

폐합형수계 모형에 의한 부정류 해석 Unsteady Flow Analysis by the Looped Network Channel Model

박 봉 진* · 이 환 기** · 정 관 수***
Park, Bong-Jin · Lee, Hwan-Ki · Jung, Kwan-Sue

Abstract

Loopnet model was developed to simulate unsteady flow in the looped network channel, considering change of the time and space. In this study, the looped solution algorithm was derived and the accuracy and stability of the model was tested. The Gulpo river system was used to calculate the flood water levels considering the hydraulic structures, tidal effect and inflow hydrographs. The result of the simulation showed that the accuracy and stability of this model was reliable. The change of flood water level of the Gulpo River system and the spillway section were not greatly affected by the operation water level of the navigation channel. But this analysis showed that roughness was one of the very important physical factor in changing flood water level.

요 지

Loopnet은 폐합형수계에서 물의 흐름에 관한 시간적·공간적 변화를 계산할 수 있는 부정류 해석 프로그램이다. 본 연구에서는 이 모형이 적용하고 있는 Looped Solution 알고리즘을 유도하고, 폐합형수계의 시험하도를 구성하여 이 모형의 안정성 및 정확성을 시험해 보았다. 또한 굴포천 유역을 대상으로 이 모형을 적용하여 수공 구조물, 서해측의 조위와 유역의 홍수 유입 등을 고려한 홍수위를 산정하였다. 그 결과 모형의 안정성 및 정확성 시험에서 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있었으며, 운하의 운영수위는 굴포천 본류와 방수로구간 모두 홍수위 변화에 큰 영향을 미치지 못하였으나, 조도계수는 홍수위 변화에 중요한 물리적 요소 중 하나로 분석되었다.

-
- * 한국수자원공사 특수지역사업본부 건설처, 기술사
 - ** 한국수자원공사 관리본부 댐관리처장
 - *** 한국수자원공사 특수지역사업본부 건설처 선임연구원, 공학박사

1. 서 론

자연하천에서 물의 흐름에 관한 시간적·공간적 변화를 고려하는 부정류는 Saint Venant의 연속 방정식과 운동량 방정식을 Preissmann 기법을 이용하여 해석할 수 있다. 음해법의 하나인 Preissmann 기법은 계산거리 및 계산시간 간격의 제약이 적고, 안정성과 정확성이 우수하여 자연하천에서 부정류 해석을 위하여 많이 사용되고 있다 (한건연 등, 1994). Preissmann 기법을 적용하고 있는 대표적인 프로그램은 미국 기상청(NWS)의 DWOPER(Fread, 1987)가 있으며, 국내 연구로는 심순보(1975), 이종태(1982), 한건연(1987), 박재홍(1993) 등이 있다. 최근 전경수(1996)는 월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구를 발표하였으나, 다양한 수공 구조물을 포함하는 폐합형수계 모형에 관한 연구는 활발하지 못한 실정이다.

본 연구에서는 부정류 해석을 위해 수지형 수계 (branched channel)뿐만 아니라 폐합형 수계 (looped network channel)에도 적용이 가능한 Loopnet (Looped network)모형을 사용하였다. 이 모형은 이환기가 처음 개발하여 1987년 개수로의 흐름해석에 사용한 부정류 해석 프로그램으로써 (이환기, 1987), Preissmann 기법에 따른 차분방정식으로 수위 및 유량에 관한 선형연립방정식을 구성하여 looped solution 알고리즘으로 해석하였다. 이 모형은 경인운하타당성조사(1992), 배종찬(1993), 박봉진 등(1995), 경인운하시설사업 기본계획 및 기본설계(1996) 등에 적용된 바 있다.

본 연구에서는 폐합형수계 모형에 적용 가능한 looped solution 알고리즘을 유도하고, 폐합형수계의 시험하도를 구성하여 Loopnet 모형의 수치적 안정성 및 정확성을 검증하였다. 또한 굴포천 유역의 하도를 대상으로 자연수로, 인공수로, 배수문, 보 등의 하천구조물과 조위변화, 유역의 홍수유입 등을 고려하고 조도계수 및 운하의 유지수심에 따른 홍수위의 변화를 비교·분석하므로써 본 모형의 실용성을 입증하였다.

2. Loopnet 모형의 구성

2.1 지배방정식

본 모형에서는 개수로의 부정류에 관한 Saint Venant 방정식을 수로의 지배방정식으로 사용하였다.

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

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + g \frac{Q |Q|}{ARn} = 0 \quad (2)$$

여기서 t 는 시간, x 는 거리(m), y 는 수위(m), Q 는 유량(m^3/s), q 는 측방향의 단위길이당 유입량($m^3/s/m$)이다. A 는 흐름에 기여하는 단면적(m^2)이고, A_s 는 흐름에 기여하는 단면적과 저류효과를 가지는 홍수터를 고려한 단면적(m^2)이다. β 는 운동량 보정계수, Rn 은 Manning의 조도계수 n 과 동수반경(hydraulic radius) R 을 사용하여 나타내면 $Rn = R^{4/3}/n^2$ 이다.

