기후변화에 따른 용수수급분석 및 대안의 효과분석

Analysis of water demand and alternative effectiveness using climate change scenarios

전상묵*, 강형식**

Sang Mook Jun, Hyung Sik Kang

요 지

기후변화는 사회·경제·환경부분에 영향을 미치며 수자원 부문에서는 안정적인 물 공급에 위기가 발생할 것으로 전망되고 있다. 인간이 이용하는 수자원은 강우에 의해 가장 민감하게 반응하므로 지속적이고 안정적인 수자원을 이용하기 위해서는 통합적이고 탄력적인 대응방안이 요구되고 있다. 특히 우리나라와 같은 여름에 집중적 강우가 나타나는 지역에서의 용수수급에 대한 중요성은 더욱더 커질 것이다. 또한 앞으로 1인당 물 수요량의 증가할 것으로 예상됨에 따라 용수수급 관리를 위한 적응전략 수립은 반드시 필요할 것이다.

본 연구에서는 수문모형인 SWAT을 이용하여 자연유량을 산출하기 위해 SWAT-CUP을 이용한 검보정을 수행하여 모형의 적용성을 검토하였다. 기후변화 시나리오인 RCP시나리오를 이용하여 기간별 자연유량을 산정하였다. 유역의 생활용수, 공업용수, 농업용수 및 하천유지유량 데이터를 수집하여 물 분배 모형인 K-MODSIM 모형에 적용하였다. 2011년부터 2100년까지 월별로 유역의 물 수급의 과부족을 산정하였다. 용수의 부족이 나타난 지역에 대한 수요관리와 공급관리 방안을 수립하였고 대안을 적용한 후 용수 공급에 미치는 영향을 다시 분석하였다.

수문모의 결과 RCP 시나리오별로 자연유량을 산정한 결과 시간의 흐름에 따라 물 공급량이 감소할 것으로 분석되었고 계절별로 차이는 더 크게 나타났다. 특히 갈수기인 봄과 겨울철의 유량감소가 나타났다. 모의된 월별 자연유량을 K-MODSIM에 입력하여 월별 모의를 수행한 결과 각 용수별로 부족현상이 나타났다. 생활용수의 부족이 나타난 경우 수요관리를 통해 물 수요량을 줄이는 적응전략을 수립하였고 부족량이 크게 나타나는 농업용수와 하천유지유량의 경우 공급량을 늘리는 공급관리를 통한 적응전략을 수립하여 효과분석을 수행하였다. 단계별로 용수공급에 대한 효과가 나타났다. 하지만 본 연구에서는 경제성 분석을 제외한 용수공급에 중점을 둔 적응전략을 수립하였으므로 이를 포함한 분석이 포함된다면 실제 용수공급 대안 선정을 위한 의사결정에 도움이 될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 기후변화, 대안효과분석, K-MODSIM, Representative Concentration Pathways

1. 서론

최근 기후변화의 불확실성과 비정상성으로 인하여 물 수요에 대한 위협이 날로 심해지고 있다(기상청, 2014). 국내의 강우량이 적은 봄과 겨울철에는 댐과 저수지의 저수량이 감소하여 각종 용수 공급에 어려움이 발생하고 있다. 작년의 경우 충청남도 서부지역의 경우 강우량이 약 50% 감소하여 용수를 공급하는 보령댐이 수위가 최저수위로 내려가는 상황이 발생하였다(관계부처합동, 2015). 보령댐에서 용수를 공급받고 있는 서부지역은 제한급수를 시행하여 주민 생활에 큰 불편을 초래하였다. 이를 해결하기 위하여 정부에서는 약 620억원을 들여 금강의 하천수를 보령댐으로 공급하는 도수관을 신설하여 이에 대비하고자 하였다. 하지만 이러한 단기적인 대응으로는 앞으로 다가올 더 극심한 기후변화에 효과적으로 대비할 수 없을 것이다. 기후변화를 이해하고 이에 대해 적응하기 위한 전략이 필요한 시점이다. 본 연구에서는 기후변화에 따

* 정회원 · 한국환경정책·평가연구원 연구원 · E-mail : smjun@kei.re.kr
** 정회원 · 한국환경정책·평가연구원 연구위원 · E-mail : hskang@kei.re.kr

른 물 수지 분석을 통한 용수공급 취약성을 분석하고 이에 대한 적응전략을 수립하여 효과분석을 수행하였다.

