

# 자연하천에서의 홍수위 산정을 위한 1차원 모형과 2차원 모형의 비교

( Comparison of 1-Dimensional Model with 2-Dimensional Model  
for Estimation of Flood Elevation in Natural Stream )

<sup>0</sup>김형일\*, 이종설\*\*, 허준행\*\*\*, 조원철\*\*\*\*

## 1. 서 론

현재 우리나라의 하천의 개수사업, 교량·제방과 같은 수공구조물 및 저류지, 저수지 등의 홍수저류시설 설계를 위한 계획홍수위 산정에 있어서, 1차원 정상 부등류 계산모형인 HEC-2 모형이 널리 사용되고 있다. 그러나 1차원 모형은 각 단면의 평균적인 값만을 산정하게 되므로 홍수시 하천 하폭의 확대, 축소, 만곡부 및 섬 등과 같은 하천 장애물이 존재하는 경우 하천 횡단면에 따른 수위, 유속 변화를 표현하기에는 어려움이 따른다. 반면, 미 육군공병단의 King 등이 개발한 RMA-2V 모형은 섬을 포함한 하천수로구간의 흐름분포, 교각부근의 흐름, 확대 및 축소부를 포함한 하천구간의 흐름 등 하천, 저수지, 하구 등의 일반적인 흐름양상을 계산할 수 있는 2차원 유한요소모형이다. 따라서 본 연구에서는 1차원 모형인 HEC-2 모형과 2차원 부정류 모형인 RMA-2V 모형을 섬에 의한 흐름의 장애와 확대, 축소부가 존재하며 복잡한 흐름양상을 갖는 북한강 상류의 남이섬 하류단으로부터 상류단 7km 구간까지의 유역에 적용하여 그 결과를 분석하였다. 또한 여러가지 홍수량 및 하천의 초기조건에 대해 RMA-2V를 이용하여 하천 각 단면에서의 좌안, 최심부, 우안에서의 홍수위 및 유속을 산정하고, 각 경우에 대하여 산정된 값들을 HEC-2 모형에 의한 계산결과와 비교함으로써 현재 널리 사용되고 있는 1차원 모형의 적용성에 대해 고찰하였다.

## 2. HEC-2모형과 RMA-2V모형

### 2.1 HEC-2 모형

HEC-2모형은 1차원 에너지 방정식을 지배방정식으로 하며, 자연하천이나 인공수로에서 정상 점변류(steady gradually varied flow)의 수면형 계산과 상류나 사류의 수면형 및 교량, 암거, 위어, 홍수터에서의 구조물 등 장애물의 영향을 고려할 수 있는 범용화된 프로그램으로 현재 널리 사용되고 있다. HEC-2모형에서 사용되는 에너지 방정식은 다음 식 (1)과 같다.

$$WS_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_2 \quad (1)$$

---

\* 연세대학교 토목공학과 석사과정  
 \*\* 연세대학교 토목공학과 박사과정  
 \*\*\* 연세대학교 토목공학과 조교수  
 \*\*\*\* 연세대학교 토목공학과 교수

## 2.2 RMA-2 모형

2차원 유한요소모형인 RMA-2V모형은 천수방정식을 지배방정식으로 사용하게 되며, 다음 식 (2), (3), (4)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{1}{\rho} (\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}) + g \frac{\partial a}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + \tau_x = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{\rho} (\epsilon_{xx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \epsilon_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}) + g \frac{\partial a}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} + \tau_y = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h (\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

여기서  $u, v$  = 직교좌표계상의  $x$ 와  $y$  방향의 유속

$x, y, t$  = 직교좌표계의 좌표 및 시간

$\rho$  = 유체의 밀도

$g$  = 중력가속도

$a$  = 바닥표고

$h$  = 수심

$\tau_x, \tau_y$  = 바닥마찰, 풍속, coriolis영향을 포함한 외력

외력항인  $\tau_x, \tau_y$  는 다음 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_x = \frac{n g u}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} - \frac{\eta}{h} V_a^2 \cos \phi - 2\omega v \sin \phi \quad (5)$$

$$\tau_y = \frac{n g v}{h^{1/3}} \sqrt{(u^2 + v^2)} - \frac{\eta}{h} V_a^2 \sin \phi + 2\omega u \sin \phi \quad (6)$$

