

한강 본류에의 적용을 위한 FLDWAV 모형의 개선

Enhancement of FLDWAV Model for Its Application to the Main Reach of the Han River

전 경 수* / 김 진 수** / 이 상 호***

Jun, Kyung Soo / Kim, Jin Soo / Lee, Sang Ho

Abstract

FLDWAV model was modified such that it can adequately simulate the effect of Jamsil and Singok submerged weirs in the main reach of the Han River. The enhanced model combines weir-type discharge equations for overflow at fixed weir and Manning equation for fluvial-type flow at the movable weir. Equations for weir overflow include those for submerged weir flow and free overflow. Gates of the movable weir may be open or closed for the simulation. In order to test the simulation capabilities, the enhanced model was applied for various flow conditions at submerged weirs. Backwater effect due to Jamsil and Singok submerged weirs were well simulated. Simulations were carried out for spring and neap tides extracted from artificial tide generated by combining M_2 and S_2 tidal constituents. Simulation results clearly indicated that tidal effect extends further upstream as the flood discharge decreases. Low flow simulation capabilities of the enhanced model was tested. Discontinuities of water surface elevation due to the submerged weirs were successively simulated.

keywords : FLDWAV model, unsteady flow, submerged weir, Han River

요 지

한강 본류의 잠실 및 신곡 수중보가 흐름에 미치는 영향을 적절히 모의할 수 있도록 FLDWAV 모형을 수정, 개선하였다. 고정보 측에서 발생하는 월류형 흐름에 대해서는 월류 유량 관계식을, 가동보 측에서의 하도형 흐름에 대해서는 Manning 형의 유량관계식을 각각 적용함으로써 복합적인 형태의 수중보 흐름을 모의하도록 하였다. 월류 유량 식으로는 수중 위어형 및 자유 월류형 흐름에 대한 식들이 적용 가능하며, 가동보 개방시 또는 미개방시의 흐름을 모두 모의할 수 있다. 모형의 적용성을 검증하기 위하여 수중보 지점에서의 다양한 조건에 대하여 계산을 수행한 결과, 각 경우에 대한 배수효과가 잘 모의되었다. M_2 및 S_2 2개 분조에 대한 합성 조위를 생성, 대조 및 소조시의 조위 조건을 하류단 경계조건으로 하여 과거 홍수사상에 대한 모의계산을 수행하였다. 홍수규모가 작을수록 대조 및 소조시 계산유량의 차이가 커지고, 감조구간도 상류쪽으로 확장되는 경향이 명확히 나타났다. 평수시 흐름에 대한 모의 기능을 검사한 결과, 수중보의 존재로 인한 수위의 불연속성이 잘 모의되었다.

핵심용어 : FLDWAV 모형, 부정류, 수중보, 한강

* 성균관대학교 토목환경공학과 부교수

Associate Prof., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea
(e-mail: ksjun@yurim.skku.ac.kr)

** 성균관대학교 토목환경공학과 대학원 박사과정

Graduate Res. Asst., Dept. of Civil and Envir. Engrg., Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

*** 부경대학교 건설공학부 부교수

Associate Prof., Div. of Construction Engrg., Pukyong National Univ., Busan 608-737, Korea

1. 서 론

한강 하류구간의 홍수 시 및 평수기 흐름에 가장 큰 영향을 미치는 하천구조물은 잠실 및 신곡 수중보이다. 잠실 수중보는 1982년부터 추진된 한강종합개발사업에 따른 상시수위 저하로 예상되는 제반 문제점을 해결하기 위하여 1986년에 건설되었다. 즉, 한강의 일정수위 및 수심을 유지하여 하천 경관을 개선하고, 수상이용의 활성화 및 기존 수리구조물의 기능 보호를 위하여 건설된 하천시설물로서 잠실대교 직하류 지점에 위치하고 있다. 고정보와 가동보의 복합보로서, 가동보는 수세(flush)를 위하여 평시에는 주기적으로 부분 개방을 하고, 유량이 1500 m³/s 이상이 되면 완전 개방하도록 되어 있다. 신곡 수중보는 잠실 수중보와 마찬가지로 한강개발사업 중 하도 정비로 인한 상시 수위의 저하로 발생하는 이수상의 문제점과 연안지대의 지하수위 변동으로 인한 지반침하 문제, 연안 농경지의 용수공급 문제, 수리 구조물에 발생하는 제반 문제를 해결하고, 하천공간을 이용하여 인공호반을 조성, 도시 경관을 극대화하려는 목적으로 건설되었다. 잠실 수중보와 마찬가지로 고정보와 가동보의 복합형으로서, 서해안 조위의 영향을 크게 받는 지점에 위치하여 조위 상승에 따라 역방향 흐름이 발생하기도 한다(김원과 김창완, 1998).

팔당댐 하류부를 포함한 하천구간을 대상으로 한 부정류 계산모형에 관해서는 많은 연구가 수행되어 왔다(김상호와 김원, 2002; 김원 등, 1995, 1996, 2001; 유명관과 전경수, 2004; 윤용남과 박무중, 1992; 이상화와 이길성, 1992; 이정규와 이창현, 2004; 이종태 등, 1993; 최병호와 서경석, 1987; 최병호 등, 1987, 1992; 황의준과 전경수, 1997). 그러나, 월류 흐름에 대한 수리학적 특성(Henderson, 1966)과 이를 부정류 계산모형에 반영하는 방법론(Cunge et al., 1980)에 대해서는 이미 잘 알려져 있는 반면, 수중보의 영향을 고려하기 위하여 이를 적용한 것은 황의준과 전경수(1997) 및 유명관과 전경수(2004)에 국한된다. 잠실 및 신곡 수중보에서의 홍수시 흐름은 고정보 측의 월류형 흐름과 가동보 측의 하도형 흐름이 공존하는 매우 독특한 형태를 나타내고 있다. 이러한 복합적인 흐름 양상은 단순한 월류 흐름의 처리 기능만으로는 모의가 불가하다. 따라서 황의준과 전경수(1997) 및 유명관과 전경수(2004) CHARIMA 모형(Holly et al., 1990)의 흐름모형과 같은 폐합형 수계모형을 이용하여 수리학적 모델링을 수행한 바 있다. 일반적으로 수지형인, 즉 폐합형이 아닌 하천수계에 대해서 굳이 복잡한 폐합형 모형을 적용할 필요는 없으나, 현재 알려진 수지형 모형 중에는 한강 하류부의 특수한

상황을 반영할 수 있는 모형은 부재한 상태이다.

