

홍수범람 모형의 적용에 관한 연구

김한준¹⁾ · 전경수²⁾

1. 서론

홍수터에서의 흐름양상은 본류에 비하여 수심이 작고 흐름에 대한 저항이 커서 본류의 흐름과는 많은 차이가 있으며 일반적으로 2차원적 해석을 요구한다. 2차원 흐름해석을 위한 일반적인 방법으로서 천수방정식에 의한 해석방법이 있다(Sato 등, 1989). 그러나 홍수터 흐름의 경우에는 범람지역, 즉 홍수터 내의 모든 부분이 항상 침수되어 있는 것이 아니며, 침수지역 중에서도 범람이 시작되는, 즉 하천본류에 가까운 지역과 먼 지역간에는 천수방정식을 적용하기에는 상당한 수위 차가 있을 수 있다. 이는 홍수터 내에 도로 등의 경계물이 존재할 경우 특히 그렇다. 이와 같이 침수지역, 즉 모형의 경계가 일정하지 않기 때문에 경계의 설정 및 경계조건의 부과에 따르는 어려움이 있고 또한 홍수터 내에 내부경계가 존재할 경우 그 부근에서는 천수방정식을 적용할 수 없다는 문제점이 따른다. 이러한 점을 감안하여 Zanobetti 등(1970)과 Cunge(1975)는 홍수터를 그 지형적 동질성 및 자연경계를 기준으로 구분하는 2차원 구획체계를 구성하고 인접구획간 흐름을 1차원적 수위-유량 관계식으로 나타내어, 이러한 관계식 및 각 구획에서의 수량보존에 관한 연속방정식을 사용하여 구획간의 흐름을 모의할 수 있도록 하는 준 2차원 홍수터 계산모형을 개발한 바 있다. 그들은 구획전체를 여러 개의 구획 군으로 나눔으로써 선형 연립방정식들을 효율적으로 풀 수 있는 matrix double-sweep 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 田庚秀(1998)는 홍수터 흐름계산을 위한 계산망의 구성 및 지배방정식은 Cunge(1975)의 경우와 같으나, 수치해법으로는 폐합형 하천수계에 대한 Newton-Raphson 방법 및 그에 따른 double-sweep 알고리즘(Cunge 등, 1980; Holly 등, 1990)을 확장시켜 홍수터 흐름에 대하여 적용함으로써 정확하면서도 효율적인 계산이 가능하도록 하였다. 본 연구에서는 이와 같은 준 2차원 계산 모형을 적용하여, 문산에 위치한 경의선 차량기지 건설부지에 대하여 침수해석을 수행하였다.

2. 계산모형

모형의 계산망은 2차원 홍수터 구획체계를 하도와 결합한 것으로서 일반적으로 폐합형 망으로 구성된다. 홍수터 흐름에 대해서는 각 구획에서의 수량보존에 관한 연속방정식 및 인접구획간 하도형 또는 월류형 수위-유량 관계식을, 하도에 대해서는 1차원 부정류에 대한 St. Venant 방정식을, 홍수터 안의 여러 구획(절점)에 대해서는 연속방정식과 등수위 조건식을 각각 지배방정식으로 하여 흐름을 모의하는 준 2차원 계산모형이다. 상기한 지배방정식에 대한 유한차분법으로는 Preissmann의 4점 음해법(Liggett와 Cunge, 1975; Cunge 등, 1980)을 사용하였다. 또한 각각의 지배방정식은 비선형이므로 계산망 전체적으로는 비선형 연립방정식을 이룬다. 따라서 각 계산점에서의 매 시

1) 성균관대학교 공과대학 토목공학과 석사과정
2) 성균관대학교 공과대학 토목공학과 부교수

각 수위 및 유량은 Newton-Raphson 방법에 의하여 계산된다. Newton-Raphson 방법의 적용에 따른, 보정량에 관한 선형연립방정식에 대해서는 폐합형 계산망에 대한 double-sweep 알고리즘에 의한 해석이 가능하다. Newton-Raphson 방법에 의한 반복계산은 Newton-Raphson 보정량 방정식의 계수산정, 수로에 대한 forward sweep, matrix double-sweep, 수로에 대한 return sweep의 네 단계로 구성된다.