여기서  $n$  = Manning의 조도계수

$\eta$  = 바람에 의한 전단계수

$V_a$  = 풍속

$\phi$  = 풍향

$\omega$  = 자전을

$\phi$  = 위도

## 3. 모형의 구성 및 입력자료

### 3.1 대상구간

모형의 적용구간은 북한강 청평댐 상류 약 21~28 km 구간이며, 이 구간은 섬에 의한 흐름의 장애와 확대, 축소부가 존재하며 복잡한 흐름양상을 갖는 구간으로 대상구간내에 가평천이 유입하며 개략적인 하천의 형태는 그림 1과 같다.

### 3.2 하상자료

하상자료는 자라섬 보존방안 용역 조사에서 실시한 측량성과(1995)를 이용하였으며, 약 7km구간에 대해 각각 약 100m, 약 20m 간격으로 중·횡단측량된 자료이다.

### 3.3 경계조건

RMA-2V모형과 HEC-2모형의 상류단 경계조건으로는 북한강 본류의 유량과 유입되는 가평천의 유량, 하류단 경계조건으로는 수위를 사용하였으며, 적용된 상·하류단의 유량 및 수위를 표 1과 같다.

### 3.4 조도계수

두 모형에 사용된 조도계수는 표 2와 같으며, 이는 84년, 86년, 90년, 91년 홍수를 대상으로 HEC-2모형을 이용하여 홍수흔적과의 비교를 통해 역산한 유량별 조도계수를 나타낸 것이며, RMA-2V모형에서도 같은 값을 사용하였다.

### 3.5 모형의 구성

RMA-2V모형은 삼각형 2차요소와 사각형 2차요소를 혼합하여 1312개의 node와 404개의 element로 구성하였으며, HEC-2모형과의 비교를 위하여 HEC-2모형에서 사용한 횡단면과 동일한 위치에 node가 위치하도록 하였다. RMA-2V모형의 경우 바람에 의한 마찰항은 무시하였으며, Eddy Viscosity는 모형의 해를 수렴시키거나 안정한 해를 얻기 위해 이용하였으며, 250~750 lb-sec/ft<sup>2</sup>의 값을 사용하였다.

HEC-2모형은 60개의 구간으로 나누어 계산을 실시하였으며, 하천의 불규칙한 형상 즉 섬의 영향과 확대 및 축소부의 영향으로 인한 유효 통수단면적(effective flow area)의 변화를 고려하기 위하여 확대 및 축소 손실계수를 두 단면의 면적비에 따라 적용하였다.

## 4. 모형의 적용 및 결과분석

### 4.1 유량별 수위비교

다음 그림 2~4는 표 1을 입력자료로 하여 RMA-2V에서 구한 지점별 수위와 HEC-2에서 구한 지점별 수위를 비교한 것이다. 그림 2~4에서 HEC-2에서 구한 값들이 RMA-2V에서 구한 값보다 전체적으로 과대 산정하는 것으로 나타났으며, 특히 하류단의 경우 HEC-2에 의한 결과는 전형적인 M<sub>2</sub> 곡선의 양상을 보이며 수위가 급격히 하강함을 알 수 있다. 그림 2~4에서 HEC-2의 결과는 확대 및 축소 손실계수를 고려하지 않은 경우이며, 상류단 약 4,500m~5,400m 구간에서는 수위가 급격히 하강하며, RMA-2V에 의한 계산수위보다 오히려 과소산정된 결과를 보이고 있다. 이 구간은 북한강본류와 가평천이 합류되고, 하폭이 급격히 확대되는 부분으로 HEC-2의 계산결과가 전반적으로 과대산정하는 경향으로 볼 때 단면확대에 의한 확대손실의 영향을 고려해야 할 것으로 생각된다. 그림 5는 RMA-2V모형의 단면에서의 평균값과 HEC-2모형의 수위를 각 유량별로 비교한 것으로 유효 통수단면적

