. 195–206.
- Luo, L., and Wood, E.F. (2008). "Use of Bayesian merging techniques in a multimodel seasonal hydrologic ensemble prediction system for the eastern United States." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 9, pp. 866–884.
- Maurer, E.P., Lettenmaier, D.P., and Mantua, N.J. (2004). "Variability and potential sources of predicability of North American runoff." *Water Resources Research*, Vol. 40, W09306, doi:10.1029/2003WR002789.
- Mo, K.C. (2008). "Model-Based Drought Indices over the United States." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 9, pp. 1212–1229.
- Mo, K.C., Shukla, S., Lettenmaier, D.P., and Chen L.C. (2012). "Do Climate Forecast System (CFSv2) forecasts improve seasonal soil moisture prediction?" *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, L23703, doi:10.1029/2012GL053598, 2012R.
- National Emergency Management Agency (NEMA) (2013). Establishment of National Drought Disaster Information System.
- Ruy, J.H., Lee, D.H., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (2002). "A Comparative Study on the Drought Indices for Drought Evaluation." *Korea Water Resources Association*, Vol. 35, No. 4, pp. 397–410.
- Shukla, S., and Lettenmaier, D.P. (2011). "Seasonal hydrologic prediction in the United States: understanding the role of initial hydrologic conditions and seasonal climate forecast skill." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 3529–3538.
- Shukla, S., and Wood, A.W. (2008). "Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought." *Geophysical Research Letters*, doi:10.1029/2007GL032487.
- Smith, J.A., Day, G.N., and Kane, M.D. (1992). "Nonparametric framework for long-range streamflow forecasting." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 118, No. 1, pp. 82–92.
- Son, K.H., Bae, D.H., and Jung, J.S. (2011). "Drought Analysis and Assessment by Using Land Surface Model on South Korea." *Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 8, pp. 667–681.
- Son, K.H., Lee, J.D., and Bae, D.H. (2010). "The Application Assessment of Global Hydrologic Analysis Models on South Korea." *Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 12, pp. 1063–1074.
- Trambauer, P., Werner, M., Winsemius, H.C., Maskey, S., Dutra, E., and Uhlenbrook, S. (2014). "Hydrological drought forecasting and skill assessment for the Limpopo river basin, Southern Africa." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 11, pp. 9961–10000.
- Wang, D., Hejazi, M., Cai, X., and Vacocchi, A.J. (2011). "Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois." *Water Resources Research*, Vol. 47, Issue 9, W09527.
- Werner, K., Brandon, D., Clark, M., and Gangopadhyay, S. (2005). "Incorporating Medium-Range Numerical Weather Model Output into the Ensemble Streamflow Prediction System of the National Weather Service." *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 6, pp. 101–114.
- Wood, A.W., and Lettenmaier, D.P. (2007). "A test bed for new seasonal hydrologic forecasting approaches in the Western United States." *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 87, pp. 1699–1712.
- Wood, A.W., and Lettenmaier, D.P. (2008). "An ensemble approach for attribution of hydrologic prediction uncertainty." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 35, No. 14, L14401, doi:10.1029/2008GL034648.
- Wood, A.W., Maurer, E.P., Kumar, A., and Lettenmaier, D.P. (2002). "Long-range experimental hydrologic forecasting for the Eastern United States." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, 4439, doi:10.1029/2001JD000659.
- Yuan, X., Wood, E.F., Luo, L., and Pan, M. (2011). "A first look at Climate Forecast System version 2 (CFSv2) for hydrological seasonal prediction." *Journal of Geophysical Research*, Vol. 38, L13402, doi:10.1029/2011GL047792.

paper number : 15-008

Received : 31 January 2015

Revised : 24 May 2015 / 2 June 2015

Accepted : 2 June 2015