

홍수시 댐 운영방안을 내부 경계조건으로 포함하는 부정류 계산모형

Unsteady Flow Model Including a Dam Operation Rule for Flood Control as Internal Boundary Condition

유 명 관* / 전 경 수**

Yu, Myoung Kwan / Jun, Kyung Soo

Abstract

An unsteady flow model for channel network including various internal boundaries is developed. It is a multiply-connected network model based on the Preissmann's four-point scheme and the Newton-Raphson method, where looped double-sweep algorithm is used. The model is capable of simulating flow through hydraulic structures such as dams and submerged weirs. It can also simulate automatic reservoir operation method (Auto ROM) for flood control, that is to maintain a target water level, by incorporating the strategy to the unsteady flow model as internal boundary condition. The model is applied to the Han River system that includes the downstream reaches of Choongju dam and Hwacheon dam as well as the downstream reach of the Paldang dam. Roughness coefficient for the downstream reach of Choongju dam is estimated. Automatic ROM is presumed for the Paldang, Chungpyung, Euiam, and Choonchun dams. The model is tested using historical flood records, and the flood control strategy is successfully simulated.

Keywords : unsteady flow model, Auto ROM, Han River system, dams

요 지

다양한 내부경계를 포함하는 폐합형 하천수계에 대한 부정류 계산모형을 개발하였다. 계산모형은 폐합형 수계모형으로서, 계산기법으로는 Preissmann의 4점 음해법과 폐합형 double sweep 알고리즘에 근거한 모형을 사용하였다. 또한 댐 및 수중보 등의 수공구조물에서 발생할 수 있는 월류흐름, 오리피스형 흐름 등에 대한 모의가 가능하도록 하고, Auto ROM에 의한 댐에서의 홍수조절 방안을 내부경계 조건으로 포함하여 홍수시 운영조건에 대한 모의가 가능하도록 하였다. 팔당댐 하류부와 충주 조정지댐 하류의 남한강 구간 및 화천댐 하류의 북한강 구간을 포함하도록 한강 수계에 대한 계산모형을 수립하였다. 또한 과거에 발생한 총 11개의 홍수사상을 사용하여 남한강 구간에 대한 조도계수를 추정하였다. 홍수기간 중 목표수위를 유지하도록 하는 팔당댐 및 북한강 수계 댐들의 홍수조절 방안을 설정하고, 수립된 방법을 사용하여 과거에 발생한 홍수사상에 대한 모의계산을 수행한 결과, 설정된 홍수조절 방안이 잘 모의되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 부정류 계산모형, Auto ROM, 한강수계, 댐

* (주)도화종합기술공사 수자원개발부

Water Resources Engineer, Dohwa Consulting Engineers Co. Ltd., 736-6 Yoksam-Dong, Kangnam-Gu, Seoul 135-080, Korea

** 성균관대학교 토목환경공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

(E-mail: ksjun@yurim.skku.ac.kr)

1. 서론

인류는 인접한 하천에 부존하는 수자원에서부터 많은 혜택을 받고 있으나 때로는 대홍수로 인하여 많은 인명과 재산의 피해를 입기도 한다. 특히 우리 나라는 해마다 여름철에 집중하는 강우로 인하여 큰 홍수피해를 입고 있다. 이러한 피해의 감소 내지는 방지를 위하여 또는 수자원의 효율적인 이용을 위하여 건설된 댐이나 제방, 수중보 등의 수공구조물은 그 운용이 부적절하거나 또는 구조물 자체가 붕괴될 경우 더욱 큰 피해를 야기할 수 있는 가능성을 내재하고 있다. 따라서 이러한 수공구조물에 대한 평가 및 홍수의 전파양상에 대한 예측은 경제적인 측면에서도 매우 중요하다고 할 수 있다.

홍수 계산모형은 수문학적 모형과 수리학적 모형으로 대별할 수 있다. 저류함수법과 같은 수문학적 모형은 비교적 단순하기 때문에 운영이 간편하고 복잡한 계산을 필요로 하지 않으며 계산의 안정성이 뛰어나서 오래 전부터 많이 이용되고 있다. 그러나 수문학적 모형은 물리적인 방법이라기 보다는 개념적인 방법으로서 유량 및 수위 계산의 대상지점이 특정 지점에 한정되어 있기 때문에 다양하고 충분한 흐름정보를 제공하기 어렵고, 수리학적 모형에 비해 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 수리학적 모형은 연속방정식과 운동량방정식, 즉 St. Venant 방정식을 수치적으로 푸는 방법으로서 실제 물리적인 현상과 자연조건을 상세히 반영하므로 수문학적 모형에 비해 정확한 반면, 모형의 복잡성 때문에 계산량은 많게 된다. 특히 수리학적 모형은 수문학적 모형에서 고려할 수 없는 댐, 보 및 교각 등의 하천구조물로 인한 배수영향, 본류 수위상승으로 인한 지류의 영향 등을 모두 고려하여 흐름을 해석할 수 있는 장점이 있다.

수리학적 모형의 수치해석방법으로는 특성곡선법(Abbott, 1975), 유한요소법(Cooley와 Moin, 1976), 유한차분법(Liggett와 Cunge, 1975) 등으로 다양하다. 그러나 1차원 흐름해석의 경우 여러 장점을 지니고 있는 유한차분법이 가장 널리 사용되고 있는 실정이며 유한차분법 중에서도 안정성과 정확성이 우수한 것으로 평가되고 있는 Preissmann 기법(Liggett와 Cunge, 1975)이 가장 보편적으로 사용되고 있다. 또한 Preissmann 기법은 음해법의 특징인 거리 및 시간 간격의 제약이 적기 때문에 하천에서의 장기간에 걸친 부정류 해석이 가능하다는 장점이 있다. Preissmann 기법을 채택하고 있는 범용 모형으로는 미국 기상청(NWS)의 FLDWAV(Fread와 Lewis, 1998), 미국 지질조사국(USGS)의 BRANCH(Schaffranek 등, 1981), 영국 Wallingford 수

리연구소의 FLUCOMP(Samuels와 Skeels, 1989) 등이 대표적인 예이다.

한강수계의 북한강에는 소양강댐, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐이, 남한강에는 충주댐이 위치하며, 팔당댐 하류에는 잠실 및 신곡 수중보 등의 수공구조물이 있어서 계산수리학적인 면에서 긴요한 연구과제를 제공하고 있다. 부정류 계산모형을 한강에 적용한, 많은 연구들이 수행되어 왔다(김상호와 김원, 2002; 김원 등, 1995, 1996, 2001; 윤용남과 박무중, 1992; 이상호와 이길성, 1992; 이정규와 이창현, 2004; 이종태 등, 1993; 최병호와 서경석, 1987; 최병호 등, 1987, 황의준과 전경수, 1997). 이 중 1990년대 초반까지의 연구들은 수공구조물들이 계산구간 내에 포함되지 않도록 구간을 나누어 적용하거나, 수공구조물이 없는 경우에 대하여 모형을 적용한 경우가 대부분이다. 한강 하류부를 대상으로 한 최근의 연구들 중에는 잠실수중보 및 신곡수중보의 존재를 내부경계로 고려한 연구들이 다수 있으나(김상호와 김원, 2002; 김원 등, 1996, 2001; 이정규와 이창현, 2004; 황의준과 전경수, 1997), 그 방법의 적정성에 대해서는 고려해야 할 부분이 많다. 수중보의 경우와 같이 수공구조물 상·하류간에 수리학적 관계식이 성립하는 경우에는 이를 내부경계 조건식으로 하여 수리학적 계산모형에 의한 모의가 가능하나(전경수, 1996), 수리학적 관계식이 아닌 댐에서의 홍수조절 방안을 내부경계로 포함시켜 계산을 수정할 수 있는 부정류 계산모형에 대해서는 연구된 바가 전혀 없다. 본 연구에서는 현재 팔당댐 및 북한강 수계 댐들의 실질적인 홍수기 운영방안이라 할 수 있는 Auto ROM을 수리학적 모형의 내부경계로 포함하여 모의가 가능하도록 하는 수리학적 계산모형을 개발하고, 또한 개발된 모형을 한강수계에 적용하여 그 적용성을 검증하고자 한다.

