

## 남북공유하천 북한강의 물이용 문제점 및 수리권 추정 (I) -임남댐 유역변경에 의한 하류 영향 분석

Problems of Water Use and Estimation of Water Right in North Han River  
Shared by North and South Korea (I) -Analysis of Diversion Impacts on  
Downstream Area by Innam Dam

안 종 서\* / 정 관 수\*\* / 이 광 만\*\*\*

Ahn, Jongseo / Jung, Kwansue / Lee, Gwangman

### Abstract

Innam Dam construction and inter-basin water transfer use by North Korea have caused several problems including water resources management aspects in the downstream reach of North Han River. Therefore, cooperative works between North and South Korea are required to make a reasonable management situation of the shared river for water quantity and quality. However, efforts by the North and the South has done not enough to achieve equitable water use in the shared river. This study analyzes main impacts caused by Innam Dam in key sectors for reviewing water use right regarded as the most important decision-making criterion in international rivers. As the results, water deficit by Innam Dam is calculated at 379 million m<sup>3</sup>/year when river drought year for water assessment is set in 1978 in the Han River basin. Additionally hydropower production is decreased by 234 GWh/year in exclusive hydropower generation dams. In respective of water quality, BOD concentration is increased by 0.065 ppm at Sambongli in North Han River. Finally it is identified that unequitable water use based on the absolute territorial sovereignty by North Korea in North Han River has directly and indirectly affected severe impacts to South Korea as the downstream user.

**Keywords** : shared river by South and North Korea, inter-basin water transfer, equitable water use, water right

### 요 지

북한강 수계의 경우 북한이 임남댐을 개발하여 유역변경식으로 물을 이용하고 있어 하류지역에서 여러 가지 문제가 나타나고 있다. 따라서 남·북한이 공유하천을 효과적으로 관리하기 위해서는 수량이나 수질 등 다양한 분야에서의 협력이 절실히 요구되고 있다. 그러나 남·북공유하천에서 상·하류국가간 물이용의 공평성을 실현하기 위한 노력은 매우 미흡한 실정이다. 본 논문에서는 남북공유하천의 공평한 물이용의 판단기준이 되는 수리권을 검토하기 위해 북한의 임남댐에 의한 영향을 주요 분야별로 심도 있게 분석하였다. 분석결과, 한강유역의 용수공급은 1978년을 이수안전도 평가를 위한

\* Kwater 대청댐관리단 단장, 공학박사 (e-mail: jsahn@kwater.or.kr)  
Office of Daechung Dam Management, Daejeon, Daejeon 306-711, Korea

\*\* 충남대학교 토목공학과 교수 (email: ksjung@cnu.ac.kr)  
Professor, Dept. of Civil Engrg., Daejeon, Korea

\*\*\* 교신저자, Kwater Kwater연구원 수석연구원 (email: lkm@kwater.or.kr)

Corresponding Author, Korea Water and Environment Research Institute, Kwater, Daejeon, Korea 305-730

기준갈수년으로 할 경우 임남댐으로 인해 379백만 m<sup>3</sup>/년의 공급부족이 발생하는 것으로 나타났다. 아울러 한강 수계의 발전용댐도 유입량 감소로 인하여 연간발전량이 234 GWh/년 감소하게 되었고, 수질은 북한강 삼봉리 지점 기준 BOD 약 0.065 ppm 증가하는 것으로 분석되었다. 결과적으로 남북공유하천에서 북한의 절대영토주권주의에 입각한 불공평한 수자원 이용은 하류국가인 남한에 직·간접적으로 상당한 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 남북공유하천, 유역변경식, 공평한 물이용, 수리권

## 1. 서론

최근 기상이변에 따른 홍수는 해마다 수많은 인명과 엄청난 재산 피해를 가져오고, 가뭄은 우리에게 물부족 뿐만 아니라 지구상의 모든 생명체에게 고통을 준다. 또한 오염된 물은 우리의 건강 뿐 아니라 자연상태에서 살고 있는 동·식물들의 생존을 위협하기도 하여 서로간 수자원 확보를 위한 갈등을 초래하기도 한다. 즉, 국가와 국가, 지역과 지역 그리고 인간과 자연환경 등 상호간 각자의 존재유지에 필요한 물을 더 많이 확보하기 위하여 경쟁하게 된다. 특히 국제하천을 무력분쟁의 역사적 원인으로 보는 시각에서 21세기 국제 분쟁의 주요 요인으로 공유하천을 지적하는 사례가 늘고 있다 (Bulloch and Darwish, 1993; Cooley, 1984).

이러한 수자원 갈등은 많은 공유하천에서 잠재해 있지만 주로 하천이나 호소 등 수자원 공급원이 수문지형학적으로 비대칭일 때 더욱 심각하다. 또한, 수자원 관리체계가 낙후되었거나 제도적 장치가 마련되어 있지 않아 물이용의 효율성을 크게 저하시키고 있다. 특히 협력시스템이 갖추어지지 못했을 경우 하천분쟁의 가능성은 더욱 커지게 된다. 분쟁원인은 내륙운하, 하천관리, 홍수조절, 수력발전, 수질관리 등 다양한 형태로 나타나지만 주로 물이용과 관련된 수리권 문제가 핵심사항이다. 하류유역에 위치하면서 수자원이 부족하여 용수수요의 대부분을 상류로부터 흘려드는 유량에 의존하는 경우 분쟁의 강도는 더욱 커지게 된다.

우리나라의 경우도 북한강과 임진강을 남·북한이 공유하고 있는 실정이다. 이들 공유하천은 그 중요성에 비하여 관심을 받지 못해왔으며, 문제가 발생하면 대응논리의 일과성 대책들이 제시되는 정도였다. 따라서 많은 문제가 있음에도 불구하고 구체적인 대책들이 추진되지 못했다 (손기웅, 2006; 이광만 등, 2008; 최동진, 2009). 또한 남·북한의 경우는 대부분의 국제공유하천처럼 물이용에 대한 협력이 마련되어 있지 않고 중동지역과 같이 군사적인 대치관계의 특수성이 존재한다. 특히 북한강 수계에는 북한에 위치한 임남댐 하류에 여러 댐들이 연속으로 위치해 있어 수자원 이용이 높은 편이다. 이들 댐들은 하천-저수

지 시스템 특성을 가지고 있어 용수공급, 수력발전 및 레크리에이션 등 하천활용도가 크다. 그러나 북한의 임남댐 건설로 하류 하천에서 유량감소, 수질악화, 용수공급 능력 저하, 수력발전 감소 및 레크리에이션 활동 위축 등 여러 분야에서 물이용 편익감소 문제가 나타나고 있다. 일부에서는 물 안보문제도 제기되고 있는 상황이다 (김익재 등, 2009).

이러한 현황과 문제점을 고려하여 공유하천의 남·북협력을 강조하는 대안들이 제시되었다. 제시된 대안은 주로 협력프로그램 및 공유하천공동관리 제도화 (정희성, 2000; 최동진, 2005; 이광만 등, 2008; 황진희, 2009; 김덕주, 2009; 백경오, 2009), 임남댐 및 남한의 주요 시설을 적극 이용하여 수량을 확보하는 방안 (전병호 등, 1993; 이재웅 등, 2004; 백경오, 2009) 및 협상에 의해 임남댐으로부터 수량을 확보하고 대가를 지불하는 방안 (손기웅, 2006) 등이었다.