폐합형수계 모형에는 식 (1)과 (2)의 수로의 지배방정식과 각 단위수로가 합류 또는 분기하는 절점에서 식 (3)과 (4)와 같은 절점방정식이 추가로 필요하게 된다.

$$\sum_{k=1}^m Q_{1k}^{n+1} = 0 \quad (3)$$

$$y_{11}^{n+1} = y_{12}^{n+1} = \dots = y_{1k}^{n+1} = \dots = y_{1m}^{n+1} \quad (4)$$

여기서 m 과 k 는 절점 1에 합류 또는 분기하는 단위수로의 갯수와 일련번호이다.

2.2 Preissmann의 유한차분 방정식

Preissmann의 음해법을 적용하면 함수 $f(x, t)$ 및 편미분치를 그림 1의 격자망에서 식 (5)~(7)과 같은 차분식으로 나타낼 수 있다(Abbott와

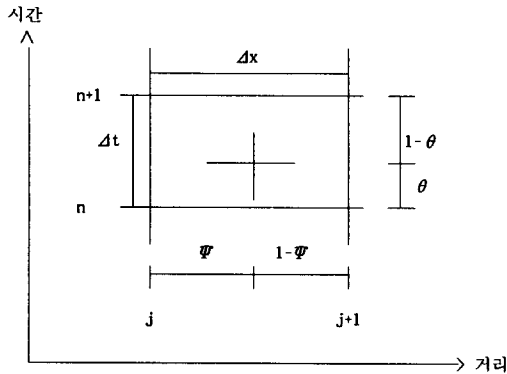


그림 1. Priesmann 음해법의 도식화

Basco, 1989).

$$f(x, t) \approx \theta [\psi f_{j+1}^{n+1} + (1-\psi) f_j^{n+1}] + (1-\theta) [\psi f_{j+1}^n + (1-\psi) f_j^n] \quad (5)$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} \approx (1-\psi) \frac{f_j^{n+1} - f_j^n}{\Delta t} + \psi \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_{j+1}^n}{\Delta t} \quad (6)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} \approx (1-\theta) \frac{f_{j+1}^n - f_j^n}{\Delta x} + \theta \frac{f_{j+1}^{n+1} - f_j^{n+1}}{\Delta x} \quad (7)$$

식 (1)과 (2)를 식 (5)~(7)에 대입하여 정리하면 식 (8)과 (9)형태의 차분식으로 나타낼 수 있다.

$$F1(Q_j^{n+1}, y_j^{n+1}, Q_{j+1}^{n+1}, y_{j+1}^{n+1}) = 0 \quad (8)$$

$$F2(Q_j^{n+1}, y_j^{n+1}, Q_{j+1}^{n+1}, y_{j+1}^{n+1}) = 0 \quad (9)$$

여기서 n과 j는 시간과 공간의 격자, θ 와 ψ 는 시간과 거리의 가중치로 0과 1사이의 값을 갖는다.

2.3 해석 알고리즘

식 (8)과 (9)는 $y_j^{n+1}, Q_j^{n+1}, y_{j+1}^{n+1}, Q_{j+1}^{n+1}$ 으

로 표시되는 비선형 대수방정식이다. 이 방정식은 $n\Delta t$ 시간준위에서 수위와 유량값이 기지의 값으로 주어지면, $(n+1)\Delta t$ 시간준위에서 각 지점의 수위와 유량값을 미지수로 하는 선형 보정량 방정식을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$A1\Delta Q_j + B1\Delta y_j + C1\Delta Q_{j+1} + D1\Delta y_{j+1} = E1_j \quad (10)$$

$$A2\Delta Q_j + B2\Delta y_j + C2\Delta Q_{j+1} + D2\Delta y_{j+1} = E2_j \quad (11)$$

여기서 $A1, B1, C1, D1, E1, A2, B2, C2, D2, E2$ 는 각 반복단계에서 구한 변수값 및 그 미분값들로 부터 주어지는 계수들이다(이환기, 1987; Liggett과 Cunge, 1975).

선형화한 연립방정식의 해법으로 가장 많이 쓰이는 double-sweep 알고리즘(Abbott와 Basco, 1989)은 단일형수계와 수치형수계 모형에도 효과적으로 적용할 수 있으나, 폐합형수계 모형에서는 직접 적용할 수 없다고 알려져있다(Cunge 등, 1980). 수치형수계 모형은 하나의 흐름경로가 하나의 절점(node)과 연결되지만, 폐합형수계 모형은 여러개의 흐름경로가 하나의 절점과 연결될 수 있다. 따라서 폐합형수계 모형은 해를 구하기 위해서 비교적 복잡한 매트릭스를 구성하여야 하므로 일반적으로 각 단위수로의 양단 격자점 사이에 있는 계산점들을 국부적으로 소거(local elimination)하는 매트릭스 감소기법(matrix reduction)을 적용하고 있다. 본 모형에서는 폐합형수계에도 적용이 가능한 매트릭스 감소기법의 일종인 looped solution 알고리즘(Cunge 등, 1980)을 사용하였다.

