

기후변화 대응을 위한 제주도 수자원 관리 방향

The Direction of Managing the Water Resources of Jeju Island in Response to Climate Change

고기원* · 박월배** · 문수형***

< 목 차 >

- | | |
|-----------------------------|-------------------------|
| I. 서언 | V. 기후변화 대응을 위한 수자원 관리방향 |
| II. 제주도의 수자원 이용현황과 용수 수요 전망 | VI. 결론 |
| III. 한반도 및 제주도 기후변화 전망 | 〈참고문헌〉 |
| IV. 기후변화가 제주도 수자원에 미치는 영향 | |

< 국문 초록 >

전 세계적인 기후변화는 제주도에서도 이미 생겨나고 있으며, 향후 더 가속화 될 것으로 전망되고 있다. RCP 8.5 시나리오에서 21세기 후반기 제주도의 평균 기온은 4.6℃가 증가한 19.0℃가 되어 아열대성 기후로 바뀔 전망이다. 또한, 강수량은 현재보다 775mm가 증가하지만 호우일수 및 강수강도도 함께 증가함으로써 유출량이 많아질 것으로 보인다. 겨울이 사라지는 대신 여름기간이 길어지고, 해수면도 현재보다 65cm나 상승할 것으로

* 제주특별자치도개발공사 물산업연구센터
** 제주발전연구원
*** 제주특별자치도개발공사 물산업연구센터

로 보인다. 이와 같은 기후변화는 수자원의 수량과 수질에 직간접적인 영향을 미쳐 직접 유출량 증가, 증발산량 증가, 물 사용량 증가, 지표수 및 지하수 수질저하, 해안 대수층 염수화, 지하수 함양량 감소, 지하수 지속 이용가능량 감소 등의 부정적 영향으로 나타날 것으로 전망된다.

기후변화에 대응한 수자원 관리 방향으로서 △기후변화를 고려한 용수수요 예측 △용수수요를 고려한 수자원관리계획 수립 △인공함양을 통한 지하수 함양량 유지 △대체수 자원 이용 확대 △상수도 공급능력 확대 △농업용수 공급체계의 개선 △수자원에 대한 조사·연구 강화의 7가지 방안을 제시하였다.

핵심어: 기후변화, 용수수요 예측, 수자원관리계획, 인공함양, 대체수자원, 농업용수 공급체계

I. 서 언

‘기후변화’란 “현재의 기후계가 자연적 및 인위적인 요인에 의하여 점차 변화하는 것”을 말하며(기상청 홈페이지), 21세기에 들어 세계는 이상기후에 시달리고 있다. 2014년 1월 미국 뉴욕주와 캐나다 온타리오주 일대가 영하 37°C까지 내려가면서 나이아가라폭포마저 얼어붙는 진풍경이 연출되었다. 그런가 하면, 캘리포니아주를 비롯한 미국 서부 지역은 3년째 극심한 가뭄이 이어지고 있다. 또한, 남태평양에 위치한 투발루(Tuvalu) 및 키리바시 공화국(Republic of Kiribati) 등 작은 섬나라들은 해수면 상승으로 수몰될 위기에 처해 있다. 이처럼 기후변화는 인류의 생존을 위협하는 큰 재앙으로 다가오고 있다. 특히 세계 인구의 폭발적 증가와 경제성장에 따른 물수요 증가를 감당하기도 어려운 마당에 기후변화 현상까지 가중됨으로써 세계 각국은 깨끗한 물을 확보하기 위해 국가차원의 대책을 수립함과 아울러 국제적 연대를 강화하고 있다.

독일, 프랑스, 스위스, 오스트리아, 이탈리아 등 유럽 국가들의 젓줄 역할을 해 온 알프스 산맥의 만년설이 지구 온난화의 영향으로 녹아 사라지면서 수량 부족 문제에 직면하고 있다. 즉 라인강, 론강, 포강, 도나우강 모두 알프스 산맥의 빙하로부터 발원하고,

유럽 국가들은 이들 강을 근간으로 경제적 번영을 누려왔다. 그러나 지난 150년 동안 알프스 산맥을 덮고 있던 빙하의 50%가 사라졌다. 또한, 21세기 말경에는 나머지 빙하의 50%도 녹아 없어지고, 이로 인하여 알프스 남부와 동부지역 여름철 유량이 55% 감소할 수도 있다는 예측까지 나오고 있다(European Environment Agency, 2009). 히말라야, 록키, 안데스 등의 지역도 알프스가 직면한 문제와 별반 다르지 않다.

수문지질학적으로 제주도와 유사한 미국 하와이주의 경우에도 기후변화의 영향이 발생하고 있다. Frazier and Giambelluca(2013)는 1920~2009년까지 관측된 강수량 자료 분석을 근거로 하와이주의 모든 섬들에서 10년 당 1.39% 비율로 강수량 감소현상이 나타났다으며, 특히 Maui섬은 1978년 이후 10년 당 8.10%씩 감소하였다고 보고하였다. 최근 하와이대학교 연구팀의 연구결과에 의하면, 연강수량이 1.9%와 5.3% 감소할 경우, 지하수 함양량은 각각 3.7%와 8.5% 줄어드는 것으로 나타났다(Kimberly Burnett and Christopher Wada, 2014). 이러한 강수량 감소 현상은 지하수위에도 영향을 미치고 있다. 오아후(Oahu)섬 생활용수의 60%를 공급하고 있는 진주만(Pearl Harbor) 지역의 지하수위가 1910년 이후 절반 가까이 떨어졌고, 마우이(Maui)섬의 생활용수 주공급원인 Iao Valley 대수층의 수위도 1990년대 이후 급격하게 떨어지고 있다(Department of Land and Natural Resources, State of Hawai'i, 2011).

제주도도 예외는 아니다. 제주지방기상청 관측자료에 따르면, 제11호 태풍 나크리(Nakri)가 제주를 통과한 2014년 8월 1일부터 3일까지 한라산 윗세오름(해발 1,673m)에 총 1,646.5mm에 달하는 엄청난 양의 비가 내렸다. 특히, 8월 2일 하루에만 1,182mm의 비가 내려 역대 최다 강수 기록 878.5mm(2004. 8. 18, 윗세오름)을 갱신하였고, 3일간의 누적 강수량은 제주시(1,497.6mm)와 고산(1,142.8mm) 지역의 평년 강수량을 훨씬 초과하는 양이다. 또한, 2007년 9월 16일에는 제11호 태풍 나리(Nari)가 통과하면서 제주시 지역에 12시간 동안 420mm에 달하는 폭우가 쏟아졌고, 이로 인해 사상 유례 없는 대홍수로 12명이 사망하고, 1000여 억 원의 막대한 피해가 발생하였다. 이와는 대조적으로, 2013년 7월 초부터 8월 하순까지 59일간 비다운 비가 내리지 않아 제주 지역은 극심한 가뭄에 시달렸다. 90년만의 최악의 가뭄으로 기록되었다. 이와 같은 제주 지역의 강수량 양극화 현상은 1980년대 중반 이후부터 빈번하게 발생하고 있다.

제주도는 내륙과 멀리 떨어진 섬지역이기 때문에 지역 내에서 발생하는 용수수요를 자체적으로 해결하지 않으면 안 된다. 더구나, 제주의 주된 용수원인 지하수의 함양량과 지속 이용 가능량도 한정되어 있다. 그러나 도시지역의 확장, 관광위락시설 등 각종 개발사업에 따른 초지 및 산림면적의 감소 등으로 지하수 함양면적이 점차 줄어들고 있다. 또한, 침수피해를 방지하기 위한 인공배수로를 통한 우수의 일시 배제, 집중호우로 인한 직접 유출률 증가, 거미줄처럼 얽혀져 있는 도로에 의한 지표수 흐름변경 등은 지하수 함양에 부정적 영향을 미치고 있다. 게다가 지하수의 수질을 위협하는 잠재오염원도 계속해서 늘어나고 있을 뿐 아니라, 집중호우에 의한 홍수발생 가능성도 높아지고 있는 실정이다.

