

기후 변화 대응을 위한 상수도 시설 적응형 관리의 필요성: 2008-2009 광동댐 취수 제한 사례 연구

Adaptive Management of Water Supply Systems to Deal with Climate Changes: A Gwangdong Dam Case Study

이상은^{1*} · 최동진² · 박희경³

Lee, Sangeun^{1*} · Choi, Dongjin² · PARK, Heekyung³

1 University Technology MARA, 2 국토환경연구소, 3 KAIST 건설및환경공학과

(2009년 6월 13일 접수 ; 2009년 9월 28일 수정 ; 2009년 10월 5일 채택)

Abstract

From the engineering standpoint, this study puts a special emphasis on application of adaptive management. To do this, we analyze the recent issue about water scarcity of the Gwangdong dam. Using the system dynamics model, we defined the system including water balance in the dam, dam manager's operation rules, regional water supply and local water distribution, and customer damage. It was expected that the model is useful to explain the real case, and also water scarcity of Gwangdong led to total damage of about 2.56 billion won, mainly to customers in the Taebaek city. Two adaptive management options (i.e., optimal allocation of limited water resources, and early control of dam storage) were applied to the model in order to examine whether adaptive management is effective to mitigate the damage, it is concluded that the case study could largely reduce or entirely avoid the damage with adaptive engineering options.

Key words : Adaptive Management, Climate Change, Drought Damage, System Dynamics

주제어 : 적응형 관리, 기후 변화, 가뭄 피해, 시스템 다이내믹스

1. 연구 배경

1.1 기후변화로 인한 상수도 공급의 취약성 증가
기후관련 주요 연구기관들은 일제히 지구 온난화로 인해 수문순환이 크게 변화하는 중에 있음을 발표하고 있다 (대표적으로, IPCC, 2008; Hadley Centre, 2005). 특히, IPCC (2008)는 고위도 지역 및 열대 지역에서 강우가 증가하며 아열대 및 중위도 이남 지역에서는 강우가 감소할 것으로 예측하고 있다. 그러나 이러한 강우의 재분포로 발생하는 홍수 및 가뭄이라는 극단적인 현상은 모든 지역에서 빈도와

강도가 증가하고 있는 것으로 보고 있다. 게다가, 수온이 증가하고 극단적 현상이 잦아지면서 수질, 연안의 염도, 보건, 상수도 공급의 신뢰도 및 운영비용 등 광범위한 악영향을 예상하고 있다. Vörösmarty 등 (2009)은 범지구적 차원에서 인구분포와 지표수의 유출량을 기후변화 시나리오에 따라 예측한 바 있다. 인구분포와 관련된 수요의 증가와 함께, 캐나다 기후센터의 기후변화 시나리오를 적용하여 1985년과 2025년의 물부족지수를 비교한 결과, 물부족은 범지구적으로 심각한 문제가 될 수 있음을 보인 바 있다. 기후변화로 인한 영향은 관측기관별, 사용한 모형별, 적용 지역별로

* Corresponding author Tel:+82-603-5543-6431, Fax:+82-42-350-3610, E-mail peregian78@gmail.com(Lee, S.):

다양하게 전망되는 것이 사실이다. 그러나 20세기 초반에 비해 수문순환이 이미 상당히 변화했다는 인식과 함께, 강우의 재분포가 홍수와 가뭄의 두 극단적인 현상에 대한 빈도와 강도를 더욱 심화시킬 것이라는 예상은 대부분 공통적이다. 한국에서도, 심기오 등 (2009)은 1971년에서 2006년까지의 한국의 계절별 강수량을 분석한 바 있는데, 홍수기인 여름과 가을에는 강수량이 매년 증가하고 있으며, 갈수기인 봄과 겨울에는 감소 추세를 보인 바 있다. 한국의 강우 또한 가뭄과 홍수의 위험이 점점 더 증가하고 있음을 의미한다.

이 같은 기후 변화는 담수자원의 저수량에 영향을 줘 결국 상수도 서비스에 대한 수요를 제때 충족시키지 못할 가능성을 야기한다. 예를 들어, Dracup 등 (2005)은 미국 California주의 상수도 공급 신뢰성에 대한 영향을 조사한 바 있다. 기후 변화 시나리오의 결과를 해당 지역 저수지 최적 운영 방식을 결정하는 데에 이용되는 모형인 CALSIM-II에 입력하여 분석한 결과, 2100년까지의 전체 신뢰도는 0.75에 불과했으며, 지역별, 고객별, 수권계약 방식별로 신뢰도의 변동폭이 다양함을 보인 바 있다. Colorado 유역에 대한 연구를 실시한 Nash와 Gleick (1993)도, 유역의 특성상 2~4 ° C의 기온 증가가 연평균 유출량을 4~21% 감소시킬 것으로 예측한 바 있다. 이 때 유출량 5%의 감소시 일년 중 1/4 기간만이 현재 수준의 상수도 공급을 유지할 수 있으며, 절반 이상의 기간 동안은 최소 수준으로 공급될 것을 전망하였다. 또한 유출량의 20% 감소시에는 연평균 저수량의 60~70%가 감소하고 전력 생산이 60% 이하에 불과하며, 염도 또한 15~20% 증가하는 위기 상황에 직면할 수 있음을 예상한 바 있다.

1.2 엔지니어링 측면에서 가뭄에 대한 적응형 관리의 필요성
기후변화로 인한 상수도 공급의 취약성을 극복하려는 논의

가운데에서, 적응형 관리는 대안적 접근의 기본 원칙이 되고 있다. 일반적으로, 적응형 관리는 관리 기능을 더욱 강화함으로써 궁극적으로 불확실성에 대한 적응능력을 늘리는 것을 의미한다 (Lee, 1999). 하지만 적응능력이라는 개념이 매우 모호하고 많은 경우 거버넌스, 법제도, 영역별 통합, 주민참여 등 기술적이지 않은 대안들을 위주로 논의가 진행되고 있다. 그 결과, 엔지니어링 측면에서는 어떤 대안이 적응능력을 높이는 데 효과적일 수 있는 지에 대해 혼동을 야기하기 쉽다. 최근 발표된 가뭄 관련 연구들에 국한하여서도, 연구자들에 따라 다양한 엔지니어링 대안들이 가뭄에 대한 적응능력을 높이는 방법으로 지칭되고 있다. 일례로, 이동률 등 (2003)은 모니터링 및 가뭄지수를 활용하여 가뭄대비 계획을 세우는 것을, 정상만 등 (2003)에서는 가뭄강도에 따른 저수지의 최적 운영방식을 결정하는 것을, Vairavamorthy 등 (2008)은 간헐적 상수도 공급 시설 (intermittent water supply)을 설계하는 것을, Pahl-Wostl과 Sendzimir (2005)는 시설물 대안에서 분산형 공급 시설을 설계하는 것을 가뭄의 효과적인 관리를 위한 대안으로 간주하고 있다. 또한 저수용량을 더욱 늘이는 것이 여전히 가뭄에 대한 적응능력을 높이기 위한 대안으로 고려되기도 한다 (O'Hara와 Georgakakos, 2008).

사실, 이 모든 대안들은 분명히 가뭄에 대한 상수도 시설 관리에 있어서 적응능력을 높이는 수단이 될 수 있다. 이상은 (2008)은 Pavildou (1977)의 질병증상 (sickness symptoms)이라는 사이버네틱스 개념을 이용하여, 엔지니어링 측면에서 상수도 시설 관리의 적응능력을 높이려는 것은 곧 Fig.1에 나타난 질병 증상들을 제거하는 것이라 설명한 바 있다. 첫째, 증상은 시스템의 상태에 대한 잘못된되거나 부적절한 정보로 X' 가 X 를 효과적으로 설명하지 못하는 것이다. 첫 번째 증상을 제거하기 위해서는 시스템의 상태

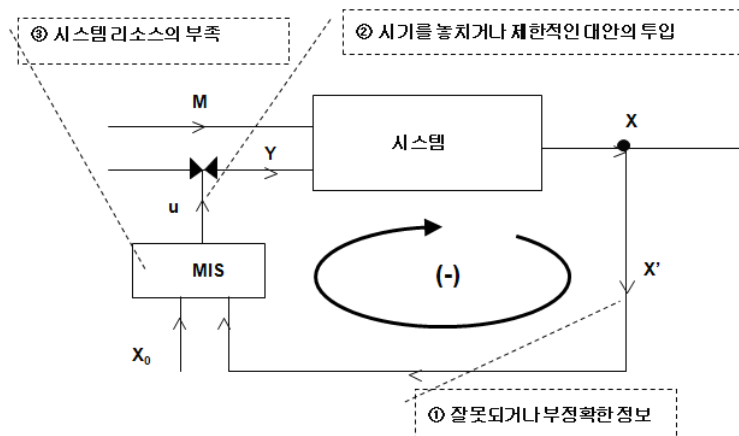


Figure 1. 적응기작의 질병증상 분류

X 를 더욱 정확히 파악할 수 있도록 모니터링 기술이나 예측을 위한 모형을 더욱 개선해야 한다. 두 번째는 시스템의 상태 X 를 개선시키기에 적합한 대안 u 이 충분히 마련되어 있지 않거나 시기적절하게 대응하지 못한 경우이다. 두 번째 증상을 제거하기 위해서는, 인식된 시스템 상태 X' 와 시스템의 목적 X_0 간의 차이를 줄이기 위한 *MIS* (management information system), 즉, 관리 주체는 다양한 대안을 미리 보유하고, 효과적인 대안을 찾아 적시에 실행할 수 있는 의사결정체계가 필요하다. 세 번째 증상은 제어수단을 투입하는 데에 필요한 시스템 리소스가 충분하지 못한 경우이다. 시스템의 상태 X 나 미래 외부환경의 불확실성 M 에 대한 충분한 정보를 보유하고, *MIS* 내부에 효과적인 대안 u 과 빠른 의사결정체계가 있다고 해도 관리 기작이 항상 적용에 성공하는 것은 아니다. 그것은 대안 u 을 투입하는 데에는 항상 인력, 에너지, 자금, 자원, 시설용량 등의 시스템 리소스가 소비되기 때문이다. **Table 1**에서는 앞에서 언급한 모든 가뭄 대안들이 나름대로 관리 기작의 질병증상을 제거함으로써 적응능력을 높일 수 있음을 보이고 있다.

