

RCP 4.5 기후변화 시나리오 기반의 낙동강 유역의 강우-유출 탄성도 분석

장영수, 박재록, 신현석*
부산대학교 사회환경시스템공학과

Precipitation-Streamflow Elasticity analysis of Nakdong River Based on RCP 4.5 Climate Change Scenario

Young-su Jang, Jae-Rock Park, Hyun-suk Shin*

Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National University

요약 기후 변화는 기후를 구성하는 대기, 해양, 생물, 육지 등의 다양한 구성 요소에 작용하여 자연 생태계와 인간의 사회 경제 활동에 큰 영향을 미친다. 기후 변화의 영향을 예측하고 방어대책을 마련하는 것은 변화된 기후에 적응하기 위한 중요한 연구가 될 것이다. 본 연구에서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 개발된 RCP 4.5 시나리오를 이용한 낙동강 권역의 강우-유출 탄성도 분석을 실시하였다. 제어적분 200년의 남한 상세 기후변화 시나리오를 수집하여 낙동강 권역에 대해 강우량을 산정하고, Tank 모형을 통해 산정된 유출량을 2가지 시나리오(계절, 연별)로 추출하여 탄성도 분석을 실시하였다. 본 연구의 결과를 통해 우리나라의 기후가 2100년까지 매우 습한 형태 초기 1.129 (0.851~1.523), 중기 1.075 (0.756~1.302), 후기 1.043(0.882~1.325)의 기후로 변해 갈 것이라고 예상 하였다. 본 연구의 결과를 통해 기후 변화에 따른 수자원 관리 및 효율적인 수리구조물 적용 방안 및 변화된 기후에 대한 빠른 적응에 대한 연구에 활용 할 수 있을 것이다.

Abstract Climate change affects the natural ecosystem and human socioeconomic activities by acting on various constituents such as the atmospheric, oceanic, biological, and land constituents of the climate. Predicting the impacts of ongoing climate change will be an important factor in adapting to the climate of the future. In this study, precipitation-streamflow elasticity analysis of the Nakdong River area was conducted using the RCP 4.5 scenario developed by the IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Precipitation and streamflow in the Nakdong River area was analyzed using monthly, seasonal, and yearly data. Results found that the climate would become very humid climate by 2100. Results of this study can be applied to adaptation of climate change, management of water resources and efficient utilization of hydraulic structures.

Keywords : Climate Change, Elasticity, Precipitation-Runoff, RCP(Representative Concentration Pathways), Streamflow

1. 서론

기후변화로 인한 기후 시스템에 변화는 인간의 생활에 큰 영향을 미치고 있다는 증거가 계속해서 늘어나고 있다. 구체적으로, 대기 및 해양의 온난화, 전 지구적 물 순환의 변화, 눈과 빙하의 감소, 그리고 평균 해수면 상승

등 등이 있으며, 이는 20 세기 중반 이후 관측된 온난화가 가장 주된 원인일 가능성이 높다. 현재까지 기후변화의 원인은 밝혀지지 않았지만, 지금까지 관측된 기후변화가 자연 생태계와 인간 생활에 많은 영향을 초래했으며, 이는 기후가 변함에 따라 자연과 인간이 민감하게 반응한다는 것을 의미한다[1]. 1912년부터 2008년까지 우

본 논문은 환경부 「기후변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었음(과제번호 201613130001).

*Corresponding Author : Hyun-suk Shin(Pusan National Univ.)

Tel: +82-51-510-3521 email: hsshin@pusan.ac.kr

Received October 19, 2017

Revised November 23, 2017

Accepted December 8, 2017

Published December 31, 2017

리나라의 연평균 강수량은 해에 따라 편차가 크게 나타나고 있지만, 연평균 강수량 변화는 강릉(3.4mm/년), 서울(2.1mm/년), 부산(1.9mm/년), 대구(1.7mm/년), 목포(1.3mm/년)에서 장기적으로 증가추세에 있다[2]. 이러한 기후변화로 인해 현재 설계기준으로는 돌발호우 등에 의한 홍수 및 침수피해 등에 대한 방어가 힘들 것이며, 장기적인 유역관리를 위해서 기후변화에 의한 강우 및 유출 등의 수문변화에 대한 대처가 필요할 것이다.

기후변화에 대한 수문변화에 대한 추세를 분석하기 위해서는 기후변화에 따른 미래자료의 생성과 수문요소 간의 장기간의 자료를 이용하여 분석이 이루어져야 한다. 이에 기후변화 시나리오를 산출하는 방법으로 국립기상연구소에서는 온실가스 배출 시나리오인 RCP 시나리오에 근거하여 기후변화 전망 자료를 산출하였다. 이를 이용한 시나리오별 수문자료 예측 또는 RCP 시나리오에 대한 응용지수 생성에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나 RCP 시나리오를 이용한 수문자료의 추세분석에 대한 연구는 전무한 실정이며 강우 유출의 관계분석에 대한 연구가 수행중이다. 국내의 RCP 시나리오에 대한 연구는 성장현 등(2012)는 HadGEM3-RA 모델을 통해 RCP 시나리오를 분석하여 21세기 말 우리나라 수도권과 남부해안 지역을 중심으로 집중호우 발생 빈도수의 증가와 발생의 양극화가 심화 될 것으로 예상하였고[3], 황창수 등(2014)은 RCP 시나리오에 따른 회야강의 유출량 및 유사의 변화가 도시발전예에 의한 토지피복의 변화가 유출특성을 변화 시키며, 식생에 의해 유사가 억제됨을 예상하였다[4]. 장선숙 등(2015)는 RCP 기후변화 시나리오에 따른 임하댐 유역의 수문순환 전망에 대한 연구를 하여 유역의 물수지 구성의 비율의 변화는 크게 바뀌지 않을 것으로 예상하였으며[5], 류정훈 등(2015)는 RCP 시나리오에 따른 계룡저수지 유역의 설계홍수량을 산정하였으며, RCP4.5 시나리오에 대하여 2020년대까지 홍수량이 증가 후, 2050년대까지 감소하며, 2080년대까지 크게 증가할 것으로 예상하였다[6]. 이혜숙 등(2016)은 RCP 시나리오 따른 용담댐 유입하천의 유량 및 수온변화를 분석하여 RCP 시나리오별 평균 수온 - 5.1~8.1%의 변화를 분석하였다[7]. 또한 물관리 지수에 관한 연구는 손태석 등(2010)은 기후변화에 따른 강우 경향성 및 탄성도 분석을 실시하여 낙동강 권역 내 여름철 강우 증가의 경향을 평가하고 강우에 대한 유출량 변동이 민감한 지역을 산정하였고[2], 양정석 등(2012)은