이처럼 제주지하수를 둘러싼 환경이 지속적으로 악화되고 있음에도 불구하고, 인구 및 관광객 증가에 따른 물 사용량이 꾸준히 늘어나고 있을 뿐 아니라, 농업형태의 변화에 따른 농업용수 수요도 늘어나고 있다. 이에 대응하여 제주특별자치도는 1991년부터 특별법에 의해 지하수를 관리해 오고 있다. 제주지하수가 공공의 자원임을 법률로 규정함과 아울러, 지하수의 고갈과 해수침투, 수질오염 등을 방지하기 위한 선진화된 제도를 도입해 시행하고 있다. 또한, 상수도 공급시스템 통합운영을 비롯하여 2007년 태풍 나리(Nari)에 의한 홍수피해 이후 홍수조절 저류지 건설 및 홍수예경보 시스템 구축, 기후변화 적응대책 세부시행계획수립(2012~2016) 등 다양한 노력을 기울여 오고 있다. 이러한 노력에도 불구하고, 현재의 지하수 관리, 용수공급, 수재해 예방 시스템 등 제주도의 치수 및 이수정책은 기후변화 적응에 취약성을 내재하고 있다. 이 글에서는 기후변화에 적응하기 위한 제주도의 수자원 관리방향(이수적 측면)에 대해 제시하고자 한다.

Ⅱ. 제주도의 수자원 이용현황과 용수 수요 전망

1. 수자원 개발 및 이용현황

2012년 12월 현재 제주도내에는 총 5,223개의 수자원 이용시설의 설치되어 있으며, 시설용량은 1,741천 m^3 /일(635 백만 m^3 /년)이다(표 1). 수원별로 보면 담수지하수 관정이 4,867개소(1,496천 m^3 /일), 용천수 14개소(192천 m^3 /일), 빗물이용시설을 포함한 지표수가

342개소(53천³㎡/일)이다. 전체 개발된 수자원 이용시설의 93%, 시설용량의 86%를 담수 지하수 관정이 차지하고 있으며, 지표수(빗물이용시설 포함)는 전체 시설용량의 3.1% 수준이다. 용도별 시설용량을 보면, 생활용수가 796천³㎡/일로서 전체의 46%를 차지하고 있고, 농업용수가 916천³㎡/일(53%)이며, 기타용수가 29천³㎡/일이다.

수자원 이용량(2011년 기준)은 총 486천³㎡/일(177,390천³㎡/년)로서 수자원 시설용량의 28%이다. 수원별로 보면 담수지하수가 419천³㎡/일로서 전체 이용량의 86%를 차지하고, 용천수 45천³㎡/일(9%), 지표수 22천³㎡/일(5%)이다. 용도별 이용량은 생활용수가 286천³㎡/일(59%), 농업용수 191천³㎡/일(39%), 기타용수 9천³㎡/일(2%)이다.

【표 1】 제주도의 수자원 시설용량 현황(2011 기준)

(단위 : 천³㎡/일)

구 분		합 계	담수지하수	용천수	지표수 ¹⁾
시설수	개 소 수	5,223	4,867	14	342
	저수용량	5,390	-	-	5,390
개발량 (2012)	합 계	1,741	1,496	192	53
	생활용수	796	566	192	38
	농업용수	916	901		15
	기타용수	29	29		
이용량 (2011)	합 계	486	419	45	22
	생활용수	286	219	45	22
	농업용수	191	191	-	0.05
	기타용수	9	9	-	-

〈자료 : 제주특별자치도 수자원본부 내부자료〉

1) 지하수

2012년 말 현재, 제주도내에는 모두 4,867공(염지하수 제외)의 지하수 관정이 개발되어 있다(표 2). 농업용이 3,316공으로 전체의 68%를 차지하고, 생활용 1,386공, 공업용 161공, 먹는샘물용 4공 순이다. 이 중 공공용 관정은 1,275공으로 26%를 차지하고, 나머지는 사설 관정인데 사설관정의 대부분은 농업용이다.

1) 빗물이용시설 포함

지하수 취수 허가량은 1일 1,496천m³으로 지하수 지속 이용 가능량의 84.5%에 이른다. 용도별 허가량을 보면, 농업용이 901천m³/일으로 전체의 60%를 차지하고, 생활용 566천m³/일, 공업용 27천m³/일, 먹는샘물용 2.2천m³/일이다. 전체 허가량 중 공공용 관정이 1,120천m³/일이고 사설관정이 376천m³/일이다.

그러나, 실제 지하수 이용량은 허가량의 28%, 지하수 지속 이용 가능량의 24%에 불과하다. 즉, 취수 허가는 지속 이용 가능량의 84%가 이루어졌지만, 실제 이용하고 있는 지하수량은 그에 훨씬 못 미치고 있는 것이다.

【표 2】 제주도의 지하수 개발 및 이용현황

(단위 : 천m³/일)

구 분		합 계	생활용	농업용	공업용	먹는샘물 제조용
공 수	합 계	4,867	1,386	3,316	161	4
	공공용	1,275	364	904	4	3
	사설용	3,592	1,022	2,412	157	1
허가량 (2012)	합 계	1,496	566	901	27	2.2
	공공용	1,120	421	695	2	2.1
	사설용	376	145	206	25	0.1
이용량 (2011)	합 계	419	219	191	7	2
	공공용	344.5	178	164	0.5	2
	사설용	75.1	41	27	7	0.1

〈자료 : 제주특별자치도 수자원본부 내부자료〉

2) 용천수

제주도의 곳곳에는 지층 속을 흐르던 지하수가 지표와 연결된 지층의 틈을 통해 솟아 나오는 용천수가 분포하고 있다. 용천수는 해발 1,862.6m(방아샘)의 백록담 기슭에서부터 해안가에 이르는 도 전역에 총 911개가 분포하고 있으나, 해발 200m 이하의 해안 저지대에 839개소(92.1%)가 분포하고, 중산간 지대에는 전체의 5.6%에 해당하는 51개소, 해발 600m 이상의 고지대에는 21개소(2.3%)가 분포한다(제주의 물 용천수, 제주도, 1999).

최근까지 상수원으로 이용한 용천수는 모두 14개소이나 광역상수도가 완공되고 또한

2006년부터 7월부터 시군 상수도가 통합 운영되면서 9개소로 줄어들었다. 현재 상수원으로 이용되고 있는 용천수 9개소의 시설용량은 136.7천 m^3 /일이며, 상수도로 공급되는 양은 일평균 47천 m^3 /일 정도이다.

3) 지표수

제주도내에는 총 431개소의 지표수 이용시설이 갖추어져 있으며, 전체 저수용량은 5,423천 m^3 이나 실제 이용량은 22천 m^3 /일 수준이다. 시설 유형별로 보면 상수도용 저수지가 2개 지역에 5개소가 시설되어 있으나 추자도의 4개 저수지만 이용되고 있다. 빗물이용시설은 골프장의 대규모 저류지를 비롯하여 농업용 소규모 빗물이용을 포함해 총 329개소에 설치되어 있고, 일평균 이용량은 21천 m^3 이다. 농업용 저수지는 7개소에 설치되어 있으나 한국공항(주)의 저수지만이 소량 이용되고 있는 실정이다.

4) 해수담수화 시설

제주도내에는 추자도, 가파도, 마라도의 3개 도서지역에 총 1,525 m^3 /일 시설용량의 해수담수화시설이 운영되고 있다. 해수담수화 시설은 도서지역의 만성적인 수돗물 부족 문제를 해결하기 위해 1999년 우도에 시설된 것을 시작으로 4개 도서지역에서 운영되었으나, 우도지역은 2011년부터 해저수도가 시설되면서 폐쇄되어 현재는 상기 3개 도서지역에서만 운영되고 있다. 도서지역별 시설현황을 보면 추자도는 1,000 m^3 /일(250 m^3 /일×4기) 규모이고, 가파도는 150 m^3 /일(75 m^3 /일×2기), 마라도는 75 m^3 /일(25 m^3 /일×1기, 50 m^3 /일×1기)이다.

5) 하수처리장 방류수 재이용

제주도내에는 하수처리장이 8개소에 시설되어 있으며, 처리용량은 총 197천 m^3 /일이다. 이들 하수처리장 중 방류수를 재이용할 수 있는 시설이 갖추어진 곳은 4개소(월정, 판포, 대정, 성산)이며, 시설용량은 16.8천 m^3 /일 규모이다. 방류 재이용 시설 4개소 중 월정과

판포는 역삼투막 방식의 5천m³/일 규모의 고도처리시설이 설치되어 있고, 대정과 남원은 각각 5천m³과 1.8천m³ 규모의 저류조가 시설되어 있다.

2012년 현재 8개소의 하수처리장에서 발생하는 방류수 재이용량은 총 4천m³/일 규모로 전체의 약 2.5% 수준이다. 방류수는 청소용수, 농업용수, 냉각수, 세척수, 조경용수 등으로 재이용되고 있다.

2. 용수 수요 전망

1) 생활 및 공업용수

제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013)에서 추정된 향후 제주도의 용수수요는 표3과 같다. 일평균 용수수요는 2015년 360천m³/일에서 2025년에는 407천m³/일로 47천m³/일이 증가할 것으로 전망되었다. 또한, 일 최대 용수수요는 2015년 455천m³/일에서 2025년 513천m³/일로 58천m³/일이 증가할 것으로 분석되었다.