2. 계산모형

계산모형으로서는 폐합형 수계에 대한 부정류 계산모형을 사용하였다. 일반적으로는 관개·배수 시스템, 우수관거 시스템 등이 폐합형 수계에 속하며, 자연하천 수계의 경우에는 대개 수지형을 이룬다. 그러나 폐합형 수계에 관한 계산모형은 수지형 모형에 비하여 복잡한 대신에, 모형의 적용대상 수계가 폐합형이 아닌 경우에도 합류점, 분기점 및 수공구조물 등의 내부경계를 간편하게 처리할 수 있다는 장점이 있으며, 무엇보다도 잠실 및 신곡수중보가 고정정보와 가동정보로 이루어져 이들 지점에서는 하도형 및 월류형 흐름이 함께 발생한다는 특수한 상황 때문이다(황의준과 전경수, 1997).

2.1 지배방정식

폐합형 수계에 관한 계산모형의 지배방정식은 수로 지배방정식과 절점 지배방정식들로 구성된다. 수로 지배방정식은 하도형 흐름에 관한 것과 수공구조물에서 발생하는 월류형 또는 오리피스형 흐름에 관한 것으로 구분된다. 하도형 흐름에 관한 수로 지배방정식은 다음 식 (1) 및 (2)와 같은 연속방정식 및 운동량방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{Q |Q|}{K^2} + gAS_b = 0 \quad (2)$$

여기서 $Q = Q(x, t)$ 및 $y = y(x, t)$ 는 각각 유량과 수위를 나타내며, A 와 K 는 흐름단면적과 통수능으로서 각각 y 의 함수이다. α 는 운동량 보정계수, g 는 중력가속도이며, x 와 t 는 각각 공간 및 시간좌표를 나타낸다. S_b 는 교각을 포함하는 수로의 경우, 교각에 의해 추가적으로 발생하는 단위길이당 손실수두를 나타낸다. 통수능 K 는 Manning의 조도계수(n)를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K = \frac{1}{n} AR^{2/3} \quad (3)$$

여기서 R 은 동수반경이다.

월류형 흐름에 관한 수로 지배방정식은 다음의 연속방정식 (4)와 유량관계식 (5a) 또는 (5b)로 구성된다 (Henderson, 1966).

$$Q_u = Q_d \quad (4)$$

$$Q_u = \mu b \sqrt{2g} \sqrt{y_u - y_d} (y_d - y_w) \quad (5a)$$

$$\left((y_d - y_w) \geq \frac{2}{3} (y_u - y_w) \right)$$

$$Q_u = \mu b \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2g}{3}} (y_u - y_w)^{3/2} \quad (5b)$$

$$\left((y_d - y_w) < \frac{2}{3} (y_u - y_w) \right)$$

여기서 μ 는 월류유량계수, y_w 는 월류부의 바닥표고, b 는 월류부의 바닥폭이다. y_u 및 y_d 는 각각 월류구조물 상·하류측 수위를, Q_u 및 Q_d 는 월류유량을 나타낸다 (그림 1 참조).

오리피스형 흐름에 관한 수로 지배방정식은 연속방정식 (4)와 유량관계식 (6a) 또는 (6b)로 주어진다 (Henderson, 1966).

$$Q_u = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} \left((y_u - y_{cr})^{3/2} - (y_u - y_{cr} - d)^{3/2} \right) \quad (6a)$$

$$(y_d \leq y_{cr} + d)$$

$$Q_u = \mu A_g \sqrt{2g} \sqrt{y_u - y_d} \quad (6b)$$

$$(y_d > y_{cr} + d)$$

여기서 b 는 개방된 수문의 폭, y_{cr} 은 여수로 마루표고, A_g 는 개방된 수문의 단면적이며, d 는 개도 높이를 나타낸다 (그림 2 참조).

절점 지배방정식은 연속방정식 (7)과 등수위 조건식 (8)로 구성된다.

$$\sum_{k=1}^L Q_{j,k} + Q_{ext}(j, t) = 0, \quad j = 1, \dots, J \quad (7)$$

$$y_{j,k} = y_j, \quad k = 1, \dots, L; \quad j = 1, \dots, J \quad (8)$$

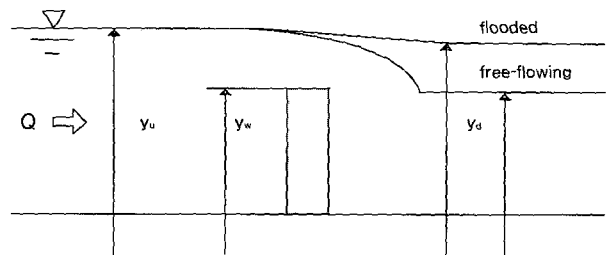


그림 1. 월류형 흐름에 관한 정의도

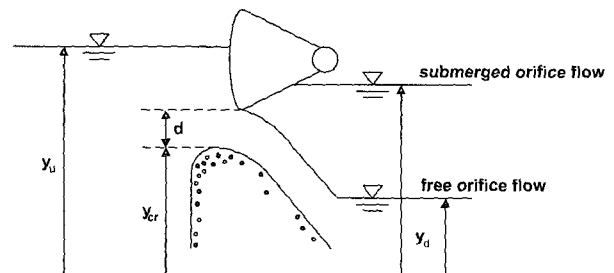


그림 2. 오리피스형 흐름에 관한 정의도

여기서 J 는 절점의 총수, L_j 는 절점 j 에 연결된 수로의 총수이다. $Q_{j,k}$ 는 수로 k 로 부터의 유입량 또는 수로 k 로의 유출량이며, $Q_{ext}(j, t)$ 는 시각 t 에서의 기지의 외부 유·출입량으로서 지천 유입량, 상류단 경계에서의 유출량 등이 여기에 포함된다. $Q_{j,k}$ 와 $Q_{ext}(j, k)$ 는 양의 값일 경우 절점으로의 유입량을, 음의 값일 경우 유출량을 각각 의미한다. $y_{j,k}$ 는 절점 j 와 k 를 연결하는 수로의 절점 j 측 끝단 계산점에서의 수위를 나타낸다.

