

# 기후변화에 따른 강우 경향성 및 유출과의 탄성도 분석

## Analysis for Precipitation Trend and Elasticity of Precipitation-Streamflow According to Climate Changes

손태석\* · 신현석\*\*

Shon, Tae Seok · Shin, Hyun Suk

### Abstract

Climate changes affect greatly natural ecosystem, human social and economic system acting on constituting the climate system such as air, ocean, life, glacier and land, etc. and estimating the current impact of climate change would be the most important thing to adapt to the climate changes. This study set the target area to Nakdong river watershed and investigated the impact of climate changes through analyzing precipitation tendency, and to understand the impact of climate changes on hydrological elements, analyzed elasticity of precipitation-streamflow. For the analysis of precipitation trend, collecting the precipitation data of the National Weather Service from major points of Nakdong river watershed, resampling them at the units of year, season and month, used as the data of precipitation trend analysis. To analyze precipitation-streamflow elasticity, collecting area average precipitation and long-term streamflow data provided by WAMIS, annual and seasonal time-series were analyzed. In addition, The results of this study and elasticity, and other abroad study compared with the elasticity analysis and the validity of this study was verified. Results of this study will be able to be utilized for study on a plan to increase of flood control ability of flooding constructs caused by the increase of streamflow around Nakdong river watershed due to climate changes and on a plan of adapting to water environment according to climate changes.

**Keywords :** precipitation, streamflow, trend, elasticity, climate change

### 요 지

기후변화는 기후 시스템을 구성하는 대기, 해양, 생물, 빙하, 육지 등의 다양한 구성요소에 작용하여 자연 생태계와 인간의 사회 및 경제 시스템에 커다란 영향을 미치고 있다. 이로 인한 현재의 기후변화의 영향을 산정하는 일은 기후변화에 적응하는 가장 중요한 요소가 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 낙동강 유역을 대상으로 강우의 경향성 분석을 통하여 기후변화의 영향을 규명하고, 기후변화가 수문학적 요소에 미치는 영향을 파악하기 위하여 강우와 유출의 탄성도 분석을 하였다. 강우의 경향성 분석을 위하여 낙동강 주요지점의 기상청 강우자료를 수집하여 년, 계절, 월 단위로 재추출하여 경향성 분석 자료로 이용하였고, 강우와 유출 탄성도 분석에서는 WAMIS에서 제공하는 면적평균강우와 장기유출 자료를 수집하여 년, 계절 분석을 하였다. 그리고 본 연구의 탄성도 분석 결과와 국외의 타 연구와의 탄성도 분석결과를 비교분석 해 봄으로써 본 연구결과의 타당성을 입증하였다. 향후 본 연구의 결과를 토대로 기후변화로 인한 낙동강 유역의 유출량 증대로 인한 수공 구조물의 치수능력 증대 방안과 해당유역 기후변화에 따른 물환경 적응방안 연구에 활용할 수 있을 것이다.

**핵심용어 :** 강우, 유출, 경향성, 탄성도, 기후변화

### 1. 서 론

기후변화는 기후 시스템을 구성하는 대기, 해양, 생물, 빙하, 육지 등의 다양한 구성요소에 작용하여 자연 생태계와 인간의 사회 및 경제 시스템에 커다란 영향을 미친다. 최근 인간의 활동에 의해 야기된 기후변화는 극단적인 기후 현상의 빈도와 강도에 영향을 미칠 뿐만 아니라, 기온상승, 강수량 변화, 강우패턴 변화, 해수면 상승 등을 야기할 것으로 알려져 있다(IPCC, 2007). 전 지구적 평균 온도는 최근 5

년 동안 0.8°C 정도 상승하였고, 과거 최근 25년 동안 온도 상승률은 0.2°C/10년으로 다른 전체 기간에 비해 가장 큰 상승을 보이고 있다. 1912년부터 2008년 까지, 우리나라의 연평균 강수량은 해에 따라 편차가 크게 나타나고 있지만, 연평균 강수량 변화는 강릉(3.4 mm/년), 서울(2.1 mm/년), 부산(1.9 mm/년), 대구(1.7 mm/년), 목포(1.3 mm/년)에서 장기적으로 증가추세에 있다. 이로 인하여 현재 100~200년 빈도의 단위로 건축된 수공구조물이 홍수 등의 수해에 제 역할을 하지 못할 것으로 판단되며 이 영향은 토목기술자, 수문

\*정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 박사수료 (E-mail : tsshon1@hanmail.net)

\*\*정회원 · 교신저자 · 부산대학교 사회환경시스템공학과 정교수 (E-mail : hsshin@pusan.ac.kr)

학자 그리고 정부기관에서 중요하게 고려해야 하는 문제로 대두되고 있다. 이로 인해 미래 기후 변화를 예측하는 일은 기후변화에 적응하는 가장 중요한 요소가 될 것이다.

기후변화에 따른 수자원의 변동 및 경향성을 찾기 위해서는 각종 기상 및 수문요소의 장기간 자료를 이용하여 시계열 분석이 이루어져야 한다. 이에 전 세계적으로 강우의 경향성 분석은 중요한 문제로 대두되고 있으며 강우와 관계된 기후인자와의 관계를 규명하는 연구 또한 활발하게 진행 중에 있다. 그러나 국내 강우-유출의 탄성도 및 민감도와 관련된 연구는 거의 전무한 실정이며 홍수량 산정 및 예측을 위한 강우-유출간의 관계를 규명하는 분석이 주로 이뤄지고 있다. 김남원 등(2004)은 도시지역의 장기유출 특성 비교를 위한 강우-유출 관계를 분석하였고, 유철상과 김경준(2006)은 소유역과 중규모 유역에 적용을 위한 강우의 특성 변화에 따른 유출 특성의 변화분석을 하였다. 이기하 등(2009)은 분포형 강우-유출 모형의 매개변수 불확실성에 대한 시, 공간적 유역 응답을 분석하였으며, 김철경과 김남원(2008)은 소양댐 상류유역의 강우-유출-유사 상호 관계를 규명하였다. 국외에서는 강우-유출의 탄성도 및 민감도와 관련된 연구는 활발하게 이뤄지고 있다. David Adamson *et al.*(2007)은 기후변화로 인한 온도상승과 감소된 강우에 의한 유출량의 감소와 흐름의 변동성에 의한 영향력을 예측하였고, A Sankarasubramanian *et al.*(2001)은 미국의 주요하천을 대상으로 주요 수문인자의 탄성도를 분석하기 위하여 Nonparametric, Bivariate, Power Law Mean, abcd 탄성도를 분석하여 미국 내 개략적인 탄성도 맵을 구축하였고, 각 기후인자와 유출의 탄성도를 분석하였으며 타 연구와의 비교분석을 실시하였다. G-H. Zhang *et al.*(2005)은 중국의 황강유역의 강우와 강우로 인한 침식의 예측을 규명하기 위한 탄성도를 분석하였으며, Richard M. Vogel *et al.*(2006)은 유출을 홍수기, 평균 유출기, 갈수기로 구분하여 기후(강우) 탄성도, 토지이용

(인구밀도)에 따른 탄성도, 물 이용에 따른 탄성도를 구분하여 기후변화로 인한 하천의 민감도 및 탄성도의 다 변수의 추정과 관련한 일반적인 다 변수 접근법을 연구하였다.

