태풍으로 인한 극한 수문사상에 대한 기후변동의 영향 평가: 우리나라 5대 권역을 중심으로

Evaluation of Influence of Climate Variation on Typhoon-Induced Hydrologic Extremes: Focused on Five Major Basins in South Korea

이민우* · 신지예** · 김태웅**

Lee, Min Woo · Shin, Ji Yae · Kim, Tae-Woong

Abstract

In this study, the influence of climate variation on typhoon-induced rainfall and streamflow was analyzed across South Korea by applying Climate Influence Index (CII). The CII represents an increase of the severity of extreme hydrologic event through evaluating the Influence Intensity (II) and the Influence Frequency (IF). Among eight climate indices which were preliminarily investigated, Arctic Oscillation (AO) (in July) and West Pacific Pattern (WP) (in August and September) were selected in this study as appropriate climate indices based on correlation analysis. The influence of selected climate indices on the typhoon-induced rainfall and streamflow was evaluated in 113 sub-basins. Results show specific regional features in the variation of typhoon-induced rainfall and streamflow in July, August and September. Typhoon-induced rainfall and streamflow have a decrease influence in high phase and an increase influence in low phase. Also, the climate influence index is closely related with the correlation coefficient between typhoon-induced hydrologic extremes and climate indices.

Key words : Climate index, Hydrologic extremes, Climate influence index

요 지

본 연구에서는 기후영향지수(CII) 산정 방법을 적용하여 기후변동이 우리나라의 태풍으로 인하여 발생된 강우량 및 유출량에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 기후영향지수는 강우량 및 유출량의 증가량과 증가 빈도를 나타내는 지수로서, 영향 강도(II)와 영향 빈도(IF)에 의하여 산정된다. 선행연구를 통해 기후변동을 고려할 수 있는 인자로 8종류의 기후지수가 선정되었으며, 기후지수와 태풍에 의한 강우량 및 유출량과의 상관분석을 통해 기후영향지수 산정에 적합한 기후지수로 WP(7월)와 AO(8, 9월)가 선정되었다. 우리나라의 태풍에 의한 강우량 및 유출량에 미치는 영향에 대하여 113개의 유역을 대상으로 평가를 실시하였다. 분석결과, 7, 8, 9월의 기후지수에 따라 태풍에 의한 강우량 및 유출량에 대한 영향의 증감은 지역적 특징을 나타내며, 기후지수의 고위상에서는 감소영향이 뚜렷이 나타나고, 저위상에서는 증가영향이 뚜렷이 나타났다. 또한 기후지수와 태풍에 의한 수문변량의 상관계수와 기후영향지수는 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 기후지수, 극한수문사상, 기후영향지수

1. 서 론

최근 지구온난화에 따른 기후변화와 기상이변에 의하여 극한 강우사상의 발생빈도가 과거에 비하여 빈번해 지고 있다(Kwon et al., 2008). 우리나라는 하계 집중형 강수형태를 가지며 연강수량의 50% 이상이 여름철(6월~9월)에 집중되는

데, 이는 6월 하순부터 시작되는 장마와 함께 6월에서 10월 까지 내습하는 태풍의 영향으로 비가 많이 내리기 때문이다(Cha, 2010). 이 중에서 태풍은 북태평양 서부에서 발생하는 열대 저기압 중에서 중심 부근의 최대풍속이 17 m/s 이상의 강한 폭풍우를 동반하는 것을 말하며, 우리나라에 연평균 3.1 회 내습을 하여 막대한 피해를 유발시키는 자연재해 중 하나

*정회원. 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정(E-mail: mwlee1115@nate.com)

Member. Graduate Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

**정회원. 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정

Member. Graduate Research Assistant, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

***교신저자. 정회원. 한양대학교 공학대학 건설환경플랜트공학과 부교수(Tel: +82-31-400-5184, Fax: +82-31-436-8170, E-mail: twkim72@hanyang.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Associate Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

이다. 실제로 태풍의 최근 피해 사례를 살펴보면(Korea Meteorological Administration, 2011), 인명피해의 경우, 최대인명피해 순위는 1987년 태풍 ‘THELMA’, 2002년 태풍 ‘RUSA’를 제외하고는, 1980년 이전에 발생한 태풍에 의한 것으로 나타났으며, 재산피해의 경우는 최대재산피해 순위가 1987년의 태풍 ‘THELMA’를 빼고 모두 1990년 이후에 발생하였으며, 2000년 이후에 발생한 태풍이 5개인 것으로 나타났다. 또한 태풍으로 인하여 발생한 일최대강수량 순위도 10개 중 7개가 1990년 이후에 발생한 것으로 나타났다. 따라서 최근 우리나라에 내습하는 태풍으로 인하여 발생한 일최대강수량이 증가하고, 재산 피해가 과거 보다 증가하고 있다고 할 수 있다.

최근 들어 기후의 변동성과 경향성이 주목받기 시작하였으며, 이러한 특성이 강우에 미치는 영향을 무시할 수 없게 되었다(Kim et al., 2007). 따라서 국내외적으로 최근 기후변화 및 변동이 극한 강우량 및 하천유출량에 미치는 영향에 관한 연구동향은 매우 다양하게 진행되어 왔다(McKerchar and Henderson, 2003; Paturel et al., 2003; Pongracz et al., 2003; Koutsoyiannis, 2003; Tate et al., 2004; Lindström and Bergström, 2004).

