

낙동강유역에서의 천변저류지에 의한 홍수 저감영향 분석

Flood Mitigation Analysis by Applying Off-line Storage Basins in Nakdong River

한건연*, 조완희**, 백진규***

Kun Yeun Han, Wan Hee Cho, Jin Gyu Baek

요 지

본 연구에서는 단일 첨두를 갖는 가상의 균일하도구간과 홍수피해가 극심하게 나타나고 있는 낙동강유역에 대하여 Saint-Venant 방정식을 음해적으로 유한차분하여 수치적으로 해석한 수리학적 하도추적을 FLDWAV 모형을 이용하여 수행함으로써 홍수과의 전달양상과 천변저류지의 홍수 저감영향을 분석하였다. 균일하도구간에 대한 적용은 천변저류지의 규모와 운영조건 그리고 설치위치에 따른 홍수 저감영향을 비교 검토함으로써 천변저류지의 최적 규모 및 설치위치를 결정하는데 효과적인 참고 자료가 될 것으로 기대된다. 또한 낙동강유역에 대한 적용에서는 낙동강 하천정비 기본계획에 근거한 계획홍수량으로 모의를 수행하였다. 낙동강 유역종합 치수계획 보고서에 제시된 10개의 천변저류지에 대한 모의를 통해 실제 낙동강유역의 홍수 저감영향을 분석함으로써 하천제방 계획시 경제적인 하천 제방단면 결정을 위한 참고 자료 및 효과적인 홍수피해 경감대책 수립을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

핵심용어 : 천변저류지, Saint-Venant 방정식, FLDWAV, 홍수 저감영향 분석

1. 서 론

지구의 온난화를 비롯한 여러 가지 원인으로 인하여 최근 발생하고 있는 예기치 못한 기상현상은 돌발적이고 국지적인 집중호우를 발생시키고, 이러한 강우양상의 변화는 인명 및 재산피해와 같은 막대한 홍수피해가 나타나게 한다. 이러한 이상호우 이외에도, 1960년대 이후 고도의 경제성장 및 인구증가에 딸 급진전된 도시화와 공업화의 결과로 나타난 인위적인 현상으로 인하여 홍수피해는 점차 대형화되고 있다. 특히 최근에 발생했던 2002년 태풍 루사 및 집중호우, 2003년 태풍 매미 등으로 인한 피해에서 볼 수 있듯이, 홍수피해는 급격하게 대형화 되어가고 있다. 이러한 피해의 규모는 당분간 증가하거나 최근의 추세를 유지할 것으로 예상되어 홍수피해에 대한 예방적 투자가 절실하고 보다 효율적인 수자원 관리 및 방재 대책이 요구되는 실정이다.

본 연구에서는 최근 들어 홍수피해가 극심한 낙동강유역에 대하여 Saint-Venant 방정식을 음해적으로 유한차분하여 수치적으로 해석한 수리학적 하도추적을 FLDWAV 모형을 이용하여 수행함으로써 홍수과의 전달양상과 천변저류지의 홍수 저감영향을 분석하였다. 천변저류지의 규모와 운영조건 그리고 설치위치에 따른 홍수 저감영향을 비교·검토함으로써 효과적인 홍수 경감대책 수립을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 기본방정식

FLDWAV 모형은 1차원 부정류 해석을 위한 동역학적 홍수추적 모형으로 부정류에 대한 Saint-Venant

* 정희원 · 경북대학교 토목공학과 교수 · E-mail : kshanj@knu.ac.kr
** 경북대학교 토목공학과 박사과정 · E-mail : jobbaeng@hanmail.net
*** 경북대학교 토목공학과 석사과정 · E-mail : baek_jg@hotmail.com

방정식을 음해적 유한차분 형태로 해석한 것이다. 질량보존의 식과 운동량보존의 식은 각각 다음과 같다.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(A + A_0)}{\partial t} - q = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial\left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial h}{\partial x} + S_f + S_e\right) + L + W_f B = 0 \quad (2)$$

여기서,

$$S_f = \frac{n^2 |Q| Q}{A^2 R^{\frac{4}{3}}} = \frac{|Q| Q}{K_c^2}$$

$$W_f = C_w |V_r| V_r$$

A = 흐름단면적

q = 측방유입량

t = 시간

S_f = 마찰경사

B = 하폭

W_f = 바람에 의한 응력

$$S_e = \frac{K_e \partial\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2g\partial x}$$

