

기상인자와 비정상성 빈도해석 모형을 이용한 낙동강유역의 계절강수량 전망

Seasonal Rainfall Outlook of Nakdong River Basin Using Nonstationary Frequency Analysis Model and Climate Information

권 현 한* / 이 정 주**

Kwon, Hyun-Han / Lee, Jeong-Ju

Abstract

This study developed a climate informed Bayesian nonstationary frequency model which allows us to forecast seasonal summer rainfall at Nakdong River. We constructed a 37-year summer rainfall data set from 10 weather stations within Nakdong river basin, and two climate indices from sea surface temperature (SST) and outgoing longwave radiation (OLR) were derived through correlation analysis. The selected SST and OLR have been widely acknowledged as a climate driver for summer rainfall. The developed model was applied first to the 2010-year summer rainfall (888.1 mm) in order to assure ourself. We demonstrated model performance by comparing posterior distributions. It was confirmed that the proposed model is able to produce a reasonable forecast. The forecasted value is about 858.2 mm, and the difference between forecast and observation is about 30 mm. As the second case study, 2011-year summer rainfall forecast was made using an observed winter SSTs and an assumed 50% value of OLRs. The forecasted value is 967.7 mm and associated exceedance probability over average summer rainfall 680 mm is 92.9%. In addition, 50-year return period for summer rainfall was projected through the nonstationary frequency model. An exceedance probability over 1,400 mm corresponding to the 50-year return level is about 73.7%.

Keywords : Bayesian, nonstationary frequency analysis, climate driver, SST, OLR

요 지

본 연구에서는 Bayesian 통계기법을 이용한 비정상성 빈도해석모형을 토대로 외부 기상인자에 의한 변동성을 고려할 수 있는 계절강수량 예측모형을 구축하였으며, 낙동강유역내의 10개 관측소에서 관측된 37년간의 강수량 자료를 이용하여 연도별 여름강수량을 추출하고 이들 관측소의 여름강수량에 물리적인 영향을 미치는 기상인자로서 SST (sea surface temperature)와 OLR (outgoing longwave radiation)을 공간상관성을 검토하여 선정하였다. 모형의 적합성을 검토하기 위해 2010년 여름강수량 사후 확률분포의 중앙값과 관측치를 비교하였으며, 그 결과 각각 858.2 mm와 888.1 mm로, 이는 구축된 모형이 적절하게 여름강수량을 모의하고 있음을 보여준다. 2010년 겨울 SST 관측 값과, 예년 평균값으로 가정한 2011년 6월 OLR을 이용하여 2011년 여름강수량을 예측하였다. 예측된 2011년 여름강수량은 967.7 mm로, 확률적으로 예년 여름강수량의 평균인 680 mm를 상회할 확률이 92.9% 이상인 것으로 나타났으며, 또한 50년 빈도에 해당하는 여름강수량을 추정할 결과, 50년 빈도 여름강수량 1400 mm를 상회할 확률도 약 73.7%인 것으로 분석되었다.

핵심용어 : Bayesian, 비정상성 빈도해석, 기상인자, 계절강수량, 해수면온도, OLR

* 전북대학교 토목공학과 조교수 (e-mail: hkwon@jbnu.ac.kr)

Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ., Jeonju 561-756, Korea

** 교신저자, 전북대학교 토목공학과 박사후연구원 (e-mail: julee@jbnu.ac.kr)

Corresponding Author, Post-Doctoral Research Scientist, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ., Jeonju 561-756, Korea

1. 서론

수자원 분야에서 강수량의 예측은 주요 관심대상중 하나이다. 여름철 수치예보 또는 기상 레이더 영상자료를 이용한 초단기 예측은 치수 및 방재의 목적으로 이용되며, 장기예측 결과는 수자원 확보 계획과 이수안정성 검토를 위한 자료로 이용된다. 기상학과 수문학 분야에서 주로 다루고 있는 GCM(global climate model), RCM(regional climate model), AGCMs(atmospheric GCMs) 및 OGCMs(oceanic GCMs) 등의 장기 예측 모형들은 기본적으로 열 에너지 등에 의한 대기 또는 대양의 순환을 동역학적 방정식에 기초한 수치모형에 의해 모의하는 과정으로 이루어져 있으며, 이러한 대규모 기상모형의 결과와 기존 기상 관측 자료들 간의 시·공간적 상관성 등을 이용하여 공간적 또는 시간적인 수문 상세화(downscaling) 과정을 통해 장기예측들이 이루어지고 있다. 즉, 많은 부분에서 강수량 예측은 통계적인 기법들에 의해 모형이 구축되고 있으며, 예측의 기간에 따라 적절한 기법들을 적용한 여러 연구들이 이루어지고 있다. 기상인자와 강수량의 상관성을 분석한 연구로 Kang et al. (1991)은 여름철 강수와 수증기 수송의 계절변화를 경험적 직교함수(EOF: empirical orthogonal function) 분석을 통해 추출하였고, 한반도의 여름철 대규모 강수의 원인이 되는 필리핀 인근의 남반구 서태평양과 인도 서해안 및 뱅갈만 일대의 대규모 강수 이동에 대해 공간상관성을 분석하였다. 안중배 등(1997)은 한반도 기온 및 강수량과 주변 해역 SST와의 상관관계를 월평균 아노말리값을 이용하여 분석하였으며 한반도 근해의 SST는 한반도 강수량과 직접적인 연관성을 갖지는 않는 것으로 나타났다. 권현환과 문영일(2005)은 수문자료와 기상자료간의 상관성 분석기법으로서 독립성분 분석을 통해 Nino지역의 해수면온도와 ENSO(El Niño-Southern oscillation)의 상관관계를 분석하고, 우리나라의 여름 강수량과의 상관성을 평가하였다. 기상인자를 이용한 강수량의 예측에 관한 연구로 김호준 등(1999)은 태평양의 SST를 그룹화 하고 각 그룹의 평균치를 대표값으로 매개변수화 하여 신경망기법을 이용한 한반도의 지역별 중장기 강수량을 예측하였으며, 월별 예측보다는 계절별 예측에서 보다 효과적인 예측이 이루어지는 것으로 분석하였다. 김맹기 등(2002)은 광역규모 예측인자로 지연상관된 3개월 이전의 해면기압(SLP: sea level pressure), 850 hPa 지오폠펜셀고도 및 SST를 선정하고, 경험적 직교함수 분석과 다중회귀를 이용하여 한반도 계절 누적 강수량을 예측하였으며, 예측인자에 따른 모델의 양상불을 통해 예측모형을 개선하였다. 권현환과 문영일(2007)은 Bayesian Logistic 다중회귀모형을 구성하여 SST, GCM

예측 강수량, 태풍 특성치를 주요 기상인자로 고려한 5~10월 계절강수량 상관관계를 분석하였으며, 이를 통해 서울과 목포지점에서 10년 빈도 이상의 강수량이 발생할 확률을 모의하였다.