본 연구는 기후변화를 탐지하기 위하여 강우 경향성 분석을 하여 기후변화가 강우에 미치는 영향을 분석하였고, 하천 유역의 강우와 유출의 관계를 규명하기 위하여 강우-유출 탄성도를 산정하였다. 낙동강 유역을 대상유역으로 하여 강우의 경향성분석을 위하여 낙동강 주요지점의 기상청 강우자료를 수집하고, 강우-유출 탄성도를 분석하기 위하여 국가수자원관리종합정보 시스템(WAMIS)에서 제공하는 낙동강 주요지점의 면적평균강우량과 장기유출자료를 수집하였다. 그리고 본 연구결과의 타당성 입증을 위하여 강우-유출 탄성도가 활발히 연구되고 있는 국외의 연구결과와 비교, 분석하였다. 향후 본 연구의 결과를 토대로 하여 기후변화로 인한 낙동강 주요지점의 유출량 증대로 인한 수공 구조물의 치수능력 증대 방안과 해당유역 기후변화에 따른 물환경 적응방안 연구에 활용할 수 있을 것이다.

## 2. 연구방법

### 2.1 유역의 개황

낙동강 유역은 한반도 동남부(동경 127° 29'~129° 18', 북위 35° 03'~37° 13')에 위치한다. 북쪽으로는 한강 유역, 서쪽으로는 금강 및 섬진강 유역과 분수령을 형성하고 있는 남한의 제2유역이다. 유역면적은 남한의 약 1/4에 해당하는 23,817.3 km<sup>2</sup>이며, 유역의 평균폭은 45.36 km, 유로연장은 521.5 km, 유역의 동서장은 약 120 km, 남북장은 약 200 km이다. 유역의 지세는 북쪽으로 한강 유역, 서쪽으로 금강과 섬진강 유역과 접하고 동쪽으로는 태백산맥이 동해안 유역과 분수령을 형성하고 있다. 낙동강 본류는 동쪽으로 태백산맥과 서북쪽의 속리산, 덕유산, 지리산으로 이어지는 소백

Table 1. Composition of Nakdong river

River name	Area(km <sup>2</sup> )	Length(km)	Legal river(km)		
			Nation	Local	Total
Total	23,657.1 (23,817.3)	-	829.5	6,630.7	7,460.2
Main stream	7,794.3	521.5	400.7	86.8	487.5
Banbuen river	1,891.5	100.7		108.7	108.7
Naesung river	1,808.2	101.8	27.0	73.4	100.4
Byungsung river	434.8	21.0		30.0	30.0
Wi river	1,404.8	110.7		117.0	117.0
Gam river	1,003.7	71.4	41.2	29.0	70.2
Kumho river	2,086.7	116.0	71.8		71.8
Whe river	780.3	70.4		26.3	26.3
Hwang river	1,328.2	111.0	78.8	28.0	106.8
Nam river	3,466.1	186.3	145.4	40.0	185.4
Milyang river	1,425.6	96.2	33.2		33.2
Yangsan river	232.9	31.4	10.0	16.0	26.0
Etc.	-	-	21.4	6,075.5	6,096.9

\*Korean river index (1991, Ministry of land, transport and maritime affairs)

Table 2. Observatory and data period of precipitation trend analysis

Point Name	No.	Latitude	Longitude	Data Period
Andong	136	36-34	128-42	1973.1.1~2008.12.31
Pohang	138	36-02	129-23	1949.1.1~2008.12.31
Daegu	143	35-53	128-37	1909.1.1~2008.12.31
Ulsan	152	35-33	129-19	1946.1.1~2008.12.31
Pusan	159	35-06	129-02	1905.1.1~2008.12.31
Tongyoung	162	34-51	128-26	1968.1.1~2008.12.31

\*Korea Meteorological Administration

Table 3. Observatory and data period of precipitation-streamflow elasticity analysis

Point Name	No.	Latitude	Longitude	Data Period
Andongdam	200111	36-52-49	129-00-12	1966.1.1~2005.12.31
Imhadam	200211	36-26-24	129-01-57	1966.1.1~2005.12.31
Nakdong	200901	36-21-07	128-18-09	1966.1.1~2005.12.31
Waegwan	201103	35-59-50	128-23-47	1966.1.1~2005.12.31
Goryunggyo	201402	35-44-59	128-23-21	1966.1.1~2005.12.31
Hapcheondam	201508	35-42-44	127-55-40	1966.1.1~2005.12.31
Jindong	202001	35-22-49	128-29-09	1966.1.1~2005.12.31
Namgangdam	201910	35-25-05	127-52-28	1966.1.1~2005.12.31
Nakdongriver estuary	202208	35-12-11	128-59-34	1966.1.1~2005.12.31

\*National Water Resources Management Information System

산맥을 유역 경계로 하여 낙동강 유역의 중심부를 관류하고 있으며, 유로는 산악으로 인하여 최단거리로 유하하지 못하고 유향을 4차례나 급변시키면서 우회하여 남해안에 유입한다(국토해양부, 2008).

수원은 강원도 태백산(EL. 1,549 m)에서 발원하여 남류하면서 안동댐 지점에서 유로방향을 서쪽으로 1차 비꾼 후 서류하면서 반변천, 미천이 합류한다. 이후 경상북도 예천군 풍양면 부근에서 내성천과 합류한 후 2차 유향을 바꾸어 남류를 계속하면서 영강, 병성천, 미천, 감천, 백천, 금호강, 회천, 황강과 차례로 합류하고 경상남도 의령군 지정면 지점에서 남강과 합류한다. 남강 합류 후 3번째 유향을 바꾸어 동류하다가 경상남도 밀양시 삼랑진읍 부근에서 밀양강과 합류한 후 4번째로 유향이 남서류로 바뀌면서 양산천과 합류하고 부산광역시 사하구 하단동 지점에서 남해안으로 유입한다.

낙동강 유역의 일반적인 특성은 산지가 많으며 하폭이 넓고 평탄하나 식생이 불량하여 침식이 심하고 유출이 불규칙하여 홍수와 한해의 피해가 크고 유사로 인한 하상변동이 특히 심하다. 유역 내 연평균 강우량은 1,167.0 mm, 수자원 부존량은 264.73억<sup>m</sup>³로 이 중 손실량은 약 114.65억<sup>m</sup>³로 43.3%, 유출량은 150.08억<sup>m</sup>³로 56.7%를 차지한다. 다음 Table 1은 낙동강수계 범정하천 현황을 나타내고 있다.

## 2.2 분석자료 수집

강우 경향성 분석을 위한 강우자료는 낙동강에 위치한 주요 기상청지점인 안동, 포항, 대구, 울산, 부산, 통영의 6개 지점에서 각 지점의 기상관측 개시일로부터 2008년 12월 31일까지 일 단위 강우자료를 취득하여 월, 계절, 연 자료로 재추출하여 분석하였다.

탄성도 분석을 위한 강우자료는 국가 수자원관리종합정보 시스템(<http://www.wamis.go.kr/>)에서 제공하는 면적평균강우량을, 유출량은 장기유출자료를 관측개시일로부터 최근 관측 기간으로 1966년 1월 1일에서 2005년 12월 31일까지 40년간의 자료를 분석하였다. 면적평균강우량은 유역에 내린 총 강우량을 유역면적으로 나눈 등가 우량값이며, 장기유출은 일 강우에 대한 유출(기저유출, 중간유출, 지표유출 포함)로



Fig. 1 Weather observatory of precipitation trend analysis and precipitation-streamflow elasticity analysis

서 일 단위 자료를 획득하여 월, 계절, 연 자료로 재추출하여 탄성도 분석을 실시하였다. Table 2는 낙동강 유역 주요 기상청 지점 및 분석 기간, Table 3에 강우-유출 탄성도 분석지점 및 분석 기간, Fig. 1에 강우 경향성 분석지점 및 강우-유출 탄성도 분석지점을 정리하였다.

