기후변화에 따른 우리나라 강수효율 및 유출량의 변화특성 분석

The Impact of Climate Change on the Trends of
Precipitation Effectiveness Ratio and Runoff Data in South Korea

김 종 필* / 김 광 섭**

Kim, Jong Pil / Kim, Gwangseob

Abstract

To analyze the regional impact of air temperature increase and precipitation variation on water resources, the variability of precipitation-effectiveness (P-E) ratio which is estimated using precipitation and air temperature data of 59 weather stations operated by the Korean Meteorological Administration (KMA) during 1973~2009 was analyzed. Also runoff data resulting from the Precipitation-Runoff Modelling System (PRMS) modelling were analyzed during 1966~2007. The overall spatio-temporal variability of P-E ratio and runoff data in South Korea is corresponding to the variability of precipitation amount. However some region shows that the P-E ratio decreases even though the trend of precipitation amount increases which may be caused by the air temperature increase. Runoff trend is similar to that of P-E ratio. Precipitation and P-E ratio have decreased all seasons except summer season and it means the reduction of available water resources during those seasons. These variability should be reflected in the spring, fall, and winter water supply strategy.

Keywords : Climate Change, Precipitation Effectiveness Ratio, PRMS, Runoff, Trend Analysis

요 지

기후변화에 따른 지역적 영향인 기온 상승과 강수량 변화로 인한 수자원 변화 특성을 파악하기 위하여 기상청 (KMA) 으로부터 전국 59개 관측지점에 대해서 1973년부터 2009년까지 강수량 및 기온자료를 이용하여 산정한 강수효율자료와 국가수자원관리종합시스템 (WAMIS) 으로부터 1966년부터 2007년까지 PRMS 모의 유출량 자료를 수집, 분석하였다. 분석결과, 전반적으로 강수효율의 거동은 강수량의 변화 특성을 따르나 지역적으로 강수량이 증가함에도 불구하고 기온 상승에 따라 강수효율이 감소하는 거동을 보였으며, 이는 유출량의 변화 특성과 유사하였다. 또한 유출량의 평균대비 변화율은 강수량 변화보다 상당히 크게 나타나, 기후변화의 영향에 민감한 것으로 나타났다. 강수량이 증가하는 5월~9 월을 제외한 전체 기간에 대하여 강수효율은 강수량보다 더 유의한 감소 경향을 나타내고 있어 해당기간의 가용 수자원 량이 줄어 들 것으로 판단되며, 이러한 특성은 봄, 가을 및 겨울철 수자원 관리에 반영되어야 할 것이다.

핵심용어 : 기후변화, 강수효율, PRMS, 유출, 추세분석

1. 서 론

대기 중 온실가스 농도의 증가로 야기되는 지구 온난

화의 영향은 전지구의 평균기온 상승, 해수면 상승 등 다 양한 측면에서 관측되고 있다. 우리나라의 경우 이와 같 은 기후변화와 더불어 연중에도 여름철에는 집중호우로

* 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 박사과정·BK21연구원 (e-mail: jpkim@knu.ac.kr)

Ph.D., Candidate and BK21 Researcher, School of Archi. and Civil Eng., Kyungpook Ntnl. Univ., Daegu 702-701, Korea

** 교신저자, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 부교수 (e-mail: kimg@knu.ac.kr)

Corresponding Author, Associate Prof., School of Archi. and Civil Eng., Kyungpook Ntnl. Univ., Daegu 702-701, Korea

인한 홍수피해, 폭염일수 증가, 겨울철에는 지역적으로 가뭄과 한파, 폭설이 발생하는 등 극한 기상현상이 번갈아 나타나고 있다.

기상청 보도자료에 의하면, 지난해 2010년 여름(6~8월)은 평균기온이 약 23.5°C로 평년(1973~2000년 평균) 대비 약 1.3°C 높았던 것으로 나타났으며, 폭염일수도 약 2.3일이 많았다고 한다. 강수량의 경우 약 710mm로 평년 대비 10.3mm가 많았고, 강수일수는 평년보다 약 7.4일이 많은 약 44.2일로 나타났다. 같은 해 12월에는 평균 최고기온과 평균 최저기온이 각각 6.4°C, -3.8°C로 평년보다 0.7°C, 0.6°C가 낮았으며, 북극진동(arctic oscillation)이 지속되며 북극의 찬 공기가 남하하여 강한 한파가 연일 지속되었다. 한편 기후변화에 관한 정부간협의체(International Panel on Climate Change, IPCC)는 2007년도 4차 기후변화에 관한 평가 보고서에서 지구온난화는 관측 자료를 통해서 논란의 여지없이 명백하다고 평가하고 있으며, 폭염 및 집중호우 등과 같은 극한사상의 발생빈도 역시 증가하고 있음을 시사했다. 이 보고서에 따르면, 아시아 지역은 전지구 평균을 상회하는 기온상승이 예상되고, 특히 동아시아 지역은 여름철 열파(heat wave or hot spell)의 기간이 길어지고 그 강도와 빈도는 역시 증가하는 경향을 보이며 강수량과 호우일수 또한 증가하는 것으로 나타났다.

