

천변 저류지의 홍수조절 효과에 대한 계산수리학적 분석방법

Computational Model for Flow in River Systems with Storage Pocket and Lateral Weir Overflow

전경수*
Kyung Soo Jun

요 지

횡월류식 천변 저류지를 포함하는 하천수계의 흐름 모의를 위한 준2차원 계산모형을 수립하였다. 수립된 모형은 횡월류 흐름에 대해서는 수량보존에 관한 연속방정식 및 월류형 수위-유량 관계식을, 하도에 대해서는 1차원 부정류에 대한 St. Venant 방정식을 각각 지배방정식으로 하여 흐름을 모의하는 폐합형 계산모형이다. 남한강 구간의 가상의 천변 저류지를 설치한 경우에 대하여 개발된 모형을 적용, 횡월류식 천변저류지의 설계변수들을 결정하기 위한 분석 방법을 제시하기 위한 연구가 진행 중에 있다.

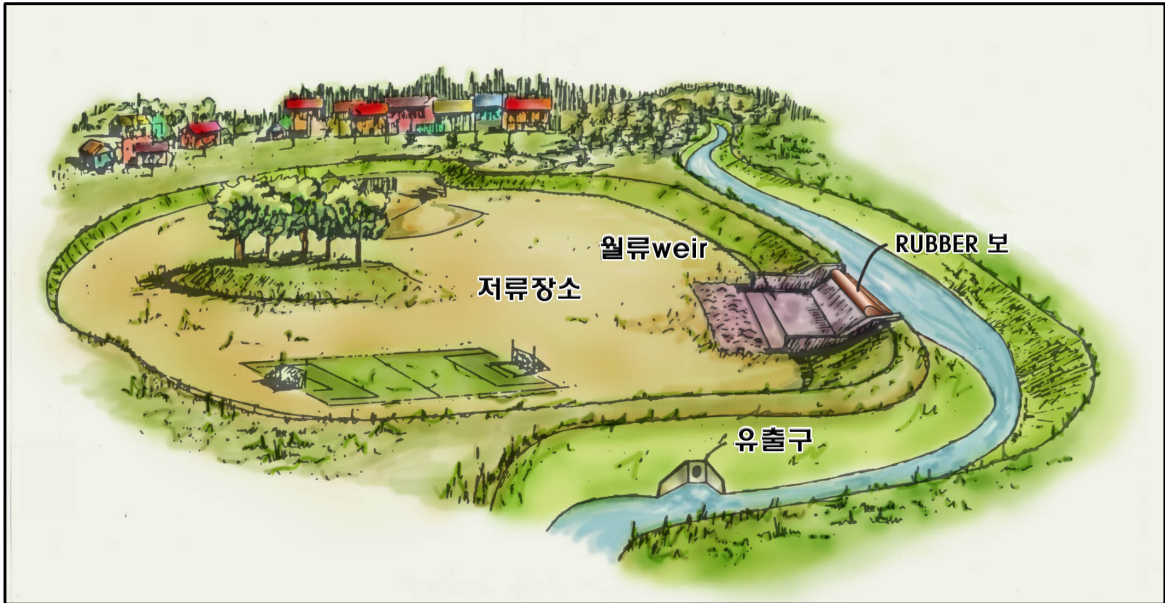
핵심용어 : 천변 저류지, 횡월류 위어, 부정류 계산모형

1. 서 론

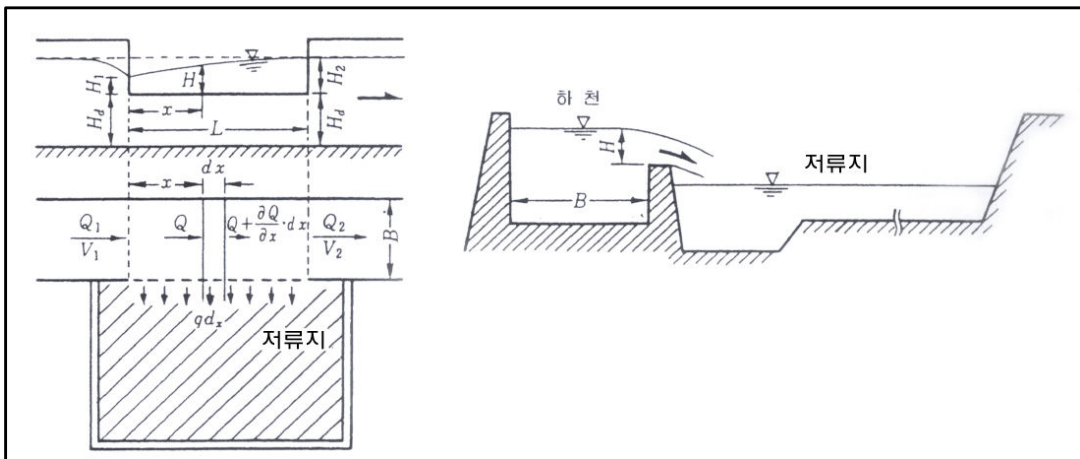
우리나라에서 발생하는 자연재해 중 가장 큰 피해를 주는 것은 홍수이다. 홍수피해의 경감을 위한 투자가 지속적으로 이루어지고 있지만, 제방 및 댐 건설, 하천개수 등 구조적인 대책들에 의존하고 있다. 이와 같이 하천 수로 내에서 홍수를 관리하는 방법들은 댐 파괴 또는 기상 이변 등에 의하여 발생할 수 있는 극한 홍수재해에 취약한 한계성을 지니고 있다. 또한 1992년 환경과 개발에 관한 리오 회합에서 '지속 가능한 발전'이라는 개념이 도입된 이후, 홍수관리의 패러다임이 변화하고 있는 것이 세계적인 추세이다. 우리나라에서도 이러한 세계적인 경향 속에서 환경보존을 고려한 치수문제가 제기되어 왔으며, 하천 내에서 홍수를 관리하고자 하는 기존의 선적인 치수대책은 유역통합적인 평면적 홍수관리 대책으로의 변화가 불가피한 실정이다.