그러나 협력을 위한 일방적인 대안제시에 앞서 북한 댐에 의한 영향을 정확히 진단할 필요가 있다. 이를 바탕으로 공평한 물이용의 피해자인 남한측면에서 주장할 수 있는 내용이 무엇인지를 분석하고 판단하는 것이 우선적으로 이루어져야 한다. 특히 북한의 임남댐으로 인한 영향은 어떤 것이 있으며, 어느 정도이고, 물이용의 문제점은 없는지, 이와 관련된 남한의 수리권은 얼마인지에 대한 정확한 진단이 필요하다.

본 연구에서는 남북공유하천의 물이용의 불공평을 해소하기 위한 시발점이라 할 수 있는 하류국가의 기본 수리권 추정에 필요한 공학적 분석의 기본정보를 제공하고 하였다. 지금까지 남북공유하천의 불평등한 물이용의 문제점과 해결대안이 협력시스템 구축과 전력지원분야에 한정되어 있어 수리권과 같은 구체적인 대안 제시에는 미흡하였다. 따라서 남북공유하천 중 문제가 심각한 북한강을 대상으로 북한의 임남댐에 의한 영향을 수량 및 수질 측면에서 분석하고 수리권을 판단하기 위한 물 부족 상황을 해석하여 제시하고자 하였다. 이를 위해 북한강 유역의 수문 및 수질조사, 강우유출 해석, 장래용수공급평가 및 수질상태 등을 분석하여 임남댐 건설과 유역변경이 하류하천에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다.

## 2. 남북공유하천 현황 및 문제점

### 2.1 공유하천 현황

일반적으로 공유하천이란 보통 둘 이상의 나라들의 경계를 이루거나 이들 국가의 영토를 흐르는 하천이라고 정의할 수 있다. 유엔국제사법위원회(IIA)는 “물과정시스템(watercourse system)”이란 개념을 도입하여 공유하천에 대한 공간적 범위를 확대 해석하고 있다. 지구상 대부분의 대화천은 공유하천으로, 여러 국가들에 의해 공유되고 있는 하천의 수는 소비에트연방과 유고슬라비아가 해체된 이후 245개 정도로 늘었다. 이 가운데 70개는 아프리카, 55개는 유럽, 40개는 아시아에 위치하고 있다. 이 중 아마존강은 7개국, 다뉴브강은 11개국 이상, 니제르강과 나일강은 9개국 이상, 라인강은 7개국, 잠베지강은 8개국이 공유하고 있다(최동진, 2005).

우리나라의 공유하천은 Table 1과 같이 국가하천으로는 북한강 및 임진강이 있고, 지방하천으로는 한탄강 등 6개 하천이 있다. 북한강의 경우는 임남댐 및 평화의댐 등이 있고, 임진강에는 황강댐 및 군남홍수조절지 등이 있어 용수공급, 또는 홍수조절 및 군사적 방어 목적으로 건설되었다. 나머지 지방하천의 경우에는 하천규모가 협소하거나 댐 등의 구조물이 설치되어 있지 않은 것이 대부분이다. 규모가 작은 하천은 북한측 방류로 인한 홍수피해가 미미하고 하천의 경제활동이 적어 지방하천으로 관리하고 있다. 지방하천 중 한탄강과 김화남대천의 경우는 비교적 규모도 크고 이수 및 치수측면에서 임진강에 큰 영향을 미치고 있다. 이외에 역곡천(남한측에서 북한으로 흘러 임진강에 유입), 금성천(일부가 남한측에서 흘러 북한측으로 유입 후 평화의 댐으로 유입) 및 남한측에서

Table 1. List of Major Shared Rivers in Korea

구 분 (등급)	유역면적 (km <sup>2</sup> ) (남한측면적, %)	유로연장 (km) (남한측연장)	비 고
북한강 (국가)	10,124.4 (7,787.0, 76.9)	291.30 (158.82)	
임진강 (국가)	8,811.7 (3,008.7, 37.1)	244.0 (91.0)	
한탄강 (지방)	3,075.8 (2,085.0, 67.8)	141.0 (85.26)	임진강 유입
김화남대천 (지방)	414.7 (333.6, 80.4)	39.70 (20.60)	한탄강 유입
수입천 (지방)	320.5 (203.0, 63.3)	50.29 (36.10)	파로호 유입
인북천 (지방)	929.9 (754.5, 81.1)	74.30 (49.20)	소양강 유입
사 천 (지방)	350.6 (45.6, 13.0)	30.0 (18.5)	소양호 유입

북한측으로 흘러 남강(북한)에 유입하여 동해안(강원도 고성군)으로 흐른다(Table 1).

### 2.2 남북공유하천의 문제점

물은 인간에 있어 필요 불가결한 자원으로 절대적인 수요(음용수)에서 레크리에이션(수영장, 분수, 공원, 사막의 골프장 등)에 이르기까지 다양한 용도로 이용된다. 물이용과 관련된 국제분쟁의 증가는 이용 가능한 물 부족이 원인이 되고 있다. 물 부족문제는 고대 메소포타미아 문명시대의 '라기슈'와 '우마' 간의 물 분쟁을 종결시킨 조약에서 알 수 있듯이 적어도 금세기까지 4500년간에 걸쳐 국가간 및 지역간 분쟁의 씨앗이 되어 왔다(Cooper, 1983). 특히 19세기 이후에는 인구증가와 산업화에 따른 근본적인 물 수요의 확대로 물이용에 대한 논쟁이 끊이지 않고 있다.

우리나라의 남북공유하천도 예외가 아니며 북한이 수문지형학적 장점을 이용한 일방적인 물이용으로 여러 가지 문제가 초래되었다. 남북공유하천은 크게 임진강 유역과 북한강 유역으로 구분할 수 있는데 현재의 상황을 정리하면 Table 2와 같이 많은 문제들이 누적되고 있다. 그러나 이들 문제에 대한 해결방안 노력은 활발히 진행되지 못했다. 실제 북한지역에 대한 접근성이 원천적으로 차단되어 이론과 논리에 의존한 단편적인 평가만이 있어 왔다. 이들 대부분은 국제공유하천의 이론에 근거하여 북한의 전력문제 등을 고려한 대안제시가 대부분이었으며, 하류국가로서의 수리권 주장이나 이에 관계된 정확한 현상 규명은 이루어지지 못했다.

비록 주체의 어려움이나 정보의 한계로 남북공유하천 공동이용관리를 위한 활발한 논의는 이루어지지 못했지만 그간의 성과를 정리하여 평가하면 다음과 같다.