최근 과거와 다른 극한 수문사상이 빈번히 발생하는 요인을 엘니뇨와 라니냐와 같은 기후변동과의 연관성에서 찾고자 하는 노력이 많이 이루어지고 있다(Lee, 2001). 기후변동이 수문변량에 미치는 영향에 대한 연구 결과를 살펴보면 Rasmusson and Carpenter (1983)는 적도 부근의 서태평양의 해수면 온도와 인도 및 스리랑카의 강수량의 관계를 분석하였으며, Ropelewski and Halpert (1987)는 전 지구적 및 지역규모 별 강수량 패턴과 남방진동지수와와의 연관성을 분석하였다. Wang and Li (1990)는 남방진동지수와 중국 북부의 반건조 지역의 강수량 변동에 대한 관계를 분석하였고, Peel et al. (2002)은 연강수량의 변동성과 남방진동지수의 관계를 분석하였다.

우리나라의 경우는 Lee (1998, 1999)는 엘니뇨 및 라니냐와 기온 및 강수량 그리고 가뭄과의 관계를 분석하였으며, Jin and Park (2005)은 남방진동지수의 범주 구분이 강수량에 미치는 영향을 통계학적으로 분석하였다. Chu et al. (2007)은 ENSO와 한국의 수문변량들 간의 계절적 관계분석을 분석하였다. Kim et al. (2011)은 ENSO를 나타내는 지수인 SOI (Southern Oscillation Index)를 이용하여 기후변동을 고려한 조건부 GEV 분포를 이용한 비정상성 빈도 분석을 수행한 바 있다.

기후변화가 수문학적 극한사상에 미치는 잠재적 영향은 지난 수십 년간 수문학 관련 분야에 많은 관심을 이끌어 왔으며 많은 연구들이 전 지구적 온난화로 인해 극한 수문사상의 규모 및 빈도가 증가한다는 결과를 보여 주었다(Kite, 1993; Boorman and Sefton, 1997; Panagoulia and Dimou, 1997; Gellens and Roulin, 1998; Saelthun et al., 1998). 설계규모를 넘어서는 극한 강우사상의 발생은 여러 수공구조물과 홍수방어시스템을 파괴하는 원인이 되고 있기 때문에 극한 강우사상에 대한 현재의 시·공간적으로 특성을 파악하는 것

은 매우 중요하다(Fowler and Kilsby, 2003a, b).

하지만, 국내에서는 태풍과 같은 극한 강우사상에 대해 기후변동이 미치는 영향분석에 관련된 연구가 미흡한 실정이며, 엘니뇨 및 라니냐는 국한된 기후변동만을 고려한 영향분석의 연구가 대부분이다. 또한 기후변동이 수문변량에 미치는 영향에 대해서 정량적인 평가가 이루어지지 못하였다. 따라서 본 연구에서는 Kim et al. (2008)에서 제시한 기후영향지수(Climate Influence Index) 산정 방법을 이용하여 기후변동이 우리나라의 태풍에 의한 극치 수문변량에 미치는 영향 정도를 시·공간적으로 정량적인 평가하고자 하였다. 다양한 기후변동을 고려할 수 있는 인자로서는 8종류의 기후지수를 선정하고 우리나라의 113개 유역을 대상으로 분석을 수행하였다.

2. 연구대상 유역 및 자료 선정

2.1 연구대상 유역

본 연구에서는 기후변동이 우리나라에 내습하는 태풍에 의한 강우량 및 유출량에 미치는 영향정도를 분석하기 위하여 30년 이상의 강우자료와 유출량 자료를 보유하고 있는 한강, 낙동강, 금강, 영산강, 섬진강 권역의 113개의 유역(Fig. 1)을 대상으로 분석을 실시하였다.

2.2 연구대상 유역 자료

본 연구에서는 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)에서 제공하는 1971년부터 2007년까지의 강우량(지속시간 24시간) 및 유출량 자료를 사용하였다. 강우자료는 면적 평균 강우량 자료이며 티센다각형법에 의하여 산정되었다. 또한 유출량 자료는 면적 평균 강우량에 대한 PRMS (Precipitation-Runoff Modeling System) 모형을 이용하여 산정된 값이다. Oh et al.

Fig. 1. The 113 sub-basins in five major basins

Fig. 2. Typhoon-induced AMR in Nakdong Estuary basin

(2009)은 태풍의 중심이 우리나라의 영향 범위 내에 존재하는 동안 관측된 시간강수량을 태풍으로 인하여 발생한 강수량이라고 정의하였다. 또한 Yoon et al. (2011)은 태풍이 내습한 기간 중 최대 일강수량을 태풍으로 인한 강우로 정의하여 집중호우에 의한 강우와 분리하였다. 따라서 본 연구에서는 기후변동에 따른 태풍에 의한 발생하는 극한 강우사상의 영향 정도를 평가하기 위해, Yoon et al. (2011)이 제시한 방법을 적용하여, Fig. 2와 같이 우리나라에 태풍이 내습한 기간(일 기준) 동안 발생한 연 최대 강수량을 추출하였으며, 이를 태풍에 의한 극한 강수량으로 정의하였다.