2.2 수치해법

하도형 흐름에 관한 수로 지배방정식을 Preissmann의 4점 음해법(Liggett와 Cunge, 1975; Cunge 등, 1980)에 의하여 차분화하면, 수로상의 각 계산점에서의 수위 및 유량과 절점 수위에 관한 비선형 연립방정식이 구성되며, 그 해는 Newton-Raphson 방법을 적용하여 구한다. Newton-Raphson 방법을 적용하여 구성되는 수위 및 유량 보정치에 관한 선형 연립방정식의 해법으로는 수로에 대한 전방소거(forward sweep), 절점 수위 보정치의 계산 및 수로에 대한 후방대입(return sweep)으로 구성되는 폐합형 double-sweep 알고리즘을 사용한다. 전반적인 계산모형에 관한 상세한 내용은 Holly 등(1990)에, 월류형 및 오리피스형 흐름의 처리기법에 관한 상세한 내용은 전경수(1996) 및 유명관(1999)에 각각 기술되어 있다. 교각에 따른 추가적 손실수두에 관한 실험공식으로 Yarnell의 식(Hendersion, 1966)을 적용하였다.

3. 모형의 구성 및 보정

3.1 모형의 구성

본 연구의 대상구간은 한강 수계로서 월곶부터 팔당댐까지의 구간, 팔당댐부터 충주 조정지댐까지의 남한강 구간 및 남·북한강 합류점부터 화천댐까지의 북한강 구간을 대상으로 하여 모형을 구성하였다. 모형의 구성을 나타내는 모식도는 그림 3과 같다. 모형의 상류단인 충주조정지댐 및 화천댐, 하류단인 월곶, 임진강, 안양천, 중랑천, 탄천, 왕숙천, 경안천, 흑천, 북한천, 양화천, 청미천, 섬강, 홍천강, 가평천, 소양강 등 14개 지천의 유입지점, 남한강과 북한강의 합류점과 팔당댐, 청평댐, 의암댐 및 춘천댐의 직상류 및 직하류 그리고 잠실 및 신곡 수중보의 직상류 및 직하류에 각각 절점이 위치하도록 하였다.

팔당댐 하류 구간에 위치한 잠실 수중보와 신곡 수중보는 고정보와 가동보의 복합형으로 되어 있다. 홍수시에는 가동보가 완전히 개방되어 고정보 측에는 월류형

흐름이, 가동보 측에는 하도형 흐름이 각각 발생하게 된다. 이들을 모의하기 위하여 수중보의 직상류 및 직하류 지점이 두 개의 수로로 연결되는 폐합형 수계 모형을 구성하였다. 수중보 흐름의 모의와 관련된 내용은 여러 문헌(Cunge 등, 1980; Holly 등, 1990; 전경수, 1996; 황의준과 전경수, 1997)에서 찾아볼 수 있다. 따라서 잠실 및 신곡 수중보 직상류 및 직하류는 두 개의 수로로 연결되며, 그 밖의 절점들은 인접 절점들과 각각 한 개의 수로로 연결된다. 따라서 전체모형은 총 30개의 절점과 31개의 수로로 구성되는 폐합형 모형이 된다. 계산점간의 평균간격은 약 200 m이다. 또한 행주대교, 성산대교, 양화대교, 당산철교, 마포대교, 원효대교, 한강대교, 동작대교, 반포대교, 한남대교, 동호대교, 성수대교, 잠실대교, 잠실철교, 올림픽대교 및 광진교 등 총 17개의 교각이 포함되도록 모형을 구성하였다.

하천수로내 각 계산점에서의 횡단면 자료는 서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수 종합 대책수립 보고서(서울특별시, 1992) 및 한강 하류연안 개발계획 보고서(서울지방 국토관리청, 1989) 등의 하천측량 자료를 사용하였다. 그러나 한강 하류단 부근은 군사분계선에 위치하여 그 지역의 단면자료가 가용하지 않은 관계로 본 연구에서는 곡릉천 이후의 단면자료는 측정자료가 가용한 최하류지점 곡릉천 입구의 단면자료를 외삽하여 1000 m 간격으로 가상단면을 설정하였다. 설정방법으로는 팔당댐부터 곡릉천까지의 최심하상고에 대한 회귀분석으로부터 구한 기울기를 사용하여 가상단면의 하상고를 결정하고, 폭은 지형도상의 폭을 사용해 최심하상고와 폭의 비만큼 확장 또는 축소하여 사용하였다(황의준, 1997). 또한 구성된 모형에는 내부경계로서 팔당댐, 청평댐, 의암댐 및 춘천댐이 포함되어 있다. 이들 댐에서의 홍수조절방안에 대한 모의 방법은 4장에서 기술하기로 한다.

3.2 모형의 보정

팔당댐 하류 구간에는 고안, 광장, 잠실 수중보, 잠수교, 인도교, 행주대교, 전류 지점 등 수위관측 지점이 다수 존재하며, 따라서 가용한 수위관측 자료가 풍부하다. 이에 따라 팔당댐 하류구간의 조도계수 추정에 관한 연구가 김원 등(1995), 황의준과 전경수(1997) 및 이정규와 이창현(2004) 등에 의하여 비교적 깊이 있게 이미 수행된 바 있다. 팔당댐 상류의 하천구간 중 북한강 구간에 대해서는 수위 관측자료가 가용하지 않은 관계로 모형의 보정이 사실상 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 남한강 구간에 대한 모형의 보정을 수행하였다.