Q = 유량

A_0 = 저류단면적

x = 거리

h = 수위

S_e = 단면 확대·축소에 의한 손실경사

n = 조도계수

L = 지류에 의한 운동량의 변화

x , t 좌표상에 있어 Δx , Δt 의 간격은 일정할 수도 있고, 일정하지 않을 수도 있다. Saint-Venant 방정식인 비선형 쌍곡선형 편미분방정식을 비선형 대수방정식의 형태로 변환하기 위해 가중 4점 음해 유한차분 근사해법이 사용되는데, Gird 함수 f 에 대한 시간 및 공간에 대한 편미분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{f_i^{j+1} + f_{i+1}^{j+1} - f_i^j - f_{i+1}^j}{2 \Delta t^j} \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \theta \frac{f_{i+1}^{j+1} - f_i^{j+1}}{\Delta x_i} + (1-\theta) \frac{f_{i+1}^j - f_i^j}{\Delta x_i} \quad (4)$$

$$f_{i+\frac{1}{2}}^{j+\frac{\theta}{2}} = \frac{\theta}{2} (f_i^{j+1} + f_{i+1}^{j+1}) + \frac{(1-\theta)}{2} (f_i^j + f_{i+1}^j) \quad (5)$$

여기서, 가중인자 θ 가 0.5일 경우는 Box 기법, 1.0일 경우는 완전음해기법이 된다. 무조건적인 선형수치안정성과 좋은 정도를 제공받기 위해서는 θ 가 0.5에 가깝게 접근하는 것이 추천된다. FLDWAV 모형에서는 θ 가 입력자료로 사용되게 되어있는데 일반적으로 0.55~0.60의 값이 0.5를 사용하였을 때 종종 나타나는 불안정의 난점을 해결하고 정도의 손실을 최소화 할 수 있어 자주 사용된다. 식 (3)~(5)에서 나타난 유한차분 근사식을 식 (1)~(2)에 대입하고, Δx_j 를 곱하여 정리하면 유한차분식이 얻어진다.

3. 모형의 적용

3.1 가상의 균일하도구간에 대한 적용

목표 지점의 홍수위 저감을 위해 다양한 조건의 천변저류지를 가상하도에 설치하고 효과를 분석하였다.

가상하도는 50km의 하도 길이와 하상경사 0.0005의 완경사 하천으로 구성하였으며, 조도계수는 0.025로 가정하였다. 하천 전 구간을 1km의 동일한 단면거리를 가지는 51개의 단면으로 구분하였고, 각 단면의 형태는 저폭이 150m, 측벽면경사 1:2인 사다리꼴 균일하도이다.

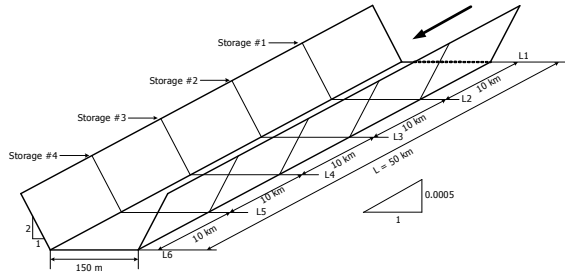


그림 1. 모의에 적용된 하도형상

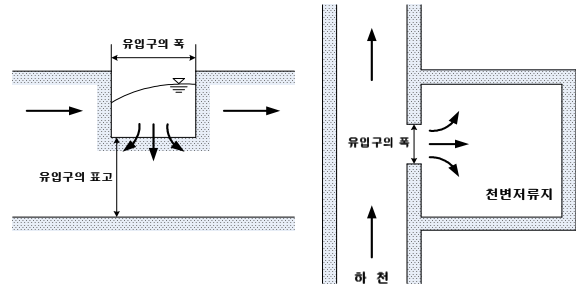


그림 2. 모의에 적용된 천변저류지의 제원

본 연구에서는 동일한 유량조건과 지형조건에서 저류지의 설치 및 운영에 따른 효과를 분석하기 위하여 모든 경우의 초기조건과 경계조건을 같게 구성하였다. 초기조건은 수위 1.15m를 하류단 초기수위로 부등류 해석하였고, 상류단 경계조건은 1000m³/s의 단일 첨두를 갖는 유량수문곡선을 사용하였으며, 하류단 경계조건은 등류상태에 대한 Manning 식을 기초로 한 loop형 수위-유량 관계곡선을 계산하여 사용하였다.