Table 1에 나타난 대안들 중에 시설용량을 대규모 확보하는 대안은 불확실성을 극복하기 위한 전통적인 대응 방식이었다. 그러나 취약성을 야기하는 기후의 불확실성 정도는 예측 또는 대비가능한 수준을 넘어서기 때문에 현재 보유한 시설용량을 더 늘리는 것은 신뢰성에도 비용면에서도 부적절하다고 지적되고 있다 (Gleick, 2003; Frederick, 1997). 따라서, 용량증설 대안이 시스템 리소스를 늘려 적응능력을 늘릴 수 있음에도 불구하고, 많은 경우 이 대안은 적응형 관리에서 제외된다 (Pahl-Wostl과 Sendzimir, 2005).

2. 연구 개요

본 연구는 기후변화에 의해 점차 심화되는 가뭄 현상에 대해 엔지니어링 차원에서 적응형 관리의 필요성을 강조하

려는 목적을 갖고 있다. **Table 1**에 나타난 적응능력을 높이기 위한 용량증설, 비상 상수도 공급 시설 설치, 상수도 시설의 연계 운영, 관로 정비 등의 기술적 대안들은 상당한 건설비용을 동반한다. 그러나 가뭄 예측을 위한 지수 및 모니터링 시스템 개발, 저수지의 최적 운영방식 설계, 제한적인 수자원의 최적 용수배분방식 설계 등은 굳이 건설비용을 내포하지 않더라도 효과적으로 가뭄에 대응할 수 있는 엔지니어링 차원의 관리적 대안이라 할 수 있다. 특히, 이상은과 박희경(2009)에서 지적된 것처럼, 그동안 신뢰할 수 있는 상수도 공급을 위해 상당한 비용을 들여 용량을 증설하는 데에 과도하게 의존했던 점을 고려하면, 이제는 관리적 대안들에 대한 더 많은 관심과 연구가 필요하다고 판단된다. 이에, 본 연구에서는 가뭄 관리의 대안으로 규정된 제한적인 수자원의 최적 용수배분방식과 용수전용댐의 운영방식의 개선을 통해 얼마나 가뭄에 대한 피해를 경감 또는 회피할 수 있는지를 설명하는 데에 초점을 맞춘다. 또한 가뭄과 관련된 실증적 연구를 위해 2009년 봄에 발생한 광동댐 취수 제한 사례에 대해 자세히 분석할 것이다.

사례 연구는 3장에서 광동댐 및 인근 지역들의 상수도 공급 시설과 발생한 가뭄피해를 간략하게 설명하고, 4장에서 취수 및 공급 제한과 피해 발생의 과거 경험을 설명할 수 있는 모형을 구현할 것이다. 그리고 5장에서 실제 광동댐 사례의 피해액을 산출하며, 6장에서, 적응능력을 높이기 위한 관리적 대안을 통해 실제 피해는 대부분 감소될 수 있는 것이었음을 보이고자 한다. 구현되어야 할 모형은 댐의 물수지, 지역별 상수도 공급 방식, 주민들의 물이용 및 피해액 등 포괄적인 요소들로 구성된 전체 시스템의 동적 변화를 묘사할 수 있어야 한다. 게다가 시스템내에 댐 관리자의 수위 조절을 위한 관리 기작을 포함시킨다면, 모형은 복합적인 피드백 루프를 지닌 다윈 고차 미분방정식으로 정의될 것으로 기대된다 (이상은, 2008). 따라서, 해석적 방법 보다는 시뮬레이션 기법이 더욱 유용하다 할 수 있으며, 피드백 루

Table 1. 가뭄에 대한 적응능력을 높이기 위한 엔지니어링 대안의 분류

문 제 인 식	질병증상	대안
가뭄 예측의 불확실성	잘못되거나 부적절한 정보	- 빠르고 정확한 가뭄 예측을 위한 지수 개발 및 모니터링 시스템
가뭄대응에 적절한 대안의 부족	시기를 놓치거나 제한적인 대안의 투입	- 제한적인 수자원의 최적 용수배분방식 설계 - 저수지 최적 운영방식 설계 - 비상 상수도 공급 시설
수요를 충족시키기 위한 가용 수자원 부족	필요한 시스템 리소스 부족	- 저수·생산·공급용량의 대규모 확보 - 저수지 및 상수도 시설의 연계 운영 - 관로 정비, 절수기 이용 등의 수요 관리

프를 갖는 시스템의 비선형성을 묘사하고 해석하는 데에 대표적인 시뮬레이션 기법인 시스템 다이내믹스 모형을 구현기로 하였다.

3. 2008-2009 광동댐 취수 제한 사례 개요

3.1 광동댐 및 상수도 공급시설 개요

광동댐은 강원도 삼척시의 골지천에 위치하고 있으며, 태백시의 전 지역과 삼척시, 정선군, 영월군의 일부지역에 생공용수를 공급하기 위해 1989년에 건설되었다. 사력댐으로서 높이 39.5 m, 길이 292.0 m 내에 체적 616 천 m^3 의 규모를 갖고 있으며, 계획홍수위 (FWL), 상시만수위 (NHWL), 저수위 (LWL)는 각각 675.3, 672, 그리고 662.0 EL.m로 설계되었다 (Fig.2). 또한 총 저수용량과 유효 저수용량은 각각 13.1 백만 m^3 과 8.0 백만 m^3 에 달한다 (광동댐 설계자료의 접근이 용의하지 않아 설계시 산정한 수위-저수량 관계곡선은 조사되지 않았으나, 수도관리연보 (한국수자원공사, 2008)의 자료를 토대로 분석할 때 Fig.2의 2차 추세선은 댐의 수위-저수량 관계를 매우 정확하게 설명할 수 있음을 확인하였다).

광동댐 수자원을 이용한 상수도 공급시설은 한국수자원공사에서 관리하는 태백권 광역상수도시설을 지칭하며 Fig.3과 같이 요약할 수 있다. 광동댐에 채워진 물은 광동취수장에서 취수하여 남쪽에 있는 황지정수장까지 도수관로를 통해 이동된다. 처리된 유량은 송수관로를 통해 남쪽에 있는 황지분기까지 이동한 뒤에 동쪽과 서쪽에 있는 배수지들을 채우게 된다. 이 배수지에 저장된 물은 크게 세 지역의 급수 시설에 공급된다 (이후부터는 태백시 전지역을 지역 1로, 정선군 고한읍, 사북읍, 남면 일부 지역을 지역 2로, 그리고

삼척시 도계읍을 지역 3으로 구분). 전만석과 한영한 (2009)에 따르면, 광동댐과의 공급 계약량은 지역 1이 30.0 천 m^3 /일, 지역 2는 12.0 천 m^3 /일, 그리고 지역 3은 4.21 천 m^3 /일이다. 이 외에, 지역 1과 지역 3은 각자의 지방 상수도를 통해 각각 6.0 천 m^3 /일과 7.0 천 m^3 /일을 상시 공급받고 있다. 각 지역의 상수도 공급 현황은 Table 2와 같다.

3.2 2008-2009 가뭄 발생 및 광동댐 취수 제한

광동댐은 주로 9월까지의 장마와 태풍으로 발생하는 집중적인 강우로 채워 이듬해 갈수기까지 생활용수를 공급해오고 있다. 그러나 2008년 가을까지의 강수량은 평년 보다 크게 저조했다. 전국적으로 매년 평균 3.4개의 태풍이 발생함에 반해 2008년에는 단 1개만이 지나가는 데 그쳤으며 예년과는 달리 가을장마는 오지 않았다. 태백지역의 2008년 9월의 강수량은 47.7 mm이었는데, 이는 최근 7년 평균인 220.9 mm의 21.6%에 불과했다. 그 결과, 9월 말 광동댐의 저수율은 57%로써 예년 평균에 비해 81% 수준이었다 (황필선, 2009).

