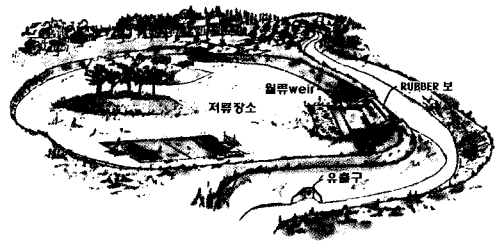


천변저류지 홍수조절 효과분석



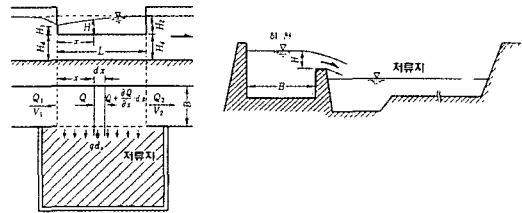
전 경 수 >
 성균관대학교 사회환경시스템공학과 교수
 ksjun@yurim.skku.ac.kr



(a) 평면도

1. 서론

최근 들어 친환경적 홍수조절 방안의 하나로서 천변 저류지가 유역종합 치수대책 등에서 널리 검토되고 있다(현대엔지니어링, 2005). 천변 저류지는 하천변에 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 규모뿐만 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



(b) 종단면 및 횡단면도

그림 1. 횡월류식 천변저류지 개념도(현대엔지니어링, 2005)

규모에 따른 홍수조절 효과의 분석 및 이러한 분석에 기초한 설계변수의 결정과정에 대해서는 충분한 연구가 수행되지 않고 있는 실정이다. 본고에서는 횡월류형 천변저류지를 포함하는 하천구간에 대한 수리학적 계산모형을 수립하고, 이에 대한 적용사례를 소개하고자 한다.

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 취급

하여 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 계산점으로 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 계산점만이 위치한다. 하천수로의 경우에는 수로 양단에 한 개씩 최소 두개의 계산점을 포함하여 임의 수의 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 절

점 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 에너지방정식은 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.

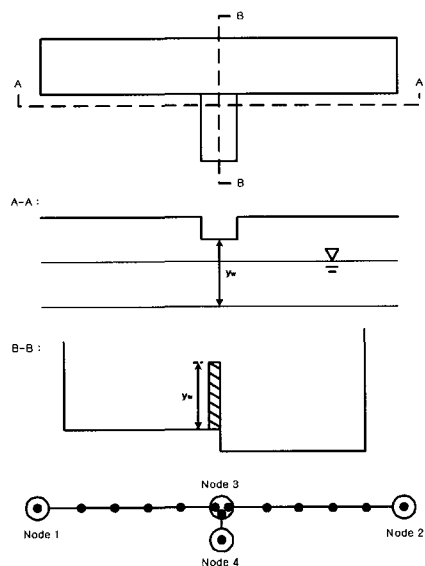


그림 2. 계산모형에 관한 설명도

2.3 수로 지배방정식

하천수로 흐름에 대한 지배방정식은 1차원 부정류

에 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.

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

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

여기서 첨자 1과 2는 수로 양끝단의 두 계산점을 나타내는 첨자이다. 하천수로에 대한 운동량방정식에 대응하는 유량관계식은 수중웨어(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 위의 정부 표고이다. 수치해법상의 문제로서 월류흐름의 방향이 바뀌는 순간 y_u 와 y_d 의 값이 같아짐에 따라 발산하는 방지하기 위하여 y_u 와 y_d 의 차가 매우 작을 경우 식 (8a)는 선형화된 식으로 대치된다(전

경수, 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. 적용사례

3.1 대상 하천구간 및 사용자료

모형의 적용 대상구간은 임진강 구간으로서 계획 중인 군남 홍수조절지부터 한강 합류 지점까지의 구간에 대하여 모형을 구성하였다. 계산모형의 구성을 나타내는 모식도는 그림 3과 같다. 모형의 상류단은 군남 홍수조절지이며 유입지천으로는 사천, 문산천, 사미천 및 한탄강 등 4개의 지천이 포함된다. 학곡, 석장 1, 석장 2, 주월, 마정 1 및 마정 2 등 현재 검토 중인 6개의 천변저류지를 모형에 포함하였다. 따라서 계산모형은 18개의 절점과 17개의 수로로 구성되며, 본류 계산점 간의 평균간격은 약 265 m이다. 상류단 경계조건으로는 100년 빈도 홍수에 대한 군남 홍수조절지 방류량을, 하류단 경계조건으로는 한강 합류점의 100년빈도 계획홍수위 값을 각각 사용하였다.

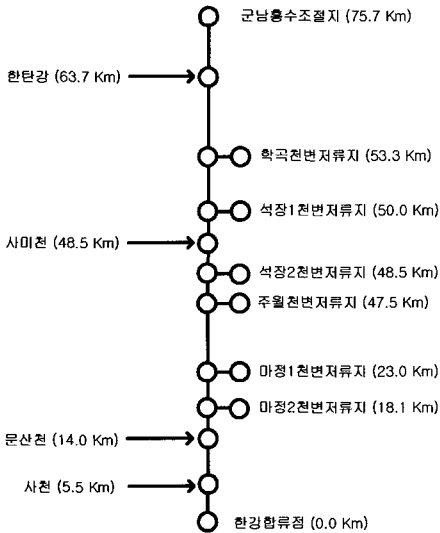


그림 3. 대상 하천구간에 대한 계산모형의 모식도

지천 유입량 또한 각 지천유역의 100년 빈도 홍수유출수문곡선을 부여하였다.