최적의 저감효과를 나타낼 수 있는 저류지의 면적을 결정하기 위하여 10km², 12km², 15km²의 면적을 갖는 저류지로 구분하였다. 각 저류지의 저면 표고는 하도의 바닥표고와 같게 가정하였으며, 저류지 유입구의 표고는 저류지를 설치하지 않고 300m³/s의 일정한 유량을 상류단 경계조건으로 사용하여 계산된 수위를 하도의 평수위로 가정하고 조절 수문이 없는 개방 저류지의 유입구 표고로 결정하였다. 따라서 하도 내 수위가 평수위보다 낮을 경우 저류지는 마른 상태를 유지하고 있으며, 홍수기에 저류되기 시작하는 구조물로 저류지 유입구의 표고를 20cm 간격으로 상승시키면서 모의하였다. 각 자료군은 저류지 면적을 기준으로 하여 저류지 유입구의 표고 3가지와 저류지 위치 4가지로 구분하여 총 36개의 입력자료를 구성하였다.

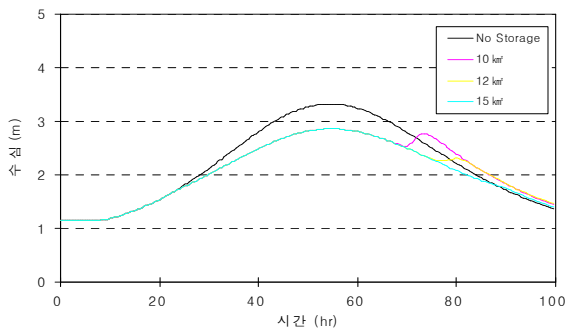


그림 3. 저류지 면적에 따른 수심의 변화

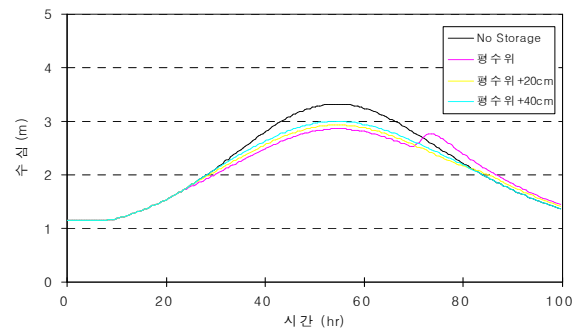


그림 4. 유입구 표고에 따른 수심의 변화

천변저류지를 이용한 홍수 저감영향은 저류지의 면적, 유입구의 표고와 밀접한 관계를 가진다. 저류지에 의해 하도의 홍수파는 감쇠되고 저류지 용량만큼의 홍수량이 저류지로 유입되어 하류부의 수위를 감소시키게 된다. 그러나 저류지의 용량을 초과한 홍수량이 유입되는 경우는 저류지와 하도의 수위가 동시에 상승하게 되고, 이후에 저류지로부터 역류가 발생하여 극한 조건의 경우 홍수파와 역류파가 중첩되어 하도내 홍수파가 지나가고 난 후에 하류부 수위가 상승되는 효과가 나타나기도 한다. 최적의 저류지 효과를 발휘하기 위해서는 저류지 면적에 따라 하도내의 홍수파와 저류지에서 발생하는 역류파가 적절히 조화 될 수 있도록 저류지 유입구의 표고가 결정되어야 한다.

3.2 낙동강유역에 대한 적용

FLDWAV 모형을 실제 낙동강유역에 적용한 모의에서는 낙동강 하천정비 기본계획에 제시하고 있는 계획홍수량에 근거하여 모의를 수행하였다. 모의에 적용된 구간은 왜관 수위표~임해진 수위표의 123.69km 구간으로서 전체 단면의 개수는 137개이고 계산 시간간격은 0.5hr로 설정하였다. 이 구간에서의 주요 지류로서는 금호강, 황강 그리고 남강이 고려되었다. 적용구간에 대한 상류단 경계조건으로서는 왜관 수위표지점의 계획홍수량인 13,420m³/s를 단일 첨두로 갖는 Gamma 확률밀도함수로 계산된 유량수문곡선을 사용하였으며, 하류단 경계조건은 등류상태에 대한 Manning 식을 기초로 한 loop형 수위-유량 관계곡선을 계산하여 사용하였다. 조도계수는 이전의 홍수조건으로부터 검증된 0.020~0.033의 범위 내에 있는 0.030을 적용하였다.