상수도 공급 지역의 용수수요를 충족시키기 위해 광동댐의 수위가 빠르게 감소하는 가운데, 댐 관리자는 2009년 1월 5일 수위가 665.2 EL.m에 달하자 광동댐의 취수를 단계적으로 제한하려는 계획을 발표했다. 2009년 1월 5일부터 계약량 대비 5% 감소, 2009년 1월 12일부터 계약량 대비 30% 감소, 2009년 1월 16일부터는 50%를 감소했다. 이후 댐 수위의 상승에 따라 2009년 3월 25일부터 30% 감소를, 2009년 4월 3일부터는 다시 공급을 정상화하였다 (연합뉴스, 2009a;연합뉴스, 2009b;연합뉴스, 2009c;연

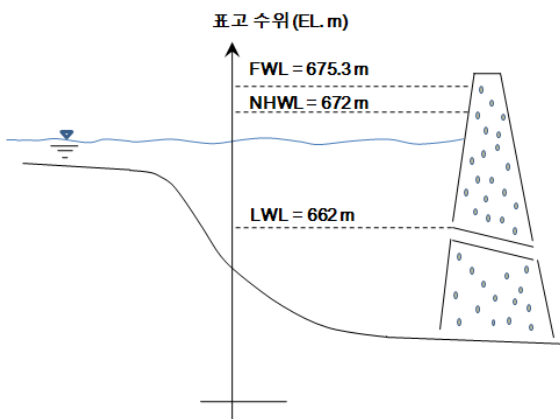
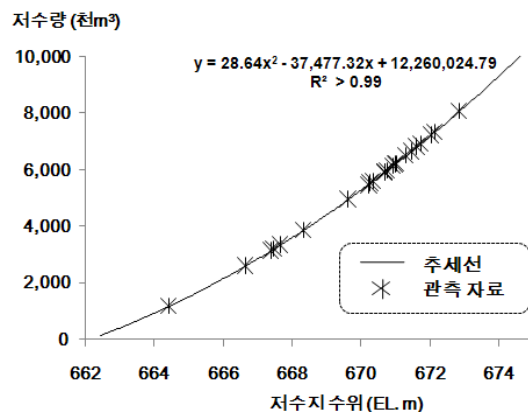
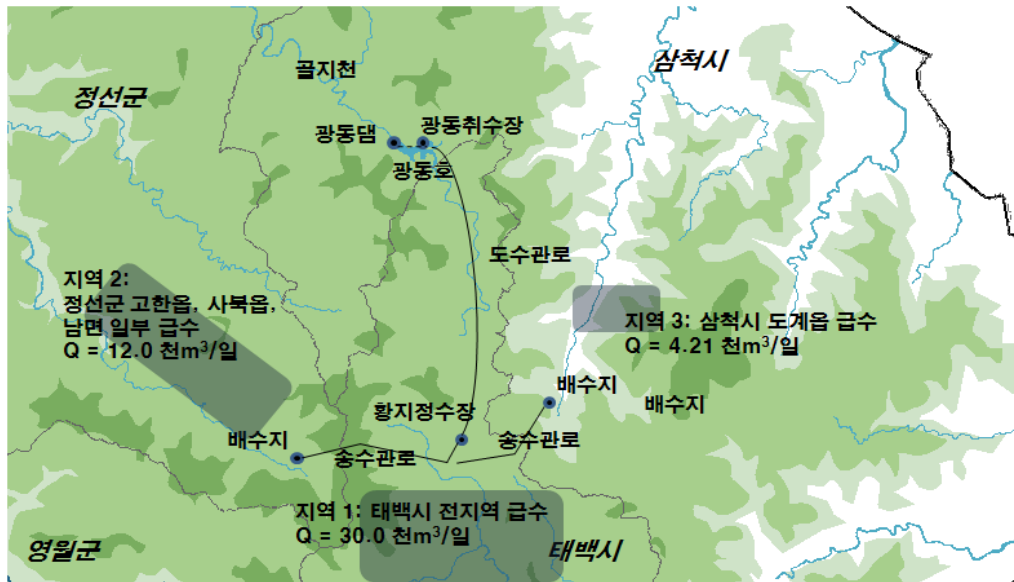


Figure 2. 광동댐 설계 수위 및 수위-저수량 곡선





주) 하천관리지리정보시스템의 국가하천전자지도 이용

Figure 3. 광동댐 상수도 공급 시설 개요

Table 2. 지역별 상수도 공급 현황

공급 지역	광동댐 계약량 (천 m^3 /일)	지방상수도 공급 (천 m^3 /일)	급수보급률 (%)	급수 인구 ¹⁾ (명)	유수율 (%)	1인1일 사용량 ²⁾ (L)
지역 1 : 태백시 전지역	30.0	6.0	98.9	50,663	39.4	233.3
지역 2 : 정선군 고함읍, 사북읍, 남면 일부	12.0	-	78.0	13,914	38.8	333.2
지역 3 : 삼척시 도계읍	4.21	7.0	83.9	10,441	60.2	242.7

- 1) 지역 2, 지역 3의 급수인구는 각 지역의 통계연보(정선군, 2008; 삼척시, 2008)의 행정인구를 상수도 통계에 제시된 읍지역 급수보급률을 적용하여 산출
- 2) 지역 전체의 1인1일 사용량을 적용하는 것은 부적절하다는 판단으로, 해당 지역만의 급수인구, 유수율, 총 공급량을 기준으로 재산정함

합뉴스, 2009d). 광동댐의 취수가 제한된 시기 동안 지역별로 지방상수도 공급 확대, 상수도 수원의 긴급 개발, 운반 급수 실시 등 상수도 공급을 보완하기 위해 다양한 노력이 뒤따랐다. 전만식과 한영한 (2009)은 이 시기 동안 타 수원 공급량의 변화에 대해, 지역 1의 경우 상시 6.0 천 m^3 /일에서 7.9 천 m^3 /일로, 지역 2에서는 상시적으로 타 수원공급량이 없지만 5.0 천 m^3 /일로 늘었다고 설명하고 있다. 또한

지역 3은 상시 7.0 천 m^3 /일에서 아주 작은 운반급수만이 추가되었을 뿐이다. 결과적으로, 취수 제한으로 인해 피해가 집중된 지역 1과 댐 관리자간에는 갈등은 여전히 해결되지 않고 있으며, 특히, 취수제한의 책임 공방, 주민들에 대한 피해보상, 댐 관리자의 감사 실시 등에 대한 논의가 뜨거운 상황이다.

4. 모형 구현

4.1 광동댐 가뭄 피해 모형

본 장에서는 앞에서 설명한 2008~2009 광동댐 취수 제한 사례에 대해 광동댐 및 3개 지역 상수도 공급시설의 운영 방식을 표현하고, 가뭄으로 인한 피해를 정량화하기 위한 모형을 개발하고자 한다. 이를 위해 모형의 시간적 범위로 갈수기가 시작되는 기간인 2008년 10월 1일 ($t=0$)에서 가뭄이 해소된 이후인 2009년 5월 15일 ($t=226$)까지로 한정하였다.

4.1.1 광동댐 물수지 모형

광동댐은 용수공급 전용댐일 뿐만 아니라 2008년 10월에서 2009년 5월 중순까지 여수로를 통한 방류가 없었으므로, 물수지는 댐 저수량 S_1 (천 m^3), 유입량 i_1 (천 m^3 /일), 증발량 i_2 (천 m^3 /일), 그리고 취수량 i_3 (천 m^3 /일)만으로 식(1)과 같이 정의할 수 있다 (시스템 다이내믹스 모형은 시스템을 저장 (stocks), 흐름 (flows) 그리고 필요시, 보조변수 (auxiliary variables)로 정의한다. 이후부터, 모든 저장변수를 S 로, 흐름변수를 i 로, 그리고 보조변수를 r 의 기호로 통칭한다).

$$\frac{dS_1}{dt} = i_1 - i_2 - i_3 \quad (1)$$

유입량 i_1 은 국가수자원관리종합정보시스템에서 발표한

시계열 자료를 이용하여 식(2)와 같이 정의할 수 있다 (Fig.4).

$$i_1 = g_1(t) \quad (2)$$

여기서, $g_1(t)$ 는 시계열 도표 함수 (time table function)으로서 천 m^3 /일의 단위를 갖는다. 모형의 시간적 범위가 6개월 정도로 증발량의 누적치가 댐의 저수량에 비해 비교적 크지 않을 뿐만 아니라, 해당기간 동안 댐의 저수량의 변동은 대부분 취수량에 의해 설명가능하다. 이에, 증발량 i_2 은 굳이 기상학 모형으로 표현하기 보다는 댐의 면적 $A(t)$ 에만 의존하는 것으로 가급적 단순화시켰다.

$$i_2 = r_1' A(t) \equiv r_1 S_2^2 \quad (3)$$

여기서, r_1' 와 r_1 는 각각 증발량 산정을 위한 상수이며, r_1 는 2.0×10^{-5} (천 m^3 /일/ $EL.m^2$)으로 가정하였다. 또한 S_2 는 광동댐의 수위 ($EL.m$)를 의미한다. 취수량 i_3 는 상시적으로는 지하체들과의 계약량의 합 r_2 (천 m^3 /일)를 따르며, 댐 수위 저하로 인한 취수량 제한을 S_3 을 반영하기 위해 다음과 같이 표현된다.

$$i_3 = r_2(1 - S_3) \quad (4)$$

$$r_2 = 46.2 \quad (5)$$

위 식(1)~식(5)로부터, 광동댐 물수지에 대한 저장흐름 모형 (stock and flow model, 이후부터는 SAF 모형으로 지칭)은 Fig.5와 같다.

