

기후 변화를 고려한 홍수 위험도 평가

Flood Risk Assessment with Climate Change

정대일* · 제리 스테딩저** · 성장현*** · 김영오****

Jeong, Dae-Il · Jerry R. Stedinger · Sung, Jang-Hyun · Kim, Young-Oh

Abstract

The evidence of changes in the climate system is obvious in the world. Nevertheless, at the current techniques for flood frequency analysis, the flood distribution can not reflect climate change or long-term climate cycles. Using a linear regression and a Mann-Kendall test, trends in annual maximum precipitation and flood data for several major gauging sites were evaluated. Moreover, this research considered incorporating flood trends by climate change effects in flood frequency analyses. For five rainfall gauging sites (Seoul, Incheon, Ulleungdo, Jeonju, and Gangneung), upward trends were observed in all gauged annual maximum precipitation records but they were not statistically significant. For three streamflow gauging sites (Andong Dam, Soyanggang Dam, and Daecheong Dam), upward trends were also observed in all gauged annual maximum flood records, but only the flood at Andong Dam was statistically significant. A log-normal trend model was introduced to reflect the observed linear trends in annual maximum flood series and applied to estimate flood frequency and risk for Andong Dam and Soyanggang Dam. As results, when the target year was 2005, 50-year floods of the log-normal trend model were 41% and 21% larger than those of a log-normal model for Andong Dam and Soyanggang Dam, respectively. Moreover, the estimated floods of the log-normal trend model increases as the target year increases.

Keywords : climate change, flood, Log-normal, risk, trend

요 지

기후변화에 대한 명백한 증거가 전 세계적으로 관찰되고 있음에도 불구하고 현재 사용 중인 홍수 빈도분석 방법은 이러한 기후변화나 장기변동성을 고려할 요소를 갖추지 못하고 있다. 본 연구에서는 관측된 연최대 일강우량과 일유출량 시계열을 대상으로 추세분석을 실시하여 전 지구적으로 나타난 기온상승과 같은 증가추세가 존재하는지 linear regression과 Mann-Kendall 기법을 이용하여 살펴보았으며, 나아가 기후의 변동성으로 인해 발생할 수 있는 홍수량의 증가추세를 반영한 빈도분석 방안을 제시하였다. 5개 대상지점(서울, 인천, 울릉도, 전주, 강릉)의 연최대 일강우량 모두 시간에 따른 증가추세를 일관되게 보이고 있었으나, 통계적인 유의성이 검증되지는 않았다. 홍수량도 3개의 대상지점(안동댐, 소양강댐, 대청댐) 모두에서 시간에 따른 증가추세가 관찰되었으나, 안동댐의 상향추세만이 통계적인 유의성을 내포하였다. 선형추세를 가진 홍수량의 빈도분석 및 위험도를 추정할 수 있는 대수정규 추세모형(log-normal trend model)을 소개하고, 안동댐과 소양강댐의 홍수 빈도분석을 위해 적용하였다. 적용결과 대수정규 추세모형의 2005년 50년 빈도 홍수량은 안동댐과 소양강댐 모두 대수정규 모형보다 각각 41%와 21% 증가하였으며, 목표연도가 증가함에 따라 추정되는 홍수량 역시 함께 증가함을 확인하였다.

핵심용어 : 기후변화, 홍수량, 대수정규, 위험도, 추세

1. 서 론

최근 우리나라는 과거 관측자료로서는 상상하기 힘든 집중호우와 태풍에 의한 홍수에 시달리고 있다. 1995년의 태풍 재니스를 시작으로, 1996년의 집중호우, 1998년에 태풍 야니, 1999년의 집중호우, 2000년 태풍 프라피룬, 2001년의 서울 지역의 도시 집중호우에 이르기까지 홍수에 의한 피해는 해

를 거듭할수록 늘어나고 있는 실정이다. 특히, 2002년의 태풍 루사에 의해서는 270 명의 인명피해와 6조 1000억 원의 재산피해가 발생하였으며, 2003년의 태풍 매미에 의해서는 131명의 인명피해와 4조 2000억 원이라는 막대한 피해가 발생함으로써, 홍수방어 구조물 설계기준의 상향 조정에 대한 검토가 불가피한 상태이다.

국내 수문자료의 빈도분석과 관련하여 ‘하천설계기준·해

*정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 박사후연구원 (E-mail : dijeong@kict.re.kr)

**Professor Cornell University School of Civil and Environmental Engineering (E-mail : jrs5@cornell.edu)

***서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (E-mail : kon26@snu.ac.kr)

****정회원 · 서울대학교 건설환경공학부 부교수 (E-mail : yokim05@snu.ac.kr)

설(한국수자원학회, 2005)'에서는 관측자료의 전체적인 경향으로부터 현저하게 벗어나는 이상치(outlier)에 대한 정의와 처리방안에 대해 언급하고 있다. 이상치의 발생 원인을 크게 두 가지로 분류하고 있는데, 첫 번째는 관측, 판독, 기록 및 검정 또는 수정과정 등에서 착오에 의해 발생하는 것으로 변밀히 검토한 후 제거할 것을 권고하고 있다. 두 번째는 산불, 도시화 및 대규모 저수지의 건설 등에 따른 유역조건의 변화에 의해 발생하는 것으로, 이 경우에는 자료의 동질성을 조사하여 나머지 자료와 동질성(또는 일관성)을 갖도록 조정하여 빈도분석 자료에 포함하도록 권고하고 있다. 이와 같이 국내 홍수 빈도분석에서 수문자료의 이상치에 관련된 지침은 어느 정도 마련되어 있으나, 이상치와 유사하게 관측자료의 경향을 따르지 않을 가능성이 큰 기후 변동성에 의한 이상홍수를 고려한 빈도분석에 대한 지침이 없어, 이에 대한 대책 마련이 시급하다고 할 수 있다.

과거에 비해 강도와 피해가 점점 심각해지는 홍수의 주요 원인으로서는 지구온난화로 인한 기후변화와 산업화 및 도시화로 인한 토지이용의 변화 등이 지목되고는 있으나, 이들의 인과 관계를 밝히는 일이 그리 쉽지만은 않다. 따라서 기후변화와 홍수와의 관계를 규명하기 위해서는 과거의 강우 및 홍수자료에 대한 통계적 연구와 대기대순환모형(GCM, General Circulation Model)을 통해 미래의 강우와 유출의 변화를 예측하고 분석하는 물리적 연구가 함께 진행되어야 한다(서용원과 김영오, 2000). 본 연구에서는 통계적 연구에 주목하고자 한다.

국내외를 막론하고 현재 수행되고 있는 일반적인 홍수 빈도분석은 연최대 홍수량(annual maximum flood)이 기후변화나 장기적 변동(decadal variations) 등의 장기 사이클(cycle)에 영향을 받지 않는 정상성(stationary)임을 가정하고 있다(Stedinger *et al.*, 1993). 하지만 최근 기후변화 연구에서 보고되는 강우량이나 유출량의 추세(trend)변화는 정상성의 가정이 유효한가에 대한 점검과, 비정상성을 고려한 빈도분석의 필요성을 절감하게 한다(Franks and Kuczera, 2002). 따라서 과거 발생하던 홍수사상의 경향을 현격히 벗어나 최근 발생하고 있는 이상홍수는 앞에서 설명한 것과 같은 기상현상의 비정상성으로부터 기인되는 것이라는 우려에 반론을 제시하는 수문학자들은 그리 많지 않을 것이다.