Looped solution 알고리즘의 해석 과정은 다음과 같다.

① 단위수로내 모든 계산점(node)에서 수위와 유량은 단위수로의 양단(nodal points)에서 수위(Δy)로 나타낸다.

② 수위가 미지수인 $2 \times$ 단위수로의 연립방정식을 경계점, 구조물의 내부경계 조건 등의 수로 줄여서 해석한다.

③ 해석된 단위수로의 양단에서 수위를 ①에서

구한 관계식에 대입하여 각 단위수로내의 모든 계산점에서 수위와 유량을 구한다.

Looped solution 알고리즘을 유도하기 위해서는 우선 식 (12)와 (13)의 관계식을 설정한다.

$$\Delta Q_j = F1_j \Delta y_1 + G1_j \Delta Q_{j+1} + H1_j \Delta y_{j+1} = I1_j \quad (12)$$

$$\Delta y_j = F2_j \Delta y_1 + H2_j \Delta Q_j + I2_j \quad (13)$$

식 (13)을 식 (10)에 대입하여 식 (12)와 비교하여

$$F1_j' = \frac{-B1_j F2_j'}{A1_j + B1_j H2_j'} \quad (14)$$

$$G1_j' = \frac{-C1_j}{A1_j + B1_j H2_j'} \quad (15)$$

$$H1_j' = \frac{-C1_j}{A1_j + B1_j H2_j'} \quad (16)$$

$$I1_j' = \frac{-E1_j - B1_j I2_j'}{A1_j + B1_j H2_j'} \quad (17)$$

의 관계를 설정하고, 식 (12)와 (13)을 식 (10)에 대입하여 식 (13)과 비교하면

$$F2_{j+1}' = \frac{-(B2_j F2_j' + \alpha^* F1_j')}{D2_j + \alpha^* H1_j'} \quad (18)$$

$$H2_{j+1}' = \frac{-(C2_j + \alpha^* G1_j')}{D2_j + \alpha^* H1_j'} \quad (19)$$

$$I2_{j+1}' = \frac{E2_j - B2_j I2_j' + \alpha^* I1_j'}{D2_j + \alpha^* H1_j'} \quad (20)$$

과 같다. 여기서

$$\alpha^* = A2_j + B2_j H2_j' \quad (21)$$

$F2_j' = 1, H2_j' = 0, I2_j' = 0$ 을 초기값으로 대입하고 계산점 $j=2$ 부터 $j=jj$ 까지 첫번째 Sweep을 시행하

면 계수 $F1_j', G1_j', H1_j', I1_j', F2_{j+1}', H2_{j+1}'$ 및 $I2_{j+1}'$ 를 축차적으로 계산 할 수 있다.

다음은 두번째 Sweep을 위하여

$$\Delta Q_j = F1_j \Delta y_1 + H1_j \Delta y_{jj} + I1_j \quad (22)$$

$$\Delta y_j = F2_j \Delta y_1 + H2_j \Delta y_{jj} + I2_j \quad (23)$$

의 관계를 설정하고, 식 (22)와 (23)을 식 (12)에 대입하고 식 (22)와 비교하면

$$F1_j = F1_j' + G1_j' F1_{j+1} + H1_j' H2_{j+1} \quad (24)$$

$$H1_j = G1_j' H1_{j+1} + H1_j' H2_{j+1} \quad (25)$$

$$I1_j = I1_j' + G1_j' I1_{j+1} + H1_j' I2_{j+1} \quad (26)$$

을 구할 수 있다. 이제 $F2_{jj} = 0, H2_{jj} = 1, I2_{jj} = 0$ 로 하여

$$F1_{jj} = \frac{-F2_{jj}'}{H2_{jj}'} \quad (30)$$

$$H1_{jj} = \frac{1}{H2_{jj}'} \quad (31)$$

$$I1_{jj} = \frac{-I2_{jj}'}{H2_{jj}'} \quad (32)$$

를 구하고, 이를 초기값으로 대입하면, 계수 $F1_j, H1_j, F2_j, H2_j$ 및 $I2_j$ 를 계산점 $j=jj-1$ 부터 $j=2$ 까지 계산할 수 있다. 이 과정을 마치면 단위수로내의 모든 계산점에서 식 (22)의 ΔQ_j 를 단위수로의 양단 격자점(절점)에서 Δy_1 와 Δy_{jj} 로 표시할 수 있다.