### 2.3 분석 방법

#### 2.3.1 Trend 분석

강우 경향성 분석을 위하여 T Test, Hotelling Pabst Test, Mann-Kendall Test, Sen Test를 실시하였고, 0.99, 0.95, 0.90의 유의수준으로 구분하여 분석하였다. 경향성 분석 결과는 검정의 유의수준으로 99% 이상을 1등급, 99~95%는 2등급, 95~90%는 3등급, 90% 미만은 4등급으로 구분하여 각 Test 결과 중 가장 높은 등급을 연, 계절, 월 경향성 분석 결과로 하였다.

#### 1) T test for Detecting Linear Trends

자료수  $N$ 인 자료가  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$ 로 주어졌을 때 자료의 선형적 경향을 분석하는 방법으로 다음과 같은 식 (1)의 선형방정식을 사용한다.

$$Y_t = a + bt, \quad t = 1, \dots, N \quad (1)$$

여기서 주어진 자료가 선형적 경향을 갖고 있다면 계수  $b$ 는 이 아닌 다른 값을 갖게 된다. 그러므로 기울기  $b$ 가 인가 아닌가에 대한 귀무가설이 곧 주어진 자료에 대한 선형적 경향의 귀무가설이 된다.

#### 2) Hotelling-Pabst test

자료수  $N$ 인 자료  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$ 를 크기순으로(작은 값부터 큰 순서) 정리된 자료를  $X_1, X_2, \dots, X_N$ 이라 하고  $Y_i$ 의 순서값(rank)을  $R(Y_i)$ 라 하면 검정 통계량은 다음 식 (2)와 같이 주어지고(Conover, 1971),

$$T = \sum_{i=0}^1 [R(Y_i) - i]^2 \quad (2)$$

검정통계량  $T$ 의 상한계와 하한계는 아래와 같이 식 (3)과 식 (4)로 주어진다.

$$T_U = \frac{N(N^2-1)}{6} + u_{1-\alpha/2} \frac{N(N^2-1)}{6\sqrt{N-1}} \quad (3)$$

$$T_L = \frac{N(N^2-1)}{6} - u_{1-\alpha/2} \frac{N(N^2-1)}{6\sqrt{N-1}} \quad (4)$$

여기서 식 (4)의  $T$ 에서 계산된  $T$ 값이 식  $T_U, T_L$ 의 밖에 존재하면 주어진 자료의 선형 경향은 유의수준  $\alpha$ 의 범위 내에서 받아들여진다고 할 수 있다.

#### 3) Mann-Kendall test

자료  $Y_t(t=1, 2, \dots, N)$ 에 대하여  $Y_{t'}(t'=1, 2, \dots, N-1)$ 과  $Y_t(t=t'+1, \dots, N)$ 의 크기를 비교하여 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} Z_k &= 1 & \text{if } Y_t > Y_{t'} \\ Z_k &= 0 & \text{if } Y_t = Y_{t'} \\ Z_k &= -1 & \text{if } Y_t < Y_{t'} \end{aligned}$$

여기서  $k = (t'-1)(2N-t') + (t-t')$ 라 하면 Mann-Kendall test의 검정통계량은 다음 식 (5)과 같이 주어진다(Hirsch 등, 1982).

$$S = \sum_{t'=1}^{N-1} \sum_{t=t'+1}^N Z_k \quad (5)$$

$$U_c = \frac{S+j}{[V(S)]^{1/2}} \quad (6)$$

여기서

$$V(S) = \frac{1}{18} \left[ N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^G E_i(E_i-1)(2E_i+5) \right] \quad (7)$$

$S < 1$ 이면  $j=1$ ,  $S > 1$ 이면  $j=-1$ ,  $S=0$ 이면  $j=0$ 의 값을 가지고,  $G$ 는 같은 값을 갖는 자료군의 총수이며,  $E_i$ 는  $i$  번째 자료군에 속하는 같은 값을 갖는 자료의 수이다. 아래 식 (8)의 조건이 만족되면 유의수준  $\alpha$ 에서 주어진 자료가 상향(upward) 또는 하향 경향(downward trend)을 갖는다고 할 수 있다.

$$|U_c| > u_{1-\alpha/2}$$

주어진 자료에 대하여  $S=0$ 이면  $U_c=0$ 으로 경향을 갖지 않으며,  $S$ 가 양수인 경우에는 상향 경향을 가지며,  $S$ 가 음의 값을 갖는 경우에는 하향 경향을 갖는다.

$$\begin{aligned} V(S) &= \frac{1}{18} \left[ N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^G E_i(E_i-1)(2E_i-5) + \sum_{j=1}^H W_j(W_j-1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sum_{i=1}^G E_i(E_i-1)(E_i-2) \sum_{j=1}^H W_j(W_j-1)(W_j-2)}{9N(N-1)(N-2)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sum_{i=1}^G E_i(E_i-1) \sum_{j=1}^H W_j(W_j-1)}{2N(N-1)} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

#### 4) Sen test

Sen(1968)에 의해 제안된 비매개변수적 방법으로, 주어진 자료  $Y_t(t=1, 2, \dots, N)$ 에 대하여 다음 식 (9)과 같이 새로운 변수  $Z_k$ 를 정의한다.

$$Z_k = \frac{Y_j - Y_i}{j - i} \quad (9)$$

여기서 모든  $i$ 와  $j$ 에 대해  $j > i$ 이고,  $Z_k$ 를 다시 크기순으로 정렬한 값을  $X_k$ 로 정의하면 Sen의 경사에 대한 검정통계량은 다음과 같이 주어진다(Gilbert, 1987).

$$M \text{이 홀수일 때, } S = X_{(M+1)/2} \quad (10)$$

$$M \text{이 짝수일 때, } S = \frac{1}{2} [X_{M/2} + X_{(M+2)/2}] \quad (11)$$

여기서  $M=N(N-1)/2$ 로 위 식 (11)에서 구한 검정통계량이 다음의 신뢰한계 안에 있게 되면 유의수준  $\alpha$ 에서 경향을 갖는다고 할 수 있다.

$$[X_{M_L}, X_{M_U}]$$

여기서

$$M_L = \frac{M - u_{1-\alpha/2}[V(S)]^{1/2}}{2} \quad (12)$$

$$M_U = 1 + \frac{M + u_{1-\alpha/2}[V(S)]^{1/2}}{2} \quad (13)$$

이고

$$V(S) \text{는 식 } v(S) = \frac{1}{18} \left[ N(N-1)(2N+5) - \sum_{i=1}^G E_i(E_i-1)(2E_i-5) \right] \quad (14)$$

을 이용하여 구한다. 그러므로 하한계  $X_{M_L}$  은  $X$  값 중 가장 작은 값으로부터  $M_L$  번째 값이고, 상한계  $X_{M_C}$  는  $M_L$  번째 값이 된다.