이수, 치수, 하천환경을 위한 수자원 개발, 종합치수대책, 그리고 수공구조물의 설계 등에 기본이 되는 것이 설계강우와 설계홍수이며, 이러한 설계강우량과 설계홍수량을 결정하기 위해서는 빈도분석이 선행되어야 한다. 그러나 기후의 변동성이나 이상홍수를 고려하지 않은 빈도분석을 통해 생성된 설계강우량과 설계홍수량으로 수자원 사업이 수행된다면, 막대한 피해가 계속적으로 반복되어 발생할 것이다. 따라서 본 연구는 기후변화를 고려한 홍수빈도를 분석하고 위험도를 평가하는 방안을 제안하고자 한다. 기후변화에 의해 증가 추세를 보이는 강우량이나 홍수량에 대한 빈도분석과 위험도 분석에 대한 연구는 세계적으로 아직 미흡하여, 본 연구에서 제시한 기후변화를 고려한 설계홍수량의 추정에 관한 연구결과는 향후 기후변화에 따른 홍수 방어대책을 마련하는데 큰 도움이 될 것이다.

2. 연구동향

기후변화의 영향에 따른 유출량의 증가 혹은 감소 추세에 대한 우려는 이미 많은 연구자의 결과에 의해 강조되었다. 외국에서 최근에 수행된 연구 중에서 과거 유량자료를 이용한 통계적 연구를 중심으로 살펴보면, Lins and Slack (1999)은 미국 내 395개 유량관측소의 관측값에 대한 장기 추세분석을 Mann-Kendall 검정을 이용해 수행하였다. 이들은 저수(low-flow), 중수(medium-flow), 풍수(high-flow)에 대한 추세분석을 수행하였으며, 저수와 중수에서는 강한 추세를, 풍수에서는 상대적으로 약한 추세가 미국 전반에 걸쳐 발생하고 있음을 확인하였다. Douglas *et al.*(2000)은 지역 평균 Kendall's S 검정을 이용하여 관측지점 간의 교차상관 관계를 고려한 홍수와 저수의 추세분석을 수행하였다. 이들의 연구결과도 비슷하여 미국의 중서부 지역의 경우 유의수준 5 %에서 홍수는 상향추세가 존재하지 않으나, 저수에 대해서는 상향추세가 존재하고 있음을 통계적으로 검증하였다. Chiew and McMahon(1993)은 오스트레일리아의 30개 하천의 연평균 유출에 대해 Mann test, Cumulative Deviation test, Worsley Likelihood Ratio test, Kruskal-Wallis test, Distribution-free CUSUM test를 이용하여 추세분석을 실시하여, 15개 지역에서 통계적으로 유의한 추세가 있음을 확인하였다. Burn(1994)은 Mann-Kendal test를 이용하여 캐나다의 West-Central 지역의 하천유량에 대해 추세분석을 실시하였다. 이 외에도 선진국의 많은 연구자들에 의해 과거의 유량자료에 대한 통계적 연구가 수행 되었으며, 대기대순환모형을 이용한 물리적 연구도 활발히 진행되고 있다.

기후변화를 고려한 설계홍수량 추정에 관한 연구는 선진국에서도 아직 시작 단계로서 선행연구가 그리 많지 않다. 유출현상 중에서도 홍수량의 비정상성에 초점을 맞춘 연구사례는 대해 정리하면 다음과 같다. Olsen *et al.*(1999)은 미국 미시시피강 상류의 홍수위험(flood risk)의 변화에 초점을 맞춘 연구들을 정리해 보고하였다. 그는 홍수위험의 변화를 초래하는 기후요인으로 Pacific Decadal Oscillation(PDO)과 Northern Atlantic Oscillation(NAO)을 지목하고, linear regression식을 이용하여 연최대 홍수량이 이 두 기후요인과 관계가 있는 시간의 변수임을 주장하였다. Stedinger and Crainiceanu (2001)는 비정상성을 고려한 연최대 홍수량의 추정을 위해 평균의 선형추세를 고려한 이변수 대수정규분포(two-parameter log-normal distribution)모형과 대수정규 ARMA 모형을 제안하였다. 그들은 대수정규분포를 따르는 유출량의 평균이 선형추세를 가지고 미래에도 계속 증가할 것이라고 가정한 대수정규 추세(log-normal trend) 모형과, 유출량의 평균이 정상성을 유지한다는 가정 하에 ARMA 모형으로 미래의 평균을 예측하는 대수정규 ARMA(log-normal ARMA) 모형을 이용하여 Mississippi 상류의 미래 30년간의 위험도가 어떻게 변화할 것인지를 예측하여 제시하였다.

비정상성을 고려한 빈도분석을 위해 확률밀도함수(probability density function)의 매개변수를 시간의 변수로 해석하도록 제안한 연구들도 드물게 찾아볼 수 있다. Strupczewski *et al.*(2001)은 연최대 홍수량을 평균과 분산에 추세가 있는 경우, 이를 분석하기 위한 2변수 분포(log-

normal, Gumbel, 2변수 Pearson)와 3변수 분포인 Pearson Type 3 분포의 매개변수를 시간에 따라 변하는 변수로 정의하고, 최우도법을 이용하여 매개변수를 추정하는 방안을 제안하였다. Coles(2001)는 GEV(Generalized Extreme Value) 분포의 위치(location) 매개변수를 시간의 변수로 가정하고 엘리뇨에 영향을 받는 연최대 파고를 추정하는데 사용하였다. Griffis and Stedinger(2007)는 미국의 공식적인 홍수 빈도분석 지침서인 Bulletin 17B에 기후변화와 변동성을 고려한 홍수빈도와 위험도 분석을 위한 방안을 제시하였다.

현재 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 평가하기 위한 연구들이 산발적으로 진행되고 있으나, 대부분이 치수가 아닌 이수에 초점이 맞춰져 있으며, 이는 세계적인 연구동향의 주된 흐름과도 크게 다르지 않다. 다만 선진국의 경우는 기상현상이나 토지이용의 변화에 따른 이상홍수의 관계를 규명하기 위한 연구가 우리나라에 비해 상당히 앞서 있는데 비해, 국내 기후변화 등에 의한 이상홍수의 발생 원인을 규명하고 이를 설계홍수량 추정에 반영하고자 하는 관심은 뜨거운 반면 자료의 부족 등으로 인해 연구가 거의 이루어지지 못하고 있는 실정이다(김남원과 원유승, 2004).

3. 국내 강우량과 홍수량의 추세분석

관측 강우량과 홍수량 자료로부터 통계적으로 유의할만한 증가추세가 있다고 말할 수 있는가에 대한 통계적 분석을 실시하였다. 기후변화나 장기적 변동 등에 의한 영향으로 관

측 강우량과 홍수량에서 정상성의 가정이 지켜지지 않고 상향 또는 하향 추세가 존재한다면, 통계적 검증을 통해 이를 인지하고 빈도분석에 반영함으로써, 향후 기후변화에 의해 발생할 수 있는 이상홍수를 고려한 설계홍수량을 추정할 수 있을 것이다.