다음은 각 단위수로가 합류 또는 분기하는 절점에서는 식 (3)과 (4)의 절점방정식을 만족시켜야 한다. 예를 들어 그림 3과 같이 절점 A에서 단위수로 ①, ②와 ③이 만나는 경우를 생각하면 식 (22)로 부터 식 (33)~(35)의 관계식을 구성할 수 있다.

$$\Delta Q_{IAB} = F1_{IAB} \Delta y_{IAB} + H1_{IAB} \Delta y_p + I1_{IAB} \quad (33)$$

$$\Delta Q_{IAC} = F1_{IAB} \Delta y_{IAC} + H1_{IAC} \Delta y_q + I1_{IAC} \quad (34)$$

$$\Delta Q_{IAa} = F1_{IAa} \Delta y_{IAa} + H1_{IAa} \Delta y_r + I1_{IAa} \quad (35)$$

식 (33)~(35)와 식 (3)과 (4)의 절점방정식을 고려하면 식 (36)의 관계식을 설정할 수 있다.

$$f(\Delta y_A, \Delta y_p, \Delta y_q, \Delta y_r) = 0 \quad (36)$$

이제 전체 하도구간의 각 단위수위가 합류 또는 분기하는 절점에서 식 (36)의 보정량 방정식을 구성하고 이들 보정량 관계식들을 연립하여 해석함으로써 각 단위수위의 양단 격자점(절점)에서 수위와 유량의 보정치 ΔQ_i , Δy_i 와 ΔQ_{ii} , Δy_{ii} 를 계산할 수 있다. 다음은 식 (12)와 (13)에서 계산점 $j = jj - 1$ 부터 $j = 2$ 까지 return sweep을 수행하면 단위수로내의 모든 계산점에서 ΔQ_i 와 Δy_i 를 축차적으로 계산할 수 있다. 위의 과정을 마치면 1회의 Newton-Raphson 반복법이 종료된다. 다음은 지정된 반복횟수 만큼 Newton-Raphson 반복계산을 수행한 후, 현 시간준위에 대한 계산을 종료하고 다음 시간준위의 계산을 수행한다(전경수, 1996).

부정류의 계산에서 계산영역내 구조물과 같은 내부경계조건이 존재하는 경우 구조물의 상·하류간에는 식(1)과 (2)의 지배방정식이 만족하지 않기 때문에 수위와 유량과의 관계를 나타내는 경험공식이나 에너지 보전을 나타내는 관계식 등으로 대체하여야 한다(Verwey, 1975). 특히 댐, 수중보 등 월류형의 내부경계조건은 흐름방향이 일정하지 않을 경우 흐름상태의 변화를 추적함과 동시에 적절한 처리가 요구된다(전경수, 1996). 본 모형에서 구조물과 같은 내부경계조건은 사용자가 부프로그램을 직접 작성하여 다양한 구조물의 특성을 고려할 수 있도록 하였으며, 그 기본 방정식의 일반적인 형태는 식 (37)~(39)와 같다.

$$Q = f(y_j^{n+1}, y_{j+1}^{n+1}) \quad (37)$$

$$y = f(Q_j^{n+1}, Q_{j+1}^{n+1}) \quad (38)$$

$$Q_j^{n+1} - Q_{j+1}^{n+1} = 0 \quad (39)$$

3. 모형의 안정성 및 정확성 검토

Loopnet 모형은 폐합형수계 모형에도 적용할 수 있도록 개발되었다. 따라서 본 모형의 안정성 및 정확성을 검증하기 위하여 그림 3과 같이 하도 ①, ⑦은 하폭 100 m, 하도 ②, ③ 및 ⑥은 50 m, 하도 ④, ⑤는 25 m인 직사각형 단면으로 폐합형 시험하도를 구성하였으며, $\Delta x = 1,000$ m, $\Delta t = 100$ sec, $n = 0.0001$, $\theta = 0.5$, $\Psi = 0.5$ 와 초기조건 및 상·하류단의 경계조건은 수위를 10.0 m, 유량을 1,000 m³/sec로 일정하게 하고, 하상경사를 고려하지 않은 수치적 정적상태와 하상경사 0.00005를 고려한 수치적 정상상태의 시험을 실시하였으며, 그 결과는 그림 4와 같다.