3. 경의선 차량기지 건설에 따른 침수해석

문산에 위치한 경의선 차량기지 건설부지의 건설 전 즉, 현황 및 장래 기지 건설 후의 경우에 대하여 각각 모형을 구성하였다. 우선, 차량기지 건설 전, 즉 현 상태에 대하여 20년 빈도 홍수의 침수범위 및 침수수심을 산정하였다. 또한 차량기지 건설 후에 대하여도 역시 20년 빈도 홍수를 대상으로 침수해석을 수행하였다.

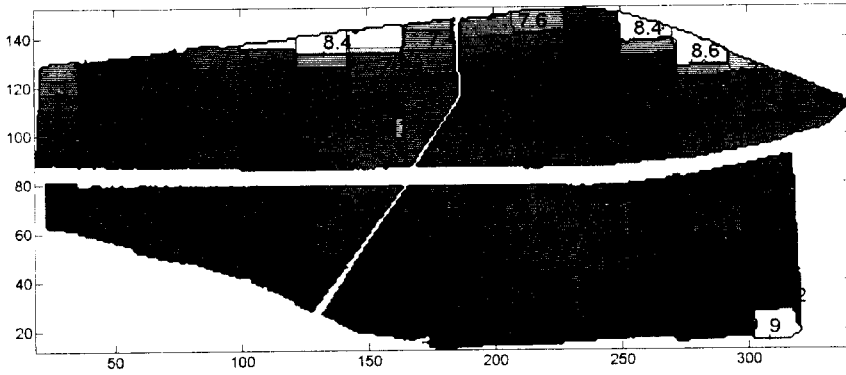
3.1 경의선 차량기지 건설 전

그림 1(a)는 대상지역의 지형도를 나타내며, 그림 1(b)는 계산 모형의 모식도를 나타낸 것이다. 그림 1(a)에서 보듯이 철도가 동서방향으로 횡단하여 남쪽과 북쪽으로 나눌 수 있는 자연경계가 되며, 중앙수로는 철도와 교차하여 남북방향으로 종단하는 데 이것을 기준으로 서쪽과 동쪽으로 구분한다. 철도의 남쪽 부분이 차량기지 건설 예정 부지에 해당되며 예정부지는 상대적으로 북쪽 부분보다 저지대이다. 지역의 동측 및 서측의 경계는 농로, 북측 경계는 도로에 해당하며, 남측 경계 외측에는 경계를 따라서 문산천이 흐르고 있다. 여기서는 문산천의 수위가 높아서 배수하지 않으며, 수로는 작아서 영향을 미치지 않는 것으로 보고 모의하였다. 즉, 이 경계는 모두 폐경계로 가정함으로써 침수피해의 관점에서 발생할 수 있는 최악의 경우에 대하여 계산을 수행하였다.

