댐 건설 갈등 조정을 위한 수문학적 공영시각모형의 개발

Development of Hydrological Shared Vision Model for Conflict Mediation of Dam Construction

정 하 옥* / 한 재 익** / 박 상 우***

Jung, Ha ok / Han, Jae Ik / Park, Sang Woo

Abstract

This study approach the conflict in the process of promoting Dam construction plan from a hydrological method and comprehend the cause of conflict on conservation and flood collect all interested parties direct involvement and develop Shared Vision Model (SVM) to plan simulation and result. We forecast water for living, industrial water and agricultural water in each administrative district on conservation and simulate promptly in case that each structural alternative is formed and suggest water level deduction effect and change of area on watted surface and damage and organize the system to draw and agreement through exchanging mutual opinion. Also, it considered to contribute meditation and soften of conflict by securing accuracy of releasing information and trust of the result.

Keywords : dam construction, conflict mediation, Shared Vision Model, conservation, flood control

요 지

본 연구에서는 댐 건설 사업을 추진하는 경우 발생하는 갈등사안 중에서 수문학적으로 접근하여 이수 및 치수에 대한 갈등 발생원인을 파악하고 이해당사자들의 직접적인 참여와 의견을 수렴하여 대안 모의와 결과를 도모할 수 있는 공영시각모형(SVM)을 개발하였다. 이수부문에서는 각 행정구역별 생활용수, 공업 및 농업용수 수요를 예측하고, 치수부문에서는 각 구조적 대안이 형성되는 경우 신속하게 모의하여 수위저감효과, 침수면적 및 피해액의 변화를 제시하여 상호의견 교환에 따른 합의점을 도출할 수 있도록 구축하였다. 이러한 공영시각모형의 이용은 정보공개의 정확성, 결과의 신뢰성 등을 확보할 수 있게 함으로써 댐 건설에 대한 갈등 조정 및 완화에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : 댐 건설, 갈등 조정, 공영시각모형, 이수, 치수

1. 서 론

최근 우리나라를 비롯하여 전 세계적으로 홍수와 가뭄 등의 자연재해는 기후변화로 인하여 그 빈도와 피해규모가 날로 증가하고 있다. 그 동안 우리나라는 1970년대부

터 홍수와 가뭄 등의 자연재해에 대응하기 위하여 다목적 댐 개발을 중심으로 하는 수자원정책이 적극 추진되어 홍수와 가뭄에 효과적으로 대처하여 왔다고 하겠다. 그러나 최근에는 민주화 및 정보화 등 사회환경의 변화에 따라 국책사업에 대한 이해당사자의 참여요구 증대와 더불어

*서남대학교 토목공학과 전임강사 (e-mail: haok0853@nate.com)

Full-time Prof. Dept., Civil Eng., Seonam Univ., Namwon 590-711, Korea

**서남대학교 토목공학과 교수 (e-mail: han0233@nate.com)

Prof. Dept., Civil Eng., Seonam Univ., Namwon 590-711, Korea

***교신저자, 서남대학교 토목공학과 교수 (e-mail: hydropsww@hanmail.net, Tel: 063-620-0232)

Corresponding Author, Prof. Dept., Civil Eng., Seonam Univ., Namwon 590-711, Korea

수자원 정책의 수행에도 상당한 어려움을 겪고 있다. 특히 개발위주의 논리에 반대하여 지속가능한 개발(sustainable development)을 주장하는 환경 관련 시민단체의 논리를 포용하는 새로운 수자원관리 개념의 전 세계적인 확산은 수자원 정책의 수행에 있어서 정부와 이해당사자들 간의 갈등을 더욱 심화시키고 있다(정상만 등, 2004). 이러한 영향은 한탄강댐 및 영월댐 갈등 사례에서도 나타났으며, 기술(공학)적인 측면에서 이들 갈등을 살펴보면 다양한 목적을 가지고 있는 댐 건설의 최대 목적은 이수와 치수인데 이에 대한 분석 결과를 신뢰하지 못하고 있다는 것이다. 즉, 이수측면에서는 인구증가와 경제성장률, 산업구조 및 농지면적 변화 등을 고려한 각 수요예측에 대한 마찰이 발생되었으며, 치수측면에서는 댐 규모에 의한 하류의 홍수저감효과 및 댐의 안정성, 댐 건설에 의한 상류의 홍수피해 문제 등이 공통적인 요인이라고 할 수 있다.

또한 정부의 입지선정 방법과 이해당사자의 참여배제, 정보의 제한 및 미공개에 의한 추진절차 등의 행정적인 요인과 수질 및 생태계 파괴 등의 환경적 요인 및 경제적 타당성 등의 여러 요인들이 복합적으로 얽혀 있어 갈등 조정 및 완화에 많은 어려움을 겪고 있다. 이에 따라 이해당사자의 참여를 유도하며 다양한 갈등 발생원인을 고려할 수 있는 정책이나 제도, 대상유역에 대한 이·치수적인 문제점이나 이해당사자들의 의견을 수렴하여 갈등 조정에 도움을 줄 수 있는 소프트웨어가 필요한데 통합적으로 모든 사항을 고려할 수 있는 갈등 조정 시스템을 개발하는 것은 많은 어려움과 한계를 가지고 있다.

그동안 사회적 여러 갈등의 조정을 위한 연구나 기술들은 주로 갈등 발생원인들 중 법/제도적이나 정책추진 방법론 등 한 두 가지 측면만을 고려하여 평면적 분석을 시도하는 것이 대부분이고 개념과 기법의 제안 및 적용이 있었으나 대부분 특정지역과 사례에 제한적으로 적용되었을 뿐 일반화시켜 이론적으로 적용된 예는 드물다. 이에 대한 방법론적으로는 사례연구와 설문조사를 동시에 활용하거나 상·하류지역간의 경제적 보상체계의 분석, 협상론적 시각에서의 분석 등이 있다고 할 수 있다. 그 중 가장 일반적인 방법이 사례분석이라고 하겠으며, 327개의 사례가 수록된 행정자치부·국토연구원·한국지방행정연구원(1999)이 발간한 환경분쟁사례집 등이 이에 속한다고 할 수 있다. 특히 이들 사례들은 신문이나 관계자와의 면담을 통해 얻어진 정보와 자료를 시계열적으로 기술하고 있으며, 분쟁의 과정을 정치적 또는 경제적, 기술적 시각에서 개괄적으로 설명하고 이에 기초하여 해결방안을 제시하고 있다.