본 연구에서는 수문학적 위험도의 관점에서 낙동강 유역의 여름강수량을 예측하고자 하며, 외부 변동요인으로 기상인자에 의한 변동성을 고려하고자 한다. 주요 모의방법으로는 Bayesian MCMC(Markov Chain Monte Carlo) 기법을 이용하였으며, 확률론적 접근에 의한 극치 강수 모의에 있어서 Bayesian MCMC 기법의 유용성은 Coles et al. (2003)에서 언급된 바 있다. 극대치강수량계열의 비정상성을 고려한 Bayesian MCMC 기반의 빈도해석 모형을 제시한 기존의 연구(이정주 등, 2010)를 통해 개발된 비정상성 빈도해석 모형을 이용하여, Bayesian 모형의 장점인 경향성 및 계절성 등의 패턴을 반영함과 동시에 기상인자 등의 외부 변동요인을 함께 고려할 수 있는 강수량 단기예측 모형을 구성하고자 한다. Bayesian 기법을 이용할 경우 통계적 추론에 근거한 모형 매개변수의 사후분포를 통한 극대치수문량 재현기간의 확장뿐만 아니라 현재의 수문량에 영향을 미치는 외부 인자로서의 기상학적 변량의 과거 관측 및 통계치를 이용한 단기강수량 예측 모의가 가능하다(이정주, 2010).

2. 대상 자료 및 기상인자

선행연구(이정주 등, 2010)에서는 극대치강수량계열에 대해 비정상성 빈도해석 모형을 구축하고 분석하였다. 본 연구에서는 앞서 개발된 비정상성 빈도해석 모형을 기반으로 외부 기상인자에 의한 변동성을 함께 고려한 단기예측 모형을 구축하고자 하며, 이 경우 예측할 대상 수문량을 한정할 필요가 있다. 일반적으로 연최대값을 정의하는 기상인자는 발굴하기가 어렵다. 우리나라의 극대치강수량은 장마전선, 태풍의 강도 및 이동경로 등과 관련성이 높지만, 이러한 인자들은 공간적 변동성과 복합적인 특성치들로 인해 특정 지역의 예측모형 구성을 위한 기상인자로서 사용하기에는 무리가 따른다. 따라서 본 연구에서는 계절단위의 수문량 정도에서 기상학적 변량과 관측지점 강수량의 관계를 정립하고자 한다.

본 연구에서는 계절강수량으로서 7~9월(JAS, July-August-September)의 총강수량을 예측하고자 하며, 대상 지역으로 낙동강유역을 선정하였다. 기상청 산하의 관측소 중 낙동강유역에 해당하는 관측소는 대구, 부산, 진주, 영주, 문경, 구미, 영천, 거창, 합천 및 산청의 10개 관측소이다. 유역 내 관측소들에서 관측된 1974~2010년 9월까지의 시단위 강수량자료를 이용하여 연도에 따른 관

측소별 여름강수량을 추출하였고, 이를 유역 평균한 강수량을 낙동강 유역의 평균 강수량으로 활용하였다.

대상 수문사상에 대한 영향인자로서의 기상학적 변량의 선택은 대상지역의 수문사상과 기상학적 연관을 가져야 하며, 상관관계가 크게 도출되는 변량을 추출하여 사용한다. 기상학적 변량으로서 취득 가능한 대표적인 인자들은 온도와 관련하여 아노말리, 육지온도, 해수면온도, 대기온도 등이 있으며, 기타 OLR, SLP, 풍속, 습도, 증기압 등이 있다. 이 중 본 연구의 대상 수문사상인 낙동강 유역의 여름강수량은 동아시아 몬순 강수에 해당하며, 동아시아 몬순 강수는 엘니뇨와 관련된 적도 동태평양 해수면온도 (Chang et al., 2000; Wang et al., 2000; Wu et al., 2003) 뿐만 아니라 인도 지역의 해수면온도 (Latif et al., 1994; Clark et al., 2000)와 큰 연관성을 갖는 것으로 알려져 있다. 6개월 또는 3개월 이전에 증가하는 SST는 우리나라의 여름 강수가능성을 높이는 것으로 알려져 있으며, 실제로 낙동강 유역의 여름강수량과 기상인자들 간의 상관성을 검토하였을 때, 특정 지역의 6개월 지연 상관된 SST와의 상관성이 다른 기상인자들보다 가장 높은 것으로 나타났다. 또한, 우리나라 인근의 OLR이 작은 경우는 그만큼 저기압이 발달되어 있다는 물리적 의미로 해석되며, 이는 결국 강수량이 높아지는 것으로 해석할 수 있다. SST 및 OLR과 몬순 강수의 관계에 대해서는 Krishnamurthy and Kirtman (2009), Bansod (2004) 및 Lu (2004)를 통해 보다 자세히 확인할 수 있다. 본 연구에서는 낙동강 유역 관측소들의 JAS 여름강수량에 영향을 미치는 기상인자로서 SST와 OLR을 활용하였다. SST는

NOAA (national oceanic and atmospheric administration)의 NEDIS (national environmental satellite, data, and information service) 내의 NCDC (national climatic data center)에서 제공하는 자료를 이용하였으며, OLR 역시 NOAA의 ESRL (earth system research laboratory)에서 제공하는 자료를 이용하였다.

Fig. 1은 낙동강유역 기상관측소별 JAS 강수량들의 평균과, 이전연도 10월~12월 (OND, October–November–December)의 겨울 SST 간의 공간적 상관관계를 분석한 그림이다. 그림에서 붉은 점선으로 표시한 부분 안쪽의 SST가 낙동강유역의 JAS 강수량과 연관성이 높은 것으로 나타났으며, 두 자료간의 상관관계를 Fig. 2에 도시하였다. 두 자료간의 상관계수는 0.5 이상을 나타내고 있다. Fig. 3은 JAS 강수량과 직전 6월 OLR의 공간적 상관관계를 분석한 그림이며 우리나라 인근의 OLR과 연관성이 높은 것으로 나타났다. Fig. 4는 JAS 강수량과 OLR의 상관관계를 나타낸 그림이며, 상관계수는 -0.49 로 물리적인 의미를 반영하는 음의상관관계에 있다. SST와 OLR 값은 모두 정규화 (normalize)하여 사용하였다. SST와 OLR 모두 평균적인 상태에서 낙동강 강수량과의 상관관계는 불확실성이 크게 존재하고 있음을 Fig. 2와 Fig. 4로부터 확인할 수 있다. 그러나 SST와 OLR이 평균에서 벗어날 때 낙동강 여름강수량이 극치값을 발현할 가능성은 매우 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 모형에서 사용되는 SST나 OLR이 평균에서 벗어날 때 모형의 예측능력이 더욱 개선될 수 있다는 의미이다. 강수량의 예측 모형으로서 수자원 실무자의 관심사는 평균적인 상태보다는 극치값에 대한

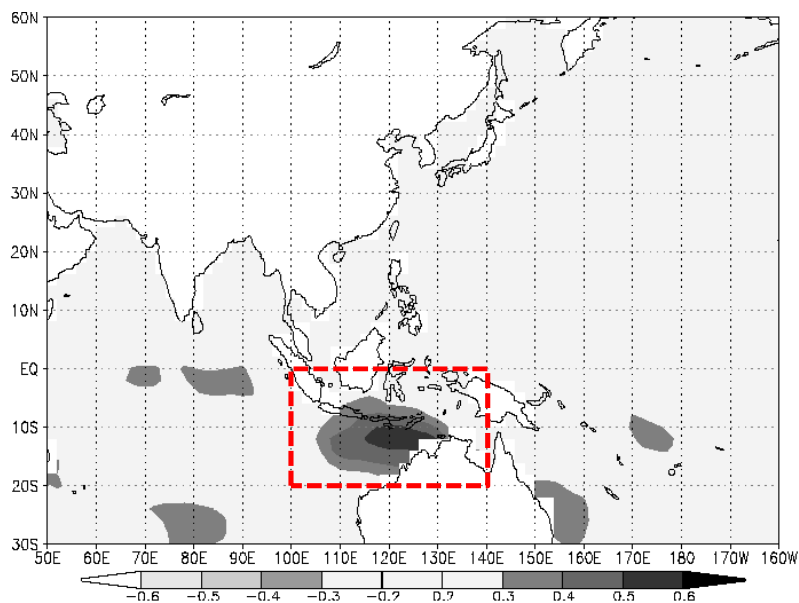


Fig. 1. Spatial Correlation Analysis Between JAS (July–August–September) Rainfall over Nakdong River Basin and Previous Year OND (October–November–December) SSTs. The Red Dotted Line Indicates Selected Zone for Deriving SST Index

