

강수극치사상의 비정상성 빈도해석 최신 연구동향



김 광 섭 ▶▶▶
경북대학교 교수
kimgs@knu.ac.kr

1. 머릿말

지금까지 우리나라나 여러 선진국들에서는 정상성 가정 하에서 수자원관리를 위한 시스템을 계획하고 운영해왔다. 하지만 최근 들어 각국들은 이러한 정상성 가정은 불합리적이며 더 이상 수자원계획 및 운영에 있어서 기본가정으로 받아들이기 힘들다고 주장하고 있다. 기후변화 패턴은 매우 복잡하고 불확실성이 크며 기후변화에 대한 인식과 이해도 빠르게 변화하고 있으며, 기후변화의 관점에서 볼 때 표본자료나 평균, 분산 등 자료 자체의 통계적 특성은 시간이 지남에 따라서 변화해왔다. 이러한 변화는 관측자료의

정상성 가정에 대한 의문을 제기한다. 비정상성 시계열의 빈도해석에 있어 분포 매개변수나 그 분포 자체 또한 시간에 따라 변화하기 때문에 기존의 정상성 가정에 근거한 빈도해석과는 다른 새로운 접근방법이 요구되며, 초과확률이나 이와 관련된 불확실성 추정에도 있어서도 마찬가지로 비정상성을 고려할 수 있는 새로운 접근법이 요구된다. 따라서 관측자료가 독립적이고 정상성을 띠는다는 기본가정을 벗어나는 요소들은 빈도해석 결과의 타당성에 영향을 미친다. 최근 수문학적 시계열 자료를 모형화하고 특정 재현기간의 극치사상을 추정하기 위해 사용되는 통계학적 방법은 비정상성을 가진 자료에 대해서는 적용될 수 없다. 최근 연구들에서는 확률분포를 관측자료에 적합시킬 때 시계열 자료의 비정상성 측면을 고려할 수 있는 여러 가지 기법들을 검토하고 있다. 강수량 자료의 비정상성 빈도해석과 관련된 연구는 최근 들어 활발히 이루어지고 있으며, 본고에서는 Table 1에서와 같이 비정상성 빈도해석과 관련된 국내외 연구동향을 정리하고 선진 사례를 소개하고자 한다.

Table 1. 문헌연구 조사범위

Journal/ Research Report	조사기간	Aug, 1999 - May, 2010 / Feb, 2001 - May, 2010
	총 편수	국외 : 33 / 2, 국내 : 12 / 4
	저널명 ¹⁾	JH(18), CC(2), AWR(5), AWRA(1), IJC(4), JAOT(1), JGPC(2), 한국수자원학회논문집(3), 대한토목학회논문집(9)
	주요 내용	Climate change, Non-stationary for hydro-meteorological data, Frequency analysis
	핵심용어	Non-Stationarity; Frequency Analysis; Return-Level; Climate Change; Extreme Values; Peak-Over-Threshold; Monte Carlo Simulation; Bayesian MCMC; Bayesian analysis; Design rainfall; GEV Distribution; Generalized Pareto Distribution; Log-Pearson Type 3 distribution; Log-normal Distribution

1) JH: Journal of Hydrology (ScienceDirect), CC: Climate change (SpringerLink), AWR: Advance in Water Resources (ScienceDirect), AWRA: American Water Resources Association IJC: International Journal of Climate Change, JAOT: Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, JGPC: Global and Planetary Change (ScienceDirect)

2. 국외 연구동향

선진국들은 자국에 적합한 표준 기후변화 시나리오를 채택하고 여러 모형 결과에 대한 종합적인 전망치를 제시하고 있다. 독일의 바이에른주는 2050년까지 증소규모 하천 홍수량을 40~50% 증가시키고, 100년 빈도 설계홍수량을 15% 증가시키도록 하고 있다. 네덜란드는 라인강 설계홍수량을 2015년까지 15,000cms에서 16,000cms로 증가시키고 향후 기후변화를 고려하여 18,000cms로 설정하였다. 영국의 경우 Table 2에서 보는 바와 같이 2115년까지 최대강우강도는 30%, 최대하천유량은 20% 증가시키도록 하고 있다.