이와 같은 사회적인 갈등 조정 연구의 한계를 극복하기 위해 최근에는 이해당사자의 참여를 유도하고 공학적으로 접근하여 여러 대안 및 시나리오를 모색할 수 있는 공영시각모형(Shared Vision Model, SVM)이 소개되면서 많은 정책결정 과정에 활용되고 있으며, 수자원관리 분야나 수질관리 분야 등에도 활용되기 시작하고 있다. 수자원과 관련하여 공영시각모형을 활용한 최근의 연구동향을 보면 Ahmad and Simonovic (2000)의 홍수 조절을 위한 저수지 운영문제, Li and Simonovic (2002)의 북미 대조원 유역에서의 해설에 의한 홍수 예측, Simonovic and Li (2003)의 기후변화가 홍수예방시스템의 성능에 미치는 영향에 대한 연구, Stave (2000)의 Las Vegas의 물 문제 해결을 위한 정책 결정, 그리고 Ahmad and Simonovic (2001)의 홍수예방 정책의 영향 평가를 위한 의사결정도구로서의 시스템 다이내믹에 대한 연구 등 주로 수자원의 다양한 분야에서 행해지고 있다(박수완 등, 2010). 국내의 경우에는 정상만 등(2003)은 댐청댐과 용담댐의 연계운영에 있어서 금강수계의 수자원 장기계획과 관련한 전주시역의 장래인구추정, 용담댐과 대청댐 하류의 적정 하천유지 유량 산정, 대전과 전주시역간의 물분쟁 해결 등을 위해 공영시각모형인 Stella 모형을 이용한 바 있으며, 이길성 등(2011)은 지속가능한 유역통합관리 계획 수립을 위해 도시화로 인한 왜곡된 물 순환을 이·치수 및 수질관리 등의 측면에서 건전화 시키고 이에 대한 문제점 및 대안이 형성될 경우 이해당사자들을 참여시켜 의사결정을 유도할 수 있는 공영시각모형을 구축하였다.

문제의 수식화가 용이하고 객체지향적인 공영시각모형은 모형의 운영이 쉽고 모의결과를 시각적으로 보여줌으로써 정책입안자와 전문가, 이해당사자들간의 문제점 논의나 의견교환이 용이하여 수자원 분야에서는 수자원관리나 이수계획에 주로 이용되어온 반면에 복잡한 수리학적 이론의 공간적 분석과 표현을 필요로 하는 치수적인 면에서는 그 활용예가 극히 드물다고 하겠다. 따라서 본 연구에서는 댐 건설에 수반되는 제반 수문학적 갈등의 조정에 활용하기 위하여 Stella모형과 더불어 미국이나 선진국에서 다양하게 이용되고 있는 Vensim모형을 이수 분석에 이용하고 치수 분석을 위해서는 HEC-RAS모형을 ArcGIS에 연계하여 이해당사자들에게 수리학적 결과를 시각적으로 쉽게 이해시킬 수 있는 공영시각모형을 개발하였다. 본 연구의 Vensim 모형은 각각의 행정구역별 용수의 수요량을 예측하고 수요증가에 따른 부족량을 분석하는데 자료로 활용될 수 있도록 하였으며, 치수부문에 적용된 ArcGIS 및 HEC-RAS는 댐 규모의 변화나 다른

구조적 대안들이 수립되는 경우 이에 따른 수위저감효과, 홍수범람모의 및 홍수피해액 등이 산정되어 제시되도록 구축하는 한편 대상지역의 필요한 DB들을 구축함으로써 공영시각모형의 장점인 신속성과 분석과정 및 결과에 대한 일관성을 확보할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 연구대상 구역인 임진강 구역의 한탄강댐 갈등사례에 대한 원인을 분석하고 갈등 조정을 위해 기 수립된 대안들에 본 연구에서 개발된 공영시각모형을 적용하여 그 활용 가능성을 분석하고자 하였다.

2. 연구대상 구역 및 갈등원인 분석

2.1 연구대상 구역

본 연구의 대상구역인 임진강은 한강의 제1지류로서 전체 유역면적이 8,138.90 km²이고 유로연장은 273.50 km로 대유역에 속하는 하천이다. 임진강 유역은 군사분계선을 기준으로 할 때, 북측이 61%로 전체 유역의 약 2/3를 차지하고 남측은 39%에 불과하며, 임진강 유역내 행정구역 중 남한지역에는 2개도(경기도, 강원도), 4개시(파주시, 양주시, 동두천시, 포천시), 2개군(연천군, 철원군)이 포함되어 있다.

임진강 유역은 1996년 7월과 1998년 8월, 1999년 8월에 경기북부지방에 이상강우에 의한 홍수 피해가 발생하여 임진강 하류의 홍수대책 일환으로 임진강 제1지류인 한탄강에 다목적댐 건설이 추진되었으나, 상류지역인 철원, 포천 및 연천지역의 강한 반발로 2006년에 결국 다목적댐에서 홍수조절용댐으로 변경되었으며, 주요 쟁점사항은 댐 규모 및 사업효과성 문제와 자연생태환경의 파괴, 수질오염 문제 등이었다.

