

복합 모델링 기법을 이용한 홍수시 저수지 최적 운영 (사례 연구 : 충주 다목적 저수지)

Optimal Reservoir Operation for Flood Control Using a Hybrid Approach (Case Study: Chungju Multipurpose Reservoir in Korea)

이 한 구* / 이 상 호**
Lee, Han Goo / Lee, Sang Ho

Abstract

The main objectives of reservoir optimal operation can be described as follows: maximization of the benefits through optimal allocation of the limited water resources for various purposes; minimization of the costs by the flood damage in potential damaging regions and risk of dam failure, etc. through safe drainage of a bulky volume of excessive water by a proper reservoir operation. Reviewing the past research works related to reservoir operation, we can find that the study on the matter of the former has been extensively carried out in last decades rather than the matter of the latter. This study is focused on developing a methodology of optimal reservoir operation for flood control, and a case study is performed on the Chungju multipurpose reservoir in Korea. The final goal of the study is to establish a reservoir optimal operation system which can search optimal policy to compromise two conflicting objectives: downstream flood damage and dam safety-upstream flood damage. In order to reach the final goal of the study, the following items were studied: (1)validation of hydrological data using HYMOS; (2)establishment of a downstream flood routing model coupling a rainfall-runoff model and SOBEK system for 1-D hydrodynamic flood routing; (3)replication of a flood damage estimation model by a neural network; (4)development of an integrated reservoir optimization module for an optimal operation policy.

keywords: flood control, multiobjective optimization of reservoir operation, global optimization, artificial neural network, hybrid modelling

요 지

일반적으로 저수지 최적운영의 목적은 한정된 수자원을 여러 목적으로 최적 분배하여 얻는 이익의 최대화와, 홍수 발생으로 인한 과잉 수량을 안전하게 배제시킴으로써 홍수 취약지역의 피해를 최소화시키는 것으로 구분할 수 있다. 저수지 운영에 대한 연구사를 고찰해 볼 때, 지난 수십 년간 첫 번째 영역에 연구가 집중되었음을 알 수 있다. 본 연구의 목적은, 충주 저수지의 홍수조절을 위한 저수지 최적운영의 방법론 개발에 중점을 두고, 하류 홍수피해 최소화와 댐 안전도 및 상류 홍수피해 최소화의 상충되는 목적들이 타협되는 최적 운영정책 수립을 위한 최적화 모형의 개발에 있다. 본 목적 달성을 위해 (1)HYMOS를 이용한 수문자료 검증, (2)강우-유출 모형과 SOBEK 1차원 부정류 홍수추적 모형의 간접결합을 통한 하류 홍수피해 평가 모형의 구성, (3)인공신경망 기법을 이용한 하류 홍수피해 평가 모형의 복제, (4)저수지 최적화모형 개발의 순차적 절차로 연구가 수행되었다.

핵심용어 : 홍수 조절, 저수지 다목적 최적 운영, 전역최적화, 인공신경망, 복합 모델링

* 한국수자원공사 조사기획처 수문조사과장

Sub-Sec. Chief, Investigation and Planning Dept., Korea Water Resources Corp., Taejeon 306-711, Korea

** 부경대학교 토목공학과 조교수

Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Pukyong National Univ., Pusan 608-737, Korea

1. 서 론

종합적인 수자원 관리를 위해서는 수계 내 다목적 댐 건설이 주로 고려되며, 이러한 다목적 댐들은 용수 공급, 발전, 홍수조절 등 여러 목적을 위해서 건설된다. 저수지운영의 궁극적 목표는 댐 건설 목적에 따라 각종 제약조건들을 최대 충족시키면서 수자원 체제로부터의 편익을 증대시킬 수 있도록 운영전략을 수립하는 것이라 할 수 있다. 그러나, 상호경쟁과 분쟁을 유발하는 목적들 간의 이해 상반성으로 인하여 저수지 운영 정책 수립에 복잡한 문제들이 내재되어 있다. 일반적으로 저수지 최적운영은 수자원의 최적분배에 관한 이수 운영과 홍수피해 최소화에 관한 홍수조절 영역으로 구분된다.

저수지운영에 관한 연구는 지난 수십 년간 주로 전자의 영역에 대해서 광범위하게 이루어졌음을 과거 연구사의 고찰로부터 알 수 있다. 이러한 연구들은 대개 최적 운영정책 수립을 위한 최적화모형 개발과 목적간의 상호 이해분석(trade-off)을 포함하고 있다(Hairs와 Hall, 1974). 홍수기 저수지운영에 관한 연구사를 고찰해 볼 때, 모의기법과 최적화기법에 의한 방법으로 대별되며, 우리나라에서는 충주댐이 완공됨에 따라 한강수계 댐군의 연계운영 방안을 개발하기 위한 사전단계로 충주댐 단일 운영방안들을 비교검토하기 위하여 Spillway Rule Curve, Rigid ROM 및 Linear Decision Rule(LDR)에 의한 방안을 대상으로 모의기법을 적용한 바 있다(이길성과 정동국, 1985). 오영민과 이길성(1986)은 소양강댐 및 충주댐의 실시간 홍수조절 모형을 개발하기 위하여 Min-max DP(동적계획법)를 사용하여, 기 개발된 Technical ROM, Rigid ROM 및 LDR에 의한 결과와 비교분석하였다. Lee와 Lee(1994)는 한강수계 저수지군의 홍수시 예측 및 제어 목적으로, 강우-유출 모형과 하도추적 모형으로 구성되는 홍수예측 모형과 LQG(linear quadratic Gaussian)에 의한 홍수제어 모형을 일체로 구성하였다. 외국의 연구사례로, 싱가포르 Tanjong Katong 유역에서 실시간 홍수배제 최적제어 시스템 개발을 위하여 단위도법에 의한 유출해석, 조위예측 모형, 1차원 부정류 흐름추적 모형, 동적계획법과 홍수예경보를 위한 전문가시스템으로 구성되는 단위목적별 개체들을 객체지향(object oriented) 해석으로 종합화한 시스템을 개발한 바 있다(Tan, 1995). 현재까지는, 하도와 수리구조물이 복잡하게 구성되어 있는 수계내에서 홍수시

저수지 운영정책 수립을 위한 최적화기법의 적용은 하도추적에 따른 홍수피해 평가모형의 개발과 최적화모형과의 연계구성에 따른 어려운 점 등으로 인하여 연구 사례가 최소한 상태이다. 본 연구의 범위는 홍수조절을 위한 저수지 최적운영에 국한되었고, 사례연구로 충주 저수지와 여주 수위관측소까지의 하류유역이 대상으로 선정되었다. 연구목적은, 현재 홍수기 저수지운영 시, 댐방류로 인한 하류 홍수추적이 간략히 수행되고 있고, 모의(simulation) 형태로 방류정책을 수립하고 있는 현실을 감안하여, 홍수조절을 목적으로 저수지 최적운영을 위한 방법론을 개발하는 것이다. 나아가, 하류 홍수피해 최소화와 댐안전 및 상류 홍수피해 최소화의 상충되는 두 목적들이 타협되는 저수지 최적 운영정책 수립을 위한 최적화모형 개발에 있다. 이러한 목적달성을 위하여 수문자료 검증과 보정, 댐 하류유역의 강우-유출 해석, 1차원 부정류 해석에 의한 하류 홍수추적, 인공신경망(artificial neural network) 기법에 의한 홍수추적 모형의 복제, 전역최적화(global optimization) 기법에 의한 저수지 최적화모형 개발이 순차적으로 수행되었다.