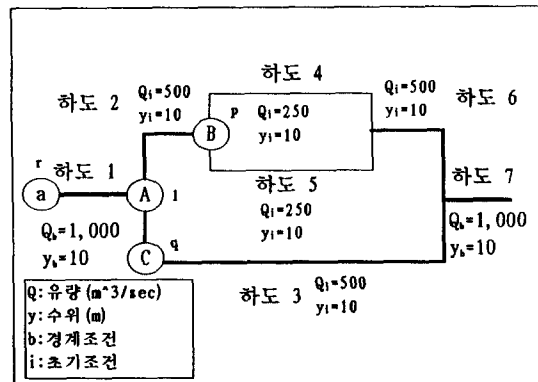


그림 3. 폐합형 시험하도의 모식도

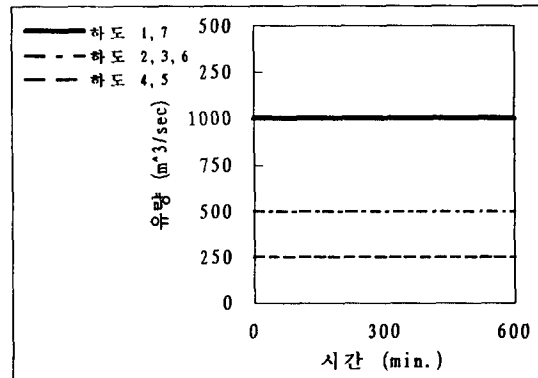


그림 4. 정상상태 및 정적상태 시험결과

4. 모형의 적용 및 검토

4.1 대상하천구간의 선정

폐합형수계 모형의 적용대상을 굴포천으로 선정하였다. 굴포천은 유역면적 133.8 km²으로 인천광역시 남동구 간석동의 철마산(EL.201m)에서 발원하여 인천시 북구의 도심지와 경기도 부천시를 거쳐 김포군 고촌면 신곡리에서 한강 본류에 유입하는 준용하천이다. 굴포천 유역은 하천경사가 매우 완만하고 하폭이 좁아 통수능력이 부족하여 홍수로 인하여 한강 본류의 외수위가 상승하면 자연배수가 불가능하여 신곡양·배수장의 배수펌프에 의한 강제 배수에 의존하고 있어 적은 강우에도 상습적인 홍수피해를 입고 있으며, 급속한 도시화 및 산업화로 인해 홍수피해 규모가 점점 커지고 있는 실정이다. 굴포천 유역의 홍수피해를 근원적으로 해소하기 위하여, 굴포천의 하천개수와 인공수로를 굴착하여 홍수를 서해측으로 방류하는 굴포천 종합치수사업이 추진 중에 있으며, 방수로 구간을 확장하여 운하수로로 활용하고자 경인운하시설사업이 계획 중에 있다.

4.2 모형의 구성

4.2.1 하도망의 구성

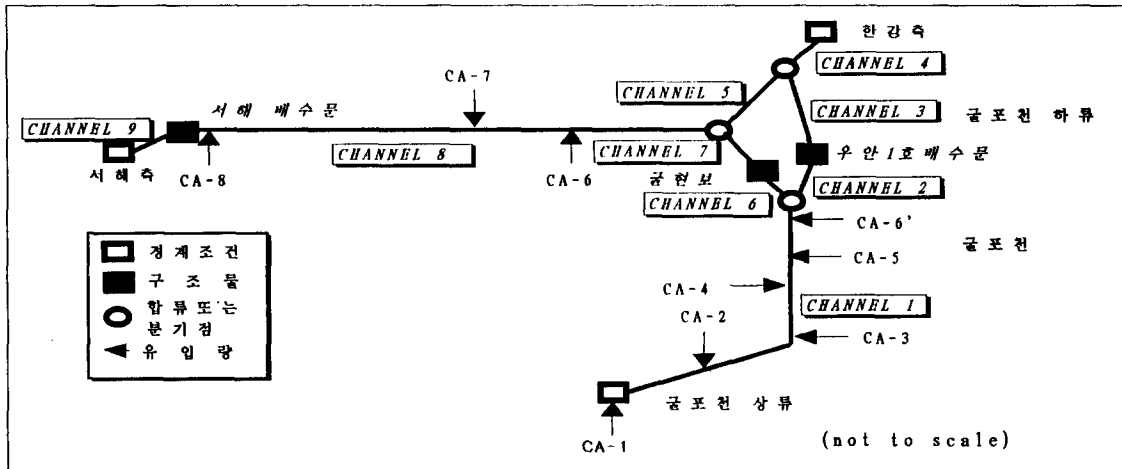


그림 5. 굴포천 유역의 하도망 구성

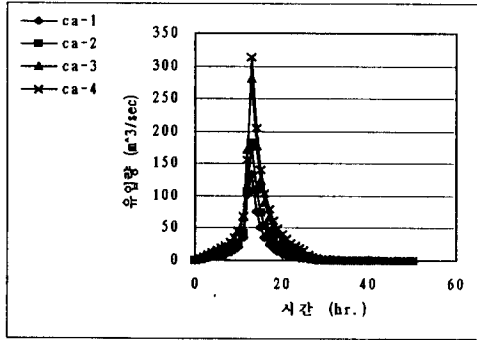
모형의 적용을 위한 하도망은 그림 5와 같이 홍수조절 시점인 굴현보를 중심으로 굴포천 상류(하도①), 우안1호 배수문 유입부(하도②), 굴포천 하류(하도③), 방수로와 굴포천의 합류점을 중심으로 서울측 우안(하도④), 서울측 좌안(하도⑤), 우안1호 배수문에서 굴현보(하도⑥), 연결수로구간(하도⑦), 방수로구간(하도⑧), 배수문에서 서해측까지(하도⑨)로 9개의 단위하도로 구성하였으며, 계획하폭 및 단면은 굴포천 본류 및 연결수로구간은 굴포천 종합치수계획 사업과 방수로구간은 경인운하시설사업 계획을 고려하여 작성하였다.