【표 3】 제주도 생활 및 공업용수 수요 전망

(단위 : m³/일)

구 분		2015년	2020년	2025년
일평균	계	360,339	381,619	406,676
	생활용수	253,489	264,296	276,880
	공업용수	16,701	16,701	16,701
	기타용수	90,149	100,622	113,095
일최대	계	455,311	481,864	513,403
	생활용수	329,537	343,584	359,943
	공업용수	16,701	16,701	16,701
	기타용수	109,073	121,579	136,759

2) 농업용수

제주특별자치도 농업용수 관리계획(2013)에 의하면, 채소류, 감귤, 감자 재배면적

34,753ha의 10년 빈도 농업용수 수요량은 1,214천m³/일으로 전망되었다. 지역별로 보면, 제주시 지역이 512천m³/일이고 서귀포시 지역은 703천m³/일으로 분석되었다(표 4).

【표 4】 제주도 농업용수 수요 전망(2020)

(단위 : m³/일)

구 분	3년 빈도	5년 빈도	10년 빈도	20년 빈도
도 전체	1,100,283	1,150,806	1,214,310	1,275,197
제주시	460,586	483,219	511,633	538,876
서귀포시	639,696	667,590	702,677	736,321

3) 용수 과부족량

제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013)과 제주특별자치도 농업용수 관리계획(2013)에서 분석한 용수수요에 따른 과부족량은 표 5와 같다. 생활 및 공업용수와 농업용수 수요를 포함한 일최대 전체 용수 수요량은 2015년 1,670천m³/일, 2020년 1,700천m³/일, 2025년 1,728천m³/일이다. 이 같은 용수수요에 대한 과부족량은 2015년 351천m³/일, 2020년 378천m³/일, 2025년 410천m³/일로 분석되었다.

【표 5】 제주도 용수수요 전망에 따른 과부족량

(단위 : m³/일)

구 분		2015년	2020년	2025년
합 계	일최대 수요량	1,669,621	1,696,174	1,727,713
	기존 공급능력	1,318,161	1,318,161	1,318,161
	과부족량	△351,460	△378,013	△409,552
생활 및 공업용수	일최대 수요량	455,311	481,864	513,403
	정수장 시설용량	419,825	419,825	419,825
	과부족량	△35,486	△62,039	△93,578
농업용수	일최대 수요량	1,214,310	1,214,310	1,214,310
	기존 공급능력	898,336	898,336	898,336
	과부족량	△315,974	△315,974	△315,974

4) 용수 과부족량에 대한 대책

제주특별자치도는 생활 및 농업용수 과부족에 대한 대책으로 △기존 수원시설의 증설 및 보조수원 개발 △어승생 수원 정수시설 증량 △제주시/서귀포시 수원 및 정수시설 증량 등의 계획을 수립해 추진하고 있다.

또한, 농업용수 대책으로서 △기존 농업용 관정 정비 △공공 농업용 관정 추가개발 △지표수/빗물/하수방류수 재이용 등 대체수자원 개발 △농업용 관정 저수조 용량 확대 △노후관로 교체 및 관로 확장 등을 시행한다는 계획이다.

Ⅲ. 한반도 및 제주도 기후변화 전망

1. 과거 30년간의 한반도 기후변화

기상청이 2012년 발간한 ‘한반도 기후변화 전망 보고서’에 따르면, 지난 30년간(1981~2010) 한반도의 연평균 기온은 1.2°C가 상승하였다(10년 당 0.41°C 상승). 계절별로 보면 겨울 1.7°C, 가을 1.5°C, 봄 0.8°C, 여름 0.7°C가 상승하여 모든 계절에 걸쳐 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 연평균 기온의 상승 경향은 북한이 0.45°C/10년으로 남한(0.36°C/10년)보다 1.3배 크게 나타났다.

연평균 강수량은 연별 변동 폭이 커서 통계적으로 유의한 추세를 감지할 수 없으나, 78mm 정도 약한 증가를 나타내었다. 특히, 남한 대부분의 지역에서 평균 강수량이 증가하는 경향을 나타내었으나, 충청남부와 남서해안에서는 강수량 증가가 약하거나 오히려 감소하는 경향을 보이는 등 지역별 편차가 큰 편이다. 또한, 지난 43년(1964~2006년)간 한반도 주변 해역의 해수면은 약 8cm 상승하여 세계 평균보다 약간 높은 1.9mm/년의 상승률을 보였다. 특히, 제주 주변해역의 연평균 해수면 상승률은 5.1mm/년으로 약 22cm가 상승하였다.

2. 한반도 미래 기후변화 전망

기후변화에 관한 정부간협의체(IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2013년 9월 27일 스웨덴 스톡홀름에서 IPCC 「WGI 제5차 평가보고서」 중 「정책결정자를 위한 요약보고서」를 통해 온실가스의 감축 없이 현재와 같은 추세로 온실가스를 배출하는 경우(이산화탄소 농도가 2100년 936ppm에 도달할 경우, RCP2) 8.5 시나리오), 21세기 말(2081~2100년) 지구의 평균기온은 1986~2005년에 비해 3.7°C 오르고, 해수면은 63cm 상승할 것으로 전망했다. 또한, IPCC는 지역적으로 예외가 있지만, 지구 대부분 지역에서 온난화된 기후로 인해 건조지역과 습윤 지역의 계절 강수량 차이가 커지고, 우기와 건기 간의 기온의 차이도 더 벌어질 것이며, 고위도와 적도 태평양의 경우 강수량이 증가할 가능성이 매우 높다고 전망했다. 동아시아의 경우, 21세기 말(2081~2100년)의 평균기온은 1986~2005년에 비해 2.4°C 상승하고, 강수량은 7% 증가할 것으로 전망하였다.

우리나라 기상청(2012)이 예측한 바에 따르면, 미래 전지구적인 기후는 대기 중의 이산화탄소 농도에 따라 큰 차이를 보일 것으로 전망되었다. 2100년경 이산화탄소 농도가 540ppm을 유지할 경우(RCP 시나리오 4.5) 현재보다 평균기온은 2.5°C 상승하고, 강수량은 4.1% 증가하며, 해수면은 70.6cm가 상승할 것으로 전망되었다. 또한, 이산화탄소 농도가 940ppm으로 증가하는 경우(RCP 시나리오 8.5), 평균기온은 4.6°C가 증가하고, 강수량은 5.9% 증가, 해수면은 88.5cm가 상승할 것으로 전망되었다(표 6).

【표 6】 현재(1981-2010) 대비 21세기 후반기(2071-2100) 전지구 평균기온, 강수량, 해수면 상승 전망

RCP 시나리오	RCP 4.5	RCP 8.5
이산화탄소 농도(2100년경)	540ppm	940ppm
평균기온	+2.5°C	+4.6°C
강 수 량	+4.1%	+5.9%
해수면	+70.6cm	+88.5cm

(자료 : 한반도 기후 전망 보고서, 2012, 기상청)

2) Representative Concentration Pathways(대표농도 경로)

기상청이 전망한 미래 한반도의 평균기온은 RCP 4.5 시나리오에서는 21세기 전반기에 +4.1℃, 중반기에 +2.4℃, 후반기에 +3.0℃ 상승할 것으로 예측되었다. 또한, RCP 8.5 시나리오에서는 21세기 전반기에 +1.5℃, 중반기에 +3.4℃, 후반기에 +5.7℃로 온난화가 더욱 가속화 될 것으로 전망되었다(표 7).

평균 강수량은 RCP 4.5시나리오에서 현재 대비 21세기 전반기에 +6.2%, 중반기에 +10.5%, 후반기에 +16.0%가 증가하고, RCP 8.5 시나리오에서는 21세기 전반기에 +3.3%, 중반기 15.5%, 후반기 17.6%가 증가하는 것으로 전망되었다.