Fig. 2는 낙동강하구언 지역의 1971~2007년까지의 태풍에 의한 발생한 연 최대 강우자료를 추출하는 과정이다. 예를 들어, 낙동강하구언 지역의 2002년, 2004년 일강수량의 전체 시계열 중 태풍이 우리나라에 주로 내습하는 6월에서 9월까지의 시계열을 자세히 나타내었으며, 색칠된 부분이 우리나라에 태풍이 내습한 기간으로 그 중 가장 큰 값을 가지는 연 최대 강수량을 네모로 표현하였다. 이러한 과정으로 태풍에 의한 연 최대 강수량 및 연 최대 유출량을 각 연도별로 추출하여 우리나라의 113개 유역을 대상으로 태풍에 의한 연 최대 강수량 및 연 최대 유출량 자료를 구축하고 분석에 적용하였다.

2.3 기후지수(Climate Index)

일반적으로 태풍은 Fig. 3과 같이 연중 6월~10월에 많이 발생하며 80% 이상이 7~9월에 우리나라로 내습하여 많은 강우를 내린다. 따라서 본 연구에서는 기후변동이 태풍에 의한 강우량 및 유출량에 미치는 영향을 분석하기 위하여 NOAA(National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 제공하는 Table 1의 8종류의 기후지수를 선정하였다. 기후지수는 대규모 기후변동을 정량적으로 표현해 주는 지수로서 우리나라의 태풍 내습 빈도를 고려하여 7월~9월 아노말리의 평균값을 사용하였다

Fig. 3. Total typhoons landfall in South Korea

Table 1. Description of Climate Indices

Climate Index	Description	Period
SOI	Southern Oscillation Index	1971-2007
PNA	Pacific North American Pattern	1971-2007
PDO	Pacific Decadal Oscillation	1971-2007
ONI	Oceanic Nino Oscillation	1971-2007
NAO	North Atlantic Oscillation	1971-2007
AO	Arctic Oscillation	1971-2007
EA	East Atlantic Pattern	1971-2007
WP	West Pacific Pattern	1971-2007

3. 연구 방법

3.1 기후지수와 태풍에 의한 강우량의 상관계수

본 연구에서는 113개의 유역을 대상으로 태풍에 의한 연 최대 강우량과 연 최대 유출량의 선형적 관계를 분석해 본 결과 상당히 높은 선형적 관계를 가지는 것을 알 수 있었다. Fig. 4는 낙동강하구언 지역의 1971년부터 2007년까지 태풍에 의한 연 최대 강우량과 연 최대 유출량의 관계를 산포

Fig. 4. Scatter plot between rainfall and streamflow (1971-2007)

도로 나타낸 것으로 강우량이 증가함에 따라 유출량 또한 선형적으로 증가하는 것이 확인되었다. 따라서 기후영향지수 산정 시, 가장 적합한 기후지수를 선정하기 위해 8 종류의 기후지수와 태풍에 의한 강우량의 상관계수를 산정하여 시간적, 공간적 특성에 대한 선형 관계를 분석하였다.

상관계수는 두 변수간의 상대적인 강도를 나타내기에 적합한 지표로 공분산보다 많이 이용되고 있으며 상관계수 R 은 항상 부등식 $-1 \leq R \leq 1$ 을 만족시키며, 양의 상관관계가 있을 경우 $R > 0$ 을 만족시키며, 음의 상관관계에 있을 때는 $R < 0$ 이고, 상관이 전혀 없는 무상관일 경우에는 $R = 0$ 이 된다. Eq. (1)은 상관계수 산정식이다(Walpole et al., 2002).

$$R_{XY} = \frac{S_{XY}}{S_X S_Y} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

3.2 Gumbel 분포

본 연구에서는 기후영향지수 산정 시, 태풍에 의한 강우량과 유출량의 증감을 쉽게 비교하기 위하여 해당 강우량과 유출량의 값을 누적확률값으로 변환하였다. 기후변동이 수문변량에 미치는 영향정도를 정량적으로 나타내기 위해 확률적 개념을 적용하였으며, 수문변량의 경우 확률분포에 따라 편향된 변동성을 가지게 된다(Chu et al., 2007). 따라서 연 최대치계열에 적합한 분포함수로서 가장 많이 사용되는 Gumbel 분포함수를 선택하였으며, 적용된 Gumbel 분포의 확률밀도함수(PDF)와 누적분포함수(CDF)는 Eqs. (2)-(3)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-x_0}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-x_0}{\alpha} \right) \right], -\infty < x < \infty \quad (2)$$

$$F(x) = \exp \left[-\exp \left(-\frac{x-x_0}{\alpha} \right) \right] \quad (3)$$

여기서, α 는 척도모수, x_0 는 위치모수이다. 국내 강우자료의 보유연수가 충분하지 않다는 점을 고려해 이상치에 따른 왜

곡특성을 크게 나타내지 않고, 자료수의 영향을 덜 받으며, 상대적으로 안정적인 장점을 가지고 있는 확률가중모멘트법(Method of Probability Weight Moments, PWM)을 적용하여 매개변수를 추정하였다.