의 변화가 크지 않는 하류단의 경우 HEC-2모형의 결과는 유량이 커질수록 과대산정하는 경향이 있으며, 유효 통수단면적이 약 20%~40%로 확대되는 상류단 약 4,500m~5,400m 구간에서는 유량이 증가할수록 과소산정하는 경향이 있다. 그림 6은 유효 통수단면적의 비가 약 10%~15% 축소되는 경우 축소 손실계수(CC)를 0.1 또는 0.0으로 둔 경우와 약 20%~40%로 확대되는 경우 확대 손실계수(CE)를 0.3~0.6으로 둔 경우에 대한 구간별 수위를 RMA-2V모형의 평균수위값과 비교한 것이다. 하류단의 축소손실계수를 고려한 경우 과대산정경향이 증가하고 있으며, 상류단의 확대 손실계수를 사용한 경우 비교적 과소산정 경향이 줄어들고 있음을 알 수 있다.

#### 4.2 유량별 유속비교

표 3에서 하류단 경계부근 유속의 경우 HEC-2에 의한 결과가 과대 추정되는 것으로 나타났다. 이는 하류단 경계부근의 급격한 수위하강에 의한 결과인 것으로 생각된다. 또한 RMA-2V모형에 의해 산정된 유속은 복잡한 하상형태에 따라 좌·우안 및 유심부에서 상이한 값을 보이며, HEC-2에 의해 산정된 단면 평균유속과는 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다.

### 5. 결론

본 연구는 1차원 모형과 2차원모형을 복잡한 하상형태를 갖는 자연하천 구간에 적용하여 그 결과를 비교한 것으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 만곡유로부나 섬, 확대 및 축소부가 존재하는 복잡한 하도구간의 경우 좌·우안 및 유심부에서의 유속과 수위는 큰 차이를 보이며, 따라서 이러한 복잡한 하상형태를 갖는 구간에서 하천의 개수사업, 교량·제방과 같은 수공구조물 및 저류지, 저수지 등의 홍수저류시설 설계를 위한 계획홍수위 산정에 있어서 1차원 모형으로는 그 양상을 정확히 파악할 수 없는 것으로 생각된다.

(2) 섬이나 확대, 축소부가 존재하여 유효 통수단면적의 변화가 심한 지역에서 HEC-2모형을 적용할 경우 확대 및 축소손실 계수의 적절한 선택이 요구되며, 특히 확대손실을 정확히 고려하지 못할 경우, 홍수위를 과소산정하게 되는 위험성이 있으며 확대부 전·후 단면의 면적비에 따른 적절한 계수의 산정이 필요한 것으로 생각된다.

### 6. 참고문헌

- 1) 조성우, 전경수, "중소하천의 치수계획을 위한 부등류 계산모형의 적용성에 관한 연구", 1995년 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp.135~138, 1995.
- 2) Hydrologic Engineering Center, HEC-2 ; Water Surface Profile, U.S. Army Corps of Engineers, 1991.
- 3) M.H. Chaydhry, Open-Channel Flow, Prentice Hall, pp. 48~161, 1993.
- 4) I.P. King, Finite Element Model for Two Dimensional Depth Averaged Flow ; RMA-2V, U.S. Army Corps of Engineers, 1987.