### 2.3.2 탄성도 분석

본 연구의 탄성도 분석을 위하여 ScHaake(1990)가 처음으로 도입한 식 (15)와 같은 탄성도(Elasticity) 개념을 도입하고 실제 탄성도 산정은 식 (16)으로 하였다.

$$\varepsilon_p(P, Q) = \frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQP}{dPQ} \quad (15)$$

$$\varepsilon_p(P, Q) = \text{median} \left[ \frac{Q_i - \bar{Q}}{P_i - \bar{P}} \right] \quad (16)$$

식 (15)는 ScHaake(1990)가 처음으로 도입한 탄성도 분석 방법으로  $P$ 는 강우를,  $Q$ 는 유출량을 나타내며  $dQ$ 는 유출량의 순간변화율,  $dP$ 는 강우의 순간 변화율을 나타낸다. 그러나 강우와 유출량의 순간변화율을 계산할 수 없으므로 본 연구에서는 Vogel *et al.*(1999)가 제안한 식 (16)의 nonparametric 탄성도 산정식을 이용하여 분석하였다. 이는  $Q$ 에 대한 유량의 변화량은  $P$ 에 대한 강우량의 변화와의 비례관계가 있음을 이용한 것으로,  $Q_i$  및  $P_i$ 는 각각 해당시간의 강우 및 유출량이며  $\bar{P}$ ,  $\bar{Q}$ 는 강우 및 유출량의 평균값을 의미한다. nonparametric 탄성도 분석 방법은 유출의 탄성도를 얻기 위하여 여러 기후인자에 적용 가능하다.

Francis Chiew(2007)가 제안한 주요 기후지역의 탄성도의 분포를 통하여 탄성도 분석결과를 이용한 해당지역의 기후 조건을 판단해 볼 수 있다. 이 연구에서 세계 주요 유역을 대상으로 탄성도 분석을 실시하여 다음 Table 4와 같은 결과를 도출하였으며, 탄성도의 중간값과 범위를 통하여 해당지역의 기후조건을 판단하였다. 결과값 중 탄성도의 범위를 벗어난 지역은 탄성도가 매우 낮은 값으로서 매우 추운 지역이거나, 매우 건조한 열대 기후지역으로 판별하였다. 다음 Table 4는 주요 기후지역의 탄성도 값의 범위를 나타낸 것이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 강우 경향성 분석

강우에 대한 경향성을 분석하기 위하여 전국이나 지역적인 규모의 단위로 많은 연구가 수행되고 있으며 기후변화에 따른 경향성 분석은 강우특성변동 분석을 통한 여러 가지 수자원 관련 문제들과 연관성이 크므로 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 강우의 경향성 분석을 위하여 강우의 선형회귀 분석, 경향성 분석을 실시하였다.

본 연구에서는 전국 주요 기상청 지점 중 낙동강 유역 내 주요 기상청 지점인 안동, 포항, 대구, 울산, 부산, 통영의 6

Table 4. Range of elasticity value in major climate zones

Climate Zone	Number of Catchments	Median of Elasticity	Range of Elasticity
<b>Tropical(A)</b>	<b>79</b>	<b>1.7</b>	<b>0.8~3.1</b>
Very wet(Af, Am)	20	1.2	0.8~1.9
Moderately wet(Aw)	59	2.0	0.9~3.3
<b>Arid(B)</b>	<b>45</b>	<b>1.8</b>	<b>0.4~2.9</b>
Cold arid(BWk, BSk)	32	1.6	0.4~3.1
Warm arid(BWh, BSh)	13	2.0	0.5~2.5
<b>Temperate(C)</b>	<b>262</b>	<b>1.9</b>	<b>0.9~3.1</b>
Wet winter(Csa, Csb, Csc)	32	2.0	0.9~3.4
Wet summer(Cwa, Cwb, Cwc)	35	1.8	0.8~2.8
No seasonality(Cfa, Cfb, Cfc)	195	1.9	1.0~3.1
<b>Cold(D)</b>	<b>136</b>	<b>1.1</b>	<b>0.5~1.9</b>

개 지점의 기상관측 개시일로 부터의 일 단위 강우자료를 취득하여 연 강우자료를 이용한 선형회귀 분석을 위하여 연 강우자료와 5년 이동평균강우를 재추출하여 비교분석을 실시하였다. Fig. 2와 같이 강우량은 매년 큰 변동폭으로 변하고 있으며, 선형회귀 분석과 5년 이동평균은 강우의 증가경향을 나타내고 있다. 각 지점 강우의 선형회귀 분석의 기울기는 안동 6.0028, 포항 4.4864, 대구 1.2574, 포항 1.0739, 부산 1.3658, 통영 1.5686로 대부분의 지점에서 증가의 경향을 확인할 수 있다. 안동 및 포항지점에서 증가의 경향이 뚜렷한데 이는 30년 정도의 짧은 관측기간으로 인한 최근 기후변화의 따른 최근의 강한 강우의 증가추세를 반영하고 있다고 판단되며 대구, 울산, 부산, 통영지점은 점진적인 증가의 경향을 나타내고 있다. 다음 Fig. 2는 낙동강 유역 강우의 연 시계열 선형회귀 분석 결과를 나타내었다.

대상유역 강우의 경향성 분석을 위하여 T Test, Hotelling Pabst Test, Mann-Kendall Test, Sen Test 분석을 실시하였다. 각각의 경향성 분석의 유의수준은 99%, 95%, 90%로 하였고, 분석 결과 중 99% 이상은 1등급, 99~95%는 2등급, 95~90%는 3등급, 90% 이하는 4등급으로 하여 구분하여 각각의 연, 계절, 월 경향성 분석결과 중 가장 높은 등급을 Table 5에 도시하였다. 낙동강 유역 주요 기상청지점 연 강우 경향성 분석 결과는 포항의 2등급을 제외한 모든 지점에서 유의성을 가진 경향이 나타나지 않았다. 계절 강우 경향성 분석 결과 여름을 제외한 대부분의 지점에서 4등급을 나타내어 일부 지점을 제외하고는 유의성을 가진 경향이 나타나지 않았다. 여름은 부산과 통영을 제외하고 1~3등급의 결과를 보여 강한 경향성이 나타나며 봄과 겨울은 각각 부산과 포항만 3등급이고 나머지 지점은 경향성을 보이지 않았고 가을은 전체 지점에서 경향성을 찾을 수 없었다. 월 경향성 분석에서 8월의 안동과 통영을 제외한 전 지점에서 경향성을 확인할 수 있다. 부산의 3, 5월의 2, 3등급과 11월 및 12월 울산의 2, 3등급을 제외한 나머지 월과 지점에서 강우 경향성의 유의성을 찾아 볼 수 없었다.

강우의 증가 경향성을 분석하기 위하여 본 연구는 Sen-Test Slope 분석하고 결과를 Table 6에 도시하였다. 연 Sen-Test Slope 분석에서 최대값은 통영지점의 7.15 최소값