현재 한강 홍수 통제소의 수리학적 하도추적 시스템은 미국 기상청의 FLDWAV(구 DWOPER) 모형(Fread and Lewis, 1998)을 기반으로 하고 있다. FLDWAV 모형은 상류와 사류의 혼합류, 댐 붕괴 홍수파, 측방 월류, 저류지, 폐경계 구간을 포함하는 하도에 대한 흐름 계산 등 다양한 기능을 갖춘 수지형 하천 수계에 대한 종합적인 부정류 계산모형으로서 국내에서 널리 사용되고 있다. 현재 FLDWAV 모형에는 상기한 바와 같은 수중보 흐름의 수리학적 특성을 반영할 수 있는 모의 기능이 없다. 따라서 이러한 기능을 갖춘 새로운 모형의 도입을 생각할 수 있으나, 그에 따른 시스템의 재구성에 상당한 기간과 노력이 요구될 뿐만 아니라, 기존의 모형이 지니고 있는 여타의 기능들을 잃게 되는 문제점이 있다. 이러한 점을 감안한다면 기존의 FLDWAV 모형에 수중보 흐름 모의 기능을 추가하는 것이 현실적인 개선방향이 될 수 있다. 현재 한강 홍수통제소의 모형은 잠실 수중보의 경우 과거 홍수사상에 대한 모의계산으로부터 산정된 수중보 지점 수위가 관측수위를 가장 잘 근사시킬 수 있도록 수위-유량 관계를 도출하여 사용하고 있다(한강홍수 통제소, 1994; 해양수산부, 2001). 그러나 현재 설치되어 있는 수중보의 제원 또는 운영방식의 변화, 새로운 하천 구조물의 설치 등으로 인하여 수중보에서의 흐름조건이 바뀔 경우에는 현재 도출되어 있는 수위-유량 관계를 적용할 수 없다는 문제가 있다. 조위의 영향으로 역방향 흐름이 발생할 수 있는 신곡 수중보의 경우에는 이러한 방법을 사용할 수 없으며, 따라서 현재 신곡 수중보의 경우에는 월류 표고를 하상의 표고로 간주하여 계산을 수행하도록 되어 있다. 또한 수리학적 계산모형의 주된 기능이 홍수시의 흐름계산이기는 하지만, 수중보 상류 및 하류의 흐름이 단절될 수 있는 평수시에 대한 모의 기능까지를 고려한다면 수중보 흐름에 대한 수리학적 모의 기능이 개선이 요구된다. 따라서 본 연구는 잠실 및 신곡 수중보에서의 다양한 흐름 양상에 따른 모의가 가능하도록 수지형 하천 수계에 대한 계산모형인 FLDWAV 모형을 보완, 개선하고자 수행되었다.

2. FLDWAV 모형

2.1 지배방정식 및 경계조건

바람에 의한 수표면 전단응력, 측방 유입에 의한 흐름 방향 운동량 감소를 무시하면, FLDWAV 모형의 지배방정식은 다음 Eq. (1) 및 (2)와 같은 연속방정식 및 운동량방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad (1)$$

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

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. A_0 는 흐름에 기여하지 않는 저류 단면적이며, q 는 단위 길이 당 측방 유출 또는 유입량으로서 각각 기지의 값을 갖는다. α 는 운동량 보정계수, g 는 중력가속도이며, x 와 t 는 각각 공간 및 시간좌표를 나타낸다. S_e 는 단면의 급 확대 또는 축소에 따라 국소적으로 발생하는 단위 길이당 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.

상류단 경계조건으로는 매 시각 유량 또는 수위를 부여할 수 있다. 하류단 경계조건으로는 매 시각 유량이나 수위가 주어지거나 수위-유량 관계식이 주어질 수 있다. 적용 가능한 수위-유량 관계식에는 Manning의 식, 한계 조건에 대한 수위-유량 관계식 등이 포함된다.

2.2 수치해법

FLDWAV 모형에서 사용되는 유한차분법은 Preissmann의 4점 음해법으로서(Liggett and Cunge, 1975; Cunge et al., 1980), 지배방정식 (1) 및 (2)에 대한 차분식은 각각 다음 Eq. (4) 및 (5)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Fn_1(y_i^{n+1}, y_{i+1}^{n+1}, Q_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}) = 0 \quad (4)$$

$$Fn_2(y_i^{n+1}, y_{i+1}^{n+1}, Q_i^{n+1}, Q_{i+1}^{n+1}) = 0 \quad (5)$$

여기서 i 와 n 은 각각 공간 및 시간격자를 나타내는 첨자이다. 각 계산점에서의 수위 및 유량에 관한 Eqs. (4) and (5)로 구성되는 연립방정식은 비선형이며, 그 해는 Newton-Raphson 방법을 적용하여 구한다. Newton-Raphson 방법의 적용에 따라 매 반복계산 단계마다 구성되는, 수위 및 유량 보정치에 관한 방정식은 다음과 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$A_1 \Delta y_{i+1} + B_1 \Delta Q_{i+1} = C_1 \Delta y_i + D_1 \Delta Q_i + G_1 \quad (6)$$

$$A_2 \Delta y_{i+1} + B_2 \Delta Q_{i+1} = C_2 \Delta y_i + D_2 \Delta Q_i + G_2 \quad (7)$$

결국 매 구간 ($i, i+1$)에 대하여 보정치 $\Delta y_i, \Delta y_{i+1}, \Delta Q_i$ 및 ΔQ_{i+1} 에 관한 한 쌍의 선형 대수방정식이 Eq. (6) 및 (7)로서 주어진다. 전체 계산구간의 수를 N , 즉 격자점수를 $(N+1)$ 이라 하면, $(2N)$ 개의 보정치에 관한 방정식이 주어지며, 여기에 두개의 경계조건식으로부터 유도되는 방정식들을 추가하면 총 $(2N+2)$ 개의 선형 방정식이 구성되어, 이 연립방정식의 해로서 각각 $(N+1)$ 개의 수위 및 유량 보정치들을 구할 수 있다.

흐름이 사류인 구간에 대해서는 두 개의 경계조건이 모두 상류단에 주어지며, 이들에 대한 Newton-Raphson 선형 방정식들로부터 상류단의 수위와 유량 보정치를 구하고, 이를 이용하여 그 다음 계산점에서의 보정치들을 구하는 방식으로 상류로부터 하류 방향으로 축차적으로 보정치들을 구하게 된다. 상류(sub-critical flow) 구간에 대해서는 상류단 및 하류단에서의 경계조건이 각 한 개씩 주어진다. 이 경우에는 다음과 같은 double sweep 알고리즘에 의하여 해를 구하게 된다. 우선 지점 i 에서의 수위 및 유량 보정치 간의 관계식을 다음의 형태로 나타낸다.

$$\Delta Q_i = E_i \Delta y_i + F_i \quad (8)$$

또한, Eq. (6) 및 (7)로부터 ΔQ_i 를 소거하면 다음과 같이 된다.

$$\Delta y_i = L_i \Delta y_{i+1} + M_i \Delta Q_{i+1} + N_i \quad (9)$$

여기서

$$L_i = \frac{A_1 D_2 - D_1 A_2}{C_1 D_2 - D_1 C_2} \quad (10)$$

$$M_i = \frac{B_1 D_2 - D_1 B_2}{C_1 D_2 - D_1 C_2} \quad (11)$$

$$N_i = \frac{D_1 G_2 - G_1 D_2}{C_1 D_2 - D_1 C_2} \quad (12)$$

지점 $(i+1)$ 에서의 수위 및 유량 보정치간의 관계를 나타내는 E_{i+1} 및 F_{i+1} 은 Eq. (6), (8) 및 (9)로부터 다음