2.2 갈등원인의 시간적 변화 분석

갈등 문제를 해결하기 위해서는 먼저 갈등의 발생원인들과 그에 따른 상대적인 강도나 영향력, 시간의 흐름에 따라 어느 방향으로 어떻게 변화되는가를 파악해야 하며, 이를 위한 일반적인 방법으로는 지속적인 면담이나 설문

조사 등이 있다. 이러한 방법들은 경제적 및 시간적인 손실을 가져오는데 이러한 과정을 거치지 않고 갈등 발생원인, 강도 및 변화추이 등을 파악할 수 있는 방법 중의 하나가 상대적 이탈지수(Relative Deviation Index, RDI)의 분석방법이라고 하겠다. 상대적 이탈지수는 갈등사례 및 현안에 널리 적용되고 있는 방법이며, 갈등 발생원인에 따라 갈등의 강도와 변화추이를 결정하는 지수로써 인터넷 신문, 뉴스 등의 기사보도 자료를 활용하여 산정할 수 있다. 갈등발생원인은 복합적으로 시간변화에 따라 강도나 중요성 및 대표성이 변화하게 되는데 본 연구에서는 한탄강댐 갈등 사례에 대하여 행정적 및 경제적 원인, 기술(공학)적, 환경적 원인으로 분류하여 분석을 수행하였다. 세부적인 요인은 행정적 원인에 대해서 정부의 사업 추진 방식, 정보공개, 주민참여, 입지선정 등의 요인에 대하여 조사하였으며, 경제적 원인은 비용과 편익 분석(B/C), 경제적 피해 및 보상, 기술(공학)적 원인은 댐의 안정성, 홍수저감효과 및 사업 효과성 문제에 대하여 조사하였다. 또한 환경적 원인은 생태계, 문화유산, 수질 등의 환경성과 관련된 일체 내용을 조사하였으며, 인터넷 신문 보도 총 293회의 게재내용을 정리하여 이에 대한 결과는 Table 1과 같이 나타내었다. Eqs. (1a)~(1c)는 상대적 이탈지수의 산정을 위해 적용된 식을 나타내고 있으며 여기서, RDI는 상대적 이탈지수, A_{ij} 는 갈등 발생원인 및 년도별 발생건수, $E(A_{ij})$ 는 기댓값, R_i 는 각 년도에 갈등 발생원인별 발생건수의 합, C_j 는 각 갈등 발생원인에 년도에 따른 발생건수의 합, T는 갈등 발생원인 및 년도별 발생건수의 총합이다.

$$RDI = \frac{A_{ij} - E(A_{ij})}{E(A_{ij})} \quad (1a)$$

$$E = \frac{R_i C_j}{T} \quad (1b)$$

$$T = \sum R_i = \sum C_j \quad (1c)$$

Table 1. Cause of Conflict and Annual Changes

A_{ij}	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	Total
Administrative Cause	2	0	4	32	4	14	4	13	2	3	78
Economic Cause	2	0	4	20	3	11	4	12	2	2	60
Engineering Cause	4	0	10	46	8	20	9	22	5	5	129
Environmental Cause	1	0	2	8	1	5	2	5	1	1	26
Total	9	0	20	106	16	50	19	52	10	11	293

Table 2. Relative Deviation Index (RDI)

$E(A_{ij})$	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Administrative Cause	2.38	0.00	5.28	27.99	4.22	13.20	5.02	13.73	2.64	2.90
Economic Cause	1.84	0.00	4.09	21.69	3.27	10.23	3.89	10.64	2.05	2.25
Engineering Cause	3.98	0.00	8.84	46.88	7.08	22.11	8.40	23.00	4.42	4.86
Environmental Cause	0.80	0.00	1.78	9.45	1.43	4.46	1.69	4.63	0.89	0.98
Relative Deviation Index	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Administrative Cause	-0.16	0.00	-0.24	0.14	-0.05	0.06	-0.20	-0.05	-0.24	0.03
Economic Cause	0.09	0.00	-0.02	-0.08	-0.08	0.08	0.03	0.13	-0.02	-0.11
Engineering Cause	0.00	0.00	0.13	-0.02	0.13	-0.10	0.07	-0.04	0.13	0.03
Environmental Cause	0.25	0.00	0.12	-0.15	-0.30	0.12	0.18	0.08	0.12	0.02

Fig. 1. Relative Deviation Index (RDI)

상대적 이탈지수(RDI)의 범위는 -1.0에서 무한대까지 나올 수 있으며, 0은 기준치와 부합하는 이른바 중간값으로 시간의 흐름에 따라 어떤 원인의 강도와 지배정도가 변함이 없음을 뜻하고, -값은 다른 주제에 비해 상대적으로 덜 강조된 것, +값은 다른 주제에 비해 상대적으로 더 강조된 것으로 해석할 수 있다. 한탄강댐 건설을 둘러싼 갈등 발생원인은 주로 Fig. 1에서 보는바와 같이 4가지 발생원인에 대해 시간변화에 따라 복합적으로 얽혀 갈등 조정 및 해결에 어려움을 보여주고 있다. 전체적으로는 환경적인 원인이 갈등의 강도와 지배정도가 제일 컸다고 할 수 있으며, 기술(공학)적 발생원인에 대해 살펴보면 2001~2002년까지는 기준값인 0이었다가 2003년부터 지속적으로 갈등원인으로 작용하고 있음을 파악할 수 있다.

3. 갈등 조정을 위한 공영시각모형 구축

3.1 공영시각모형의 개요

댐 건설 사업은 유역개념의 이·치수 목적을 갖는 포괄적 수자원 사업 중의 한 일환으로 수리학, 수문학 및 수자원 시스템 등의 물리적 특성을 고려하여야 한다. 광범위하고 복잡한 모의를 위하여 사용목적에 따라 오랜 기간 동안 개발되고 널리 활용되어 온 모형들은 주로 전문가들을 위해 개발되어 왔으며, 1950년대 이후에는 일반적으로 고급프로그램 언어인 포트란을 이용하여 개발된 HEC-1, HEC-2, HEC-3, HEC-5 등이 있다.

하지만 포트란 언어로 구성된 모형은 복잡하고 방대한 계산을 효과적으로 처리할 수 있는 장점이 있으나, 모형을 개발하는데 많은 노력과 시간이 필요하고, 개발자 이외의 사람이 모형을 사용하고자 하는 경우 프로그램의 수정 또는

보완이 용이하지 않으며, 모형의 수행결과를 일반인에게 효과적으로 전달하기 어려운 단점이 있다(Palmer et al., 1993). 이런 단점들을 보완하기 위하여 최근에는 GUI (graphical user interface) 형태로 HEC-RAS 및 HEC-HMS 모형 등의 개발과 함께 GIS(geographic information system)와 연계할 수 있거나 탑재된 모형들이 개발되고 있다. 또한 최근에는 효율적인 수자원관리를 위하여 객체지향적 시뮬레이션(Object Oriented Simulation, OOS) 소프트웨어의 사용이 증가하고 있는데, 이 모형은 기본 객체(Object 또는 Icon)들을 컴퓨터 화면상에서 선택하고 연결하여 만들어 지기 때문에 모형을 개발하는데 필요한 시간을 현저히 줄일 수 있고, 프로그램에 대한 전문지식 없이도 원하는 대로 적절히 모형을 사용하고 수정·보완이 가능하며, 시스템의 구성과 모형의 수행결과 등을 쉽게 표현할 수 있다(김영오, 1998).