2. 자연유량 산정

유역의 용수수급분석을 수행하기 위하여 유역의 자연유량을 산정하여야 한다. 자연유량을 산정하기 위하여 USDA에서 개발한 준분포형 장기강우유출 모형인 SWAT을 활용하였다. 본 연구에서는 한강권역의 24개 중권역 중 모형구축을 위한 데이터가 부족하고 상수도시설의 구축이 잘 되어 있어 물 수급에 큰 문제가 없는 서울지역을 제외하여 모의를 수행하였다. 총 14개의 중권역에 대하여 모의를 수행하였다.

기상청 기후변화정보센터(www.climate.go.kr)에서는 RCP 기반 기후전망 자료를 제공하고 있다. 모형에 필요한 기상변수인 강수량, 평균, 최고, 최저 기온은 한반도 스케일 제공되는 기후변수를 사용하였다.

2.1 SWAT 모의 결과

SWAT 모형을 통하여 자연유량을 산정하기 위해 EAWAG에서 개발된 SWAT-CUP을 이용하여 검보정 및 민감도 분석을 수행하였다. 민감도 분석에 수행된 검보정 알고리즘은 SUFI-2로 가장 일반적으로 활용된다. 검보정을 위한 실측데이터는 오염총량단위유역의 오염총량데이터를 사용하였다. 보정기간은 2010년이고, 검증기간은 2011년으로 하였다. 오염총량단위유역에서의 실측데이터는 8일간격으로 측정이 이루어짐에 따라 1년에 45개 정도의 데이터를 이용하여 검보정을 수행하였고 결정계수는 R Square를 사용하여 신뢰성을 판단하였다. 한강수계의 12개 단위유역의 검보정을 수행한 결과 다음 표와 같은 결과를 얻었다. 검보정 결과 12개 단위유역의 R^2값은 보정결과 0.75~0.98로 나타났고 검증결과는 0.76~091로 나타나 모형의 신뢰성이 확인되었다.

표 1. SWAT 검보정 결과

단위유역명	보정결정계수	검증결정계수	단위유역명	보정결정계수	검증결정계수
달천B	0.86	0.89	한강A	0.98	0.90
북한B	0.96	0.76	한강B	0.96	0.88
북한C	0.98	0.78	한강D	0.91	0.91
북한D	0.98	0.83	한강E	0.93	0.91
섬강B	0.89	0.89	홍천A	0.96	0.80
소양A	0.75	0.87	평창A	0.84	0.80

기후변화 시나리오인 RCP 4.5와 8.5를 이용한 수문 모의 결과 다음 표와 같은 결과를 나타내었다. 90년의 모의기간을 30년씩 구분하여 초기, 중기, 말기에 대한 연 자연유량을 분석한 결과 2020s 기간에서 연유출량과 2050s, 2080s의 연유출량을 비교한 결과 일부지역에서는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 표에서의 증감의 기준은 2000년부터 2010년까지의 연평균을 나타낸 것이다.

표 2. RCP 시나리오별 유량의 증감율(%)

유역명	RCP 4.5			RCP 8.5		
	2020s 증감율	2050s 증감율	2080s 증감율	2020s 증감율	2050s 증감율	2080s 증감율
남한강상류	2.1	4.6	6.1	3.4	5.5	7.3

평창강	(0.3)	(0.5)	(1.1)	(0.5)	(1.3)	(2.2)
충주댐	0.2	0.2	0.1	0.2	0.3	0.5
달천	(0.7)	(1.1)	(2.5)	(3.7)	(5.8)	(10.5)
충주댐하류	(5.5)	(7.5)	(11.5)	(8.3)	(11.2)	(16.1)
섬강	(3.1)	(6.4)	(7.5)	(11.4)	(16.3)	(17.2)
남한강하류	(2.5)	(4.5)	(6.3)	(7.3)	(10.1)	(12.8)
춘천댐	(9.5)	(12.5)	(16.8)	(6.3)	(9.1)	(10.2)
소양강	(10.4)	(12.4)	(17.4)	(14.2)	(16.7)	(19.0)
의암댐	(8.4)	(12.3)	(15.1)	(11.1)	(13.2)	(14.8)
홍천강	0.7	1.3	2.2	2.6	4.3	5.1
청평댐	(6.9)	(8.5)	(12.3)	(9.0)	(11.2)	(14.8)
경안천	(14.1)	(16.1)	(29.2)	(20.4)	(26.0)	(33.1)
팔당댐	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.5
						*(): 마이너스