Strupczewski et al.(2001)은 비정상성 홍수빈도 해석을 위하여 56개 모형을 구성하고 Akaike 정보판정법(Akaike Information Criterion, AIC)을 사용하여 최적의 비정상성 빈도해석모형을 선정하였으며, 최우추정법(Maximum Likelihood Estimation, MLE)을 적용하여 매개변수를 추정한다. Cunderlik and Burn(2003)은 지역 홍수빈도해석을 위하여 2차 비정상성 접근법을 제안하였다. 이 연구에서는 비정상성 분위수(quantile) 함수를 위치 매개변수와 축척 매개변수로 구성되며 시간에 대해서 종속적인 지점성분과 2차 비정상성 가정 하에서 시간에 대해서 독립적으로 고려될 수 있는 지역성분으로 분리하였다. 또한 비정상성 자료의 위치 및 축척매개변수를 추정함에 있어서 모형의 성능을 평가하기 위하여 Monte-Carlo 모의실험을 수행하였다. Khaliq et al.(2006)는 Time-varying moments, Nonstationary pooled flood frequency analysis, Quantile regression method 등 비정상성 빈도해석기법들에 관하여 소개

하였다. Sugahara et al.(2009)은 Brazil Sao Paulo의 1933년부터 2005년까지 일강수량 극치 빈도해석을 위하여 Peaks-Over-Threshold(POT)와 GP 분포형을 적용하였으며, 비모수적 추세검정을 위하여 Mann-Kendall 검정을 수행한 바 있다. Villarini et al.(2009)은 도시지역에서의 홍수빈도 해석은 토지이용변화와 도시빗물시설의 개발과 관련된 연 최대기록의 비정상성에 의해 복잡해진다고 하였다. 이 연구에서 제안한 홍수빈도해석기법은 비정상성 조건 하에서 시계열 자료를 모형화할 수 있는 Generalized Additive Models for Location, Scale and Shape parameters(GAMLSS)에 기초를 두어 발전되어 왔다. North Carolina에 위치한 Charlotte의 도시화된 유역인 Little Sugar Creek의 연 최대정상방출기록에 적용시킨 결과, 선택된 모수적 분포의 매개변수를 모형화함으로써 연 최대유량의 평균과 분산변화를 묘사할 수 있다고 하였다 (Table 3 참조).

3. 국내 연구동향

김보경 등(2008)은 강우와 기온에 관련하여 객관성과 일관성을 유지할 수 있는 극한지수를 설정하였으며, 이에 근거하여 우리나라 전역에 위치한 총 66개 관측소의 과거자료를 분석하고, 통계적 유의성을 파악하기 위해 선형회귀 및 Kendall-Tau 방법을 적용하였다. 권영문과 김태웅(2009)은 서울 강우관측소의 46개년(1961-2006)시 강우자료를 Gumbel 혼합모형에 적용하여 빈도해석을 수행하였다. 이변량 강우빈도해석을 통해 결합누적분포함수를 산정한 후, 결합 재현기간, 그리고 조건부 재현기간을 산정하였

Table 2. 기후변화를 고려한 설계변수 기간별 보정계수 사례 (영국)

변 수	1990~2025	2025~2055	2055~2085	2085~2115
최대강우강도	+5%	+10%	+20%	+30%
최대하천유량		+10%		+20%
연안풍속		+5%		+10%
극한파고		+5%		+10%