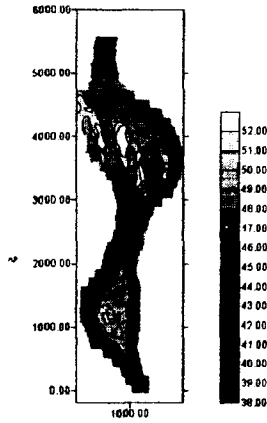


그림 1. 적용대상구간

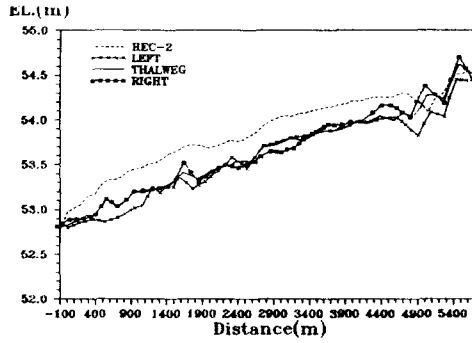


그림 2. 지점별 홍수위(Q = 8,430 cms)

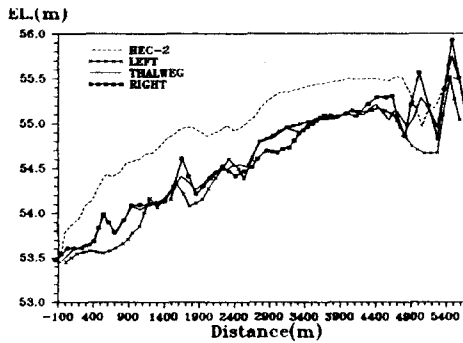


그림 3. 지점별 홍수위 (Q = 12,650 cms)

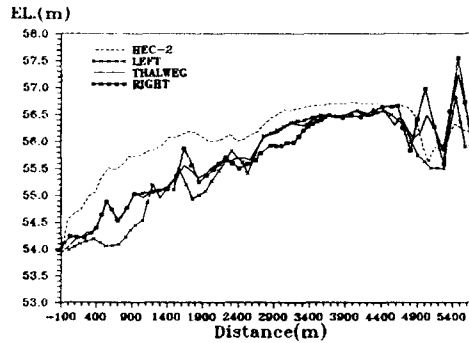


그림 4. 지점별 홍수위(Q = 16,870 cms)

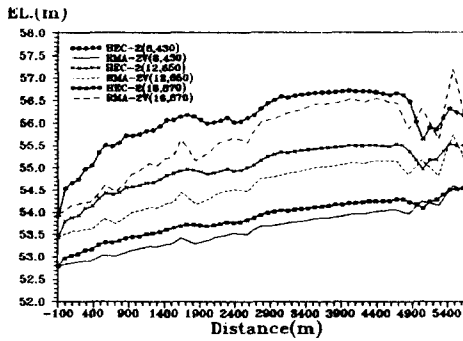


그림 5. 각 유량별 평균수위비교

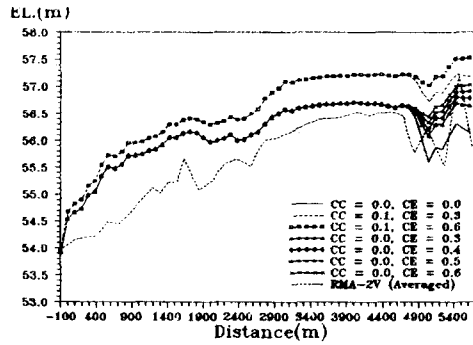


그림 6. 확대·축소 손실계수를 고려한 수위비교(Q = 16,870 cms)

표 1. 상·하류단 경계조건

	유량(cms)		수위 (El. m)
	북한강 분류	가평천	
1	8,000	430	52.79
2	12,000	650	53.44
3	16,000	870	53.92