추세분석은 이론적으로 이해하기 쉽고 간단하여 가장 많이 사용되는 linear regression 검정과, 대표적인 비모수 방법인 Mann-Kendall 검정을 사용하였다. 두 기법에 대한 구체적인 설명은 Salas(1993)를 비롯한 참고서적과 논문에서 쉽게 찾아볼 수 있으므로 생략하였다. 국내에서 사용가능한 강우량과 유출량 자료 중에서 길이가 긴 서울, 인천, 울릉도, 전주, 강릉 기상청 관측소의 연 최대 일강우량(mm)과 안동댐, 소양강댐, 대청댐의 연 최대 일유출량(cms)의 추세분석을 실시하였다. 강우량 분석지점은 홍수량과의 연관성을 고려하지 않고 긴 자료를 보유한 지점 위주로 선정하였다. 이는 길이가 긴 연최대 일 강우량 자료를 분석하여 강우자료가 가진 경년변동 주기현상을 설명하고 분석기간의 길이가 달라짐에 따라 추세분석의 결과도 달라질 수 있음을 강조하기 위해서이다. 홍수량 검증지점의 일 강우량 자료는 길이가 30년 정도로 짧아 이와 같은 현상을 설명하기에 적합하지 않다고 판단하였다.

3.1 강우량

국내 관측소 중 길이가 긴 서울, 인천, 울릉도, 전주, 강릉 기상청 관측소의 강우자료에서 홍수와 직접적인 연관이

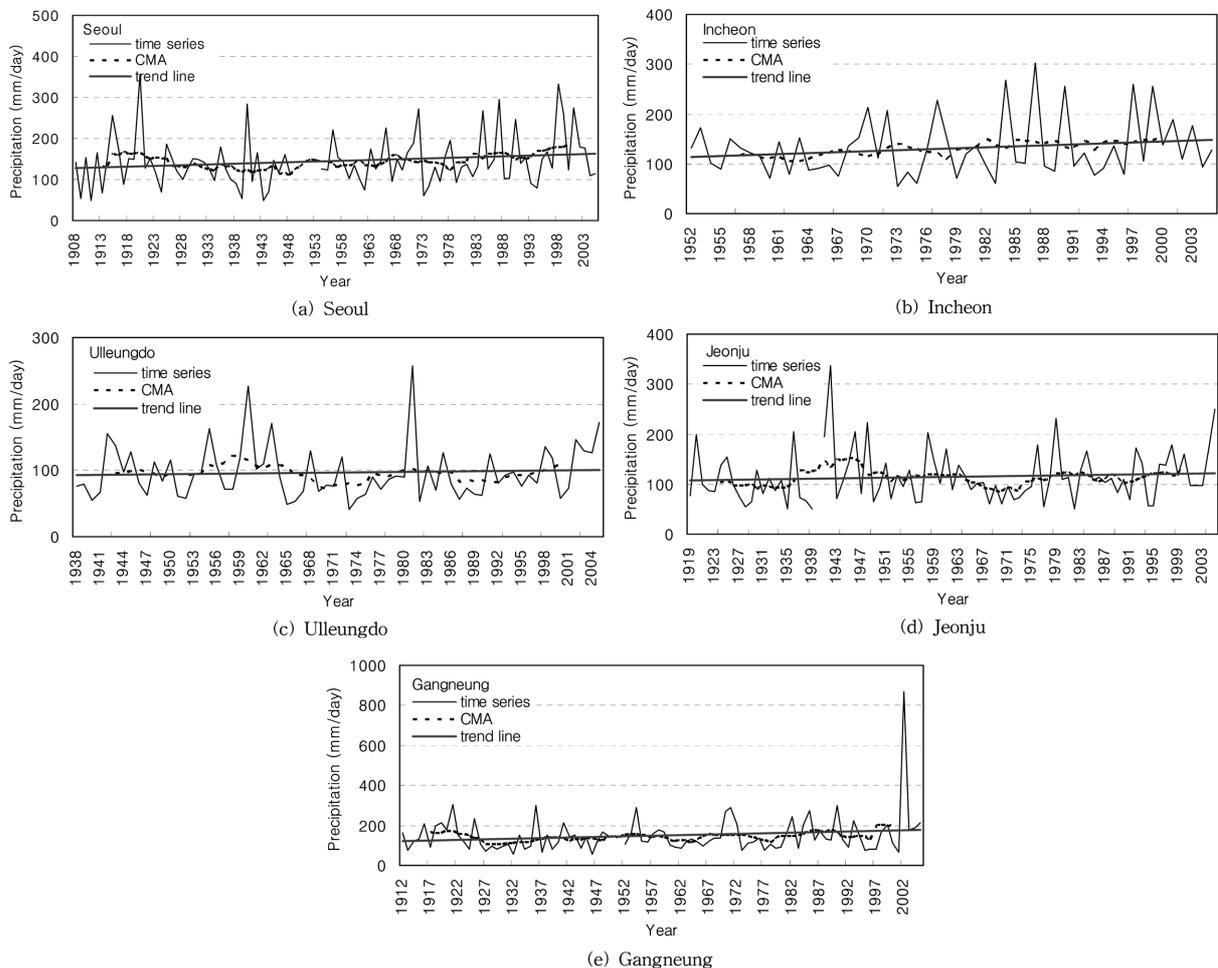


Fig. 1 Annual maximum daily precipitation time series

Table 1. linear regression and Mann-Kendall trend test results for annual maximum daily precipitation

station	Record length	Linear Regression				Mann-Kendall	
		slope	R ² (%)	correlation	P-value	Z	P-value
Seoul	98(5)	0.352	2.788	0.167	0.055*	1.142	0.127
Incheon	54(0)	0.643	2.966	0.172	0.107	0.679	0.249
Ulleungdo	68(0)	0.111	0.300	0.055	0.329	0.603	0.273
Jeonju	87(1)	0.171	0.688	0.083	0.224	1.279	0.100
Gangneung	94(1)	0.620	3.081	0.176	0.046**	1.009	0.157

*90 percent level of significance for a one-side test

**95 percent level of significance for a one-side test

(·) number of non-observed data

있는 연최대 일강우량을 이용하여 추세분석을 실시하였다. 서울은 1908~2005년(결측: 1949~1953), 인천은 1952~2005년, 울릉도는 1938~2005년, 전주는 1919~2005년(결측: 1940년), 그리고 강릉은 1912~2005년(결측: 1951년)의 연최대 일강우량 시계열 자료를 분석하였으며, 시계열과 중심이동평균(Centered Moving Average, CMA)을 그리면 Fig. 1과 같다. 모든 지점의 연최대 일강우량 시계열도에서 유관으로 식별 가능한 증가추세를 확인할 수 있으나, 통계적으로도 이러한 증가추세가 의미가 있는지에 대해 linear regression 검정과 Mann-Kendall 검정을 이용하여 검토하였다.

Table 1은 두가지 검정방법에 대한 단측검정(One-side Test) 결과를 정리한 것이다. linear regression 검정에서는 서울과 강릉의 연최대 일강우량 시계열의 경향성이 각각 90%와 95% 신뢰수준에서 유의할만한 것으로 분석되었으며, Mann-Kendall 검정에서는 5개 지점 모두의 경향성이 90% 신뢰수준에서 유의하지 않은 것으로 판단되었다. 특히, 강릉의 경우 2002년에 발생한 870.5 mm/day의 강수량이 linear regression 검정에서 강우량의 분산이 일정하다는 가정을 크게 벗어나고 있어 Mann-Kendall 검정의 결과와 큰 차이를 보였다. 전주의 경우 linear regression 검정에서는 P-value 값이 0.224로 큰 값을 나타내었지만 Mann-Kendall 검정에서는 0.100으로 상당히 작은 값을 나타내었다. 따라서 오차 분산이 일정하다는 가정 하에서 이루어지는 linear regression 검정보다는 Mann-Kendall 검정의 결과가 더 신뢰할만한 것임을 고려할 때 5개 지점의 강우량이 시간에 따라 증가 추세에 있다고 통계적으로 말하기에는 충분하지 않았다. 김광섭과 임태경(2005)도 Mann-Kendall 검정을 통해 우리나라의 월별 및 연 자료의 총강우량, 강우일수, 그리고 특정 강수강도 이상을 가지는 강우일수의 장기추세분석을 통해 강수량 증가, 강수일수의 감소, 그리고 호우일수의 증가가 관찰되었으나, 90%와 95%의 유의성을 가진 증가나 감소의 추세를 보이지 않았다고 보고한 바 있다.