이러한 전망은 우리나라 강수 및 기온 관측자료를 이용한 최근 연구들에서 보여주는 연강수량 증가, 연강수일수 감소, 일강수량 80 mm 이상의 호우일수 증가, 평균기온 증가 등의 분석결과와도 일치한다(Choi, 2004; Choi et al., 2008; 강부식, 2008; 김광섭 등, 2009; 이재준 등, 2010). Chang and Kwon (2007)은 1973년부터 2005년까지 일강수량 자료를 이용하여 여름철(6~9월) 총 강수량, 여름철 강우강도, 일강수량 30 mm와 50 mm 이상의 호우사상에 대한 추세분석을 수행한 결과, 총 강수량과 강우강도 모두 증가하고 있다고 하였다. 정대일 등(2008)은 기후변화를 고려한 홍수 위험도를 평가하기 위하여 선형 회귀분석 방법과 Mann-Kendall 검정기법을 이용하여 서울, 인천, 울릉, 전주, 강릉 등 5개 지점의 연최대 일강우량과 안동댐, 소양강댐, 대청댐 등 3개 지점의 일유출량의 경향성 분석을 실시하였으며, 연최대 일강우량의 경우 5개 지점 모두 상향추세를 보였으나 통계적 유의성은 검증되지 않았으며, 일유출량의 경우 3개 지점 모두 상향추세를 보이고 통계적 유의성은 안동댐에서만 나타난다고 하였다. 손태석과 신현석(2010)은 낙동강 유역을 대상으로 강우의 경향성 분석을 수행한 결과 연강우량의 증가경향을 파악할 수 있었으며 특히 여름철 강우의 증가경향이 두드러지며 가을과 겨울에는 전 지역에서 감소경향이 나타난다고

하였다. 이러한 기존 연구결과들을 기초로 할 때 연강수량의 증가경향은 여름철 호우사상의 발생빈도 증가로 인한 것으로 연강수량의 증가가 수자원 확보에 용이할 것이라는 예상과는 달리 이수에 도움을 주기보다는 오히려 홍수위험도를 가중시켜 치수에 어려움을 주는 형태임을 알 수 있다. 또한 강수 관측자료에 대해서는 유의한 변화 특성 감지하였으나, 하천 유출량에서는 뚜렷한 변화특성을 발견하지 못하고 있다(Bae et al., 2008). 이는 유역의 유출량이 강수뿐만 아니라 토양, 식생, 토지이용, 기온, 증발산 등 다양한 인자의 영향을 받고 있기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 기온상승에 따른 지역적 영향이 해당 지역의 월강수량이 증가하는 추세를 가짐에도 불구하고 강수효율은 감소하는 경향을 가지는 경우도 함께 반영하기 위하여 강수와 증발을 동시에 고려할 수 있는 강수효율의 변동 특성을 분석하고, 수자원의 변화를 잘 나타낸다고 판단되는 대유역 유출량의 변화 특성을 규명하기 위하여 국가수자원관리종합시스템에서 제공하는 PRMS 모의 유출량의 변화를 분석하여 기후변화가 우리나라 수자원에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

2. 자료수집 및 연구방법

2.1 기상관측자료 및 장기유출자료

기상청은 전국 76개 기상관측소로부터 수집된 강수, 기온, 습도 등 다양한 인자들에 대한 관측치를 제공하고 있다. 이 기상관측소들은 각기 설치된 시기가 다르기 때문에 자료의 구축기간도 관측소마다 다르다. 수집된 관측자료를 바탕으로 할 때 1972년 이전부터 관측을 개시한 지점의 수가 매우 적었기 때문에 본 연구에서는 관측기간과 관측지점의 수를 고려하여 1973년부터 2009년까지(37년간)를 분석대상기간으로 설정하였으며, 이 기간동안 자료가 구축되어 있는 59개 관측지점을 선정하였다. 각 수계별로는 한강 유역 내에 14개 지점, 낙동강 유역 내에 20개 지점, 금강 유역 내에 13개 지점, 섬진강 유역 내에 5개 지점, 영산강유역 내에 4개 지점, 제주도 내에 3개 지점으로 구분된다. Fig. 1, and Table 1은 각각 분석에 사용된 기상관측지점의 위치와 각 수계에 해당하는 관측지점을 보여주고 있다.

또한 국가수자원관리종합시스템에서는 전국유역조사사업의 성과를 기반으로 장기 유출자료를 제공하고 있으며, 이 장기 유출자료는 PRMS 모형을 이용하여 계산된 결과값이다. 현재 가용한 장기유출자료는 1966년부터 2007년까지(42년간)이며, 대권역 및 중권역 단위로 구분되어 있다. 본 연구에서는 전체 가용한 장기 유출자료를 대권역 단위로 수집하였다. Table 2는 총 21개로 구분된 대권역

Fig. 1. Locations of KMA Weather Stations.

단위와 각 권역에 해당하는 유역면적을 제시하고 있다.