경향성 분석을 통한 금강과 낙동강 유역의 보 지점 가뭄 취약성 지수를 개발하여 구미보, 상주보, 합천보, 칠곡보 3개 보에 대하여 수자원 확보 방안이 필요하다고 예상했으며[8], 또한 이수지 등(2013)은 RCP 시나리오 기반 국내 열지수와 불쾌지수를 개발하였다[9]. 국외에서는 Andersen et al.(2006)은 Gjern강 유역을 대상으로 SRES A2 시나리오를 이용하여 기후변화에 대하여 토질에 따라 TN이 +6.9~+8.5% 변화하는 것으로 분석하였고 [10] David Adamson et al. (2007)은 기후변화로 인한 강우와 유출량의 변동성에 의한 영향으로 농업분야에 대해 2억 5천만 달러의 사회적 가치가 부과 될 것으로 예상하였고[11], Junxu Chen et al.(2014)은 중국 동부 유역을 대상으로 RCP 2.6, 4.5 및 8.5 시나리오를 이용하여 몬순지역에서의 기온-유출 탄성도와 강우-유출 탄성도 분석을 실시하여 기온-유출의 경우 강우-유출 탄성도보다 민감도가 낮다고 분석하였다[11].

수자원 관리는 인간의 기본 생활을 위해 반드시 필요한 국가 정책으로 수환경 부존량 평가를 수행하기 위하여 한강, 낙동강, 금강 그리고 영산강 등과 같은 주요 대권역에 대한 장기 물순환 분석이 필요하다. 그러나 국외 연구의 경우 시나리오 격자의 크기의 한계, 한반도 기후와는 다른 곳에 대하여 연구가 이루어 졌으며, 국내의 경우 기후 변화에 따른 수자원 수량은 댐유역의 소규모 분석, 또는 기후에 의한 수질, 호우 빈도 등에 대하여 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 우리나라의 주요 대권역 중 하나인 낙동강에 대하여 RCP 시나리오 4.5를 이용, 강우 및 유출 자료를 통하여 낙동강 각 단위유역의 강우와 유출 관계 및 기후변화에 의한 영향을 분석하였다. 낙동강 유역을 대상으로 하여 강우-유출 탄성도 분석을 위하여 기상청에서 제공하는 남한 상세 RCP 4.5 시나리오의 강우·유출 자료를 수집하였다. 향후 본 연구의 결과를 토대로 하여 기후변화로 인한 낙동강 전체 각 유역의 수공 구조물의 이수, 치수 능력의 효율적인 증대 방안과 물환경 적응방안 연구에 활용될 수 있을 것이다.

2. 연구방법

2.1 대상 유역

낙동강 유역은 경상도 지역의 물공급에 있어 중요한 수원으로서 자리 잡고 있으며, 수자원 관리는 국가 정책 수

Table 1. Types of representative concentration pathway [13]

| Name | Radiative forcing | Concentration | Pathway shape |
|----------|--|--|---------------------------------|
| RCP 8.5 | >8.5 W/m ² in 2100 | > ~1370 CO ₂ -eq in 2100 | Rising |
| RCP 6 | ~6 W/m ² at stabilization after 2100 | ~850 CO ₂ -eq (at stabilization after 2100) | Stabilization without overshoot |
| RCP 4.5 | ~4.5 W/m ² at stabilization after 2100 | ~650 CO ₂ -eq (at stabilization after 2100) | Stabilization without overshoot |
| RCP 3-PD | peak at ~3 W/m ² before 2100 and then decline | peak at ~490 CO ₂ -eq before 2100 and the decline | Peak and decline |

립에 있어 중요한 사안으로 적용된다. 따라서 기후변화에 따른 수환경 자원 및 부존량의 평가가 필요하며, 이는 대권역의 장기적 분석을 통해 미래를 위한 수자원 관리의 방향을 설정 할 수 있을 것이다. 우리나라의 주요 대권역 중 하나인 낙동강은 한반도 동남부(동경 127°

29'~129° 18', 북위 35° 03'~37°13')에 위치한다. 유역면적은 남한의 약 1/4에 해당하는 23,817.3km²이며 유역의 평균 폭은 45.36 km, 유로연장은 521.5km, 유역의 동서장은 약 120km, 남북장은 약 200km이다. 낙동강 본류는 동쪽으로 태백산맥과 서북쪽의 속리산, 덕유산, 지리산으