연구범위에서 저수지 유입량 예측과 강우량 예측모형은 제외되었고, 저수지 유입량은 고유 모형에 의해 이미 알고 있거나 안다고 가정하므로써 결정론적으로 처리되었다. 증발산에 의한 효과는 홍수기에 큰 영향을 미치지 않는 관계로 무시되었다.

2. 수문 자료의 검증과 보정

본 연구수행을 위해 충주댐과 충주 조정지댐의 유입량, 방류량, 저수위자료와 수위(달천, 문막, 간현, 횡성, 청미, 목계, 여주 수위관측소) 및 18개 관측소의 강우량자료가 시간단위로 이용되었다. 충주댐 방류량과 여주 수위관측소의 수위-유량 관계곡선식은 1차원 부정류 모형망(network)의 상류 및 하류 경계조건으로 각각 이용되었다. 분석대상으로, 3개의 홍수사상들(1988/07/19~1988/07/23, 1989/07/25~1989/07/29, 1990/09/09~1990/09/17)이 선택되었다.

모든 모형을 수행하기에 앞서 모형이 요구하는 입력 자료에 대한 검증 및 보정은 기본적인이다. 보통, 시자료는 일 단위 이상의 자료보다 결측치 및 오류치의 발생률이 높다 할 수 있다. 3개 홍수사상 기간에 해당되는 모든 수문자료를 대상으로 자료의 결측 및 오차를 검증 및 보정하였고, 이를 위하여, 네덜란드 델프트 수리연구소(Delft Hydraulics)에서 개발되어 현재 한국수

자원공사와 공동으로 기능향상 과업수행 중인 HYMOS 수문자료 관리 및 분석 시스템을 이용하였다.

강우자료의 검증 및 보정을 위해서, 상관행렬(correlation matrix) 분석, 이중누가(double mass) 우량 분석, 자료동질성(series homogeneity) 분석 등이 이용되었다. 분석절차로는 (1) 상관행렬 분석을 통한 이웃관측소 그룹 결정, (2) 그룹별 이중누가우량 분석, (3) 그룹별 자료동질성 분석, (4) 보정의 순으로 수행되었다. 상관행렬은 관측소간 선형 상관계수들이 일반적인 천이확률 행렬(transition matrix)의 형태로 표시되어, 이로부터 관측소간 상관성을 용이하게 판별할 수 있다. 이를 위하여 지도상 거리를 기준으로 18개의 강우관측소를 크게 2개 그룹으로 분리하였다.

- (1) 그룹 I : 충주댐, 용인, 양평, 이천, 여주, 부론, 피산, 청평, 백운, 생극
- (2) 그룹 II : 문막, 간현, 횡성, 청일, 안흥, 방림, 봉평, 생극, 부론

생극, 부론 관측소의 경우, 다른 관측소들과의 상관성이 큰 범위 내에서 변화하는 관계로, 모든 관측소들과 비교되었다. 이 결과로부터 도출된 상관성과 지도상 거리를 참조하여 이중누가우량 분석과 자료동질성 분석을 위한 5개 소그룹을 다음과 같이 분리하였다:

- (1) 소그룹 1 : 피산, 충주댐, 청평, 백운
- (2) 소그룹 2 : 청일, 봉평, 방림, 횡성, 안흥
- (3) 소그룹 3 : 횡성, 간현, 안흥, 문막
- (4) 소그룹 4 : 부론, 생극
- (5) 소그룹 5 : 용인, 이천, 양평, 여주

이중누가우량 분석은 관측소의 위치변동 등으로 인한 자료의 이질성을 발견하기 위해서 사용되며, 이로부터 횡성 우량관측소의 '88, '90년 홍수사상 기간에 해당되는 자료에 오류가 있음이 발견되었다. 오류치는 간현, 안흥, 문막 관측소의 산술 평균치로 보정되었다. 자료의 동질성 분석을 위해 HYMOS는 11가지 통계분석 도구들을 제공하며, 이 중 Student T test가 이용되었다. Student T-test 결과로부터 우량자료에는 특별한 오류가 없음이 확인되었다(Lee, 1997). 수위자료 검증을 위해서는, 침투유량과 지체시간에 대해 종속적 관계 하에 있는 주변 관측소들과의 그래프 도시가 유용한 방법일 수 있다. 그러나, 수집된 수위자료가 미비하여 시계열 그래프를 독립적으로 도시하였다. 결과는 충주댐과 문막 관측소에 오류 및 결측치가 발견되었고, 선형보간과 블록형보간 방법으로 보정되었다.

3. 댐 하류 홍수피해 평가를 위한 유출 모형

댐 하류 상황은 전적으로 댐 방류와 하류에 위치한 지류 유입량으로부터 결정된다. 따라서, 강우-유출 모형과 홍수추적 모형은 댐 하류의 상황분석을 위한 필수적인 도구들이다. 여주 수위관측소의 홍수예측을 위하여, (1) 강우-유출 모형을 이용한 충주댐과 여주 관측소 사이에 위치한 소유역들의 유출량 산정, (2) 1차원 유체동력학적(hydrodynamic) 홍수추적 모형 구성 및 수행, (3) 모형보정 과정의 순으로 진행되었다.

3.1 강우-유출 해석

강우-유출 모형에 의해 모의된 유출량은 하도 홍수추적 모형의 측면 유입량 자료로 입력된다. 모형을 선택하기 위해서는 이들에 대한 평가작업이 수행되어야 하나, 이미 연구(한국수자원공사, 1995)를 통해 모형의 우수성이 입증된 Tabios 등(1986)의 NWSRFS 수정 모형을 선택하였다. Tabios 등의 모형은 미국 기상국의 NWSRFS를 수정한 것으로, Sacramento 토양함수 상태(SAC-SMA) 분석 모형과 흐름추적 모형으로 구성되었다. SAC-SMA 모형에는 24개의 매개변수가 존재하며, Rosenbrock 최적화기법을 이용하는 자동보정 기능이 포함되어 있다(Tabios 등, 1986). 흐름추적 방법은 운동파(kinematic wave)로서 유역의 사면과 하도에서 흐름을 추적할 수 있고, 단위도 Muskingum 방법을 조합하여 추적할 수도 있다. 본 연구에서는 운동파 추적법을 사용하였다.