강우량 자료는 경년변화를 가짐으로서 추세분석을 어렵게 하는데, Fig. 1에서 각 지점의 11년 중심이동평균을 보면 강우량 시계열이 장기적인 주기를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 기존의 강우량 분석에서도 이러한 장기적 주기가 관찰되었는데, 권원태 등(2007)은 과거 30년(1971년~2000년)과 최근 10년(1996년~2005년) 간의 우리나라 연강우량 변화를 분석한 결과 변동폭이 크기는 하나 장기적으로 증가하는 경향을 보이며, 평균적으로 약 11% 정도가 증가하였다고 밝힌

바 있다. 그들은 이 연구에서 뚜렷한 증가추세를 보이는 온도와 달리 강우량은 자연변동에 의한 주기를 가지며 증가하는 경향을 나타낸다고 밝힌 바 있다. 백희정과 권원태(2005)는 한강과 낙동강의 유역평균 월강수량의 기후 특성에 대한 분석에서 1970년대 이후 한강유역의 8월 강수량이 뚜렷한 증가추세를 보였으며, 최근에는 분산이 커지는 현상과 함께 6년 이하의 경년변동 주기를 나타내었다고 설명하였다.

그러나 본 연구결과에서 주목할 만한 사실은 통계적인 신뢰성이 부족하기는 하나 장기적인 주기를 보이면서 5개 지점 모두에서 연최대 일강우량이 시간에 따라 증가하는 경향을 일관되게 보이고 있다는 것이다. 각 지점의 연최대 일강수량의 증가량은 지점에 따라 차이가 있으나 0.11~0.64 mm/year인 것으로 분석되었다.

Table 2는 이론적으로 간편하고 결과를 이해하기 쉬운 linear regression 검정방법을 통해 추세분석 결과가 분석기간에 따라 어떻게 달라지는가를 알아보기 위해 서울과 전주 지점의 연최대 일강우량 자료에 대해 추세 분석기간을 과거 관측이 시작된 시점을 기준으로 분석기간을 미래로 증가시키면서(Past-to-present) 수행한 추세분석과, 이와는 정 반대로 최근시점을 기준으로 분석기간을 과거로 증가시키면서(Present-to-past) 수행한 추세분석의 결과를 비교한 것이다. 강우량 시계열의 경우 경년변화에 따른 주기를 가지고 있어 분석기간이 달라짐에 따라 추세분석 결과 역시 크게 달라짐을 확인하였다. 서울의 Present-to-past 분석에서 2005년부터 1968년까지의 최근 38년간의 자료만을 추세분석 하였을 때 통계적으로 유의한 상향추세가 관찰되지 않았으나, 1968년 이전의 자료를 포함한 추세분석에서는 통계적으로 유의한 상향추세가 검증되었다. 서울의 Past-to-present 분석에서 1995년까지의 88년간의 자료에서는 상향추세가 관찰되지 않았으나 2005년까지 10년간의 최근자료를 포함한 분석에서는 통계적으로 유의한 선형추세가 검증된 것을 확인할 수 있다. 이와는 반대로 전주의 Present-to-past 분석에서 2005→1969년, 2005→1959년, 2005→1949년간의 시계열자료 즉 최근 수십년간의 시계열 자료만을 따지고 본다면 통계적으로 유의한 상향추세가 관찰되었다. 특히 2005→1949년(자료길이 57년)의 자료를 이용한 추세분석에서는 P-value가 0.042로 작아 강한 증가경향을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 전주의 Past-to-present 분석에서 상향추세가 한번도 발생하지 않았으며, 전체 분석기간인 1919~2005년의 추세분석에서는 P-value가 0.224로 상당히 높았다. 이와 같이 자연적 변동에

Table 2. Past-to-Present and Present-to-Past trend analysis for annual maximum daily precipitation

(a) Seoul

length of record	period of record	slope	R ²	correlation	P-value
Past-to-Present					
8	1908-1915	13.741	23.120	0.481	0.114
18	1908-1925	3.004	4.422	0.217	0.193
28	1908-1935	0.353	0.230	0.048	0.404
38	1908-1945	-0.580	1.045	-0.102	0.270
48	1908-1955(5)	-0.488	1.136	-0.107	0.248
58	1908-1965(5)	-0.196	0.354	-0.060	0.336
68	1908-1975(5)	0.038	0.018	0.014	0.458
78	1908-1985(5)	0.092	0.144	0.038	0.375
88	1908-1995(5)	0.138	0.392	0.062	0.287
98	1908-2005(5)	0.352	2.788	0.167	0.055*
Present-to-past					
8	2005-1998	-27.467	59.732	-0.773	0.013
18	2005-1988	2.608	3.803	0.195	0.219
28	2005-1978	1.153	1.889	0.137	0.243
38	2005-1968	0.991	2.732	0.165	0.161
48	2005-1958	1.037	5.313	0.231	0.058*
58	2005-1948(5)	0.830	4.500	0.212	0.064*
68	2005-1938(5)	0.815	6.460	0.254	0.022**
78	2005-1928(5)	0.671	6.752	0.260	0.013**
88	2005-1918(5)	0.352	2.260	0.150	0.088**
98	2005-1908(5)	0.352	2.788	0.167	0.055*

*90 percent level of significance for a one-side test

**95 percent level of significance for a one-side test

(b) Jeonju

length of record	period of record	slope	R ²	correlation	P-value
Past-to-Present					
7	1919-1925	3.479	2.757	0.166	0.361
17	1919-1935	-2.585	11.961	-0.346	0.087
27	1919-1945(1)	1.473	3.383	0.184	0.184
37	1919-1955(1)	0.722	1.713	0.131	0.224
47	1919-1965(1)	0.414	1.009	0.100	0.254
57	1919-1975(1)	-0.258	0.649	-0.081	0.278
67	1919-1985(1)	0.002	0.000	0.001	0.498
77	1919-1995(1)	-0.102	0.195	-0.044	0.353
87	1919-2005(1)	0.171	0.688	0.083	0.224
Present-to-past					
7	2005-1999	14.768	31.599	0.562	0.095*
17	2005-1989	4.555	20.397	0.452	0.035**
27	2005-1979	0.950	2.402	0.155	0.220
37	2005-1969	1.486	11.567	0.340	0.020**
47	2005-1959	0.754	5.469	0.234	0.057*
57	2005-1949(1)	0.613	5.321	0.231	0.042**
67	2005-1939(1)	-0.060	0.045	-0.021	0.433
77	2005-1929(1)	0.519	0.441	0.066	0.285
87	2005-1919(1)	0.171	0.688	0.083	0.224

Table 3. The linear regression and Mann-Kendall trend test results for annual maximum daily runoff

Station	Record length	Linear Regression				Mann-Kendall	
		slope	R ² (%)	correlation	P-value	Z	P-value
Andong Dam	29	27.163	12.720	0.357	0.029**	1.784	0.037**
Soyanggang Dam	32	21.403	1.474	0.121	0.254	0.542	0.294
Daechong Dam	25	18.890	1.247	0.112	0.298	0.529	0.298

**95 percent level of significance for a one-side test

의해 주기를 가지며 증가추세를 포함하고 있는 강우량은 자료의 분석기간에 따라 서로 상이한 결과들이 도출될 수 있으므로, 증가추세가 있는가에 대한 판단에는 매우 신중해야 할 것이다.