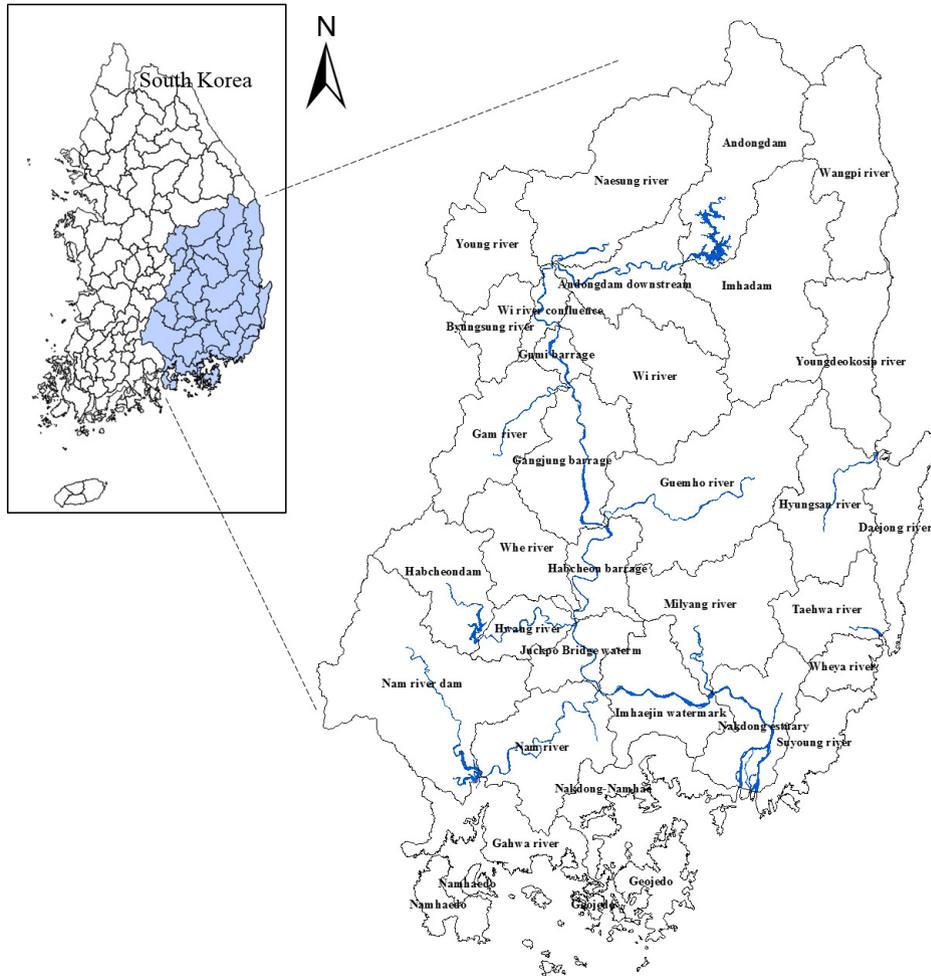


Fig. 1. Catchment basin map of Nakdong river

로 이어지는 소백산맥을 유역 경계로 하여 낙동강 유역의 중심부를 관류하고 있으며, 수원은 강원도 태백산(EL. 1,549m)에서 발원하여 남류하며 부산광역시 사하구 하단동 지점에서 남해안으로 유입한다. 낙동강 권역의 하천 및 유하 형태를 Fig. 1.에 도시하였다[1]. 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 최근 10년 동안의 평균 연강수량은 1,265mm이며, 수자원 부존량은 391억m³/년이며 유출량은 272억m³/년으로서 유출률은 약 69.6%이다.

2.2 대표농도경로(RCP) 시나리오

본 연구에서 사용한 RCP 시나리오는 남한 상세(1km) 기후변화 시나리오이며, 해당 시나리오는 지역기후모델을 통해 생산된 한반도(12.5km) 기후변화 시나리오를 바탕으로 통계적 상세화 과정을 통해 생산되었다. 관측 자료(2000~2100)를 PRIDE 모델에 적용하여 1km 해상도의 관측격자 자료를 생산하여 기후 값으로 사용하였다. [12]. 온실가스 농도 변화에 따라 RCP 2.0/4.5/6.0/8.5 시나리오가 생성되었으며, 분석을 위해 RCP 4.5 시나리오를 사용하였으며, 2010~2100년 기간 중 2010~2040년을 초기 시나리오, 2041~2070년을 중기 시나리오, 2071~2100년을 후기 시나리오로 분석하였으며, 각 초기, 중기, 후기 시나리오에 대하여 계절별, 연별 탄성도 분석을 실시하였다. RCP 4.5 시나리오의 경우 2100년 후에 약 4.5W/m²의 복사강제력을 갖는 저농도 시나리오로서 RCP 8.5의 온실가스의 극단적 고농도 시나리오와 RCP 2.6의 강력한 온실가스 감축 정책 시행을 통한 온실 가스 농도 저하 시나리오와 비교하여 2100년 이후 안정적인 농도를 유지하기에 RCP 4.5 시나리오를 선택하였다. 각 RCP 시나리오에 대한 CO₂ 농도는 Table 1에 정리하였다.

2.3 분석자료 수집

탄성도 분석을 위한 강우자료와 유출 자료는 기상청에서 제공하는 RCP 4.5 시나리오의 격자 자료에서 33개의 낙동강 단위유역 2010년 1월 1일부터 2100년 12월 31일까지의 일 단위 강우자료를 취득하여 월, 계절, 연 자료로 재추출하였다. 유출 자료의 경우 RCP 4.5 시나리오의 강우 자료를 TANK 모형에 입력하여 각 유역별 유출량을 산정하였다.