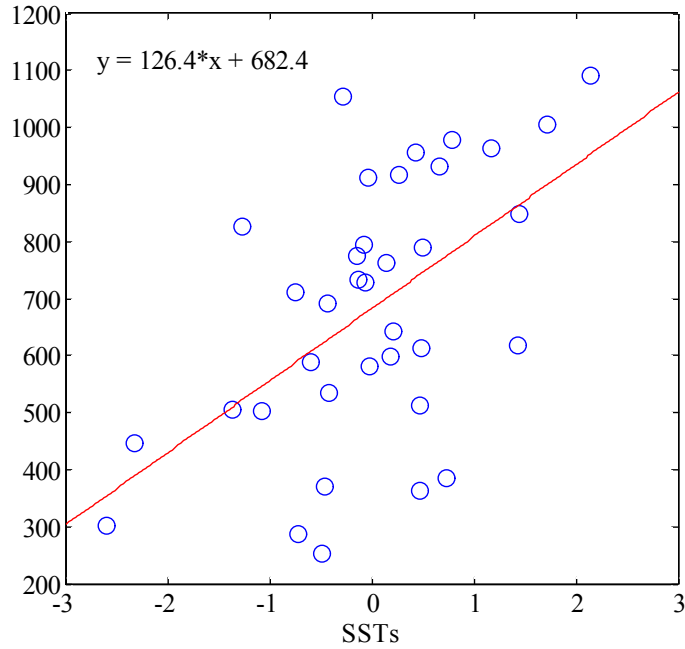


Fig. 2. A Scatter Plot Between JAS (July–August–September) Rainfall and the Derived SST Index. The Red Line Indicate a Linear Regression Line

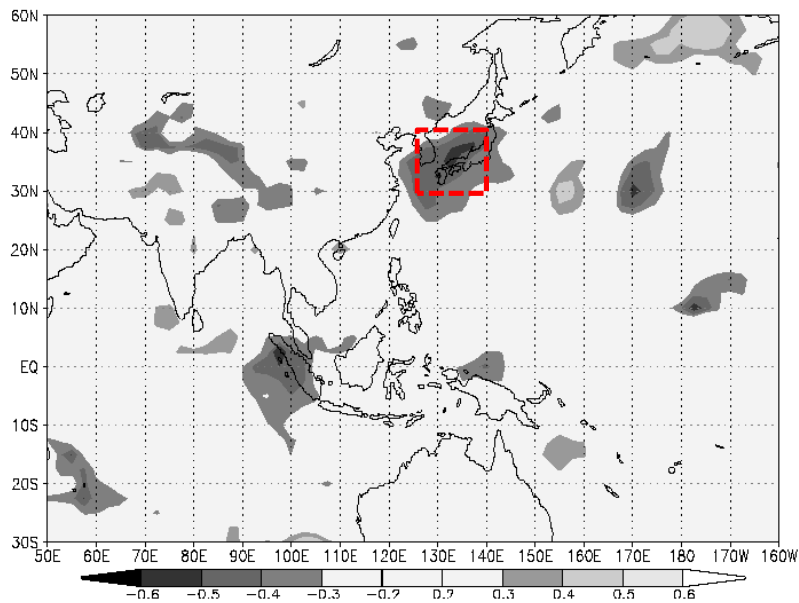


Fig. 3. Spatial Correlation Analysis Between JAS (July–August–September) Rainfall over Nakdong River Basin and June OLR. The Red Dotted Line Indicates Selected Zone for Deriving OLR Index

인지가 더욱 중요하므로 본 연구에서 사용되는 기상인자를 활용한 여름 강수량 예측은 타당할 것으로 판단된다.

3. 계절강수량 예측모형

본 연구에서는 낙동강유역의 2010년 여름 JAS 3개월 강수량을 통계적으로 예측하고자 하며, 비정상성 빈도

해석을 통해서 여름 계절강수량의 동적 거동을 확률적으로 검토하는 방법을 이용하였다. 앞에서 발굴된 기상인자인 SST와 OLR을 주요한 기상인자로 활용하며, 정량적인 불확실성 평가를 위해 Bayesian 비정상성 빈도해석 모형을 이용하였다. 모형을 통해 예측하고자 하는 낙동강유역의 계절강수량을 Y 라고 하면, 기상인자의 변화를 고려한 계절강수량 예측 값은 다음 Eq. (1)과 같이 표현할 수 있다.

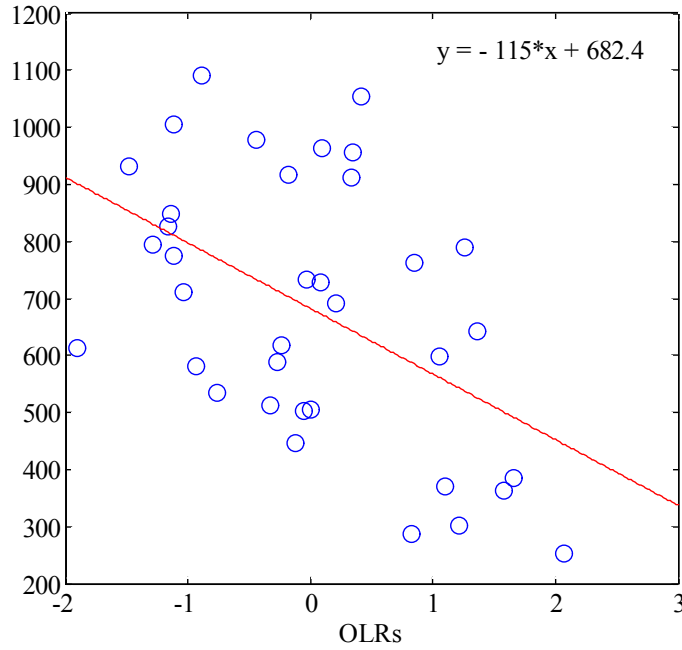


Fig. 4. A Scatter Plot Between JAS(July–August–September) Rainfall and the Derived OLR Index. The Red Line Indicate a Linear Regression Line

$$Y(\text{3개월강수량}) = F(\text{기상인자}) + \text{error} \quad (1)$$

JAS 여름 강수량을 예측하기 위해서 본 연구에서는 비정상성 빈도해석 모형에 근간을 둔 Bayesian 모형을 개발하였으며, 모형의 회귀매개변수에 기상인자들을 결합하기 위해서 GLM (Generalized Linear Model) 모형이 도입되었다. Bayesian GLM모형에서 낙동강 여름강수량은 Gumbel 분포형을 따른다고 가정하였으며 이에 대한 적합성은 4장에서 언급하였다. Gumbel 분포형은 Location 매개변수와 Scale 매개변수로 구성되며 이들 두 개의 매개변수들이 선정된 기상인자들에 의해서 시간에 따라 변동되는 동역학적 모형으로 수정되게 된다.