3.2 천변저류지 홍수조절효과 분석절차

우선 100년 빈도 설계홍수에 대하여 천변저류지가 없는 경우에 대하여 조도계수 $n=0.028$ 을 적용하여 하천 부정류 흐름계산을 수행하였으며, 그 결과로부터 천변저류지 계획 하도지점의 최대수위를 산정하였다. 천변저류지 횡월류위어 폭은 200m로 고정하고, 위어 정부표고를 설계변수로 취하였으며, 5개의 설계안(표 1의 설계안 A, B, C, D, E)에 대하여 준 2차원 하도-홍수터 결합모형을 적용, 홍수조절 효과를 분석하였다. 표 1에서 'No overflow'는 조도계수 0.028

인 경우 저류지로 월류가 발생하지 않게 되는 횡월류 위어의 정부표고의 최소값을 나타낸 것이며, 설계안 A, B, C, D, E는 각각 이보다 정부표고를 0.50, 1.0, 1.5, 2.0 및 2.5m씩 낮은 경우에 해당된다.

조도계수의 불확실성에 따른 천변저류지 홍수조절 효과의 불확실성을 살펴보기 위하여, 조도계수를 0.0238, 0.0252, 0.0308, 0.0336 등으로 다양하게 변화시켜 가며, 각 경우에 대한 조절효과를 모의하였다. 또한 유역유출 수문곡선이 설계홍수의 경우와 전혀 다른 형태를 갖는, 1996년 및 1999년 홍수에 대하여 조절효과를 모의하였다.

3.3 천변저류지 홍수조절효과 분석결과

각 경우에 대하여 모의된 문산 지점(문산천 합류 직후) 수위 및 유량 저감효과는 표 2에 제시된 바와 같다. 평균적으로 0.10m 정도의 수위저감 효과와 500m³/s 내외의 유량저감 효과를 보이고 있으나, 적용된 조도계수에 따른 민감도가 매우 크며, 특히 설계안 A의 경우에는 수위저감 효과의 범위가 0-0.26 m, 유량저감 효과가 0-1109m³/s로 조도계수 값에 따라 크게 달라짐을 나타내고 있다. 조도계수 0.0238을 적용한 경우에는 설계안 E의 홍수조절 효과가 가장 큰 반면, 0.0336을 적용한 경우에는 설계안 A가 가장 큰 홍수조절 효과를 나타내고 있다. 적용되는 조도계수에 따라 가장 양호한 홍수저감 효과를 보이는 설계안이 달라짐을 알 수 있다. 본 연구에서 적용된 조도계수 값의 범위는 0.028에서 20% 이내로 증가 또는 감소시킨 경우에 대한 것으로서 실제

표 1. 각 설계안별 횡월류위어 정부표고

설계안	학 곡	석장1	석장2	주 월	마정1	마정2
No overflow	21.70	21.00	20.50	20.00	12.75	11.50
A	21.20	20.50	20.00	19.50	12.25	11.00
B	20.70	20.00	19.50	19.00	11.75	10.50
C	20.20	19.50	19.00	18.50	11.25	10.00
D	19.70	19.00	18.50	18.00	10.75	9.50
E	19.20	18.50	18.00	17.50	10.25	9.00

표 2. 문산지점 최대수위 및 유량 저감효과

(a) 최대수위 감소량(m)

	A	B	C	D	E
n = 0.0238	0.00	0.01	0.04	0.10	0.13
n = 0.0252	0.00	0.04	0.11	0.13	0.14
n = 0.0280	0.07	0.18	0.19	0.17	0.11
n = 0.0308	0.21	0.23	0.17	0.13	0.11
n = 0.0336	0.26	0.20	0.14	0.12	0.10
1996년 홍수	0.12	0.08	0.06	0.05	0.04
1999년 홍수	0.17	0.15	0.08	0.06	0.04
평균	0.12	0.13	0.11	0.11	0.10

(b) 최대유량 감소량(cms)

	A	B	C	D	E
n = 0.0238	0	95	244	496	653
n = 0.0252	0	215	561	680	680
n = 0.0280	342	836	874	770	551
n = 0.0308	900	960	729	532	415
n = 0.0336	1109	787	596	474	393
1996년 홍수	587	411	323	256	216
1999년 홍수	856	741	435	276	204
평균	542	578	537	498	445

하천에 대한 조도계수의 불확실성은 이보다 클 수 있다. 따라서 이러한 조도계수의 불확실성을 감안할 때 천변저류지를 치수계획의 일부로 포함할 경우, 홍수 저감 효과는 보수적으로 평가할 수밖에 없을 것으로 판단된다. 1999년 홍수는 문산지점 침투유량 규모로 볼 때, 약 110년 빈도의 홍수에 해당하는데, 이에 대한 조절효과는 상당히 작게 나타나고 있다. 즉, 조도계수 뿐만 아니라 유역 유출수문곡선의 불확실성 또한 천변저류지의 홍수조절 효과를 보수적으로 평가할 필요가 있음을 시사하고 있다.

4. 결론

홍수터를 포함하는 폐합형 수계에 관한 준 2차원 계산모형을 이용하여 천변저류지의 홍수조절 효과를 분석하기 위한 모형을 수립하였다. 수립된 모형을 임진강 수계에 적용하여 천변저류지의 홍수조절 효과를

분석한 결과, 홍수사상이나 하천 조도계수, 천변저류지 월류고 등에 따라 홍수 조절 효과가 매우 다양하게 나타나는 것으로 분석되었다. 이와 같이 천변저류지의 경우 설계 및 운영 측면에서 상당한 불확실성을 지니고 있는 것으로 판명되었으며, 따라서 이러한 불확실성을 고려한 설계를 위한 기술적인 지침의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

전경수(1996). 월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구, 한국수자원학회지, 제29권 제2호, pp. 153-165.
 전경수(2006). "FLDWAV 모형을 이용한 홍수해석," 제15회 수공학 워킹 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." IHR 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. 