3. 용수수급 취약성 분석

용수수급의 취약성을 분석하기 위하여 한강수계 14개 중권역의 생활, 공업, 농업, 하천유지유량에 대한 용수수요량을 조사하였다. 용수수요량에 대한 데이터가 월별로 조사되지 않고 연간 이용량으로 조사됨에 따라 연 데이터를 균등하게 나누어 각 용수 수요량으로 가정하였다. 단 농업용수는 농번기에 사용되는 용수임에 따라 4월부터 10월까지 사용되었다고 가정하였다. 용수수급분석은 물 분배 모형인 K-MODSIM의 입력하여 각각의 용수공급에 대한 전망을 분석하였다. 자연유량 모의 결과를 월별 K-MODSIM에 시계열로 입력하고 용수의 우선순위에 따라서 용수 공급의 과부족을 산정하였다. 용수공급 분석은 2011년부터 2100년까지 90년간 월별로 분석이 수행되어 총 1,080개월에 대한 분석을 수행하였다.

물 분배모형을 통한 14개 중권역에서 시나리오별 용수수급 분석 결과 다음 표 3과 같이 나타났다. 용수부족이 나타난 유역은 달천, 섬강, 춘천댐, 소양강, 의암댐, 홍천강, 청평댐, 경안천으로 8개 유역에서 용수 부족현상이 나타났다. 특히 섬강과 경안천 유역에서는 나머지 유역보다 큰 부족이 나타났다.

표 3. 시나리오별 생활용수 공업용수 수급 분석 결과

	생활용수					공업용수				
	수요량	RCP4.5		RCP8.5		수요량	RCP4.5		RCP8.5	
		부족량	부족 횟수	부족량	부족횟수		부족량	부족 횟수	부족량	부족 횟수
남한강 상류	18,337	-	-	-	-	8,113	-	-	-	-
평창강	15,066	-	-	-	-	12,786	-	-	-	-
충주댐	47,637	-	-	-	-	8,926	-	-	-	-
달천	52,869	542	5	1,562	5	9,467	1,101	6	807	8
충주댐 하류	7,581	-	-	-	-	623	-	-	-	-
섬강	84,583	2,318	8	2,255	9	4,319	531	9	465	11
남한강 하류	126,988	-	-	-	-	64,263	-	-	-	-
춘천댐	13,177	56	2	90	3	840	115	3	112	3
소양강	12,887	304	8	402	9	662	86	9	87	10
의암댐	45,914	1,629	3	1,458	4	3,026	416	5	436	7
홍천강	15,132	329	1	308	3	8,327	1,144	2	728	5
청평댐	23,403	1,223	1	1,323	1	690	57	2	57	2

경안천	66,636	2,039	10	2,234	12	702	97	11	107	12
팔당댐	604	-	-	-	-	49	-	-	-	-

농업용수와 하천유지용수의 부족은 생활 및 공업용수에 비해 크게 나타났다. 이는 농업용수와 하천유지용수는 용수수요량이 생활용수와 공업용수에 비하여 매우 크고 용수공급 우선순위가 낮기 때문이다.

4. 적응전략 효과 분석

용수수급 취약성 분석결과 각종 용수에 대해서 부족현상이 나타났다. 본 연구에서는 부족한 용수를 해결하기 위하여 수요관리와 공급관리에 대한 적응전략을 수립하여 효과를 분석하였다.

4.1. 수요관리 효과분석

본 연구에서는 생활용수의 수요관리를 통한 적응전략을 수립하였다. 생활용수의 수요관리는 절수기기의 도입을 통한 수요관리를 하여 물 수급 분석을 수행하였다.

수요관리를 통한 수요량을 재산정후 용수수급 분석을 재수행한 결과 표 4와 같은 결과를 나타냈다. 수요관리를 통해서 생활용수와 공업용수의 용수부족이 크게 개선되었음을 보여주고 있다. 반면에 농업용수와 하천유지유량에는 큰 영향을 나타내고 있지 않았다.