표 2. 유량별 조도계수

유량(cms)	조도계수 (Manning's n)
8,430	0.0315
12,650	0.0276
16,870	0.0238

표 3. 유량별 유속

구분 Sec. No.	8,430 cms				12,650 cms				16,870 cms			
	HEC-2 결과	RMA-2V 결과			HEC-2 결과	RMA-2V 결과			HEC-2 결과	RMA-2V 결과		
		좌안	최심부	우안		좌안	최심부	우안		좌안	최심부	우안
0	3.58	1.62	2.24	2.24	5.03	2.46	3.11	3.08	6.58	3.28	4.11	4.08
1	3.04	1.45	2.03	2.06	4.21	2.22	2.90	2.78	5.39	2.90	3.79	3.69
2	2.95	1.57	1.90	2.08	4.08	2.34	2.62	2.85	5.21	3.23	3.46	3.73
3	2.89	1.55	1.79	2.12	4.01	2.35	2.56	2.86	5.11	3.10	3.34	3.77
4	2.64	1.67	1.98	2.35	3.64	2.53	2.77	3.13	4.62	3.31	3.63	4.18
5	2.57	1.95	2.30	2.30	3.52	2.83	3.12	3.12	4.44	3.74	4.05	4.05
6	2.30	2.24	2.26	2.28	3.10	3.14	3.13	3.16	3.84	4.26	3.96	3.99
7	2.10	2.39	2.02	2.02	2.80	3.28	2.77	2.77	3.44	4.48	3.48	3.48
8	2.22	2.49	1.73	1.75	2.95	3.37	2.29	2.33	3.61	4.70	2.91	2.94
9	2.24	2.41	2.02	1.93	2.93	3.31	2.72	2.64	3.48	4.49	3.43	3.31
10	2.05	2.36	2.46	2.37	2.66	3.29	3.36	3.29	3.11	4.34	4.26	4.13
11	2.04	2.43	2.07	2.07	2.68	3.26	2.86	2.86	3.21	4.33	3.59	3.59
12	2.11	2.63	1.78	1.88	2.74	3.24	2.41	2.53	3.25	4.46	3.05	3.20
13	2.01	2.21	1.94	1.78	2.63	2.89	2.64	2.52	3.16	3.77	3.30	3.06
14	2.04	1.44	1.80	1.80	2.64	2.11	2.46	2.46	3.13	2.47	3.08	3.08
15	1.98	2.00	1.92	1.92	2.53	2.55	2.58	2.58	2.98	3.31	3.21	3.21
16	1.80	1.69	1.97	2.02	2.26	2.29	2.65	2.72	2.56	2.77	3.24	3.31
17	1.75	2.11	1.78	1.69	2.23	2.76	2.34	2.29	2.64	3.53	2.87	2.77
18	1.64	1.34	1.36	.48	2.08	1.93	1.75	.81	2.45	2.24	2.15	.87
19	1.60	1.78	1.65	.91	2.02	2.35	2.16	1.28	2.38	2.95	2.59	1.53
20	1.70	2.63	2.00	1.88	2.16	3.37	2.64	2.56	2.57	4.42	3.19	3.11
21	1.86	2.31	1.86	1.73	2.42	3.10	2.49	2.36	2.93	3.94	2.98	2.84
22	2.07	2.36	1.76	1.75	2.70	3.15	2.32	2.32	3.28	4.01	2.81	2.85
23	2.12	2.20	1.73	1.51	2.77	2.96	2.25	2.08	3.36	3.68	2.72	2.47
24	2.13	2.12	1.69	1.35	2.78	2.68	2.18	1.79	3.37	3.36	2.65	2.16
25	2.04	1.88	1.94	1.38	2.65	2.48	2.54	1.88	3.20	3.04	3.06	2.29
26	2.30	1.50	1.72	1.74	3.00	2.09	2.34	2.35	3.67	2.50	2.79	2.91
27	2.31	2.00	1.92	1.74	3.03	2.58	2.54	2.34	3.69	3.17	3.11	2.86