우선 북한의 불공평한 물이용에 대한 최초의 연구로 선호중호(1986)는 금강산댐(지금의 임남댐) 건설로 인한 하류의 수권(water right) 문제 및 하류의 피해에 대한 대책 방안을 제시하였다. 즉, 금강산댐 건설로 인해 화천댐의 연평균 유입량의 57.8%인 18.6억m<sup>3</sup>이 완전히 차단되는 것으로 분석하였으며, 지하수의 지하로 인한 식물의 수분공급 부족, 어족의 고갈, 농작물의 피해, 산림황폐화로 인한 유출현상의 변화 등 하류 생태계에 많은 변화가 있을 것으로 예측하였다. 전병호 등(1993)은 금강산댐 건설로 인한 화천댐으로의 유입량 및 수위변화를 모의하여 유입량과 수위가 감소되는 것을 확인하고 화천댐의 최적 운영을 위해 새로운 댐 운영기준 수립을 제시하였다. 이재응 등(2004)은 유입량이 약 35~40% 정도 감소할 것으로 예상하고 평화의 댐을 증고하여 화천댐과 연계, 치수와 이수측면의 효과를 증대시키는 방안을 제시하였다.

Table 2. Main Issues of the Shared Rivers in North and South Korea (Lee, 2008)

구 분	임진강	북한강
댐 건설	사전 협의없이 상류에 4~5개 정도의 댐이 건설(황강댐은 유역외 도수목적)	사전 협의없이 4개 정도의 댐을 건설했음(임남댐은 유역외 도수목적)
수질관리	북측지역에 심각한 오염원은 없는 상태로 수질은 대체적으로 양호	2000년 이후 방류량이 거의 없어 남측하천에서 여러 가지 문제가 발생
하천이용	수해방지사업만 진행	일체의 협이가 없었음
자료제공	2004년 홍수기부터 주요 수문자료 제공 합의하였으나 진전 없음. 2009년 무단방류 인명피해 발생	임남댐에서 2번의 수문방류시 남측에 통보하였으나 양과 시간은 알려주지 않았음
제3자협력	특별한 실적 없음	임남댐 공동조사에 대해 불허
주요문제	유역변경에 따른 하류에서 유량 감소(수리권 분쟁) 임진강 하류지역 수질환경 통합유역관리 차원의 공동이용관리	유역변경에 따른 하류에서 유량 감소(수리권 분쟁) 임남댐 댐체의 안정성 통합유역관리 차원의 공동이용관리
현안사항	황강댐 도수영향평가 및 하천유지 유량산정 임진강 수해방지를 위한 실질적 협력	상호 공동이용 방안 및 북한수력발전 재건협력 하류수리권보장량 검토

김남원과 이정은 (2009)은 화천댐 상류유역에 대해 미래 기후변화 및 용수이용 증대에 따른 안정적인 물 공급 방안을 도출하기 위해 장기유출해석을 통해 1975년도부터 2008년도까지 약 18.3억m<sup>3</sup>의 수자원 감소가 발생한 것으로 추정하였다. 특히, 수자원 감소는 유출량이 많은 여름철이 크고, 감소율은 겨울철이 클 것으로 예상했다.

이광만 등 (2008)은 남북공유하천 협력체계를 제시하고 북한강에 대하여 임남댐으로부터 안변천으로의 유역변경 상태가 고착화되는 것을 우려하였다. 이를 위해 상호 공동이용 방안으로 북한 수력발전 재건을 위한 포괄적 협력이 필요하고, 동시에 하류유역 수리권 개념의 용수공급 보장량을 검토해야 한다고 지적했다. 임진강에 대해서는 황강댐 도수에 의한 환경영향평가가 필요하며, 북한과의 대화시 남한이 확보해야할 수리권 개념으로 하천유지 유량 산정이 요구된다고 강조하였다.

최동진 (2009)은 공유하천의 이용이 남한은 수해예방을, 북한은 전력생산을 목적으로 하고 있어 편익이 엇갈린다고 분석하고 수자원의 합리적 이용에 대한 합의가 시급하다고 진단했다.

북한의 일방적인 유역변경에 의한 유량차단은 불합리한 것이며, 최소한 자연상태 유량의 50% 이상이 남한에 보장되어야 한다고 하였다. 또한 현재와 같은 공유하천 이용의 불합리한 구조가 지속되지 않도록 가능한 빠른 시일 내에 수자원의 합리적인 이용질서에 대한 합의가 이루어져야 한다고 하였다. 백경오 (2009)는 북한이 황강댐의 물을 하류로 흘릴 경우 임진강 물을 예성강으로 돌리지 못하는 대신에 북측이 원하는 전력을 남측에서 공급해 주고, 한탄강댐을 홍수조절목적에서 다목적댐으로 전환하는 방안을 제시하였다.

공유하천에 대한 사회경제적 측면의 연구사례로 이명환 (1987)은 금강산댐 건설계획을 북한의 경제계획과 관련시켜 그 계획의 경제적 당위성 여부를 분석하였다. 아울러 금강산댐 건설이 남한에 미치게 될 영향과 그에 대한 남한의 대응방안을 구상하여 제시하였다. 그리고 금강산댐 건설의 영향과 대응방안을 자연환경의 변화와 안보 측면에서의 영향으로 나누어 분석한바 있다. 김영봉 (2002)과 김영봉 등 (2005)은 남·북한 공용하천에서 발생할 수 있는 분쟁의 문제를 다양한 교류협력 사업을 통해서 평화적으로 해결할 수 있는 방안을 제시하였다.

### 2.3 북한 임남댐의 도수량 추정

북한의 임남댐에 의한 하류유역의 영향을 분석하기 위해서는 임남댐으로부터 동해안의 안변천으로 유역변경되는 수량을 추정하여야 한다. 그러나 북한이 임남댐으로부터 유역변경하는 양을 알려주지 않고 있어 피해를 보고 있는 남한은 그 양이 얼마인지 정확히 알지 못하고 있다. 따라서 알려져 있는 안변천년발전소의 발전규모를 추정하여 역산할 수 있으나 이 역시 발전 운영에 대한 자료가 없이는 정확한 값을 보장받을 수 없다. 그래서 도수터널 규모와 임남댐의 직접적인 영향을 받는 화천댐의 유입량을 분석하여 추정하는 것이 비교적 정확할 것으로 판단되었다. 결국 임남댐지역을 미계측유역으로서 간주하고 1997년을 임남댐의 건설 전과 후로 구분하여 이전에 대해서는 화천댐의 실유입량을, 이후는 지리적으로 가까운 소양강댐의 실유입량을 대상으로 Fig. 1과 같은 절차로 추정하였다. 즉, 화천댐 실측 유입량 자료를 분석하여 임남댐 건설전·후 유량변화를 분석하였으며, 화천댐과 소양강댐의 상관성 분석 및 유역전이법을 이용하여 임남댐 건설

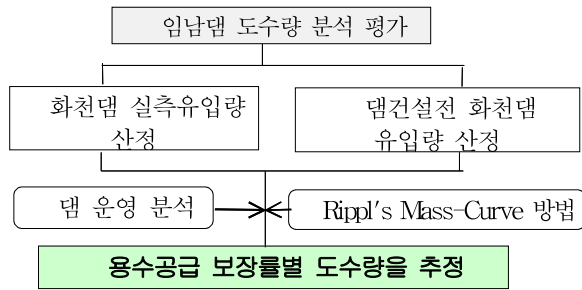


Fig. 1. Diagram of Water Conveyance Evaluation from the Imnam Dam

이후 왜곡되지 않은 자연유량을 산정하였다. 이의 계산을 위한 연유량자료 계열은 임남댐 건설전인 1967~1996년까지는 화천댐지점 실측유량 자료를 이용하고, 임남댐 건설시작 이후인 1997~2005년까지는 소양강댐 유입량자료를 강우량과 유역면적비를 고려하여 추정하였다. 즉 임남댐 건설전은 화천댐 유입량 자료를 이용하여 유역비로 할당하고 이후는 비교적 근접거리에 있는 소양강댐의 유량 자료를 전이하였다(Fig. 1).