과 같이 유도된다.

$$E_{i+1} = \frac{-A_i + L_i(C_1 + D_1 E_i)}{B_1 - M_i(C_1 + D_1 E_i)} \quad (13)$$

$$F_{i+1} = \frac{G_i + D_1 F_i + N_i(C_1 + D_1 E_i)}{B_1 - M_i(C_1 + D_1 E_i)} \quad (14)$$

상류단 경계조건으로부터 E_1 및 F_1 이 주어지면 하류단($i = N$)까지의 매 지점에 대한 E_i 및 F_i 의 값을 Eq. (13) 및 (14)에 의하여 축차적으로 구해나간다. 하류단 경계지점에 대하여 E_N 및 F_N 의 값이 구해지면 하류단 지점에 대한 Eq. (8) 및 하류단 경계조건에 따른 또 하나의 선형 보정량 관계식을 연립하여 풀어서 Δy_N 및 ΔQ_N 을 구한다. 이들 값과 Eq. (9) 및 (8)로부터 각 지점 수위 및 유량 보정치를 상류방향으로 축차적으로 계산한다.

이로써 1회의 Newton-Raphson 반복계산이 종료된다. 이와 같이 계산된 각 계산점에서의 수위 및 유량 보정치들을 이전 반복계산 단계(m)에서 구해진 각 계산점에서의 수위 및 유량값에 더함으로써 금번 계산단계($m+1$)에서의 값들이 구해지고 이로부터 다음단계의 계산을 수행한다. 본 계산모형에서는 수위 및 유량보정 최대치의 절대값이 어느 정도 이하로 작아지거나, 허용최대반복계산 회수에 이르면 현 시간준위($n+1$)에 대한 계산을 종료하고 다음 시간 준위에 대한 계산이 수행된다.

3. 수중보 흐름 모의를 위한 FLDWAV 모형의 개선

기존의 FLDWAV 모형을 사용할 경우 잠실 수중보 및 신곡 수중보에서의 흐름을 수리학적으로 모의하는 것이 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 모의 기능이 추가되도록 FLDWAV 모형을 수정하였다. 수정된 내용에 대한 이론적 배경은 다음과 같다.

계산구간 내부에 수중보가 존재하는 경우, 수중보의 상·하류 간에는 1차원 부정류 흐름에 관한 연속 방정식 및 운동량 방정식을 대체할 두 개의 수리학적 관계식에 대한 차분식, 즉 Eq. (4) 및 (5)에 상응하는 두 개의 식과 그에 따른 Newton-Raphson 보정치에 대한 선형 방정식의 계수들이 요구되는데, 이들은 다음과 같이 주어질 수 있다.

수중보 상류 및 하류의 계산점을 각각 i 및 $(i+1)$ 이라 하면 연속 방정식에 대응하는 차분식은 다음과 같이 나타낼 수 있으며,

$$Q_i^{n+1} = Q_{i+1}^{n+1} \quad (15)$$

운동량 방정식에 대응하는 차분식은 월류 유량 관계식으로서 흐름의 방향성을 고려하여, 다음과 같은 일반적인 형태로 나타낼 수 있다.

$$|Q_i^{n+1}| = f(y_u, y_d) = f_w(y_u, y_d) + f_c(y_u, y_d) \quad (16)$$

여기서 f_w 는 고정보 측에서의 월류 흐름에 관한 유량함수를, f_c 는 완전 개방된 가동보에서의 하도형 흐름에 대한 유량 관계함수를 각각 나타낸다. 흐름의 방향이 순방향인 경우, 즉 전체 계산구간의 상류측에서 하류측으로 월류하는 경우에는 $y_u = y_i^{n+1}$, $y_d = y_{i+1}^{n+1}$ 이며, 역방향인 경우에는 그 반대이다. 월류 함수 f_w 는 수중 위어형 및 자유 월류형 흐름으로 구분하여 각각 다음과 같이 주어진다(Fig. 1 참조).

$$f_w(y_u, y_d) = \mu_s b \sqrt{2g} \sqrt{y_u - y_d} (y_d - y_w) \quad \left((y_d - y_w) \geq \frac{2}{3}(y_u - y_w) \right) \quad (17a)$$

$$f_w(y_u, y_d) = \mu_f b \frac{2}{3} \sqrt{\frac{2g}{3}} (y_u - y_w)^{3/2} \quad \left((y_d - y_w) < \frac{2}{3}(y_u - y_w) \right) \quad (17b)$$

여기서 μ_s 와 μ_f 는 각각 유량계수이며, y_w 는 월류부의 표고, b 는 월류부의 폭이다.

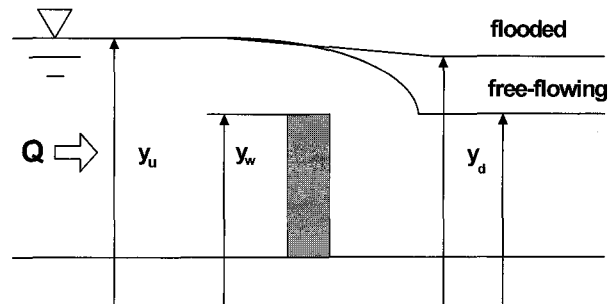


Fig. 1. Definition sketch for weir overflow

가동보가 완전 개방되어 발생하는 하도형 흐름에 대해서는 다음과 같은 유량 관계식을 적용한다.

$$f_c(y_u, y_d) = \frac{\bar{K}}{\sqrt{\Delta x}} (y_u - y_d)^{1/2} \quad (18)$$

$$\bar{K} = \frac{1}{2}(K(y_u) + K(y_d)) \quad (19)$$

여기서 Δx 는 수중보 직상류의 계산점과 직하류의 계산점 간의 거리이며, K 는 가동보측 흐름에 대한 통수능으로서, 가동보측 통수단면의 폭(B)이 수심에 비하여 매우 크다고 보면 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$K(y) = \frac{1}{n} B (y - y_b)^{5/3} \quad (20)$$

Eq. (15)에 대한 반복계산 단계 (m+1)에서의 Newton-Raphson 선형 방정식은 다음 Eq. (21)과 같으므로

$${}^m Q_i + \Delta Q_i = {}^m Q_{i+1} + \Delta Q_{i+1} \quad (21)$$

보정량 방정식 (6)의 계수 값들은 $A_1 = C_1 = 0$, $B_1 = D_1 = 1$, $G_1 = {}^m Q_i - {}^m Q_{i+1}$ 로 된다. 유량 관계식 (16)에 대한 보정치 방정식은 다음과 같다.

$${}^m Q_i + \Delta Q_i = {}^m f + \left. \frac{\partial f}{\partial y_u} \right|_m \Delta y_u + \left. \frac{\partial f}{\partial y_d} \right|_m \Delta y_d \quad (22)$$

흐름방향이 계산점 i에서 (i+1)로 향할 경우를 양의 유량으로, 그 반대의 경우를 음의 유량으로 규정하고, $y_u = y_i$, $y_d = y_{i+1}$ 인 경우 및 그 반대의 경우에 대하여 Eq. (7)의 계수값들을 구하면 Table 1과 같다.