$$Y(R_{JAS}) = \text{Gumbel}(\mu(t), \sigma(t)) \quad (2)$$

$$p(\mu(t)) \sim N(\alpha_0 + \alpha_1 \times \mathbf{x}(t), \sigma_\mu^2) \quad (3)$$

$$p(\sigma(t)) \sim N(\beta_0 + \beta_1 \times \mathbf{x}(t), \sigma_\sigma^2) \quad (4)$$

여기서, \mathbf{x} 는 기상인자로서, SST와 OLR을 포함한다. 구성된 모형에서 기상인자와 계절강수량 사이의 관계는 단순한 선형관계가 아닐 수도 있으므로, 모형에서 사후확률 분포의 매개변수는 다음과 같이 선형, 비선형을 모두 고려할 수 있도록 Quadratic 항을 추가하여 구성하였다. Eq. (5)에서 추정된 강수량이 음의 값을 갖는 것을 방지하기 위해서 Logarithm 항을 추가하였다.

$$p(\mu(t)) \sim \log \left[N(\alpha_0 + \alpha_1 \times SST(t) + \alpha_2 \times SST(t)^2 + \alpha_3 \times OLR(t) + \alpha_4 \times OLR(t)^2, \sigma_\mu^2) \right] \quad (5)$$

Fig. 5는 본 연구를 위해 구성한 Bayesian 모형의 네트워크를 나타낸 그림이다. 계절강수량의 확률적 거동에서 평균과 표준편차는 매년 갱신되는 기상인자들의 회귀매개변수들에 의해 결정되며, 각 회귀매개변수들 역시 각각 확률적 분포를 갖는다. 그림에서 Y_i 는 모형을 통해 추정되는 연도별 여름강수량을 의미하며, Eq. (2)에서 여름강수량이 Gumbel분포를 따를 때, 연도별로 다른 값을 갖는 Gumbel 분포의 위치매개변수 $\mu(t)$ 와 규모매개변수 $\sigma(t)$ 에 의해 여름강수량이 추정된다. 또한, $\mu(t)$ 와 $\sigma(t)$ 도 Eqs. (3) and (4)에 나타난 것처럼 각각 확률분포를 가지며, 해당 확률분포는 Eq. (5)에서 볼 수 있듯이 기상인자들에 의한 회귀매개변수의 확률분포에 의해 결정된다. $\alpha_0 \sim \alpha_4$ 에 해당하는 각 회귀매개변수들도 각각의 위치매개변수 $\mu_{\alpha_i(i=0\sim4)}$ 와 규모매개변수 $\sigma_{\alpha_i(i=0\sim4)}$ 에 의한 확률분포로 이루어진다.

4. 적용 및 예측결과

4.1 모형 구축 및 2010년 강수량 예측 평가

낙동강유역의 36년간 여름강수량 관측치의 확률분포 적합성을 도해적으로 검토하여 Fig. 6에 도시하였다. 여름강수량의 경험적 확률분포가 정규분포(a)의 경우보다는 Gumbel분포(b)가 낙동강 여름 계절 강수량의 분포특

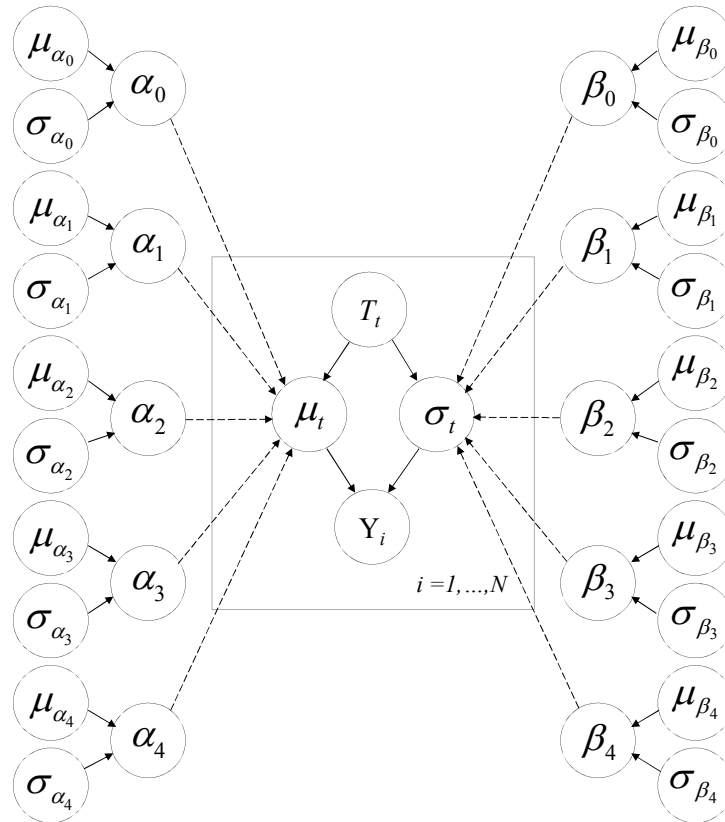


Fig. 5. Diagram Showing Concept of the Hierarchical Bayesian Network Model for Seasonal Rainfall Forecasting

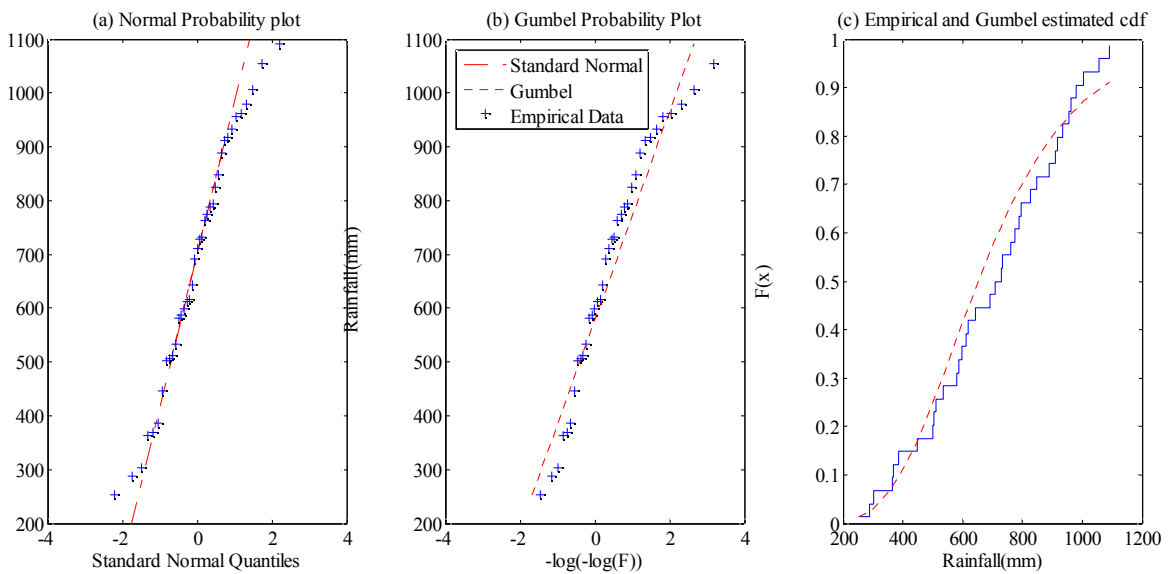


Fig. 6. Comparison of Distribution Characteristics through Normal and Gumbel Probability Plot Paper

성을 좀 더 정확하게 묘사하고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 6(c)는 Gumbel 확률분포와 여름강수량의 경험적 확률분포를 누적확률분포곡선으로 비교한 것이다. 또한 본 연구에서는 평균적인 여름 강수량을 예측하는 것에 더해 서 극치강수량을 정량적으로 해석하기 위함이므로 Gumbel

분포를 기본 확률분포형으로 가정하여 분석을 실시하였다.