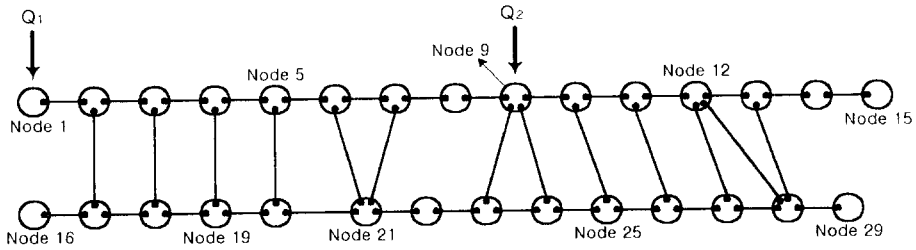
계산모형은 29개의 절점과 40개의 수로로 구성하였다. 철도와 중앙수로를 교차하는 지점을 기준으로 북서쪽 부분은 8개의 절점으로, 북동쪽 부분은 7개의 절점으로, 남서쪽 부분은 6개의 절점으로, 남동쪽 부분은 8개의 절점으로 구성하였다. 즉, 절점 1에서 8까지는 북서쪽 부분, 절점 9에서 15까지는 북동쪽 부분이며 절점 16에서 절점 21까지는 남서쪽 부분, 절점 22에서 절점 29까지는 남동쪽 부분이다. 절점 1과 9에는 상류유역으로부터의 유출수가 유입되는 지점이다. 계산조건으로는 Manning의 조도계수는 0.04로 하였으며, 초기조건으로 모든 수로의 유량을 0으로 하였고 시간 증분은 5분, 총 계산시간은 33 시간으로 하였다. 각각의 절점들의 초기 수위는 4.01 m로 설정하였다.

표 1은 임의로 지형의 각각의 구획에 4.0~12.0 m의 수위를 0.1 m씩 증가시키며 지형의 표고와 면적을 통하여 각 수위의 침수 수량을 구한 후 각 연도별 홍수의 총 유량과 비교하여 그와 비슷한 침수수량들을 찾아낸 후 그들을 선형내삽(Interpolation)하여 각각의 홍수빈도에 따른 침수수량을 구한 후 이를 이용하여 수위, 침수지역, 최심수위, 침수지역 평균수위 등을 구한 것이다.

표 2는 20년 빈도의 홍수량이 상류유역으로부터 유입되는 경우에 대하여 계산 모형을 적용하여 구한 계산결과를 나타낸 것이다. 표 2에서 보듯이 이 계산모형에서 얻은 33 시간 후의 침수된 지역의 최종수위인 6.46 m는 표 1의 20년 빈도의 홍수량에 의한 수위와 비교할 때 거의 일치함을 알 수 있다.



(a) 대상지역의 지형도



(b) 계산모형의 모식도

그림 1. 계산 모형 적용 대상지역의 지형도 및 계산모형의 모식도

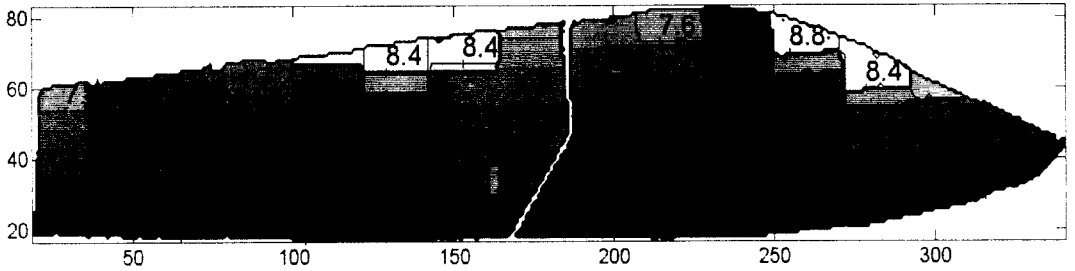
표 1. 유입된 빈도별 홍수량에 따른 침수수위 및 침수면적(기지 건설 전)

홍수 빈도 (연도)	침수수량 (m ³)	수위 (m)	최심수심 (m)	침수지역 평균수심 (m)	침수면적 (m ²)	침수면적비 (%)
2	157458	6.26	2.26	0.62	331055	43.37
5	206358	6.34	2.34	0.62	377213	49.42
10	234861	6.42	2.42	0.60	439699	57.61
20	266721	6.49	2.49	0.67	439699	57.61
30	287877	6.54	2.54	0.67	478643	62.71
50	324513	6.61	2.61	0.65	542093	71.02
100	341484	6.63	2.63	0.67	542093	71.02