3.2 홍수량

홍수량의 추세분석을 위해 선정된 지점은 안동, 소양강, 대청댐으로서 국내 유량관측 지점 중에서 길이가 길고 신뢰할 만한 자료를 보유한 다목적댐 유입량을 사용하였으며, 홍수와 직접적인 연관이 있는 연최대 일유입량(cms)을 이용하였다. 소양강댐은 1974~2005년(자료길이 32년), 안동댐은 1977~2005년(자료길이 29년), 대청댐은 1981~2005년(자료길이 25년)의 시계열 자료를 분석하였다. 대청댐의 연최대 일유입량은 2001년 이후 상류에 위치한 용담댐의 홍수조절 영

향이 배제된 자료로 분리할 수가 없어 그대로 사용하였다.

Table 3은 두가지 검정방법에 대한 단측검정(one-side test) 결과를 정리한 것이다. 소양강댐과 대청댐의 홍수량 시계열은 통계적으로 유의한 증가추세가 관찰되지 않았으나, 안동댐의 경우에는 linear regression 검정과 Mann-Kendall 검정 모두 통계적으로 유의하며 뚜렷한 상향추세가 관찰되었다. 각 지점의 연최대 일유입량은 지점에 따라 차이가 있으나 18.9~27.2 cms가 매년 증가하는 것으로 나타났다. 대청댐의 경우 P-value 값이 다른 두 댐의 값보다 커 상향추세가 가장 미비하였는데 유역면적이 대청댐의 약 1/4에 달하는 용담댐이 2001년부터 본격적인 담수를 시작하면서 2001년 연최대 일유입량은 평균 연최대 일유입량의 약 16%인 422.5 cms에 그쳤으며, 2001년 이후에도 용담댐의 홍수 조절효과로 인해 연최대 일유입량의 증가추세가 감소된 것으로 판단된다.

4. 변동성을 고려한 홍수 빈도분석

4.1 대수정규 추세모형(Log-Normal Trend Model)

대수정규분포를 따르며 정상성을 따르는 홍수량의 빈도분석은 다음과 같은 일반적인 대수정규 모형(Log-Normal(LN model))으로 추정할 수 있다.

$$\ln(Q_t) \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (1)$$

여기서 μ 는 관측된 홍수량의 평균을, σ^2 는 분산을, t 는 임의의 시간을 의미한다.

대수정규 모형에서 미래 h 년 이후의 분포는 시간에 대해 독립이므로 위험도의 예측분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln(Q_{T+h}) \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (2)$$

임의의 홍수량 q_p 를 $T+h$ 년에 초과할 위험도 $p(h)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다. 여기서 T 는 홍수량의 총 관측길이를 의미한다.

$$p(h) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(q_p) - \mu}{\sigma}\right) \quad (3)$$

여기서 $\Phi(\bullet)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수를 의미한다. 위의 식에서 살펴본 바와 같이 대수정규 모형의 위험도는 예측년도와 서로 독립인 것을 알 수 있는데, 대수정규 모형은 관측자료에서 선형추세가 관찰된다 하더라도 이를 반영하지 못할 뿐더러 미래에도 현재의 정상성 가정이 지켜질 것이라는 낙관적인 시나리오를 바탕으로 홍수 빈도분석을 수행하는 방법이다.

대수정규 모형과 달리 Stedinger and Crainiceanu(2001)는 기후변화에 따른 선형추세를 가지며 대수정규분포를 따르는 홍수량 자료에 대해 빈도분석 및 위험도를 추정할 수 있는 대수정규 추세모형(LNTrend model)을 아래와 같이 제안한 바 있다.

$$\ln(Q_t) = \mu + \lambda \times (t - \bar{t}) + \varepsilon_t \quad (4)$$

여기서 μ 는 관측된 홍수량의 평균을 의미하며, λ 는 관측 홍수량의 시간에 대한 추세 기울기를 의미한다. \bar{t} 는 총 관측길이 T 의 중심으로서 $(1+T)/2$ 와 같이 계산한다. ε_t 는 독립이며 평균이 0 분산이 σ^2 인 정규분포를 따르는 오차이다.

대수정규 추세모형에서 홍수량의 예측분포는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\ln(Q_{T+h}) \sim N(\mu + \lambda \times (T+h - \bar{t}), \sigma^2) \quad (5)$$

추세가 λ 의 기울기로 미래에도 계속될 것이라고 가정한다면, 목표연도인 년의 대수정규분포의 평균은 $\mu + (\lambda/2)(T-1) + \lambda h$ 가 되고, 홍수량은 대수정규분포를 따르므로 임의의 홍수량 q_p 를 $T+h$ 년에 초과할 위험도 $p_T(h)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_T(h) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(q_p) - \mu - (\lambda/2)(T-1) - \lambda h}{\sigma}\right) \quad (6)$$

만약 추세선의 기울기인 $\lambda > 0$ 이면 $p_T(h)$ 는 h 의 증가에 따라 함께 증가하는 증가함수가 된다. 따라서 대수정규 추세모형은 관측 자료로부터 관찰되는 선형추세가 미래에도 계속

같은 기울기를 가지고 지속될 것이라는 비관적인 시나리오를 바탕으로 미래 목표연도에 대한 홍수 빈도분석을 수행하는 방법이다.

대수정규 추세모형의 기본 틀을 벗어나지는 않으나, 증가 추세가 미래 h 년까지 계속 지속된다는 가정에 대해 회의적인 시각이 있을 수 있음을 감안하여 홍수량의 증가추세가 관측이 끝나는 시점에서 멈춘다고 가정하는 대수정규 추세 정지모형(Log-Normal Trend Stop (LNTS) model)을 함께 제시하였다(Stedinger and Crainiceanu, 2001).

$$\log(Q_{T+h}) \sim N(\mu + \lambda \times (T - \bar{t}), \sigma^2) \quad (7)$$

따라서, 임의의 홍수량 q_p 를 $T+h$ 년에 초과할 위험도 $p_{TS}(h)$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$p_{TS}(h) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(q_p) - \mu - (\lambda/2)(T-1)}{\sigma}\right) \quad (8)$$

대수정규 추세정지모형은 관측자료에서 관찰된 상향추세를 고려하되 빈도분석 시점까지 발생한 추세만을 고려하고 미래에는 더 이상의 상향추세가 발생하지 않을 것이라는 비교적 현실적인 시나리오에 근거해 홍수 빈도분석을 수행하는 방법이다.

이와 같이 Stedinger and Crainiceanu(2001)에 의해 제안된 대수정규 추세모형은 통계적으로 유의한 추세를 포함한 홍수량 자료로부터 치수시설의 규모를 결정하는 설계홍수량을 어떻게 추정할 것인가에 대해 합리적인 절차를 제공하였으며, 추세분석을 홍수 빈도분석에 반영하였을 경우 치수시설의 설계에 어떠한 영향을 미칠 것인가를 설명할 수 있다.

4.2 대수정규 추세모형의 적용

안동댐, 소양강댐, 대청댐의 유입량이 대수정규 분포를 따르는지에 대해 Chi-square(χ^2) 검정과 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 검정을 수행한 결과 안동댐에서는 두 검정의 P-value가 각각 0.71과 0.53이었으며 소양강댐에서는 각각 0.61과 0.59로서, 귀무가설인 안동댐과 소양강댐의 유입량이 대수정규분포를 따른다고 통계적으로 결론내릴 수 있었다. 그러나 대청댐은 정규분포를 따르지 않는 것으로 통계적으로 검증되어 안동댐과 소양강댐의 연최대 일유출량에만 대수정규 추세모형을 적용하였다.