【표 7】 RCP 4.5와 8.5에 따른 21세기 한반도의 기후 전망

구 분	현재 기후값 (1981~2010)	21세기 전반기 (2011~2040)		21세기 중반기 (2041~2070)		21세기 후반기 (2071~2100)		경향성 (10년당)	
평균기온	11.0	12.4	(12.5)	13.4	(14.4)	14.0	(16.7)	0.33	(0.63)
일최고기온	16.6	17.9	(18.1)	18.9	(19.9)	19.4	(22.2)	0.31	(0.62)
일최저기온	6.2	7.7	(7.7)	8.6	(9.7)	9.3	12.0)	0.34	(0.64)
강수량	1,162.2	1,234.3	(1,201.1)	1,283.7	(1,342.1)	1,348.1	(1,366.9)	20.66	(22.74)
풍 속	1.9	1.9	(1.9)	1.9	(1.9)	1.8	(1.9)	-0.01	(0.00)
상대습도	70.2	70.1	(70.0)	69.8	(70.4)	70.4	(70.3)	0.02	(0.01)
운 량	5.2	5.2	5.2	5.2	(5.2)	5.2	(5.2)	0.00	(0.00)
폭염일수	7.3	8.8	10.2	11.1	(15.2)	13.1	(30.2)	0.64	(2.54)
열대야 일수	2.8	4.1	5.7	9.0	(16.6)	13.6	(37.2)	1.20	(3.82)
호우일수	2.0	2.3	2.1	2.6	(2.8)	2.7	(2.8)	0.08	(0.09)

※ ()는 RCP 8.5에 따른 변화를 나타낸 것임

※ 단위는 기온 ℃, 강수량 mm, 풍속 m/s, 상대습도 %, 운량(1-10), 폭염/열대야/호우일수는 연간 일수임

※ 10년당 경향성은 21세기 후반기와 현재 기후값(1981-2010)의 차이를 10년 당 변화값으로 환산한 것임

〈자료 : 한반도 기후변화 전망 보고서, 2012〉

또한, 21세기 후반기의 폭염일수는 현재 연간 7.3일 수준인데 반해 RCP 4.5 시나리오에서 13.1일로 증가하고, RCP 8.5 시나리오에서는 30.2일로 크게 증가할 것으로 전망되었다. 열대야 일수 또한 21세기 후반기에는 현재 2.8일에서 RCP 4.5 시나리오 13.6일, RCP 8.5 시나리오 37.2일로 대폭 늘어날 것으로 전망되었다.

현재 2.0일인 호우일수는 21세기 후반기에 RCP 4.5 시나리오에서 2.7일, RCP 8.5에서 2.8일로 30% 이상 증가하는 것으로 전망되었다. 해수면은 한반도 모든 해안에서 높아질 것으로 전망되었다. 즉, RCP 4.5에서 21세기 후반기 남해안과 서해안이 53cm, 동해안이 74cm 상승하는 것으로, RCP 8.5에서는 남해안과 서해안 65cm, 동해안 99cm가 상승할 것으로 전망되었다.

3. 제주도의 기후변화 전망

1) 기후변화 추세(1973~2010)

가. 기온

제주지방기상청이 2011년 발간한 ‘지역 기후변화 보고서(제주도)’에 따르면, 제주도의 평균 기온은 1971~2000년 기간에는 15.6°C이었으나, 1981~2010년 기간에는 15.9°C로 0.3°C 상승하였다. 최고기온 역시 1971~2000년 기간에 19.2°C에서 1981~2010년 기간에 19.4°C로 0.2°C 상승하였고, 최저기온 또한 12.2°C에서 12.7°C로 0.5°C 상승하였다. 30년 단위 월 평균기온은 1971~2000년 평균보다 1981~2010년 기간에 초가을이나 늦겨울 평균기온이 다른 기간에 비해 상승하였다. 이러한 기온의 변화는 봄철이 점차 앞당겨져서 겨울철 지속기간이 짧아지는 대신 여름철이 종료되는 시점이 점차 늦어져 여름철 지속기간이 늘어나고 있음을 의미한다. 제주, 서귀포, 성산 관측지점을 평균한 제주도 해안지역의 1973~2010년 기간 동안의 평균기온은 0.32°C/10년의 상승률로 상승하였고, 최고기온은 0.29°C/10년 상승률, 최저기온은 0.50°C/10년의 상승률을 나타내 최저기온 상승률이 최고기온 상승률보다 약 1.7배 크게 나타났다(표 8).

나. 강수량

제주도는 연평균 강수량이 2,061mm(1992-2011)에 달하는 많은 비가 내리는 지역이지만, 섬 중앙에 위치한 한라산의 지형적 영향으로 동-서 및 남-북간, 그리고 해안 및 산악지역 간에 강수량의 편차가 크게 발생한다. 해발고도 100m 상승시 연평균 강수량

증가량은 동부지역이 235mm로 가장 크고, 북부지역 153mm, 서부지역 144mm, 남부지역 69mm를 나타낸다(제주특별자치도 수자원관리종합계획, 2013).

제주도 해안지역 4개 지점에서 관측된 10년 단위 평균 강수량을 보면, 전 지점에서 관측 시작시점보다 강수량이 증가했음을 알 수 있다. 제주지역의 경우 관측개시(1931~1940) 10년 평균은 1,401.7mm 이었으나, 최근(2001~2010) 10년 평균 값은 1,516.4mm로 약 114mm가 증가하였다. 또한, 서귀포의 경우에도 초기(1961~1970) 평균값은 1,707.6mm이었으나 최근(2001~2010) 평균값은 1,993.4mm로 약 286mm나 증가하였다(표 9).

【표 8】 제주도 해안 4개 지점의 10년 단위의 기온(단위 : °C)

구 분		1931~ 1940	1941~ 1950	1951~ 1960	1961~ 1970	1971~ 1980	1981~ 1990	1991~ 2000	200~ 2010
제 주	평균	14.5	14.7	15.0	15.3	15.3	15.4	16.0	16.1
	최고	18.2	18.6	18.8	18.8	18.5	18.6	19.1	19.3
	최저	11.2	11.3	11.4	11.7	11.8	12.3	13.1	13.3
서귀포	평균				15.7	15.9	16.2	16.6	17.2
	최고				19.3	19.5	19.9	20.1	20.7
	최저				11.9	12.6	12.9	13.7	14.2
성 산	평균						15.3	15.3	15.7
	최고						19.0	19.2	19.2
	최저						11.2	11.6	12.3
고 산	평균							15.6	15.7
	최고							18.3	18.8
	최저							13.1	13.1

〈자료 : 제주지방기상청(2011) 보고서 각색〉

【표 9】 제주도 해안 4개 지점의 10년 단위의 강수량(단위 : mm)

구 분	1931~ 1940	1941~ 1950	1951~ 1960	1961~ 1970	1971~ 1980	1981~ 1990	1991~ 2000	2001~ 2010
제 주	1401.7	1369.8	1547.6	1369.4	1394.5	1506.9	1469.6	1516.4
서귀포				1707.6	1716.7	1889.6	1945.9	1993.4
성 산						1887.3	1916.5	2017.1
고 산							1125.1	1205.3

〈자료 : 제주지방기상청(2011) 보고서 각색〉

관측기간이 짧은 고산지역을 제외한 나머지 해안지역 3개 지점의 1973~2010년 기간 동안 강수량의 연 및 계절 변화율을 보면(표 10), 해안지역 평균 7.169mm/년의 증가율을 나타냈다. 지점별 연 변화율은 성산이 9.746mm/년으로 가장 높고, 제주가 3.534mm/년으로 가장 낮았다. 해안지역 평균 계절 변화율은 여름과 가을이 각각 3.278mm/년과 2.737mm/년으로 봄(0.790mm/년)과 겨울(0.659mm/년)보다 상대적으로 높았다.

【표 10】 제주도 해안 3개 지점의 연 및 계절 강수량 변화율(단위 : mm/년)

구 분	연변화률 (1973~2010)	봄	여름	가을	겨울
제주	3.534	0.867	0.158	2.019	0.617
서귀포	8.226	-0.232	4.625	3.298	0.841
성산	9.746	1.736	5.052	2.895	0.520
해안지역	7.169	0.790	3.278	2.737	0.659

(자료 : 제주지방기상청(2011) 보고서 각색)

2) 제주도의 미래 기후변화 전망

가. 기온

평균기온은 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에서 현재보다 모두 증가하는 것으로 전망되었다. 즉, RCP 4.5 시나리오에서 21세기 후반기에 2.3°C가 상승한 16.7°C에 이를 것으로 전망되며, RCP 8.5 시나리오에서는 현재보다 4.6°C가 높은 19.0°C에 이를 것으로 기상청(2013)은 전망하였다. 또한, 최고 및 최저기온도 현재보다 각각 4.5°C와 4.6°C가 상승하여 22.6°C, 15.6°C에 이를 것으로 전망되었다. 이처럼 평균기온을 비롯한 최고 및 최저기온이 상승함에 따라 열대야 및 폭염일수도 크게 증가할 것으로 전망되었다(표 11).

나. 강수량

강수량 역시 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에서 현재보다 증가하는 것으로 전망되었다. RCP 4.5 시나리오에서는 21세기 전반기에서 후반기로 가면서 강수량이 2,479mm, 2,561mm,

2,710mm로 점차 증가할 것으로 전망되었으며, RCP 8.5 시나리오의 경우는 2,456mm, 2,643mm, 2,943mm로 강수량 증가량이 많아지는 것으로 나타났다(표 12).