Fig. 7은 구성된 모형의 결과와 2010년 강수량 예측 결과를 도시한 것이다. 실선은 여름강수량 관측치를 나타내며, 점선은 기상인자와 결합된 여름강수량 예측모형의 매개변수 사후분포 중앙값을 도시한 것이며, 음영은 매개변

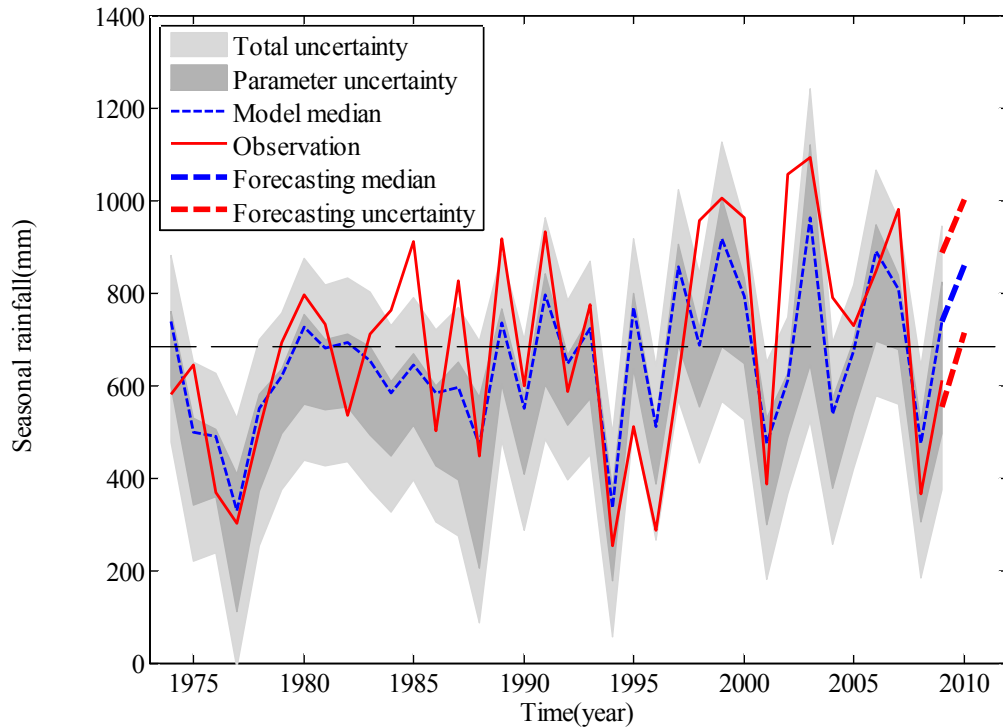


Fig. 7. The Bayesian Model Setup for Seasonal Summer Rainfall and Its Application to the 2010 Summer Rainfall. The Shaded Area is Uncertainty Bounds Associated with Model and Parameters. The Black Dotted Horizontal Line Represents Historical Means over 37 Years at Nakdong River Basin

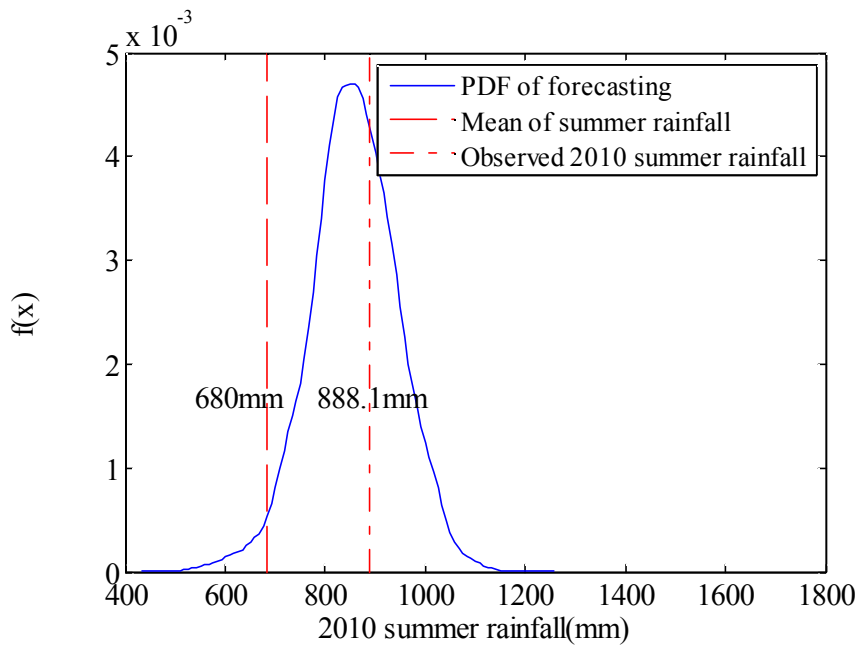


Fig. 8. The Predictive Posterior Distribution for 2010 Summer Rainfall Forecasts

수 불확실성과 전체 불확실성 범위를 도시한 것이다. 따라서 전체 불확실성과 매개변수의 불확실성의 차이가 본 연구에서 구성한 모형이 가지는 불확실성으로 판단될 수 있다. 관측된 여름강수량과 모의된 여름강수량 간의 상관 계수는 0.72이며, 대부분의 연도별 여름강수량이 불확실

성 범위 안에 들어오는 것을 통해서도 모형의 적합성을 확인할 수 있다. 또한, Bayesian 통계의 장점 중 하나인 사후확률분포의 교차검정 (cross-validation) 효과를 Fig. 11을 통해서도 확인할 수 있다. 확률분포에서 0을 기준으로 초과하는 부분 (또는 0보다 작은 부분) 즉, 초과확률

(exceedance rate)에 해당하는 부분이 p -value와 같은 검정결과를 보여준다. 이러한 기준에 의해 Fig. 11의 결과에서 α_2 를 제외한 모든 매개변수의 사후확률분포는 유의하다고 할 수 있으며, 따라서 이전해의 OND 평균 SST와 6월 OLR을 이용한 JAS 여름강수량은 정도 높게 모의되고 있는 것을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 구축된 모형을 통해서 2010년 여름강수량 모의결과와 관측치를 비교하여 모형의 적합성을 평가하고, 나아가 2011년 여름강수량을 예측하고자 한다. Fig. 7은 모형에 의해 예측된 2010년 JAS 강수량을 도시한 결과이다. 이 결과는 낙동강유역 10개 관측소의 3개월 총 강수량의 평균을 이용해 도시한 것이며, 2009년의 여름강수량보다는 큰 값으로 예측된 결과를 확인할 수 있다. 그림에서 수평으로 나타낸 점선은 낙동강유역 여름강수량의 예년평균인 680 mm를 표시한 것이다. 모형을 통해 예측된 낙동강유역의 2010년 여름강수량 확률분포의 평균은 858.2 mm이며, 실제 관측된 여름강수량의 평균은 888.1 mm로 실측값에 매우 근접한 예측결과를 보인다 (Fig. 8).