이러한 맥락에서 최근 유역종합 치수계획 등에서 적극적으로 검토되고 있는 홍수조절 방안으로 천변 저류지(storage pocket)를 들 수 있다. 천변 저류지는 하천 변에 위치한 저류공간으로서 홍수 시에 침수되어 하천 홍수량의 일부를 저류함으로써 홍수량과 홍수위를 감소시켜 피해를 어느 정도 경감시키는 기능을 하게 된다. 유역종합 치수계획에서 검토되고 있는 천변 저류지는 자연형의 저류지가 아니라, 제방의 일부 구간에 월류제를 설치하고 일정규모 이상의 홍수시 저류지로 월류시켜 홍수량을 저감하는 인공적인 치수시설물이다(그림 1 참조). 이러한 횡월류식 천변 저류지는 하천 홍수수문곡선의 첨두부분을 월류제를 통하여 월류시킴으로써 첨두 홍수량을 저감시킬 목적으로 설계된다. 따라서 저류지의 규모 뿐만 아니라 횡월류 위어의 폭 및 정부 표고가 설계 변수로 포함된다. 횡월류 위어의 정부 표고를 결정하기 위해서는 조절 대상 홍수량에 해당하는 하천수위에 관한 정보가 요구된다. 또한 저류지의 규모에 따른 하도 홍수조절 효과의 분석을 위해서는 저류지를 포함한 하도구간에서의 시간에 따른 유량 및 수위의 변화를 모의할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 하천 부정류 계산모형이 필수적으로 요구된다. 그러나 천변 저류지 및 횡월류 위어의 규모에 따른 홍수조절 효과의 분석 및 이러한 분석에 기초한 설계변수의 결정과정에 대해서는 충분한 연구가 수행되지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 횡월류형 천변 저류지를 포함하는 하천구간에 대한 수리학적 계산모형을 수립하고, 이를 이용하여 천변 저류지의 제반 설계변수들을 결정하는 과정을 확립하고자 수행되었다.