3.3 합성분석

합성분석은 기후영향지수 산정 시, 기후변동을 고려하기 위해 기후지수에 대한 위상(phase)별 한계값(threshold value)을 정하고, 각 위상에 해당하는 태풍에 의한 강우량 및 유출량 값을 추출하는 과정이다. 이 과정을 적용하기 위해서는 월별 기후지수에 대한 값을 Eq. (4)와 같이 Z-Score 방법으로 표준화하고, 표준정규분포에 적용하여 누적확률 값으로 계산한다. 표준정규분포의 누적분포함수(CDF)는 Eq. (5)와 같다.

$$Z = \frac{x_{i,j} - u_{i,j}}{\sigma_{i,j}} \quad (4)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}Z^2}, -\infty < Z < \infty \quad (5)$$

따라서 표준정규분포의 누적확률 값으로 변환된 기후지수에 대하여 고위상(high phase)과 저위상(low phase)으로 구분하고 Fig. 5와 같이 고위상의 한계값은 75 백분위수(percentile)로 정하여 고위상은 양의 위상(positive phase)이 된다. 반면에, 저위상의 한계값은 25 백분위수로 정하여 저위상은 음의 위상(negative phase)이 된다.

3.4 기후영향지수(Climature Influence Index, CII)

기후영향지수(Climature Influence Index, CII) 산정방법은 Kim et al.(2008)이 대규모 기후변동이 계절 강우량 대해 미치는 영향을 분석하기 위해 제시한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 기후변동이 태풍에 의한 강우량 및 유출량에 미치는 영향을 평가하기 위하여 기후영향지수 산정방법을 적용하였다. 기후영향지수는 영향강도(Influence Intensity, II)와 영향빈도(Influence Frequency, IF)를 통하여 산정이 되며, 영

Fig. 5. Two conceptual phases in Climate Index

Table 2. Classification of Climate Influence Index

Range of climate influence index	Class	Symbol
$0.9 < CI \leq 1.0$	Extreme Increase (EI)	▲
$0.8 < CI \leq 0.9$	Severe Increase (SI)	▲
$0.7 < CI \leq 0.8$	Moderate Increase (MI)	▲
$0.6 < CI \leq 0.7$	Slightly Increase (SLI)	▲
$0.4 \leq CI \leq 0.6$	No Effect (NE)	□
$0.3 \leq CI < 0.4$	Slightly Decrease (SLD)	▼
$0.2 \leq CI < 0.3$	Moderate Decrease (MD)	▼
$0.1 \leq CI < 0.2$	Severe Decrease (SD)	▼
$0.0 \leq CI < 0.1$	Extreme Decrease (ED)	▼

향강도는 강수량 및 유출량의 증감 정도를 나타내는 값이고 영향빈도는 강수량 및 유출량의 증가빈도를 나타내는 값이다. 즉, 기후영향지수는 기후변동이 강수량 및 유출량의 증감과 빈도에 대한 종합적인 영향 정도를 정량적으로 나타내는 지수이다. 영향강도와 영향빈도를 산정하는 방법은 Eqs. (6)-(7)과 같다.

$$II = \frac{1}{N_C} \sum_{i=1}^{N_C} P_C(i), \quad 0 \leq II \leq 1 \quad (6)$$

$$IF = \frac{N_{C,P}}{N_C}, \quad 0 \leq IF \leq 1 \quad (7)$$

여기서, N_C 는 여기서, N_C 는 기후지수의 고위상 또는 저위상에 해당하는 연도의 수이며, $N_{C,P}$ 는 고위상 또는 저위상에 해당되는 연도의 태풍에 의한 연 최대 강수량 및 연 최대 유출량을 Gumbel 분포의 누적확률 값이 0.5 보다 큰 연도의 갯수이다. P_C 은 고위상 또는 저위상에 해당되는 연도의 태풍에 의한 연 최대 강수량 및 연 최대 유출량을 Gumbel 분포의 누적확률 값이다. 따라서 기후영향지수는 Eq. (8)과

같이 영향강도와 영향빈도의 평균으로 구할 수 있다.

$$CII = \frac{II + IF}{2}, \quad 0 \leq CII \leq 1 \quad (8)$$

일반적으로 산정된 지수는 그 목적과 지표에 따라 다르지만, 대부분 일정한 구간을 세분하여 평가한다(Kim, 2001). 따라서 산정된 기후영향지수는 Table 2에 나타난 등급으로 구분하여 평가하였다.

4. 연구결과

4.1 기후지수와 태풍에 의한 강우량의 상관분석

본 연구에서는 7, 8, 9월의 8종류 기후지수와 113개의 유역의 태풍에 의한 연 최대 강우량의 상관계수를 산정하였다. Table 3은 전체 유역에 대한 통계학적으로 95%의 유의수준을 넘는 유역의 비율을 나타낸 것으로 7월에는 WP가 19%, 8, 9월에는 AO가 16%, 24%로 다른 기후지수에 비해 유의한 상관을 가지는 유역의 비율이 높게 나타났다.