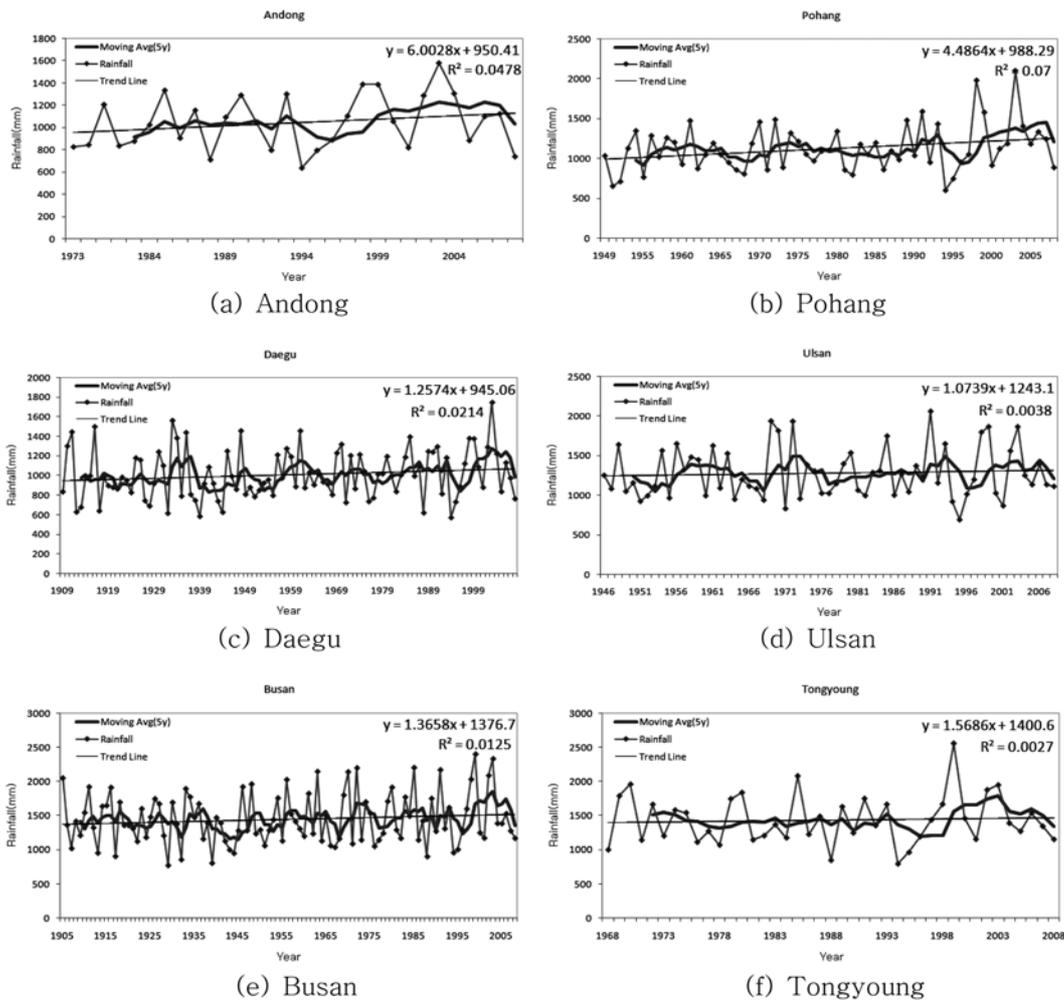


Fig. 2 Yearly rainfall and trend line

Table 5. Result of precipitation trend analysis in year, season and month

Point	Year	Season				Month											
		Spring	Summer	Fall	Winter	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Andong	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Pohang	2	4	1	4	3	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	3	4
Daegu	4	4	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	4	4	4	4
Ulsan	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	4	4	3	2
Busan	4	3	4	4	4	4	3	4	4	2	4	4	2	4	4	4	4
Tongyoung	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

은 울산지점의 0.782를 나타내고 있었으며 유역평균 2.716으로 상당한 증가의 경향을 나타내고 있다. 계절별로는 가을과 겨울에 전 지역에서 감소의 경향을 나타내고 있었으며 안동과 울산지점의 봄철 강우의 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 특히 여름철 강우의 증가 경향은 두드러지게 나타나는데 안동, 포항, 통영 지점에서 증가의 경향이 크게 보이고 있다. 월 Sen-Test Slope 분석에서 안동에서 8월의 2.529로 최대값을 나타내고 있었고, 통영의 4월에서 -1.207의 최소값을 나타내고 있다. 각 지점의 평균으로 낙동강 유역을 분석하면 1월, 5~9월에 증가경향을, 2~4월, 10~12월에 감소경향을 나타내고 있으며 8월에 1.310의 최대 증가를, 4월에 -0.422로 최대 감소로 분석되었다. Sen-Test Slope 계절 분석과 비슷하게 월 분석에서도 봄, 여름의 강우가 증가하고 가을 및 겨울에 강우가 감소함을 알 수 있다. 다음 Table 5의 낙동

강 유역 강우의 연, 계절, 월 경향성 분석결과를 Table 6에 낙동강 유역 강우의 연, 계절, 월 Sen-Test Slope 분석결과를, Fig. 3에 Trend 분석결과와 지점별 분석결과와 Fig. 4에 연, 계절의 지점별 Sen-Test Slope 분석결과를 도시하였다.

### 3.2 강우-유출 탄성도 분석

낙동강 유역의 강우-유출의 탄성도 분석에서 겨울을 제외한 계절과 연에서 모두 탄성도가 1이상으로 크게 나타났다. 연 자료 탄성도 분석에서 낙동강 유역의 평균은 1.666이고, 최대는 1.800의 임하담 유역, 최소는 1.471의 남강담 유역이며 표준편차는 0.130을 보였다. 낙동강 유역의 계절별 탄성도는 봄은 평균 1.570으로 1.257~1.823, 여름은 평균 1.557로 1.297~1.768, 가을은 평균 1.262로 1.082~1.416, 겨울은 평균 0.910으로 0.336~1.144의 분포를 보여 평균적으로 봄,

Table 6. Result of precipitation sen-test slope analysis in year, season and month

Point	Year	Season			
		Spring	Summer	Fall	Winter
Andong	7.150	-0.256	6.229	-0.507	-0.455
Pohang	3.381	0.335	3.055	-0.253	-0.191
Daegu	1.598	0.200	1.599	-0.239	-0.074
Ulsan	0.872	-0.283	2.528	-0.960	-0.511
Busan	1.366	0.666	1.113	-0.318	-0.095
Tongyoung	1.931	0.108	2.890	-1.331	-0.393
Mean	2.716	0.128	2.902	-0.601	-0.287
S.D.	2.332	0.362	1.796	0.448	0.190
S.K.	1.817	0.242	1.492	-1.073	0.008

Point	Month											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Andong	0.227	-0.429	-0.227	-0.920	0.112	1.137	1.200	2.529	0.938	-0.691	-0.380	-0.040
Pohang	0.218	-0.246	0.026	-0.063	0.381	0.971	0.655	1.585	0.884	-0.376	-0.529	-0.220
Daegu	-0.013	0.022	0.131	-0.100	0.128	0.228	0.090	0.870	-0.257	-0.054	-0.044	-0.031
Ulsan	0.163	-0.15	-0.212	-0.256	-0.027	0.650	0.765	1.617	-0.412	-0.204	-0.361	-0.278
Busan	-0.167	0.144	0.155	0.012	0.498	0.130	-0.045	1.028	-0.237	-0.173	0.093	-0.072
Tongyoung	-0.016	-0.067	-0.007	-1.207	1.078	1.437	0.409	0.233	-0.640	-0.098	-0.541	-0.307
Mean	0.069	-0.121	-0.022	-0.422	0.362	0.759	0.512	1.310	0.046	-0.266	-0.294	-0.158
S.D.	0.159	0.202	0.165	0.512	0.400	0.517	0.460	0.786	0.686	0.236	0.261	0.125
SK.	-0.459	-0.344	-0.411	-0.981	1.327	-0.052	0.292	0.310	0.772	-1.434	0.748	-0.146