강우-유출 해석을 위해 총 18개의 소유역으로 분할되었고(그림 1), 이들의 지형학적 인자 및 Thiessen 계수들은 기존 연구성과로부터 입수되었다(한국수자원공사, 1995). Tabios 등(1986)의 모형을 구성하고 있는 운동파 추적기법은 de Saint Venant 운동량방정식의 중력항과 마찰항만을 고려하는 관계로, 홍수파는 감쇄없이 왜곡되어진다. 이러한 점에서, 운동파 추적기법은 도시유출 해석이나 사면유출 해석적용에 한정되며(U.S. Army Corps of Engineer, 1985), 본 연구에서도 이의 이용을 소유역 유출량 산정에 국한하였다. 모형보정은 비교적 자료가 정확한 침기 수위관측소에서 1989년 홍수사상 자료를 이용하여 수행되었고, 검증은 1988, 1990년 홍수사상 자료를 이용하였다. 그림 2는 모형보정 결과를, 그림 3과 4는 검증결과를 보여주며, 그림 3은 만족스러운 검증결과를 보여주나 그림 4는 저유량 부분에서 상당한 검증오류를 보인다. 그러나,

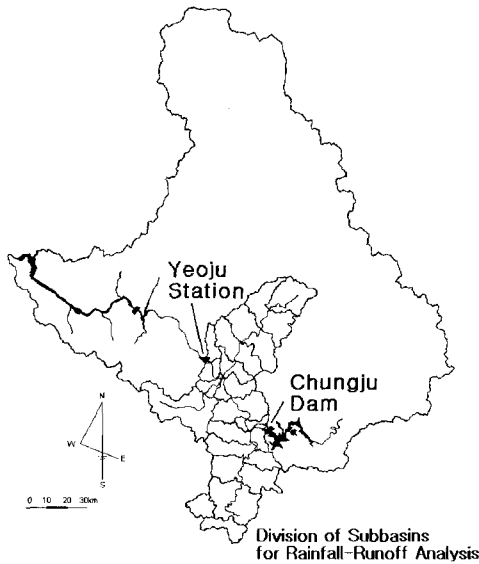


그림 1. 유역분할도

검증결과 모두 고유량 부분에서 높은 신뢰도로 검증되었다고 판단되어 청미천 유역에서 검증된 매개변수들을 전체 유역의 대표 매개변수로 결정하였다.

3.2 일차원 부정류 모형에 의한 하류 홍수추적

본 연구에서는 SOBEK 모형을 이용하여, 충주담에서 여주 관측소까지 홍수추적 체제를 구성하였다. SOBEK 모형은 1차원 부정류 수치모형으로서 네덜란드 델프트 수리 연구소에서 개발되었으며, 흐름추적, 수질모의, 유사·이송 모의, 하천·하구 형상모의, 해수 침입 모의 기능들을 제공한다. 모형의 특징으로는 dynamic wave 식에 의한 흐름추적과 수치해석을 위해 Preissmann 기법을 사용하며, 구조물 제어를 위해서 4가지 형태의 제어기(interval, proportional integral differential, hydraulic, time controller)를 제공한다(Delft Hydraulics, 1994). Tabios 등(1986)의 모형으로부터 계산된 18개의 소유역으로부터의 유출량은 충주담 방류량과 함께 SOBEK 모형에 입력되어 간접적으로 강우-유출 모형과 홍수추적 모형이 연계되었다.

3.2.1 대상 유역의 홍수추적 모형 구성

그림 5는 SOBEK 모형의 레이어별 정의기능에 의해 구성된 수치형태 유역의 홍수추적망을 보여주며, 주요 요소로서 절결 8개, 가지(branch) 7개, 횡단면 22

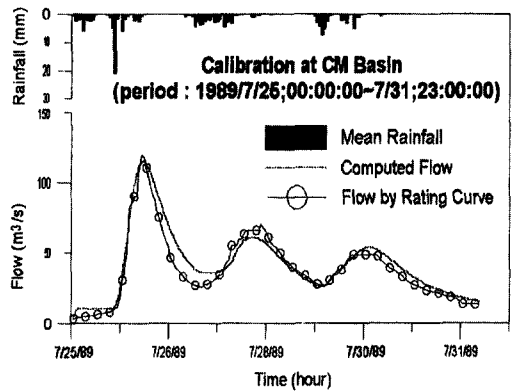


그림 2. 모형보정(청미천, 1989)

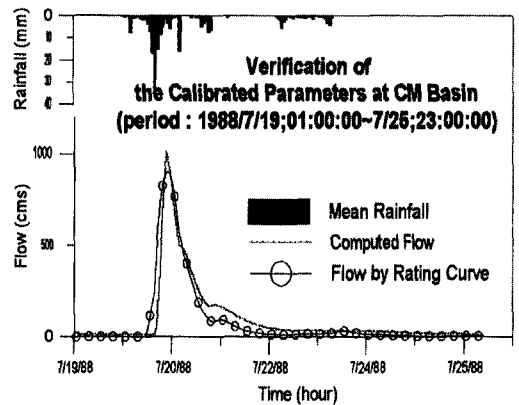


그림 3. 모형검증(청미천, 1988)

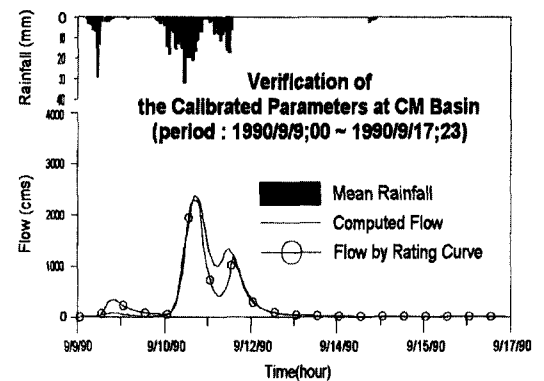


그림 4. 모형검증(청미천, 1990)

개, 경계조건 5개, 점 측면 유입 13개로 구성되었다. 충주담 방류량, 달천, 섬강, 청미천의 최 상류 소유역 유출량, 여주 수위관측소의 수위-유량 관계곡선식이 경

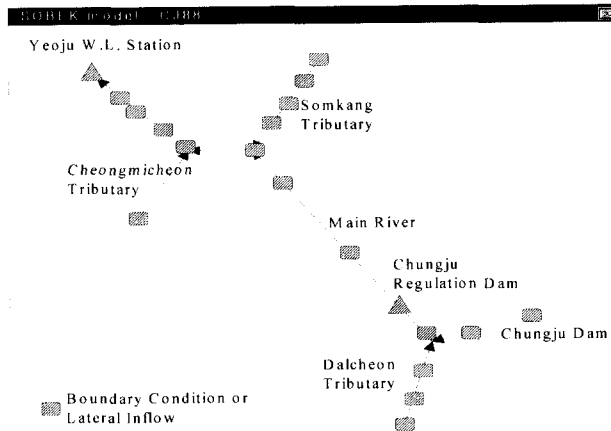


그림 5. 홍수추적 모형 구성

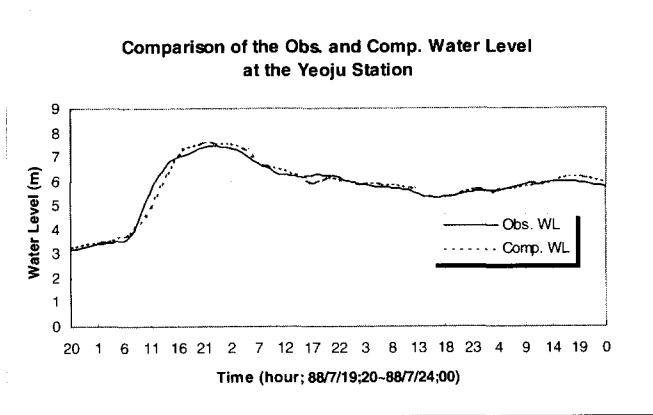


그림 6. SOBEK 모형보정(1988)

계조건으로 설정되었다.