Table 3. Percentage of significant correlation basins between climate index and typhoon-induced AMR in 113 sub-basins

Climate index	Typhoon-Induced AMR		
	July	August	September
AO	2%	16%	24%
EA	4%	3%	2%
NAO	6%	12%	5%
ONI	0%	1%	1%
PDO	4%	0%	1%
PNA	4%	0%	6%
SOI	1%	1%	6%
WP	19%	0%	1%

Fig. 6. Correlation map between climate index and typhoon-induced AMR in South Korea

WP는 북태평양 서쪽 일대의 월별 기후 변동성을 아노말리 값으로 나타낸 기후지수이며, Barnston and Livezey (1987)와 Wallace and Gutzler (1981)에 의해 정의되었다. AO는 북극 진동을 지수의 값으로 나타낸 것으로 Thompson and Wallace (1998)에 의해 정의되었으며, AO가 양의 위상일 경우 중위도가 난동을 나타내고, 음의 위상일 경우 엄동을 나타낸다.

유의한 상관을 가지는 유역의 비율이 높은 기후지수 WP(7월)와 AO(8, 9월)에 대한 상관관계 지도를 Fig. 6에 도시하였으며, 시·공간적으로 기후지수와 태풍에 의한 강우량의 상관관계의 특징을 분석하였다. 7월의 WP는 남동부 지역인 낙동강 권역의 20개 유역으로 60.6%, 8월의 AO는 남서부 지역인 영산강 권역의 11개 유역으로 78.5%, 섬진강 권역의 6개 유역으로 40%, 9월의 AO는 중부 지역인 한강 권역의 18개 유역으로 60%, 금강 권역의 9개 유역으로 42.8%가 높은 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 이는 태풍이 우리나라에 주로 내습하는 기간인 7, 8, 9월에 WP와 AO 기후지수의 값이 낮을수록 태풍이 내습할 때 특정 지역에 많은 강우량을 동반하는 것을 알 수 있다.

4.2 태풍에 의한 강우량 및 유출량에 대한 영향평가

4.1절에서 상관분석을 통하여 선정된 기후지수 WP(7월)와 AO(8, 9월)에 대한 연 최대 강우량 및 연 최대 유출량의 기후영향지수를 3절에서의 과정을 통해 산정하였으며 서로 비교분석하였다. 기후영향지수에 대한 시간적, 공간적 특성을 분석하기 위하여 Fig. 7 and 8과 같이 기후영향지수 지도를 작성하여 나타냈다.

7월 태풍으로 발생한 강우량 및 유출량은 WP의 고위상에서 동남부 지역인 낙동강 권역에서 감소 영향이 나타났으며 저위상에서는 중부 지역인 한강 권역이 감소 영향, 남동부 지역인 낙동강 권역에서 증가 영향이 고위상 보다 뚜렷이 나타났다.

8월 태풍으로 발생한 강우량 및 유출량은 AO의 고위상에서 중남부 지역인 한강 남부, 금강 권역에서 증가 영향, 남서부 지역인 영산강, 섬진강 권역에서 감소 영향이 나타났으나, 유출량에서는 영산강 권역에서 보다 더 큰 감소영향이 나타났다. 저위상에서는 강우량, 유출량 모두 남서부 지역인 영산강, 섬진강 권역, 중남부 지역인 금강 권역, 남서부 지역인 낙동강 권역에서 증가 영향이 나타났다.

Fig. 7. Climate Influence Index Map for the typhoon-induced rainfall and streamflow during the high phase of climate variation

Fig. 8. Climate Influence Index Map for the typhoon-induced rainfall and streamflow during the low phase of climate variation

9월의 태풍으로 발생한 강우량 및 유출량은 AO의 고위상에서 중부, 중남부, 남서부 지역인 한강, 금강, 영산강 권역에서 높은 감소영향이 나타났으며, 저위상에서는 중부, 중남부 지역인 한강, 금강 권역에서 높은 증가 영향이 나타났다.

태풍에 의한 강우량과 유출량에 대한 영향 정도를 기후영향지수 지도를 통해 비교분석한 결과 강우량의 증감에 따라 유출량 또한 매우 유사하게 증감하는 것을 알 수 있다.

기후변동이 태풍으로 인한 강우량과 유출량에 미치는 영향 등급에 따라 권역별 비율을 계산할 수 있다. 예를 들어, Table 4는 8월 AO가 태풍으로 인한 강우량 및 유출량에 미치는 영향등급에 대하여 권역별 비율을 정리한 것이다.