2.2 강수효율

동식물의 성장과 활동에는 기온이나 강수량뿐만 아니라 증발의 강도 또한 중요한 변수가 되며, 이러한 증발의 강도는 일반적으로 기온과 풍속, 습도 등 다양한 기상인자에 의해 좌우되기 때문에 기후특성을 파악하기 위해서는 강수량이나 기온 등 한 가지 변수만 사용하는 대신 강수량과 증발량을 결합하거나 강수량과 기온을 결합하여 사용하는 것이 보다 합리적이라 할 수 있겠다(오재호, 1999). 이러한 점에 착안하여 Thornthwaite (1931)는 강수효율을 도입하였다. 강수효율은 P-E비 또는 P-E지수를 이용하여 나타낼 수 있다. P-E비는 매월의 월 강수량 합계를 월 증발량으로 나눈 것이며, P-E지수는 1년 동안의 P-E비의 합계로 정의된다. 오재호 (1999)에 따르면, 증발량에 대한 관측치는 보통 기후포에 별로 나와 있지 않고, 증발량이 기온의 함수이며 오차가 적기 때문에 다음과 같이 증발량 대신 기온을 사용하여 P-E비를 구한다고 하였다.

$$P-E \text{ ratio} = \frac{P}{E} = 115 \left(\frac{P}{T-10} \right)^{10/9} \quad (1)$$

Table 1. Analyzed KMA 59-Weather Stations

Main River	Station Number	Station Name	Main River	Station Number	Station Name	Main River	Station Number	Station Name
Han	090	Sokcho	Nakdong	162	Tongyeong	Geum	226	Boeun
	100	Daegwallyeong		192	Jinju		232	Cheonan
	101	Chuncheon		272	Yeongju		235	Boryeong
	105	Gangreung		273	Mungyeong		236	Buyeo
	108	Seoul		277	Yeongdeok		238	Geumsan
	112	Incheon		278	Uiseong		243	Buan
	114	Wonju		279	Gumi		245	Jeongeup
	119	Suwon		281	Yeongcheon	Sumjin	168	Yeosu
	127	Chungju		284	Ceochang		170	Wan-do
	201	Ganghwa		285	Hapcheon		244	Imsil
	202	Yangpyeong		288	Miryang		256	Suncheon
	203	Icheon		289	Sancheong		262	Goheung
	211	Inje		294	Geoje	Yeongsan	156	Gwangju
	221	Jecheon		295	Namhae		165	Mokpo
Nakdong	115	Ulleung	Geum	129	Seosan		260	Jangheung
	130	Ulsan		131	Cheongju	Jeju	261	Haenam
	138	Pohang		133	Daejeon		184	Jeju
	143	Daegu		135	Chupungryeong		188	Seongsan
	152	Ulsan		140	Gunsan		189	Seogwipo
	159	Busan		146	Jeonju			

Table 2. Analyzed Basins with PRMS Runoff (Source: WAMIS)

Serial No.	Main River	Basin	Area (km ²)	Serial No.	Main River	Basin	Area (km ²)
1	Han	Hangang(*)	23,292.83	12	Geum	Sapgyocheon	1,668.39
2		Ansungcheon	1,658.65	13		Geumgang Seohae	2,932.06
3		Hangang Seohae	1,992.90	14		Mangyung, Dongjin	3,022.54
4		Hangang Donghae	3,337.56	15	Sumjin	Sumjingang	4,914.32
5	Nakdon	Nakdongang	23,702.02	16		Sumjingang Namhae	3,384.79
6		Hyungsangang	1,139.99	17	Yeongsan	Yeongsangang	3,469.58
7		Taehwagang	660.86	18		Tamjingang	505.52
8		Hoiya, Suyeong	865.44	19		Yeongsangang Namhae	1,506.74
9		Nakdongang Donghae	2,895.01	20		Yeongsangang Seohae	2,116.81
10	Geum	Nakdongang Namhae	2,448.64	21	Jeju	Jeju-do	1,852.22
11		Geumgang	9,914.01				

(*): The North Korea territory was excluded from area counting.

여기서, P , E , T 는 각각 월강수량합계 (inch), 월증발량 (inch) 그리고 월평균기온 (°F)을 나타낸다.

2.3 추세분석

본 연구에서는 강수량, 기온, 강수효율 등의 추세분석을 위하여 비교적 간단하고 이해하기 쉬운 선형 회귀분석과 대표적인 비모수적 기법인 Mann-Kendall 검정을 이용하였다. 선형 회귀분석을 통하여 강수량, 기온, 강수효율 및 유출량의 연 및 월별 정량적 선형 변화량을 분석하여 제시하였다. 또한 각 변수들이 보이는 증가 또는 감소 추세와 각 추세에 대한 통계적 유의성을 분석하기 위해서 Mann-Kendall 검정을 수행하였다. Mann-Kendall 검정은 Mann (1945)에 의해서 처음 제시되었으며, 표본자료 사이의 상대적인 물리량의 크기를 비교함으로써 시계열 자료로부터 추세를 탐지하는 비모수적 검정기법이다 (Gilbert, 1987). 이 기법은 관측자료가 정규분포 등 어떤 특정한 분포형을 따르지 않아도 되며, 결측치를 포함하고 있는 관측자료의 경우에 대해서도 적용이 가능하다는 장점을

가지고 있다. Mann-Kendall 검정기법의 자세한 수행절차나 적용원리에 대한 내용은 Hirsch and Slack (1984)를 참고하기 바란다.