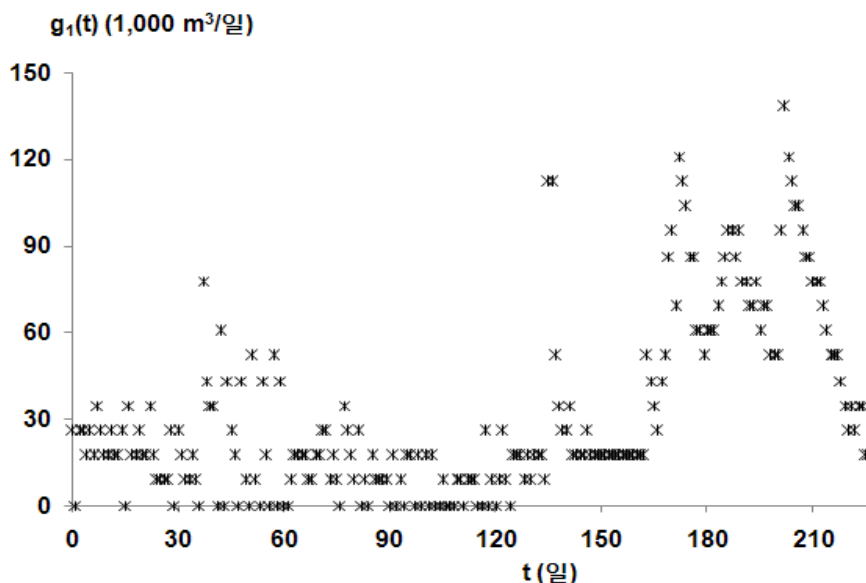


Figure 4. 광동댐 유입량 (2008.10.1 ~ 2009.5.15)

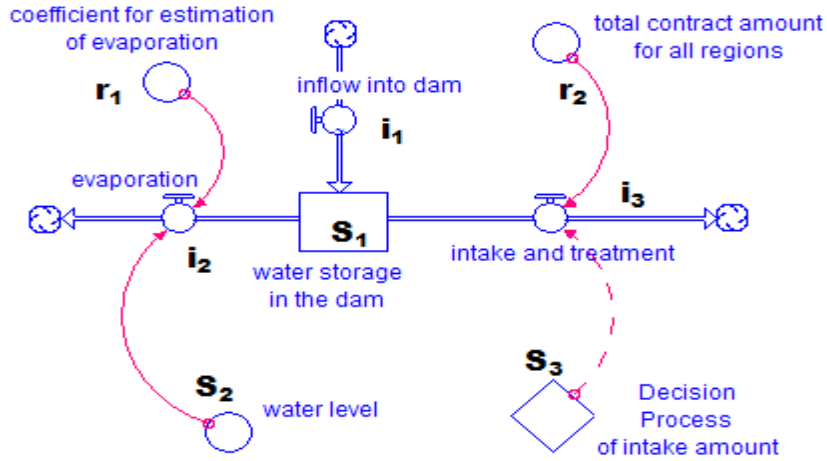


Figure 5. 광동댐 물수지에 대한 SAF 모형

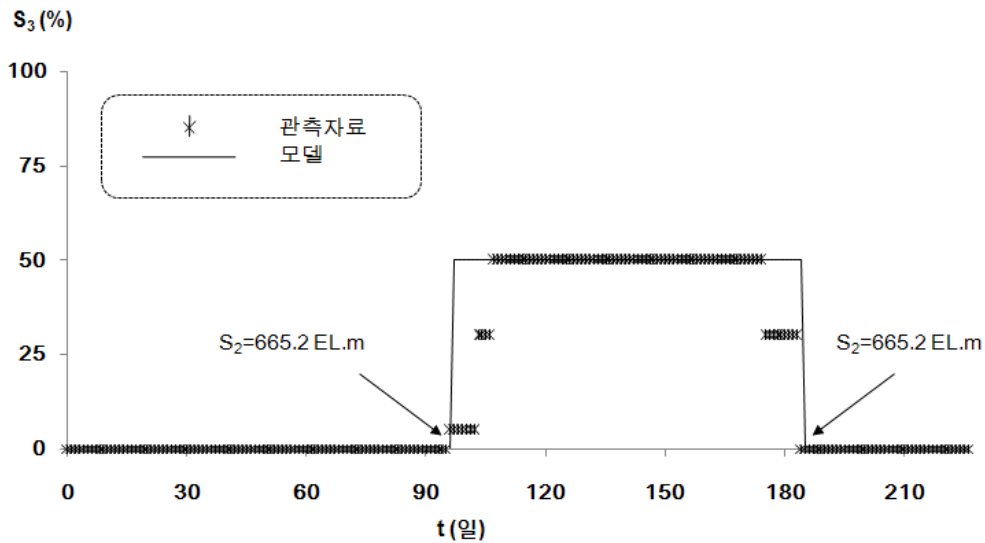


Figure 6. 댐 수위에 따른 취수량 조절 방식

4.1.2 취수량의 제한 모형

앞에서 설명한 것처럼, 2009년 1월 5일 (t=96)부터 2009년 4월 3일 (t=183)까지 광동댐의 취수량은 단계적으로 제한되었다. 그러나 Fig.6에서 나타낸 것처럼, $96 \leq t \leq 183$ 의 기간 동안 대부분 50%의 취수량 감소를 실시하였기 때문에 모형에 포함된 댐 관리자의 취수량 제한을 S_3 은 수위 S_2 와 임계 수위 r_3 의 차이에 따라 0% 또는 50%로 구분된다고 간주하였다. 특히, 임계 수위의 경우 실제로 취수량 제한을 시작했을 때와 취수량을 정상화 했을 때 모두 댐의

수위 S_2 가 665.2 EL.m였던 점을 고려하여 이를 임계 수위 r_3 로 설정하였다. 따라서 취수량 제한 모형은 식(6)과 식(7)과 같이 단순하게 표현할 수 있다.

$$S_3 = \begin{cases} 0 & (S_2 \geq r_3) \\ 0.5 & (S_2 < r_3) \end{cases} \quad (6)$$

$$r_3 = 665.2 \text{ EL.m} \quad (7)$$

한편, 저수지 수위 S_2 는 앞의 Fig.2의 수위-저수량 관계 곡선을 정리하여 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

5.0, 7.1까지 증가되었으므로,

$$i_7 = \begin{cases} 6.0 & (S_3 = 0) \\ 7.9 & (S_3 \neq 0) \end{cases}, i_7 = \begin{cases} 0.0 & (S_3 = 0) \\ 5.0 & (S_3 \neq 0) \end{cases}$$

$$i_7 = \begin{cases} 7.0 & (S_3 = 0) \\ 7.1 & (S_3 \neq 0) \end{cases} \quad (14)$$

위 식(10)~(14)의 지역별 상수도 공급에 대한 SAF 모형은 Fig.8과 같다.

4.1.4 제한급수로 인한 피해 산정 모형

제한 급수 피해를 산출하기 위해서, 단수 또는 제한급수를 회피하기 위한 고객의 지불용의를 측정하여 단위 피해액을 제시한 많은 선행 연구들이 있다. (예를 들어, Griffin와 Mjelde, 2000; Howe 등, 1994). 그러나 이런 단위 피해액은 다양한 단계의 제한급수를 실시한 경우에 대해 피해액의 변화를 설명하기에는 적절하지 않다. 그것은 제한급수의 정도와 피해액간의 비선형적인 관계를 합리적으로 설명하지 못하기 때문이다 (즉, 직관적으로 볼 때, 50%의 급수제한시 주민들이 느낄 불편함과 경제적 피해는 10%의 급수제한시의 피해와 같지도 않을뿐더러 5배를 넘을 것임이 분명하다). 비선형성을 반영하기 위해서는 다양한 제한급수 상황에 따라 피해가 어떻게 변화하는 지에 대한 자료가 필요하며, 이

에 일본 후생노동성의 (건강국 수도과, 2007)의 연구 결과를 이용키로 하였다. 물론 한국에서도 박두호 등 (2006)이 40개 도시에 대해 25% 그리고 50% 제한 급수시 주민들이 느끼는 피해들을 각각 조사한 바 있다. 그러나 저자들이 지적했듯이 설문조사에 참여한 많은 주민들이 가뭄을 충분히 인식하지 못하기 때문에 피해가 지나치게 과소평가되었다고 판단된다.

일본 후생노동성 자료를 2009년 원화가치로 환산한 결과는 Fig.9와 같다. 10 여개의 관측치에서 급수제한율에 따른 피해액은 비선형적으로 증가하고 있으며, 1인1일 피해액 (원/인/일)과 급수제한율 (%)의 관계는 2차식으로 잘 설명됨을 알 수 있다. 이 식을 모형에 적용하면,

$$S_{11} = 8.834S_8^2 + 4.964S_8,$$

$$S_{12} = 8.834S_9^2 + 4.964S_9, \text{ 그리고}$$

$$S_{13} = 8.834S_{10}^2 + 4.964S_{10} \quad (15)$$

여기서, S_8 , S_9 , 그리고 S_{10} 은 각각 지역 1, 지역 2, 지역 3의 급수제한율 (%)이고, S_{11} , S_{12} , S_{13} 은 각각 지역 1, 지역 2, 지역 3의 1인1일 피해액 (원)이다.