천변저류지에 의한 실제 낙동강유역에서의 홍수 저감영향을 분석하기에 앞서 천변저류지가 설치되지 않은 경우에 대하여 FLDWAV 모형을 적용하여 홍수추적을 실시하였다. 모의를 통하여 얻어진 첨두 홍수위와 낙동강 유역종합치수계획 보고서에 제시된 하천의 제방고를 비교하여 범람 여부를 판단하였다. FLDWAV 모형은 1차원 홍수추적 모형이므로 하천의 좌/우 제방고 가운데 낮은 제방고를 범람여부를 판단하는 기준으로 적용하였다. 계획홍수량을 적용한 모의를 통하여 9개 단면에서 첨두 홍수위가 제방고를 초과하는 것을 볼 수 있었다.

낙동강 유역종합치수계획 보고서에는 낙동강 유역의 국가 하천과 지방1급 하천을 중심으로 하여 천변저류지로 가능한 지점을 도상조사와 현장조사를 통하여 선정된 총 75개의 지점이 제시되었다. 선정된 천변저류지는 저·평지의 하천 등에 접하게 저류지를 설치하여 증가된 홍수량 혹은 저류지 하류의 하도 분담량이 저감될 때까지 하천의 홍수량을 월류제에 의해 저류지에 분류하는 월류제 방식을 택하고 있다. 월류량의 계산에 요구되는 월류 유량계수는 낙동강 유역종합치수계획 보고서에 제시된 1.8을 적용하였다. 천변저류지를 이용한 홍수 저감영향을 분석하기 위하여 낙동강 유역종합치수계획 보고서에 제시된 75개의 천변저류지 가운데 모의구간인 왜관 수위표~임해진 수위표 사이에 위치하고 유효 저류용량이 100만m³을 초과하는 10개의 천변저류지를 선정하여 모의를 실시하였다. 낙동강 유역종합치수계획 보고서에 유효저류용량과 이용수심이 제시되어 있으므로 저류지 유입구의 표고에 대한 조절을 통하여 실제 낙동강유역에서의 홍수 저감영향을 분석하였다.

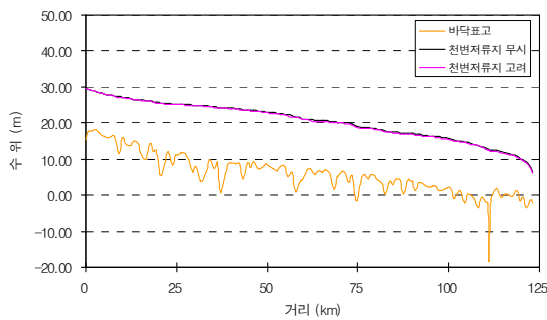


그림 5. 첨두 홍수위의 변화

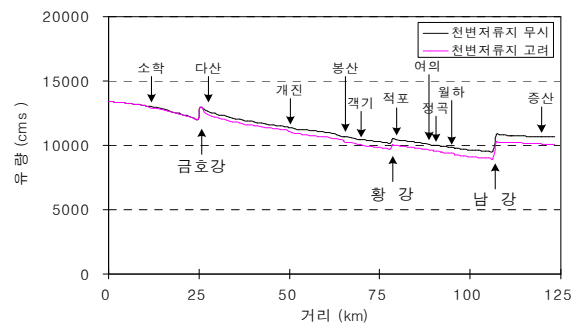


그림 6. 첨두 홍수량의 변화

표 1. 범람 예상지역에서 침투 홍수위의 변화

번호	단면번호	Hec No.	천변저류지 설치 전	천변저류지 설치 후	제방고	비 고
1	32	355	25.00m	24.84m	24.43m	0.16m 감소, 범람
2	34	351	24.92m	24.76m	24.73m	0.16m 감소, 범람
3	68	285	20.67m	20.43m	20.53m	0.24m 감소, 안전
4	70	283	20.57m	20.33m	20.36m	0.24m 감소, 안전
5	93	241	17.30m	17.04m	17.08m	0.26m 감소, 안전
6	103	225	16.40m	16.14m	16.02m	0.26m 감소, 범람
7	108	217	15.85m	15.57m	15.33m	0.28m 감소, 범람
8	109	215	15.61m	15.33m	14.96m	0.28m 감소, 범람
9	116	201	14.15m	13.91m	14.07m	0.24m 감소, 안전