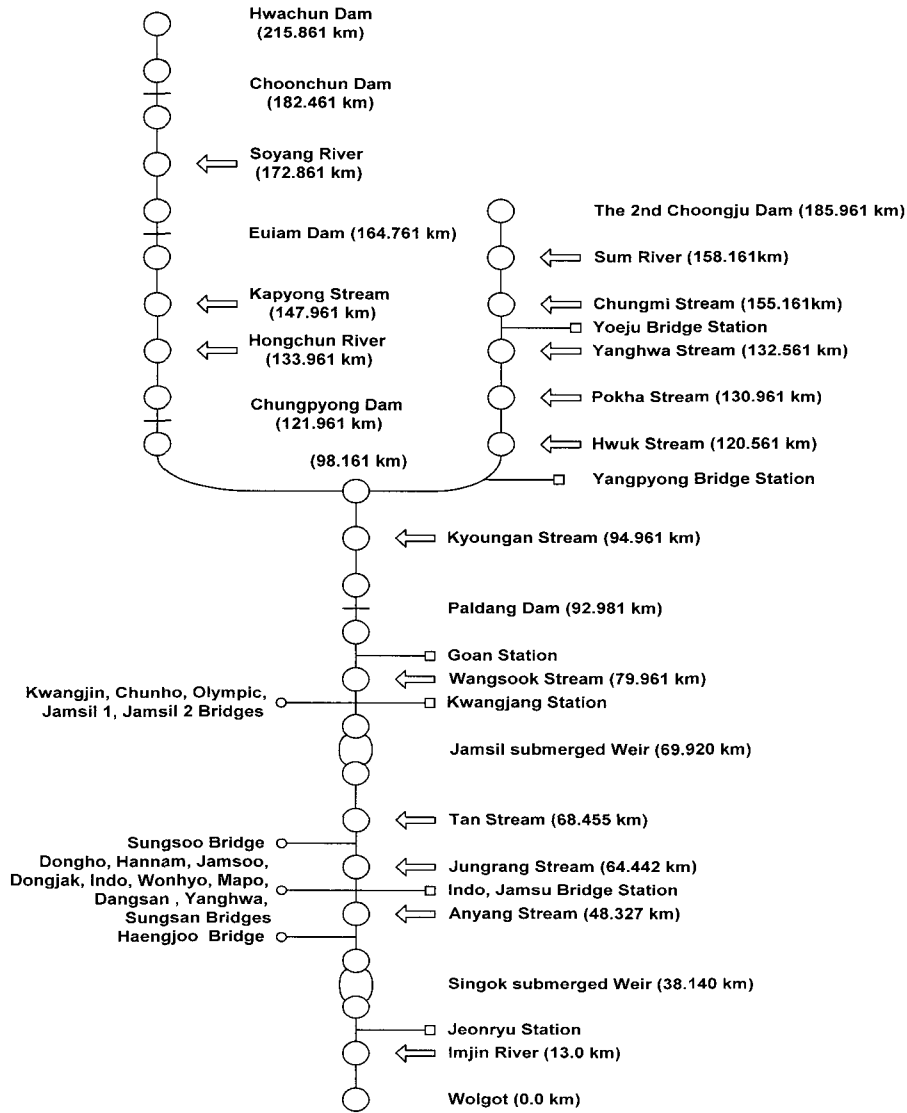


그림 3. 한강 수계에 대한 모형의 모식도

이를 위하여 청평댐 및 충주조정지댐을 상류단으로, 팔당댐을 하류단으로 하는 부분모형을 구성하였다. 즉, 부분모형의 대상구간에 대한 모식도는 그림 1에서 팔당댐 하류부를 제외한 것이 된다. 1987년부터 1993년 사이에 발생한 홍수사상 중 충주조정지댐 및 청평댐 방류량과 팔당댐 수위 및 여주 또는 양평 수위표 자료가 가용한 11개의 홍수사상 자료를 이용하여 모형의 보정을 수행하였다(표 1 참조). 충주 조정지댐 및 청평댐 방류량을 상류단 경계조건으로, 팔당댐 수위를 하류단 경계조건으로 각각 사용하였다. 유입지천 중 경안천, 섬강 및 청미천의 지천 유입량은 경안, 문막 및 청미 수위표 자료와 수위-유량 관계식으로부터 산정하였으며, 흑천, 북하천 및 양화천에 대해서는 청미천 유입면적의 비에 청미천의 유량을 곱하여 각각 지천 유입유량으로 취하였다. 모형의 보정을 위한 수위자료로는 양평 및 여주

수위표 자료를 사용하였다.

북한강 구간에 대해서는 모형의 보정을 위한 수위 관측자료가 가용하지 않으므로 조도계수를 임의로 부여할 수밖에 없다. 그러나 북한강과 남한강 합류점에서의 수위 및 유량 계산결과는 북한강 구간에 대한 조도계수의 값에 따라 어느 정도 달라질 수도 있을 것이며, 또한 남한강 구간의 흐름은 합류점에서의 수위와 무관하지 않으므로, 결국 남한강 구간의 흐름은 북한강 구간에 대한 조도계수의 영향을 받을 수도 있다고 보는 것이 일반적으로 타당하다. 이러한 영향이 미미하여 합류점 직상류의 일부 구간에 국한된다면 문제가 없을 것이나, 만약 북한강 구간에 대하여 임의로 부여되는 조도계수가 남한강 구간의 여주 및 양평지점 수위 계산치에 영향을 미친다면, 즉 이들 지점에서의 흐름이 북한강 구간에 대한 조도계수에 민감하다면 남한강 구간에 대한

표 1. 남한강 구간의 조도계수 추정을 위한 홍수사상 자료

번호	기간	충주조정지댐 최대방류량(CMS)	청평댐 최대방류량(CMS)
1	90/9/9 23:00 ~ 90/9/13 23:00	16646	16103
2	90/6/20 01:00 ~ 90/6/27 23:00	2443	3304
3	90/7/19 01:00 ~ 90/7/25 23:00	1383	5057
4	88/7/19 01:00 ~ 88/7/25 16:00	5340	2496
5	87/7/21 01:00 ~ 87/7/24 23:00	5457	3798
6	87/8/3 01:00 ~ 87/8/6 23:00	3330	4141
7	93/7/13 01:00 ~ 93/7/16 23:00	1941	1763
8	88/7/13 01:00 ~ 88/7/16 23:00	2178	3055
9	87/7/26 01:00 ~ 87/7/30 23:00	2678	3214
10	91/7/24 12:00 ~ 91/7/26 12:00	2330	10339
11	87/8/7 01:00 ~ 87/8/9 23:00	1671	1590

조도계수의 추정은 별 의미가 없게 된다. 따라서 북한강 구간의 조도계수가 여주 및 양평 수위 계산치에 미치는 영향을 평가하기 위하여 북한강 구간의 조도계수를 0.025, 0.033 및 0.050으로 변화시켜 가며 각 홍수사상에 대한 모의계산을 수행하였다. 그 결과 모든 홍수사상에 대하여 양평과 여주 지점의 수위 계산치는 북한강 구간의 조도계수에 전혀 민감하지 않음을, 즉 남한강과 북한강 합류점의 배수영향을 받지 않음을 알 수 있었다. 즉, 북한강 구간에 대한 조도계수의 값을 얼마로 취하든 남한강 구간에 대한 조도계수 추정결과에 전혀 영향을 미치지 않게 된다. 따라서 북한강 구간의 조도계수는 0.030으로 임의로 설정하고 남한강 구간에 대한 조도계수의 추정을 수행하였다.

추정방법으로는 각 홍수사상마다 조도계수를 0.025에서 0.050까지 0.001 간격으로 변화시켜가며 각 경우에 대한 모의 계산을 수행하여 여주 및 양평 지점에서의 매 시각 수위 관측치와 계산치간의 오차 제곱합이 최소가 되도록 하였다. 각 홍수사상에 대한 조도계수의 추정 결과와 그에 따른 RMS 오차는 표 2에 요약된 바와 같다.

4. 댐을 내부경계로 하는 계산모형의 개발 및 적용

본 연구의 대상 구간 내에는 팔당댐, 청평댐, 의암댐 및 춘천댐이 내부경계로 포함되어 있다(그림 3 참조). 이들 댐은 원래 수력발전용 댐으로 건설되었으나, 실질적으로는 어느 정도 홍수조절 기능을 하고 있다. 이들 댐의 홍수시 운영은 저수지의 만수위 이하 수위에서 만수위까지를 홍수조절에 활용하고 있으며, 부득이 한 경우 이외에는 저수위 이하로 수위를 낮추지 않고 있다. 또한 제한수위를 넘지 않도록 예비방류를 하고 있다(발전처, 1998). 따라서 본 연구에서는 이들 댐에서의 홍수조절 방안으로서 일정한 목표 수위(target water level)를 유지하는 Auto ROM을 모의할 수 있는 계산기법을 수립하여, 이를 부정류 계산모형에 포함하도록 하였다.