한편, 지역별 급수제한율은 지역별 급수시설에 대한 총 공급량, 유수율, 급수인구, 1인1일 사용량으로부터,

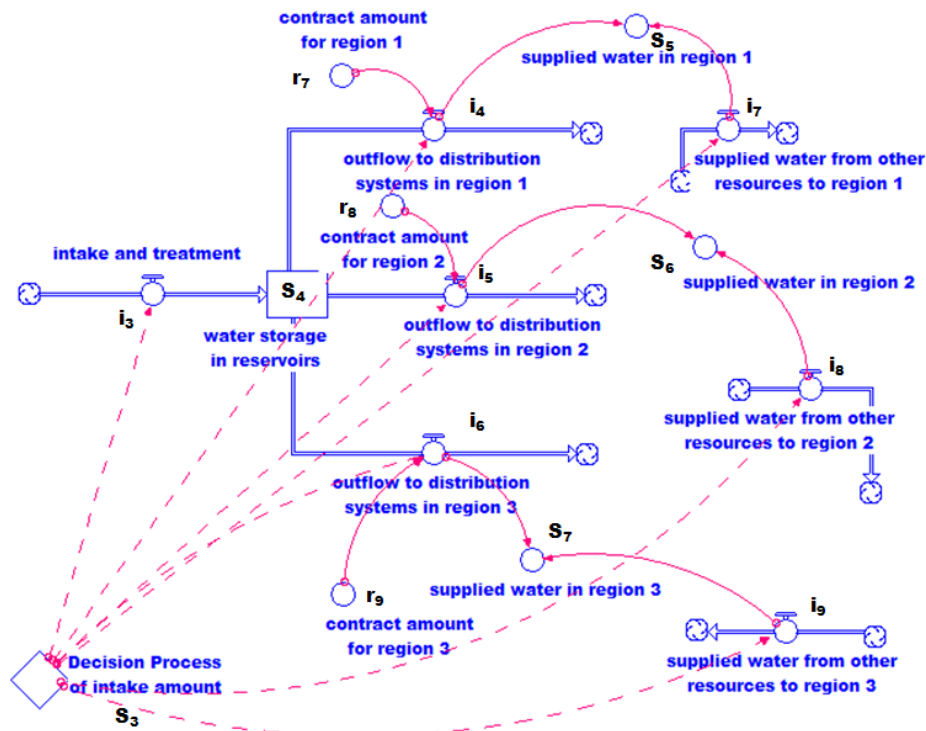


Figure 8. 지역별 상수도 공급을 위한 SAF 모형

$$S_8 = \left(1 - \frac{r_{10}S_6}{r_{13}r_{16}10^4}\right) \times 100, \quad S_9 = \left(1 - \frac{r_{11}S_7}{r_{14}r_{17}10^4}\right) \times 100,$$

$$\text{그리고 } S_{10} = \left(1 - \frac{r_{12}S_8}{r_{15}r_{18}10^4}\right) \times 100 \quad (16)$$

여기서, r_{10}, r_{11}, r_{12} 는 지역별 유수율을, r_{13}, r_{14}, r_{15} 는 급수인구 (명)를 의미한다. 또한 r_{16}, r_{17}, r_{18} 는 지역별 1인1일 사용량 (L)이다. 각 계수는 Table 2로부터,

$$r_{10} = 39.4, r_{11} = 38.8, \text{ 그리고 } r_{12} = 60.2 \quad (17)$$

$$r_{13} = 50,663, r_{14} = 13,914, \text{ 그리고 } r_{15} = 10,441 \quad (18)$$

$$r_{16} = 233.3, r_{17} = 334.6, \text{ 그리고 } r_{18} = 242.7 \quad (19)$$

또한, 해당 기간 동안 지역별 누계된 피액액 S_{11}, S_{12}, S_{13} (원)은 식(20)과 같이 산정할 수 있다.

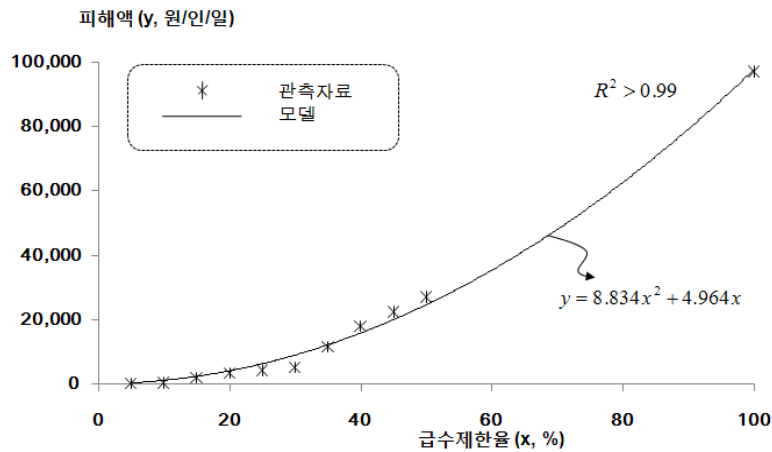


Figure 9. 급수제한율에 따른 피해액

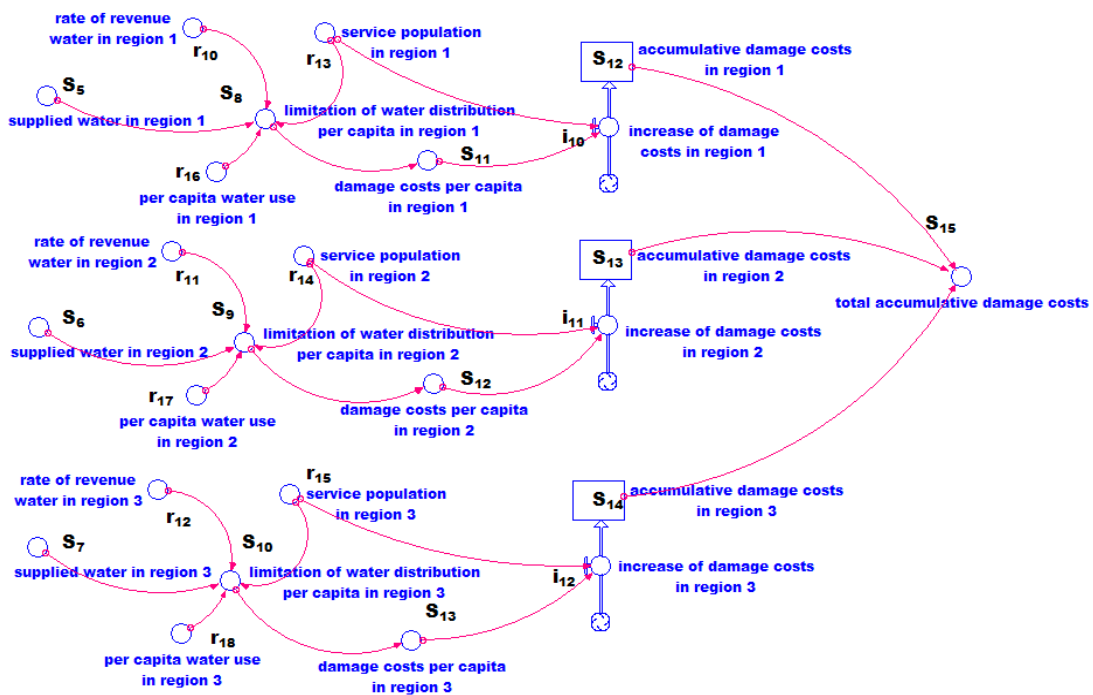


Figure 10. 제한급수로 인한 피해액 산정을 위한 SAF 모형

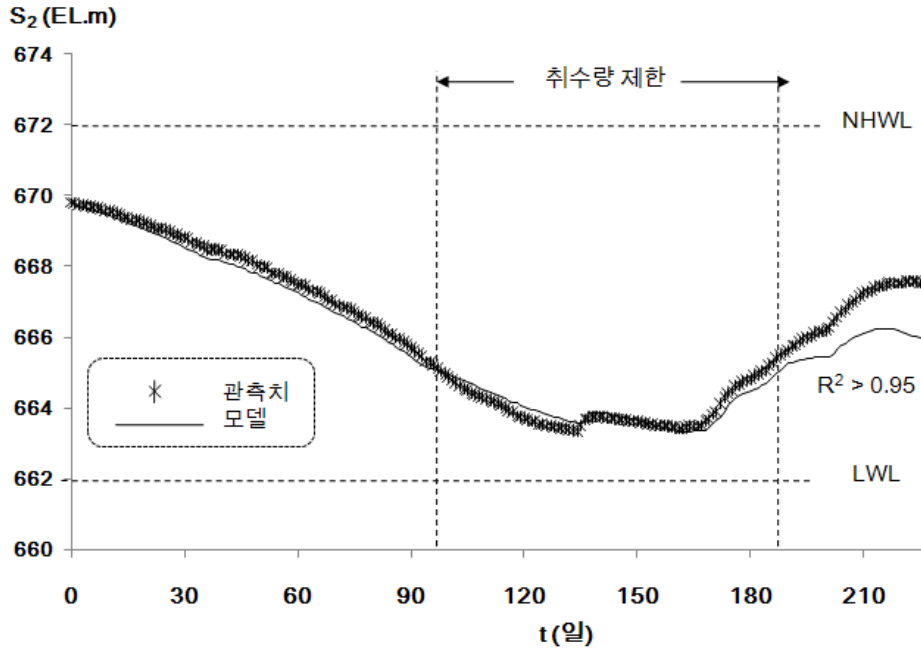


Figure 11. 광동댐 수위에 대한 시뮬레이션 결과

$$\frac{dS_{11}}{dt} = i_{10}, \quad \frac{dS_{12}}{dt} = i_{11}, \quad \text{그리고} \quad \frac{dS_{13}}{dt} = i_{12} \quad (20)$$

$$i_{10} = r_{13}S_{11}, \quad i_{11} = r_{14}S_{12}, \quad \text{그리고} \quad i_{12} = r_{15}S_{13} \quad (21)$$

여기서, i_{10} , i_{11} , i_{12} 는 각각 지역별 1일 피해액 (원)을 의미한다. 식(15)~식(21)을 이용하여, 피해산정을 위한 SAF 모형은 Fig.10과 같이 구현할 수 있다.