* 정희원 · 성균관대학교 대학원 토목환경공학과, 부교수



(a) 평면도



(b) 종단면 및 횡단면도

그림 1. 횡월류식 천변 저류지 개념도(현대엔지니어링, 2005)

2. 계산모형

자연형 저류지를 포함하는 하천구간의 흐름에 대해서는 저류지와 인접 하도지점에서의 등수위 조건 및 유량에 관한 연속방정식을 적용, 저류지를 하도에 대한 부정류 계산모형의 내부 경계조건의 하나로 취급하여 계산을 수행할 수 있다(전경수, 2006). 그러나 횡월류형 인공 저류지의 경우에는 저류지와 하도 간의 등수위 조건을 적용할 수 없기 때문에 횡월류 위어가 없는 자연형 저류지의 경우와는 다르며, 홍수터를 포함하는 폐합형 수계에 관한 준 2차원 계산모형(Cunge, 1975)을 적용하여 모의를 수행할 수 있다.

2.1 계산망의 구성

하도 및 저류지 결합모형의 계산망은 절점(node), 수로(link) 및 계산점(computational point)으로 구성된다(그림 2 참조). 절점은 저류지와 하천(수계)의 외부 및 내부 경계, 즉 상류단과 하류단, 저류지로의 범람(가능) 지점에 위치한다. 또한 흐름의 분기점 및 합류점, 댐이나 수중보 등 하도 상에 위치한 월류 구조물의 직상류 및 직하류에도 절점이 위치하도록 한다. 각 절점은 인접한 절점들과 수로로 연결된다. 수로는 하천수로 및 하도와 저류지의 연결수로(이하 횡월류수로라 칭함)로 분류할 수 있다. 즉, 수로양단의 절점이 모두 하도 상에 위치하면 하천수로가 되며, 저류지 절점과 하도 상의 절점을 연결하는 수로는 횡월류수로에 해당한다. 수로의 양단 및 수로 상에는 계산점이 위치한다. 횡월류수로의 경우에는 수로 양단에 각각 한 개씩 두 개의 계산점 만이 위치한다. 하천수로의 경우에는 수로 양단에 한 개씩 최소 두개의 계산점을 포함하여 임의수의 계산점을 수로 상에 둘 수 있다. 하천수계 내 각 지점 및 저류지에 대한 부정류 계산, 즉 수위와 유량의 계산은 이들 계산점에 대하여 수행된다.

2.2 절점 지배방정식

절점 i 에 대한 연속방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_{si} \frac{dy_i}{dt} = \sum_{k=1}^{L(i)} Q_{i,k} + Q_{ext}(i,t), \quad i=1, \dots, M \quad (1)$$

여기서 t 는 시간을, M 은 절점의 총수를, $L(i)$ 는 절점 i 에 연결된 수로의 총수를 각각 나타낸다. y_i 는 절점 i 에서의 수위를 나타내며, $Q_{i,k}$ 는 절점 i 와 인접절점 k 간의 유출입 유량으로서 절점 i 로 유입되는 경우에 양의 값을 갖는다. $Q_{ext}(i,t)$ 는 본류절점에 대한, 지천 유입량, 상류단 경계에서의 유입량 등 기지의 외부 유출입량으로서 유입량일 경우 양의 값을 갖는다. A_{si} 는 저류지 i 의 수표면적(하도 상의 절점에 대해서는 영의 값이 부여됨)으로서 y_i 의 함수이다. 따라서 저류지 절점 i 에 대한 식 (1)은 하천으로부터 저류지로의 유입량/유출량이 저류지 내 수량의 증가량/감소량과 같음을 의미한다.

절점에서의 에너지방정식으로는 다음과 같이 등수위 조건식을 적용한다.

$$y_{i,k} = y_i, \quad k=1, \dots, L(i), \quad i=1, \dots, M \quad (2)$$

여기서 $y_{i,k}$ 는 절점 i 와 k 의 연결수로의 절점 i 측 끝단 계산점에서의 수위를 나타낸다.