고위상에서의 태풍에 의한 강우량은 7월에 WP에 대한 기후영향지수가 낙동강 권역에서 총 36%(MD 등급 2곳, SLD 등급 10곳)의 비율로 감소 경향이 나타났으며, 8월에는 AO에 대한 기후영향지수가 영산강 권역이 총 50%(MD 등급 2곳, SLD 등급 5곳), 섬진강 권역이 총 47%(MD 등급 1곳, SLD 등급 6곳)의 비율로 감소경향 나타났다. 마지막으로 8월의 AO에 대한 기후영향지수가 한강 권역이 총 77%(MD 등급 8곳, SLD 등급 15곳), 금강 권역이 총 62%(SD 등급 2곳, MD 등급 3곳, SLD 등급 8곳), 영산강 권역이 총 50%(MD 등급 5곳, SLD 등급 2곳)의 비율로 감소 경향이

나타났다. 특히 9월의 AO에서 태풍에 의한 강우량이 많은 유역에서 뚜렷이 감소 영향을 나타나는 것을 알 수 있다.

저위상에서의 태풍에 의한 강우량은 7월에 WP에 대한 기후영향지수가 낙동강 권역이 총 100%(EI 등급 7곳, SI 등급 6곳, MI 등급 17곳, SLI 등급 4곳), 섬진강 권역이 총 100%(MI 등급 6곳, SLI 등급 9곳), 금강 권역이 총 53%(SI 등급 1곳, MI 등급 6곳, SLI 등급 4곳)의 비율로 증가 경향이 나타났다. 8월에는 AO에 대한 기후영향지수가 영산강 권역이 총 100%(MI 등급 1곳, SLI 등급 13곳), 금강 권역이 총 62%(MI 등급 1곳, SI 등급 12곳), 낙동강 권역이 총 58%(MI 등급 1곳, SLI 등급 18곳)의 비율로 증가 경향이 나타났다. 특히 7월의 WP에서 태풍에 의한 강우량이 많은 유역에서 뚜렷이 증가 영향을 나타나는 것을 알 수 있다.

본 연구 결과를 통해 월별 기후지수에 따라 우리나라에 내습하는 태풍에 의한 강우량이 지역적으로 특징을 나타내고 있음을 알 수 있었으며 고위상에서는 감소 영향이 뚜렷하고, 저위상에서는 증가 영향이 보다 더 뚜렷한 것으로 나타났다.

4.3 상관계수와 기후영향지수의 관계분석

WP(7월)와 AO(8, 9월) 기후지수에 대한 태풍으로 발생한

Table 4. Percentage of increase and decrease basins in typhoon-induced rainfall and streamflow (AO in August)

High Phase										
Major Basins	ED	SD	MD	SLD	NE	SLI	MI	SI	EI	Total
Han River	0	0	0	0	24	6	0	0	0	30
	0%	0%	0%	0%	80%	20%	0%	0%	0%	100%
Geum River	0	0	0	0	13	3	5	0	0	21
	0%	0%	0%	0%	62%	14%	24%	0%	0%	100%
Nakdong River	0	0	0	0	31	2	0	0	0	33
	0%	0%	0%	0%	94%	6%	0%	0%	0%	100%
Seomjin River	0	0	1	6	8	0	0	0	0	15
	0%	0%	7%	40%	53%	0%	0%	0%	0%	100%
Yeongsan River	0	0	2	5	7	0	0	0	0	14
	0%	0%	14%	36%	50%	0%	0%	0%	0%	100%
Low Phase										
Major Basins	ED	SD	MD	SLD	NE	SLI	MI	SI	EI	Total
Han River	0	0	0	1	25	4	0	0	0	30
	0%	0%	0%	3%	83%	13%	0%	0%	0%	100%
Geum River	0	0	0	0	8	12	1	0	0	21
	0%	0%	0%	0%	38%	57%	5%	0%	0%	100%
Nakdong River	0	0	0	0	14	18	1	0	0	33
	0%	0%	0%	0%	42%	55%	3%	0%	0%	100%
Seomjin River	0	0	0	0	7	8	0	0	0	15
	0%	0%	0%	0%	47%	53%	0%	0%	0%	100%
Yeongsan River	0	0	0	0	0	13	1	0	0	14
	0%	0%	0%	0%	0%	93%	7%	0%	0%	100%

Fig. 9. Scatter plot between correlation coefficient and climate influence index

연 최대 강우량의 상관계수 지도와 기후영향지수 지도를 비교 분석해 보면 서로 매우 밀접한 관계를 가지고 있는 것을 알 수 있다. Fig. 9는 7, 8, 9월의 WP와 AO 기후지수에 대한 113개 유역의 태풍으로 발생한 강우량의 상관계수와 기후영향지수를 고위상 또는 저위상으로 구분하여 산포도 (Scatter plot)으로 나타낸 것이다. 상관계수와 기후영향지수를 비교분석한 결과, 고위상에서는 음의 상관을 가지는 유역은 감소 영향, 양의 상관을 가지는 유역은 증가 영향을 나타냈다. 반면, 저위상에서는 음의 상관을 가지는 유역은 증가 영향, 양의 상관을 가지는 유역은 감소 영향을 나타냈다. 또한 상관계수가 커지면 영향 증감의 정도도 커지는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 기후영향지수 산정방법을 적용하여 우리나라의 113개 유역에 대하여 기후변동이 태풍에 의해 발생한 강우량 및 유출량에 미치는 시·공간적 영향 정도를 태풍의 내습이 집중되는 7, 8, 9월에 대한 시간적 특성을 고려한 기후영향지수 지도를 작성하여 정량적으로 평가하였다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 기후지수와 태풍에 의한 강우량의 상관분석을 통하여 WP(7월)와 AO(8, 9월)의 기후지수가 7, 8, 9월의 강우량과 높은 상관관계를 가지는 것으로 나타났다. 이에 대한 결과를 지도로 도시하여 분석한 결과 기후지수와 태

풍에 의한 강우량의 시간적, 선형적 관계에 따른 지역적 특징이 나타났다.