3. 분석결과

강수효율의 연변화는 강수량의 연변화 특성과 마찬가지로 대체로 증가하는 양상을 보여주었다. 그러나 강수량이 증가하는 동시에 기온 증가의 영향으로 강수효율은 그 변화 크기에 있어서는 강수량의 변화 크기에 비해서 작은 것을 알 수 있었다. Table 3은 각 변수의 연 시계열 자료에 대한 선형 회귀분석 결과를 토대로 계산된 선형 변화량을 제시한 것이다.

표에서 보는 바와 같이 각 수계별로는 한강 유역에서 강수효율 변화량이 약 14.62로 평균대비 약 14.4% 증가한 것으로 나타나 변화가 가장 컸으며, 낙동강이 약 8.68 (9.6%) 증가, 제주도 약 3.84 (3.5%) 증가, 섬진강 약 3.04 (2.9%) 증가, 금강 약 0.98 (1.1%) 증가, 영산강 약 0.25

Table 3. Linear Change of Annual Precipitation Amount, Annual Mean Air Temperature, Precipitation-Effectiveness Ratio and PRMS Runoff Data

Variables		Han	Nakdong	Geum	Sumjin	Yeongsan	Jeju
Precipitation (mm)	Mean	1333.85	1288.36	1263.95	1502.93	1325.55	1611.21
	Change	333.74	200.22	123.48	109.88	72.17	142.79
Air Temperature (°C)	Mean	11.07	12.87	12.13	13.81	13.61	15.16
	Change	1.30	0.95	1.04	0.44	0.64	1.45
P-E Ratio	Mean	101.25	90.33	89.86	104.58	91.04	108.60
	Change	14.62	8.68	0.98	3.04	-0.25	3.84
PRMS Runoff (10 ² m ³ /sec)	Mean	252.26	197.82	109.69	68.54	-	19.97
	Change	98.14	64.18	36.69	10.31	-	4.07

Table 4. Linear Changes of Monthly Mean Precipitation Amount, Air Temperature, P-E Ratio and PRMS Runoff Data