2.3 수로 지배방정식

하천수로 흐름에 대한 지배방정식은 1차원 부정류에 관한 연속방정식 및 운동량방정식인 다음 식 (3) 및 (4)를 Preissmann의 4점 음해법(Liggett과 Cunge, 1975; Cunge 등, 1980)에 의하여 차분화한 유한차분식들로 구성된다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA \frac{Q|Q|}{K^2} = 0 \quad (4)$$

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 는 흐름방향 위치를 나타낸다. 차분식의 구체적인 형태는 Liggett과 Cunge(1975)에 상세히 기술되어 있다.

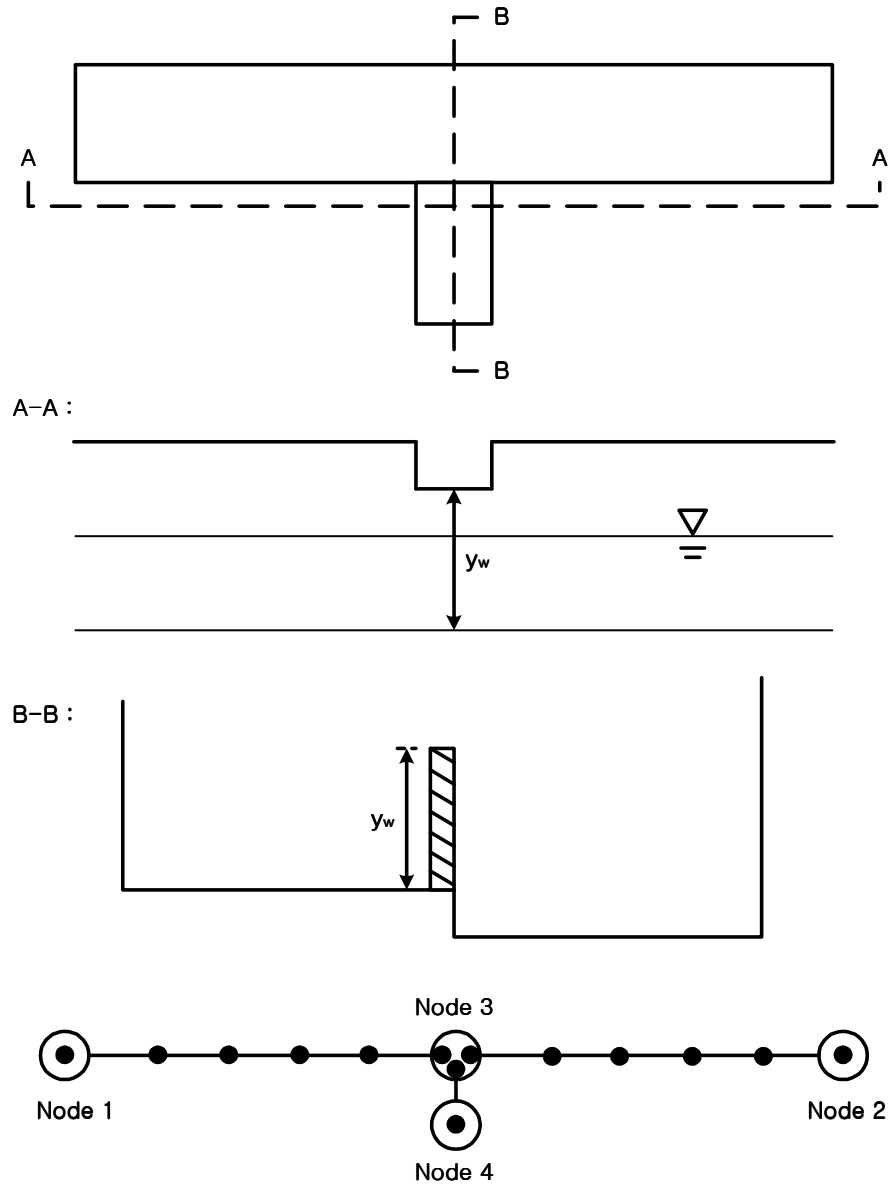


그림 2. 계산모형에 관한 설명도

절점 i 와 k 를 연결하는 횡월류수로에 관한 연속방정식은 다음과 같다.