표 4. 수요관리를 통한 용수수급 분석 결과

	생활용수					공업용수				
	수요량	RCP4.5		RCP8.5		수요량	RCP4.5		RCP8.5	
		부족량	부족 횟수	부족량	부족횟수		부족량	부족 횟수	부족량	부족 횟수
남한강 상류	**15,974**	-	-	-	-	8,113	-	-	-	-
평창강	**13,146**	-	-	-	-	12,786	-	-	-	-
충주댐	**41,790**	-	-	-	-	8,926	-	-	-	-
달천	**45,644**	122	1	481	2	9,467	1,101	3	807	3
충주댐 하류	**6,752**	-	-	-	-	623	-	-	6	-
섬강	**75,814**	498	3	894	4	4,319	158	5	462	5
남한강 하류	**115,136**	-	-	-	-	64,263	1	-	6	1
춘천댐	**11,730**	-	-	18	1	840	115	-	112	-
소양강	**11,452**	149	3	227	5	662	86	-	87	-
의암댐	**39,048**	400	1	1,045	3	3,026	416	-	436	-
홍천강	**13,144**	-	-	-	-	8,327	78	1	84	1
청평댐	**20,441**	976	1	1076	1	690	57	1	57	1
경안천	**59,173**	592	3	648	4	702	34	9	43	9
팔당댐	**547**	-	0	-	-	49	-	-	-	-

4.2. 공급관리 효과분석

공급관리는 용수공급에 가장 효과적인 적응전략이지만 사회·경제적인 요인을 고려해야 한다. 본 연구에서는 용수공급의 효과적인 측면만을 고려하였고 이를 위해서 용수공급의 용량을 농업용수 부족량의 평균으로 하여 효과분석을 수행하였다. 공급관리를 통한 농업용수의 부족량 및 부족횟수는 큰 효과를 나타냈다. 특히 달천, 섬강, 소양강, 홍천강은 큰 효과를 나타내고 있다.

표 4. 수요관리를 통한 용수수급 분석 결과

유역명	수요량	RCP 4.5					RCP 8.5				
		취수원용량	Before		After		취수원용량	Before		After	
			부족량	부족횟수	부족량	부족횟수		부족량	부족횟수	부족량	부족횟수
남한강상류	100,890	1,397	1,397	7	189	4	2,102	2,102	17	342	8
평창강	122,892	13,282	13,282	14	1,358	6	14,813	14,813	24	872	11
충주댐	186,154	7,448	7,448	11	1,310	2	7,989	7,989	31	1,078	12
달천	278,249	39,617	39,617	60	6,684	26	36,207	36,207	87	7,801	33
충주댐하류	76,999	11,384	11,384	4	3,158	2	13,698	13,698	7	4,081	5
섬강	183,076	22,275	22,275	59	5,164	28	16,589	16,589	89	5,994	26
남한강하류	566,205	86,057	86,057	16	13,641	7	54,799	54,799	30	11,081	7
춘천댐	71,817	9,015	9,015	24	1,514	11	11,058	11,058	33	1,795	19
소양강	61,437	7,698	7,698	79	1,899	33	8,389	8,389	81	2,048	37
의암댐	49,596	6,587	6,587	22	1,001	11	6,615	6,615	40	727	19
홍천강	123,303	12,495	12,495	23	2,211	11	19,055	19,055	28	2,405	19
청평댐	41,839	4,995	4,995	12	981	6	6,389	6,389	12	1,043	6
경안천	57,669	5,351	5,351	93	2,021	39	5,908	5,908	95	2,287	44
팔당댐	2,896	183	183	1	-	-	183	183	1	-	-

5. 결과

본 연구에서는 국내의 기후변화에 대한 용수수급의 취약성을 분석하고 적응전략의 수립에 따른 효과 분석을 수행하였다. 자연유량의 산정을 위하여 수문모형을 사용하여 RCP 시나리오에 따른 유량을 산정하였다. 산정된 중권역의 자연유량을 산정하여 생활, 공업, 농업, 하천유지유량에 대한 용수공급 취약성을 산정하였다. 대상유역인 한강수계에서 생활 및 공업용수에 대한 용수수급은 비교적 적게 나타났지만 농업용수에 대한 부족이 크게 나타나는 것으로 나타났다. 이에 수요관리와 공급관리에 대한 적응전략을 수립하였고 이에 대한 효과 분석을 수행하였다. 효과분석에 따라 모든 용수가 안정적으로 공급되지는 않았지만 이는 적응전략에 대한 경제적인 측면이 고려되지 않았기 때문이다. 따라서 적응전략의 실효성을 위해서는 본 연구의 추후 연구로 경제성 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 연구는2015년 기후변화대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 한국환경정책·평가연구원이 수행한 “적응대책 수립 지원을 위한 영향 및 적응평가 기술개발”(과제번호: 2014001310005) 과제의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. 관계부처합동(2015). 이상기후 보고서 2015.
2. 기상청(2014), 기후변화 2014 종합보고서.

<인터넷 자료>

기후변화 정보센터(www.climate.go.kr)
국가수자원종합시스템(www.wamis.go.kr)