이에 따라 임남댐에서 조정지점으로 도수하기 위한 도수터널의 직경이 10m, 유속을 1.0m/sec로 가정 할 경우 초당 78.5m<sup>3</sup> (24.7억 m<sup>3</sup>/년)를 도수할 수 있는 규모(터널면적 78.5m<sup>2</sup>×1.0m/s)로 판단되었다. 그러나 유입량 감소 실적, 개발가능 규모, 저수지 모의 운영 결과 등을 종합해 볼 때 약 12.7~16.2억 m<sup>3</sup>/년의 유역 외 도수가 가능한 것으로 추정되었다. 임남댐에서의 타 유역 도수의 주목적은 안변청년발전소에서의 발전이므로 북한에서는 도수량을 극대화시킬 것으로 예상된다. 따라서 도수예상량 중 보장률 90%인 약 16.2억 m<sup>3</sup>/년을 임남댐에서 실제 도수가능량으로 정하였다(안중서, 2011). 이를 근거로 보장률별 발

Table 3. Possible Diversion Water from Imnam Dam (1967~2007, 41 years)

보장률	수요량		공급량 (억m <sup>3</sup> /년)		
	m <sup>3</sup> /s	억m <sup>3</sup> /년	추정도수량	남한측 무효방류	합계
100%	40.2	12.7	12.7	5.0	17.7
98%	44.9	14.1	14.0	3.7	17.7
95%	49.7	15.7	15.1	2.6	17.7
90%	54.6	17.2	16.2	1.5	17.7

전용수와 공급가능량을 추정하면 Table 3과 같다.

한편 북한의 임남댐 건설로 인한 수자원량 변화를 분석하기 위해 남한측 화천댐의 실측 유입량자료를 이용하였다. 이를 위해 1996년 이전은 임남댐 건설 전, 1997~2000년은 임남댐 건설 중, 2001년 이후는 임남댐 건설 후로 구분하였다. 분석 기간에 대한 화천댐의 실측유입량 변화를 Fig. 2를 이용하여 분석하면 임남댐 건설 후 지속적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 화천댐 유입량은 임남댐 건설 중(1997~2000년) 유입량 평균은 25.9억 m<sup>3</sup>/년, 임남댐의 건설 후 화천댐 유입량 평균은 17.2억 m<sup>3</sup>/년으로, 임남댐 건설 전의 평균 유입량 30.1억 m<sup>3</sup>/년에 비해 약 12.9억 m<sup>3</sup>/년이 감소한 것으로 추정된다. 동 기간 중의 평균 강우량은 임남댐 건설 전에 비해 건설 후에 약 37mm가 증가했음에도 화천댐 유입량이 크게 감소하였다.

### 3. 하류영향 분석을 위한 모형화

#### 3.1 강우유출 모형

일반적으로 수문모형을 구분하는 방법은 모의과정, 공

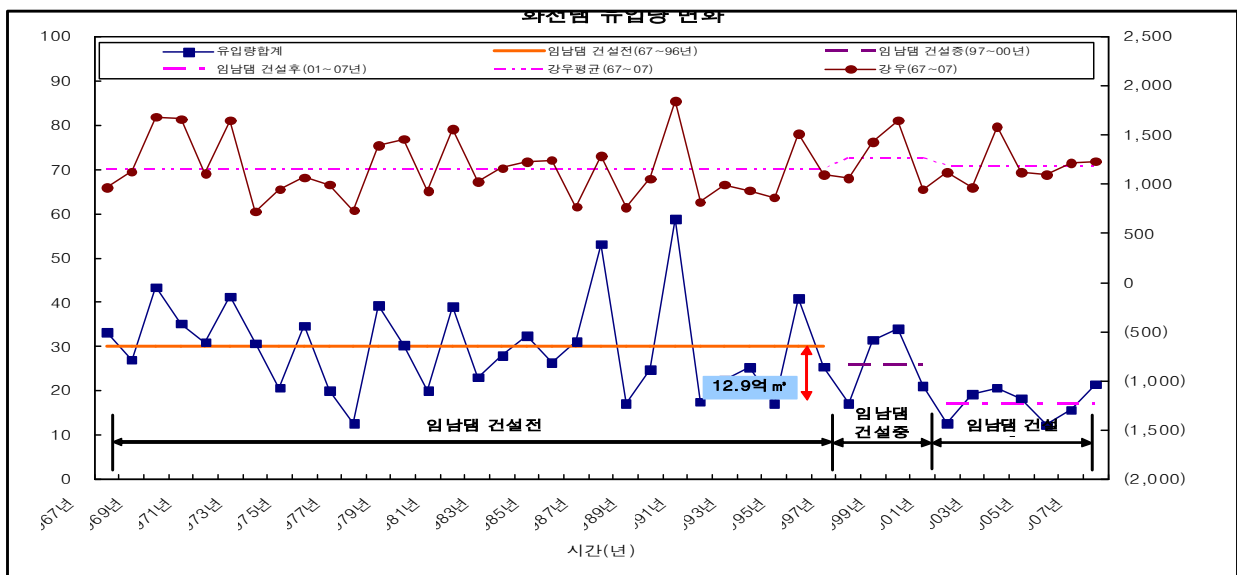


Fig. 2. Variation of Inflow in the Hwacheon Dam

간 및 시간규모, 해결기법 등 크게 세 가지이다. 모의과정에 따라 집중형 모형 (lumped model)과 분포형 모형 (distributed model)으로 구분할 수 있으며, 이는 다시 확정론적 모형 (deterministic)과 추계학적 모형 (stochastic)으로 나누어진다. 또한, 적용하는 공간 및 시간에 따라 연속형 모형 (continuous)과 사상형 모형 (event)으로 구분할 수 있다 (Singh, 1995). 모형선정은 실제 북한의 특성상 많은 공간자료를 확보하는 것이 어렵기 때문에 가용한 자료에 의한 모의 가능성 등을 종합적으로 고려하였다. 따라서, 미세측 유역에 대한 자료는 위성영상이나 GIS 기법을 활용한 유역특성 인자의 생산 및 가공 측면을 고려하였다. 이러한 측면에서 PRMS (Precipitation Runoff Modular System) 모형을 선정하였으며 MMS (Modular Module System) 버전 (Leavesley et al., 1996)을 이용하였다.

MMS는 다양한 모듈을 개발하고 적용할 수 있도록 설계된 통합시스템으로, 여러 모듈들이 시스템 내에서 모듈화될 수 있도록 개발되었다. 강우, 기후, 토지이용 등을 이용하여 지표유출, 토사 산출량 등의 전반적인 유역의 수문에 대하여 모의할 수 있으며, 평상시와 호우시 강우와 용설을 모의 할 수 있다.