지금까지 객체지향적인 공영시각모형은 소프트웨어(Stella, Vensim, Powersim 등)에 의해 구축되어져 왔으며, 수자원 관리를 위한 이수적인 부문에서는 장점이 있으나, 공간 및 지형적인 부문을 고려해야 하는 지수 측면에서의 객체지향적인 소프트웨어는 한계를 가지고 있다. 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 ArcGIS 및 HEC-RAS를 연계하여 공영시각모형을 개발하였으며, 다목적댐 건설과 같이 이해관계가 얽혀 있는 경우 이해당사자들의 의견을 수렴하여 모형에 반영함으로써 보다 현실성 있고 많은 이해당사자에게 분석 및 결과의 신뢰를 줄 수 있는 모형을 만들 수 있다. 이와 같이 공영시각모형은 개발자와 사용자가 그래픽한 유저 인터페이스의 활용으로 이해당사자의 참여와 대상구역의 문제점 및 여러 가지 대안에 대한 결과를 활용하여 시각적으로 보여줌으로써 관련된 당사자들을 이해시킬 수 있는 갈등 조정 모형이라고 하겠다.

3.2 공영시각모형의 이수부문 모형 구축

댐 건설 목적의 하나인 이수는 장래의 각 용수수요 및 회수수량, 하천유지유량 등을 고려하여 대상지역의 앞으로의 물 부족량을 제시하고 물 부족의 해소를 목적으로 하고 있다. 여기서 장래의 생활용수, 공업용수, 농업용수의 수요 예측이 큰 비중을 차지하고 있으므로 본 연구에서는 이해당사자들의 이해와 자료 수집의 용이성 등을 고려하여 각 용수의 원단위법에 의해 수요를 예측할 수 있도록 모형화 하였으며, 각 변수들의 변화와 이해관계자 사이에 상호이건이 발생하였을 경우 이에 대한 모의를 할 수 있도록 모형을 구축하였다.

3.2.1 생활용수

생활용수 수요량 예측은 Eq. (2)와 같이 계획인구에 계획 급수보급률 및 1인당 1일 평균급수량(ℓ pcd)을 적용하여 장래 일평균 생활용수를 산정하므로, 장래 생활용수 수요량은 각 인자의 증감에 따라 결정된다. 본 연구에서는 생활용수 수요량을 행정구역별로 제시된 원단위 및 급수보급률을 이용하여 추정할 수 있도록 구축하였다.

$$(1인\ 1일\ 평균급수량 \times 보급률 \times 인구)$$

$$\text{생활용수량} = + (\text{미보급지역 } 1인\ 1일\ 평균급수량 \times (2) \\ (1 - \text{보급률}) \times \text{인구})$$

생활용수 수요량을 산정하기 위해서는 장래 인구 증감에 대한 예측이 매우 중요하다. 일반적으로 인구 추정방법으로는 등비급수법, 등차급수법, 지수함수법(지수성장곡선식), 최소자승법, 로지스틱 곡선식에 의한 방법들이 있으나, 본 연구에서는 Eq. (3)과 같이 도시권 인구 예측에 적합한 로지스틱 곡선식에 의한 방법을 적용하였으며, Fig. 2는 Vensim 모형에서의 로지스틱 모델을 보여주고 있다.

$$\frac{dP}{dt} = aP - bP^2 \quad (3)$$

여기서, P : 인구, aP : 증가율, $-bP^2$: 감소율

3.2.2 공업용수

공업용수는 생활용수와 달리 용수 공급원이 상수도뿐만 아니라 하천수, 지하수 및 해수 등 다양하기 때문에 공급원별 사용량을 정확하게 파악하여 통계분석에 의한 적합한 회귀식을 구한 후 장래목표년도의 공업용수 수요를 추정하는 것이 실질적인 방법이나 장래의 개발계획을 고려할 수 없는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 장래의 개발계획 및 원단위의 변화추이를 반영할 수 있으며 일반적으로 적용되고 있는 Eq. (4)의 원단위 적용법을 이용하였다.

Fig. 2. Logistic Model of VENSIM

$$\text{공업용수량} = \frac{(\text{공장부지면적} + \text{장래개발계획면적})}{\times \text{부지면적 원단위}} \quad (4)$$

3.2.3 농업용수

농업용수의 수요량에 대한 예측은 다른 용수 수요 추정
에 비해 매우 복잡하다. 장래의 수요특성의 다항성이 더
욱 심화되고, 일조시간, 강수량 등의 기상조건의 변화에
따라 농업용수 수요도 매년 변화하는 무작위성을 보이기
때문이다. 따라서 본 연구에서는 각 행정구역별이나 유역
별로 고시된 수리안전담, 수리불안전담, 관개면적의 자료
를 활용하고 각각의 단위 용수량을 적용하여 기준년도에
대한 농업용수 수요량을 산정하고 장래의 농업용수 수요
량 예측은 앞서 생활용수에서와 같이 로지스틱 모델을 활
용하여 예측할 수 있도록 구축하였다.

$$\text{농업용수량} = \frac{\text{수리안전담 면적} \times \text{수리안전담 단위용수량} + \text{수리불안전담 면적} \times \text{수리불안전담 단위용수량} + \text{관개면적} \times \text{관개면적 단위용수량}}{\text{면적} \times \text{관개면적 단위용수량}} \quad (5)$$

3.2.4 용수수요 예측 시스템 구축

대상유역에 편입된 행정구역별 각 용수수요량을 예측
하기위하여 이용되는 Vensim 모형은 Stella 모형과 같은
모형으로 기본 알고리즘은 같으나 편리성, 기능성, 유연성
을 고려할 수 있는 변수의 양 등으로 차이를 두며 이러한
모형을 통틀어 시스템 다이내믹스 모형이라고도 한다.
Vensim 모형은 모형 개발자가 직접 모형을 이용하고 개
발하는 개발자(Map/Model) 레벨과 시스템 알고리즘을
해석하는 방정식(Equation) 레벨로 구성되어 있다.