Table 2. Range of elasticity value in major climates zone [14]

| Climate Zone | Number of Catchment | Median of Elasticity | Range of Elasticity |
|-------------------------------|---------------------|----------------------|---------------------|
| Tropical(A) | 79 | 1.7 | 0.8~3.1 |
| Very wet(Af, Am) | 20 | 1.2 | 0.8~1.9 |
| Moderately wet(Aw) | 59 | 2.0 | 0.9~3.3 |
| Arid(B) | 45 | 1.8 | 0.4~2.9 |
| Cold arid(BWk, BSk) | 32 | 1.6 | 0.4~3.1 |
| Warm arid(BWh, BSh) | 13 | 2.0 | 0.5~2.5 |
| Temperate(C) | 262 | 1.9 | 0.9~3.1 |
| 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 |
| Cold(D) | 136 | 1.1 | 0.5~1.9 |

2.4 탄성도 분석

탄성도(Elasticity)분석은 비매개변수 두 개의 기후 인자를 이용하여 기후 인자간의 상관관계를 나타내고, 두 기후 인자간의 변화에 대한 민감도를 분석할 수 있으며, 일반적으로 강우-유출 간의 상관관계 분석 시 주로 사용되어 왔다.

본 연구에 분석을 위해 사용된 탄성도의 개념은 ScHaake(1990)가 처음으로 도입한 Eqs. (1)과 같으며 [16], 실제 탄성도 산정은 Eqs. (2)를 이용하였다.

$$\epsilon_p(P, Q) = \frac{dQ/Q}{dP/P} = \frac{dQ}{dP} \frac{P}{Q} \quad (1)$$

$$\epsilon_p(P, Q) \text{ median} \left[\frac{Q_t - \bar{Q}}{P_t - \bar{P}} \frac{\bar{P}}{\bar{Q}} \right] \quad (2)$$

Eqs. (1)은 ScHaake(1990)가 처음 도입한 기후변화에 대한 유량의 민감도 평가 분석법으로 P 는 강우, Q 는 유출량을 나타낸다. dQ 는 유출량의 순간 변화율, dP 는 강우의 순간 변화율을 뜻한다. 그러나 강우와 유출량의 순간 변화율은 계산 할 수 없는 경우가 절대적이며, 이에 Sankarasubramanian 등(1999)은 Eqs. (2)과 같이 중앙값과 평균값 개념을 적용한 비매개변수적 방법을 제안하였다[17]. 제안된 Eqs. (2)는 유량의 변화량이 강우량의 변화와 비례관계가 있음을 이용하며, Q_t 및 P_t 는 각각 해당 시간의 강우 및 유출량을 가리킨다. \bar{P} , \bar{Q} 는 강우 및 유출량의 평균값을 의미한다. 비매개변수적 탄성도 분석법은 유출에 대한 탄성도를 얻기 위해 여러 기후 인자에 대해 적용 할 수 있다.

Table 3. Result of precipitation-streamflow elasticity analysis (RCP 4.5)