4.1 단일 댐의 Auto ROM 모의기법의 수립 및 적용

4.1.1 단일 댐 일정 수위 유지 운영방안의 모의 방법

댐수위를 일정하게 유지하기 위해서는 방류량을 조절해야 한다. 각 시간 준위마다 댐 지점에서의 유입량에 대하여 전혀 방류를 하지 않더라도 수위가 목표 수위 이하로 유지될 수 있다면 방류량을 영으로 한다. 방류량을 영으로 할 경우에 수위가 목표 수위 이상으로 상승하게 될 것이라면, 수위가 목표 수위에서 유지되도록 적정량을 방류한다. 이러한 과정, 즉 방류량의 조절은 실제로는 수문의 조작에 의하여, 즉 개도에 따라 이루어진다. 이러한 절차에 대한 모의방법은 다음과 같다.

각 시간 준위마다 우선 수문을 전혀 열지 않는 경우에 대하여 전체 시스템에 관한 계산을 수행하여 댐 수위가 목표 수위 이상이 될 것으로 판명되면, 개방되는 수문의 수를 한 개씩 늘려가며, 각 경우에 대한 계산을 수행하고 그에 따른 댐 수위를 계산한다. 이 때 수문은 완전 개방을 한다. 이 과정에서 댐수위가 목표 수위에 보다 하강하게 되면, 직전에 개방된 수문을 완전개방하지 않고 개도를 영으로부터 일정량씩 점차 증가시켜 가며 다시 계산을 수행한다. 이 과정에서 댐수위가 목표 수위에 근접하게 되면, 그 때의 계산결과를 현 시간 준위에 대한 계산결과로서 취하고, 다음 시간 준위로 넘어간다. 수문을 모두 완전 개방하는 경우에도 댐 수위가 목표 수위를 넘는다면, 수문을 모두 개방하는 것으로 하며, 이 때 댐수위는 불가피하게 목표 수위를 초과하게 된다. 그림 4는 이러한 과정을 나타내는 흐름도이다.

4.1.2 팔당댐의 일정 수위 유지 방안에 대한 모의계산

팔당댐은 원래 발전용 댐으로서 당초 계획된 홍수조절 용량은 없다. 상시만수위는 El. 25.50 m, 홍수시 만수위는 El. 27.70 m이며, 발전 가능한 최저수위인 저수위는 El. 25.00 m이다. 팔당댐에 대하여 명시적으로

표 2. 조도계수 추정결과 및 RMS 오차

홍수사상	추정된 조도계수	RMS 오차
1	0.032	0.7105
2	0.045	0.3377
3	0.035	0.1239
4	0.035	0.3484
5	0.037	0.4859
6	0.037	0.4121
7	0.041	0.2879
8	0.040	0.3356
9	0.043	0.3364
10	0.043	0.2543
11	0.034	0.2179
평균	0.038	0.3501

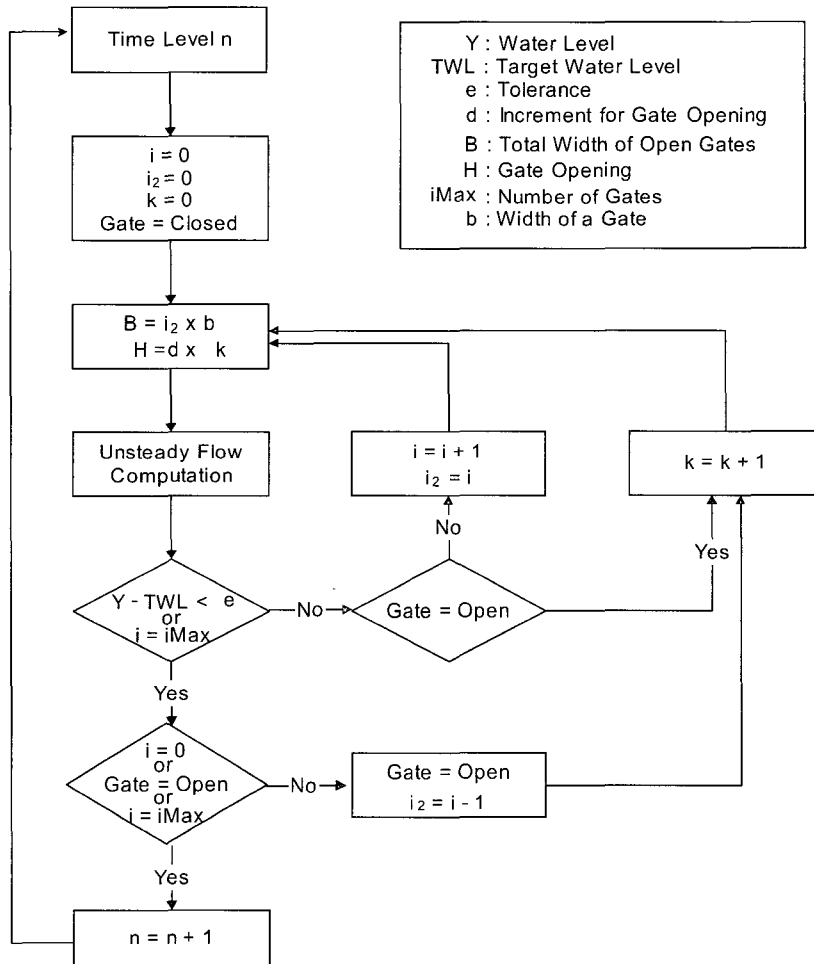


그림 4. 단일 댐 Auto ROM 모의기법에 대한 흐름도

설정된 홍수조절 방안은 없으나 과거의 7, 8 및 9월 운영실태를 검토해 보면, 실제로 홍수기의 댐 운영은 상시만수위 El. 25.50 m와 저수위인 El. 25.00 m 사이에서 댐 수위를 유지하고 있음을 알 수 있다. 이러한 운영방안, 즉 팔당댐 수위가 저수위 이하로 내려가지 않도록

하는 운영방안을 위해서는 저수위인 El. 25.00 m 이상으로 목표 수위(target water level)을 설정하여, 이를 유지하도록 하는 방안을 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 목표 수위값을 El. 25.50 m로 하여 모의계산을 수행하였다.

모형의 적용 대상구간은 그림 3에서 청평댐 상류부를 제외한 구간이다. 즉 월곶부터 팔당댐까지의 구간(92.981 km), 청평댐에서 남한강 합류점까지의 북한강 구간(23.8 km) 및 충주 조정지댐에서 팔당댐까지의 남한강 구간(92.98 km)을 대상으로 하여 모형을 구성하였다. 수중보 직상류 및 직하류의 절점들은 두 개의 수로로 연결되며, 그 밖의 절점들은 인접 절점들과 각각 한 개의 수로로 연결된다. 따라서 전체모형은 총 21개의 절점과 22개의 수로로 구성되며, 계산점간 평균간격은 약 200 m이다.

수립된 홍수조절 방안을 사용하여 과거의 4개 홍수사상에 대한 모의계산을 수행하였다. 사용된 홍수사상은 표 3에 정리된 바와 같다. Manning의 조도계수는 팔당댐 하류 구간에 대해서는 황의준과 전경수(1997)에 의하여 추정된 값으로서 왕숙천 유입 지점 상류구간에 대해서는 0.0386의 값을, 하류구간에 대해서는 0.0262의 값을 각각 사용하였으며, 남한강 구간에 대해서는 3.2 절에서 11개 홍수사상에 대하여 추정된 조도계수의 평균치인 0.038을 사용하였다. 북한강 구간에 대해서는 3.2 절에서의 분석 결과에 따라 0.030의 값을 임의로 부여하였다.