(1) 개발자 레벨

개발자 레벨에서는 모형개발과 이용에 있어서 모든 매
개변수와 목적함수를 비롯한 제약조건, 그리고 시스템의
연계성 등을 구성하는 레벨이다(정상만 등, 2004). Figs. 3
~5에서는 임진강 유역에 편입된 행정구역별 각 용수수요
량을 예측할 수 있도록 Stock-Flow 다이어그램을 제시한
것으로 사각형(Stock)은 각 용수수요량의 예측값을 나타
내고 있으며, 사각형에 연결되어 있는 화살표(Flow)는 유
량의 흐름방향을 나타내고 있고 사각형이 존재하지 않는
것은 매개변수를 표현하고 있는 것으로 여기서 나오는 화
살표(Connector)는 각각의 매개변수나 원단위 자료를 동
적으로 연결해 준다.

Fig. 3. Model of Residential Water Demand

Fig. 4. Model of Industrial Water Demand

Fig. 5. Model of Agricultural Water Demand

(2) 방정식 레벨

개발자 레벨에서 표현되는 매개변수는 Fig. 6의 방정식
레벨에서 입력하여 수식화 할 수 있으며, 개발자 레벨에
서의 Stock-Flow 다이어그램을 앞서 설명한 각 용수수요
산정식을 이용하여 수식화하였다. 구축된 모형이 구동할
때 에러(Error)가 발생하게 되면 잘못된 연산이 이루어지
는 객체(Stock, Flow, Converter)를 알리는 에러창이 생
성되기 때문에 오류를 쉽게 파악할 수 있다.

3.3 공영시각모형의 치수부문 모형 구축

물의 사용과 홍수 피해를 방어하기 위한 이수 및 치수

Fig. 6. Level Equation of VENSIM

목적에 갖는 다목적 댐은 규모에 따라 하류에 가장 큰 수위저감효과를 가져오며, 이에 따른 홍수범람면적 및 홍수피해액의 감소효과를 동반한다. 이러한 효과를 제시하기 위하여 홍수위산정모형은 주로 HEC-RAS가 이용되고 있으며, 범람모의는 지리정보시스템과 연계하여 주로 1차원 및 2차원 해석에 의해 분석되고 있다. 또한 홍수피해액은 범람모의 결과와 다양한 공간 DB자료를 활용하여 산정되고 있는데 여러 단계에 걸친 분석과정은 이해당사자들의 이해의 어려움과 결과에 대한 신뢰성 문제를 안겨주고 있는 실정이다. 따라서 앞서 설명한 일련의 과정을 보다 단순화하고 시각적으로 표현하여 이해당사자들에게 인식 및 이해시킬 수 있는 모형이 필요하다. 본 연구에서는 ArcGIS와 HEC-RAS 모형을 연계하여 이해당사자들로 인해 각 대안이 수립되는 경우 각 대안별 수위저감효과를 한눈에 파악하고 그에 따른 홍수범람면적 및 홍수피해액의 변화를 제시하여 상호의견교환에 따른 갈등 조정에 도움을 줄 수 있도록 구축하였다.

3.3.1 홍수위산정모형 선정 및 구축

댐 건설이나 다양한 구조적인 치수대책에 의해 홍수조

절효과가 발생되면 그에 따른 하류의 홍수위 변화를 산정하여야 한다. 홍수위 산정모형으로는 FLDWAV와 HEC-RAS 모형 등이 널리 이용되고 있으나, FLDWAV는 좌우대칭의 정형적인 하도단면을 필요로 하며 수심-하폭에 대한 관계를 설정해 주는 추가적인 작업이 요구되는 반면에 HEC-RAS는 측량된 하천단면자료의 입력이 가능하며 저류지, 하도준설, 제방중고 등 다양한 치수대책을 고려할 수 있는 장점이 있다. 따라서 본 연구 목표에 부합되는 홍수위산정모형은 HEC-RAS가 보다 적합하다고 판단되며, 대상유역인 임진강 유역에 대해 하천지형을 구축하였다. 상류단 경계조건은 한탄강댐기본설계보고서(건교부, 2002)에서 제시된 문산천 합류점 부근에서 홍수량을 최대로 저감할 수 있는 홍수조절용량과 댐 상류지역 개발제한 조건을 고려할 때 확보가 가능한 $Q=2700 \text{ m}^3/\text{s}$ ($V=305 \text{ 백만 m}^3$)를 최대 홍수조절량 적용하여 CASE-1으로 설정하고, 한탄강 하류의 홍수위를 계획홍수위 이하로 경감할 수 있는 $Q=1860 \text{ m}^3/\text{s}$ ($V=210 \text{ 백만 m}^3$)을 최소 홍수조절량으로 적용하여 CASE-3로 설정한 다음 최대와 최소 홍수조절량의 중간 값인 $Q=2,300 \text{ m}^3/\text{s}$ ($V=260 \text{ 백만 m}^3$)을 CASE-2로 계획하여 각 CASE별 기본홍수량에서 댐 규모 변화에 의한 홍수저감량과 조절지 $700 \text{ m}^3/\text{s}$ 와 천변저류지 5개소에 의한 $290 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 감한 홍수량 값을 적용하였다. 하류단 경계조건으로는 임진강과 한강의 합류점에서 한강의 100년 빈도 기점홍수위 6.36 m 를 적용하였다.