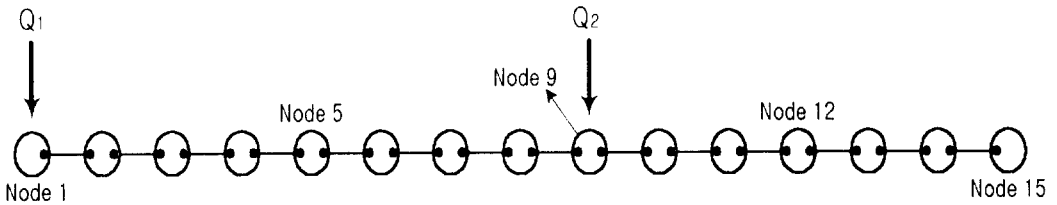
표 2. 유입된 20년 빈도 홍수량에 대한 계산모형의 결과(기지 건설 전)

시간 (분)	침수수량 (m ³)	수위 (m)	최심수심 (m)	침수지역 평균수심 (m)	침수면적 (m ²)	침수면적비 (%)
100	165	4.25	0.25	0.15	2525	1.67
200	80978	5.71	1.71	0.52	151220	19.81
300	212184	6.28	2.28	0.67	331055	43.37
400	271693	6.44	2.44	0.67	439699	57.61
500	281367	6.46	2.46	0.68	439699	57.61

3.2 경의선 차량기지 건설 후



(a) 대상지역의 지형도



(b) 계산모형의 모식도

그림 2. 계산 모형 적용 대상지역의 지형도 및 계산모형의 모식도

그림 2(a)는 경의선 차량기지 건설 후의 지형도이며 그림 2(b)는 계산 모형의 모식도를 나타낸 것이다. 계산모형은 15개의 절점 및 14개의 수로로 구성되었다. 차량기지 건설 전의 경우에 대해서와 마찬가지로 Manning의 조도계수는 0.04, 시간 증분은 5 분, 총 계산 시간은 33시간, 초기 조건은 모든 수로에서 유량은 0으로, 상류유역으로부터 유출수가 유입되는 지점은 절점 1과 9이고, 각각의 절점들의 초기수위만 5.71 m로 하여 계산모형에 적용하였다. 이 대상지역의 남측인 기지 건설부지는 범람수가 범람할 수 없을 정도로 높다고 가정하였다. 즉, 위에서와 같이 경계는 모두 폐경계로 가정하였다.

표 3. 유입된 빈도별 홍수량에 따른 침수수위 및 침수면적(기지 건설 후)

홍수 빈도 (연도)	침수 수량 (m ³)	수위 (m)	최심수심 (m)	침수지역 평균수심 (m)	침수면적 (m ²)	침수면적비 (%)
2	157458	7.11	1.41	0.51	308237	80.24
5	206358	7.26	1.56	0.62	327695	85.31
10	234861	7.35	1.65	0.70	335520	87.34
20	266721	7.44	1.74	0.77	342865	89.25
30	287877	7.51	1.81	0.83	346784	90.27
50	324513	7.61	1.91	0.91	353694	92.07
100	341484	7.66	1.96	0.96	353694	92.07

표 3은 위의 표 1에서와 같은 방법으로 각각의 홍수빈도에 따라 침수수량을 구한 후 이를 이용하여 수위, 침수지역, 최심수위, 침수지역 평균수위 등을 구한 것이다. 또한, 표 4는 위의 대상 지역에 20년 빈도의 홍수량을 계산 모형에 적용한 후에 얻은 결과치이며 계산모형에서 얻은 33시간 후의 침수된 지역의 최종 수위인 7.49 m는 표 3의 20년 빈도의 홍수량에 의한 수위와 비교할 때 거의 일치함을 알 수 있다.