4.2.2. 지류하천의 유입량

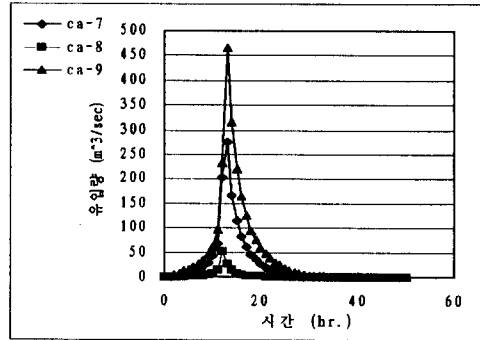
모형의 적용을 위한 지류 하천의 유입량 자료는 경인운하보완조사 수리수문 보고서(1993)의 100년 빈도 홍수수문곡선을 사용하였다(그림 6 참조).

4.2.3 모형의 적용조건

외부경계조건으로 굴포천 상류는 부평1교 지점(CA-1)에서 100년 빈도 유입량과(그림 6(a) 참조), 서울측은 경인운하계획에 따른 운하유지 수심, 서해 배수문은 서해측의 조위의 영향을 고려하였다. 내부경계조건으로 굴현보, 우안1호 배수문, 서해 배수문 등의 구조물을 고려하였다. θ 와 ψ 는 0.8과 0.5, Δt 는 30분 간격으로 하였다.



(a) 굴포천 본류구간



(b) 방수로 구간

그림 6. 굴포천 상류단 및 각 지류하천의 100년 빈도 유입량

4.3 모형의 적용결과

4.3.1 모형에서의 구조물 적용

금번 연구에서는 굴포천 종합치수사업계획에 따른 인공수로와 자연수로, 배수문, 보, 등의 구조물과 하천측의 홍수위, 바다측의 조위변화(굴포천방수로 및 부대시설공사 추가실시설계보고서, 1995) 등의 다양한 내부경계조건을 갖고있다.

굴현보는 상류측 및 하류측 월류면 경사를 고려하여 식 (40)~(42)의 Homma의 실험공식으로 월류량을 산정하였다.

$$Q = C_1 b h_1 \sqrt{2g h_1} \quad (h_2 < 0.25 - \frac{2}{3} h_1) \quad (40)$$

$$Q = \left(\frac{\alpha h_2}{h_1} + \beta \right) b h_1 \sqrt{2g h_1} \quad (0.25 - \frac{2}{3} h_1 < h_2 < 0.7 - 0.8 h_1) \quad (41)$$

$$Q = C_2 b h_1 \sqrt{2g(h_1 - h_2)} \quad (0.7 - 0.8 h_1 < h_2) \quad (42)$$

여기서 h_1 및 h_2 는 상류 및 하류측의 수위, b 는 수문의 폭, $C_1 = 0.31 + 0.23h_1/\alpha$, $\alpha = -0.03C_1$, $\beta = 1.018C_1$, $C_2 = 2.6C_1$ 이다.

굴현보 지점의 유입량 및 월류량을 산정한 결과는 그림 7과 같다. 초기에는 굴포천 유역의 유입량이 우안1호 배수문으로 방류되므로 월류량은 없고

유입량이 증가하면 지체시간을 두고 굴현보를 월류하였다.

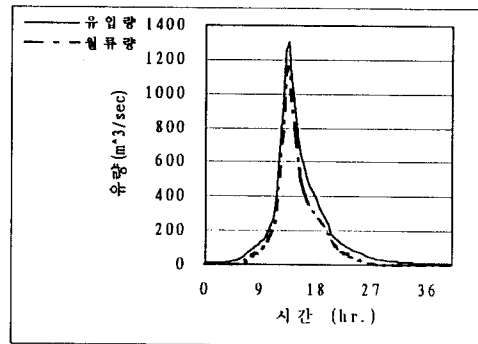


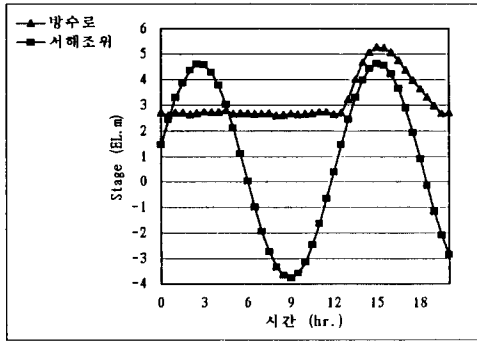
그림 7. 굴현보의 유입량 및 월류량

우안1호 배수문은 식 (43)의 수위-유량관계 곡선식(굴포천방수로 및 부대시설공사 추가실시설계보고서, 1995)으로 방류량을 산정하였다.