River	Variable		JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Han	Preicip. (mm)	Mean	27.81	30.02	48.05	78.09	95.92	140.17	322.95	294.01	159.97	59.68	50.72	26.47
		Change	-0.54	-4.14	4.56	-38.96	15.77	20.19	187.56	98.41	58.12	1.23	2.80	-11.18
	Air Temp. (°C)	Mean	-3.48	-1.03	4.32	11.17	16.41	20.64	23.76	24.11	19.20	12.82	5.65	-0.78
		Change	2.27	2.53	1.93	1.20	0.90	0.87	-0.04	0.36	1.36	1.51	1.50	1.30
	P-E Ratio	Mean	7.24	5.27	5.67	6.53	6.50	8.50	19.32	17.36	10.51	4.58	5.35	4.41
		Change	-1.95	-1.29	0.20	-4.12	0.90	0.97	12.70	6.34	3.91	-0.21	-0.23	-2.59
Nak-dong	Runoff (10 ² m ³ /sec)	Mean	39.87	43.70	82.86	182.78	167.98	174.86	781.72	788.20	462.84	151.64	94.52	56.11
		Change	-4.91	-0.28	-19.48	-52.97	83.76	102.57	469.82	412.30	173.01	27.57	-7.39	-6.36
	Preicip. (mm)	Mean	32.57	38.62	59.57	99.35	109.82	170.00	256.95	243.24	151.93	53.58	46.25	26.48
		Change	1.63	-4.47	2.59	-49.41	33.75	17.97	121.77	84.68	36.21	-29.23	-10.48	-4.71
	Air Temp. (°C)	Mean	0.06	1.94	6.52	12.62	17.23	20.98	24.31	24.98	20.49	14.76	8.21	2.35
		Change	1.76	2.38	1.62	0.93	0.58	0.42	-0.23	-0.21	0.88	1.03	1.17	1.15
Geum	P-E Ratio	Mean	4.84	4.97	6.04	7.85	7.30	10.31	14.89	13.76	9.30	3.67	4.12	3.25
		Change	-0.08	-1.36	-0.08	-4.58	2.21	1.04	8.11	5.40	2.35	-2.33	-1.13	-0.87
	Runoff (10 ² m ³ /sec)	Mean	37.36	54.79	100.85	160.80	158.68	216.05	541.47	524.58	366.34	104.02	65.84	43.03
		Change	-6.29	-12.46	-59.46	-78.76	33.26	127.30	252.74	299.77	221.78	4.04	-14.04	2.33
	Preicip. (mm)	Mean	28.85	33.74	49.60	84.15	92.02	161.09	281.28	264.92	135.73	52.33	48.71	31.53
		Change	-0.73	-4.55	-2.36	-53.03	5.26	37.06	72.99	60.52	47.28	-20.12	-11.02	-7.90
Sum-jin	Air Temp. (°C)	Mean	-1.63	0.28	5.14	11.71	16.99	21.41	24.74	25.16	20.26	13.81	6.91	0.79
		Change	1.79	2.03	1.59	0.68	0.92	0.69	-0.03	0.06	1.28	1.13	1.38	1.03
	P-E Ratio	Mean	5.11	4.91	5.40	6.78	5.99	9.56	16.04	14.81	8.31	3.73	4.70	4.54
		Change	-0.81	-1.32	-0.79	-4.98	0.04	2.14	4.70	3.87	3.02	-1.70	-1.43	-1.76
	Runoff (10 ² m ³ /sec)	Mean	27.76	38.35	59.26	71.84	68.14	98.50	305.91	303.10	194.87	70.93	44.63	32.95
		Change	-1.90	-7.85	-40.28	-29.97	-9.01	83.85	136.62	202.71	86.75	20.07	-2.97	2.26
Yeong-san	Preicip. (mm)	Mean	40.00	50.50	79.48	119.26	137.51	213.22	278.12	265.35	164.30	61.96	57.90	35.33
		Change	-3.29	-13.15	17.07	-49.70	3.26	3.06	91.48	55.27	36.95	-24.42	-5.20	-1.45
	Air Temp. (°C)	Mean	1.91	3.23	7.20	12.70	17.19	20.98	24.67	25.70	21.74	16.22	9.89	4.28
		Change	0.59	1.25	0.89	0.41	0.68	0.61	-0.09	-0.27	0.58	0.21	0.31	0.15
	P-E Ratio	Mean	5.16	6.00	7.89	9.46	9.30	13.33	16.05	14.67	9.81	4.06	4.84	4.01
		Change	-0.57	-1.99	1.61	-4.64	-0.23	-0.15	5.89	3.35	2.37	-1.96	-0.54	-0.10
Jeju	Runoff (10 ² m ³ /sec)	Mean	12.46	21.43	38.11	59.76	62.45	95.08	189.53	175.71	110.52	27.21	17.39	12.89
		Change	-6.95	-9.68	-11.61	-39.13	-25.31	27.10	57.66	83.77	58.33	-4.63	-3.96	-1.86
	Preicip. (mm)	Mean	31.68	45.51	64.68	102.41	113.65	194.74	255.91	245.48	146.27	50.26	46.10	28.86
		Change	2.67	-11.20	17.15	-77.94	-8.49	-11.85	74.67	92.15	27.50	-29.77	-5.98	3.28
	Air Temp. (°C)	Mean	1.20	2.56	6.72	12.59	17.40	21.41	24.96	25.87	21.63	15.87	9.35	3.55
		Change	1.04	1.54	1.13	0.29	0.55	0.72	-0.11	-0.23	0.76	0.44	0.82	0.71
Jeju	P-E Ratio	Mean	4.28	5.68	6.53	8.11	7.50	11.86	14.45	13.44	8.69	3.28	3.85	3.34
		Change	0.25	-2.05	1.59	-6.96	-0.98	-1.19	4.59	5.51	1.58	-2.26	-0.63	0.32
	Runoff (10 ² m ³ /sec)	Mean	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Change	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Preicip. (mm)	Mean	51.98	63.93	91.29	132.22	148.06	219.07	275.14	271.92	186.78	70.77	61.13	38.92
		Change	20.78	-10.86	13.95	-54.84	-5.70	-30.08	27.84	81.11	109.06	-18.80	2.97	7.36
Jeju	Air Temp. (°C)	Mean	4.34	5.44	8.90	13.80	17.90	21.47	25.40	26.41	22.59	17.47	11.64	6.54
		Change	2.07	2.42	1.73	1.08	1.08	0.97	0.66	0.70	1.57	1.59	1.76	1.81
	P-E Ratio	Mean	5.74	6.74	8.43	10.14	9.89	13.45	15.62	14.79	10.96	4.47	4.69	3.68
		Change	1.98	-2.03	0.89	-5.14	-0.91	-2.47	1.57	4.54	6.70	-1.72	-0.03	0.46
	Runoff (10 ² m ³ /sec)	Mean	9.36	9.95	14.95	16.07	18.48	23.24	40.48	36.62	32.27	16.14	12.59	9.52
		Change	1.45	-3.22	0.86	-2.80	2.12	0.09	5.16	14.59	22.16	4.47	1.24	2.73