Table 4는 안동댐과 소양강댐 유역의 대수정규와 대수정규 추세모형의 매개변수를 정리한 것이다. Table 4에서 대수정규 추세모형의 표준편차가 대수정규 모형의 표준편차보다 작은 이유는 추세경사 λ 가 안동댐과 소양강댐 자료를 통계적으로 설명해주기 때문이다. 두 모형간의 표준편차 감소폭은 통계적으로 유의한 추세를 가진 안동댐이 그렇지 않은 소양

Table 4. LN and LN trend model parameter estimators for Andong Dam

site	method	μ	λ	σ
Andong Dam	LN	6.819		0.560
	LN Trend	6.819	0.024	0.521
Soyanggang Dam	LN	7.481		0.637
	LN Trend	7.481	0.012	0.626

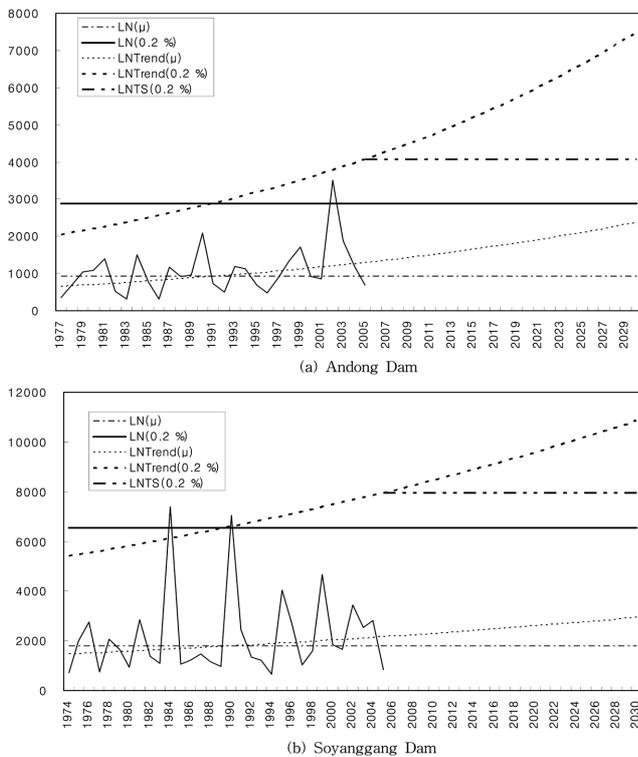


Fig. 2 Mean and 50-year flood levels over historical record and planning period for Andong Dam and Soyanggang Dam using three flood risk models

강댐 보다 더 큰 것을 확인할 수 있다.

Fig. 2는 안동댐(1977년~2005년)과 소양강댐(1974년~2005년)의 연최대 일유입량 시계열, 대수정규(LN) 모형과 대수정규 추세(LNTrend)모형의 2006년~2030년까지의 평균과 2%(50년 빈도) 초과확률의 예측 연최대 일유입량을 그림으로 나타낸 것이다. 대수정규 추세모형에서 2005년을 기점으로 추세가 정지한다는 가정 하에서 구축된 대수정규 추세정지(LNTS) 모형의 2006년~2030년까지의 평균과 2% 초과확률의 예측 연최대 일유입량도 함께 도시하였다. 그림에서 대수정규 모형의 평균과 50년 빈도 홍수량은 시간에 대한 증가추세를 고려하지 않으므로 시간 변화에 일정한 상수이다. 이와 반면 대수정규 추세모형은 과거 관측자료에 포함된 상향추세가 미래에도 계속된다는 비관적인 시나리오에 따라 홍수량의 평균과 50년 빈도 설계홍수량 역시 목표연도의 증가에 따라 계속 증가하는 결과를 보인다. 대수정규 추세정지모형은 홍수량에 포함된 상향추세가 관측이 끝나는 시점에 정지하여 미래에는 더 이상 상향추세를 보이지 않는다는 비교적 현실적인 시나리오에 따라 홍수량의 평균과 50년 빈도의 설계홍수량이 관측자료가 존재하는 부분까지 증가하나 미래에는 더 이상 증가하지 않는 비교적 실현가능한 설계홍수량을 제시하고 있다.

Table 5는 3가지 모형에 대해 목표연도 1980년, 2005년(현재), 2030년(미래)의 안동댐과 소양강댐의 50년 빈도 연최대 유입량을 서로 비교한 것이다. 안동댐에서 2005년 현재의 LNTrend와 LNTS모형의 50년 빈도 연최대 일유입량은 4068.6 cms로서 LN모형의 2891.9 cms보다 41% 증가하였으며, 소양강댐에서도 마찬가지로 LNTrend와 LNTS모형의 50

Table 5. Projected 50-year floods for the LN, LNTrend, LNTS models at Andong Dam and Soyanggang Dam

site	target year	50-year flood		
		LN	LNTrend	LNTS
Andong Dam	1980	2891.9	2211.5	2211.5
	2005	2891.9	4068.6	4068.6
	2030	2891.9	7485.0	4068.6
Soyanggang Dam	1980	6563.6	5832.4	5832.4
	2005	6563.6	7958.8	7958.8
	2030	6563.6	10860.4	7958.8

년 빈도 일유입량은 7958.8 cms로서 LN모형의 6563.6 cms보다 21% 정도 큰 값을 예측하였다. 2030년인 미래시점의 LNTrend모형의 50년 빈도 연최대 일유입량의 예측값은 안동댐이 7485.0 cms로서 LN모형의 예측값 보다 156%, LNTS모형보다 84% 정도 큰 값을 예측하였으며, 소양강댐에서는 LNTrend모형의 예측값이 LN모형의 예측값 보다 65%, LNTS모형보다는 36% 정도 큰 연최대 일유입량을 제시하였다.

4.3 추정된 설계홍수량의 유효자료길이와 신뢰구간

시간의 변화에 따른 유출량의 변동성, 즉 상향추세를 반영하여 추정한 평균과 홍수량은 시간에 의한 함수이며, 예측 연도의 길이가 길어짐에 따라 정확성이 감소하게 된다. 본 연구에서는 표준오차(Standard Error, SE)와 유효자료길이(Effective Record Length, ERL)를 이용하여 추정된 평균과 홍수량의 정확성을 평가하였다. 본 연구에서 ERL은 LN모형의 추정값들의 정확성에 대한 LNTrend모형의 추정값들의 상대적인 정확성을 자료의 길이로 나타낸 지표이다. ERL은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$ERL = T \times [SE(LN)/SE(LNTrend)]^2 \quad (9)$$

여기서 T 는 총 관측길이를 의미하며, $SE(\cdot)$ 는 추정값에 대한 표준오차(standard error)로 이를 제공한 것이 추정값의 분산이 된다.