28	2.15	2.62	1.98	1.60	2.83	3.26	2.66	2.12	3.46	4.06	3.18	2.59
29	2.17	2.22	2.03	1.47	2.86	2.84	2.64	1.96	3.50	3.44	3.20	2.40
30	1.82	1.57	1.50	1.18	2.39	2.05	1.99	1.59	2.93	2.42	2.37	1.97
31	1.61	1.56	1.47	1.28	2.11	1.97	1.89	1.68	2.57	2.29	2.24	2.06
32	1.48	1.57	1.50	1.54	1.94	1.95	1.88	1.92	2.36	2.20	2.18	2.27
33	1.21	1.32	1.30	1.68	1.55	1.67	1.67	2.05	1.86	1.84	1.88	2.38
34	1.35	1.14	1.00	1.81	1.70	1.43	1.38	2.18	2.00	1.53	1.50	2.50
35	1.28	1.14	.98	1.70	1.58	1.38	1.31	2.07	1.85	1.46	1.44	2.31
36	1.27	1.24	1.27	1.46	1.55	1.45	1.51	1.79	1.79	1.50	1.66	1.91
37	1.23	1.21	1.22	1.36	1.49	1.38	1.47	1.64	1.71	1.34	1.48	1.71
38	1.22	1.08	.94	1.32	1.47	1.24	1.19	1.61	1.69	1.11	1.14	1.63
39	1.20	1.16	1.11	1.23	1.43	1.28	1.28	1.46	1.64	1.17	1.23	1.40
40	1.25	1.27	1.38	1.27	1.49	1.38	1.47	1.41	1.70	1.31	1.43	1.36
41	1.30	1.13	1.22	1.05	1.55	1.23	1.36	1.21	1.76	1.11	1.27	1.11
42	1.32	.84	.97	.65	1.55	.98	1.14	.82	1.75	.80	1.01	.68
43	1.26	.90	1.17	.94	1.49	1.01	1.32	1.03	1.69	.91	1.28	.97
44	1.38	1.12	1.52	1.47	1.63	1.24	1.69	1.61	1.85	1.24	1.77	1.63
45	1.44	.97	1.28	1.32	1.72	1.10	1.47	1.58	1.96	1.02	1.48	1.50
46	1.49	.84	1.04	1.46	1.78	.95	1.21	1.69	2.02	.81	1.21	1.61
47	1.65	.87	1.31	1.62	2.00	1.04	1.54	1.82	2.30	1.06	1.71	1.85
48	1.79	.89	1.91	1.59	2.18	1.22	2.37	1.89	2.53	1.44	2.68	2.09
49	1.91	1.28	1.99	1.64	2.34	1.55	2.43	1.84	2.71	1.77	2.71	2.12
50	1.79	1.53	2.20	3.11	2.22	1.73	2.70	2.94	2.59	1.87	3.08	3.32
51	1.96	1.95	2.64	2.88	2.41	2.39	3.32	3.54	2.82	2.84	3.83	3.97
52	2.47	2.17	2.98	3.03	3.05	2.87	3.85	4.11	3.55	3.41	4.41	4.92
53	2.90	2.60	2.98	2.97	3.79	3.39	3.72	3.63	4.64	4.12	4.32	4.12
54	3.42	2.27	2.77	2.08	4.51	2.61	3.28	2.00	5.61	3.34	3.84	2.14
55	3.21	3.36	2.95	2.62	4.23	4.70	3.73	3.22	5.25	5.66	4.44	3.85
56	3.30	3.59	3.44	3.36	4.39	4.86	4.53	4.44	5.50	5.70	5.47	5.41
57	3.16	2.93	3.06	2.94	4.17	3.69	3.85	3.66	5.18	4.33	4.47	4.25
58	2.99	2.67	2.39	2.01	3.94	3.16	2.69	1.99	4.89	3.61	2.86	1.92
59	3.14	2.48	2.97	2.68	4.17	3.25	3.81	3.37	5.20	3.95	4.39	3.89
60	3.25	3.10	3.58	3.60	4.33	4.43	4.84	4.91	5.46	5.36	5.72	5.88