상류단 경계조건으로는 청평댐 및 충주 조정지댐에서의 방류량이 사용되었으며, 팔당댐 하류구간의 유입 지천 중 왕숙천, 탄천, 안양천에서의 시간별 지천 유입량은 퇴계원, 성남 및 안양 수위표 지점에 대한 수위-유량 관계곡선으로부터 산정하였다. 중랑천의 경우 인접한 탄천에서의 유입유량에 중랑천의 유역면적과 탄천의 유역면적의 비를 곱하여 중랑천에서의 지천 유입량을 산정하였으며, 임진강의 경우 같은 방법으로 인접한 안양천과 비교하여 지천 유입량으로 산정하였다. 남한강 구간의 지천 유입량은 3.2절에서 기술된 것과 동일하게 산정하였다.

하류단 경계조건으로서 월곶 지점에서의 실시간 조위변화를 표준조화함수의 형태로서 다음과 같이 부여하였다.

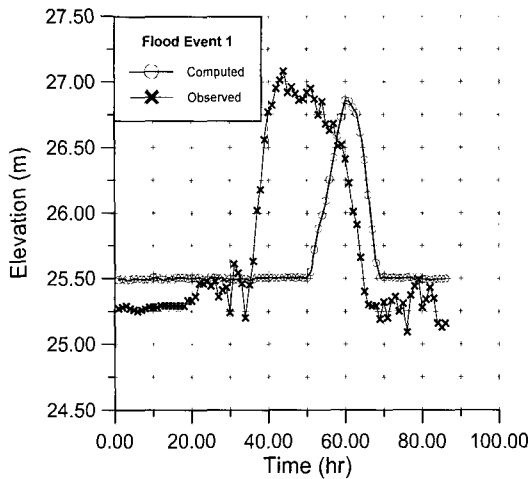
$$\zeta = \sum_{i=1}^n f_i H_i \cos(\sigma_i t + u_i + V_i - K_i) \quad (9)$$

여기서 σ_i 는 분조의 각속도, V_i 는 상응하는 분조의 126.5 °E 자오선의 평행분조의 위상(홍수추정 시작일시), f_i 와 u_i 는 진폭과 위상(지각)의 18.6년 조석주기의 변화를 고려한 nodal factor이며, H_i 와 K_i 는 조화상수로서 분조의 진폭과 국지적 지각을 각각 나타낸다. 월곶 지점의 조화상수는 부근 강화대교에서 1978년 5개월 관측치의 분석결과로부터 구한, 14개의 분조에 대한 추정치들(최병호 등, 1992)을 사용하였다.

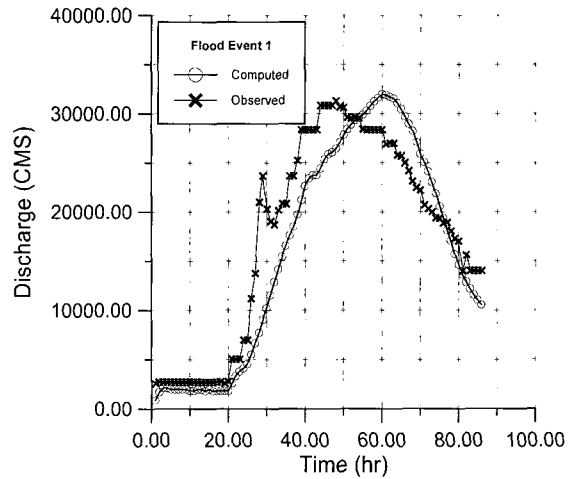
그림 5는 홍수사상 1 및 4에 대한 모의결과를 예시한 것으로서, 팔당댐 수위와 방류량을 실제 홍수사상 당시의 관측치와 비교하여 나타내고 있다. 당시의 댐 운영은 본 연구에서 설정한 EI. 25.50 m의 목표수위를 유지하는 것이 아니었기 때문에 모의 계산치와 관측치가 일치하는 것은 아니다. 우선 댐 수위 계산 결과를 보면 물리적으로 가능한 경우에는 목표 수위로 설정된 EI. 25.50 m로 수위가 유지되도록 잘 모의되고 있음을 알 수 있다. 홍수사상 1에 대한 계산 결과를 보면(그림 5(a) 및 (b) 참조) 약 20 시간 동안 댐 수위가 목표 수위를 상회하고 있으며, 이후 목표수위로 복귀하고 있음을 알 수 있다. 이는 댐 상류로부터의 유입량이 매우 커서 수문을 모두 완전히 개방하여 방류하더라도 댐 수위가 목표 수위 이하로 유지될 수 없기 때문이다. 이는 당시의 실제 댐 수위 관측 기록에서도 마찬가지로 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 운영규칙을 만족하기 위한 방류량을 물리적으로 방류할 수 없는 경우는 Rigid ROM 및 Technical ROM에서도 마찬가지로 발생할 수 있다. 예를 들어 현재의 댐 수위는 매우 낮은데 댐 유입량이 급격히 증가한다면 수문을 완전 개방하더라도 홍수초기 방류량은 rule curve에 따른 일정량이나 유입량의 일정률보다 작을 수밖에 없게 된다. 즉, 어떠한 ROM을 사용하더라도 수위에 따른 가능 최대 방류량은 제약조건으로 작용하게 된다. 홍수사상 4의 경우(그림 5(c) 및 (d) 참조), 당시의 댐 수위를 25.50 m로 유지했다면 팔당댐의 최대 방류량을 어느 정도까지 감소시킬 수 있었을 지가 잘 모의되고 있다.

표 3. 모의계산에 사용된 홍수사상

번호	홍수사상	충주조정지댐 최대방류량 (CMS)	청평댐 최대방류량 (CMS)	팔당댐 최대방류량 (CMS)
1	90/9/9 23:00~90/9/13 12:00	16646	16103	31303
2	90/7/19 01:00~90/7/25 23:00	1383	5057	8806
3	88/7/19 01:00~88/7/25 16:00	5340	2496	11445
4	88/7/13 02:00~88/7/16 23:00	2178	3055	8431



(a) 수위(홍수사상 1)



(b) 방류량 (홍수사상 1)

그림 5. 단일 댐 Auto ROM 모의모형에 의하여 계산된 팔당댐 수위 및 방류량

4.2 댐 군의 Auto ROM 모의기법의 수립 및 적용

4.2.1 댐 군의 일정 수위 유지 운영방안의 모의 방법

Auto ROM을 적용하는 댐 군을 포함하는 수계에 대한 수리학적 계산의 경우에는 단일 댐에 대한 Auto ROM 모의 알고리즘을 각 댐에 동시에 적용할 수는 없다. 즉, 상류측 댐의 방류량이 결정되어야 하류측 댐에 대한 모의가 가능하므로, 상류측 댐에서부터 하류측 댐 순으로 단일 댐에 대한 Auto ROM 모의 알고리즘을 순차적으로 적용한다. 댐 수로 상의 두 계산점에 대한 Newton-Raphson 보정량 방정식의 계수들은 이미 Auto ROM 모의 알고리즘의 적용이 완료된 상류 댐의 경우에는 결정된 개방 수문의 수와 개도로부터 식 (5a), (6a) 또는 (6b) 및 double-sweep 알고리즘의 절차에 따라 산정한다. 현재 Auto ROM 모의 알고리즘을 적용 중인 댐에 대해서는 현재 반복계산 단계에서의 개방 수문의 수와 개도로부터 계수들을 산정한다(그림 4 참조). 아직 Auto ROM 모의 알고리즘이 적용되지 않은 하류 댐에 대해서는 이전의 시간준위에서의 개방 수문의 수와 개도를 사용하여 Newton-Raphson 보정량 방정식의 계수들을 산정한다. 그림 6은 어떠한 시간 준위에서 이러한 과정을 나타내는 흐름도이다. 그림 6에서 Case 1은 이미 홍수조절 방안이 적용된 댐을, Case 2는 아직 적용되지 않은 댐을, Case 3은 현재 적용 중인 댐을 각각 의미한다.