| Number of point | Year | | | Spring | | | Summer | | | Fall | | | Winter | | |
|-----------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|-------------------|-----------------|------------------|
| | Early (2010-2040) | Mid (2041-2070) | Late (2071-2100) | Early (2010-2040) | Mid (2041-2070) | Late (2071-2100) | Early (2010-2040) | Mid (2041-2070) | Late (2071-2100) | Early (2010-2040) | Mid (2041-2070) | Late (2071-2100) | Early (2010-2040) | Mid (2041-2070) | Late (2071-2100) |
| 20010 | 1.145 | 1.029 | 1.045 | 1.015 | 0.140 | 0.499 | 0.891 | 0.815 | 0.230 | 0.013 | 0.054 | 0.240 | 0.099 | 0.679 | 0.027 |
| 20020 | 1.241 | 1.249 | 1.065 | 1.422 | 1.648 | 0.893 | 0.774 | 1.158 | 0.740 | 0.281 | 0.149 | 0.102 | 0.243 | 0.725 | -0.115 |
| 20030 | 1.227 | 1.095 | 1.056 | 0.669 | 0.250 | 0.599 | 0.728 | 1.210 | 0.464 | 0.146 | 0.240 | 0.260 | -0.061 | 0.328 | -0.115 |
| 20040 | 1.363 | 1.138 | 1.129 | 0.656 | -0.024 | 0.604 | 1.034 | 0.520 | 0.445 | 0.152 | 0.280 | 0.127 | -0.019 | 0.620 | 0.079 |
| 20050 | 1.199 | 1.035 | 1.087 | 0.586 | 0.107 | 0.699 | 0.941 | 0.360 | 0.405 | 0.030 | 0.352 | 0.006 | 0.135 | 0.431 | 0.006 |
| 20060 | 1.173 | 1.022 | 1.004 | 0.486 | 0.324 | 0.797 | 0.959 | 0.491 | -0.063 | 0.329 | 0.388 | -0.039 | 0.116 | 0.009 | -0.037 |
| 20070 | 1.182 | 1.044 | 1.033 | 0.555 | 0.133 | 0.742 | 0.962 | 0.639 | -0.196 | 0.049 | 0.339 | -0.084 | -0.006 | 0.392 | -0.058 |
| 20080 | 1.211 | 1.122 | 1.033 | 0.878 | 1.587 | 0.976 | 0.422 | 1.274 | 0.832 | 0.178 | 0.246 | 0.193 | -0.195 | 0.965 | -0.131 |
| 20090 | 0.851 | 0.756 | 1.027 | 0.439 | 0.836 | 0.338 | 0.855 | 0.522 | -0.125 | 0.183 | 0.233 | -0.026 | -0.018 | 0.280 | -0.042 |
| 20100 | 1.132 | 0.941 | 0.989 | 0.492 | 0.520 | 0.791 | 1.110 | 0.670 | 0.730 | 0.123 | 0.334 | 0.025 | 0.055 | 0.226 | 0.054 |
| 20110 | 1.099 | 1.093 | 1.023 | 0.443 | 0.895 | 0.390 | 0.709 | 0.976 | 0.877 | 0.121 | 0.300 | -0.064 | -0.063 | 0.513 | 0.045 |
| 20120 | 1.288 | 1.300 | 1.325 | 0.191 | 1.009 | 0.094 | 0.561 | 0.884 | 0.780 | 0.116 | 0.102 | 0.539 | 0.067 | 0.531 | -0.020 |
| 20130 | 0.972 | 0.967 | 0.882 | 0.342 | 1.114 | 0.604 | 0.504 | -0.139 | 0.907 | 0.080 | 0.382 | 0.002 | 0.087 | 0.391 | -0.091 |
| 20140 | 0.969 | 1.117 | 1.127 | 0.488 | 0.079 | 0.265 | 0.654 | 0.470 | 0.633 | 0.014 | 0.258 | 0.251 | -0.169 | 0.337 | -0.057 |
| 20150 | 0.883 | 0.994 | 0.960 | 0.516 | 0.578 | 0.740 | 0.561 | 0.289 | 0.666 | 0.258 | 0.445 | -0.069 | 0.007 | 0.018 | 0.039 |
| 20160 | 1.077 | 1.101 | 1.071 | -0.193 | 1.179 | 1.033 | 0.622 | 0.888 | 1.211 | 0.159 | 0.445 | 0.199 | 0.028 | 0.222 | 0.056 |
| 20170 | 1.158 | 1.035 | 0.961 | 0.399 | 0.796 | 0.738 | 0.821 | 0.523 | 0.787 | 0.165 | 0.474 | 0.460 | -0.087 | 0.277 | 0.058 |
| 20180 | 0.939 | 1.001 | 1.035 | 0.539 | 1.037 | 0.799 | 0.880 | 0.805 | 0.652 | 0.152 | 0.432 | -0.024 | -0.005 | 0.292 | 0.016 |
| 20190 | 0.985 | 0.907 | 0.910 | 0.289 | 0.629 | 0.810 | 0.940 | 0.798 | 0.368 | 0.161 | 0.440 | 0.278 | -0.072 | 0.215 | 0.055 |
| 20200 | 1.091 | 1.000 | 0.994 | 0.755 | 0.850 | 0.617 | 0.687 | 0.739 | 0.582 | 0.210 | 0.197 | 0.205 | -0.160 | -0.022 | -0.069 |
| 20210 | 1.382 | 1.234 | 1.236 | 1.154 | 1.408 | 0.529 | 0.693 | 1.100 | 0.705 | 0.225 | 0.247 | 0.263 | -0.081 | 0.212 | -0.281 |
| 20220 | 1.028 | 1.174 | 0.982 | 0.668 | 0.748 | 0.711 | 0.421 | 0.288 | 0.672 | 0.201 | -0.056 | 0.403 | 0.018 | -0.014 | -0.119 |
| 21010 | 1.371 | 1.296 | 1.167 | -0.097 | 0.161 | 0.646 | 0.993 | 0.537 | 0.939 | 0.245 | 0.331 | 0.395 | 0.108 | 0.299 | -0.024 |
| 22010 | 0.927 | 1.010 | 0.924 | 0.333 | 0.607 | 0.584 | 0.421 | 0.744 | 0.571 | 0.186 | -0.085 | 0.151 | 0.015 | 0.015 | -0.015 |
| 23010 | 1.251 | 1.162 | 1.062 | -0.060 | 1.058 | 1.065 | 0.889 | 1.001 | 0.898 | 0.096 | -0.072 | 0.284 | 0.194 | 0.138 | -0.040 |
| 23020 | 1.038 | 1.132 | 0.927 | 0.289 | 0.967 | 0.881 | 0.303 | 0.778 | 0.439 | 0.280 | -0.126 | 0.407 | 0.199 | 0.024 | -0.128 |
| 24010 | 1.254 | 1.179 | 1.009 | 0.555 | 0.053 | 0.937 | 0.731 | 0.687 | 0.607 | 0.273 | 0.322 | 0.212 | 0.238 | 0.297 | -0.129 |
| 24020 | 1.523 | 1.147 | 1.252 | 0.789 | 0.362 | 1.061 | 0.910 | 0.178 | 0.522 | 0.275 | 0.544 | -0.268 | 0.143 | 0.899 | -0.013 |
| 24030 | 1.367 | 1.302 | 1.212 | 0.151 | 1.045 | 1.221 | 0.349 | 0.664 | 1.098 | 0.302 | 0.288 | 0.290 | 0.047 | 0.552 | 0.260 |
| 25010 | 1.070 | 0.931 | 0.918 | 0.411 | 0.675 | 0.843 | 0.481 | 0.608 | 0.484 | 0.146 | 0.339 | 0.468 | 0.100 | 0.123 | -0.022 |
| 25020 | 0.915 | 0.968 | 1.041 | 0.756 | 1.021 | 0.916 | 0.535 | 0.682 | 0.581 | 0.128 | 0.277 | 0.284 | 0.131 | 0.131 | -0.025 |
| 25030 | 0.961 | 0.936 | 1.000 | 0.298 | 0.978 | 1.054 | 0.315 | 0.547 | 0.449 | 0.171 | -0.026 | 0.404 | 0.110 | 0.214 | 0.104 |
| 25040 | 0.990 | 1.049 | 0.939 | 0.514 | 0.808 | 1.152 | 0.270 | 1.096 | 0.536 | 0.140 | 0.309 | 0.383 | 0.032 | 0.275 | 0.081 |
| Mean | 1.129 | 1.075 | 1.043 | 0.507 | 0.714 | 0.746 | 0.695 | 0.691 | 0.589 | 0.169 | 0.254 | 0.190 | 0.038 | 0.321 | -0.020 |
| S.D. | 0.164 | 0.122 | 0.103 | 0.329 | 0.444 | 0.254 | 0.235 | 0.306 | 0.307 | 0.081 | 0.172 | 0.192 | 0.110 | 0.250 | 0.094 |
| SK | 0.336 | -0.041 | 0.935 | 0.374 | 0.087 | -0.436 | -0.191 | -0.298 | -0.721 | -0.047 | -0.777 | -0.295 | -0.165 | 0.841 | 0.114 |

Fracis Chiew(2007)가 제안한 주요 기후지역에 대한 탄성도 분포를 통하여 분석 유역의 탄성도 결과값과 비교하여 기후 조건을 판단해 볼 수 있다. 주요 기후에 대한 유역의 탄성도 분석결과는 다음 Table 2.와 같으며, 분석 결과 중 탄성도 범위를 벗어난 유역은 매우 춥거나, 매우 건조한 열대 지역으로 판별하였다.