【표 11】 시나리오별 제주도의 기온 전망

구 분	현 재 (2001-2010)	시나리오	21세기 전반기 (2011-2040)	21세기 중반기 (2041-2070)	21세기 후반기 (2071-2100)
평균 기온	14.4℃	RCP 4.5	15.1(+0.7)	16.1(+1.7)	16.7(+2.3)
		RCP 8.5	15.3(+0.9)	17.0(+2.6)	19.0(+4.6)
최고 기온	18.1℃	RCP 8.5	19.0(+0.9)	20.7(+2.6)	22.6(+4.5)
최저 기온	11.0℃	RCP 8.5	11.8(+0.8)	13.5(+2.5)	15.6(+4.6)
열대야 일수	9.5일	RCP 4.5	+6.3	+20.3	+29.1
		RCP 8.5	+10.5	+31	+56.3
폭 염 일 수	1.6일	RCP 4.5	+3.2	+9.2	+14.0
		RCP 8.5	+5.6	+17.9	+39.6

〈자료 : 제주도 기후변화 상세 분석 보고서, 기상청, 2013〉

【표 12】 시나리오별 제주도의 강수량 및 호우일수 전망

구 분	현 재 (2001-2010)	시나리오	21세기 전반기 (2011-2040)	21세기 중반기 (2041-2070)	21세기 후반기 (2071-2100)
강수량	2,168.1mm	RCP 4.5	2,479.2(+14.3%)	2,561.1(+18.1%)	2,709.7(+25%)
		RCP 8.5	2,456.1(+13.3%)	2,642.6(+21.9%)	2,942.5(+34.9%)
호우 일수	4.7일	RCP 4.5	+5.2(+110.6%)	+7.3(+155.3%)	+7.8(+166.0%)
		RCP 8.5	+3.1(+66.0%)	+5.6(+119.1%)	+9.5(+202.1%)
강수 강도	19.4mm/일	RCP 4.5	+2.0(+10.3%)	+2.7(+13.9%)	+3.9(+20.1%)
		RCP 8.5	+1.7(+8.8%)	+3.3(+17.0%)	+5.6(+28.9%)

〈자료 : 제주도 기후변화 상세 분석 보고서, 기상청, 2013〉

다. 호우일수와 강수강도

1일 80mm 이상의 호우일수도 현재(4.7일)보다 두 시나리오에서 모두 증가하는 것으

로 전망되어 향후 집중호우가 늘어날 것으로 보인다. 21세기 후반기에 RCP 4.5 시나리오에서는 현재(4.7일)보다 7.8일 늘어난 12.5일, RCP 8.5 시나리오에서는 현재보다 9.5일 증가한 14.2일이 될 것으로 전망되었다.

강수강도도 RCP 4.5 및 8.5 시나리오에서 모두 증가하는 것으로 분석되었다. 21세기 후반기에 RCP 4.5 시나리오에서 현재(19.4mm/일)보다 20% 가량이 증가한 23.3mm/일의 강수강도를, RCP 8.5 시나리오에서는 25.0mm/일의 강수강도를 보일 것으로 전망되었다.

라. 계절변화

기온상승과 더불어 제주도의 계절변화도 가속되어 21세기 후반기에는 겨울이 사라져 봄과 가을이 합쳐지고, 여름이 더 길어질 것으로 전망되었다(표 13). 즉, 21세기 후반기에는 여름이 5월부터 시작되고 현재보다 최대 56일(RCP 8.5)이 길어질 것으로 전망되었다.

【표 13】 시나리오별 제주도의 계절변화 전망

구분	현 재 (2001-2010)	시나리오	21세기 전반기 (2011-2040)	21세기 중반기 (2041-2070)	21세기 후반기 (2071-2100)
봄	116일 (2월 13일)	RCP 4.5	117일(2월 6일)	113일(2월 4일)	225일(10월 9일)
		RCP 8.5	115일(2월 7일)	230일(10월 9일)	201일(10월 23일)
여름	108일 (6월 9일)	RCP 4.5	117일(6월 3일)	136일(5월 28일)	141일(5월 21일)
		RCP 8.5	122일(6월 2일)	135일(5월 27일)	164일(5월 12일)
가을	88일 (9월 25일)	RCP 4.5	91일(9월 28일)	100일(10월 11일)	225일(10월 9일)
		RCP 8.5	88일(10월 2일)	230일(10월 9일)	201일(10월 23일)
겨울	53일 (12월 22일)	RCP 4.5	40일(12월 28일)	16일(1월 19일)	
		RCP 8.5	42일(12월 27일)		

(자료 : 제주도 기후변화 상세 분석 보고서, 기상청, 2013)

마. 해수면 상승

제주도에 인접한 남해안의 해수면 상승은 21세기 후반기에 RCP 4.5 시나리오에서 53cm, RCP 8.5에서 65cm가 상승할 것으로 전망되었으며, 해수면 고도는 2100년에 남

해안의 해수면이 RCP 4.5와 8.5 시나리오에서 각각 65cm, 85cm 정도 상승할 것으로 전망되었다.

기후변화에 해수면 상승과 조석, 태풍해일 등을 고려한 우리나라 침수지역에 대한 연구에 따르면, 제주도는 2100년 전체 면적의 4.8% 정도가 침수될 가능성이 있으며, 침수 지역의 24.6%가 농업지역이 될 것으로 나타났다.

바. 식물 성장 가능 기간

온난화가 진행되면서 산악지역의 식물 성장 가능기간도 증가할 것으로 전망되는데, RCP 4.5 시나리오에서는 21세기 후반에 현재(322.9일)보다 21.6일이 증가하여 연간 344일 이상 식물 성장이 가능할 것으로 전망되었다. 또한, RCP 8.5 시나리오에서는 현재보다 32일이 증가하여 연간 355 이상이 될 것으로 전망되었다.

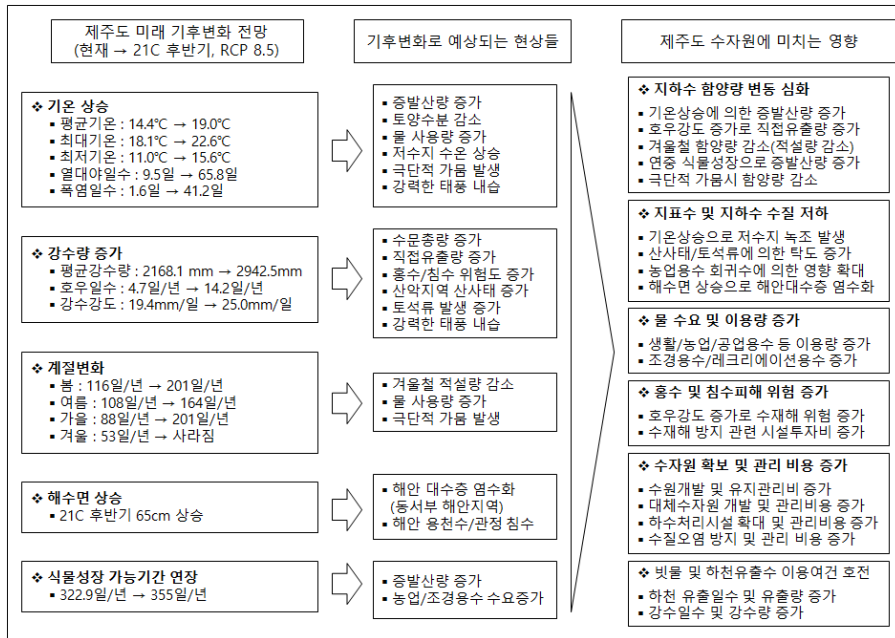
【표 14】 시나리오별 식물 성장 가능기간 전망

현 재 (2001-2010)	시나리오	21세기 전반기 (2011-2040)	21세기 중반기 (2041-2070)	21세기 후반기 (2071-2100)
322.9	RCP 4.5	+7.0	+17.8	+21.6
	RCP 8.5	+7.9	+25.5	+32.1

〈자료 : 제주도 기후변화 상세 분석 보고서, 기상청, 2013〉

IV. 기후변화가 제주도 수자원에 미치는 영향

미래 제주도의 기후변화 전망 중 수자원에 직간접적으로 영향을 미치는 변화로서는 기온 상승, 열대야 및 폭염일수 증가, 강수량 증가, 호우일수 및 호우강도 증가, 계절변화, 해수면 상승, 식물성장 가능 기간 연장 등을 들 수 있다. 이러한 기후변화에 수반되어 미래에 발생할 것으로 예상되는 현상들과 제주도 수자원에 미치는 영향을 요약하면 그림 1과 같다.