3.3.2 홍수범람 및 피해액

홍수범람모의는 근래에 들어 지리정보시스템의 발달로 정밀도가 높은 지형 자료를 얻을 수 있어 다른 연구에도 널리 유용하게 활용되어지고 있다. 본 연구에서는 전국 DEM 자료를 DB 자료로 구축하였으며, HEC-RAS 결과와 DEM자료를 연계하여 홍수범람지도가 작성되도록 구축하였다. 또한 다양한 대안에 의해 홍수위가 산정되면

Table 3. The Flood Damage of Flood Inundation Area and Frequency

Flood Inundation Area	Damage Type	Flood Damage (1000 won)				
		50 Year	80 Year	100 Year	150 Year	200 Year
IJ-R01	Direct Damage	12,907,443	13,322,587	13,812,894	14,110,299	14,981,325
	Indirect Damage	29,687,119	30,641,950	31,769,656	32,453,688	34,457,048
	Total Damage	42,594,562	43,964,537	45,582,550	46,563,987	49,438,373
IJ-L01	Direct Damage	873,767	909,667	946,056	973,315	1,038,300
	Indirect Damages	2,009,664	2,092,234	2,175,929	2,238,625	2,388,090
	Total Damage	2,883,431	3,001,901	3,121,985	3,211,940	3,426,390

이에 따른 침수면적과 함께 홍수피해액을 산정하여 신속하게 제시할 수 있도록 하였다. 홍수범람구역은 제방붕괴에 의한 붕괴지점을 예측하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있으나, 실질적으로 붕괴지점을 정확히 예측하는 것은 불가능하다고 판단된다(정하옥 등, 2010). 따라서 수공구조물의 취약부분이나 과거의 피해이력, 하도 형태, 여유고 분석에 의한 자료를 활용하여 Fig. 7과 같이 임진강 유역에 대한 홍수범람구역을 산정하여 제시하였다.

기존의 홍수피해액 산정방법을 개선하여 제시된 다차원법에 의한 홍수피해액 산정방법은 좀 더 높은 정확도를 가질 수는 있으나, 아직 정형화된 산정 모형이 개발되어 있지 않으며 많은 자료 구축과 여러 단계에 걸치는 분석 과정은 많은 시간적인 손실을 가져올 수 있다. 따라서 본 연구에서는 홍수위 변화에 의한 홍수피해액을 제시하기

위하여 수위-피해액 곡선식을 산정하여 적용하는 방법을 채택하였으며, 한탄강댐기본설계보고서(2002)에서 구간 및 빈도별 홍수피해액 자료를 활용하였다. 간접피해액은 직접피해액에 간접 피해율 계수 2.3을 곱하여 산정하였으며, 임진강 하류부의 문산천 합류 지역을 검토 대상지역으로 선정하여 Table 3과 같이 두 범람구역별로 빈도별 홍수피해액을 나타내었다. 수위-피해액 곡선식은 Eq. (6)과 같이 2차 방정식을 적용하였으며, Fig. 8과 같이 결정계수가 각각 0.978 및 0.984로 나타나 산정된 수위-피해액 곡선식은 적정하다고 판단된다. 여기서, x와 y는 수위와 피해액, b와 c는 각각 x와 x의 제곱의 계수, a는 상수항을 의미한다.

$$y = a + bx + cx^2 \quad (6)$$

Fig 7. Virtual Flood Inundation Area of the Imjin River Basin

(a) Flood Stage vs. Damage of IJ-R01

(b) Flood Stage vs. Damage of IJ-L01

Fig. 8 Relation of Damage with Flood Stage

4. 모형의 적용 및 결과 분석

4.1 이수부분 적용 결과

본 연구에서 구축한 모형을 임진강 유역에 적용하였다. 생활용수 수요량과 공업용수 수요량의 예측은 한탄강댐 기본설계보고서(2002)자료를 활용하여 비교 검토하였으며, 농업용수 수요량은 한탄강댐 기본설계보고서의 자료가 불충분하여 임진강수계하천정비기본계획(2003)에서의 3개 지구를 선정하여 적용 분석하였다. 생활용수 수요량 예측에서는 각 행정구역별 당해연도의 급수보급률과 1인 1일 급수량을 적용하였으며, 그 결과 2021년도에는 비교적 정확하게 예측되고 있으나 2006~2016년도에서 약 5~7% 정도 적게 산정되는 차이를 보였다. 이는 Vensim 모형에서의 로지스틱 곡선이 완만하게 증가하는 경향을 보여 이에 따른 차이를 보이는 것으로 판단된다. 이에 대한 결과는 Table 4와 Figs. 9(a) 및 10(a)와 같이 나타내었다.

공업용수 수요량 예측에서는 2006년까지는 업종별 공업용수 원단위의 평균값을 적용하였으며 한탄강댐기본설계보고서(2002)에서와 같이 2011년 이후의 공업용수 원단위는 2006년 이후 원단위의 변화가 없는 것으로 가정하였다. 공장부지면적은 행정구역별 2006년에 개발계획에 의한 공장부지면적의 증가를 고려하였으며, 그 결과 2006년 이후 약 5%정도 크게 산정되는 것으로 분석되었다. 이에 대한 결과는 Table 4와 Figs. 9(b) 및 10(b)에서와 같이 나타내었다.

농업용수 수요량 예측에서는 수리안전답 용수 사용 추정 원단위는 1091.02mm를 적용하였으며 수리불안전답은 수리안전답의 70%, 관개전 용수 사용 추정 원단위는 530.96mm를 적용하였다. 또한 지구별 각 면적은 제시된 값을 적용하여 분석한 결과 약 1~2%의 차이를 보여 비교적 정확성이 높게 산정되었으며 이에 따른 결과는 Table 5와 Figs. 9(c) 및 10(c)에서와 같이 나타내었다.