4.2 2011년 낙동강 여름 강수량 예측 전망

2011년 여름강수량을 예측하기 위해, 아직 관측되지 않은 2011년 6월 OLR 값을 Fig. 9를 이용하여 추론하였다. 우선 2010년 OND(-) 겨울 SST 평균은 29.76°C로 이를 정규화한 값은 1.5615이며, 이는 과거 평균보다 매우 높은 값에 해당한다. 이러한 경우 2011년 6월 OLR은 평균을 중심으로 조금 작은 값을 가질 개연성이 있으나, 전체적인 자료의 경향이 뚜렷한 선형성을 보이지는 않는다. 따라서

2011년 6월 OLR은 과거 OLR 자료의 평균값으로 가정하여 모형에 이용하였다.

Fig. 10은 2011년 6월 OLR을 과거 OLR 분포의 50%에 해당하는 값으로 적용했을 때 예측되는 JAS 여름강수량과 50년 빈도 여름강수량을 함께 도시한 그림이다. 점선으로 표시한 두 개의 평행한 직선은 각각 50년 빈도 여름강수량(위의 수평한 점선)과 여름 평균강수량(아래의 수평한 점선)을 나타낸 것이다. 2010년 겨울 SST가 예년에 비해 매우 높은 관측 값을 갖는다는 사실이 2011년 여름강수량 예측결과를 매우 큰 폭으로 상승시킨 주요 원인이라 할 수 있으며, 만약 2011년 6월 OLR을 평균 이하의 작은 값으로 가정한다면 여름강수량은 더욱 큰 값으로 예측될 것이다. 2011년 6월 OLR을 예년 평균값으로 가정했을 때, 본 모형에 의해 예측된 2011년 낙동강유역 여름강수량 평균은 967.7 mm였으며, OLR을 예년 70%, 20%에 해당하는 값으로 입력하였을 경우는 각각 891.3 mm, 1022 mm가 예측되었다. Fig. 11은 Bayesian 모형으로부터 추정된 매개변수의 사후확률분포를 도시한 것이다. 모형 매개변수들의 사후확률분포는 α_2 를 제외하고 모두 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. Fig. 11의 세 번째 그림인 α_2 의 사후확률분포는 0을 중심으로 좌우에 걸쳐 분포하고 있으며, 이는 Eq. (5)에서 SST의 Quadratic 항이 확률적으로 뚜렷한 연관성이 없는 것을 의미한다.

Fig. 12는 모형의 매개변수 사후분포와 Quantile 함수에 의해 예측된 올 여름 강수량의 확률분포함수를 도시한 것이며, Fig. 10에 수평 점선으로 도시된 여름 평균강수량 및 2010년 여름강수량을 함께 도시하였다. 정량적인 평가

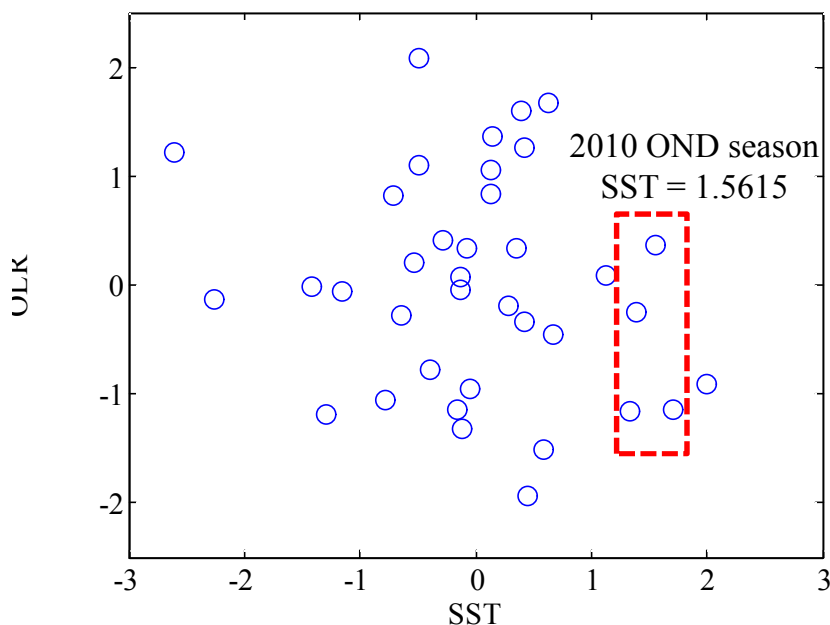


Fig. 9. A Scatter Plot Between Derived SST Index and OLR Index. Negative Relationship between the SST and OLR is Generally Recognized. Given Present SST's Condition (+1.56), a Low OLR in June 2011 is Expected

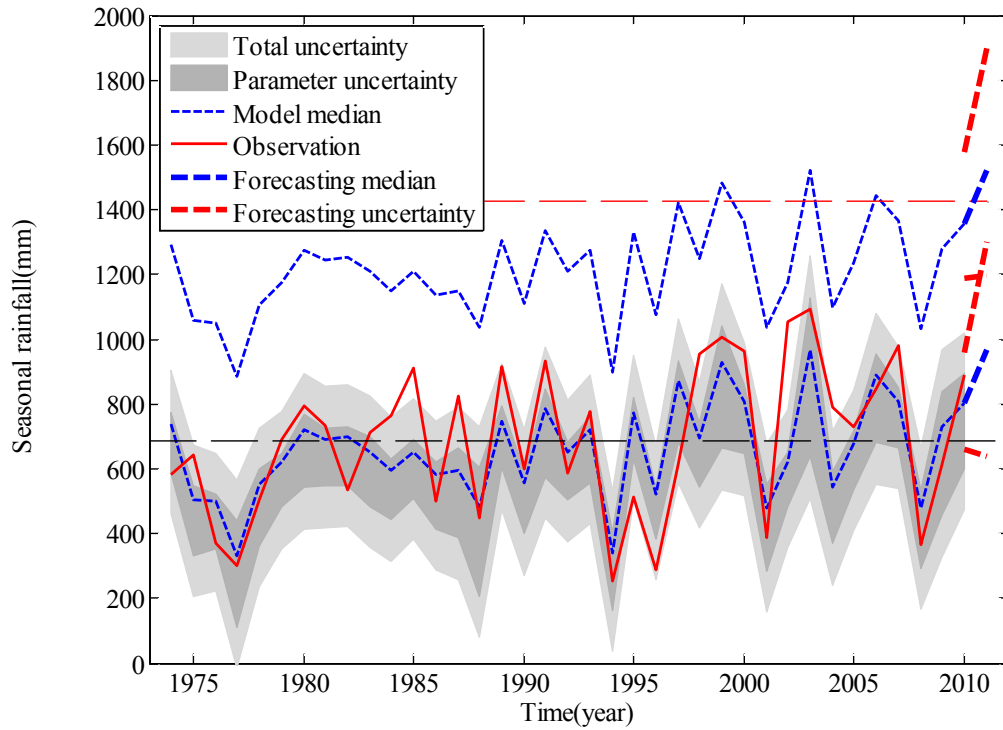


Fig. 10. Another Application to the 2011 Summer Rainfall Using Present SST's Condition and Assumed OLR. The Shaded Area is Uncertainty Bounds Associated with Model and Parameters