LNTrend모형에서 관측홍수량에 자연로그를 취해 Normal 분포로 변환한 홍수량의 평균 μ 의 분산은 σ^2/T 이며 추세 기울기 λ 의 분산은

$$\sigma^2 / \sum_{t=1}^T (t-i)^2$$

이다. 임의의 시점 t 에서의 홍수량의 평균은 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$m(t) = \mu + \lambda(t-i) \quad (10)$$

여기서 μ 와 λ 는 서로 독립이며, 두 변수의 공분산 $Cov(\mu, \lambda)$ 이 0이므로 LNTrend 모형에서 시간 t_0 의 홍수량의 평균과 평균의 분산의 BLUE(Best Linear Unbiased Estimator)는 다음과 같다.

$$\hat{m}(t_0) = \hat{\mu} + \hat{\lambda}(t_0 - \bar{t}) \quad (11a)$$

Table 6. Mean and 50-year flood estimates (common logarithms)

Site	Model	mean			50-year flood		
		value	SE	ERL	value	SE	ERL
Andong Dam	LN	6.819	0.104	29	7.970	0.184	29
	LNTrend 1980	6.550	0.160	12	7.701	0.220	6
	LNTrend 2005	7.160	0.188	9	8.311	0.242	5
	LNTrend 2030	7.770	0.461	1	8.799	0.485	1
Soyanggang Dam	LN	7.481	0.113	32	8.789	0.199	32
	LNTrend 1980	7.363	0.159	16	8.672	0.205	10
	LNTrend 2005	7.673	0.216	9	8.982	0.271	6
	LNTrend 2030	7.983	0.498	2	9.292	0.469	2

$$Var(\hat{m}(t_0)) = \sigma^2 \left(\frac{1}{T} + \frac{(t_0 - \bar{t})^2}{\sum_{t=1}^T (t - \bar{t})^2} \right) \quad (11b)$$

위 두 식은 $|t_0 - \bar{t}|$ 의 증가에 따라 함께 증가하는 함수가 된다. 마찬가지로 $\hat{\mu}, \hat{\lambda}, \hat{\sigma}^2$ 가 서로 독립이면 임의의 시간 t_0 에서의 초과확률 p 의 홍수량 $\ln(q_p)$ 와 $\ln(\hat{q}_p)$ 의 분산의 BLUE는 의해 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\ln(\hat{q}_p(t_0)) = \hat{\mu} + \hat{\lambda}(t_0 - \bar{t}) + z_{1-p} \bar{\sigma} \quad (12a)$$

$$Var[\ln(\hat{q}_p(t_0))] = \sigma^2 \left(\frac{1}{T} + \frac{(t_0 - \bar{t})^2}{\sum_{t=1}^T (t - \bar{t})^2} \right) + z_{1-p}^2 Var(\bar{\sigma}) \quad (12b)$$

위 두 식 역시 평균의 경우에서와 마찬가지로 $|t_0 - \bar{t}|$ 의 증가에 따라 함께 증가하는 함수가 된다. LN모형의 홍수량 $\ln(\hat{q}_p)$ 에 대한 분산은 Stedinger(1983)에 제시된 식(6)에서 찾아볼 수 있으며, 이를 제시하면 다음과 같다.

$$Var(\ln \hat{q}_p) = \sigma^2 \frac{1 + \frac{1}{2} z_p^2}{T} \quad (13)$$

Table 6은 안동댐과 소양강댐에 대한 LN과 LNTrend 모형의 1980, 2005, 2030년의 평균과 50년 빈도 연최대 일유입량의 표준오차와 ERL를 표로 정리한 것이다. LNTrend모형의 2005년과 2030년의 평균과 50년 빈도 홍수량의 SE이 LN모형에 비해 크게 증가하고 ERL이 감소하였으며, 특히 LNTrend모형의 2030년 평균과 홍수량 추정값의 SE가 크고 ERL이 작아 추정된 50년 빈도 홍수량의 정확성이 LN모형에 비해 매우 낮아졌음을 알 수 있다. 예를 들어 설명하자면 LN모형의 50년 빈도 ERL은 32년으로 32년간의 홍수량 자료로부터 추정된 정확도를 나타내지만 LNTrend모형을 이용해 추정된 2030년의 ERL은 2년으로 2년 간의 홍수량 자료로부터 추정된 정확도와 같음을 의미한다.

Fig. 3은 LN모형과 LNTrend모형의 50년 빈도 홍수량과 95%신뢰구간을 표시한 그림으로서 Stedinger(1983)의 논문에 제시된 식(10)을 이용하여 계산할 수 있다. LN모형과 비교해 LNTrend모형의 2030년 추정값과 신뢰구간이 매우 크고

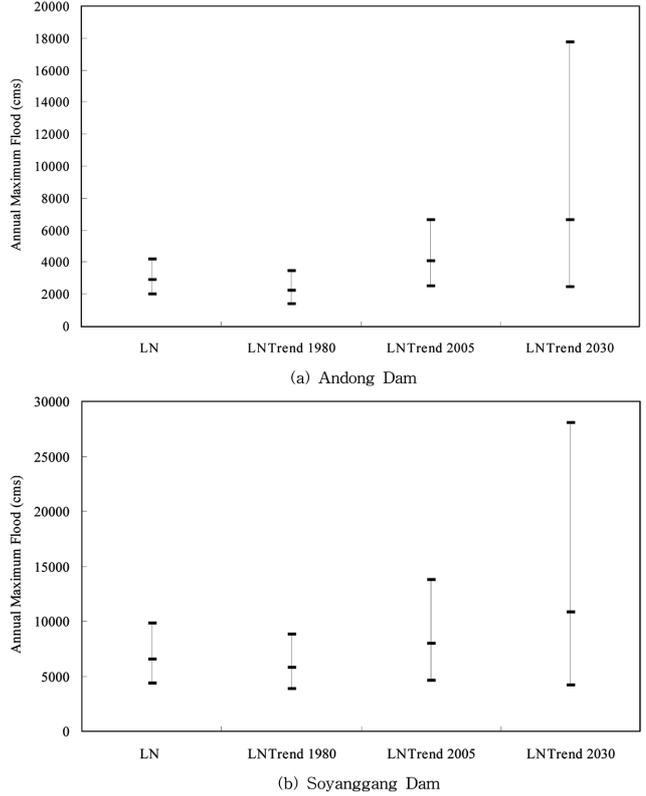


Fig. 3 50-year flood and its 95% confidence intervals for LN and LNTrend models when 50-year flood estimates are made for 1980, 2005, and 2030

넓은 것을 확인할 수 있다. 따라서 홍수 빈도분석에 상향추세를 반영하여 미래의 홍수량을 예측할 경우 추세반영에 따라 추정된 설계홍수량이 증가하지만 이 설계홍수량의 불확실성도 함께 증가한다는 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구는 기후변화로 인해 발생할 수 있는 홍수량의 증가추세를 반영한 빈도분석 방안 제시를 목적으로 진행되었다. 이를 위해 강우량과 유출량 자료 중에서 길이가 긴 서울, 인천, 울릉도, 전주, 강릉 기상청 관측소의 연최대 일강우량과 안동댐, 소양강댐, 대청댐의 연최대 일유출량에 대해 통계적으로 유의한 증가추세가 있는지 분석하였다.

강우량의 경우 linear regression 방법에 의해 서울과 강릉

의 연최대 일강우량 시계열에서 각각 10%와 5% 유의수준에서의 상향추세가 검정되었으나, Mann-Kendall 방법에서는 5개 지점 모두의 경향성이 10% 유의수준에서 상향추세가 검정되지 않아, 5개 지점의 강우량에 시간에 따른 증가 추세가 있다고 통계적으로 말하기에는 충분하지 않았다. 그러나 통계적 유의성을 떠나 5개 지점 모두에서 연최대 일강우량이 시간에 따라 증가하는 경향을 일관되게 보이고 있었다. 유출량의 경우 소양강댐과 대청댐의 홍수량 시계열은 통계적으로 유의한 증가추세가 관찰되지 않았으나, 안동댐에서는 linear regression 검정과 Mann-Kendall 검정 모두 통계적으로 유의하며 뚜렷한 상향추세가 관찰되었다.