3. 결과

3.1 낙동강 단위유역 강우-유출 탄성도 분석

낙동강 유역의 강우-유출 탄성도 분석결과 전체기간

(2010-2100)에 걸쳐 봄 계절에 1이상의 탄성도가 가장 많이 나타났다. 연별 탄성도 분석에서 낙동강 유역 평균은 초기 1.129, 중기 1.075, 후기 1.043으로 중-후기로 갈수록 탄성도가 1에 가까워지는 추세를 보였다. 최대 탄성도의 경우 초기-영덕오십천 1.523, 중기-대중천 1.302, 후기-금호강 1.325로 분석되었으며, 최솟값은 초기, 중기에 걸쳐 구미보 유역이 각각 0.851, 0.756을 보였으며, 후기는 회천이 0.882의 탄성도를 보였다. 계절별 분석 결과로는 봄 -0.193~1.648, 여름 -0.196~1.274, 가을 -0.268~0.544, 겨울 -0.281~0.965의 분포를 보이며 평균적으로 여름(0.658), 봄(0.656), 가을(0.204), 겨울(0.113) 순의 탄성도 분포를 보였다. 특히 겨울의 경우

단위유역의 탄성도가 0보다 작은 경우가 많았으며, 특히 후기 겨울의 권역 평균 탄성도는 -0.020 으로, 초기 0.038 , 중기 0.321 보다 현저히 낮은 탄성도를 보였다. 또한 계절에 대하여 봄, 여름의 경우 0.6 이상의 높은 탄성도를 보였으며, 가을 겨울의 경우 $0.1-0.2$ 의 비교적 낮은 탄성도를 보였다. 봄, 여름은 대부분 0.2 이상의 표준편차를 보였으며, 가을 겨울은 0.1 의 표준편차를 보였다. 이는 봄, 여름의 경우 유역의 특성에 따라 유출량의 변화가

극단적일 수 있으나, 가을, 겨울의 계절에는 유출량의 변화가 크게 발생하지 않을 것으로 보인다.

아래의 Fig. 2.에 강우-유출의 연 탄성도 공간분포 특성을 낙동강 유역도에 도시하였다. 연 탄성도는 전 기간(2010-2100)에 걸쳐 낙동강 중상류 유역과 동해안에 위치한 유역의 증가가 뚜렷하다. 특히 금호강, 밀양강, 영덕오십천 등 낙동강 권역 중동부에 위치한 유역의 경우 초기, 중기, 후기 모든 구간에 대하여 높은 탄성도 분포