Table 1. Coefficients for Newton-Raphson iterations

	$y_i > y_{i+1},$ $Q_i = Q_{i+1} > 0$ $y_u = y_i, y_d = y_{i+1}$	$y_i < y_{i+1},$ $Q_i = Q_{i+1} < 0$ $y_u = y_{i+1}, y_d = y_i$
A_2	$\left. \frac{\partial f}{\partial y_d} \right _m$	$-\left. \frac{\partial f}{\partial y_u} \right _m$
B_2	0	0
C_2	$-\left. \frac{\partial f}{\partial y_u} \right _m$	$\left. \frac{\partial f}{\partial y_d} \right _m$
D_2	1	1
G_2	$-{}^m f + {}^m Q_i$	${}^m f + {}^m Q_i$

가동보가 개방되지 않은 상태에서 수중보 양측의 수위가 월류 표고보다 낮아 수중보에 의한 흐름의 불연속이 생기는 경우, 월류 흐름의 방향이 바뀌는 순간 수중보 상류와 하류의 수위가 같아지는 경우 및 자유월류형

역방향 흐름이 발생하는 경우 등 계산수리학적으로 문제가 발생할 수 있는 여러 경우(전경수, 1996)에 대한 처리가 가능하도록 하였다. 이와 같이 수중보에서의 흐름을 계산수리학적으로 모의할 수 있도록 개선된 FLDWAV 모형을 수행하기 위한 추가적인 변수 및 source program 수정에 관한 내용은 한국수자원공사(2004a)에 기술되어 있다.

4. 모형의 적용

4.1 모형의 구성

모형의 대상구간은 팔당댐부터 한강 하구의 월곶지점까지의 하천구간이다(Fig. 2 참조). 주요 지천으로 왕숙천, 탄천, 중랑천, 안양천 등이 있으며 황해로 유출되기 직전 임진강과 합류한다. 이들 지천으로부터의 유입량은 기지의 모형 입력자료로서 부여되었다. 잠실 및 신곡 수중보에서의 흐름과 관련된 모형의 입력자료는 Table 2에 정리된 바와 같다.

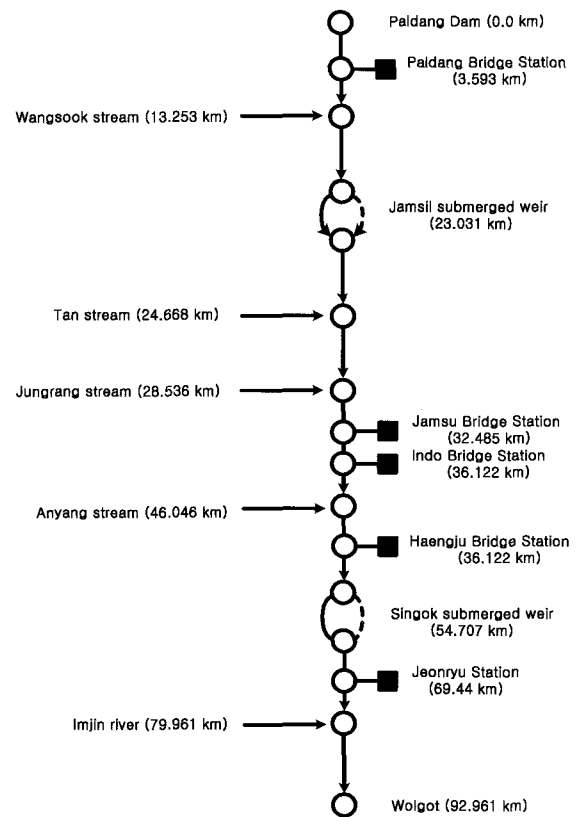


Fig. 2. Schematic representation of the unsteady flow model for the Han River

Table 3은 모의계산에 사용된 과거의 홍수사상의 기간을 팔당댐 최대방류량과 함께 나타낸 것이다. 상류단 경계조건으로는 팔당댐의 시간별 방류량이 사용되었으

Table 2. Size of Jamsil and Singok submerged weirs

Weir	Size	
Jamsil	length of the fixed weir crest	650 m
	width of fully open gates	200 m
	elevation of submerged weir crest	EL. 6.20 m
	bottom elevation of submerged weir	EL. 2.90 m
Singok	length of the fixed weir crest	883 m
	width of fully open gates	100 m
	elevation of submerged weir crest	EL. 2.40 m
	bottom elevation of submerged weir	EL. -0.50 m

Table 3. Summary of flood data

Flood event	Duration	Peak discharge of the Paldang Dam (m ³ /s)
1	1987/08/03 ~ 1987/08/09	11,068
2	1995/08/23 ~ 1995/08/27	24,956
3	2003/08/24 ~ 2003/08/26	9,369

며, 유입지천인 왕숙천, 탄천, 중랑천 및 안양천에서의 시간별 지천 유입유량은 퇴계원, 성남, 중랑교 및 안양수위표 지점에 대한 당해연도 수위-유량 관계곡선(한국수자원공사, 2004a)으로부터 산정하였다. 단, 중랑천의 경우 중랑교 수위표가 설치되기 이전에 발생한 홍수사상 1에 대해서는 인접한 탄천에서의 유입유량에 중랑천의 유역면적과 탄천의 유역면적의 비를 곱한 값을 지천 유입량으로 취하였다. 각 홍수사상에 대한 팔당댐 방류량 및 지천 유입량 자료는 한국수자원공사(2004b)에 상세히 제시되어 있다.

홍수사상 1에 대해서는 서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수 종합 대책수립 보고서(서울특별시, 1992) 및 한강 하류연안 개발계획 보고서(서울지방 국토관리청, 1989) 등의 하천측량 자료를 사용하여 단면 자료를 구축하였다. 홍수사상 2와 3에 대해서는 2000년 한강 하천정비 기본계획(서울지방 국토관리청, 2000) 상의 하천측량 결과를 사용하였다. 이들 두 자료 모두 팔당댐부터 곡릉천 합류점까지의 구간에 대하여만 측량자료가 가용하다. 따라서 곡릉천 합류점부터 월곶까지의 구간에 대해서는 곡릉천 입구의 단면자료를 외삽하여 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.

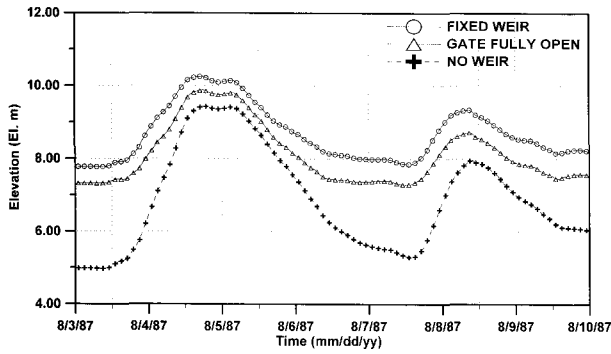
4.2 홍수시 수중보 흐름에 대한 모의 기능 검토

3장에 기술된 바와 같이 수중보 흐름의 모의 기능이 추가된 FLDWAV 모형의 적용성을 검증하기 위하여 홍수사상 1에 대한 모의계산을 수행하였다. 하류단 경계조건으로는 월곶 지점에서의 실시간 조위변화를 표준 조화함수의 형태로서 부여하였다. 월곶 지점의 조화상 수로는 2000년도에 측정된 197일간의 자료를 이용하여 산정된 55개 분조에 대한 추정치들(해양수산부, 2001, 2002)을 사용하였다.