4.2.2 한강수계 댐 군의 일정 수위 유지 방안에 대한 모의계산

모형의 적용 대상구간은 그림 3의 모식도에 나타난

바와 같다. 상류단 경계조건으로는 화천댐 및 충주 조정지점의 방류량이 사용되었다. 남한강 구간 및 팔당댐 하류구간의 지천 유입량은 각각 3.2절 및 4.1.1 절에서 기술된 것과 동일하게 산정하였다. 북한강 구간의 유입 지천 중 소양강의 시간별 지천 유입량은 소양강댐에서의 방류량으로 산정하였으며, 홍천강은 서면수위표 지점에 대한 수위-유량 관계곡선식으로부터 산정하였다. 가평천은 개발된 수위-유량 관계곡선이 없는 관계로 홍천강의 유역면적(1484.0 km²)과 가평천의 유역면적(518.0 km²)의 비에 홍천강의 유입유량을 곱하여 산정하였다. 목표수위는 팔당댐의 경우에는 4.1 절에서와 같이 El. 15.50 m로, 청평댐, 의암댐, 춘천댐 댐은 홍수기 제한수위를 유지하는 것으로 하였다.

수립된 모형을 테스트하기 위하여 4.1 절에서와 마찬가지로 4개의 홍수사상에 적용하였다(표 3 참조). 팔당댐, 청평댐, 의암댐, 춘천댐 등 수계 내의 모든 댐들에 대하여 일정수위를 유지하고자 하는 Auto ROM 홍수조절 방안이 잘 모의되고 있음을 알 수 있었다. 그림 7은 홍수사상 1 및 4에 대한 모의결과를 예시한 것으로서 팔당댐과 춘천댐에서의 계산수위를 나타내고 있다. 홍수사상 1에 대한 팔당댐 수위 계산 결과를 보면(그림 7(a) 참조) 약 10 시간동안 수위가 목표수위인 25.50 m보다 상승하고 있는데, 이는 단일 댐에 대한 모의 모형에 의한 계산결과의 경우와 유사한 이유 때문이다(4.1.2 절 참조). 춘천댐의 경우에도 목표수위인 El. 102.00 m가 잘 유지되고 있음을 확인할 수 있다(그림 7(b) 및 (d) 참조).

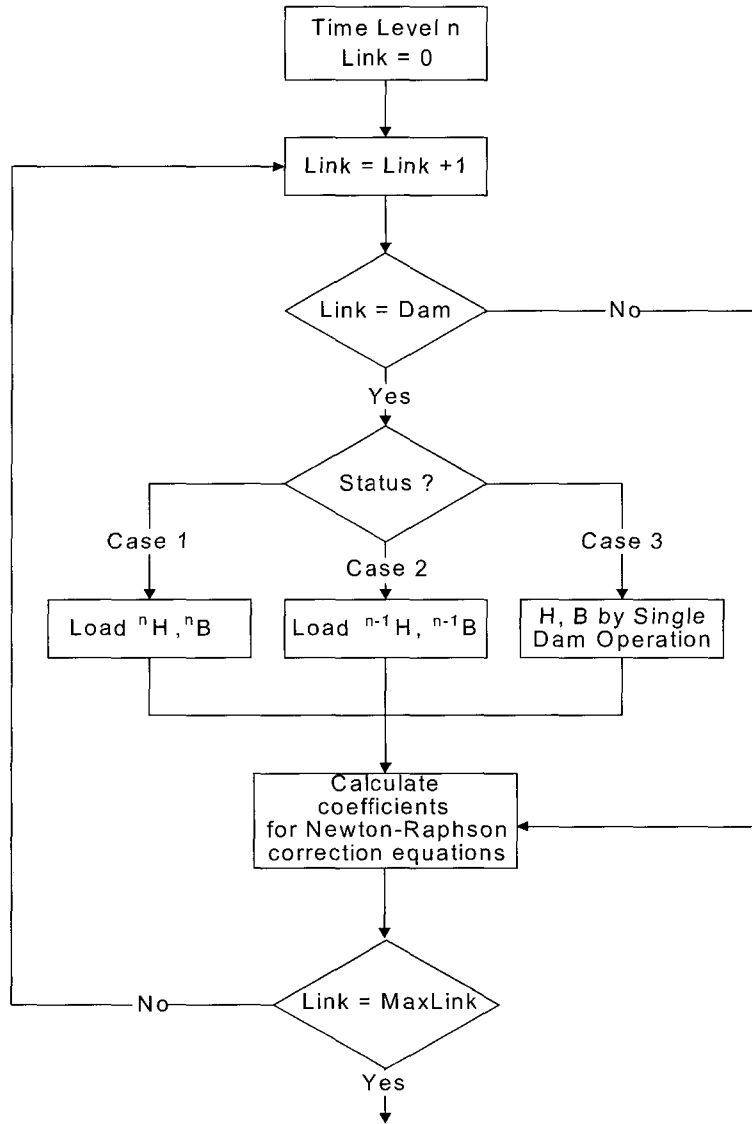
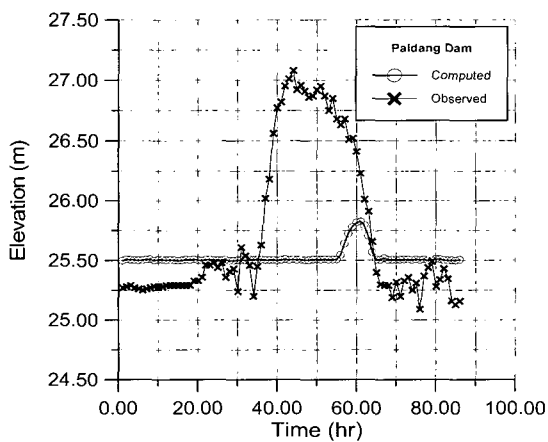
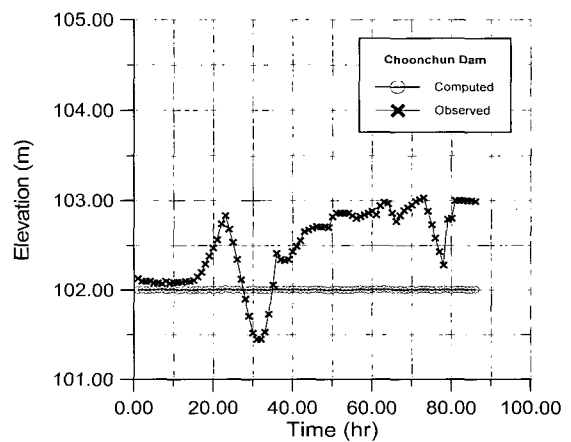