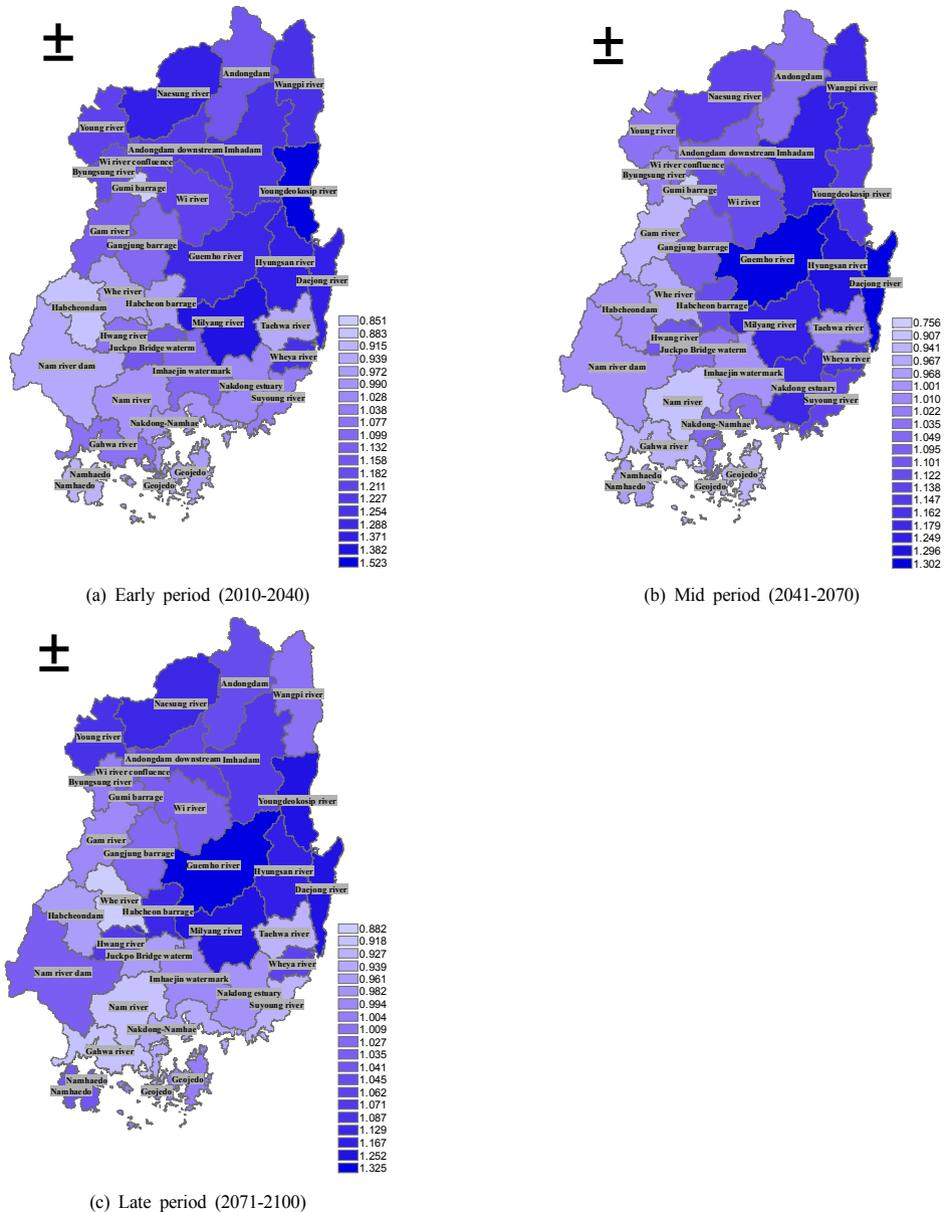


Fig. 2. Result of annual precipitation-streamflow elasticity analysis

를 보인다. 특히 낙동강 권역의 남서부에 위치한 남강, 남강댐, 합천댐, 가화천 유역은 지리산, 덕유산, 가야산의 영향으로 기후변화에 의한 강우량의 변동이 적은 것으로 보인다.

본 연구에서 실시한 강우-유출 탄성도 분석은 기후수문학적 조사에 대한 결과를 입증하기에 타당하며[17], 국내 과거 자료에 대해 타당성을 검증한 바 있다[2]. 또한 RCP 시나리오를 활용한 탄성도 분석에 대한 국내 연구결과는 전무한 실정이다. Table 3.에 낙동강 33개 단위유역에 대한 탄성도 분석 결과의 기간별 평균을 정리하였다. 평균은 초기 1.129 (0.851~1.523), 중기 1.075(0.756~1.302), 후기 1.043(0.882~1.325)으로 Table 2.의 주요 기후 지역의 Very Wet 기후의 탄성도 값과 유사하여 우리나라의 기후가 습해져 갈 것으로 예상할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인간 사회에 커다란 영향을 미치는 기후변화에 대한 분석을 위하여 기상청에서 제공하는 RCP 4.5 시나리오를 통해 낙동강 33개 단위유역에 대하여 강우-유출 탄성도 분석을 실시하였고 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 기후변화에 의한 강우량 변화가 유출량에 미치는 영향을 제어적분 200년의 RCP 4.5 시나리오에 대하여 계절별, 연별 탄성도 분석을 실시하였다. 초기(2010-2040), 중기(2041-2070), 후기(2071-2100)의 구간에 대해 분석하였으며, 전체 기간(2010-2100)에 대하여 여름(6월~8월) 기간에 강우-유출 탄성도 평균이 가장 높게 분석되었다. 반면 겨울(12월~2월)의 기간에 강우-유출 탄성도는 평균적으로 가장 낮게 분석되었으며, 계절별 분석 결과 여름, 봄, 가을, 겨울 순의 탄성도를 보였다.

2) 강우-유출 탄성도 분석의 공간적 분포로는 낙동강 권역의 중동부 유역에 대하여 높은 탄성도를 보였으며, 남서부에 위치한 유역은 비교적 낮은 탄성도를 보였다(Fig. 2.). 동해안에 인접한 유역의 탄성도가 남해안에 인접한 유역의 탄성도보다 높게 분석되었으며, 수영강 유역을 경계로 동해안(북부)은 왕피천 1.147, 영덕오십천 1.308, 대종천 1.294로 높았으며, 남해안(남부)의 경우 수영강 1.032, 낙동남해 0.939, 거제도 0.999, 가화천

0.918, 남해도 1.041로 탄성도는 낮게 나타났다. 내륙의 경우 금호강 유역이 1.324로 가장 높은 탄성도를 보였으며, 구미보의 경우 0.878로 가장 낮은 탄성도를 나타냈다.

3) 손태석 등(2010)은 낙동강 권역의 주요 지점 6곳에 대해 1966년-2005년까지 40년의 과거 자료를 이용한 탄성도 분석을 실시하였으며, 낙동강 권역 평균 1.666(1.490~1.800)의 탄성도를 산정하였다[2]. 본 연구의 낙동강 권역 평균 탄성도는 초기 1.129 (0.851~1.523), 중기 1.075 (0.756~1.302), 후기 1.043(0.882~1.325)으로 분석되었다. Francis Chiew(2007)가 제안한 주요 기후 지역 탄성도 분포를 참고하여 앞서 분석된 탄성도 1.666에 비교할 경우 시간의 흐름에 따라 Very Wet의 기후로 변화되어 진다. 특히 후기로 갈수록 탄성도는 감소하는 추세를 보이는데 이는 기후변화에 따라 우리나라가 점차적으로 열대기후와 비슷한 분석 결과를 보인다고 할 수 있다.

향후 하천에 대한 기후변화의 영향을 평가하기 위해 수문요소와 기상요소의 상관성 분석이 활발하게 진행되어지고 이를 바탕으로 가뭄, 홍수에 대비한 효율적인 수자원 관리, 수리 구조물 활용이 이루어져야 할 것이다. 또한 이를 바탕으로 기후 변화에 따른 물환경 적응방안에 대한 연구가 활발히 진행되어야 할 것이다.