또한, 물리적 현실성에 최대한 근접하기 위하여, 수문 순환을 구성하는 각각의 요소들은 측정 가능한 유역의 특성을 기초로 임의의 물리적 해석을 갖는 경험적 관계와 물리 법칙의 형태로 표현된다. PRMS 모형은 유역을 지형학적 특성이 균일한 소유역으로 나누어 각 소유역별 매

별 수문학적 반응의 합을 유역의 총 유역 반응으로 계산한다. PRMS는 Fig. 3과 같이 개념적 유역수문순환 시스템을 모의하도록 개발되었다.

### 3.2 물수지분석 모형

우리나라의 경우 대부분의 유역은 저수지를 포함하는 등 유역 규모가 매우 크고, 유역간 물 배분, 저수지와 지표수 연계운영, 하천환경 및 생태계를 고려하여야 하므로 시스템이 복잡한 형태를 가지고 있다. 이러한 특성을 반영하여 수요-공급을 평가하기 위한 유역물수지분석 모형으로 한국수자원공사와 Colorado 주립대학이 공동으로 개발한 KModSim를 이용하였다 (정태성 등, 2007). KModSim은 다양한 흐름 조건 하에서 모의가 가능하며, 지표수-지하수 연계를 위하여 다양한 모형과 GIS자료 및 데이터베이스를 활용하여 계산할 수 있다. 주요 입력자료는 저수지 침투, 증발, 발전, 댐 운영률, 수로손실, 홍수추적, 펌핑, 회귀수, 펌핑에 의한 저류정보, 그리고 지하수흐름에 기인한 저류정보 등이다. KModSim을 이용해 단순히 배분만을 계산할 경우에는 유입량, 용수수요량, 그리고 하천 유지유량이 필요한데, 우리나라에서 기존 물수지 분석에 적용되고 있는 대부분의 자료를 거의 그대로 사용할 수 있어 모형과 결과의 안정성을 확보할 수 있다는 장점이 있다. KModSim의 최적화는 공급의 우선순위를 고려하여 네트워크상에서 흐름을 계산하는 것으로 운영시간에 대해 Eqs. (1), (2) and (3)에 제시된 목적함수와 제약조건을 풀게 된다.

$$\min \sum_{l \in A} c_l q_l \quad (1)$$

그리고 노드의 제약조건은 다음 식과 같다.

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{l \in I_i} q_l = b \text{ for all nodes } i \in N \quad (2)$$

$$l_{it} \leq q_l \leq u_{lt} \text{ for all links } l \in A \quad (3)$$

여기서,  $c_l$ 은 링크  $l$ 에서의 비용, 가중치 혹은 단위 유량당 우선순위,  $q_l$ 은 링크  $l$ 에서의 유량,  $A$ 는 네트워크상의 모든 링크 혹은 아크,  $O_i$ 는 노드  $i$ 에서 시작되는 모든 링크 (예: 유출링크),  $I_i$ 는 node  $i$ 에서 끝나는 모든 링크 (예: 유입링크),  $b$ 는 시간  $t$ 일 때 노드  $i$ 의 유입 (양수) 혹은 수요 (음수),  $l_{it}$ 는 시간  $t$ 일 때 링크  $l$ 에서의 하한치, 그리고  $u_{lt}$ 는 시간  $t$ 일 때 링크  $l$ 에서의 상한치이다.

### 3.3 수질모형

우리나라 하천수질을 보다 정확히 모의하기 위하여 국립환경연구원은 오염총량관리 대상물질인 BOD에 대해

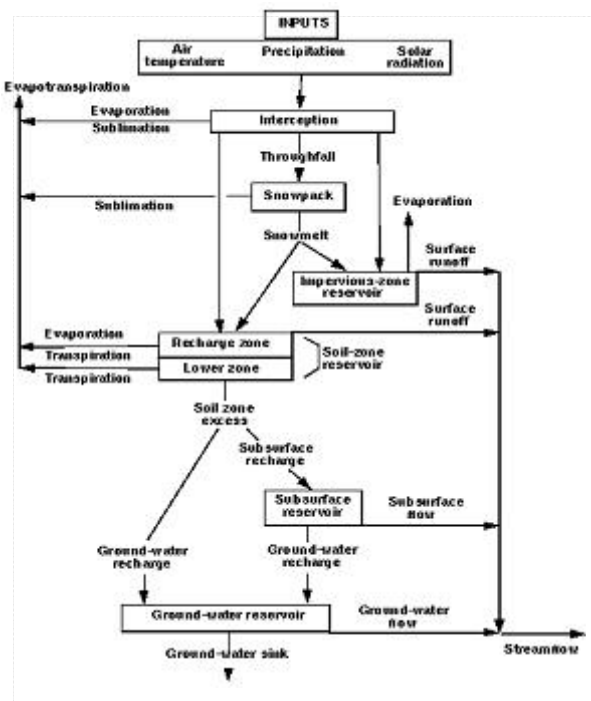


Fig. 3. PRMS Hydrologic System

개변수를 산정하고, 유출 분석을 통해 추출된 각 소유역

조류사멸에 따른 BOD 증가 현상을 고려하고 실제 실험실에서 측정되는 Bottle BOD 반응 기작을 고려할 수 있는 QUALKO 모형을 2001년도에 개발한 바 있다. 또한, 2007년도에는 국내 수체 특성과 오염총량관리를 위해 고려되어야 하는 현상들과 기존 개발된 모형 적용시 나타난 문제점을 하천현상학적인 측면, 수질시험방법적 측면, 오염총량관리 측면 등을 종합적으로 고려한 QUAL-NIER를 개발하였다. 따라서 본 연구에서는 국내 실정에 적합하게 개발된 모형을 사용하고자 QUAL-NIER를 수질모형으로 선정하였다(국립환경연구원, 2005).

QUAL-NIER 모형은 미국환경청에서 개발한 QUAL2E를 기반으로 하고 있으며, QUAL2E 모형의 DO 중심 구조로부터 우리나라 하천 및 호소에서 주요 수질지표로 사용되고 있는 유기물, 영양염류 및 조류 중심 구조로 변환되었다. 유기물질은 크게 입자성과 용존성으로 구분하고, 조류의 물질대사에 따른 유기물의 증가 및 질소·인의 순환과정을 모형의 중심구조로 설정하였다. 또한, 수질반응 구조 및 수질변수 간의 상호작용 등을 검토하여 국내 하천에 적용하기 위해 요구되는 반응기작을 보완하였으며, 유기물, 질소나 인과 같은 영양염류와 조류에 대한 수질반응식이 포함되어 있다(박준대 등, 2008). 유기물과 관련된 수질항목은 CBOD<sub>5</sub>와 BOD<sub>5</sub>로 구분되어 있으며, 이에 대한 수질반응 과정은 다음과 같다.