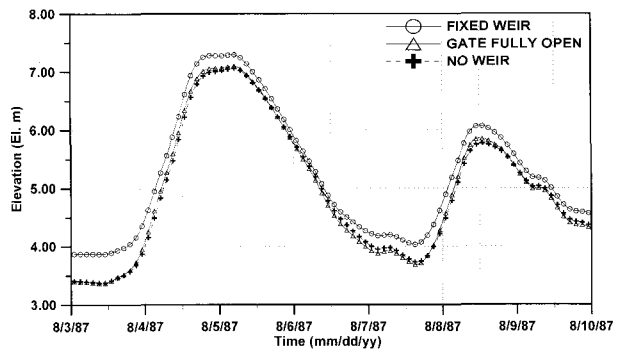
가동보가 완전 개방된 경우, 가동보가 개방되지 않은 경우 및 수중보가 존재하지 않는 가상의 경우 등 세 가지 경우에 대하여 조도계수 $n = 0.0263$ 으로 하여 계산을 수행하였다. 각 경우에 대한 모의계산 결과로서 광장 및 행주대교에서의 수위수문곡선을 Fig. 3에 나타내었다. 광장 지점은 잠실 수중보 상류 약 3 km, 행주대교는 신곡 수중보 상류 약 2 km 지점에 각각 위치한다. 수중보가 존재하지 않는 가상의 경우와 비교하여 수중보의 존재로 인한 배수 효과(backwater effect)가 잘 모의되고 있으며, 가동보가 개방되지 않을 경우의 배수효과가 완전 개방된 경우에 비하여 더 크다는 점 등 기대되는 경향들이 잘 모의되고 있다. 신곡 수중보에 의한 배수효과는 잠실 수중보의 경우에 비하여 작게 나타나고 있는데, 이는 수중보의 정점표고가 상대적으로 낮기 때문이다. 가동보를 개방할 경우 신곡 수중보에 의한 배수효과는 수중보가 존재하지 않는 경우와 비교하여 미미한 것으로 나타나고 있다.

4.3 홍수규모에 따른 조위 영향 분석

흐름이 조위의 영향을 받는 하천구간, 즉 감조구간은 조차가 클수록, 하천유량이 작을수록 상류측으로 확장된다. 한강 하구에서의 조위변화가 팔당댐 하류 구간의 홍수에 미치는 영향을 분석하기 위하여 다음과 같은 모의계산을 수행하였다. 우선 M₂ 및 S₂, 2 개 분조만을 포



(a) Gwangjang station



(b) Haengju Bridge station

Fig. 3. Stage hydrographs calculated by the enhanced FLDWAV model

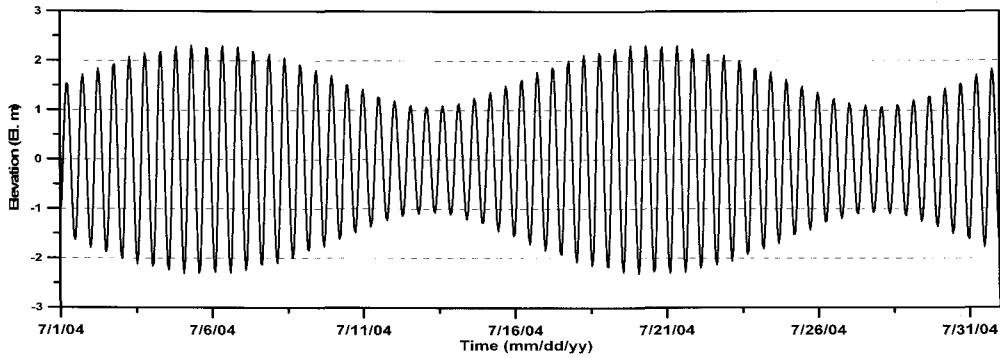


Fig. 4. Tidal elevation generated by combining M_2 and S_2 tidal constituents

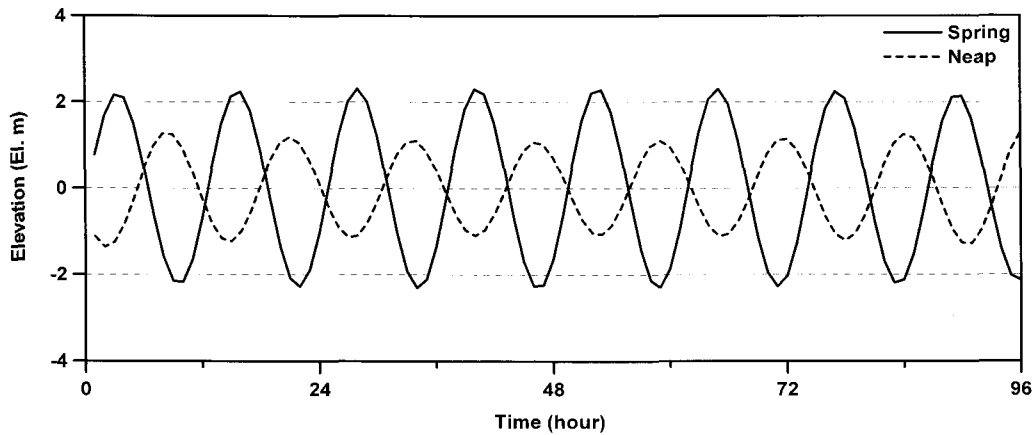
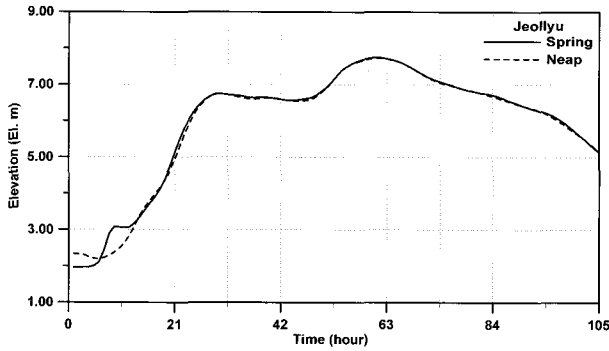


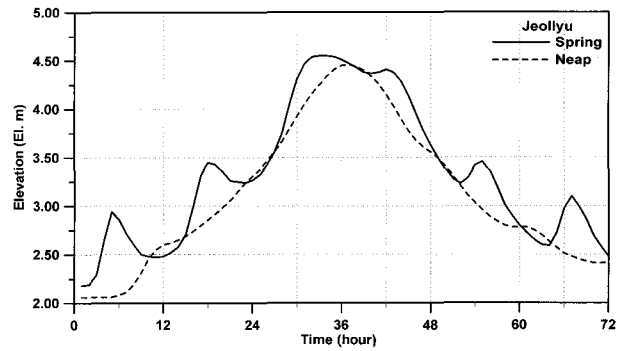
Fig. 5. Downstream boundary conditions for analyzing tidal effects

함하여 30일간의 조위를 생성하였다(Fig. 4). 각 분조의 주기는 12.4 및 12시간이며, 따라서 생성된 가상 조위는 15.5일의 주기를 갖는다. 조화상수는 해양수산부(2001)에서 추정된 M_2 및 S_2 분조에 대한 값들을 사용하였다. Fig. 5는 이로부터 각각 대조시 고조 및 소조시 저조를 중심으로 4일간의 조위 변화를 도시한 것이다. 이 두 가지 조위조건을 하루단 경계조건으로 하여 홍수사상 2 및 3(Table 2 참조)에 대하여 조도계수 $n = 0.025$ 로 모의계산을 수행하였다.