관측된 홍수량 자료가 대수정규 분포를 따르며 추세가 존재하지 않는다는 낙관적인 시나리오에 기초한 대수정규모형과, 대수정규 분포를 따르며 기후변화에 따른 선형추세를 가진 홍수량 자료에 대해 빈도분석 및 위험도를 추정할 수 있는 대수정규 추세모형(LNTrend model)의 이론적 배경을 소개하고 대수정규 분포를 따르며 증가추세를 나타내는 안동댐과 소양강댐의 홍수 빈도분석을 위해 LNTrend모형을 적용하였다. LNTrend 모형은 관측자료의 상향추세가 미래에도 계속 이어질 것이라는 비관적인 가정에서 출발하고 있으나, 이 가정에 대한 회의적인 의견을 반영할 수 있도록, 상향추세가 홍수량의 관측이 끝나는 시점에서 멈추어 더 이상 증가하지 않는다는 비교적 현실적인 시나리오에 기초한 대수정규 추세정지모형(Log-Normal Trend Stop(LNTS) model)을 함께 설명하였다.

3가지 모형에 대해 홍수 추정 목표연도 1980년, 2005년(현재), 2030년(미래)의 안동댐과 소양강댐의 50년 빈도 연최대 유입량을 서로 비교한 결과 안동댐에서 2005년 현재의 LNTrend와 LNTS모형의 50년 빈도 연최대 일유입량은 4068.6 cms로서 LN모형의 2891.9 cms보다 41% 증가하였으며 소양강에서도 변화에 폭에는 정도의 차이가 있으나 유사한 결과가 관찰되었다. 2030년인 미래시점의 LNTrend모형의 50년 빈도 연최대 일유입량의 예측값은 안동댐이 7485.0 cms로서 LN모형의 예측값 보다 156%, LNTS모형보다 84% 정도 큰 값을 예측하였다. LNTrend모형은 과거 관측 자료에 포함된 상향 추세가 미래에도 계속될 것이라는 가정 하에서 해당 빈도의 홍수량을 추정하였으나, 홍수량의 평균과 평균의 분산이 증가함으로써 추정된 설계홍수량의 불확실성도 함께 증가하는 것을 알 수 있었다. LNTS모형은 홍수량에 포함된 상향추세가 관측이 끝나는 시점에 정지하여 미래에는 더 이상 상향추세를 보이지 않는다는 비교적 현실적인 시나리오에 따라 설계홍수량을 추정하는 것으로 실무에서의 활용 가능성을 검토할 만한 것으로 사료된다. 미래 홍수량의 평균과 분산의 상향추세를 예측하고 이를 홍수 빈도분석에 활용하는 방안에 대한 연구가 향후 진행되어야 할 것으로 생각되며, 최근 Griffis and Stedinger(2007)도 미국 Bulletin 17B에서 기후변화를 고려한 홍수 빈도분석을 위해 이와 같은 연구가 필요함을 지적한 바 있다.

본 연구는 국내에서 발생할 수 있는 이상홍수가 홍수방어 구조물들의 설계홍수량 추정에 미치는 영향에 대해 진단할 수 있는 실마리를 제공하였으므로, 기존의 홍수방어 시설물의 현황을 점검하고 유역종합치수계획이나 하천정비기본계획

에 반영함으로써 향후 이상홍수의 발생으로부터 야기될 수 있는 피해를 최소화하는데 기여할 것으로 기대한다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-214-D00174)이므로 지원에 감사드립니다. 또한 서울대학교 SIR BK21(안전하고 지속가능한 사회기반건설사업단)의 연구비 지원에도 감사드립니다.

참고문헌

- 권원태, 부경은, 허인혜(2007) 한반도 최근 10년 기후특성. 2007 한국수자원학회 학술발표회, 한국수자원학회, CD.
- 김광섭, 임태경(2005) 한반도 강수량과 유량의 장기 추세 분석. 2005 한국수자원학회 학술발표회논문집, 한국수자원학회, pp. 916-919.
- 김남원, 원유승(2004) 우리나라의 빈도홍수량의 추정. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제37권, 제12호, pp. 1019-1032.
- 백희정, 권원태(2005) 한강과 낙동강 유역평균 월강수량의 기후 특성: I. 유역평균 시계열의 변동. 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제38권, 제2호, pp. 111-119.
- 서용원, 김영오(2000) 선진국의 기후변화 연구동향(I): 유출에 대한 영향을 중심으로. 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제33권 제3호, pp. 22-31.
- 한국수자원학회(2005) 하천설계기준·해설, 건설교통부.
- Burn, D.H. (1994) Hydrological effects of climatic change in west-central Canada. *Journal of Hydrology*, Vol. 160, pp. 53-70.
- Chiew, F.H.S. and McMahon, T.A. (1993) Detection of trend or change in annual flow of Australian rivers. *International Journal of Climatology*, Vol. 13, pp. 643-653.
- Coles, S. (2001) *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Springer-Verlag, United Kingdom.
- Douglas, E.M., Vogel, R.M., and Kroll, C.N. (2000) Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation. *Journal of Hydrology*, Vol. 240, No. 1-2, pp. 90-105.
- Franks, S.W. and Kuczera, G. (2002) Flood frequency analysis: Evidence and implications of secular climate variability, New South Wales. *Water Resources Research*, Vol. 38, No. 2, pp. 432-439.
- Griffis, V.W. and Stedinger, J.R. (2007) Incorporating climate change and variability into Bulletin 17B LP3 Model, *World Environmental and Water Resources Congress 2007*, ASCE, Tampa, FL, USA, CD.
- Lins, H.F. and Slack, J.R. (1999) Streamflow trends in the United States. *Geophysical Research Letters*, Vol. 26, pp. 227-230.
- MaCabe, G.J. and Wolock, D.M. (2002) A step increase in streamflow in the conterminous United States. *Geophysical Research Letters*, Vol. 29, No. 24, 2185, doi: 10.1029/2002GL015999.
- Olsen, J.R., Stedinger, J.R., Matalas, N.C., and Stakhiv, E.Z. (1999) Climate variability and flood frequency estimation for the Upper Mississippi and Lower Missouri Rivers. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, No. 6, pp. 1509-1524.
- Salas, J.D. (1993) Analysis and modeling of hydrologic time series, Chapter 19, *Handbook of Hydrology*, D. Maidment (ed.), McGraw-Hill, Inc., New York, USA.
- Stedinger, J.R. (1983) Confidence intervals for design events. *Journal of the Hydraulic Engineering*, Vol. 109, pp. 19-27.

Stedinger, J.R. and Crainiceanu, C.M. (2001) Climate variability and flood-risk management, risk-based decision making in water resources. *IX Proceedings of the Ninth Conference, United Engineering Foundation, ASCE, Santa Barbara, CA, USA*, pp. 77-86.

Stedinger, J.R., Vogel, R.M., and Foufoula-Georgiou, E. (1993) Frequency analysis of extreme events, Chapter 18, *Handbook of Hydrology*, D. Maidment (ed.), McGraw-Hill, Inc., New York,

USA.

Strupczewski, W.G., Singh, V.P., and Feluch, W. (2001) Non-stationary approach to at-site flood frequency modeling I. Maximum likelihood estimation. *Journal of Hydrology*, Vol. 248. pp. 123-142.

(접수일: 2007.9.27/심사일: 2007.10.31/심사완료일: 2007.11.22)