3.2.2 과거 홍수사상 모의

3개의 과거 홍수사상이 여주 수위관측소에서 모의되었고, 모형망에서 내부 경계조건인 충주 조정지댐은 Hydraulic Controller에 의해 수문개방 정도의 운영기록에 따라 제어되었다. 일반적으로, 부정류 흐름해석 모형은, 입력자료가 정확하고 주어진 조건이 이상적인 경우에 조도계수를 조정하면서 보정하게 된다. 그러나, 기존의 연구(이상호와 이길성, 1994)로부터 충주댐-여주 수위관측소 구간에 대한 부정류 모의 시, 보정된 조도계수 0.025를 적용하였다. 반면에, 점 측면 유입량이 강우-유출 모형으로부터 계산되었고 과거 충주 조정지댐의 운영기록이 간략히 산출된 관계로, 대부분의 오류

는 이로부터 파생됨을 인식할 수 있다. 따라서, 모형보정 시, 조도계수의 조정보다는 충주 조정지댐의 운영기록과 점 측면 유입량을 조정하였다. 모형보정 순서는 충주 조정지댐에서 일차 보정되었고, 최종적으로, 여주 관측소에서 보정되었다. 그림 6은 보정결과를, 그림 7과 8은 검증결과를 보여준다.

4. 인공신경망을 이용한 홍수추적 모형 복제

인공신경망은 시스템 상에서, 어느 형태의 입력(input) 및 출력(output) 관계를 모의할 수 있는 비선형 수확모형이다(Hsu 등, 1995). 본 연구에서는 최적방류정책 수립을 위하여 전역최적화 기법을 이용하였다. 이 기법에 의한 최적화모형은 많은 횟수의 목적함수 평가를 요구한다. 이러한 이유로, 계산수행 시간당

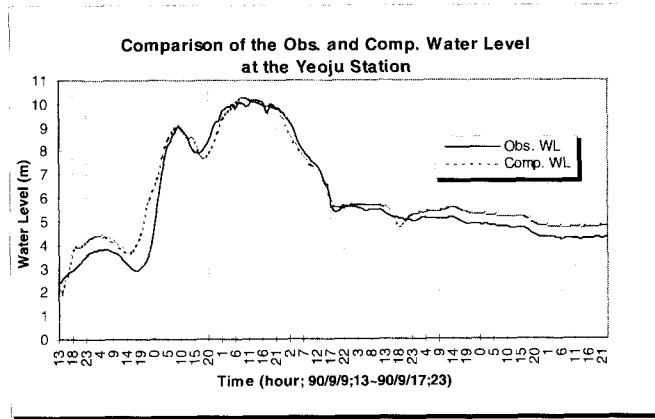


그림 7. SOBEK 모형검증(1990)

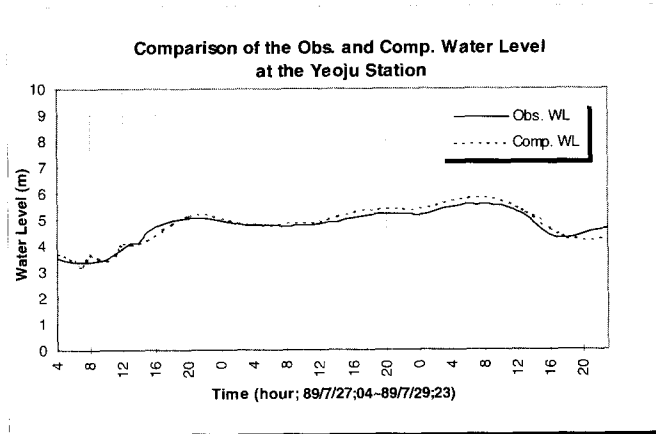


그림 8. SOBEK 모형검증(1989)

측을 위하여, 1차원 부정류 홍수추적 모형을 빠르게 수행되는 적은 용량의 프로그램으로 대체하여야 한다. 본 연구에서는 인공지능망 모형을 이용하여, SOBEK 모형을 복제하였다.

4.1 인공지능망 모형

인공지능망은 정보처리 단위를 나타내는 뉴런으로 구성되며, 3가지 기본요소(synapses, summation function, activation function)로 표현, 정의된다 (Haykin, 1993). Synapses는 뉴런들을 연결하는 역할을 하며, 가중치를 지니고 있다. Summation function은 Synapses의 가중치가 고려된 각 입력신호를 합하여 중간 입력신호를 생성하는 역할을 한다. Activation function은 합해진 입력신호를 출력신호로

변형시키는 역할을 한다. 모형의 특징은 Activation function에 의해 좌우되며, 대개, S곡선 형태의 Sigmoid 함수가 적용된다. 일반적으로 인공지능망 회로는 Multi-layer feed forward network의 형태로 입력층(input layer), 중간층(hidden layer), 출력층(output layer)으로 구성된다. 신호는 입력층에서 중간층을 거쳐 출력층으로 전파된다. 인공지능망 모형이 입력-출력 관계를 인지하기 위해서는 학습과정을 거쳐야 하며, Error back propagation 학습원리가 주로 쓰인다.

본 연구에서는 홍수추적 모형복제를 위해, 네덜란드 국제 수리·환경공학 연구소(IHE: International Institute for Infrastructural, Hydraulic and Environmental Engineering)에서 개발된 NNN

Multi-layer feed forward network 모형을 사용하였고, 본 모형은 저수지 최적화에 응용된 사례가 있다 (Solomatine과 Avila Torres, 1996). 본 모형의 학습 원리로는 Error back propagation과 Radial basis function network 기법이 사용되었고, 모든 뉴런들은 Sigmoid activation function으로 처리된다.

4.2 홍수추적 모형 복제

인공신경망 모형을 이용한 SOBEK 모형복제는 (1) 대상 유역에서의 홍수전파 특성분석, (2)인공신경망 모형의 학습과 검증을 위한 입력-출력자료 선정, (3)반복적인 학습과 검증과정을 통한 인공신경망 모형 구조결정의 순으로 수행된다.

4.2.1 홍수전파 특성에 대한 사전 분석

그림 9는 여주 관측소 수위가 충주댐 방류량과 지류 유입량에 대하여 비선형 함수관계를 맺고 있는 점을 보여준다. 이로부터 인공신경망 모형의 입력 출력자료

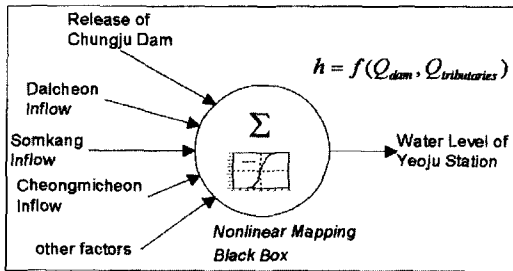


그림 9. 인공신경망 모형 입력-출력 관계

를 구성하기 위해서는 홍수전파 해석이 필수적임을 인식할 수 있다. 최종적으로 반복적인 학습과정을 통하여 모형의 구조가 결정된다.