Fig. 6은 각 홍수사상 에 대한 계산결과로 대조 (spring tide) 및 소조(neap tide) 시의 전류지점에서의 수위변화를 비교하여 나타내고 있다. 홍수사상 3에 대한 전류 지점의 수위변화를 보면 대조 때에 조위의 영향이 더욱 뚜렷하게 나타남을 알 수 있으나, 홍수규모가 큰 홍수사상 2의 경우에는 별 차이를 나타내지 않고 있다. Fig. 7은 대조시의 경우에 대하여 계산된 각 지점에서의 최대 유량과 소조시에 대하여 계산된 최대유량의 차이를 나타낸 것이다. 조위의 영향을 전혀 받

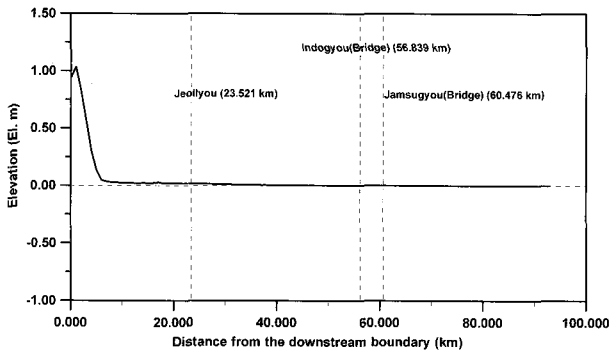


(a) Flood event 2

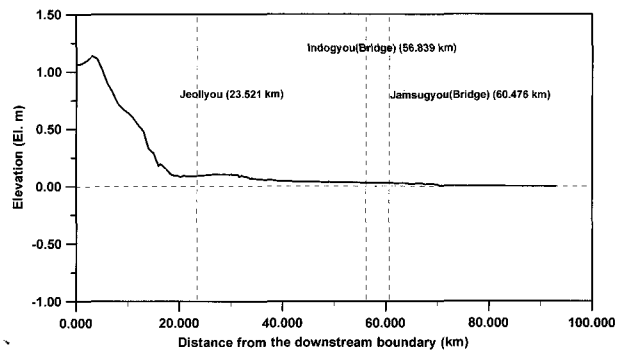


(b) Flood event 3

Fig. 6. Sensitivities of stage hydrograph at Jollyu station to the downstream boundary condition



(a) Flood event 2



(b) Flood event 3

Fig. 7. Difference of calculated peak stages due to the difference in tidal boundary conditions

지 않을 만큼 상류에 위치한 지점이라면 이 차이가 영이 된다. 홍수사상 2의 경우에는 최대 유량이 차이를 보이는 구간의 범위가 비교적 작아 인도교에도 미치지 못하고 있는 반면, 홍수규모가 작은 3번 사상의 경우에 최대유량의 차이가 커지고, 차이를 나타내는 구간의 범위, 즉 감조구간이 잠수교의 상류까지 확장됨을 볼 수 있다.

4.4 평수시 흐름 모의가능 검토

수중보에서의 다양한 흐름양상을 모의할 수 있도록 개선된 모형의 평수시 흐름에 대한 모의가능성을 검토하기 위하여 2005년 3월 11일 0시부터 14일 0시까지의 기간에 대한 모의계산을 수행하였다. 이 기간 동안의 팔당댐 방류량은 Fig. 8과 같으며, 이를 상류단 경계조건으로 부여하였다. 하류단 경계조건은 4.2 절에서와 마찬가지로 월곶 지점에서의 실시간 조위변화를 표준조화함수의 형태로서 Fig. 9와 같이 부여하였다. 잠실 및 신곡 수중보의 가동보가 모두 개방되지 않은 상태에서 고정보 측 월류 흐름만이 존재하는 경우에 대하여, 신곡 수중보 상류구간에 대해서는 조도계수 0.025로, 하류구간에 대해서는 0.015로 각각 부여하여 모의계산을 수행하

였다. Fig. 10(a)는 신곡 수중보 직상류 및 직하류 지점에서의 시간에 따른 수위 변화를 나타내고 있다. 조석의 영향으로 매일 2회에 걸쳐 하류 측 수위가 상류 측 수위보다 높아지는 것으로 모의되고 있다. 하류 측 수위가 더 높아지는 기간 동안에는 조석이 신곡수중보 상류로 전파하게 되는데, Fig. 10(b)는 그 영향이 잠실수중보 직하류까지 미칠 수 있음을 나타내고 있다. 이는 팔당댐 방류량이 $180 \text{ m}^3/\text{s}$ 일 때, 잠수교 지점에서 최대 1.1 m의 조차가 발생한다는 실측결과(김원과 김창완, 1998)로 미루어 볼 때, 납득할 만한 결과라 할 수 있다.

4.5 개선모형의 조도계수의 적용에 관한 검토

본 연구에서는 잠실 및 신곡 수중보에서의 흐름에 대한 수리학적 모의가 가능하도록 FLDWAV 모형을 개선하였다. 그러나 이러한 모형의 적용성, 즉 적용된 모형의 계산결과가 실제 현상에 근사하게 모의하는지를 좌우하는 중요한 요소는 조도계수이다. 따라서 본 연구에서 개선된 모형을 적용하기 위해서는 실측치를 사용한 모형의 보정, 즉 조도계수의 추정 및 검증과정을 거쳐야 한다. 하류부에 대한 모형의 검증을 위하여 홍수사상 3번에 대하여 조도계수를 산정, 적용하였다. 대상