4.2 모형의 검증

앞선 4가지 부분모형을 합친 전체 광동댐 가뭄 피해 모형은 2개의 음의 피드백 루프가 포함된 3차 시스템으로 정의된다. 모형의 결과를 해석적으로 다루기보다는 시뮬레이션 방법이 훨씬 효과적이라 할 수 있다. 이에, HPS사의 Stella ver.8.0을 이용하여 광동댐 수위에 대한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 Fig.11과 같다. 구현된 모형은 국가수자원관리종합정보시스템에 발표된 관측치와 매우 유사한 모습을 보이며, 통계적으로도 만족스러운 결과를 제시할 수 있다. 즉, 구현된 모형은 해당 기간 동안 저수지 수위를 효과적으로 설명하고 있다고 판단된다. 시간이 지나면서 오차가 증가하고 있다. 이는 첫째, 증발량 계산에서 정교한 기상학적 모형을 사용하지 않았기 때문에 점점 오차가 누적되었을 수 있다. 둘째, 언론 발표시 2009년 4월 3일 이후 상수도

공급이 정상화된다고 발표했음에 반해, 실제 광동댐에서 취수량 제한 시기 이전 보다 낮은 양을 취수하고 있을 가능성이 있다. 이 같은 점들에 대한 보완을 실시할 수 있음에도 불구하고, 모형을 더욱 복잡하게 구현하는 것 보다 현재의 모형을 이용하는 것이 해석에 더욱 유용할 것으로 판단되었다.

5. 광동댐 취수량 제한으로 인한 피해액 추계

시뮬레이션 결과, 각 지역별 피해액은 Fig.12와 같이 추계되었다. 총 누적 피해액은 약 256 억 원인데, 대부분의 피해는 지역 1 (태백시)에 집중되어 있다. 지역 1의 누적 피해액은 247 억 원이며, 1인당 누적 피해액은 48.7만원에 달한다 (이는 취수 제한 기간인 88일 동안 1인당 1일 5,540원의 피해액을 의미한다). 이에 반해, 지역 2의 1인당 누적 피해액은 6.3만원이며 지역 3의 1인당 누적 피해액은 0으로서 이 지역들은 거의 피해를 보지 않았다. 이처럼 피해가 지역 1에 집중된 것은 지역 1의 상수도 공급이 광동댐 수자원에 크게 의존하는 데에 반해 타수원 상수도 공급에 의해 보완할 수 없었기 때문이다. 이에 반해, 지역 2는 타수원을 통해 상당히 보완가능했으며 지역 3은 광동댐의 의존도가 상대적으로 낮으므로 가뭄의 피해를 상당히 피할 수 있었던 것으로 분석된다.

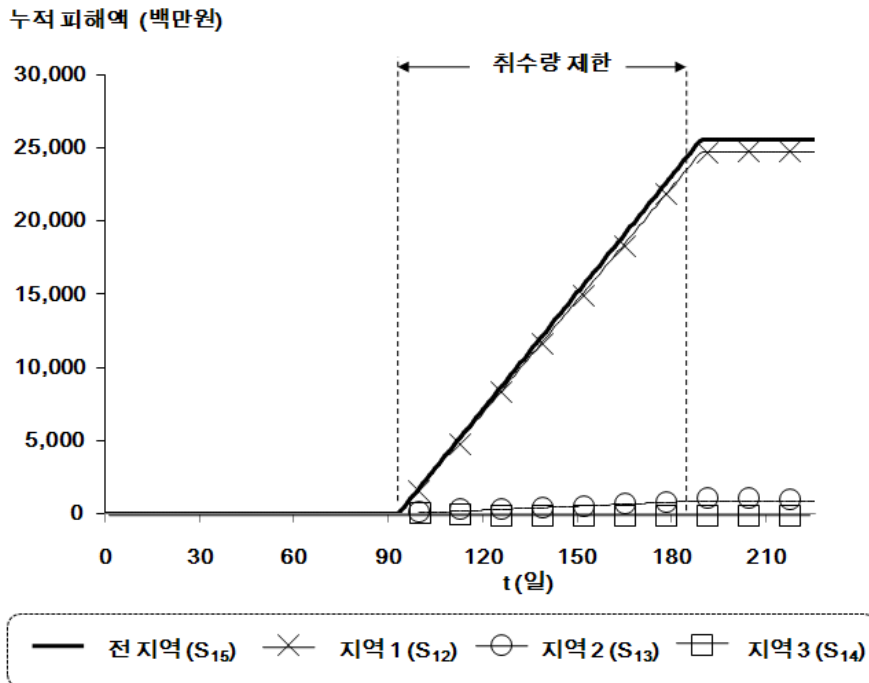


Figure 12. 광동댐 취수제한에 따르는 누적 피해액 추계 결과

6. 시스템 최적화: 적응형 관리를 통한 피해 경감 및 회피

시스템 최적화를 위한 대안으로, 제한적인 수자원의 최적 용수배분방식과 용수전용댐의 최적 운영방식이 선택되었다. 이 대안들은 모두 Table 1의 두 번째 질병증상을 제거하는 수단이다. 즉, 만일 이러한 대안들이 크게 효과적이라면, 댐 관리자가 시기를 놓치거나 제한적인 대안을 투입했기 때문에 댐 관리에 실패했음을 시사한다.

6.1 제한적인 수자원의 최적 용수배분방식: 수위 저하시 지역별 물배분의 최적화

지역 1의 경우 상수도 공급이 대부분 광동댐 수자원에 의존하고 있으며 타수원 공급 가능량이 크지 않다. 그럼에도 불구하고, 모든 지역에 동일한 비율로 상수도 공급을 감소시켰기 때문에 대부분의 피해가 지역 1에만 집중되었다. 따라서 물 부족에 적응하기 위해 지역별 상수도 공급을 최적 배분하는 대안은 효과가 있을 것으로 예상되었다.

시뮬레이션 모형의 민감도 분석을 통해, 전체 피해액을 최소화하는 광동댐 수자원의 상수도 공급 배분량은 각각 식 (22)~(24)와 같다. 즉, 저수지 수위 S_2 가 임계 수위 r_3 이하일 경우, 지역 1은 $30.0 \text{ 천m}^3/\text{일}$ 에서 $18.36 \text{ 천m}^3/\text{일}$

로, 지역 2는 $12 \text{ 천m}^3/\text{일}$ 에서 $4.75 \text{ 천m}^3/\text{일}$ 로, 그리고 지역 3은 $4.21 \text{ 천m}^3/\text{일}$ 에서 공급을 중단하는 것이 전체 피해액을 최소화할 수 있는 최적 배분량이다. 이 결과는 서비스 인구가 많고 타수원 상수도 공급의 가용능력이 낮은 지역 1에는 전체 취수제한율 0.5에 비해 비교적 많은 물을 할당하여 피해를 낮추어야 하는데 반해, 지역 2와 지역 3은 배분량을 줄여 어느 정도 피해액을 허용시켜야 함을 말하고 있다.

$$i_4 = \begin{cases} 30.0 & (S_2 > r_3) \\ (1 - 0.388) \times 30.0 = 18.36 & (S_2 \leq r_3) \end{cases} \quad (22)$$

$$i_5 = \begin{cases} 12.0 & (S_2 > r_3) \\ (1 - 0.604) \times 12.0 = 4.75 & (S_2 \leq r_3) \end{cases} \quad (23)$$

$$i_6 = \begin{cases} 4.21 & (S_2 > r_3) \\ (1 - 1) \times 4.21 = 0 & (S_2 \leq r_3) \end{cases} \quad (24)$$

Fig.14는 취수량의 최적 배분시 지역별 누적 피해액을 나타내고 있다. 전체 누적 피해액은 약 113억원인데, 실제 사례로부터 추산한 256억원의 44%에 불과하다. 즉, 물배분 방식의 개선을 통해 피해를 반 이상 줄일 수 있었다는 의미가