Table 4. Comparison of Residential Water and Industrial Water Demand

		2001 Year		2006 Year		2011 Year		2016 Year		2021 Year	
		Residential Water	Industrial Water	Residential Water	Industrial Water	Residential Water	Industrial Water	Residential Water	Industrial Water	Residential Water	Industrial Water
Dongducheon	HantanRiver Dam	32.40	20.00	37.60	22.30	39.20	22.30	41.30	22.30	42.60	22.30
	This Study	32.40	20.00	33.70	23.49	36.70	23.49	40.80	23.49	44.50	23.49
	Estimation Error	0.00	0.00	3.90	-1.19	2.50	-1.19	0.50	-1.19	-1.90	-1.19
Yangju	HantanRiver Dam	37.70	0.40	47.10	23.58	68.60	23.58	93.60	23.58	104.70	23.58
	This Study	37.70	0.40	45.30	25.17	60.40	25.17	83.90	25.17	106.50	25.17
	Estimation Error	0.00	0.00	1.80	-1.59	8.20	-1.59	9.70	-1.59	-1.80	-1.59
Yeoncheon	HantanRiver Dam	16.40	-	15.90	-	16.00	-	16.90	-	17.80	-
	This Study	16.40	-	17.50	-	17.80	-	17.60	-	17.10	-
	Estimation Error	0.00	-	-1.60	-	-1.80	-	-0.70	-	0.70	-
Pocheon	HantanRiver Dam	35.10	29.00	45.80	34.00	53.50	34.00	63.20	34.00	73.90	34.00
	This Study	35.10	29.00	40.90	34.94	49.30	34.94	62.30	34.94	75.50	34.94
	Estimation Error	0.00	0.00	4.90	-0.94	4.20	-0.94	0.90	-0.94	-1.60	-0.94
Cheorwon	HantanRiver Dam	9.80	-	10.30	-	10.70	-	11.40	-	11.70	-
	This Study	9.80	-	10.50	-	11.10	-	11.20	-	10.90	-
	Estimation Error	0.00	-	-0.20	-	-0.40	-	0.20	-	0.80	-
Total	HantanRiver Dam	131.40	49.40	156.70	79.88	188.00	79.88	226.40	79.88	250.70	79.88
	This Study	131.40	49.40	147.90	83.60	175.30	83.60	215.80	83.60	254.50	83.60
	Fractional Error	1.00	1.00	0.94	1.05	0.93	1.05	0.95	1.05	1.02	1.05

Table 5. Comparison of Agricultural Water Demand

(단위: 백만 m^3)

		2001 Year	2006 Year	2011 Year	2016 Year
Sagimak	HantanRiver Dam	0.59	0.61	0.64	0.66
	This Study	0.59	0.60	0.63	0.68
	Estimation Error	0.00	0.01	0.01	-0.02
Seolmal	HantanRiver Dam	0.77	0.80	0.83	0.86
	This Study	0.77	0.78	0.82	0.88
	Estimation Error	0.00	0.02	0.01	-0.02
Duji	HantanRiver Dam	0.78	0.81	0.84	0.88
	This Study	0.78	0.79	0.83	0.89
	Estimation Error	0.00	0.02	0.01	-0.02
Total	HantanRiver Dam	2.13	2.22	2.31	2.40
	This Study	2.13	2.18	2.29	2.45
	Fractional Error	1.00	0.98	0.99	1.02

(a) Residential Water Demand

(b) Industrial Water Demand

(c) Agricultural Water Demand

Fig. 9. Comparison of the Results of Each Water Demand Forecast

(a) Residential Water Demand

(b) Industrial Water Demand

(c) Agricultural Water Demand

Fig. 10. Forecast of Each Water Demand from the Vensim

Vensim 모형을 이용하여 각 용수 수요량을 예측한 결과 생활용수 수요량 예측의 모형에 대한 좀 더 면밀한 검토가 필요한 것으로 판단되나, 이수부문에서 Vensim 모형의 이용으로 갈등발생시 여러 변수들의 조정이 용이하여 비교적 쉽고 빠르게 앞으로의 예측값을 산정할 수 있어 갈등 조정에 많은 도움이 될 것으로 사료된다.

4.2 치수부문 적용 결과

본 연구에서 구축한 치수부문에 대한 갈등 조정 모형은 한탄강댐기본설계보고서(2002)에서 제시된 홍수량 자료를

이용하여 다양한 대안에 대하여 Table 6과 같이 홍수위 변화와 이 때 홍수범람면적 및 피해액의 변화가 분석되었다. Table 6의 홍수위저감효과는 한탄강 합류점으로부터 하류로 약 13km 떨어진 적성수위표 지점에서와 임진강 하류에서 상류로 약 14km 떨어진 문산천 합류점에서 댐 규모 변화 따른 홍수위저감효과를 검토하였다. Table 6과 같이 적성수위표 지점에서는 CASE-1의 경우 1.99m의 저감효과를 가져오는 것으로 분석되었으며, CASE-2,3의 경우에는 각각 1.75~1.50m의 효과를 가져왔다. 문산천 합류점에서는 CASE-1의 경우 0.80m의 저감효과를 가져왔으

며, CASE-2,3의 경우는 각각 0.70~0.61 m 저감되는 것으로 분석되었다. 이에 따른 공영시각모형에서의 수위저감효과는 다음 Fig. 11(a)에서와 같이 하천단면을 클릭하면 각 대안별 수위저감효과를 파악할 수 있으며, 대안평가에서의 수위저감효과를 클릭하면 Fig. 11(b)와 같이 각

대안별 수위저감효과의 비교가 가능하도록 모형을 구축하였다.

또한, 공영시각모형에서 HEC-RAS 결과를 이용하여 임진강 유역 전체에 대하여 홍수범람모의를 수행한 결과는 Fig. 12와 같다. 그 결과 중 문산천 합류 지역의 IJ-R01,

Table 6. Flood Discharge and Flood Stage on Each Alternatives

		Jeok Seong Gauge		Munsancheon Channel Junction	
		Flood Discharge (m ³ /s)	Flood Water Stage (EL.m)	Flood Discharge (m ³ /s)	Flood Water Stage (EL.m)
Before		18,600	22.41	19,800	10.17
CASE	1	14,910	20.42	16,110	9.37
	2	15,340	20.66	16,540	9.47
	3	15,780	20.91	16,980	9.56
Reduction	1	3,690	-1.99	3,690	-0.80
	2	3,260	-1.75	3,260	-0.70
	3	2,820	-1.50	2,820	-0.61

(a) Flood Stage Comparison

(b) Flood Stage Reduction

Fig. 11. Flood Stage on Each Alternatives of the Shared Vision Model

Fig. 12. Simulation on Flood Inundation and Damage of the Shared Vision Model

Table. 7 Simulation Result on Each Alternatives

		IJ-R01			IJ-L01		
		Ground Elevation (EL. m)	Flood Area (km ²)	Damage (one billion won)	Ground Elevation (EL. m)	Flood Area (km ²)	Damage (one billion won)
Before		6.80	1.70	31.25	6.47	1.43	2.04
CASE	1		1.57	26.88		1.43	2.04
	2		1.58	27.27		1.43	2.04
	3		1.60	27.62		1.43	2.04

(a) Reduction of Flood Mitigation Safety

(b) Flood Damage Reduction

Fig. 13. Alternatives Evaluation on Each Alternatives of the Shared Vision Mode

IJ-L01 범람구역을 대표 지점으로 선정하여 그에 대한 결과를 검토하여 보면 Table 7과 같이 IJ-R01에서의 기본홍수량을 적용한 결과를 기준으로 홍수범람면적은 CASE-1의 경우에는 1.55km²로 약 8%의 감소효과를 가져오며, 피해액은 약 14%정도 감소하였다. CASE-2~3의 경우 홍수범람면적은 각각 약 6~7%가 감소하였으며, 피해액은 12~13% 감소하여 CASE-1의 경우가 가장 큰 저감효과를 가져오는 것으로 분석되었다. IJ-L01에서는 낮은 지반고에 의해 모든 경우에서 전체적으로 침수가 되는 것으로 분석되어 침수면적 및 피해액의 변화가 일어나지 않는 것으로 분석되었다.