댐 하류 상황은 댐 방류 지속시간과 방류량의 변동에 따른 흐름특성의 비선형적 변화에 의하여 매우 복잡하게 전개됨을 예상할 수 있다. 이에 대한 사전분석을 위하여, 순간 충격 반응(impulse-response) 분석을 수행하였고, 이로부터, 유하시간(travel time), 첨두홍수와 도달시간, 기저시간이 획득되었다. 그림 10은 순간 충격 방류량의 변동에 따른 여주 관측소에서의 수문곡선을 보여준다. 이론적으로, 순간 충격 방류량이 커짐에 따라 운동량의 효과로 첨두홍수와 도달시간은 감소하게 되며, 이는 그러한 사실을 분명히 보여준다. 이로부터, 첨두홍수와 도달시간과 기저시간이 산출되었다. 그림 11은 순간 충격 방류량 5,000 m³/s의 지속시간 변화에 따른 여주 관측소에서의 수문곡선을 보여준다. 이로부터, 유하시간이 획득되어 지며, 이 경우에는 유하시간이 약 5시간임을 알 수 있다. 순간 충격-반응 분석결과는 표 1에 정리되었다.

4.2.2 모형 입력-출력자료 선정

인공신경망 모형이 학습되어 높은 신뢰도로 일반화되기 위해서는 입·출력자료의 선정에 많은 주의를 기울여야 한다. 모형의 일반화란 모든 경우의 입·출력 관계성을 주어진 허용한계 내에서 높은 정확도로 표현함을 의미하며, 따라서 모든 경우들을 대표하는 사상들이 포함되어 학습되어야 한다. 그러나, 연구에 쓰인 과거 홍수사상은 모든 사상을 대표하지 못하는 관계로

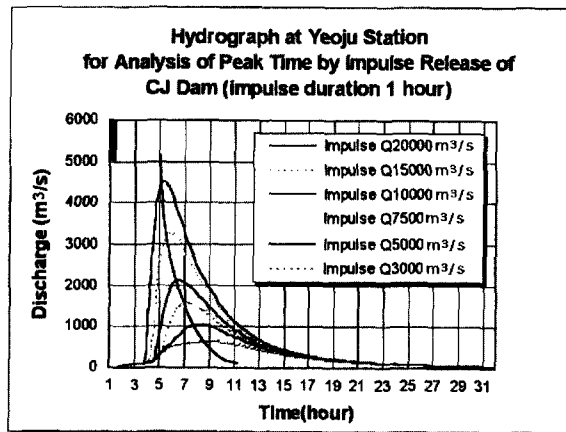


그림 10. 순간 충격-반응 해석

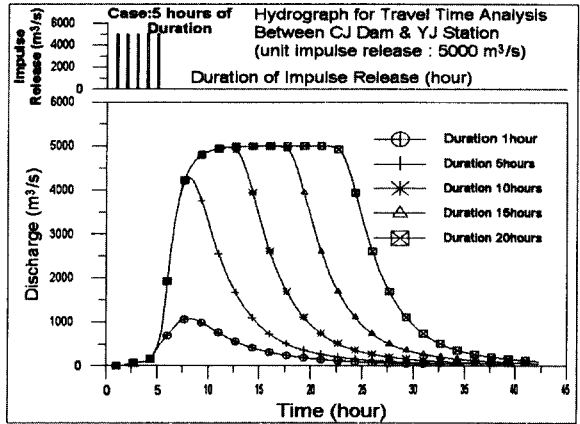


그림 11. 유하시간 분석

표 1. 충격 방류에 의한 홍수전파 특성

충격방류 (m^3/s)	침투홍수 도달시간 (모형 수행에러)	유하시간	기저시간
1,000		8.5	≈ 30
5,000		5.0	≈ 30
15,000		3.8	≈ 30
20,000		3.5	≈ 30

댐 방류량과 댐 하류 18개 강우관측소들의 강우자료를 2개월간 모의발생하였고, 발생한 강우자료를 이용하여 강우-유출 모형으로 지류 유입량을 산정한 후, SOBEK 모형에 입력하여 가상의 홍수사상을 모의하였다. 모의발생에는 과거 수문자료와 함께 ARMA (auto-regressive moving average) 모형이 이용되었다. 인공신경망 모형의 학습에는 과거 및 모의된 홍수사상자료가 이용되었고 학습된 모형의 검증에는 모의된 홍수사상을 이용하였다. 그림 9에서 모형의 입력자료는 5개 항목으로 총주댐 과거 방류량, 3개 지류 유역의 과거 유역평균 강우량과 여주 관측소의 과거 수위로, 출력자료는 여주 관측소의 현재시간 수위로 각각 구성되었다. 모형의 입·출력자료에서 SOBEK 모형에

의한 홍수사상 모의와 다른 점은 지류 유입량 대신에 평균강우량을 사용한 것이며, 이는 복제된 모형이, 간략화된 강우-유출 모형까지를 포함하였다고 할 수 있다. 이렇게 입·출력 자료를 구성한 이유는 연구성과를 홍수기 실시간 저수지운영에 실제 적용 시, 앞으로의 강우량을 예측하여 이로부터 지류 유입량을 강우-유출 모형으로 산정해야 하는 절차 상의 어려움과, 설령, 지류 유입량을 산정하였다 하여도 강우량 예측과정의 불확실도까지 포함하는 관계로 오차의 누적을 고려하였기 때문이다. 보다 정확한 해법을 찾기 위해서는 이에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

4.2.3 모형 구조 결정

여주 관측소의 현 시간수위는 주로, 과거 한 시점에서 시작하는 댐 방류량으로 결정되며, 현 시점부터 과거 한 시점까지를 시간 창(time window; W)이라 정의할 때, 시간 창은 표 1의 기저시간(30시간)보다는 작고, 최소 유하시간(3.5시간)보다는 커야 한다. 그림 12는 인공신경망 모형의 입력과 출력자료의 대응관계(mapping)를 정의하며, 식 (1)의 비선형 함수관계로