【그림 1】 미래 제주도의 기후변화(RCP 8.5)에 따라 발생할 수 있는 현상들과 제주도 수자원에 미치는 영향

21세기 후반기 제주도의 연강수량은 현재보다 36%(774mm) 늘어난 2,945mm에 이를 것으로 전망되고 있다. 이를 단순 계산하면, 수문총량은 현재보다 약 1,359백만 m³/년 늘어나 총 51억 m³/년에 이른다. 그러나, 강수량 증가에 따른 수문총량의 증가는 직접유출량 증가로 이어진다. 강수패턴도 집중호우 일수 및 강우강도의 증가, 강우일수의 감소, 특정시기 강수량 편중 등이 전개되는 경우, 직접유출을 증가로 인하여 지하수 함양율의 감소가 예상된다. 아울러, 홍수 및 산사태 등으로 인한 하천과 산악지역의 지형변화는 수계의 변화를 초래할 수 있으며, 또 홍수시 퇴적현상은 지표 침투율의 저하를 가져올 수도 있다. 게다가, 기온상승, 열대야 및 폭염일수의 증가, 계절변화 등으로 증발산량이 현재보다 더 늘어나 직접유출을 증가와 더불어 지하수 함양을 감소를 가져오는 원인으로 작용할 수 있다. 그리고, 기온상승 등으로 산림이 고사하거나, 초지가 감소하는 등의 생태계 변화가 생겨나는 경우 역시 직접유출율의 증가를 가져올 수 있다. 이와 같은 원인에 의한 지하수 함양량 감소는 결국 지하수의 지속 이용 가능량의 감소로 이어져 지하

수의 취수 가능량이 줄어드는 현상이 발생할 수도 있다.

제주지역을 대상으로 기후변화에 따른 강수량 증가(호우일수 및 강수강도 증가 포함)가 직접유출량에 어떠한 영향을 미칠 것인지에 대한 연구는 아직까지 수행되지 않았으나, 다른 지역에서 연구된 결과를 보면 강수량 증가는 직접유출률을 현저하게 증가시킬 것으로 보고되고 있다. 박종혁 외 3인(2014)이 SWAT모형을 이용하여 기후변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향을 평가한 결과, 21세기 중반 RCP 8.5 시나리오에서 강수량 증가로 인해 직접유출률이 59.7~63.0%까지 증가할 것으로 예측되었다. 또한, 은코모제피 텀바와 정상옥(2014)이 Catchment Modeling Toolkit의 4가지 수문기상 모형을 사용하여 RCP 2.6, RCP 4.5 RCP 8.5 시나리오별로 기후변화가 우리나라 5대강 유역 유출량에 미치는 영향을 분석한 결과, 유출율이 RCP 2.6 시나리오에서 10~24% 증가한 것을 비롯해서 RCP 4.5와 8.5 시나리오에서 각각 7~30%, 11~30% 증가할 것으로 예상되었다. 이러한 점을 감안하면, 수문총량 증가가 지하수 함양에 그다지 도움이 되지 않을 것으로 보인다.

기온상승 또한 지하수 함양량을 감소시킬 뿐만 아니라, 물 사용량을 증가시킨다. 미국 Ogallala 대수층 지역에 대하여 전망된 자연 지하수 함양량은 기온이 2.5°C 혹은 그보다 크게 상승할 경우 모든 모델 모의에서 20% 이상 감소하는 것으로 보고되었다(Rosenberg et al., 1999). 기온상승은 토양수분 결핍을 가져올 뿐 아니라, 지표수의 증발량 및 식물의 발산량을 증가시켜 수문순환에 영향을 미친다(Kumar, 2012).

기후변화가 증발산량에 미치는 영향에 대한 이전의 연구 결과들을 보면, 크게 ‘증가한다’와 ‘감소한다’는 상반되는 결과가 보고되고 있다. North America 지역은 지난 세기 동안 기온 상승으로 인해 기준증발산량(Reference Evapotranspiration; ETo)이 증가되었다는 보고(Myeni et al. 1997, Milly and Dunne 2001)가 있는 반면, 중국에서는 일최대 기온이 상승했음에도 불구하고 기준증발산량과 팬증발량은 1.19mm/년 비율로 오히려 감소(Thomas, 2000, Liu et al., 2004, Song et al., 2010) 했다는 보고도 있다. 티벳고원지대의 경우에서도 연간 총 증발산량이 2.0%(1.31mm/년) 감소했는데, 이는 풍속과 순복사량의 감소에 기인하는 것으로 해석되었다(Shenbin et al., 2006). Gao et al.,(2007)의 연구에 의하면, 중국 동부지역 대부분은 실제 증발산량이 감소하는 경향을 나타낸 반면, 중

국 서부지역과 북동부의 북부지역은 증가하는 경향을 나타내었는데, 강수량이 실제 증발산량 변화에 중요한 인자 역할을 하는 것으로 해석하였다. Abderrahman et al.(1991)은 사우디아라비아에서 수행한 연구에서 기온이 1°C 증가함에 따라 기준증발산량은 1~4.5% 증가했다고 보고하였고, Abderrahman and Al-Harazin(2003)이 사우디아라비아, 아랍에미레이트, 쿠웨이트 등에서 연구한 결과 기온이 1°C 상승함에 따라 기준증발산량은 최대 20%까지 증가하는 것으로 나타났다.

강수량 못지않게 지하수 함양량에 영향을 미치는 기후인자 중의 하나가 ‘적설(snow)’이다. 일반적으로 제주도는 11월 중순경부터 한라산 고지대 지역에 눈이 쌓이기 시작하여 다음해 4~5월까지 이어진다. 이 기간 동안에 한라산 지역에 많게는 1m 이상의 눈이 쌓이며, 눈 녹은 물(snowmelt)은 지하수 함양에 상당히 기여하고 있다. 그러나, 21세기 후반기에 제주도에는 겨울이 사라지기 때문에 적설에 의한 지하수 함양은 기대하기 어려울 것으로 전망된다.

기후변화에 의한 해수면 상승 또한 지하수 관리에 부정적 영향을 미친다. 해수면 상승은 해안지역 침수(해안선 후퇴)로 인하여 해안대수층 및 용천수의 이용에 악영향을 초래한다. 즉, 현재보다 해수가 내륙 쪽으로 더 들어옴에 따라 해안대수층의 염분농도가 높아져 이미 개발된 관정이나 용천수 수원들이 더 이상 이용할 수 없는 피해를 가져올 수 있다. 제주도의 경우, 21세기 후반기에 해수면은 현재보다 53~65cm 높아질 것으로 전망되고 있다. 해수면 상승은 남-북지역보다 완만한 해안지형을 이루고 있는 동-서부 해안지역에 더 많은 영향을 미칠 것으로 보인다. 동부지역은 담-염수 경계면을 갖는 기저지하수가 내륙 쪽으로 더 확장될 것이며, 서부지역 역시 해안 가까이에 개발된 지하수 관정과 해안 용천수의 염분농도 증가가 예상된다.

제주지역의 평균기온은 21세기 후반기에 현재보다 최대 4.6°C나 높은 19.0°C에 이를 것으로 전망되고 있다. 또한, 열대야 일수와 폭염일수도 현재보다 대폭 증가할 것으로 전망되고 있다. 이와 같은 현상은 생활용수를 비롯한 농업용수 수요를 대폭 증가시킬 것으로 보인다. 아울러, 여름철이 길어지고 봄과 가을이 합쳐지는 계절변화로 인하여 작목 변화 등을 수반하는 농업의 변화에 수반한 농업용수 수요가 크게 증가할 것으로 보이며, 1인당 1일 물 사용량도 늘어날 전망이다.

기후변화는 수질에도 영향을 미친다. 강수량 부족이나 가뭄, 그리고 기온상승, 홍수 등의 현상은 수자원의 수질을 악화시킬 수 있다. 우선 기온상승은 저수지 녹조현상을 발생시킬 수 있다. 가뭄에 의해 물 순환이 제대로 이루어지지 못하거나, 강한 일사량이 장기간 지속되는 경우 저수지 녹조현상은 더욱 심각하게 진행될 수 있다. 또한, 강수량 증가(강우강도 증가 및 호우일수 증가 포함)는 한라산 고지대지역 토사유출 및 토석류를 발생시켜 하천유출수에 많은 토사가 포함되어 직접적 이용을 어렵게 할 수 있다. 농업용수 사용량 증가로 인한 회귀수(return flow)량이 늘어나면서 지하수의 수질을 저하시킬 수 있으며, 집중호우시 관정침수에 의한 오염물질 유입도 우려된다.