(0.3%) 감소하는 것으로 나타났다. 영산강 유역의 경우, 강수량 증가량이 약 72.17 mm로 평균대비 약 5.4% 증가한데 반해 강수효율은 오히려 감소하는 것으로 나타났다. PRMS 유출량에 대한 선형 변화는 한강 유역이 약 9,814 m³/s (38.9%), 낙동강 유역이 약 6,418 m³/s (32.4%), 금강 유역이 약 3,669 m³/s (33.4%), 섬진강 유역이 약 1,031 m³/s (15.0%), 제주도가 약 407 m³/s (20.4%) 증가한 것으로 나타나, 강수량이나 강수효율에 비해서 변화율이 더 크게 나타났다. 이는 강수의 증가와 기온상승보다 유역의 유출이 기후변화로 인한 영향에 더욱 민감하게 반응한다고 할 수 있겠다. 한편 영산강 유역의 유출량은 국가수자원관리종합시스템에서 제공하는 원시 자료에서 영산강 유역에 해당되는 부분이 2000년 7월 이후 원인을 알 수 없는 이유로 매우 크게 증가한 것에 따른 결과로서, 영산강 유역에 대한 유출량 분석결과에 대해서는 신뢰할 수 없다고 판단하기 때문에 이에 대한 언급은 하지 않도록 하겠다.

Table 4는 분석에 사용된 변수들의 월별 평균 및 선형 회귀분석을 통하여 산정된 변화량을 보여주고 있다. 월별 강수량의 변화량은 주로 7월에 한강 유역이 약 187.56 mm (58.1%), 낙동강 유역이 약 121.77 mm (47.4%), 섬진강 유역이 약 91.48 mm (32.9%) 증가하여 월별로 7월의 강수량 증가율이 가장 큰 것으로 나타났으며, 금강 유역과 제주도는 9월에 각각 약 47.28 mm (34.8%)와 약 109.06 mm (58.4%)로 증가율이 가장 큰 것으로 나타났다. 대체로 1월, 2월, 4월, 10월, 11월, 12월에 감소하는 지역이 많았으며, 특히 4월에는 한강이 약 38.96 mm (49.9%), 낙동

강 약 49.41 mm (49.7%), 금강 약 53.03 mm (63.0%), 섬진강 약 49.70 mm (41.7%), 제주도 약 54.84 mm (41.5%)가 감소하여 4월에 우리나라 강수량의 감소현상이 두드러지는 것을 확인할 수 있었다. 강수효율 및 유출량의 월별 변화는 전반적으로 강수량의 변화 특성과 잘 부합하는 것으로 나타났다. 그러나 한강 유역과 섬진강 유역의 경우 3월에 강수량과 강수효율은 증가하는데 반해 유출량은 오히려 감소하고 있는 것으로 나타났다. 또 한강 유역에서 11월, 낙동강 유역에서 1월과 3월, 섬진강 유역에서 5월 등에서는 강수량은 증가하는 것으로 나타났지만, 강수효율과 유출량은 감소하는 것으로 나타나 강수량의 변화보다 강수효율이 유출량 변화와 더욱 잘 일치하는 결과를 보여주었다.

Fig. 2는 연강수량합계, 연평균기온, 강수효율 (P-E지수)에 대한 Mann-Kendall 검정결과를 보여주고 있다. 연강수량합계에 대한 추세분석결과, 전체 59개 기상관측지점 중 서울 (108), 인천 (112), 수원 (119), 강화 (201), 양평 (202), 이천 (203) 등 12개 지점에서 신뢰수준 95%의 증가경향이 나타났다. 증가경향이 나타난 12개 지점 중 울릉도 (115), 영주 (272) 등 2개 지점을 제외한 10개 지점 모두 한강 유역에 속하는 지역으로서 한강 유역에서 연강수량의 증가경향이 뚜렷하게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다. 강수효율 (P-E지수)에 대한 추세분석결과에서는 춘천 (101), 서울 (108), 이천 (203) 등 3개 지점에서만 통계적으로 유의한 증가경향을 나타냈다.

월별 강수효율 (P-E비)에 대한 선형 회귀분석 결과 (Table 4), 한강 유역의 경우 1, 2, 4, 10, 11, 12월에는 강수

Fig. 2. Results from Mann-Kendall test of Annual Precipitation, Air Temperature and Precipitation Effectiveness Ratio (↑ and ↓ indicate the increase or decrease trend with 95% confidence level, while ▲ and ▼ indicate that the data has not significant trend)

효율이 감소하고, 3, 5, 6, 7, 8, 9월에는 증가하는 것으로 나타났다. 특히 4월에는 약 4.12 (63.1%)가 감소하고, 7월에는 약 12.70 (65.7%)가 증가하여 가장 큰 변화를 보였다. 낙동강 유역과 금강 유역의 경우도 한강 유역과 월별 변화양상이 비슷하게 나타났으나, 3월에는 다소 감소하고 있는 것으로 나타났다. 낙동강은 4월과 10월에 각각 약 4.58 (58.3%), 약 2.33 (63.5%)가 감소하였으며, 7월에 약 8.11 (54.5%)가 증가하여 가장 변화가 크게 나타났다. 금

강 유역은 4월에 약 4.98 (73.5%)가 감소, 7월과 8월에 각각 약 4.70 (29.3%), 3.87 (26.1%)가 감소하는 것으로 나타났다. 섬진강 유역의 경우는 3, 7, 8, 9월에 증가하고, 나머지는 모두 감소하고 있는 것으로 나타났으며, 다른 유역에서와 마찬가지로 4월에 가장 크게 감소하고, 7월에 가장 크게 증가하고 있는 것으로 나타났다.