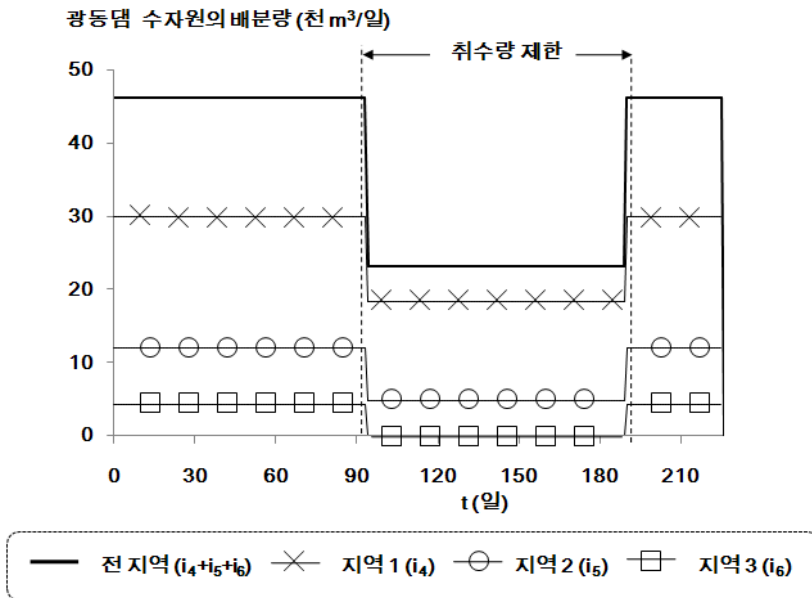


Figure 13. 광동댐 취수량의 최적 배분 방식

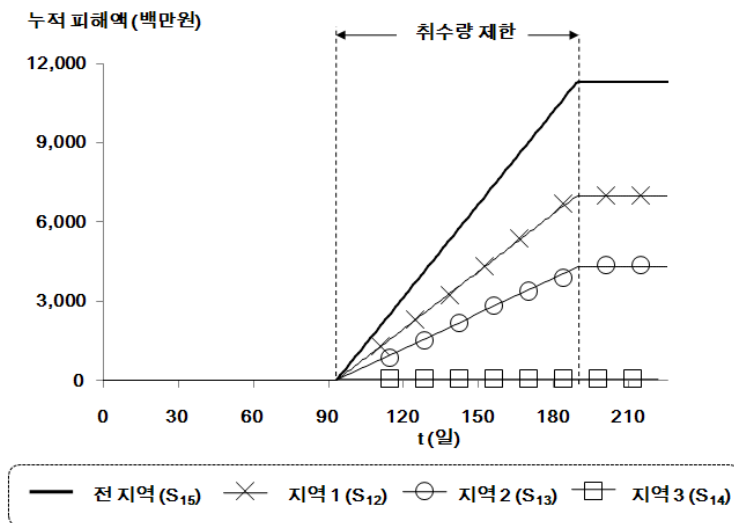


Figure 14. 광동댐 취수량의 최적 배분시 지역별 누적피해액

된다. 또한 지역별로 보면, 지역 1의 누적 피해액은 247억원에서 70억원으로 크게 감소할 수 있는 반면, 지역 2의 누적 피해액은 8.8억원에서 43억원으로 증가하게 된다. 또한, 지역 3에서는 광동댐 수원의 상수도 공급을 중단하더라도 여전히 피해액이 발생하지 않을 것으로 예상되었다. 지역 3은 상대적으로 광동댐 수자원 의존이 낮고 유수율이 높기 때문

에 다른 수자원에서부터 공급되는 유량만으로 해당 기간 동안 지역의 수요를 만족시킬 수 있었기 때문이다.

6.2 용수전용댐의 최적 운영방식: 수위 저하에 대한 보다 빠른 대처

두 번째 대안은 댐 관리자가 미리 소폭의 취수량 제한을

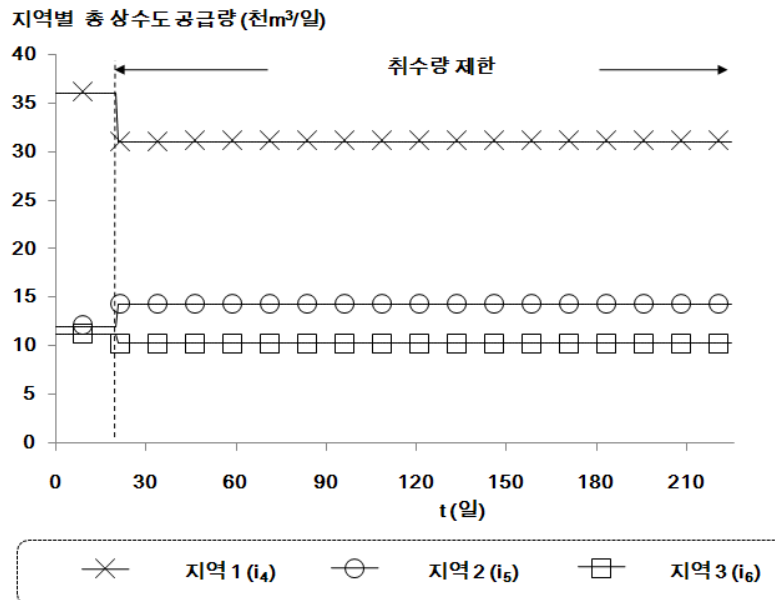


Figure 15. 수위 저하에 대한 보다 빠른 대처시 지역별 총 상수도 공급량

실시하는 것이다. 광동댐의 취수제한은 2009년 1월 5일에 시작되었지만, 저수량이 부족할 것이라는 관측은 이 보다 훨씬 전에 가능했다고 판단된다. 한국의 기후 특성상 9월 말 댐의 수위가 평년 보다 낮을 경우 거의 예외없이 물부족이 발생하며, 실제로 댐 관리자 또한 이미 물부족 사태의 가능성에 대해 크게 우려하고 있던 것으로 조사되었다 (변희룡, 2009; 안창진, 2008). 이에, 본 연구에서는 댐 관리자가 취수를 제한케 하는 임계 저수위 r_3 를 665.2 EL.m ($t=96$, 또는 2009년 1월 5일에 해당)가 아닌 669.0 EL.m ($t=25$, 또는 2008년 10월 26일에 해당)로 설정할 때 취수량의 제한을 S_3 의 최적값을 산정하고 이 때의 지역별 피해액을 분석코자 하였다.

제한율에 따른 전체 누적 피해액에 대한 모형의 민감도 분석 결과, 최적 제한률 S_3 는 식(25)와 같이 산정되었다 (이 제한률은 50% 취수량 제한을 한 실제 사례보다 댐 수위를 저하시키지 않음을 확인하였다). 즉, 댐의 수위가 임계 수위 보다 낮을 경우 23%의 취수량 제한을 실시하는 것이 최적이다.

$$S_3 = \begin{cases} 0 & (S_2 \geq r_3) \\ 0.23 & (S_2 < r_3) \end{cases} \quad (25)$$

$$r_3 = 669.0 \text{ EL.m} \quad (26)$$

중요한 사실은, 2008년 10월 26일부터 취수량을 23% 제한하여 댐을 운영하였을 경우 피해액은 전혀 발생하지 않는다는 점이다. Fig.15에 나타난 것처럼, 광동댐으로부터 모

든 지역들의 상수도 공급은 23% 감소되었지만, 그 부족분은 타수원으로부터의 상수도 공급량의 증가에 의해 상당량 충당될 수 있다. 특히, 취수 제한 기간 지역 2의 상수도 공급량이 오히려 증가하는 것은 기존의 물 공급량을 넘을 수 있는 타수원 상수도 공급량이 확보되어 있음을 의미한다.

7. 결론

기후변화의 불확실성으로 인해 최근 상수도 공급 시설에 대한 적응형 관리의 당위성이 진지하게 제기되고 있다. 무엇보다 수문순환의 극단적인 현상 중 가뭄에 대한 상수도 공급의 취약성을 효과적으로 개선하기 위해서는, 법제도적·행정적·엔지니어링 대안들이 새로운 시각에서 관리 기작의 적응능력을 높일 수 있도록 준비되어야 한다. 본 연구에서는 가뭄에 대한 피해를 완화하기 위한 엔지니어링 대안들을 적용형 관리의 맥락에서 살펴보았으며, 필요성을 촉구하기 위해 실증적인 사례연구를 실시하였다. 먼저, 최근 발생한 2008-2009 광동댐 취수 제한 사례에서 나타난, 물수지, 광동댐의 취수량 제한, 지역별 상수도 공급, 그리고 주민 피해 상황들은 시스템 다이내믹스 모형을 통해 효과적으로 묘사되었으며, 총 256억원의 누적 피해액이 산정되었다. 하지만, 제한적인 수자원의 최적 용수배분방식과 용수전용댐의 최적 운영방식을 적용하였을 때 해당 사례의 피해는 반 이상 감소시킬 수 있었거나 완전히 회피할 수 있었던 것으로 분석

되었다. 고려했던 대안은 Table 1에 제시한 적응형 관리 구분법에 의하면 두 번째 질병증상, 즉, 시기를 놓치거나 제한적인 대안의 투입으로 시스템이 적응에 실패하는 것을 다루기 위한 수단이다. 즉, 고려했던 대안들이 가뭄 피해로부터 적응하는 데에 효과적이라는 의미는 굳이 값비싼 공사비를 들이지 않더라도 관리적 대안을 통해 적응능력을 개선시킬 여지가 많이 있음을 시사한다.