References

- [1] IPCC 5th Assessment Report, 2014.
- [2] T. S. Son, H. S. Shin "Analysis for Precipitation Trend and Elasticity of Precipitation-Streamflow According to Climate Changes", *Korea Society of Civil Engineers*, vol. 30, no. 5, pp. 497-507, 2010.
- [3] J. H. Sung, H. S. Kang, S. H. Park, C. H. Jo, D. H. Bae, and Y. O. Kim "Projection of Extreme Precipitation at the end of 21st Century over South Korea based on Representative Concentration Pathways (RCP)", *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, vol. 22, no. 2, pp. 221-231, 2012.
DOI: <https://doi.org/10.14191/Atmos.2012.22.2.221>
- [4] C. S. Hwang, C. W. Choi, and J. S. Choi, "Impact of IPCC RCP Scenarios on Streamflow and Sediment in the Hoeya River Basin", *Korea Society for GeoSpatial Information Studies*, vol. 22, no. 3, pp. 11-19, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.7319/kogsis.2014.22.3.011>
- [5] S. S. Jang, S. R. Ahn, H. K. Jo, and S. J. Kim, "Assessment of Climate Change Impact on Imha-Dam Watershed Hydrologic Cycle under RCP Scenarios", *Korea Society for GeoSpatial Information Studies*, vol. 18, no. 1, pp. 156-169, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.11108/kagis.2015.18.1.156>

[6] J. H. Ryu, M. S. Kang, I. H. Song, J. H. Park, J. H. Song, S. M. Jeon, and K. U. Kim, "Estimation of Design Flood for the Gyeryong Reservoir Watershed based on RCP scenarios, Journal of Korean Society of Agricultural Engineers", *The Korean Society of Agricultural Engineers*, no. 57, vol. 1, pp. 47-57, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.5389/KSAE.2015.57.1.047>

[7] H. S. Lee, D. S. Kim, M. H. Hwang, and G. G. Ahn, "Assessment of Runoff and Water temperature variations under RCP climate Change Scenario in Yongdam dam watershed South Korea", *Journal of Korean Society on Water Environment*, vol. 32, no. 2, pp. 173-182, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.15681/KSWE.2016.32.2.173>

[8] J. S. Yang, J. H. Park, and N. K. Kim, "Development of Drought Vulnerability Index Using Trend Analysis", *Korea Society of Civil Engineers*, vol. 32, no. 3, pp. 185-192, 2012.

[9] S. J. Lee, B. Y. Kwon, D. H. Jung, K. H. Jo, M. S. Kim, S. M. Ha, H. A. Kim, B. N. Kim, M. A. Masud, E. I. Lee, and, Y. K. Kim, "Future Prediction of Heat and Discomfort Indices based on two RCP Scenarios", *Korean Meteorological Society*, vol. 23, no. 2, pp. 221-229, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.14191/Atmos.2013.23.2.221>

[10] H. E. Andersen, B. Kronvang, S.E. Larsen, C.C. Hoffmann, T.S. Jensen and E.K. Rasmussen. "Climate-change impacts on hydrology and nutrients in a Danish lowland river basin", *Science of the Total Environment* 365, pp. 223-237, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.036>

[11] D. Adamson, T. Mallawaarachchi, J. Quiggin, "Climate change and climate uncertainty in the Mlrray-Darling Basin' 51st Queenstown New Zealand Australian", *Agricultural and Resource Economics Society Conference*, pp. 2-26, 2007.

[12] Climate Information Portal, Korea Global Atmosphere Watch Center[Internet], Republic of Korea, c2015[cited 2015 Oct 20], Available From: climate.go.kr.

[13] J. Chen, J. Xia, C. Zhao, S. Zhang, G. Fu, and L. Ning, "The mechanism and scenarios of how mean annual runoff varies with climate change in Asian monsoon areas", *Journal of Hydrology* vol. 517, pp. 595-606, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.075>

[14] R. Moss, M. Babiker, S. Brinkman, E. Calvo, T. Carter, J. Edmonds, I. Elgizouli, S. Emori, L. Erda, K. Hibbard, R. Jones, M. Kainuma, J. Kelleher, J. F. Lamarque, M. Manning, B. Matthews, J. Meehl, L. Meyer, J. Mitchell, N. Nakicenovic, B. O'Neill, R. Pichs, K. Riahi, S. Rose, P. Runci, R. Stouffer, D. van Vuuren, J. Weyant, T. Wilbanks, J. P. van Ypersele, and M. Zurek "Towards New Scenariosfor Analysis of Emissions, Climate Change,Impacts, and Response Strategies", *IntergovernmentalPanel on Climate Change, Geneva*, pp. 132, 2008.

[15] F. Chiew, Climate change implication on Australian river flows, *3rd international Symposium on Riverine Landscapes*, 2007.

[16] J. C. Schaake, From climate to flow, p. 177-206, John Wiley and Sons Inc. Publishers, 1990.

[17] Sankarasubramanian, A. Richard, M. Vogel, J. F.

Limbrunner, "Climate elasticity of streamflow in the unites states", *Water Resources Research*, Vol 37, no. 6, pp. 1771-1781, 2001.
DOI: <https://doi.org/10.1029/2000WR900330>

장 영 수(Young-su Jang)

[정회원]



- 2011년 2월 : 부산대학교 토목공학과 (공학사)
- 2013년 2월 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 수공학전공 박사과정

<관심분야>
수공학, 수자원

박 재 록(Jae-rock, Park)

[정회원]



- 2015년 2월 : 부산대학교 토목공학과 (공학사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 수공학전공 석·박통합과정

<관심분야>
수공학, 수자원

신 현 석(Hyun-suk Shin)

[정회원]



- 1990년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 고려대학교 토목환경공학 (공학석사)
- 1997년 1월 : University of Colorado 토목환경공학 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수

<관심분야>
수공학, 수자원