QUAL-NIER 모형을 구성하는 기본방정식은 1차원 이송-확산 물질 이동 방정식(1-dimensional advection-dispersion mass transport equation)이다. 이 방정식에는 하천의 계산요소(comp. element)에 대한 물질의 흐름에 의한 이동(advection)과 확산에 의한 이동(dispersion), 수체내부에서 발생하는 반응과 상호작용(reactions and interactions), 그리고 수체외부로부터의 유입 또는 외부로의 유출(external source and sinks) 등 4가지 사항을 포함한 방정식으로 다음과 같이 나타내어진다.

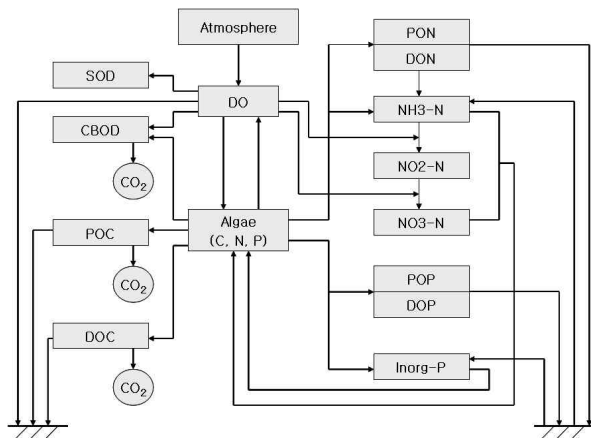


Fig. 4. Relationship of Material Change Process and Mutual Response in Water Body

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial(A_x D_L \frac{\partial C}{\partial x})}{\partial x} dx - \frac{\partial(A_x \bar{U} C)}{\partial x} dx + (A_x dx) \frac{dC}{dt} + S \quad (4)$$

여기서, M은 물질의 질량(mass), x는 거리, t는 시간, C는 농도, Ax는 하도 단면적, DL은 종방향 확산계수,  $\bar{U}$ 는 평균유속, S는 외부로부터 유입 또는 유출을 각각 나타낸다. 그리고 dC/dt는 농도 C인 임의의 오염물질이 물리, 화학 또는 생물학적으로 변화하는 속도를 나타낸다. 외부로 유입 또는 유출을 나타내는 S는 일반적으로 유량, 수질 및 기상 등으로 구분되며, 물질수지나 Flow augmentation과 같은 Headwater 입력, 하수처리장, 우수유출, 도수 및 하수처리 효율 등과 같은 점오염원, 비점오염원과 지하수로의 손실 등과 같은 증분 유입, 확산계수가 큰 감소 하천의 하구 등 하류 경계조건 등은 사용자가 지정할 수 있도록 되어 있다.

### 3.4 치수영향 분석

치수영향을 분석하기 위하여 사상형 강우-유출모형으로 선정된 저류함수모형을 적용하여 분석하였다. 저류함수모형의 매개변수 산정은 유역유출모형의 변수산정과 하도유출모형의 변수산정으로 나누어지며 유역 및 하도유출모형의 매개변수를 산정하기 위해서는 유역의 지형인자와 하도의 기하학적 기초자료의 결정이 우선되어야 한다. 결정된 유역 및 하도에 대한 자료와 과거 수문자료를 분석하여 저류함수모형의 매개변수를 산정하고 이들 상수값을 유출예측모형의 입력 자료로 사용한다. 최근에는 토지이용도로부터 GIS 및 RS 기법을 이용해 쉽게 관련 매개변수의 추출이 가능하며, 강우손실의 비선형 특성을 반영할 수 있는 SCS Curve-number법을 유역 유출에 적용하고 있다. 유출계산을 위하여 한강유역을 67개의 소유역과 64개의 하도로 분할하여 적용하였다(안종서, 2011).

## 4. 임남댐 영향 분석

### 4.1 모형 적용

남북공유하천 중에서 북한강 지역을 대상으로 하류유역을 점하고 있는 남한지역에서의 북한의 임남댐에 의한 영향을 분석하는 과정은 위와 같이 매우 복잡한 절차를 거치게 된다. 우선 북한 측에 위치한 댐들이 수량 및 수질 측면에서 남한 측에 미치는 문제점 및 영향을 분석하기 위해서는 유출 및 수질모형 등 여러 수학적 모형을 적용하게 된다. 또한 수리권 추정은 수요와 공급에 기초한 물수지 분석이 필요하며, 수리권 추정과 관련된 물 배분방

식이 정해져야 한다. 이를 위해 앞장에서 제시한 모형들을 분야별 기본모형으로 하여 관련 정보들을 획득하였다(안중서, 2011). 이와 관련된 해석은 Fig. 5의 유역도를 기반으로 구성하여 모의하였다.

모형구성에 필요한 입력자료 중 유출량은 1966~2005년까지의 강우자료를 반순별로 정리하여 사용하였다. 자연유출량의 장래 예측치는 과거의 유출이 미래에도 재현된다고 가정하여 대상년도(2020년) 용수수요량을 기준으로 물수지 분석을 실시하여 그 중 가장 하천수 부족이 크게 발생하는 연도를 최대갈수년으로 선정하였다. 댐의 저수위, 저수량 현황은 1967~2006년까지의 매월 말일의 저수위, 저수량 실적을 이용하였으며, 장래 용수수요 예측량(2020년 고수요기준), 광역 물 이동망은 「수자원장기종합계획(2006~2020)(건설교통부/한국수자원공사, 2006)」

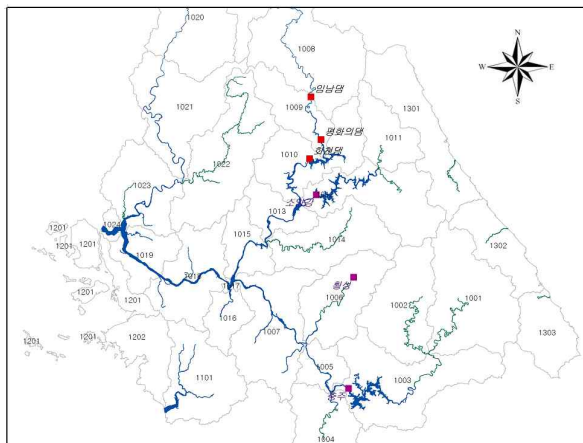


Fig. 5. View of the Han River Basin

의 자료를 동일하게 적용하였다. 댐이 위치한 중권역은 중권역내 단위유역을 이용하여 댐 상·하류의 자연유량, 생활·농업·공업용수의 비율을 산정하여 댐 상·하류로 분리하여 적용하였다. 「수자원장기종합계획(2006~2020)」, 부록 내의 연간 광역 물이동량 자료를 반순 5일단위로 등배분하여 사용하였다. 물수지분석을 위한 적용기준은 Table 4와 같고 시스템 구성도는 Fig. 6과 같다.