- 2) 기후영향지수 산정법을 적용하여 산정된 WP(7월)와 AO(8, 9월)의 기후지수에 대한 위상별 태풍에 의한 강우량 및 유출량의 기후영향지수는 시·공간적 특성이 비교분석되었다. 그 결과 강우량의 증감에 따라 유출량 또한 시간적, 공간적으로 거의 유사한 증감을 가지는 것으로 나타났다.
- 3) WP(7월)와 AO(8, 9월)의 기후지수와 태풍에 의한 강우량에 대한 상관계수 지도와 기후영향지수 지도를 비교분석했을 경우, 수치적 지역적 특징이 유사한 경향이 나타났으며 서로 밀접한 관계를 가지는 것을 알 수 있었다.
- 4) 기후영향지수 산정법을 적용하여 산정된 기후영향지수와 상관분석을 통하여 산정된 상관계수를 113개 유역을 대상으로 산포도를 통해 위상별로 구분하여 비교한 결과, 음의 상관을 가지는 유역은 고위상에서는 극한 수문변량이 감소 영향이 나타나며, 양의 상관을 가지는 유역은 저위상에서 극한수문변량이 증가 영향이 뚜렷이 나타났다. 이는 WP(7월)와 AO(8, 9월)의 기후지수의 값이 낮을 때에는 강우량 및 유출량이 많으며, 기후지수의 값이 높을 때에는 강우량 및 유출량이 작음을 의미한다.

본 연구는 Jin and Park (2005)의 남방진동지수의 범주구분에 의한 강수량에 미치는 ENSO 영향의 통계학적 분석과 Chu et al. (2007)의 ENSO와 한국의 수문 변량들간의 계절적 관계분석의 연구와는 방법적으로 차이를 가지고 있다. 남방진동현상이 우리나라의 남부의 중부에 대해 각기 다른 양상의 영향을 미치고 있다는 Jin and Park (2005)의 연구결과와 일부 지역에서 남방진동지수와 수문 변량들간에 유의한 상관관계를 갖는다는 Chu et al. (2007)의 연구결과를 비교해 보면, 본 연구는 기존 연구에서의 한정적인 하나의 기후지수가 아닌 다양한 기후지수를 고려하였으며, 기후지수별 상관분석을 통한 선형적 관계와 기후지수의 위상구분에 따라 시·공간적 변화하는 기후영향지수를 산정하여 기후변동이 우리나라의 극한 수문변량에 영향을 미치고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 현재 우리나라에 내습하는 태풍은 발생 및 내습 기간이 불규칙하여 태풍에 의한 극치수문사상의 변동성이 심하고 예측이 어려운 특징을 고려한다면 본 연구의 결과가 앞으로 다양한 기후 변동과 극치수문사상의 직접적인 관계 해석 및 예측 기법 개발에 대한 유용한 기초자료로 이용될 수 있다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 국제수문계획(International Hydrological Program)의 제7단계 연구지원사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