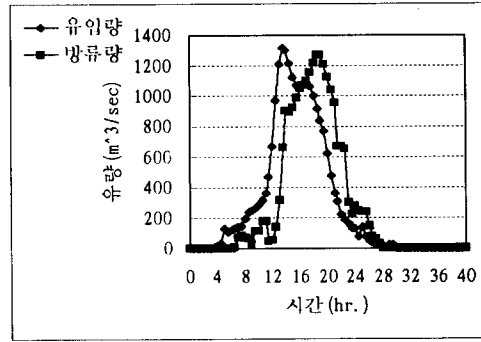
$$Q = 4.2469h_1^2 - 3.3005 \quad (43)$$

서해 배수문은 방수로와 서해측의 조위변화를 고려하여 식 (44)와 (45)로 방류량을 산정하였으며, 홍수시 서해측 조위가 방수로구간의 홍수위보다 낮으면 수문을 개방하고, 방수로내 수위는 운하의 운영수위를 유지하도록 하였다.

$$Q = C_1 b h_2 \sqrt{2g \Delta h_1} \quad (h_1 \geq d, \Delta h < \frac{1}{3} h_1) \quad (44)$$

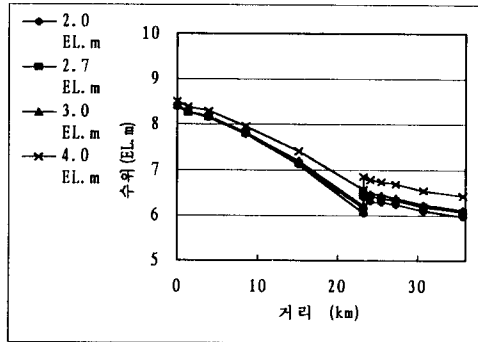


(a) 방수로수위와 서해측 조위계산 결과

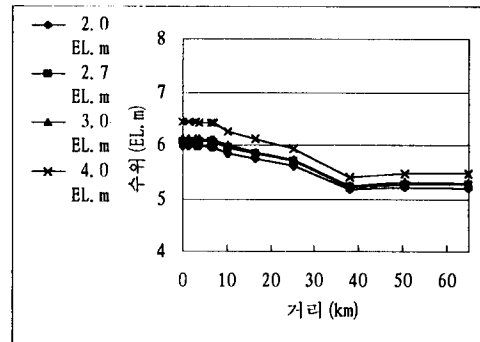


(b) 배수문의 유입량 및 방류량

그림 8. 방수로 홍수위 및 서해측 조위 모의운영 결과

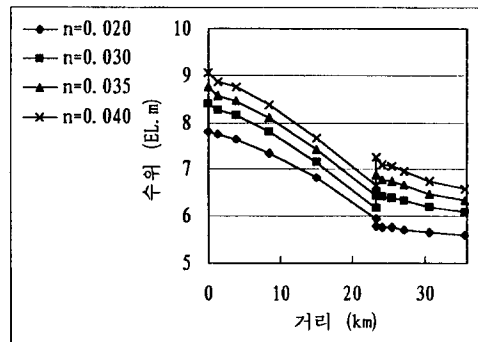


(a) 굴포천 구간

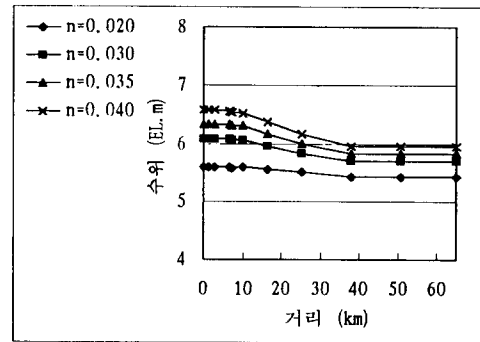


(b) 방수로 구간

그림 9. 주운수로의 유지수위 변화에 따른 홍수위 산정결과 비교



(a) 굴포천 구간



(b) 방수로 구간

그림 10. 조도계수 변화에 따른 홍수위 산정결과 비교

$$Q = 1.7C_1 b h_1^{3/2} \quad (h_1 \leq d, \Delta h > \frac{1}{3} h_1) \quad (45)$$

여기서 C_1 은 0.40, h_1 은 상류단의 수위 h_2 는 하류

단의 수위, $\Delta h = h_1 - h_2$, b 와 d 는 배수문의 폭 및 개도이다. 서해측의 조위는 대조평균 만조위 EL. 4.630m, 파고 4.203m, 주기는 12시간 25분의 정현곡선(경인운하 타당성조사 보고서, 1992)으로

모의발생 시켰으며, 서해측 조위의 변화와 방수로 구간으로 유입되는 홍수량을 여러번 모의운영하여 방수로구간의 홍수위가 최고가 되도록 하였다(그림 8(a) 참조). 서해배수문의 유입량과 방류량 계산결과는 그림 8(b)와 같다.

4.3.2. 주운수로의 유지수위와 조도계수의 영향 검토

방수로구간은 경인운하계획에 따라 주운수로로 활용하게 될 경우 주운을 위한 상시 유지수위가 필요하게 된다. 운하의 유지수위에 따라 홍수위의 변화를 고려하기 위하여 유지수위를 EL. 2.0m~EL. 4.0m로 하여 비교·검토 하였다. 그 결과는 그림 9와 같이 굴포천 본류와 방수로구간 모두 운하의 운영수위는 홍수위 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되었다. 따라서 운하의 유지수위는 홍수위보다 운하구간을 통과하는 선박 및 물동량 등을 고려하여 우선 결정하여야 타당할 것으로 분석되었다. 굴포천의 본류구간은 자연하천을 개수하고, 방수로구간은 인공수로를 개설하게 되므로 수로의 형상 및 운영·유지방법에 따라 조도계수를 여러 범위로 가정할 수 있다. 따라서 조도계수를 0.02~0.04로 변경하여 홍수위를 비교·검토하였다. 그 결과 그림 10과 같이 조도계수가 커짐에 따라 굴포천 본류와 방수로구간의 홍수위가 상승하였다.