본 연구의 모형 구현 방법론인 시스템 다이내믹스 모형은 대표적인 연속형 시뮬레이션 기법으로서 이론적 근거가 충분하며 유연하게 다양한 정책실험을 하는 데에 큰 문제가 없었다. 게다가 전체 시스템의 목적 (가뭄 피해의 감소) 하에 포괄적인 시스템 요소들 (광동댐, 댐 관리자의 관리기작, 지역별 급수 시설 운영, 주민 피해 등)과 이들의 복잡한 관계성을 조직해 시스템의 목적 달성 여부를 분석하기에 효과적이었다. 따라서 사용된 방법론은 가뭄과 관련된 실증적 연구를 수행하기에 유용한 것으로 판단된다.

추후 연구로서 두 가지를 제안코자 한다. 첫째, 본 연구는 보다 정확하고 국내 실정에 맞는 자료를 통해 더욱 개선될 여지가 있다. 우선, 피해액을 산출하는 데에 일본의 자료를 이용했다. 실제 피해지역 주민들과 분석된 지역 주민들의 피해를 회피하기 위한 지불용의가 일치하지 않음을 고려할 때 피해액의 절대적 수치에 큰 의미를 부여하는 것은 적절치 않다. 잘 알려진 것처럼 일본은 한국에 비해 자연재해가 잦기 때문에 주민들의 지불용의가 더 높을 수 있다. 이는 산정된 값이 실제 피해액 보다 다소 높을 가능성이 있음을 의미한다. 또한, 댐 관리자의 광동댐 취수 제한 방식을 파악하기 위해 언론발표 자료를, 광동댐 취수 제한시 지역별 상수도 공급 방식을 파악하는 데에는 특정 기관의 정책브리프를 참조하였다. 이 문헌들로부터 사용된 자료들은 추후 지자체 및 한국수자원공사의 통계연보 등 보다 공식적인 자료로 대체되어야 한다. 그럼에도 불구하고 이 자료를 사용한 것은 우선 광동댐 사례가 최근에 발생했기 때문에 신뢰할 만한 통계자료에 대한 접근이 아직 힘들기 때문이다. 또한 이 자료들은 피해액의 상대적인 변화를 보임으로 적응형 관리가 필요함을 강조하려는 본 연구의 목적을 만족시키기에 큰 문제가 없는 것으로 판단된다.

둘째, 본 연구에서 제안된 모델은 과거 사례의 실패를 분석하는 것을 넘어 장래 설계상의 시사점을 제공할 수 있도록 개선되어야 한다. 이를 위해서는, 우선 광동댐의 유입량의 다양한 가능성을 재현기간별로 정의한 뒤, 해당 시스템이 더 높은 불확실성에 적응하기 위해 어떤 대안이 효과적인지를 분석할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 과거 선행적인 사실에 근거하여 10월 말부터 취수 제한을 할 필요가 있었음을 회귀적으로 확인하였다. 그러나 댐 관리자 측면에

서 당면한 댐 수위, 해당 시기 동안 유입량의 확률분포, 갈수기의 잔여기간 등을 통해 가뭄에 대한 리스크를 분석하고, 리스크를 허용할 수 있는 수준으로 유지하게 하는 취수 제한 모델을 구현한다면 본 연구는 실용적으로 더욱 큰 시사점을 제공할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업(과제번호:09 도시재생B04) 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다. 또한 소중한 의견을 제공한 익명의 세 심사위원께도 감사드립니다.

참고문헌

1. 건강국 수도와 (2007) *수도사업의 비용 효과 분석 - 제5편 자료집*, 일본 후생노동성 <<http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido>>
2. 국가수자원관리종합정보시스템 웹사이트 <<http://www.wamis.go.kr>>
3. 박두호 등 (2006) *수자원 및 기술가치 평가시스템 구축 - 연구 보고서*, 한국수자원공사 수자원연구원, 수자원의 지속적 확보 기술개발사업
4. 변희룡 (2009) “동아 2009 가뭄, 현황과 전망과 대책”, *2009 가뭄 심포지엄: 가뭄의 역사, 현황, 대책, 그리고 극복기술*, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, pp.33-45
5. 삼척시 (2008) *통계연보* <<http://www.samcheok.go.kr>>
6. 심기오, 이원호 (2009) “가뭄극복을 위한 대책방안”, *2009 가뭄 심포지엄: 가뭄의 역사, 현황, 대책, 그리고 극복기술*, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단
7. 안창진 (2008) “2009년 가뭄대비 저수지 운영계획”, *물과미래*, 한국수자원학회, 41(12), pp.66-73
8. 연합뉴스 (2009a) 강원 폐광지역 수돗물 12일부터 제한급수, 2009년 1월 6일 보도
9. 연합뉴스 (2009b) 강원도 태백권 2단계 비상급수대책 추진, 2009년 1월 13일 보도
10. 연합뉴스 (2009d) 태백시 제한급수.. 물 부족 ‘대란’, 2009년 1월 9일 보도
11. 연합뉴스 (2009c) 태백 토,일요일 수돗물 공급 정상화, 2009년 3월 24일 보도
12. 이동률, 이대희, 강신욱 (2003) “가뭄 경보기준과 모니터링 시스템”, *한국수자원학회논문집*, 36(3), pp.375-384
13. 이상은 (2008) *물 인프라의 조직화된 복잡성을 다루기 위한*

- 적응형 설계, 박사학위 논문, KAIST
14. 이상은, 박희경 (2009) “국내 정수장 과다시설용량 실태 분석”, *상하수도학회지*, 23(1), pp.57-67
 15. 전만식, 한영한 (2009) *강원남부지역의 물부족 해소방안*, 정책브리프 제48호, 강원발전연구원 <<http://www.gdri.re.kr>>
 16. 정상만 등 (2003) *용수수급의 최적화를 위한 가물관리 시스템 개발 - 연구보고서*, 공주대학교, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단
 17. 정선군 (2008) *통계연보* <<http://www.jeongseon.go.kr>>
 18. 하천관리지리정보시스템 웹사이트 <<http://www.river.go.kr>>
 19. 한국수자원공사 (2008) *수도관리연보* <<http://www.kwater.or.kr>>
 20. 황필선 (2009) “가뭄 및 다목적댐 운영 현황과 전망”, *2009 가뭄 심포지엄: 가뭄의 역사, 현황, 대책, 그리고 극복기술*, 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단, pp.86-101
 21. Dracup, J.A., Vicuna, S., Leonardson, R., Dale, L., and Hanneman, M. (2005) *Climate Change and Water Supply Reliability*, California Energy Commission, PIER Energy-Related Environmental Research, CEC-500-2005-053
 22. Frederick, K.D. (1997) "Adapting to climate impacts on the supply and demand for water", *Climate Change*, 37, pp.141-156
 23. Gleick, P. (2003) "Global freshwater resources: soft-path solutions for the 21st century", *Science*, 302, pp.1524-1528
 24. Griffin, R.C., and Mjelde, J.W. (2000) "Valuing water supply reliability", *American Journal of Agricultural Economics*, 82(2), pp.414-426
 25. Hadley Centre (2005) *Stabilizing Climate to Avoid Dangerous Climate Change - A Summary of Relevant Research at the Hadley Centre* (<http://www.metoffice.gov.uk/>)
 26. Howe, C.W., Smith, M.G., and Bennett, L. (1994) "Water supply reliability in urban water systems", *Journal of Environmental Economics and Management*, 26(1), pp.19-30
 27. Intergovernmental Panel on Climate Change (2008) *Climate Change and Water*, IPCC Technical Paper IV, WMO · UNEP
 28. Lee, K.N. (1999) "Appraising adaptive management", *Ecology and Society*, 3(2), art.3 <<http://www.consecol.org/vol3/iss2/art3>>
 29. Nash, L.L., and Gleick, P.H. (1993) *The Colorado River Basin and Climatic Change: The Sensitivity of Streamflow and Water Supply to Variations in Temperature and Precipitation*, EPA 230-R-93-009, US EPA
 30. O'Hara, J.K., & Georgakakos, K.P. (2008) "Quantifying the urban water supply impacts of climate change", *Water Resources Management*, 22, 1477-1497
 31. Pahl-Wostl, C., & Sendzimir, J. (2005) *The Relationship between IWRM and Adaptive Water Management*, NeWater Report Series No.3, NeWater
 32. Pavlidou, M.T. (1977) "Dynamic control of hierarchical public systems", Klir, G.J. (ed), *Applied General Systems Research: Recent Developments and Trends*, NATO conference series II, Systems Science, 5, Plenum Press
 33. Vairavamoorthy, K., Gorantiwar, S.D., Pathirana, A. (2008) "Managing urban water supplies in developing countries - climate change and water scarcity scenarios", *Physics and Chemistry of the Earth*, 33, pp.330-339
 34. V r smarty, C.J., Green, P., Salisbury, J., and Lammers, R.B. (2009) "Global water resources: vulnerability from climate change and population growth", *Science*, 289, pp.284-288