$$Q_1 = Q_2 = Q_{i,k} \quad (5)$$

여기서 첨자 1과 2는 수로 양끝단의 두 계산점을 나타내는 첨자이다. 하천수로에 대한 운동량방정식에 대응하는 유량관계식은 수중웨이(submerged weir)형 또는 자유월류형 흐름으로 구분되어 각각 다음식 (6a) 또는 (6b)로서 주어진다.

$$|Q_{i,k}| = \mu_s b \sqrt{2g} (y_u - y_d)^{1/2} (y_d - y_w) \quad (y_d - y_w \geq \frac{2}{3} (y_u - y_w)) \quad (6a)$$

$$|Q_{i,k}| = \mu_f b \sqrt{2g} \frac{2}{3} \sqrt{\frac{1}{3}} (y_u - y_w)^{3/2} \quad (y_d - y_w < \frac{2}{3}(y_u - y_w)) \quad (6b)$$

여기서 y_u 는 y_i 와 y_k 중 큰 값이며, y_d 는 작은 값이다. μ_s 와 μ_f 는 유량계수이며, b 는 월류폭, y_w 는 횡월류 위어의 정부 표고이다. 수치해법상의 문제로서 월류흐름의 방향이 바뀌는 순간 y_u 와 y_d 의 값이 갈아짐에 따라 발산하는 방지하기 위하여 y_u 와 y_d 의 차가 매우 작을 경우 식 (8a)는 선형화된 식으로 대치된다(전경수, 1996).

2.4 수치해법

각 절점 및 수로에 대한 지배방정식이 비선형이므로 계산망 전체적으로는 비선형 연립방정식을 이룬다. 따라서 각 계산점에서의 매시각 수위 및 유량은 Newton-Raphson 방법에 의하여 계산된다. Newton-Raphson 방법의 적용에 따른, 보정량에 관한 선형 연립방정식에 대해서는 폐합형 network에 대한 double-sweep 알고리즘에 의한 해석이 가능하다. Newton-Raphson 방법에 의한 1회 반복계산은 Newton-Raphson 보정량방정식의 계수산정, 수로에 대한 forward sweep, 절점 수위보정치의 계산 (matrix double-sweep) 및 수로에 대한 return sweep 등 크게 네 단계로 구성된다. 이들 각 단계에 관한 상세한 내용은 Cunge(1975) 및 Holly 등(1990)에 기술되어 있다.

3. 결론 및 향후 연구과제

횡월류식 천변 저류지를 포함하는 하천수계의 흐름 모의를 위한 준2차원 계산모형을 수립하였다. 수립된 모형은 횡월류 흐름에 대해서는 수량보존에 관한 연속방정식 및 월류형 수위-유량 관계식을, 하도에 대해서는 1차원 부정류에 대한 St. Venant 방정식을 각각 지배방정식으로 하여 흐름을 모의하는 폐합형 계산모형이다. 개발된 모형을 적용, 남한강 구간의 가상의 천변 저류지를 설치한 경우에 대한 모의계산을 수행 중이며, 횡월류식 천변저류지의 설계변수들을 결정하기 위한 방법론을 수립, 제시하기 위한 연구가 진행 중에 있다.

참고문헌

- 전경수(1996). 월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구, 한국수자원학회지, 제29권 제2호, pp. 153-165.
- 전경수(2006). “FLDWAV 모형을 이용한 홍수해석,” 제15회 수공학 워크샵 교재, 한국수자원학회.
- 현대엔지니어링(2005). 영산강 유역 종합 치수계획(안).
- Cunge, J.A. (1975). “Two-dimensional modeling of flood plains.” *Unsteady flow in open channels*, K. Mohmmod and V. Yevjevich, eds., Water Resour. Publications, Fort Collins, Colo., pp. 705-762.
- Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr, and Verwey, A. (1980). *Practical aspects of computational river hydraulics*. Pittman.
- 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, Colo., pp. 89-182.