그림 6. Auto ROM을 적용하는 댐 군을 포함하는 수계에 대한 Newton-Raphson 보정량 방정식의 계수 산정 흐름도



(a) 팔당댐 수위 (홍수사상 1)



(b) 춘천댐 수위 (홍수사상 1)

그림 7. Auto ROM 모의모형에 의한 팔당댐 및 춘천댐 수위 계산결과

5. 결론

다양한 내부경계를 포함하는 폐합형 하천수계에 대한 부정류 계산모형을 개발하여 한강수계에 적용하였다. 계산모형은 폐합형 수계모형으로서, 계산기법으로는 Preissmann의 4점 음해법과 폐합형 double sweep 알고리즘에 근거한 모형을 사용하였다. 또한 댐 및 수중보 등의 수공구조물에서 발생할 수 있는 월류흐름, 오리피스형 흐름 등에 대한 모의가 가능하도록 하고, 특히 댐에서의 Auto ROM에 의한 홍수조절 방안을 내부경계 조건으로 포함하여 홍수시 운영조건에 대한 모의가 가능하도록 하였다. 팔당댐 하류구간과 충주 조정지댐 하류의 남한강 구간 및 화천댐 하류의 북한강 구간을 포함하도록 한강 수계에 대한 계산모형을 수립하였다. 또한 과거에 발생한 총 11개의 홍수사상을 사용하여 남한강 구간(남·북한강 합류점-충주 조정지댐)에 대한 조도계수를 추정하였다.

개발된 모의계산 기법의 적용성을 검증하기 위하여 우선 청평댐 하류의 북한강 구간, 충주 조정지댐 하류의 남한강 구간 및 팔당댐 하류 구간을 포함하는, 즉 팔당댐을 내부경계로 하는 부모형을 수립하고, 수립된 계산모형을 과거에 발생한 4개의 홍수사상에 대한 모의계산을 수행하였다. 그 결과 목표수위를 유지하는 것으로 설정된, 단일댐에 대한 Auto ROM 홍수조절 방안이 잘 모의되었다. 다음으로는 이와 같이 수립, 검증된 모의계산 기법의 적용범위를 춘천댐, 의암댐 및 청평댐까지 포함하도록 확장하여 4개 댐을 내부경계로 갖는 전체모형을 수립하였다. 역시 과거의 4개 홍수사상에 대한 모의계산을 수행하였으며, 그 결과 목표수위를 유지하는 것으로 설정된, Auto ROM 홍수조절 방안이 잘 모의되었다.

감사의 글

본 연구는 성균 학술 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 사의를 표한다.

참고 문헌

- 김상호, 김원 (2002). "한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학적 모형의 구축." **한국수자원학회 논문집**, 제35권, 제5호, pp. 485-500.
- 김원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수산정." **한국수자원학회지**, 제28권, 제6호, pp. 133-146.
- 김원, 우효섭, 김양수 (1996). "1차원 St. Venant 방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍수류 특성분석."

- 한국수자원학회지**, 제29권, 제1호, pp. 163-179.
- 김원, 김창완, 윤광석, 윤태훈 (2001). "신곡수중보와 조석운동을 고려한 한강 본류의 흐름특성." **대한토목학회 논문집**, 제21권, 제3-B호, pp. 305-314.
- 발전처 (1998). **수력발전소 운용자료집**.
- 서울지방 국토관리청 (1989). **한강 하류연안 개발계획 보고서**.
- 서울특별시 (1992). **서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수 종합 대책수립 보고서**.
- 이상호, 이길성 (1992). "소양강댐 가상 파괴파의 수치모의." **대한토목학회 논문집**, 제12권, 제2호, pp. 109-122.
- 이정규, 이창현 (2004). "수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정." **대한토목학회 논문집**, 제24권, 제1B호, pp. 25-32.
- 이종태, 한건연, 서병하 (1993). "한강의 홍수규모에 따른 인도교수위의 조석영향분석." **한국수문학회지**, 제26권, 제2호, pp. 66-77.
- 유명관 (1999). "한강 수계에 대한 홍수계산모형에 관한 연구," 석사학위논문, 성균관대학교.
- 윤용남, 박무종 (1992). "수리학적 홍수추적에 의한 댐 방류시 하류수위 및 주요 하천 구간별 홍수 도달시간의 예측." **한국수문학회지**, 제25권, 제3호, pp. 115-124.
- 전경수 (1996). "월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구." **한국수자원학회지**, 제29권, 제2호, pp. 153-165.
- 최병호, 서경석 (1987). "한강감조구간의 홍수추정." **대한토목학회 논문집**, 제7권, 제3호, pp. 133-139.
- 최병호, 이정렬, 서경석 (1987). "한강감조구간의 조석전파." **한국수문학회지**, 제20권, 제2호, pp. 151-160.
- 최병호, 전덕일, 안익장 (1992). "인천만 및 한강체계의 수치모형." **한국해양·해양공학회지**, 제4권, 제2호, pp. 130-137.
- 황의준 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산모형," 석사학위논문, 성균관대학교.
- 황의준, 전경수 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정." **한국수자원학회논문집**, 제30권, 제5호, pp. 549-559.
- Abbott, M.B. (1975). "Methods of characteristics." *Unsteady flow in open channels*, K. Mohmmmod and V. Yevjevich, eds., Water Resour. Publications, Fort Collins, CO, USA, pp. 63-88.
- Cooley, R.L., and Moin, S.A. (1976). "Finite element solution of Saint-Venant equations." *J. Hydr.*

- Div., ASCE, Vol. 102, No. HY6, pp. 759-775.
- Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr., and Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pittman.
- Fread, D.L. and Lewis, J.M. (1998). "NWS FLDWAV Model." *NWS Report*, Hydrologic Research Laboratory, NWS Office of Hydrology, NWA, Silver Spring, MD, USA.
- Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*. Macmillan.
- Holly, F.M., Yang, J.C., Schwarz, P., Schaefer, J., Hsu, S.H., and Einhellig, R. (1990). "Numerical simulation of unsteady water and sediment movement in multiply connected networks of mobile-bed channels." *IIHR Report No. 343*, Iowa Inst. of Hydr. Res., Iowa City, Iowa.
- Liggett, J.A., and Cunge, J.A. (1975). "Numerical methods of solution of the unsteady flow equations." *Unsteady flow in open channels*, K. Mohmmod and V. Yevjevich, eds., Water Resour. Publications, Fort Collins, CO, USA, pp. 89-182.
- Samuels, P.G., and Skeels, C.P. (1989). "Stability and accuracy analysis of numerical scheme modelling open channel flow." *paper presented at Hydrocomp 89*, Dubrovnik, Yugoslavia, pp. 13-16.
- Schaffranek, R.W., Baltzer, R.A., and Goldberg, D.E. (1981). "A model for simulation of flow in singular and interconnected channels." *Technique of WRI*, U.S. Geological Survey, Denver, CO, USA.

(논문번호:04-95/접수:2004.10.07/심사완료:2004.11.29)