Mann-Kendall 검정결과 (Fig. 3)에서는 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 11월 등에서는 대부분 통계적으로 유의한 변화가 나타

Fig. 3. Results from Mann-Kendall Test of Precipitation Effectiveness Ratios (↑ and ↓ indicate the increase or decrease trend with 95% confidence level, while ▲ and ▼ indicate that the data has not significant trend)

나지 않았다. 그러나 4월의 경우 인천 (112), 수원 (119), 대구 (143), 목포 (165), 금산 (238), 서귀포 (189) 등 전체 59개 분석지점 중 25개 지점에서 신뢰수준 95%의 감소경향을 나타내었으며, 10월에 서울 (108), 인천 (112), 울릉도 (115),

부산 (159) 등 10개 지점에서 신뢰수준 95%의 증가경향을 나타냈다.

PRMS 유출량 자료에 대한 월별 선형 회귀분석 결과 (Fig. 4)는 전반적으로 강수량 및 강수효율의 월별 변화를

Fig. 4. Linear Change Rate of Monthly Runoff Data from PRMS

Table 5. Results from Mann-Kendall Test of PRMS Runoff Data (Confidence Level: 95%).

Main River	Basins	JAN	FEN	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
Han	Hangang	N	N	N	N	U	U	N	N	N	N	N	N
	Ansungcheon	N	N	D	N	N	N	N	N	N	U	N	N
	Hangang Seohae	N	N	D	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Hangang Donghae	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Nak-dong	Nakdongang	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Hyungsangang	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Taehwagang	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Hoiya, Suyeong	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Nakdongang Donghae	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Nakdongang Namhae	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Geum	Geumgang	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Sapgyocheon	N	N	N	N	N	U	N	N	N	N	N	N
	Geumgang Seohae	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
	Mangyung, Dongjin	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Sumjin	Sumjingang	N	N	N	D	N	N	N	N	N	N	N	N
	Sumjingang Namhae	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N
Jeju	Jeju-do	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N

※ Where, U, D and N indicate increase trend, decrease trend and no trend, respectively

따르는 것으로 나타났다. 하지만 2월과 10월 유출량의 변화는 대체로 감소하는 경향을 나타냈으나, 강수효율의 전반적인 감소경향에도 불구하고 한강 유역에 해당하는 기상관측지점에서 강수효율 증가의 영향으로 한강, 한강동해 대권역은 다소 증가하는 것으로 나타났다. 금강 유역에 대한 분석결과, 금강 유역의 기상관측지점 모두 10월과 12월 강수효율은 감소하는 반면 유출량은 오히려 증가하는 것으로 나타났다. 또 12월 낙동강 유역에서도 울릉

도지점 (115)을 제외한 나머지 관측지점에서 강수효율이 감소하고 있으나, 유출량의 경우는 증가하는 것으로 나타났다. 이는 어떤 수문변수로 유역의 복합적인 유출반응을 분석함에 있어서 가지는 한계로 생각된다. 이러한 한계에도 불구하고 기상관측자료를 활용하여 산정된 강수효율의 시공간 변화 특성은 유출량의 변화와 상당히 높은 상관성을 보여주었다. 그러나 Table 5에서 보는 바와 같이 PRMS 유출량의 변화는 3월 안성천, 한강서해, 4월 섬진

Appendix 1. Results from Mann-Kendall test of Monthly Precipitation Amount (↑ and ↓ indicate the increase or decrease trend with 95% confidence level, while ▲ and ▼ indicate that the data has not significant trend)

Appendix 2. Results from Mann-Kendall test of Monthly Mean Air Temperature (↑ and ↓ indicate the increase or decrease trend with 95% confidence level, while ▲ and ▼ indicate that the data has not significant trend)

강 유역에서의 감소경향과, 5월 한강, 6월 한강과 삼교천, 10월 안성천 유역에서의 증가경향을 제외한 대부분의 지역에서 통계적으로 유의한 경향성을 보여주지는 않았다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 기후변화에 따른 수자원 변화 특성을 감지하기 위하여 강수와 증발의 영향을 동시에 고려할 수 있는 강수효율 (P-E비, P-E지수)을 산정하였으며, 산정

된 강수효율자료와 PRMS 유출량 자료의 변화 특성을 분석하였다. 강수효율 및 유출량 변화는 10월과 12월 금강 유역과 낙동강 유역의 분석결과를 제외하면 주요 입력변수인 강수량의 변화 특성과 시공간적으로 매우 높은 상관성을 보여주었다.