한편, 기후변화가 수자원 이용에 모두 부정적인 영향을 미치는 것은 아니다. 강수량 증가는 빗물을 이용할 수 있는 여건을 좋게 해준다. 빗물을 저장할 수 있는 시설 투자가 뒤따를 경우, 농업용수나 조경용수 등의 확보가 보다 용이해 질 수 있다. 또한, 빗물이나 하천유출수를 인공함양시켜 지하수 함양량을 증대시킬 수도 있다.

V. 기후변화 대응을 위한 수자원 관리방향

1. 기후변화를 고려한 용수수요 예측

2013년 수립된 제주특별자치도 수자원관리종합계획과 농업용수 관리계획상의 용수수요는 미래에 전개될 기후변화(기온상승, 열대야 및 폭염일수 증가, 강우강도 및 호우일수 증가, 식물성장 가능 기간의 연장, 여름기간의 증가 등)에 따른 생활·공업용수 및 농업용수의 수요를 반영하지 못하고 있다.

한국수자원공사(2003)의 연구결과에 의하면, 기온과 생활용수 사용량 간에는 정의 상관관계를 보여 여름철 최대 피크를 나타내며, 특히 기온이 30℃ 이상인 달의 평균 사용량이 8% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 기후변화로 인한 농업용수의 영향에 있어서 주요 요인은 증발산량과 유효우량이라는 두 가지 측면에서 살펴볼 수 있는데, 증발산량의 증가는 농업용수의 증가, 유효우량의 증가는 농업용수의 감소원인이 된다. 증발산량

의 변화요인으로는 기온상승, 일사량의 변화 등이고 유효우량의 변화요인으로는 강수량의 변화, 계절별 강우편차 및 강우강도의 변화 등으로 볼 수 있다(최진용 외 4인, 2012).

따라서, 제주도의 장래 용수수요는 용수수요에 직접적인 영향을 미치는 기후변화 현상을 반영하여 예측되어야 한다. 제주도는 2013년 여름 극심한 가뭄으로 농작물 1,200ha에서 고사피해가 발생하였고, 피해액도 3,111백만 원에 달했다(2013년 이상기후 보고서, 관계부처합동, 2014). 또한, 어승생저수지의 저수량이 급격히 감소하여 2013년 8월 6일부터 18일 간 중산간 11개 마을에 격일제로 수도물이 공급되면서 큰 불편을 겪기도 했다. 이 같은 2013년 가뭄피해는 강수량의 양극화라는 이상기후 대비하지 못한데서 비롯된 것이라 할 수 있으며, 기후변화가 진전되면 될수록 이 같은 현상의 발생빈도가 늘어날 수 있다. 주민생활의 불편을 없애고, 안정적인 산업경제 활동을 보장하기 위해서는 기후변화를 고려한 용수수요 예측과 지속 가능한 용수공급 시스템 구축이 요구된다.

2. 용수수요를 고려한 수자원관리계획 수립

기후변화를 고려한 용수수요 예측과 더불어 시급하게 진행되어야 할 과제는 수자원관리계획을 용수수요에 기초하여 수립되어야 한다는 것이다. 자연적 물 순환시스템으로부터 얻을 수 있는 지역별/시기별 지속 이용 가능한 수자원으로 생활 및 농업용수 수요를 감당할 수 있는 것인지에 대한 고려가 우선되어야 한다. 그러나, 지금까지 제주도의 수자원관리계획은 자연계에서 일어나는 물순환 과정상의 물수지(water balance)에 기초하여 수립되었기 때문에 지역별/시기별 지속 이용 가능한 수자원의 배분 및 관리계획이 충분히 반영되지 못하였다. 그 결과, 해당 수역의 지하수 지속 이용 가능량을 초과해 지하수가 개발되는 문제점도 노출되었을 뿐 아니라, 가을 가뭄시 농업용수의 집중적인 취수로 인해 서부 해안지역 대수층이 염분농도가 증가하는 현상도 발생하고 있다.

이러한 문제점을 해소하기 위해서는 지역별/시기별 용수수요와 지속 이용 가능한 수자원의 배분 및 관리계획이 필요하다. 만약, 해당 수역의 지속 이용 가능한 수자원만으로 용수수요를 감당하지 못할 경우에는 대체수자원 개발, 용수수요 관리, 저류조 또는 배수지 등 용수 저장시설 확충 등의 대안이 마련되어 한다. 또한, 수량적 여유가 있는 수역

으로부터 가용량이 부족한 수역으로 물을 배분하기 위한 급수체계 구축 등을 포함하는 수자원관리계획이 수립되어야 한다.

3. 인공함양을 통한 지하수 함양량 유지

먹는물을 비롯하여 모든 용수를 지하수에 의존하고 있는 제주도의 수자원 이용여건에 비추어 볼 때, 기후변화로 인한 지하수 함양량 감소는 매우 심각한 물 문제를 일으킬 수 있다. 따라서, 향후 용수수요 증가를 대비하여 지하수 함양율을 현재보다 더 늘리거나, 현재 수준을 지속적으로 유지시킬 수 있는 방안이 필요하다. 지하수 함양량을 확대(또는 유지)시키기 위한 방안으로서는 △인공함양 저류지 설치 △인공함양정 설치 △빗물침투조 설치(주택, 공공건물, 비닐하우스 등) △인공함양림 조성 △하천 인공함양보 설치 등의 방법을 고려해 볼 수 있다. 그러나, 지하수 인공함양에 있어서 △시설위치 △인공함양시킬 물의 수질 △인공함양방법 △하류지역 지하수위 상승에 따른 부작용 △인공함양 시설물의 유지관리 등에 대한 사항을 사전에 면밀하게 검토하여야 한다(고기원, 2013).

4. 대체수자원 이용 확대

기후변화에 따른 수자원 가용량의 불확실성, 생활 및 농업용수 수요 증가, 해안지역 대수층의 이용 장애, 지하수 함양량의 감소 등 수자원 이용 전반에 걸쳐 발생할 수 있는 위협에 적극적으로 대응하기 위해서는 지하수를 대체해 이용할 수 있는 수자원(대체수자원) 개발·이용사업에 투자를 확대하여야 한다. 제주도의 여건에 비추어 볼 때, 개발대상 대체수원으로는 △빗물 △하천유출수 △하수처리장 방류수 △염지하수를 들 수 있다(고기원, 2013).

5. 상수도 공급능력 확대

2012년 기준 제주특별자치도의 상수도 시설용량은 453천 m^3 /일이며, 일평균 용수수요

는 2015년 360천 m^3 /일에서 2025년에는 407천 m^3 /일로 47천 m^3 /일이 증가할 것으로 전망되었다. 또한, 일최대 용수수요는 2015년 455천 m^3 /일에서 2025년 513천 m^3 /일로 58천 m^3 /일이 증가할 것으로 분석되었다(제주특별자치도 수자원관리종합계획, 2013). 단순히 일최대 용수수요를 기준으로 하더라도 2015년부터 상수도 부족현상이 발생할 수 있다는 것이다. 더욱이, 상수도 유수율과 향후 기온상승에 따른 용수 사용량 증가까지 고려한다면, 상수도 공급능력 확대는 매우 시급한 문제이다. 특히, 용천수 상수원(9개소, 시설용량 136.7천 m^3 /일)은 극단적 가뭄시 보장수량이 현저히 감소한다.

어승생 수원은 평상시에는 평균 15,000 m^3 /일 가량의 용천수가 저수지로 유입되어 평균 12,000 m^3 /일 용수를 공급하고 있으나, 가뭄이 들면 4,000 m^3 /일 수준으로 용출량이 급감하며, 겨울철에는 결빙에 의한 용출량 부족현상도 생겨난다. 가뭄과 겨울철 결빙 등으로 용출량이 급감하더라도 안정적으로 용수를 공급하기 위해서는 예비수원이 확보되어야 한다. 아울러, 도 전체적으로 유수율 향상을 위한 투자가 확대되어야 한다.

6. 농업용수 공급체계의 개선

2011년말 현재 총 3,316개 농업용 관정의 지하수 개발량은 874,093 m^3 /일이고 총 이용량은 일최대 563,070 m^3 /일, 일평균 205,870 m^3 /일이며, 일최대 이용량을 기준으로 할 때, 도 전체 지하수 개발량 대비 이용량은 64.4%를 차지하고 있으나 일평균 이용량은 개발량의 23.6% 수준으로 분석되었다(제주특별자치도 농업용수 관리계획, 2013). 또한, 최근 12년간(2000~2011) 공공 농업용 관정 775개를 대상으로 월별 지하수 이용량을 조사한 결과, 공당 지하수 개발량 대비 월평균 이용량은 10월이 36.6%로 가장 높았고, 1월이 13.8%로 최저치를 나타내었다. 이 같은 조사결과는 농업용수 실제 평균 이용량은 개발량 대비 24% 수준이지만, 지역별/시기별 편차가 매우 크다는 것을 보여주는 것이다.