#### 4.2 영향 분석

임남댐의 건설에 따른 영향분석을 위해 앞 절에서 제시한 모형들을 이용하여 얻어진 결과들을 분야별로 제시하

Table 4. Application Method and Estimation Standard for KModSim

항 목	KModSim 적용기준
시나리오	- 고수요(2020년): 장래 사회·경제 전망의 불확실성 고려
단위/기간	- 5일(반순) - 1966년 - 2005년
장기유출	- PRMS(1966년 -2005년)
수 요 량	- 생·농·공의 장래예측치를 적용 후 반순별 수요비율 이용
회귀수량	- 농업용수는 65%를 적용 - 하수처리장 회수를 적용 - 유지유량은 수요량의 85% 적용
저수지운영	- 모든 댐 동일 저수율 유지 운영(댐연계운영) - 초기저수위 10월 1일 평균저수위(충주, 소양강, 화천, 횡성)
광역물이동	- '04년 수립된 수도정비기본계획

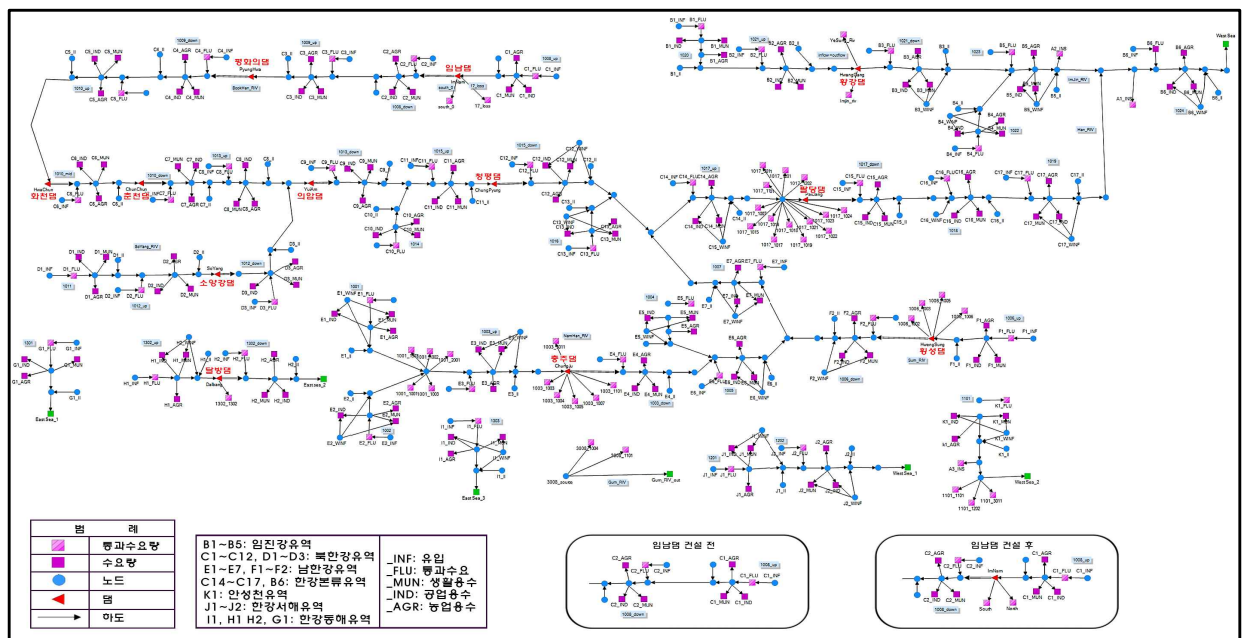


Fig. 6. Water Assessment System in the Han River Basin



**Table 5. Variation of Stream Flow Deficit according to the Water Usage Safety Standard (Unit: Million m<sup>3</sup>/year)**

년도	임남댐도수량	하천수 부족량			비고
		건설전	건설후	증△감	
1978	784	1,149	1,528	△379	40년
1968	1,726	809	1,122	△313	20년
2005	1,722	602	603	△1	10년
2002	1,722	504	505	△1	5년

면 다음과 같다.

우선 이수측면의 영향은 단순히 임남댐 하류권역에만 영향을 미친다고 판단하기는 어렵다. 이는 수계내 물의 흐름은 용수공급 체계에 따라 전 권역이 연계되어 있어 상호간의 증축여부를 판단하여야 한다. 임남댐 건설에 따른 유입유량의 타유역 도수로 인하여 발생하는 남한측의 하천수 공급 부족량 변화를 분석하였다. 용수공급평가를 위한 기준에는 공급량을 충족시키는 수준을 따지는 신뢰도방법과 하천의 수문량을 기준으로 하는 기준갈수년 방법이 있다. 본 연구에서는 과거 1967년부터 2005년까지 39개년을 대상으로 최대갈수년을 용수공급 평가를 위한 기준갈수년으로 평가하였다. 수요기준은 2020년을 장래공급목표년으로 하여 하천수 부족량을 산정하였다. 산정 결과, Table 5에서 보여주듯이 40년갈수빈도 대해 임남댐 건설전에는 1,149백만 m<sup>3</sup>/년, 임남댐 건설 후는 1,528백만 m<sup>3</sup>/년의 부족이 발생하였다. 따라서 용수공급측면에서의 임남댐에 의한 최대 용수공급부족량은 379백만 m<sup>3</sup>/년으로 추정되었다. 그러나 이는 한강유역전체를 대상으로 검토되어 실질적인 북한강유역만을 대상으로 할 경우 이보다 작을 수 있으나 국가수자원계획의 기본골격과 수도권을 중심으로 한 한강권의 용수공급 체계를 고려하는 것이 타당하다.

임남댐 건설로 인한 북한강수계 내 발전량 변화는 각 수력발전댐별 실적발전량을 임남댐 건설 전·후로 나누어 분석하였다. 임남댐 건설전·후 발전량 실적을 검토한 결과 북한강 수계내 연평균 실적발전량은 임남댐 건설 후 대부분의 댐에서 감소하였다. 따라서 임남댐 건설 전·후 16.2억 m<sup>3</sup>/년의 유량이 유역변경될 경우 북한강수계의 수력발전댐의 발전량은 Table 6과 같이 234 GWh/년 (19%) 정도 감소하는 것으로 나타났다.

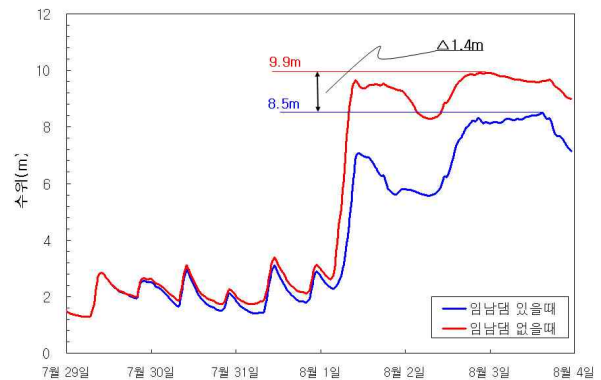
북한강 수계의 수질측정망은 총 52개소로서 한강유역 환경청과 원주지방환경청 관할 측정망 등으로 이루어져 있다. 본 연구에서 검토한 대상 지점은 총 8개 지점(화천댐상류, 화천댐, 춘천댐, 의암댐앞, 춘성교, 청평댐, 대성리, 삼봉리)의 자료를 이용하여 구간별 목표수질 설정, 오염부하량을 할당하고 목표수질 달성여부를 분석하였다.