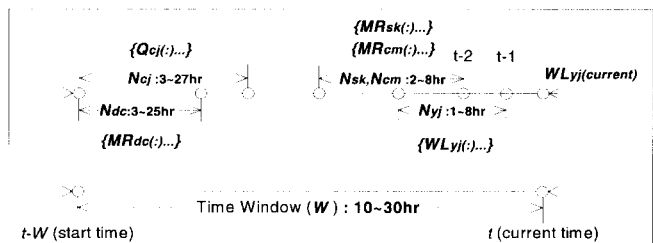


그림 12. 인공신경망 모형 구조

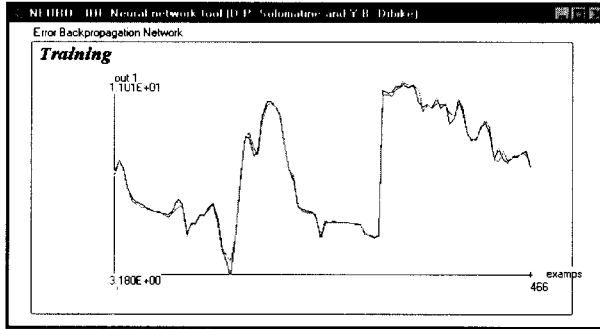


그림 13. 모형학습 결과

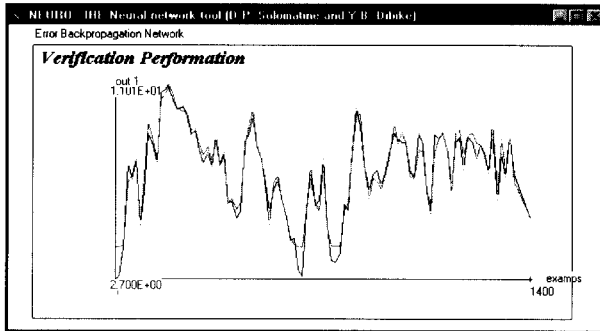


그림 14. 학습된 모형검증

$$WL_{yj}(t) = f_{nonlinear} \left(\begin{array}{l} \{Q_{cj}(t-W), \dots, Q_{cj}(t-N_{cj})\}, \\ \{MR_{dc}(t-W), \dots, MR_{dc}(t-N_{dc})\}, \\ \{MR_{sk}(t-N_{sk}-2), \dots, MR_{sk}(t-2)\}, \\ \{MR_{cm}(t-N_{cm}-2), \dots, MR_{cm}(t-2)\}, \\ \{WL_{yj}(t-N_{yj}), \dots, WL_{yj}(t-1)\} \end{array} \right) + E(t) \quad (1)$$

표현될 수 있다.

여기서, $f_{nonlinear}$, $E(t)$, Q_{cj} , MR_{dc} , MR_{sk} , MR_{cm} ,

WL_{yj} 는 각각, 비선형 대응함수, 미지의 오차, 충주댐 방류량과 달천, 섬강, 청미천 유역의 평균 강우량 및 여주 관측소 수위를 나타낸다. N_{cj} , N_{dc} , N_{sk} , N_{cm} , N_{yj} , N_h 는 모형의 매개변수로서, 각각, 충주댐 과거 방류량, 달천, 섬강, 청미천 과거 유역평균 강우량 및 여주 관측소의 과거 수위자료들에 대한 지속시간과 모형 중간층의 절점(node)수를 의미한다. 모형의 구조는

NNN(W , N_{cj} , N_{dc} , N_{sk} , N_{cm} , N_{yj} , N_h) 의 형태로 표현되며, 매개변수들의 범위는 그림 12에 나타나 있다.

모형의 매개변수들을 보정하기 위해서는 매개변수들

을 다수 조합하여 학습과 검증과정을 반복수행하였다. 모형구조 선택기준으로는 관측값과 계산값의 평균 제곱 오차 평방근(RMSE: root mean square error), 첨두치 오류 및 최대 오류의 통계치가 이용되었고, 최종적으로 NNN(20,16,15,2,2,2,7)로 결정되었다. 그림 13과 14는 각각, NNN(20,16,15,2,2,2,7) 구조를 갖는 모형의 학습결과와 검증결과를 보여준다. 저수위 부분은 약간의 오류가 있으나 고수위 부분은 미소한 검증오류를 보이는 관계로 모형은 만족스럽게 일반화되었음을 알 수 있다.

5. 홍수 조절을 위한 저수지 최적화 모형 개발

지난 수십 년간, 저수지 최적운영에 관한 연구는 주로 한정된 수자원의 최적분배에 집중되어 왔다. 이를

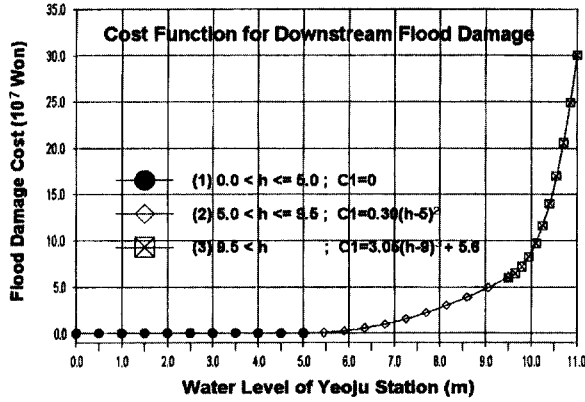


그림 15. 비선형 하류 홍수피해 함수(C1)

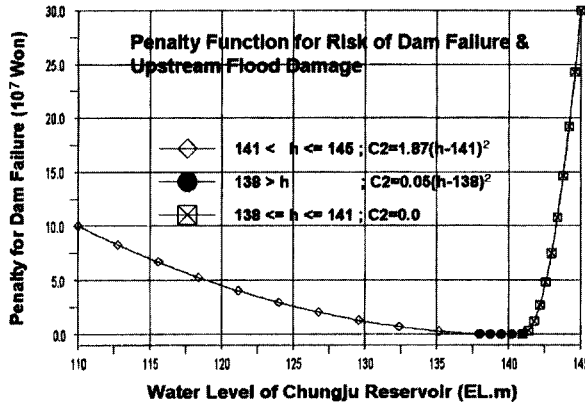


그림 16. 댐위험도의 비선형 벌칙함수(C2)

위한 최적화모형은 동적계획법(dynamic programming)과 선형계획법(linear programming)이 주로 이용되었다. 본 연구에서는 홍수시, 최적 운영정책 수립을 위하여 전역최적화 기법을 이용, 인공신경망 모형에 의해 복제된 1차원 부정류 홍수추적 모형과 함께 홍수조절을 위한 충주 저수지 최적화모형이 개발되었다.

5.1 저수지 최적화 모형 구성

다목적함수는 식 (2)로 표현되었고, $C1_t(h_{YJ,t})$ 는 여주 지점에서 시간 t 의 홍수피해 함수를, $C2_t(h_{dam,t})$ 는 시간 t 의 댐 위험도 및 상류 홍수피해에 따른 벌칙함수를, h_{YJ} 와 h_{dam} 은 여주 관측소 수위와 충주 댐수위를 각각 의미하며, 의사결정 단계수는 12시간으로 고정되었다. 이러한 함수들의 결정은 사회, 경제, 정치적인 면 등을 고려하여야 하나, 그림

15와 16과 같이 피해액을 원화로 하여 간략히 결정하였다. $C2$ 함수의 경우, 홍수기가 끝나고 이수기 용수공급을 위한 저수량 확보차원에서 홍수기제한수위 이하의 수위에 대해서는 완만한 벌칙을, 홍수기제한수위부터 상시만수위까지는 무벌칙을, 상시만수위 이상은 다음 홍수조절 및 상류 홍수피해 최소화를 고려하여 높은 벌칙을 부과하였다. 발전항목은 여수로 방류시, 최대로 발전된다고 판단되어 목적함수 구성에서 제외되었다.

$$f = \min \left\{ \sum_{t=1}^{22} C1_t(h_{YJ,t}) + \sum_{t=1}^{13} C2_t(h_{dam,t}) \right\} \quad (2)$$