강수효율의 평균대비 변화율은 강수량의 변화율에 비해서 미미한 것으로 나타났으며, 유출량의 변화율은 상당히 큰 것으로 나타났다. 대구, 울산, 천안 등 8개 기상관측 지점에서는 강수량의 증가에도 불구하고 강수효율(P-E 지수)은 오히려 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 강수량이 증가하는 동시에 기온 또한 증가하기 때문에 나타난 결과로 판단된다. 선형 회귀분석을 통한 월별 강수량, 기온, 강수효율 및 유출량의 선형 변화 특성은 강수량, 강수효율 그리고 유출량 모두 7월에 증가경향, 4월에 감소경향이 가장 뚜렷하게 나타났으며, 변화율 또한 가장 크게 나타났다. 강수효율의 월별 변화에 대한 Mann-Kendall 검정결과, 대부분의 경우 통계적 유의성을 가진 경향성은 나타나지 않았으나, 전반적으로 4월에는 감소경향을, 한강 유역에서는 10월에 증가경향을 나타냈다. 유출량에 대한 Mann-Kendall 검정결과도 강수효율의 분석결과와 마찬가지로 통계적으로 유의한 경향성이 나타나지 않았으나, 봄철 안성천, 한강서해, 섬진강 등에서 감소경향을, 여름철 한강, 삽교천 등에서 증가경향을 나타냈다.

이상의 분석결과를 종합해볼 때 기후변화에 따른 우리나라 연강수량 및 유출량은 앞으로도 계속 증가할 것으로 보인다. 하지만 이러한 강수량 및 유출량의 증가는 여름철 호우사상에 의해서 발생하는 현상이며, 여름철을 제외한 경우는 강수량과 강수효율이 오히려 감소하고 있으며, 봄철 특히 4월 강수량, 강수효율, 유출량의 감소가 뚜렷한 것으로 나타났다. 식생의 활력도가 증가하는 4월의 용수 공급과 과거 여름철 집중호우에 의한 피해사례를 감안하면, 이러한 기후변화가 지속될 경우 이수 및 치수에 어려움을 가중시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한 각 변수들이 보여주는 장기추세에도 불구하고 통계적으로 유의한 추세를 보이는 경우가 드물게 나타나는 것은 선형적인 증감에 따른 각 변수들의 변동특성보다는 분산형태의 변동에 대한 불확실성이 더 우세하기 때문일 것이다. 따라서 향후 기후변화에 능동적으로 대처할 수 있도록 월별, 지역별 변화 특성에 맞는 구체적이고 효율적인 이수 및 치수 대책에 대한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 국토해양부 한국건설교통기술평가원의 2009 건설기술혁신사업인 ‘기후변화에 의한 수문 영향분석과

전망’ 과제에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

- 강부식 (2008). “남한지역내 수문기상학적 기후변화 추세 의 공간분석.” **물과 미래**, 한국수자원학회, 제41권, 제8호, pp. 46-54.
- 김광섭, 임태경, 박찬희 (2009). “우리나라 월 및 연강수량 의 경년변동 분석.” **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제9권, 제6호, pp. 17-30.
- 손태석, 신현석 (2010). “기후변화에 따른 강우 경향성 및 유출과의 탄성도 분석.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제30권, 제5B호, pp. 497-507.
- 오재호 (1999). 기후학I. 도서출판 아르케.
- 이재준, 장주영, 곽창재 (2010). “각종 수문기상인자의 경년별 특성변화 분석 (I)-기본 통계량, 경향성을 중심으로.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제4호, pp. 409-419.
- 정대일, 제리 스테딘저, 성장현, 김영오 (2008) “기후변화를 고려한 홍수 위험도 평가.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제1B호, pp. 55-64.
- Bae, D.H., Jung, I.W., and Chang, H. (2008). “Long-term trend of precipitation and runoff in Korean river basins.” *Hydrological Processes*, Vol. 22, No. 14, pp. 2644-2656.
- Chang, H., and Kwon, W.T. (2007). “Spatial variation of summer precipitation trends in South Korea, 1973-2005.” *Environmental Research Letters*, DOI: 10.1088/1748-9326/2/4/045012.
- Choi, G., Kwon, W.T., Boo, K.O., and Cha, Y.M. (2008). “Recent spatial and temporal changes in means and extreme events of temperature and precipitation across the Republic of Korea.” *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 43, No. 5, pp. 681-700.
- Choi, Y. (2004). “Trends on temperature and precipitation extreme events in Korea.” *Journal of the Korean Geographical Society*, Vol. 39, No. 5, pp. 711-721.
- Gilbert, R.O. (1987). Statistical methods for environmental pollution monitoring. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Hirsch, R.M., and Slack, J.R. (1984). “A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence.” *Water Resources Research*, Vol. 20, No. 6, pp. 727-732.
- IPCC. (2007). Climate Change 2007: The Physical

Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the International Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Mann, H.B. (1945). "Nonparametric tests against trend." *Econometrica*, Vol. 13, No. 3, pp. 245-259.

Thornthwaite, C.W. (1931). "The climates of North America according to a new classification." *Geographical Review*, Vol. 21, No. 4, pp. 633-655.

논문번호: 11-029	접수: 2011.03.09
수정일자: 2011.06.13/07.19	심사완료: 2011.07.19