현재와 같은 수리계 단위의 농업용수 관리체계로는 향후 극단적 가뭄을 극복하기 어렵다. 즉, 공공 농업용수는 1일 1,000 m^3 내외를 양수할 수 있는 소형관정과 100 m^3 을 저장할 수 있는 배수조를 갖추고 50ha 내외를 급수하고 있으나, 가뭄이 들면 급수면적 대비 급수량이 턱없이 모자라 농작물 피해가 발생하고 있다. 이와 같은 점을 감안할 때,

우선적으로, 리(마을) 단위로 농업용수 급수체계를 통합함과 아울러, 단계적으로 읍·면단위로 광역화하는 것이 바람직하다. 농업용수 수원 또한, 지하수 일변도에서 벗어나 대형 빗물저류시설과 하수처리장 방류수를 연계시켜 급수할 수 있도록 관망체계를 정비하고, 수질과 수량상에 문제가 있는 관정정비 및 전문기관 위탁관리 등이 필요하다.

7. 수자원에 대한 조사·연구 강화

한정된 수자원을 효율적으로 이용하기 위해서는 무엇보다도 수자원에 대한 기초조사·연구는 물론 내적 및 외적 환경변화로 나타나는 양상이나 흐름에 대한 연구가 꾸준하게 수행되어야 한다. 예를 들어, 기후변화 시나리오에 따라 지하수 함양량이 어떻게 변화해 나갈 것인지? 기온상승에 따른 물 수요량은 어떻게 증가하여 나갈 것인지? 해수면 상승에 따라 해안대수층의 염수화 범위는 어떻게 형성되어 나갈 것인지? 하는 연구가 수행되어야 한다.

또한, 이와 같은 연구를 수행해 나가기 위해서는 수자원 관측망(지하수위, 수질, 이용량, 하천유출량, 증발산량, 강수조성, 토양수분 등)을 구축하여 지속적으로 운영해야 한다. 중산간지역을 포함한 고지대지역의 수문지질과 지하수 부존특성 규명을 위한 시추조사가 확대 시행되어야 한다. 특히, 한라산 백록담 주변지역의 지하질구조와 지하수 부존특성을 규명함과 아울러, 장기 관측망으로 활용하기 위하여 윗세오름 및 진달래밭 대피소에 심부시추도 필요하다. 수자원에 대한 조사·연구없이 기후변화를 극복할 수 없다. 더욱이, 지하수의 합리적 이용도 장기적인 모니터링과 수문지질에 대한 꾸준한 조사·연구로부터 가능하다.

VI. 결 언

전 세계적인 기후변화는 제주도에서도 이미 생겨나고 있다. 1971~2000 기간 동안 제주지역의 평균기온은 15.6°C이었으나, 1981~2010년 기간에는 15.9°C로 0.3°C 상승하였

다. 강수량 역시 제주지역의 경우 관측개시(1931~1940) 10년 평균은 1,401.7mm 이었으나, 최근(2001~2010) 10년 평균값은 1,516.4mm로 약 114mm가 증가하였다. 또한, 서귀포의 경우에도 초기(1961~1970) 평균값은 1,707.6mm이었으나 최근(2001~2010) 평균값은 1,993.4mm로 약 286mm나 증가하였다.

향후 제주도의 기후변화는 더 가속화 될 것으로 보인다. RCP 8.5 시나리오에서 21세기 후반기 평균 기온은 4.6°C가 증가한 19.0°C로 아열대성 기후로 바뀔 전망이다. 또한, 강수량은 현재보다 775mm가 증가하지만 호우일수 및 강수강도도 함께 증가함으로써 유출량이 많아질 것이다. 겨울이 사라지는 대신 여름기간이 길어지고, 해수면도 현재보다 65cm나 상승할 것으로 보인다. 이와 같은 기후변화는 수자원의 수량과 수질에 직간접적인 영향을 미쳐 직접 유출량 증가, 증발산량 증가, 물 사용량 증가, 지표수 및 지하수 수질저하, 해안 대수층 염수화, 지하수 함양량 감소, 지하수 지속 이용가능량 감소 등의 부정적 영향으로 나타날 것으로 전망된다.

기후변화에 대응한 수자원 관리 방향으로서 △기후변화를 고려한 용수수요 예측 △용수수요를 고려한 수자원관리계획 수립 △인공함양을 통한 지하수 함양량 유지 △대체수자원 이용 확대 △상수도 공급능력 확대 △농업용수 공급체계의 개선 △수자원에 대한 조사·연구 강화의 7가지 방안을 제시하였다.

[참고문헌]

- 고기원, 2013, 기후변화에 따른 제주지역 수자원관리 및 확대방안, 제주의정 제12호, pp174~197
- 관계부처합동, 2014, 2013년 이상기후 보고서
- 기상청, 2012, 한반도 기후 전망 보고서
- 기상청 2013, 제주도 기후변화 상세분석 보고서
- 박종혁, 정혁, 장철희, 김성준, 2014, RCP 배출 시나리오와 SWAT 모형을 이용한 기후 변화가 용담댐 유역의 수문요소에 미치는 영향 평가. Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers Vol. 56, No. 3, pp. 19~29
- 은코모제피 텀바, 정상옥, 2014, 기후변화에 따른 우리나라 수문 기상학적 예측의 불확실성, 한국수자원학회논문집, 제47권 제3호, pp. 257~267
- 제주특별자치도, 2013, 제주특별자치도 농업용수 관리계획(2013~2022)
- 제주특별자치도, 한국수자원공사, 2013, 제주특별자치도 수자원관리종합계획(2013~2022)
- 제주지방기상청, 2011, 지역 기후변화 보고서(제주도)
- 최진용, 유승환, 오윤경, 이상현, 윤동균, 2012, 기후변화의 농업환경 요인 영향을 고려한 미래 농어촌용수 수요평가. 한국수자원학회지 제45호 제2권, pp 73~83
- 한국수자원공사, 2003, 실측을 통한 생활용수의 예측모델 개발. 한국수자원공사 연구보고서
- Abderrahman W. A., Bader T. A., Asfahan Ullah Kahn, Ajward M. H. (1991), Weather Modification Impact on Reference Evapotranspiration, Soil Salinity and Desertification in Arid Regions, A Case Study. J. Arid Environments. 20(3): 277-286
- Abdreeahman, W.A., and Al-Harazin, I. M. (2003). The impacts of global climatic change on reference crop evapotranspiration, irrigation water demands, soil salinity, and desertification in Arabian Peninsula. 67:74p. In Proc. Intl. Conf. of "Desertification in the Third Millennium". Dubai, 12-15 February 2003. Ed. Alsharhan, A. S. Organized by Zayed International Prize for the Environment. 504 pp

- C. P. Kumar, 2012, Climate Change and Its Impact on Groundwater Resources. International Journal of Engineering and Science, Vol. 1, pp. 43-60
- Department of Land and Natural Resources, State of Hawai'i, 2011, The Rain Follows The Forest : A Plan to Replenish Hawai'i's Source of Water, p. 24
- Frazier, A. G. and Giambelluca, T. W., 2013, Mapping Rainfall Trends in Hawai'i. American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, abstract #H43I-1580
- Gao, G., D. Chen, C.-y. Xu, and E. Simelton. (2007). Trend of estimated actual evapotranspiration over china during 1960-2002. Journal of Geophysical Research 112(D11):D11120+.
- Henthorne L (2005) Economic Evaluation of Membrane and Conventional SWRO Pretreatment – Results from a Pilot Study. American Waterworks Association, Membrane Technology Conference.
- Kimberly Burnett and Christopher Wada, 2014, Optimal groundwater management when recharge is declining: A method for valuing the recharge benefits of watershed conservation. The Economic Research Organization at the University of Hawaii, p. 32
- Liu, B., M. Xu, M. Henderson, and W. Gong. (2004). A spatial analysis of pan evaporation trends in china, 1955-2000. Journal of Geophysical Research 109(D15):D15102+.
- Metito Overseas Ltd. (Metito) (2006) Desalination Water Cost Modeling Variables.
- Miller JE (2003) Review of Water Resources and Desalination Technologies. Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM. Available at: 49pp.
- Song, Z. W., H. L. Zhang, R. L. Snyder, F. E. Anderson, and F. Chen. (2010). Distribution and trends in reference evapotranspiration in the north china plain. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 136(4):240-247.
- Thomas, A. (2000). Spatial And Temporal Characteristics Of Potential Evapotranspiration Trends Over China. Int. J. Climatol. 20: 381-396