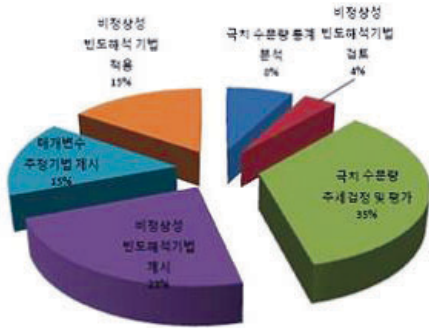


Fig. 1. 국외 문헌조사 통계

다. 이와 같은 이변량 강우빈도분석은 다양한 호우특성들의 확률적 거동에 대한 예측정보를 제공함으로써 수공구조물의 계획 및 설계 그리고 위험도평가 등의 문제해결에 유용하게 사용될 수 있다고 제안하였다. 권현한과 김병식(2009)은 Markov Chain 모형의 매개변수인 천이확률과 확률분포형의 매개변수 등을 연결함수(link function)를 통해 외부인자와 연동하도록 하였으며 정준상관분석을 통해 매개변수를 추정하였다. 개발된 모형을 서울지방 1961~2006년까지의 일강수량 자료를 대상으로 검증하였고, 추정된 결과가 계절강수량의 특성뿐만 아니라 일강수량의 특성 또한 적절하게 모의된다고 하였다. 권영문 등(2009)은 기상청 산하 56개 강우관측소의 강우자료를 분석하여 증가 경향성을 가지는 관측지점에 대하여 그 경향성을 반영함으로써 설계목표년도의 확률강우량을 산정하는 방법을 제안하였다. 이창환 등(2010)은 BCM2 모의결과와 NCEP 자료로부터 산정된 연 총강우량을 이용하여 연 최대 강우량 평균과 매개변수 사이의 통계적 상관관계를 이용하여 목표년도 확률강우량을 산정한 결과, 기후변화 시나리오에 따른 지역적 연 총 강우량의 변화는 미래 확률강우량의 변화에 영향을 미치는 것으로 나타났다고 하였다(Table 4 참조).

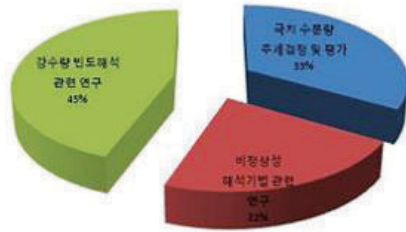


Fig. 2. 국내 문헌조사 통계

4. 맺음말

최근 강수량 자료는 정상성 가정에 대한 문제를 제기하고 있으며, 선진국들에서는 기후변화 영향을 고려한 수자원 계획의 필요성을 공감하고 있다. 이러한 문제제기에 대해서도 기후변화로 인한 변화의 정량적 크기 산정과 이에 대한 대처가 힘든 이유는 상대적으로 작은 기후변화 영향이 거대한 자연적 변화와 장주기 변화 등 여러 가지 불확실적인 요소에 포함되어 있기 때문에 그 변화를 추출해내기 어렵기 때문이다. 그런데 장주기 변화는 연구측면에서는 관심이 있으나 수자원 관리나 실무적인 측면에서 주요 사안으로 다룰만한 양적 변화가 아니며 선형추세에 대한 올바른 적용만으로도 실무적으로는 기후변화를 대응함에 있어서 도움이 될 것이다. 앞에서 제시한 바(2절)와 같이 선진국들에서는 이러한 강수량자료의 비정상성에 대한 완벽한(perfect of complete) 접근법이 아니라 일관성 있는(consistent) 접근법 확립을 위해서 노력하는 중이다. 또한 기존의 정상성 가정에 따른 빈도 해석과 같이 동일 자료에 대한 동일 결과를 도출할 수 있는 재현성 있는 접근법 확립이 필요하다. 또한 향후 Point process 모형의 적용 등을 통하여 양과 빈도의 비정상성을 동시에 고려하는 한편, 다양한 기후변화 시나리오 결과를 적용함으로써 발생할 수 있는 불확실성을 최소화하도록 하여야 할 것이다. 🌧️

Table 3. 기후변화에 따른 비정상성 빈도해석 - 국외 연구동향 (대표 사례)