6. 결 론

Loopnet 모형은 폐합형하천 및 감조하천의 수리 계산, 하도의 홍수추적, 배수위 계산과 수문, 보, 관개배수시설 등의 수공구조물의 계획과 설계에 사용할 수 있는 부정류 해석 프로그램이다. 본 연구에서는 이 모형을 폐합형 시험하도와 굴포천에 적용하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 폐합형의 시험하도를 구성하여 수치적 정적상태와 정상상태를 시험한 결과 안정성 및 정확성에 있어 신뢰할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 폐합형 수계인 굴포천을 대상으로 배수문, 보 등의 다양한 하천구조물과 바다측의 조위변화, 유역의 홍수유입 등을 고려하여 홍수위를 산정하여

모형의 실용성을 입증하였다.

(3) 굴포천의 적용결과, 주운수로의 유지수위 변화에 따른 홍수위 산정결과 굴포천 본류와 방수로구간 모두 운하의 운영수위는 홍수위 변화에 큰 영향을 미치지 못하였다. 따라서 운하의 유지수위는 홍수위 보다 운하구간을 통과하는 선박의 규모 및 물동량 등을 고려하여 우선 결정하여야 타당할 것으로 분석 되었으며,

(4) 조도계수는 홍수위 산정에 가장 중요한 물리적 요소 중의 하나이므로 수로의 형상 및 유지관리 상태에 따른 적절한 조도계수의 결정이 중요한 문제로 분석 되었다.

금번 연구 결과 Loopnet 모형을 다양한 내부경계조건을 갖는 폐합형수계의 수공구조물의 계획과 설계에 크게 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- 경인운하 기본계획 및 기본설계 보고서. (1996). 한국수자원공사.
- 경인운하 보완조사 수리수문 보고서. (1993). 한국수자원공사.
- 경인운하 타당성 조사 보고서. (1992). 한국수자원공사.
- 굴포천 방수로 및 부대시설공사 추가실시설계보고서. (1995). 한국수자원공사.
- 굴포천 종합치수사업 2단계실시설계보고서. (1992). 한국수자원공사.
- 박봉진, 박정기, 정관수 (1995). “댐방류에 따른 하류홍수추적연구(I).” '95년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 47-478.
- 박봉진, 김규문 (1996). “댐방류에 따른 하류홍수추적연구(II).” '96년 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 247-253.
- 박재홍 (1993). “자연 하천에서 Preissmann기법의 수치 불안정성 해석,” 석사학위논문, 경북대학교.
- 배종찬 (1993). “GIS(지리정보시스템)를 이용한 수자원관리 및 계획에 관한 연구.” 연구보고서, 한국수자원공사.
- 심순보 (1975). “Double Sweep Algorithm을 이용한 Implicit Difference Scheme에 의한 하천류의 추적.” 대한토목학회지, 제23권, 제2호, pp. 153-

- 165.
- 이종태 (1982). "Preissmann기법에 의한 1차원 부정류 해석." 한국수문학회지, 제15권, 제1호, pp. 57-62.
- 이환기 (1987). "수치모형에 의한 개수로 Network의 부정류 해석." 제8회 한국대담학회 학술발표회 발표집.
- 전경수 (1996). "월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구." 한국수자원학회지, 제29권, 제2호, pp. 153-165.
- 한건연 (1987). "하천에서의 홍수와 해석을 위한 수치모형의 개발." 한국수문학회지, 제22권, 제2호, pp. 223-231.
- 한건연, 박재홍, 이종태 (1994). "개수로에서의 상류-사류영역에 대한 부정류 해석." 한국수문학회지, 제27권, 제2호, pp. 85-96.
- Abbott, M.B. (1992). *Computational hydraulics: Elements of the theory of free surface flow*. Pitman, London.
- Abbott, M.B., and Basco, D.R. (1989). *Computational fluid dynamics: An introduction for engineers*. Longman Scientific & Technical.
- Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr., and Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pitman.
- Fread, D.L. (1987). "National weather service operational dynamic wave model Version 07/18/84." National Weather Service, NOAA, Silver Spring, Maryland.
- Liggett, J.A., and Cunge, J.A. (1975). "Numerical methods of solution of the unsteady flow equations." *Unsteady Flow in open channels*, K. Mahmmud and V. Yevjevich, eds., Water Resources Publications, Fort Collins, Colo., pp. 89-182.
- Verwey, A. (1975). "On external and internal boundary condition and their influence on net flows and mean water levels in systems of channels." *Proc of 16th Congress of the IAHR*, Sao Paulo, Vol. 4.

〈접수: 1996년 1월 8일〉