다음 Fig. 13에서와 같이 공영시각모형에서는 각 대안별 치수대책의 효과 변화를 비교 검토가 가능하도록 하여 이해당사자가 쉽게 이해할 수 있고 최종적으로는 각 효과 분석에 의한 최적대안을 선정하여 합의점을 도출 시키는 데 도움이 될 수 있도록 개발하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 앞으로의 용수 수요 및 홍수 피해에 대

응하기 위해 시행되는 다목적댐 건설 계획시 발생하는 갈등에 대하여 수문학적으로 접근하여 갈등 조정 및 완화에 도움을 줄 수 있는 공영시각모형을 개발하였다. 모형의 정확도 및 다양한 분석에 의한 유연성을 확인하기 위하여 한탄강댐 갈등이 발생하였던 임진강 유역에 적용하여 모의하였으며, 본 연구에서 도출된 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 이수부문에서는 각 행정구역별로 생활용수 수요량과 공업 및 농업용수 수요량을 예측할 수 있는 모형을 개발하였으며, 인구의 변화 및 각 변수들의 변화 추이, 개발계획 등을 고려할 수 있어 이에 대한 상이한 의견이 있을시 유연하게 모의할 수 있음을 확인하였다.
- 2) 공업 및 농업용수 수요량 예측은 각각 5%와 1~2%의 차이를 보여 비교적 정확성과 일관성을 확보하였으나, 생활용수 수요량 예측에서는 2021년도에는 비교적 정확하게 예측하고 있지만 2006~2016년도에서 5~7%의 차이를 보여 이는 인구추정 방법에 의해 오차가 발생한 것으로 판단된다.
- 3) 치수부문에서는 이해당사자들에 의해 댐 규모 및 다

양한 구조적인 대책에 의해 변화되는 하류의 홍수저감효과와 침수면적 및 피해액의 변화를 제시할 수 있었으며, 이에 따른 상호의존 교환 및 합의점을 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

- 4) ArcGIS를 기반으로 HEC-RAS 및 Vensim 모형을 연계한 갈등 조정 공영시각모형은 다양한 변수 및 조건 등을 반영하여 모의하였을 경우 결과 값이 시스템 상에서 그림 또는 표로 나타나는 등 강력한 사용자 인터페이스(User Interface)의 활용으로 이해관계자들이 서로 의견을 교환하고 결과에 대해 상의할 수 있는 의사결정지원시스템이라고도 할 수 있으며, 이·치수 분야에 대한 갈등 조정 및 완화에 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 있는 한국건설교통기술평가원에서 지원한 건설기술혁신사업(08기술혁신F1)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

건설교통부 (2002). 한탄강댐 기본설계보고서, pp. 1-663.

건설교통부 (2003). 임진강(1지구)수계 하천정비기본계획 보고서, pp. 424-763.

김영오 (1998). “수자원 관리를 위한 Object-Oriented Simulation Software들의 소개.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제31권, 제6호, pp. 21-25.

박수완, 김규리, 김봉제, 임기영 (2010). “상수도 시스템의 운영 및 유지관리 의사결정 지원을 위한 시스템아디내믹스 모형의 개발.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제43권, 제7호, pp. 609-623.

이길성, 정은성 (2011). “유역통합관리 계획 수립 및 실행.” **대한민국학술원 논문집**, 대한민국학술원, 제50권, 제2호, pp. 153-191.

정상만, 이주현, 안중근 (2004). “Shared Vision 모형을 이용한 용수수급의 안정성 분석.” **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제7호, pp. 569-579.

정상만, 이주현, 유찬중 (2003). “STELLA를 이용한 충주댐의 시물레이션 모형 개발.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제23권, 제3b호, pp. 191-199.

정하옥, 박상우, 추태호, 박건철 (2010). “Query 및 Mathematical 기법을 이용한 홍수범람해석.” **한국습지학회 논문집**, 한국습지학회, 제10권, 제1호, pp. 33-40.

행정자치부, 국토연구원, 한국지방행정연구원 (1999). 지방자치시대의 분쟁사례집1-분쟁의 발생 실태와 해결-. pp. 12-158.

Ahmad, S., and Simonovic, S.P. (2000). “System Dynamics modeling of reservoir operations for flood management.” *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 14, No. 3, pp. 190-198.

Ahmad, S., and Simonovic, S.P. (2001). “A decision support tool for evaluation of impacts of flood management policies.” *Hydrological Science and Technology*, AIH, Vol. 17, No.1, pp. 11-22.

Li, L., and Simonovic, S.P. (2002). “A system dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds.” *Hydrological Processes, HydroL, Precess*, Vol. 16, No. 13, pp. 2645-2666.

Palmer, R.N., Keyes, A. M. and Fisher, S.M. (1993). Empowering Stakeholders through Simulation in Water Resources Planning, *Proceedings of the 20th Annual Water Resources Planning and Management Conference*, ASCE, Seattle, pp. 541-454.

Simonovic, S.P., and Li, L. (2003). “Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, Vol. 129, No. 5, pp. 361-371.

Stave, K.A. (2000). “Using system dynamics models to facilitate public participation in Water Resources Managment: a pilot study using the Las Vegas.” *NV Water System 18th International Conference of the System Dynamics Society*, Bergen, Norway, August pp. 6-10.

논문번호: 12-060	접수: 2012.06.19
수정일자: 2012.07.16	심사완료: 2012.07.16