연번	저자명	발행연도	연구지역	분석자료	분석기간	해석기법	주요내용
1	Strupczewski et al.	2001	Polish river, Poland	Annual peak flow	1921~1990	Weighted Least Squares (WLS) and Identification of DisTribution (IDT)	To obtain the gradient of trends in the mean and the standard deviation and further insights into the detected non-stationarity
2	Cunderlik and Burn	2003	Columbia river, Canada	Maximum flow	1960~1999	Monte-Carlo	Estimation of trend magnitudes in the location and scale parameters of a nonstationary series
3	Moussaoui et al.	2006		Spectral		Markov Chain Monte Carlo (MCMC)	
4	Renard et al.	2006	France	Stream flow	1907~2007	Markov Chain Monte Carlo (MCMC)	Estimate parameters, quantify the probability of models and derive a realistic frequency analysis
5	Laurent and Parey	2007	France	Temperature	1960~2002	Block maxima and Peak-Over-Threshold (POT)	To define a new return-level
6	Leclerc and Quarda	2007	Southeastern Canada and northeastern United States	Peak flow	1975~2000	Mann-Kendall test, Maximum Likelihood (ML), Generalized Maximum-Likelihood (GML) estimators, Monte Carlo	The estimation of the nonstationary regional flood quantiles
7	Blasone et al.	2008	USA	Daily river discharge	1975~1984	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), Markov Chain Monte Carlo (MCMC)	Value of the cutoff threshold based on the appropriate coverage of the resulting uncertainty bounds.
8	Hassan et al.	2008	USA	Groundwater flow	1960~1990	Markov Chain Monte Carlo (MCMC)	Quantify parameter uncertainty and its effect on predictions of a groundwater flow model
9	Sugahara	2009	Brazil	Daily rainfall	1933~2005	Peaks-Over-Threshold (POT) and Generalized Pareto Distribution (GPD)	To estimate of increasing in magnitude and frequency over time of daily rainfall

Table 4. 기후변화에 따른 비정상성 빈도해석 - 국내 연구동향 (대표 사례)

연번	저자명	발행연도	연구지역	분석자료	분석기간	해석기법	주요내용
1	김보경 등	2008	전국 66개 관측소 지점	일강우량, 기온	1991~2006	최소제곱 선형회귀법, Kendall-Tau 방법	통계적 유의성을 파악하기 위하여 통계적 진단으로 선형회귀 및 Kendall-Tau 방법을 적용하여 극한사상의 발생빈도와 경향성 분석
2	김상욱, 이길성	2008	낙동강 유역	저수량 (low flow)	1966~2001	Bayesian 다중회귀분석을 이용한 지역빈도해석	불확실성 측면에서의 효과를 분석하기 위하여 Bayesian 다중회귀분석과 t분포를 이용한 일반 다중회귀분석 추정치를 비교분석
3	신홍준 등	2008	전국 378개 강우 관측 지점	연 최대 강우량		Fuzzy-c means 기법, 홍수지수법, 지점빈도해석, 지역빈도해석	홍수지수법의 불확실성을 평가하기 위해 Generalized logistic 분포형의 분위수에 대한 점근 분산식을 이용하여 성장곡선에 대한 신뢰구간을 산정

Table 4. 기후변화에 따른 비정상성 빈도해석 - 국내 연구동향 (대표 사례) (계속)

연번	저자명	발행연도	연구지역	분석자료	분석기간	해석기법	주요내용
4	권영문, 김태웅	2009	서울	강우량	1961~2006	Gumbel 혼합모형	이변량 강우빈도해석을 통해 결합 누적분포함수를 산정한 후, 결합재현기간과 조건부 재현기간을 산정
5	권현한, 김병식	2009	서울	일강수량	1961~2006	Markov Chain	Markov Chain 모형의 매개변수들을 외부인자와 연계
6	권영문 등	2009	전국 56개 관측소 지점	강우량	1973~2006	Gumbel 분포형, 최우도법	강우관측소의 강우자료를 분석하여 증가경향성이 존재하는 지점에 대하여 이를 반영하여 설계목표연도의 확률강우량을 산정하는 방법을 제안
7	이창환 등	2010	전국 56개 관측소 지점	강우량	1973~2006	Gumbel 분포형, 확률가중 모멘트법	BCM2 모형과 NCEP 자료를 이용하여 연 최대 강우량 평균과 매개변수의 통계학적 관계를 분석, 목표연도 확률강우량을 산정하는 방법을 제안