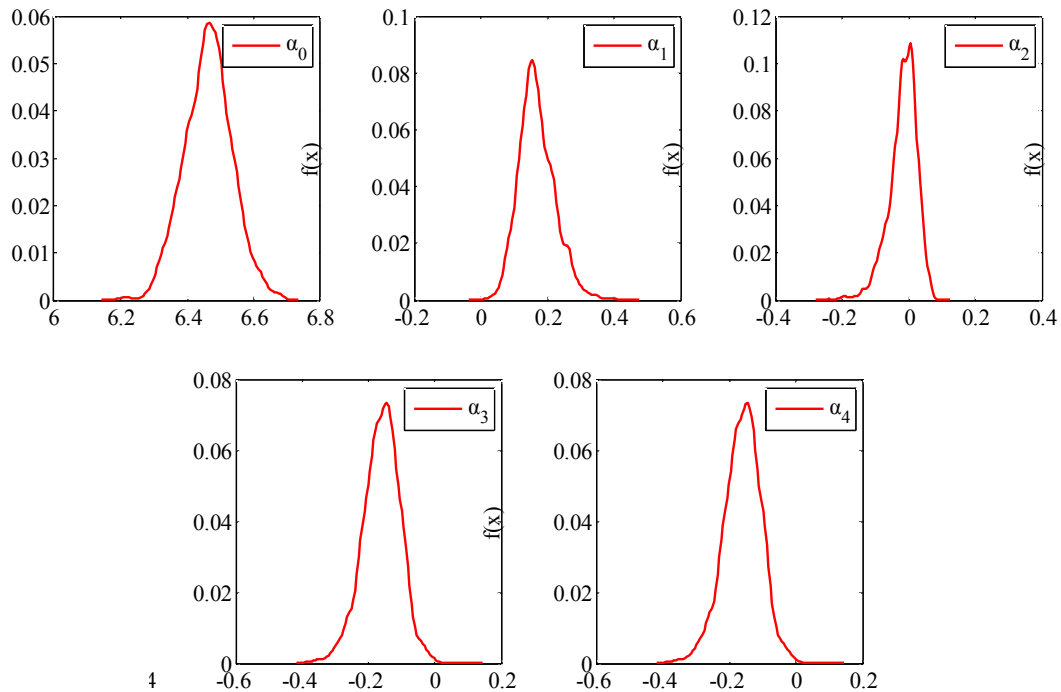


Fig. 11. Posterior Distributions of the Model Parameters. All Alphas are Statistically Significant Given Posterior Distribution Except Alpha 2. The Alpha 2 Often Crosses Zero Which Means the Parameter is No Longer Significant

결과 낙동강유역의 2011년 JAS 여름강수량은 예년 여름 강수량 평균인 680 mm를 초과할 확률이 92.9% 이상이라고 할 수 있다. 또한 50년 빈도에 해당하는 여름강수량을

추정한 결과, 50년 빈도 여름강수량 평균인 1400 mm를 상회할 확률도 약 73.7%임을 Fig. 13을 통해 확인할 수 있다. 2010년 여름강수량 예측결과인 Fig. 9와 비교하였을

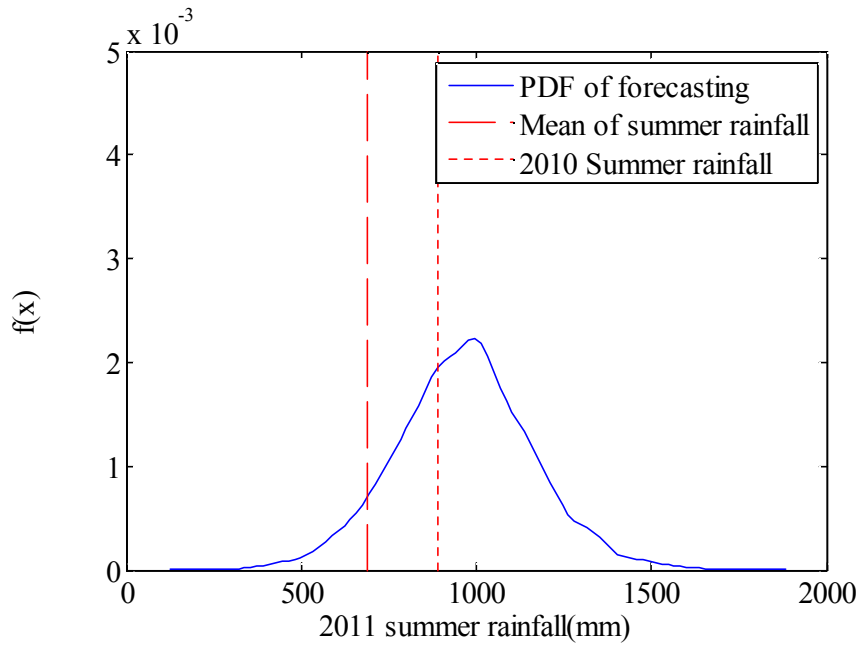


Fig. 12. The Predictive Posterior Distribution for 2011 Summer Rainfall Forecasts

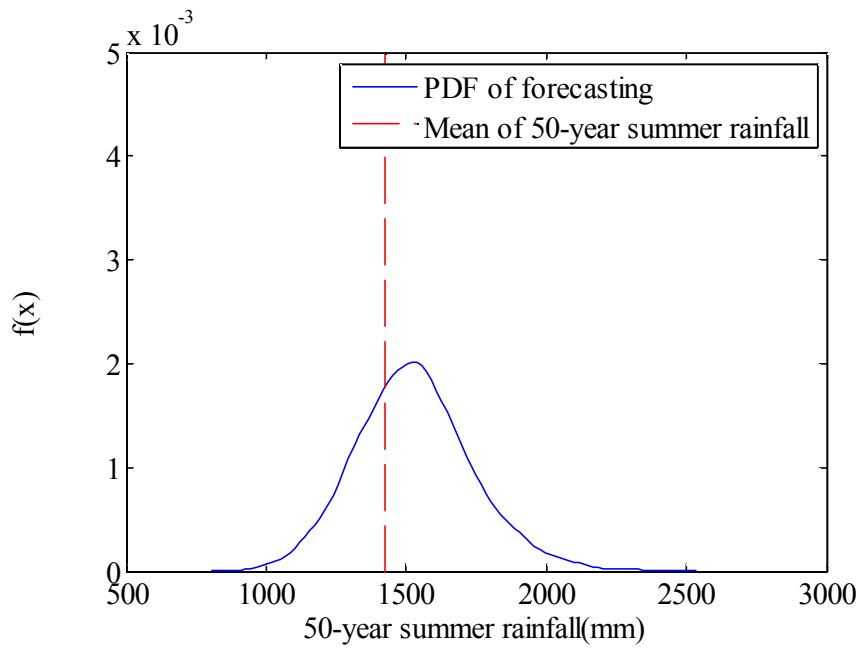


Fig. 13. The Predictive Posterior Distribution for 50-year Return Level Summer Rainfall Forecasts

Table 1. Exceedance Probability Driven by Predictive Posterior Distribution of 2011 Summer Rainfall. The Exceedance Probabilities According to Various Levels are Calculated from $p(Q_{f,2011} > Q_{level})$