충주댐에서 여주 관측소까지의 홍수와 유하시간을 감안하여, $C1$ 함수의 평가는 댐방류 종료 후부터 10시간이 더 연장되었고, $C2$ 함수의 경우는 마지막 시간의 방류

로 인한 함수평가를 위해 1시간이 연장되었다. 시스템 제약조건들은 다음과 같다 :

(1) 댐방류량 상, 하한값 제약조건

$$0 \leq Q_{out(t)} \leq 17,000 \text{ m}^3/\text{s} \quad (t = 1, \dots, 12); \quad (3)$$

(2) 저수지 연속방정식 제약조건

$$S_t + Q_{inflow(t)} \cdot \Delta t - Q_{out(t)} \cdot \Delta t = S_{t+1} \quad (t = 1, \dots, 13); \quad (4)$$

(3) 결정단계 간, 댐 수문개방 높이변화에 대한 제약 조건

$$0 \leq |Q_{out(t+1)} - Q_{out(t)}| \leq 5,000 \text{ m}^3/\text{s} \quad (t = 1, \dots, 12); \quad (5)$$

(4) 홍수기 저수지 수위 제약조건

$$110 \text{ EL.m} \leq h_{dam(t)} \leq 145 \text{ EL.m} \quad (t = 1, \dots, 13). \quad (6)$$

제약조건에서 저수지 수위와 결정 단계간 수문개방 높이변화는 매우 높은 벌칙과 함께 비제약 형태로 처리되었다. 최적화 절차는 (1) GLOBE 전역최적화 도구에 의한 하나의 운영정책 수립, (2) 과거 및 예측 저수지 운영자료와 수문자료를 “(1)”과정에서 수립된 운영정책과 함께 시스템에 입력, (3) 연속방정식을 이용, 총주 저수위 계산, (4) 제약조건 충족여부를 검사 후, 충족되지 않으면 매우 높은 벌칙을 부과하고 “(1)”과정으로 복귀, (5) 복제된 SOBEK 모형을 이용, 여주 관측소 수위계산, (6) 목적함수 평가, (7) GLOBE 도구에 목적함수값 전달, (8) GLOBE 도구의 수행종료 기준 검사 후, 만족되지 않으면 “(1)”과정으로 복귀, (9) 최적 운영정책 제시 및 종료의 순으로 진행된다.

5.2 최적화 도구

본 연구에서는 저수지최적화 문제 해결을 위해, 지금까지 주로 사용되었던 동적계획법 대신에 전역최적화 기법을 이용하였고, 4가지 형태의 전역최적화 기법들 (CRS: Controlled Random Search, GAs: Genetic Algorithms, ACCO/L: Adaptive Cluster Covering /Combination of ACCO with multiple Local search)이 포함된 GLOBE 도구가 이용되었다. GLOBE 도구는 네덜란드 IHE에서 개발된 최적화 도구로서, 주로 모형의 보정 및 일반적인 최적화 문제에

활용되어 왔다(Solomatine, 1995). 무작위탐색법에 의거한 전역최적화 기법은 지역최적화 기법인 직접탐색법 및 동적계획법과 같은 열거탐색법과 비교될 때, 두 기법이 지니고 있는 단점들을 보완할 수 있는 효율적인 대안이라 할 수 있다. 동적계획법은 모든 타당영역을 격자개념으로 분할하여 탐색하는 반면에 전역최적화 기법은 무작위탐색과 최적해로 이동하는 탐색경로가 합해진 기법이다. 따라서, 동적계획법은 시간면에서 효율성은 떨어지지만 최적해를 보장할 수 있다는 장점과, 반면에 전역최적화 기법은 최적해를 보장할 수 없지만, 그 효율성 및 전역해의 탐색 정확도면에서 뛰어나다 할 수 있어, 열거탐색법의 지역해 탐색과 동적계획법의 저 효율성을 보완할 수 있다(Goldberg, 1989).

GAs는 자연도태와 자연 유전학으로부터 모방된 유전연산자(selection: 선택, crossover: 교환, mutation: 돌연변이)를 이용하여, 인위적인 도태과정을 모의하는 일반적인 탐색기법이다(Holland, 1975). ACCO는 4가지 원리, 즉, 목적함수의 반응영역에서 투시점들을 집단화하는 clustering 원리, 제약된 반응영역 내에서의 연속적으로 무작위 탐색하는 반복 covering 원리, 입수된 목적함수의 반응정보에 의거한 탐색영역 이동에 관한 adaptation 원리, 무작위로 발생하는 탐색점들이 최적점으로부터 이탈방지를 위한 주기적 randomization 원리에 의한 탐색기법이다(Solomatine, 1995).

5.3 개발된 최적화 모형의 검증

개발된 최적화 모형의 검증은 '90년 홍수사상을 대상으로 수행되었다. 약 9일 동안 발생한 '90년 홍수사상 중에서, 저수지 방류량이 가장 컸던 2일 동안의 사상을 추출하여 최적화모형을 의해 총주댐 방류량 계열을 결정하였고, 결과는 과거 운영기록과 비교되었다(그림 17). '90년 9월 홍수 시, 총주댐은 계획홍수위보다 1.03 m 높은 저수위 146.03 EL.m를 기록하였고, 이는 총주댐 상류 단양지역에 엄청난 피해를 야기시켰으며, 이의 피해액을 식 (2)의 목적함수값으로 나타내면 4.295×10^7 원으로 산정되었다. 그림 17을 보면, 본 최적화모형을 통하여 총주댐 최고 저수위가 145.3 EL.m로 산정되었고, 반면에 여주 지점의 최고 수위는 0.2 m 상승하여 피해는 증가하지만, 피해액을 식 (2)의 목적함수값으로 나타내면 3.766×10^7 원으로 총 피해는 실제보다 경감됨을 알 수 있다. 이로부터, 본 연구를 통해 개발된 최적화 모형은 높은 신뢰도로 실제 시스템과 잘 반응하고 있음을 발견할 수 있다. 특히,