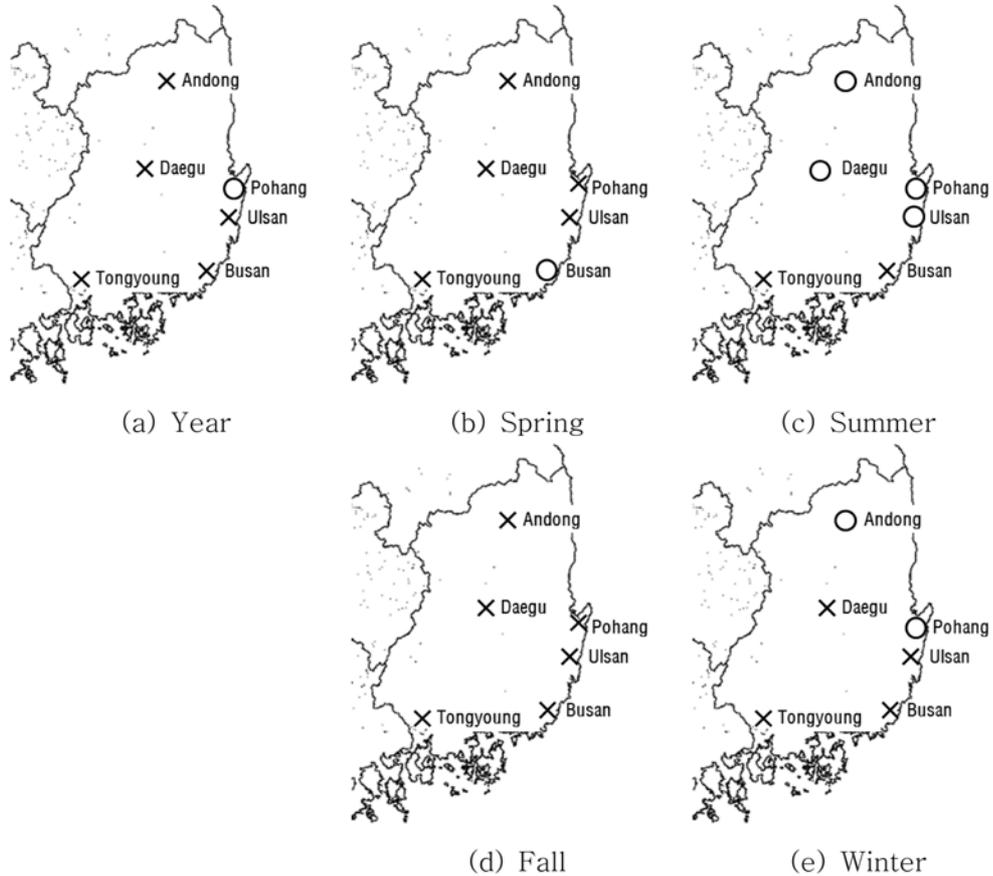


Fig. 3 Result of precipitation trend analysis in year and season (Trend presence O, Trend absence X)

여름, 가을, 겨울 순으로 탄성도가 큰 것으로 분석되었다. 낙동강을 Table 7과 같이 상류, 중류, 하류로 구분하여 구간

별 탄성도를 계절별로 분석한 결과 봄에는 상류, 중류, 하류 순으로 크게 분석되었고, 여름은 중류, 상류, 하류 순으로,

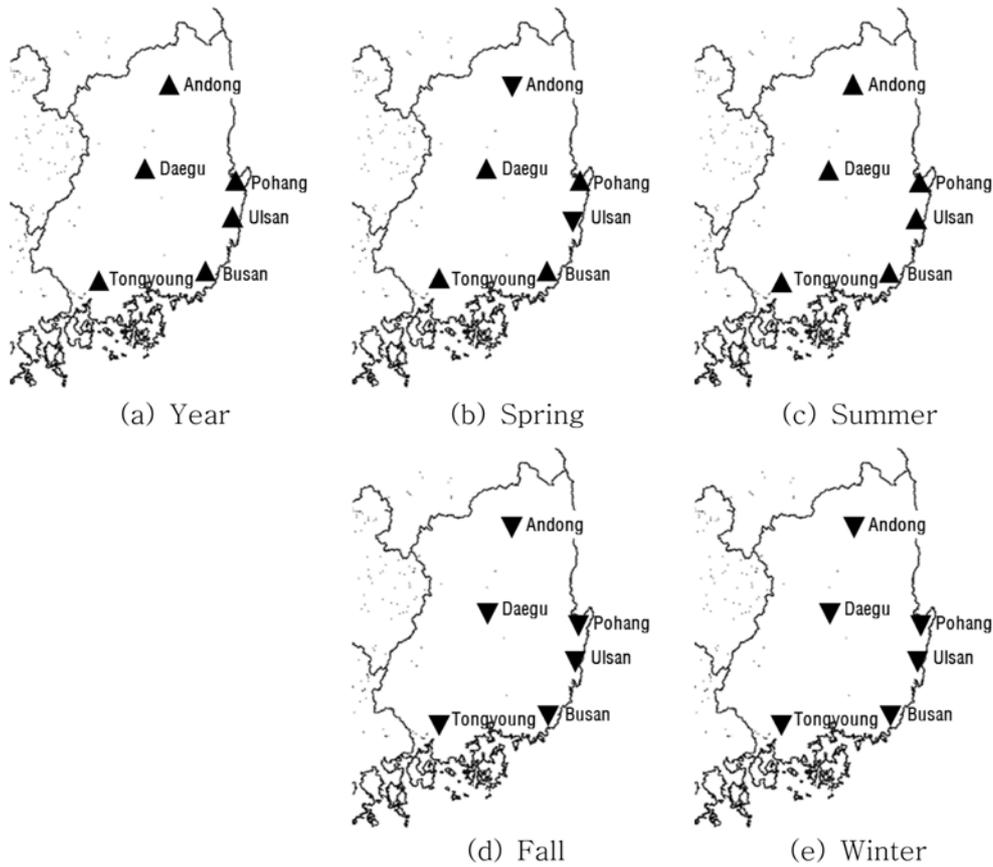


Fig. 4 Result of precipitation sen-test slope analysis in year and season (Upward trend: ▲, Downward trend: ▼, No trend: X)

Table 7. Result of precipitation-streamflow elasticity analysis

Point	Year	Season				
		Spring	Summer	Fall	Winter	
Upper reach	Andongdam	1.555	1.272	1.604	1.281	0.848
	Imhadam	1.800	1.575	1.700	1.398	1.144
	Nakdong	1.782	1.776	1.722	1.187	0.867
	Mean	1.712	1.541	1.675	1.289	0.953
Middle reach	Waegwan	1.759	1.756	1.768	1.181	1.02
	Goryunggyo	1.777	1.823	1.626	1.291	0.986
	Hapcheondam	1.490	1.257	1.370	1.116	0.336
	Mean	1.675	1.612	1.588	1.196	0.781
Lower reach	Jindong	1.685	1.764	1.541	1.416	0.958
	Namriverdam	1.471	1.342	1.297	1.409	1.142
	Nakdongriverestuary	1.676	1.565	1.386	1.082	0.887
	Mean	1.611	1.557	1.408	1.302	0.996
Mean	1.666	1.570	1.557	1.262	0.910	
S.D.	0.130	0.228	0.170	0.128	0.241	
SK.	-0.602	-0.409	-0.391	-0.050	-1.861	

가을은 하류, 상류, 중류 순으로, 겨울은 하류, 상류, 중류 순으로 크게 나타났다. Table 7에 낙동강 유역의 강우-유출 탄성도를 보였다.

Fig. 5에 강우-유출의 연 및 계절의 탄성도의 공간분포 특성을 낙동강 유역도에 도시하였다. 연 탄성 도는 중상류 및 동해안 유역의 증가가 뚜렷하다. 계절 탄성도는 봄은 낙동강 중상류의 낙동, 왜관, 고령교 유역의 높은 탄성도에 기인하여 타 유역에 비해 높은 탄성도 분포를 보이고, 여름은 낙

동강 상류 및 중류에서 높은 탄성도 분포를 보이고 있으며 하류 및 남해안 유역에 낮은 탄성도 분포를 보이고 있다. 가을은 안동댐, 임하댐 유역의 상류 유역과 진동, 남강댐의 하류 유역의 높은 탄성도로 낙동강 유역 동북부와 서남부에서 높은 분포를 나타내고 있다. 겨울철은 중류의 합천댐 유역을 제외한 모든 유역에서 탄성도가 고르게 분포하고 있어 낙동강 유역 전체적으로 고른 분포를 보이고 있다.