Summer Rainfall	680 mm (Annual Mean)	800 mm	1,000 mm	1,200 mm	1,400 mm
Exceedance Probability	92.93%	80.83%	42.70%	10.95%	1.77%

때, 2011년 예측결과의 확률분포가 2010년의 경우보다 분산이 큰 사실은 결국 예측결과의 불확실성이 크다는 것을 의미한다. 이는 예년 평균에 해당하는 값으로 가정한 2011년 6월 OLR에 기인한 것으로, SST보다는 OLR에 의해 모형의 불확실성이 크게 좌우된 결과라 할 수 있다. 즉, 가정한 OLR 평균값 부근에서는 OLR에 대응하는 여름강수량의 분포가 위아래로 넓게 자리한 Fig. 4를 통해서도 유추가 가능하다. 보다 정확한 예측을 위해서는 2011년 6월 OLR을 사용하여야 할 것이며, 본 연구에서는 예측방법 및 결과의 해석에 주안을 두고 연구를 진행하였다. Table 1은 매개변수 사후분포로부터 추정된 강수량이 임의의 강수량을 초과할 확률을 나타낸 것이며, 확률적 결과제시가 가능한 Bayesian 통계의 장점을 이용한 결과라 할 수 있다.

5. 결론

최근에 기후변화로 기인하는 기상변동성 증가는 수자원 관리에서 불확실성을 증가시키고 있으며 이러한 증가된 불확실성을 저감하기 위한 노력으로 국외를 중심으로 기상정보를 활용한 예측 모델개발이 활발하게 이루어지고 있다. 본 연구에서는 Bayesian 기법에 근간을 둔 비정상성 빈도해석 예측 모형을 개발하였으며 이를 활용한 동적 위험도 관리 관점의 확률론적 예측 전망을 수행하였다.

본 연구에서는 Bayesian 통계기법을 이용한 비정상성 빈도해석모형을 토대로 외부 기상인자에 의한 변동성을 고려할 수 있는 계절강수량 예측모형을 구축하였으며, 낙동강유역내의 10개 관측소에서 관측된 37년간의 강수량 자료를 이용하여 연도별 여름강수량을 추출하고 이들 관측소의 여름강수량에 물리적인 영향을 미치는 기상인자로서 SST와 OLR을 공간상관성을 검토하여 선정하였다. 모형의 적합성을 검토하기 위해 2010년 여름강수량 사후 확률분포의 중앙값과 관측치를 비교하였으며, 그 결과 각각 858.2 mm와 888.1 mm로, 이는 구축된 모형이 적절하게 여름강수량을 모의하고 있음을 보여준다. 2010년 겨울 SST 관측 값과 2011년 6월 OLR을 예년 평균값으로 가정하여 2011년 여름강수량을 예측한 결과 968 mm로, 예년 여름강수량의 평균인 680 mm를 상회할 확률이 92.9% 이상인 것으로 나타났으며, 또한 50년 빈도에 해당하는 여름강수량을 추정된 결과, 50년 빈도 여름강수량 평균인 1400 mm를 상회할 확률도 약 73.7%인 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 여름 강수량을 대상으로 평균적인 강수량과 계절강수량에 대한 극치값 전망을 수행하였으나, 일강수량에 대한 극치값 전망은 수행하지 않았다. 추후 연구

로서 일강수량에 대한 극치값 전망을 수행할 예정이며, 이를 위해서는 계절강수량을 입력자료로 비정상성 Down-scaling 기법을 통한 일강수량 시나리오를 구축하고 이로부터 극치강수량에 대한 발생 여부를 전망할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(한국연구재단-2010-220-NRF-2010-220-D00083)이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 권현한, 문영일 (2005). "Nino3.4지역 SST 및 여름강수량의 독립성분분석." **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제38권, 제12호, pp. 985-994.
- 권현한, 문영일 (2007). "기상정보 및 태풍특성을 고려한 계절 강수량의 확률론적 모형 구축." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제1B호, pp. 45-52.
- 김맹기, 김화수, 곽종흠, 소선섭, 서명석, 박정규 (2002). "광역규모 예측인자를 이용한 한반도 계절 강수량의 장기 예측." *Journal of Korean Earth Science Society*, 한국지구과학회, Vol. 23, No. 7, pp. 587-596.
- 김호준, 백희정, 권원태 (1999). "지역별 중장기 강수량 예측을 위한 신경망 기법." **한국지리정보학회지**, 한국지리정보학회, 제2권, 제2호, pp. 69-78.
- 안중배, 류정희, 조익현, 박주영, 류상범 (1997). "한반도 기온 및 강수량과 주변 해역 해면 온도와의 상관관계에 관한 연구." **한국기상학회지**, 한국기상학회, 제33권, 제2호, pp. 327-336.
- 이정주 (2010). 강수계열의 비정상성 평가 및 비정상성 빈도해석 기법 개발. 박사학위논문, 전북대학교.
- 이정주, 권현한, 김태웅 (2010). "극치수문자료의 경향성 분석 개념 및 비정상성 빈도해석." **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제4B호, pp. 389-397.
- Bansod, S.D. (2004). "Outgoing long-wave radiation over the Tropical Pacific and Atlantic Ocean and Indian summer monsoon rainfall." *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 77, No. 3-4, pp. 185-193.
- Chang, C.P., Zhang, Y.S., and Li, T. (2000). "Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and the tropical Pacific SSTs. Part II: Meridional structure of the monsoon." *Journal of Climate*, Vol. 13, No. 24, pp. 4326-4340.

- Clark, C.O., Cole, J.E., and Webster, P.J. (2000). "Indian Ocean SST and Indian summer rainfall: Predictive relationships and their decadal variability." *Journal of Climate*, Vol. 13, pp. 2503-2518.
- Coles, S., Pericchi, L.R., and Sisson, S. (2003). "A fully probabilistic approach to extreme rainfall modeling." *Journal of Hydrology*, Vol. 273, pp. 35-50.
- Kang, I.-S., Lee, D.-I., and Min, K.-D. (1991). "Seasonal Evolution of Summer Precipitation and Moisture Transport in Asian Monsoon Region Estimated from the ECMWF Data." *Journal of the Korean Meteorological Society*, Vol. 27, No. 3, pp. 241-255.
- Krishnamurthy, V., and Kirtman, B.P. (2009). "Relation between Indian Monsoon Variability and SST." *Journal of Climate*, Vol. 22, No. 17, pp. 4437-4458.
- Latif, M., Sterl, A., Assenbaum, M., Junge, M.M., and Maierreimer, E. (1994). "Climate variability in a coupled GCM. Part II: The Indian Ocean and monsoon." *Journal of Climate*, Vol. 7, No. 10, pp. 1449-1462.
- Lu, R.Y. (2004). "Associations among the components of the east Asian summer monsoon system in the meridional direction." *Journal of Meteorological Society of Japan*, Vol. 82, No. 1, 155-165.
- Wang, B., Wu, R.G., and Fu, X.H. (2000). "Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate?" *Journal of Climate*, Vol. 13, No. 9, pp. 1517-1536.
- Wu, R.G., Hu, Z.Z., and Kirtman, B.P. (2003). "Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia." *Journal of Climate*, Vol. 16, No. 22, pp. 3742-3758.

논문번호: 11-020	접수: 2011.02.21
수정일자: 2011.04.01/04.19	심사완료: 2011.04.19