표 4. 유입된 20년 빈도 홍수량에 대한 계산모형의 결과(기지 건설 후)

시각 (분)	침수수량 (m ³)	수위 (m)	최심수심 (m)	침수지역 평균수심 (m)	침수면적 (m ²)	침수면적비 (%)
100	1157	6.03	0.33	0.09	12745	3.32
200	91028	6.87	1.17	0.37	253734	66.05
300	218167	7.30	1.60	0.66	326485	84.99
400	275514	7.47	1.77	0.81	341656	88.94
500	282347	7.49	1.79	0.83	341656	88.94

3.3 토출유량에 따른 민감도 분석

절점 9의 유입량이 침두에 이르는 시각을 중심으로, 유량을 토출하지 않은 경우, 펌프 1, 2, 3, 4, 5 대로 유량을 토출한 경우를 1시간씩 증가시키며 각 경우에 대한 계산을 수행하였으며, 그에 따른 계산 결과는 표 5에 요약하였다. 그림 3은 총 계산시간 33시간이 지난 시점의 지역의 그림으로 토출을 하지 않은 경우와 펌프 1, 2, 3, 4 대를 5시간 운전한 경우를 나타낸 것이다.

표 5. 절점 9에서 유량을 토출한 시간에 따른 침수수위 및 침수면적비

운전 시간	3.28 m ³ /s		6.56 m ³ /s		9.84 m ³ /s		13.12 m ³ /s		16.4 m ³ /s	
	수위	침수 면적비(%)	수위	침수 면적비(%)	수위	침수 면적비(%)	수위	침수 면적비(%)	수위	침수 면적비(%)
0	7.49	88.94	7.49	88.93	7.49	88.93	7.49	88.93	7.49	88.93
1	7.46	88.94	7.42	88.93	7.38	87.03	7.35	87.03	7.32	87.03
2	7.42	88.94	7.35	87.03	7.27	84.99	7.21	84.99	7.13	79.92
3	7.39	87.03	7.28	84.99	7.16	79.92	7.05	75.14	6.92	71.09
4	7.36	87.03	7.20	79.92	7.04	75.14	6.87	66.04	6.63	44.16
5	7.34	87.03	7.12	79.92	6.90	66.05	6.63	44.16	0	0

4. 결론

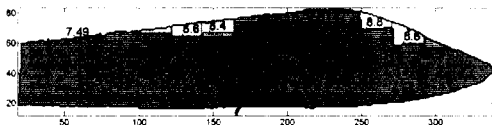
본 연구에서는 폐합형 하천수계에 대한 부정류 해석 수치기법을 홍수터 흐름까지 포함하도록 확장하여서, 하천분류 및 홍수터 흐름을 동시에 모의할 수 있는 수치모형을 대상지역에 적용한 것이다. 위의 결과에서 보듯이 계산모형으로 얻어진 결과치가 0.1 m씩 수위를 증가하여 지형의 면적과 표고를 통하여 계산한 결과치와 거의 같음을 알 수 있다.

감사의 글

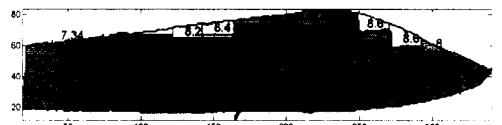
본 연구는 (주)대우의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 사의를 표한다.

참고문헌

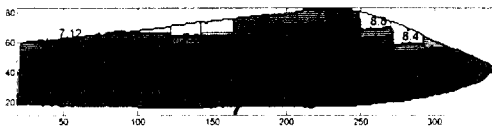
- 전경수 (1998). "준2차원 홍수범람 모형에 관한 연구." *韓國水資源學會誌*, 제31권, 제5호, pp. 515-528.
- 전경수 (1996). "유티흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구." *韓國水資源學會誌*, 제29권, 제 2호, pp. 153-165.
- Cunge, J.A. (1975). "Two-dimensional modeling of flood plains." *Unsteady flow in open channels*, K. Mohmmod and V. Yevjevich, eds., Water Resour. 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.



(a) 펌프의 토출량이 0인 경우



(b) 펌프 1대로 토출한 경우



(c) 펌프 2대로 토출한 경우



(d) 펌프 3대로 토출한 경우



(e) 펌프 4대로 토출한 경우

그림 3. 총 계산시간이 지난 후의 그림