본 연구에서는 강우-유출의 계절, 연 자료를 이용하여 탄

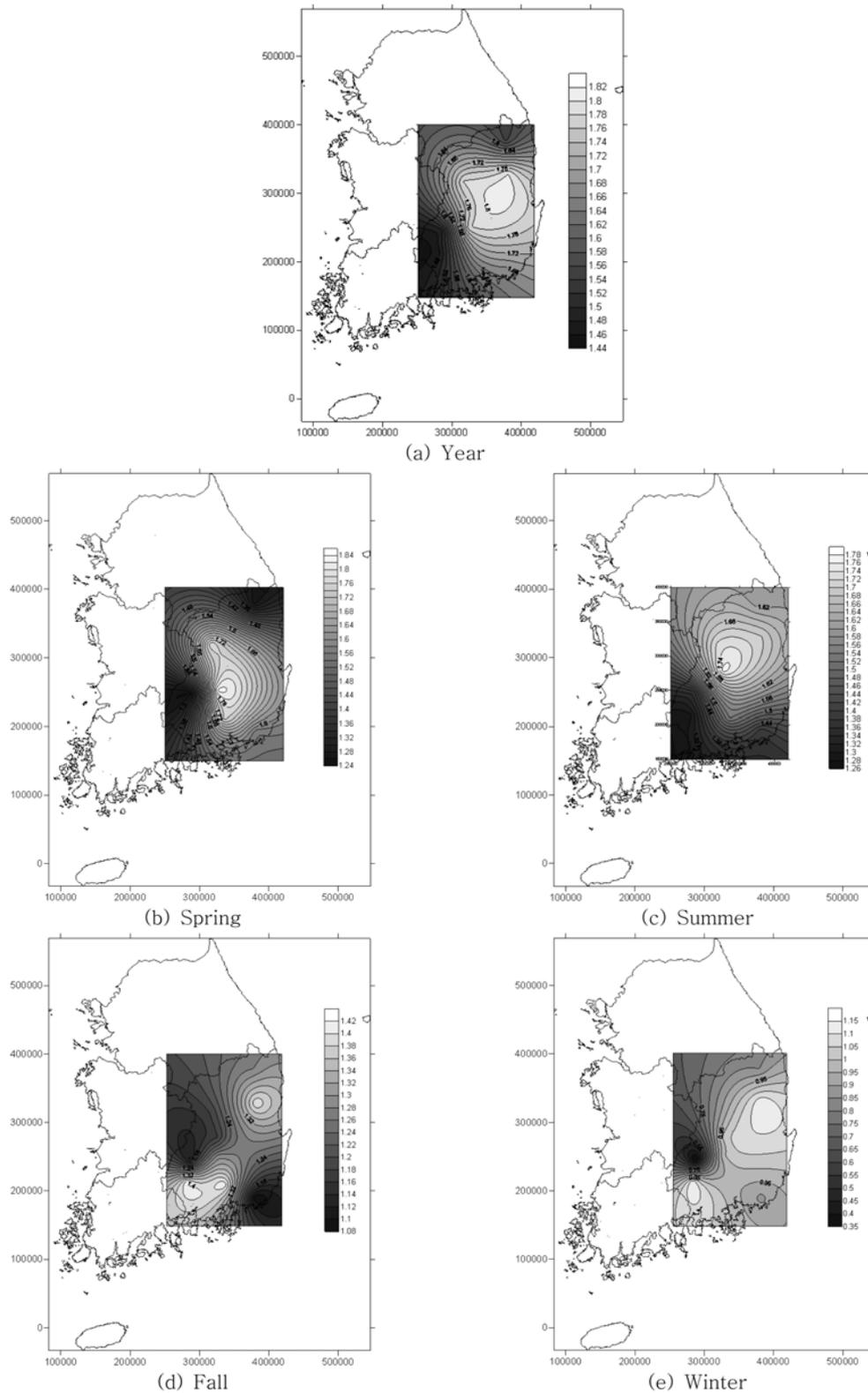


Fig. 5 Spatial distribution of precipitation-streamflow elasticity in Nakdong river watershed

성도를 분석하였고, 강우-유출 탄성도 결과의 타당성을 입증하기 위하여 타 연구와 비교분석을 실시한 바, 국내 강우-유출 탄성도 분석과 관련한 연구결과는 전무한 실정으므로 국외의 연구 결과와 비교, 분석하였다. 대부분의 국외 연구에서는 임의로 유출을 증가하거나(10% 또는 25%), 강우를 감소하여 강우-유출 탄성도를 분석하였다. 탄성도 연구의 주요 방법으로 nonparametric 탄성도를 이용하는데 기후수문학적 조사에 의한 결과를 입증하기에 타당하다고 알려져 있다(A.

Sankarasubramanian, 2001). 다음 Fig. 6은 본 연구의 탄성도 분석결과와 타 연구에서 분석된 탄성도 결과값을 비교 분석한 것이다. 본 연구의 낙동강 유역 강우-유출 평균 탄성도는 1.666이며 미국의 강우-유출의 탄성도 값은 1~5.5의 분포를 보이나 Pease River(Texas)의 5.5를 제외하면 대부분의 유역에서는 1~2의 분포를 보인다. 탄성도 값이 너무 크게 나타난 Pease River(Texas)의 5.5를 포함한 평균은 1.925이지만 Pease River, Texas의 탄성도 값을 제외한 평