References

- Barnston, A.G and Livezey, R.E. (1987) Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, Vol. 115, Issue. 6 pp. 1083-1126.
- Boorman, D.B. and Sefton, C.E.M. (1997) Recognizing the uncertainty in the quantification of the effect of climate on hydrological response. *Climate change*, Vol. 35, pp. 415-434.
- Cha, E.J. (2010) Characteristic of long duration precipitation of South Korea : Focus on localized rainfall and typhoon. *Journal of KOSHAM*, Vol. 10, No. 2, pp. 64-73.
- Chu, H.J., Kim, T.W., Lee, J.K., and Lee, J.H. (2007) Seasonal relationship between El Nino-Southern Oscillation and hydrologic variables in Korea. *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 40, No. 4, pp. 299-311.
- Flower, H.J. and Kilsby, C.G. (2003a) A regional frequency analysis of United Kingdom extreme rainfall from 1961 to 2000. *International Journal of Climatology*, Vol. 23, pp. 1313-1334.
- Flower, H.J. and Kilsby, C.G. (2003b) Implications of change in seasonal and annual extreme rainfall. *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 13, pp. 1720 doi:10.1029/2003GL017327.
- Gellens, D. and Roulin, E. (1998) Streamflow response of Belgian catchment to IPCC climate change scenario. *Journal of Hydrology*, Vol. 210, pp. 242-258.
- Jin, Y.H. and Park, S.C. (2005) Statistical analysis of ENSO-influence on monthly precipitation by categorization of southern oscillation index. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 6B, pp. 443-450.
- Kim, B.S., Lee, J.K., Kim, H.S., and Lee, J.W. (2011) Non-stationary frequency analysis with climate variability using conditional generalized extreme value distribution. *Journal of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 499-514.
- Kim, B.S., Oh, J.S., and Kim, C.Y. (2007) Assessment of the ENSO Influences on Rainfall Characteristics and Frequency Analysis. *Proceedings of the Korea Water Resources Association 2007 Conference*, pp. 1619-1624.
- Kim, T.W., Yoo, C., and Ahn, J.H. (2008) Influence of climate variation on seasonal precipitation in the Colorado River Basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 22, Issue 3, pp. 411-420.
- Kim, Y.H. (2001) *The Newest Environmental Impact Assessment*, Shingwang Publish Company.
- Kite, G.W. (1993) Application of a land class hydrological model to climate change. *Water Resour. Res.*, Vol. 29, pp. 2377-2384.
- Korea Meteorological Administration (2011) *Typhoon White Book*.
- Koutsoyiannis, D. (2003) Climate change, the Hurst phenomenon and hydrological statistics. *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 48, No. 1, pp. 3-24.
- Kwon, H.Y., Oh, T.S., and Moon, Y.I. (2008) A predictive model of summer precipitation and rainfall pattern by typhoon. *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 6, pp. 89-97.
- Lee, D.R. (1998) Relationships of El Niño and La Niña with both Temperature and Precipitation in South Korea. *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 31 No. 6, pp. 807-819.
- Lee, D.R. (1999) Relationship between El Niño/Southern Oscillation and drought in Korea. *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 32 No. 2, pp. 111-120.
- Lee, D.R. (2001) Climatic Variability and Rainfall-Frequency Change. *Proceedings of the Korea Water Resources Association 2001 Conference*, pp. 403-408.
- Lindström, G. and Bergström, S. (2004) Runoff trends in Sweden:

- 1807-2002. *Hydrol. Sci. J. Special Section: Detecting Change in Hydrological Data*, Vol. 49, No. 1, pp. 69-83.
- McKerchar, A.I. and Henderson, R.D. (2003) Shifts in flood and low-flow regimes in New Zealand due to interdecadal climate variations. *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 48, No. 4, pp. 637-654.
- Oh, T.S., Moon, Y.I., Chun, S.Y. and Kwon, H.Y. (2009). Evaluation of extreme rainfall based on typhoon using nonparametric Monte Carlo simulation and locally weighted polynomial regression. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 2B, pp. 193-205.
- Panagoulia, D. and Dimou, G. (1997) Sensitivity of flood events to global climate change. *Journal of Hydrology*, Vol. 191, pp. 208-222.
- Paturel, J. E., Ouedraogo, M., Servant, E., Mahe, G., Dezetter, A., and Boyer, J.F. (2003) The concept of rainfall and streamflow normals in West and Central Africa in a context of climate variability. *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 48, No. 1, pp. 125-137.
- Peel, M.C., McMahon, T.A., and Finalyson, B.L. (2002) Variability of annual precipitation and its relationship to the El Nino-Southern Oscillation. *Journal of Climate*, Vol. 15, pp. 545-551.
- Pongracz, R. Bogardi, I., and Duckstein, L. (2003) Climate forcing of drought; a Central European example. *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 48, No. 1, pp. 39-50.
- Rasmusson, E.M., and Carpenter, T.H. (1983) The relationship between eastern equatorial pacific sea surface temperature and rainfall over India and Sri Lanka. *Monthly Weather Review*, Vol. 111, pp. 517-528.
- Ropelewski, C.F. and Halpert, M.S. (1987) Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Nino/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, Vol. 115, pp. 606-1626.
- Saelthun, N.R., Aittoniemi, P., Bergstrom, S., Einarsson, K., Johannesson, T., Lindstom, G., Ohlsson, P.O., Thomsen, T. Vehrilainen B., and Aamodt, K.O. (1998) Climate change impact on runoff and hydropower in the Nordic countries. *TemaNord*, Vol. 522, pp. 170.
- Tate, E. Sutcliffe, J., Conway, D., and Farquharson, F. (2004) Water balance of lake ictoria; update to 2000 and climate change modelling to 2100. *Hydrol. Sci. J.*, Vol. 49, No. 4, pp. 563-574.
- Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M. (1998) The arctic oscillation signature in the winter time geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, Vol. 25, Issue 9, pp. 1297-1300.
- Wallace, J.M. and Gutzler, D.S. (1981) Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, Vol. 109, pp. 784-812.
- Walpole, R.E., Myers, R.H., Myers, S.L., and Ye, K. (2002) *Probability and Statistics for Engineers and Scientists*. Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, N.J.
- Wang, W.C. and Li, K. (1990) Precipitation fluctuation over semi-arid region in Northern China and the relationship with El Nino/Southern Oscillation. *Journal of Climate*, Vol. 3, pp. 769-783.
- Yoon, P.Y, Kim, T.W., Yang, J.S., and Lee, S.O (2012) Estimating quantiles of extreme rainfall using a mixed gumbel distribution model. *Journal of Korean Water Resources Association*, Vol. 45 No. 3, pp. 263-274.

© Received December 8, 2012

© Revised December 13, 2012

© Accepted May 10, 2013