**Table 6. Variation of Amount of Power FGeneration (Unit : GWh/Year)**

구분	화천댐	춘천댐	의암댐	청평댐	팔당댐	계
건설전	267	188	217	319	211	1,202
건설후	151	139	187	289	202	968
증감	△117	△49	△31	△30	△10	△234

**Table 7. Result of Water Quality Modelling before and after Imnam Dam Construction**

구분	비교지점	2005년	댐 건설전	댐 건설후	증△감	
		검증자료	(18.2억m <sup>3</sup> /년)	(2.0억m <sup>3</sup> /년)		
BOD	화천댐3	0.819	0.797	0.902	0.105	13%
	삼봉리	0.817	0.791	0.856	0.065	8%



**Fig. 7. Effect of Water Level Reduction by Imnam Dam**

분석결과, 임남댐 건설 후가 건설 전에 비하여 Table 7과 같이 BOD기준으로 평균 10% 정도 높아지는 것으로 나타났다(안중서, 2011).

북한강유역의 치수영향 분석은 임남댐의 홍수조절효과를 중심으로 실시하였다. 임남댐이 정상적으로 운영될 경우, 인위적인 홍수조절운행을 하지 않더라도 댐 자체의 제원에 따라 홍수량 감소효과가 있을 것으로 예상되어 한강 하류 한강대교(인도교)의 수위는 Fig. 7과 같이 1.4m 낮아지는 것으로 분석되었다. 이때의 임남댐 홍수 저감효과는 27.4%로 나타났다.

## 5. 결론

본 연구에서는 2003년 완공된 북한의 임남댐에 의한 영향을 종합적으로 판단하고자 주요 분야에 대한 분석을 실시하였다. 이에 따라 수자원 감소측면에서의 용수감소량, 흐르는 물이 수질에 미치는 영향, 긍정적인 측면에서 치수 효과 등에 대한 평가가 이루어 졌다. 그 결과 남한측 북

한강으로 유입되는 수량은 임남댐 건설 후는 임남댐 건설 전에 비하여 약 12.7~16.2억 m<sup>3</sup>/년 감소되었다. 이로 인해, 한강유역의 용수공급은 1978년을 이수안전도 평가를 위한 기준갈수년으로 할 경우 379 m<sup>3</sup>/년의 공급부족이 발생하는 것으로 나타났다. 아울러 한강 수계의 발전용댐도 유입량 감소로 인하여 연간발전량이 234 GWh/년 감소하게 되었고, 수질은 북한강 삼봉리 지점 기준 BOD 약 0.065 ppm 증가하는 것으로 분석되었다. 결과적으로 남북공유하천에서 북한의 절대영토주권주의에 입각한 불공평한 수자원 이용은 하류국가인 남한에 직·간접적으로 상당한 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 다만, 임남댐 건설로 인한 치수 측면에서의 홍수기시 하류영양은 다소 완화될 수 있다. 따라서 남한은 이와 같은 자료에 근거하여 공평한 물이용 실현을 위해 수리권 등 중요 사항에 대한 정보를 검증하고 공유하천 협력체계 구축에 조속히 나서야 할 것이다.

### 참고문헌

건설교통부, 한국수자원공사 (2006). 수자원장기종합계획 (2006-2020)

국립환경연구원 (2005). QUAL-NIER 모델 사용자 지침서

김남원, 이정은 (2009). 화천댐 상류유역의 유출거동 특성. **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제42권, 제12호, pp. 1069-1077.

김덕주 (2009). “국제공유하천의 분쟁 및 해결 사례”. 국제정세 변화와 이명박 정부의 외교 과제, pp. 351~404.

김영봉 (2002). 남북협력을 통한 임진강유역의 평화적 활용방안에 관한 연구, 국토연구원 연구보고서.

김영봉, 이문원, 조진철 (2005). 북한강 유역의 남북한 평화적 이용 방안, 국토연구원 연구보고서.

김익재, 이진희, 추장민, 명수정, 김호정 (2009). 남·북한 공유 하천의 관리 현황과 물안보 확보 방향, 한국환경정책·평가연구원.

박준대, 신동석, 김문숙, 공동수, 류덕희, 정동일, 나은혜 (2008). “수질오염총량관리를 위한 하천수질모델 (QUAL-NIER) 개발”, **한국물환경학회지**, 한국물환경학회, 제24권, 제6호, 6, pp. 784-792.

백경오 (2009). “임진강 북측 댐들의 영향과 대처방안”, 경기개발연구원 Policy Brief, No. 20, pp. 1-10.

선우중호 (1986). “금강산댐 건설 영향에 대한 기술적 검토”, **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제19권 제4호, pp. 294-302.

손기웅 (2006). 남북한 공유하천 교류협력 방안, 통일연구원 2006 연차보고서, pp. 42-49.

안중서 (2011). 남북공유하천 하류유역 수리권 추정 연구,

충남대학교 박사학위 청구 논문.

이광만, 강부식, 홍일표 (2008). “남북한 공유하천의 갈등 해소와 공동이용을 위한 협력체계”, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제28권, 제5호, pp. 505~514.

이명환 (1987). **북한의 수자원 개발이 한국 안보에 미치는 영향-금강산댐 건설 중심으로**, 석사학위논문, 동국대학교.

이재웅, 임동선, 이종태 (2004). “이수측면에서 평화의댐 활용방안 연구”, **한국수자원학회논문집**, 한국수자원학회, 제37권, 제8호, pp. 653-662.

전병호, 신현석, 이재철, 윤용남 (1993). “화천댐의 홍수량 및 수위에 미치는 평화댐의 영향 분석”, **한국수문학회지**, 한국수문학회, 제26권, 제1호, pp. 93-101.

정태성, 강신욱, 고익환, 황만하 (2007). “금강유역에서의 KModSim을 이용한 의사결정지원시스템 개발 및 적용성 검토”, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제3B호, pp. 319-329.

정희성 (2000). “남북 환경실태와 남북환경협력의 과제와 방향”, **북한과학기술연구**, 제5집, pp. 61-82.

최동진 (2005). “공유 수자원의 합리적 관리제도 연구”. 한국수자원학회 2005년 분과위원회 연구과업 보고회.

최동진 (2009). “공유하천 관리, 협력사업 연계·통합하여 추진 필요”, 워터저널, 11월.

황진희 (2009). “임진강 사태로 본 공유하천 분쟁 해결방안”, 북한해양수산리뷰, 제6호.

Bulloch, J., and Darwish, A. (1993). *Water Wars: Coming Conflicts in the Middle East*, London : Victor Gollancz

Cooley, J.K. (1984). *The War over Water, Foreign Policy*, No. 54, pp. 3-26.

Cooper, J. (1983). *Reconstructing history from ancient inscriptions: the Lagash - Umma border conflict*. Undena, Malibu, CA, USA.

Leavesley, G.H., Lichty, R.W., Troutman, B.M., and Saindon, L.G. (1996). *Precipitation-runoff modeling system-User's Manual: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 83-4238*. pp. 208.

Singh, V.P. (1995). *Watershed modeling*. Singh, V.P. ed., *Computer Models of Watershed Hydrology* (1st Edition), pp. 1-22, Highlands Ranch, Colorado, Water Resources Publications.

논문번호: 11-021	접수: 2011.02.21
수정일자: 2011.04.07	심사완료: 2011.04.07