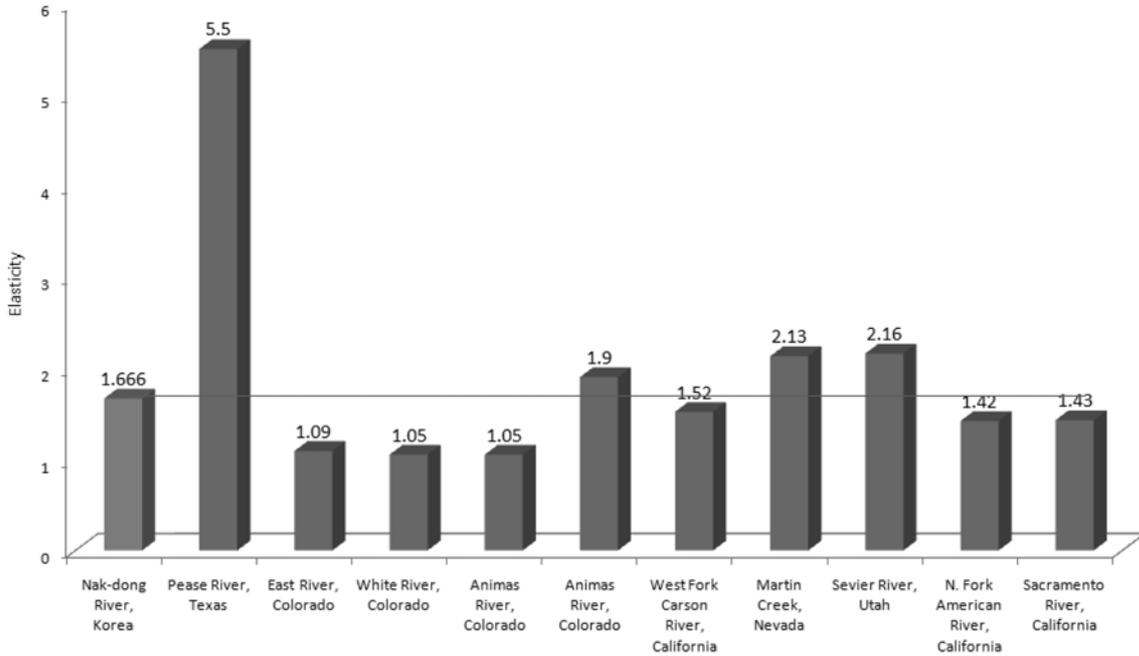


Fig. 6 Comparing elasticity of Nakdong river and American river

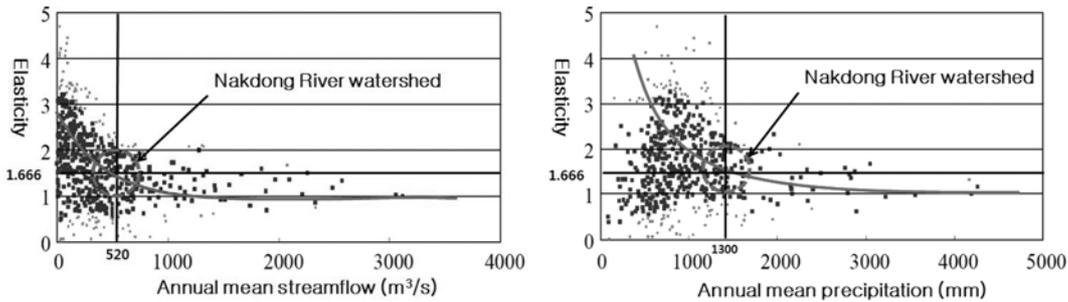


Fig. 7 Elasticity versus streamflow and precipitation

균은 1.528로 본 연구의 대상유역인 낙동강 유역의 1.666과 근사한 값을 나타내고 있다.

낙동강 유역의 연 강우-유출 탄성도는 평균은 1.666이며 표준편차는 0.130이며 1.471~1.800의 분포를 보인다. 이는 Table 4의 주요 기후 지역의 탄성도에서 낙동강 유역은 온대의 습한 여름의 값과 유사하며 이는 우리나라의 기후와 일치한다. 다음 Fig. 7은 Francis Chiew(2007)의 연구 결과로 전 세계 강우 탄성도와 연 평균 유출량과의 관계 및 탄성도와 연 평균 강우량의 관계를 나타내고 있다. 낙동강 유역의 연평균 유출량은 약 520 m<sup>3</sup>/s, 연 평균강우는 약 1300 mm로 Fig. 7에 낙동강 유역의 특성을 표시하여 전 세계의 탄성도 경향과 비교하였다. 정량적인 수치로 비교할 수는 없지만 대략적인 경향선 상에 낙동강 유역의 탄성도 특성이 위치하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 인간의 사회 및 경제 시스템에 커다란 영향을 미치는 기후변화에 대응하기 위하여 낙동강 유역을 대상으로 낙동강 주요 기상청지점에서 강우자료를 획득하여 강우의 경향성 분석을 하였다. 또한 WAMIS에서 제공하는 먼 적평균강우와 장기유출 자료를 수집하여 하천유역의 강우-유

출관계 규명을 위한 강우-유출 탄성도를 분석하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 강우 경향성 분석에서 낙동강 유역 주요 기상청지점의 연 강우가 증가의 경향을 나타내고 있었다. 계절별로는 여름철 강우의 증가경향은 두드러지며 가을과 겨울에 전 지역에서 감소의 경향을 나타내고 있었다.
2. 낙동강 유역 주요지점 탄성도를 분석한 결과 유역 평균은 1.666이고, 전 지점에서 탄성도 값이 1이상으로 분석되어 강우의 증가에 유출은 더 크게 증가하는 유출량의 변동이 민감한 지역이라고 판단된다.
3. 탄성도를 이용한 본 연구의 강우-유출 탄성도 분석결과 낙동강 유역은 1.666이며 타 연구와의 비교분석에서 미국의 강우-유출의 탄성도 값은 1~5.5의 분포를 보이고 있으며, 탄성도 값이 너무 크게 나타난 Pease River, Texas의 탄성도 값을 제외한 타 연구 탄성도의 평균은 1.528로 본 연구의 대상유역인 낙동강 유역의 1.666과 근사한 값을 나타내고 있다.

향후 기후변화에 따른 하천에의 영향을 평가하기 위해서는 수문요소 및 기상요소의 경향성 분석과 각 요소간의 상관성 분석이 다양하게 이루어져야 할 것이며 이를 바탕으로 기후변화에 따른 물환경 적응방안에 관한 연구가 더욱 활발히 진행되어야 할 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업의 기 후변화에 의한 수문 영향분석 및 전망기술과제의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 국토해양부(2008) 2007년도 유량조사 보고서, 제4권 낙동강 유량 측정.
- 김남원, 원유승(2004) 강우-유출관계에 의한 도시지역의 장기유출 특성 비교. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 610-614.
- 김철겸 김남원(2008) 소양댐 상류유역에 대한 강우-유출-유사 상호 관계 규명. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 2095-2099.
- 신현석, 김상단, 강두기, 손태석(2009) 기후변화를 고려한 환경유량 산정 및 물환경 적응방안. 한국환경정책평가연구원.
- 유철상, 김경준(2006) 강우의 특성 변화에 따른 유출 특성의 변화분석 소유역과 중규모 유역에의 적용 비교. **한국수자원학회 논문집**, 한국수자원학회, Vol. 39, No. 5, pp. 417-430.
- 이기하, 타카라 카오루, 타치카와 야수토, 사야마 타카히로(2009) 분포형 강우-유출 모형의 매개변수 불확실성에 대한 시·공간적 유역 응답. **한국수자원학회 학술대회논문집**, 한국수자원학회, pp. 2215-2219.
- 환경부(2008) 기후변화 현황 및 대책 수립. 한국환경정책평가연구원.
- Sankarasubramanian, A., Richard M. Vogel, James, F. Limbrunner.

- (2001) Climate elasticity of streamflow in the united states. *Water Resources Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 1771-1781.
- David Adamson, Thilak Mallawaarachchi, John Quiggin (2007) Climate change and climate uncertainty in the Murray-Darling Basin. *51st Australian Agricultural and Resource Economics Society Conference*, Queenstown New Zealand, pp. 2-26.
- Francis Chiew (2007) Climate change implication on Australian river flows. *3rd International Symposium on Riverine Landscapes*.
- Zhang, G.-H., Nearing, M.A., and Liu, B.-Y. (2005) Potential effect of climate change on rainfall erosivity in the yellow river basin of China. *American Society of Agriculture Engineers*, Vol. 48, No. 2, pp. 511-517.
- IPCC (2007) Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry ML, Canziani OF, Palutikof LP, van der Linden PJ, Hanson CE(eds), *Cambridge University Press*, Cambridge.
- Richard, M. Vogel, Maura C. Allaire, Charles N. Kroll (2006) The hydromorphology of an urbanizing watershed using multivariate elasticity. *Advances in Water Resources*.
- Schaake, J.C. (1990) *From climate to flow, in Climate Change and U.S. Water Resources*. John Wiley, New York.
- Vogel, R.M., and Wilson, C. Daly. (1999) Regional regression models of annual streamflow for the United States. *J. Irrig. Drain. Eng.*, Vol. 125, No. 3, pp. 148-157.

(접수일: 2010.6.15/심사일: 2010.7.30/심사완료일: 2010.8.27)