참고문헌

1. 권영문, 김태웅 (2009). “이변량 강우 빈도해석을 이용한 서울지역 I-D-F 곡선 유도.” 대한토목학회논문집, 제29권, 제2B호, pp. 144-162.
2. 권영문, 박진원, 김태웅 (2009). “강우량의 증가 경향성을 고려한 목표연도 확률강우량 산정.” 대한토목학회논문집, 제29권, 제2B호, pp. 131-139.
3. 권현한, 김병식 (2009). “비정상성 Markov Chain Model을 이용한 통계학적 Downscaling 기법 개발.” 한국수자원학회논문집, 제42권, 제3호, pp. 213-225.
4. 김보경, 김병식, 김형수 (2008). “극한지수를 이용한 극한 기상사상의 변화 분석.” 대한토목학회논문집, 제28권, 제1B호, pp. 41-53.
5. 김상욱, 이길성 (2008). “Bayesian 다중회귀분석을 이용한 저수량(Low flow) 지역 빈도분석.” 한국수자원학회논문집, 제41권, 제3호, pp. 325-340.
6. 신흥준, 남우성, 정영훈, 허준행 (2008). “Generalized Logistic 분포형을 이용한 지역빈도해석의 불확실성 추정.” 대한토목학회논문집, 제28권, 제6B호, pp. 723-729.
7. 이창환, 김태웅, 경민수, 김형수 (2010). “BCM2 모의 결과를 반영한 목표연도 확률강우량 산정.” 대한토목학회논문집, 제30권, 제3B호, pp. 269-276.
8. Blasone, R.S., Vrugt, J.A., Madsen, H., Posbherg, D., Robinson, B.A. and Zyvoloski, G.A. (2008). "Generalized likelihood uncertainty estimation(GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling." Advances in Water Resources, Vol. 31, pp. 630-648.
9. Cunderlik, J.M. and Burn, D.H. (2003). "Non-stationary pooled flood frequency analysis." Journal of Hydrology, Vol. 276, pp. 210-223.
10. Hassan, A.E., Bekhit, H.M. and Chapman, J.B. (2009). "Using Markov Chain Monte Carlo to quantify parameter uncertainty and its effect on predictions of a groundwater flow model." Environmental Modelling & Software, Vol. 24, pp. 749-763.

11. Khaliq, M.N., Ouarda, T.B.M.J., Ondo J.-C., Gachon, P. and Bobee, B. (2006). "Frequency analysis of a sequence of dependent and/or non-stationary hydro-meteorological observations: A review." *Journal of Hydrology*, Vol. 329, pp. 534-552.
12. Laurent, C. and Parey, S. (2007). "Estimation of 100-year-return-period temperatures in France in a non-stationary climate: Results from observations and IPCC scenarios." *Global and Planetary Change*, Vol. 57, pp. 177-188.
13. Leclerc, M. and Ouarda, T.B.M.J. (2007). "Non-stationary regional flood frequency analysis at ungauged sites." *Journal of Hydrology*, Vol. 343, pp. 254-265.
14. Moussaoui, S., Carteret, C., Brie, D. and Mohammad-Djafari, A. (2006). "Bayesian analysis of spectral mixture data using Markov Chain Monte Carlo Methods." *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol. 81, pp. 137-148.
15. Renard, B., Lang, M. and Bois, P. (2006). "Statistical analysis of extreme events in a non-stationary context via a Bayesian framework: case study with peak-over-threshold data." *Stoch Environ Res Risk Assess*, Vol. 21, pp. 97-112.
16. Strupczewski, W.G., Singh, V.P. and Mitosek, H.T. (2001). "Non-stationary approach to at-site flood frequency modelling III: Flood analysis of Polish rivers." *Journal of Hydrology*, Vol. 248, pp. 152-167.
17. Sugahara, S. (2004). "Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in Sao Paulo, Brazil." *International Journal of Climatology*, Vol. 29, pp. 1339-1349.
18. Villarini, G. (2009). "Flood frequency analysis for nonstationary annual peak records in an urban drainage basin." *Advances in Water Resources*, Vol. 32, pp. 1255-1266.