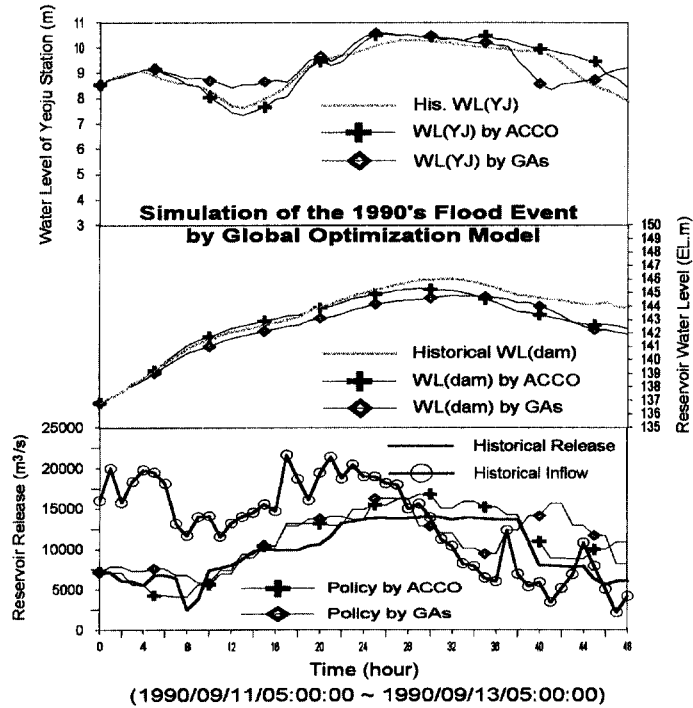


그림 17. 최적화 모형에 의한 '90년 홍수모의

인공신경망 모형에 의해 산출된 여주 관측소 수위는 높은 정확도로 모의됨을 알 수 있다. 일반적으로 실시간 저수지운영에는 사용의 간편성과 신속성으로 운영률이 적용되나, 개발된 최적화모형의 경우, ACCO 기법으로 10분 이내에 12시간의 최적 운영정책 수립이 가능한 관계로 일반적인 저수지 운영률과 함께 실시간 운영에 적용이 가능함을 알 수 있다. 그리고, 저수지 운영정책 수립과 같은 연속 의사결정 문제해결에 동적 계획법과 함께 전역최적화 기법 적용의 잠재력을 인식할 수 있다.

6. 결론 및 향후 연구 방향

본 연구목적은 하류 홍수피해 최소화과 댐 안전도 및 상류 홍수피해 최소화라는 두 상충되는 목적들이 타협될 수 있는 저수지 운영정책 수립을 위한 최적화 모형의 개발에 있다. 목적달성을 위해, 수리·수문학적 모형에서부터 인공신경망 모형을 포함하는 시스템 공학에 이르기까지 고려형태의 복합 모델링 기법으로 수행되었다. 개발된 최적화 모형에 대한 실제 시스템과의 반응정도를 검증하기 위하여, '90년 홍수사상을 대상으로 모의하였고, 결과는 과거 운영기록과 비교되었다.

본 연구로부터 얻어진 결과들은 다음과 같다.

(1) 복합 모델링 기법은 일반적으로 사용되는 저수지 운영률과 함께 실시간 저수지운영에 실 적용 가능성이 기대된다. 또한, 개발된 최적화 모형은 연속 의사결정 문제를 해의 일관성을 유지하며 해결할 수 있기에, 전역최적화 기법적용의 높은 잠재력이 인식되었고, 전통적으로 사용되어 왔던 동적계획법의 적절한 대안이 될 수 있음이 확인되었다.

(2) 실시간 홍수조절 시스템에 홍수피해 평가를 위하여 Muskingum 방법과 같은 비교적 간단한 홍수추적 모형이 사용된다고 가정 할 때, 실제 조건들의 개략적인 가정으로 높은 정확성이 보장되지 못한다. 따라서, 유체동력학적 홍수추적 모형적용이 필수적이라 할 때, 인공신경망 기법의 중요성이 인식된다.

(3) 개발된 복합모형 기법의 부정확성에 대한 영향은 개념적, 집중형 강우-유출 모형에 의한 유출량이 가장 크다고 판단할 수 있다. 또한, 인공신경망 모형의 입력자료인 강우량은 모형의 일반화에 민감한 영향을 끼친다. 이러한 점에서, 순차적인 복합 모델링 절차 상에서 계산오류의 전파를 최소화하기 위해서는 수문자료의 검증과 보정이 기본적으로 중요함을 인식할 수 있

다.

개발된 복합 모델링 기법에 의한 저수지 최적화모형을 실 시스템에 적용하기 위해서는 다음의 연구가 뒤따라야 할 것이다 :

(1) 전체 한강유역에서 이상적인 홍수조절을 위해서는 본 복합 모델링 기법이 전체 시스템에 확장, 개발되어야 하며, 효과적이고 효율적인 실시간 홍수조절 시스템을 위해서는 개발된 복합 모델링 기법이 기존의 홍수방재 시스템에 이식되어야 한다 ;

(2) 높은 신뢰도로 홍수피해를 평가하기 위해서는 분산형 홍수추적 모형과 GIS가 연계된 홍수범람 모형과의 연결이 요구된다.

참 고 문 헌

오영민, 이길성 (1986). "Min-max DP에 의한 소양 및 충주호의 홍수조절 운영." 한국수문학회지, 제19권, 제4호, pp. 339-344.

이길성, 정동국 (1985). "홍수시 충주댐 운영방안의 비교검토." 한국수문학회지, 제18권, 제3호, pp. 225-233.

이상호, 이길성 (1994). "Musking-Cunge 방법에 의한 남한강 홍수추적." 한국수문학회지, 제27권, 제4호, pp. 105-114.

한국수자원공사 (1995). 한강수계 다목적댐 하류 연속유출 모형과 동력학적 하도추적 모형 연구. 2차년도 연구보고서, WRRRI-WR-95-2.

Delft Hydraulics (1994). *SOBEK Users Guide & SOBEK Technical Reference Guide*. Delft, The Netherlands.

Goldberg, D.E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison Wesley Publishing Company.

Haims, Y.Y., and Hall, W.A. (1974). "Multiobjectives in water resources systems analysis: the surrogate worth trade-off method." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 4, pp. 614-624.

Haykin, S. (1993). *Neural network, a comprehensive foundation*. Macmillan College Publishing Company, USA.

Holland, J.H. (1975). *Adaptation in natural and artificial system: an introduction analysis with*

applications to biology, control and artificial intelligence. The University of Michigan Press.

Hsu, K.-I, Gupta, H.V., and Sorooshian, S. (1995). "Artificial neural network modeling of the rainfall-runoff process." *Water Resources Research*, Vol. 31, No. 10, pp. 2517-2530.

Lee, H.G. (1997). *Optimal reservoir operation for flood control using a hybrid modelling approach (Chungju Multipurpose Reservoir in Korea)*. M.Sc. thesis, IHE, the Netherlands.

Lee, S.H., and Lee, K.S. (1994). "Forecasting and control of the Han River-reservoir system under flood condition." *Proceedings, 9th Congress of APD-IAHR*, Singapore, Vol. 1, pp. 126-133.

Solomatine, D.P. (1995). "Application of global optimization to models calibration." *Seminar on the Methods and Software for Estimation of Large Scale Spatial Interaction Models*, Organized by The Netherlands Interdisciplinary Demographic Institute, The Hague.

Solomatine, D.P., and Avila Torres, T.L.A. (1996). "Neural network approximation of a hydrodynamic model in optimizing reservoir operation." *Intern. Proc. of the Second Int. Conference in Hydroinformatics*, Zurich.

Tabios III, G., Obeysekera, J.T., and Salas, J.D. (1986). *Hydrology and water resources program*. Colorado State University, Ft. Collins, Colorado, USA.

Tan T.S. (1995). *Development of a real-time optimal control system for drainage using an object-oriented approach*. M.Sc. thesis, IHE, the Netherlands.

U.S. Army Corps of Engineers (1985). *HEC-1 Flood Hydrograph Package User's Manual (revised edition)*. The Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

(논문번호:98-038/접수:1998.07.07/심사완료:1998.10.16)