천변저류지의 설치로 인하여 범람 예상지역에서 0.16m~0.28m의 침투 홍수위 감소가 나타나고, 범람 예상지역도 천변저류지를 설치하기 전 9개의 단면에서 천변저류지를 설치한 후 5개의 단면으로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 낙동강유역에 대한 홍수추적 모의를 통하여 천변저류지의 설치가 침투 홍수위 및 침투 홍수량을 저감시킨다는 사실을 알 수 있다. 또한 천변저류지가 분담할 수 있는 저류용량을 초과하게 되면 천변저류지로부터의 역류로 인하여 하류부의 수위가 오히려 상승한다는 사실 역시 알 수 있다. 즉, 천변저류지의 설치만으로는 홍수저감 효과를 얻는 것이 아니라 오히려 하류부에 더욱 큰 피해를 발생시킬 수 있으므로, 천변저류지의 설치와 더불어 올바른 관리와 조작이 수반되어야 목표로 하는 홍수저감 효과를 얻을 수 있다.

4. 결 론

가상의 균일하도구간에 대한 모의를 통하여 천변저류지의 적용조건인 저류지의 위치, 면적 그리고 유입구의 표고 가운데 저류지의 위치는 홍수위 저감에 영향을 거의 미치지 않으며, 저류지의 면적과 유입구의 표고가 홍수위 저감에 많은 영향을 미친다는 것을 판단할 수 있었다. 같은 유입구의 표고를 갖는 경우에 있어 면적 증가에 따른 홍수위 저감효과가 거의 나타나지 않음을 통하여 가장 경제적인 저류지 면적을 결정할 수 있음을 확인할 수 있었다. 단일 침투로 1000m³/s를 갖는 홍수사상에 대한 유량 수문곡선을 적용하여, 하류단 목표지점에서 최대 0.46m, 최소 0.32m의 홍수위 저감효과가 있었으며, 천변저류지에서의 적용조건에 따라 0.18m의 차이가 발생할 수 있음을 확인하였다.

10개의 천변저류지를 적용한 낙동강유역에서의 모의로부터 천변저류지의 설치로 인하여 범람 예상지역에서 최소 0.16m에서 최대 0.28m의 침투 홍수위 감소를 확인할 수 있었고, 범람 예상지역도 천변저류지를 설치하기 전 9개의 단면에서 천변저류지를 설치한 후 5개의 단면으로 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 또한 천변저류지의 설치만으로는 올바른 홍수저감 효과를 얻을 수 없다는 것을 가상의 균일하도구간에 대한 모의에서 확인했기 때문에 천변저류지의 유입구 표고에 대한 시행착오법(Trial & Error)을 통하여 천변저류지에서 낙동강으로의 역류가 발생하지 않게 하는 각각의 천변저류지에 대한 최적의 유입구 표고를 결정하였다. 이렇게 얻어진 천변저류지의 유입구 표고를 모의에 적용하여 실제 낙동강유역에 적용하여 천변저류지에 의한 낙동강유역에서의 홍수저감영향을 분석하였다.

본 논문에서는 저류지의 위치, 면적, 유입구의 표고에 따른 다양한 조건의 적용을 통하여 저류지 상류부와 하류부의 동역학적 홍수 전달 특성을 규명하였다. 본 논문의 연구결과는 천변저류지의 설치·계획시 유용한 자료로 이용될 수 있으며, 하천에서의 경제적인 제방단면 결정을 위한 참고 자료 및 효과적인 홍수 경감 대책 수립을 위한 기초 자료를 제시할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 출연하고 한국과학재단에서 위탁시행한 2004년도 특정연구개발사업중 웹기반 홍수정보 시스템 Prototype 개발사업(과제번호 : M1-0402-02-0002-04-002-02-000-00)에 의한 연구로서 관계당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부 (2004). “낙동강 유역종합치수계획 보고서”
2. 한건연 (1990). “댐의 파괴형태와 하도부 양상에 따른 홍수파 전달특성 해석에 관한 연구.” 한국수문학회 논문집, 제23권, 제4호, pp. 467-476.
3. 한건연, 김원 (2002). “댐·제방붕괴 및 홍수범람.” 한국수자원학회지, 제34권 제1호, pp. 53-60.
4. Jaffe, D.A and Sanders, B.F (2000). "Engineered Levee Breaches For Flood Mitigation." J. of Hydraulic Engineering, Vol. 127, No. 6 pp. 471-479.
5. Fread, D.L. (1998). NWS FLDWAV MODEL : Theoretical Description/User Documentation. Hydrologic Research Laboratory, NWS, Silver Spring, Md.
6. Lee, K.L. and Holley, E.R. (2002). Physical Modeling for Side-channel Weirs, Online Report 02-2, Center for Research in Water Resources, Univ. of Texas, Austin, TX.