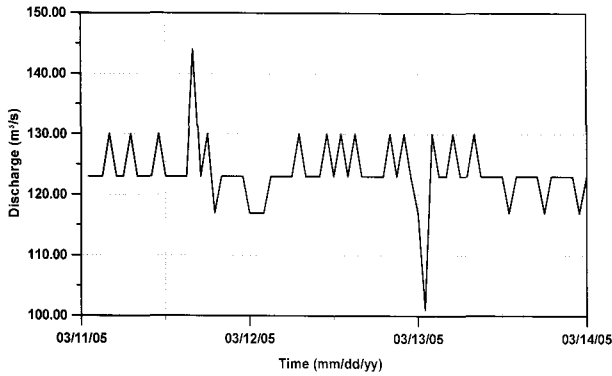


Fig. 8. Upstream boundary condition for low flow simulation

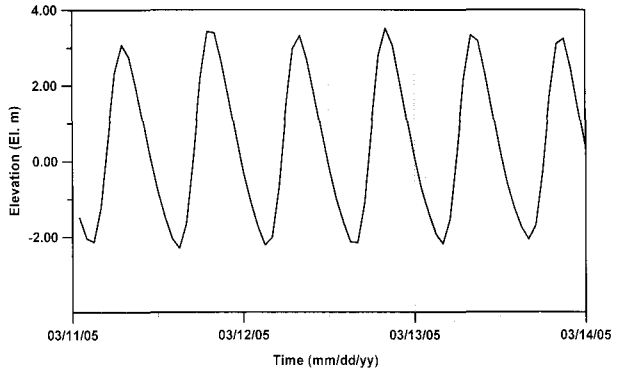
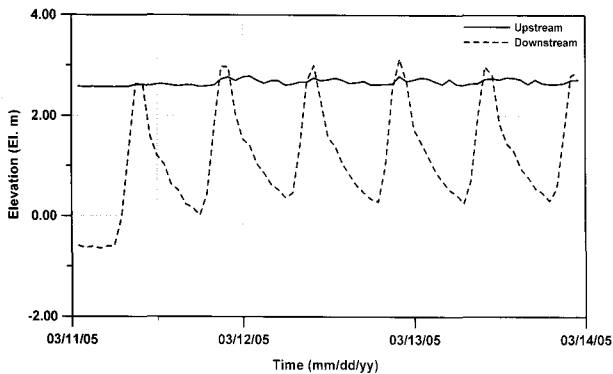
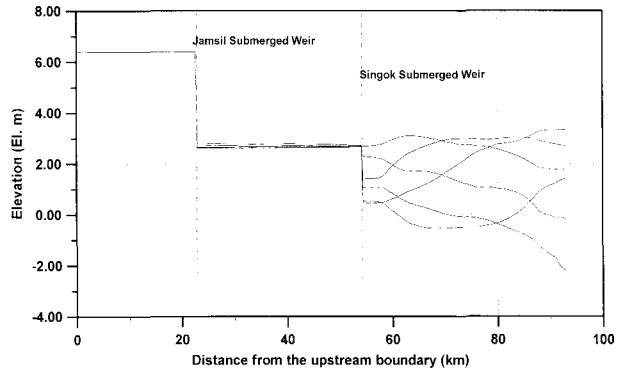


Fig. 9. Downstream boundary condition for low flow simulation



(a) Stages at the immediate upstream and downstream of Singok submerged weir



(b) Temporal variation of water surface profile

Fig. 10. Low flow simulation results

구간인 팔당댐 하류부에서 월곶까지를 잠실 수중보와 신곡 수중보를 경계로 하여 3개의 구간으로 나누었으며, 잠실수중보 및 신곡수중보 상류에 각각 위치한 팔당대교 및 행주대교 지점의 관측 수위와의 RMS 오차를 최소화 하도록 조도계수를 추정하였다(Table 4, 5 참조). 또한 이전의 다른 연구 결과와의 비교를 위하여 김상호와 김원(2000)의 조도계수 추정 결과를 동일한 구간에 대하여 해당 홍수사상이 속하는 유량등급에 대하여 산술평균하여 모형에 적용하였다. 두 경우에 대하여 적용된 조도계수를 Table 4에 정리하였으며, 표 5는 실제 관측 값과 모형의 계산 값과의 RMS 오차를 나타

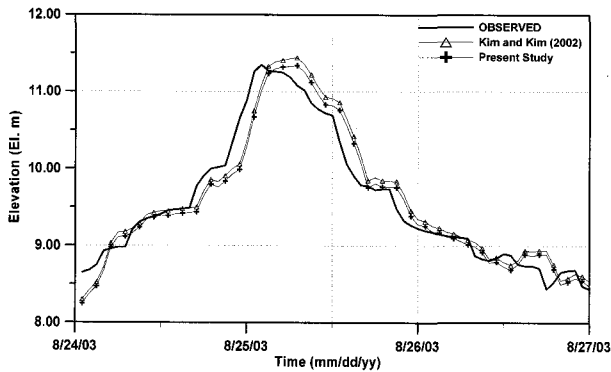
내고 있다. 팔당대교와 행주대교 지점에 대한 모형의 수행결과를 관측 수문곡선과 비교하여 Fig. 11에 도시하였다. 추정된 구간별 조도계수가 전반적으로 김상호와 김원(2000)의 경우와 유사한데 이는 수중보 흐름 모의에 관한 모형의 개선에 따른 조도계수의 영향은 미미함을 보이는 결과라 하겠다. RMS 오차의 경우에는 본 연구에서 추정된 조도계수를 적용할 경우 다소 작은 값을 보이고 있는데 이는 본 연구의 경우 홍수사상 3에 대한 관측자료를 사용하여 추정된 조도계수를 적용한 데 따른 것으로서 큰 의미를 부여하기는 어렵다.

Table 4. Manning's n for each sub-reaches

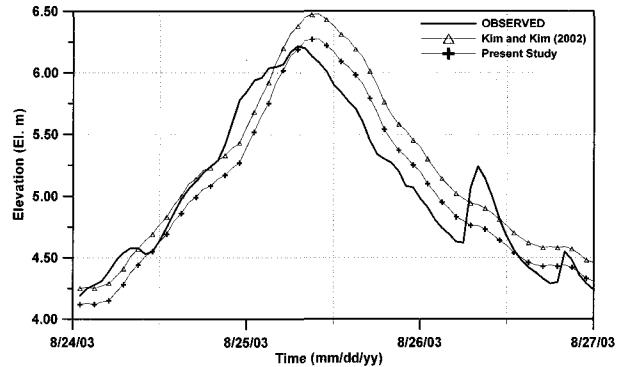
Manning's n \ reach	Paldang Dam to Jamsil submerged weir	Jamsil submerged weir to Singok submerged weir	Singok submerged weir to Wolgot
Kim and Kim (2002)	0.0307	0.0265	0.0188
Present study	0.030	0.025	0.017

Table 5. RMS Errors (m)

	Kim and Kim (2002)	Present study
Paldang Bridge	0.244	0.232
Haengju Bridge	0.277	0.217
Average	0.261	0.225



(a) Paldang Bridge station



(b) Haengju Bridge station

Fig. 11. Comparison of calculated and observed stages

5. 결 론

한강 하류부의 잠실 및 신곡 수중보가 흐름에 미치는 영향을 적절히 모의할 수 있도록 FLDWAV 모형을 수정, 개선하였다. 고정보 측에서 발생하는 자유 월류형 및 수중 위어형 월류 흐름에 대해서는 월류 유량 관계식을, 가동보 측에서의 하도형 흐름에 대해서는 Manning 형의 유량관계식을 각각 적용하여, 복합형 수중보 흐름을 모의하였다. 수중보 양측의 수위가 모두 월류 표고보다 낮아 흐름이 존재하지 않는 경우, 수중보 양측의 수위가 같아지는 경우, 자유 월류형 역방향 흐름 등 고정보 측의 다양한 형태의 흐름에 대한 모의가 가능하도록 하였다. 종전에 폐합형 수계 모형에 의하여 가능하였던 한강 본류의 잠실 및 신곡 수중보에 대한 수리학적 모의 기능을 수지형 수계 모형인 FLDWAV 모형에 포함시킴으로써 모형의 활용성을 증진하였다는 점에서 연구의 의의를 찾을 수 있다.

가동보가 완전 개방된 경우, 가동보가 개방되지 않은 경우 및 수중보가 존재하지 않는 가상의 경우 등 세 가지 경우에 대하여 계산을 수행한 결과, 수중보의 존재로 인한 배수 효과가 잘 모의되었으며, 가동보가 개방되지 않을 경우의 배수효과가 완전 개방된 경우에 비하여 더 크다는 점 등 기대되는 경향들이 잘 모의되었다. 신곡 수중보에 의한 배수효과는 잠실 수중보의 경우에 비하여 작게 나타났다. 가동보를 개방할 경우

신곡 수중보에 의한 배수효과는 수중보가 존재하지 않는 경우와 비교하여 미미한 것으로 나타났다. M_2 및 S_2 , 2 개 분조에 대한 합성 조위를 생성, 대조 및 소조시의 조위조건을 하류단 경계조건으로 하여 과거 홍수사상에 대한 모의계산을 수행하였다. 대조시의 경우에 계산된 각 지점에서의 최대 유량과 소조시에 대하여 계산된 최대유량과의 차이를 구하여, 감조구간을 도시하였다. 홍수규모가 작을수록 대조 및 소조시 계산유량의 차이가 커지고, 감조구간도 상류쪽으로 확장됨이 잘 모의되었다. 평수시 흐름에 대한 모의 결과, 잠실 및 신곡 수중보에 의한 흐름의 단절과 신곡수중보에서의 역방향 흐름 및 신곡수중보 상류 구간으로의 조석전파가 재현되었다. 팔당댐 방류량이 $150 \text{ m}^3/\text{s}$ 이하인 경우, 조석의 영향이 잠실수중보 직하류까지 미칠 수 있는 것으로 나타났다. 모형의 검증을 위하여 본 연구에 사용된 홍수사상 3에 대하여 구간별로 산정된 조도계수와 타 연구에서의 조도계수 추정 결과를 모형에 적용하여 수치모의를 시행하였다. 하류 구간으로 갈수록 조도계수는 작아지는 경향을 보이고 있으며, 두 경우의 조도계수의 차이는 크지 않다. 팔당대교의 경우 관측 수위와 계산 결과가 잘 일치하고 있으며, 행주대교의 경우에는 다소 차이를 보이고 있으나 두 경우의 RMS 오차 모두 전체적으로 작은 값을 가지고 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국수자원공사의 연구과제로서 수행되었으며, 이에 사의를 표한다.

참고 문헌

- 김상호, 김원 (2002). "한강 하류부 흐름해석을 위한 수리학적 모형의 구축." **한국수자원학회논문집**, 제35권 제5호, 한국수자원학회, pp. 485-500.
- 김원, 김양수, 우효섭 (1995). "부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정." **한국수자원학회지**, 제28권 제6호, 한국수자원학회, pp. 133-146.
- 김원, 김창완. (1998). "신곡수중보의 영향 및 흐름특성 조사." **건기연 98-097**, 한국건설기술연구원.
- 김원, 김창완, 윤광석, 윤태훈 (2001). "신곡수중보와 조석운동을 고려한 한강 본류의 흐름특성." **대한토목학회 논문집**, 제21권 제3-B호, 대한토목학회, pp. 305-314.
- 김원, 우효섭, 김양수 (1996). "1차원 St. Venant 방정식을 이용한 한강 하류부 하도의 홍수류 특성분석." **한국수자원학회지**, 제29권 제1호, 한국수자원학회, pp. 163-179.
- 서울지방 국토관리청 (1989). **한강 하류연안 개발계획 보고서**.
- 서울지방 국토관리청 (2000). **한강 하천정비 기본계획**.
- 서울특별시 (1992). **서울시 관내 하천제방 안전도 검토 및 치수 종합 대책수립 보고서**.
- 유명관, 전경수 (2004). "홍수시 댐 운영방안을 내부경계로 포함하는 부정류 계산모형." **한국수자원학회논문집**, 제37권 제12호, 한국수자원학회, pp. 1043-1054.
- 윤용남, 박무중 (1992). "수리학적 홍수추적에 의한 댐 방류시 하류수위 및 주요 하천 구간별 홍수 도달시산의 예측." **한국수문학지**, 제25권 제3호, 한국수문학지, pp. 115-124.
- 이상호, 이길성 (1992). "소양강댐 가상 파괴파의 수치모의." **대한토목학회 논문집**, 제12권 제2호, 대한토목학회, pp. 109-122.
- 이정규, 이창현 (2004). "수리학적 홍수추적 모형을 이용한 한강하류부의 조도계수 산정." **대한토목학회 논문집**, 제24권 제1B호, 대한토목학회, pp. 25-32.

- 이종태, 한건연, 서병하 (1993). "한강의 홍수규모에 따른 인도교수위의 조석영향분석." **한국수문학지**, 제26권 제2호, 한국수문학지, pp. 66-77.
- 전경수 (1996). "월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구." **한국수자원학회지**, 제29권 제2호, 한국수자원학회, pp. 153-165.
- 최병호, 서경석 (1987). "한강감조구간의 홍수추정." **대한토목학회 논문집**, 제7권 제3호, 대한토목학회, pp. 133-139.
- 최병호, 이정렬, 서경석 (1987). "한강감조구간의 조석전파." **한국수문학지**, 제20권 제2호, 한국수문학지, pp. 151-160.
- 최병호, 전덕일, 안익장 (1992). "인천만 및 한강체계의 수치모형." **한국해안·해양공학지**, 제4권 제2호, 한국해안·해양학회, pp. 130-137.
- 한강홍수 통제소 (1994). **홍수자료관리시스템 구축**.
- 한국수자원공사 (2004a). **한강수계 댐군 홍수조절 연계운영 시스템 구축(1차년도) 보고서**.
- 한국수자원공사 (2004b). **한강수계 댐군 홍수조절 연계운영 시스템 구축(1차년도): 부록**.
- 해양수산부 (2001). **한강-임진강 유역에 대한 조위영향 연구**.
- 해양수산부 (2002). **한강-임진강 유역에 대한 조위영향 연구(II)**.
- 황의준, 전경수 (1997). "한강 본류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정." **한국수자원학회논문집**, 제30권 제5호, 한국수자원학회, 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, pp. 63-88.
- 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.
- 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.

Mohmmmod and V. Yevjevich, eds., Water Resour.
Publications, Fort Collins, CO, pp. 89-182.

(논문번호:05-70/접수:2005.05.17/심사완료:2007.01.16)