

## FESWMS-2DH 모형에 의한 한강 하류부의 수리특성 분석

Analysis of Hydraulic Characteristics of the Downstream  
Han River Reach by the FESWMS-2DH Model

윤용남\* · 박무종\*\*

Yoon, Yong Nam · Park, Moo Jong

## Abstract

FESWMS-2DH developed by the U.S. Department of Transportation based on two-dimensional shallow water wave equation is used in this study to simulate the flow characteristics of the river reach between Chamsil and Shingok submerged weirs, which acts as a tidal river under low flow conditions. The model uses Galerkin F.E.M and meshes are composed of triangular or quadrangular elements. The model shows accurate and stable results concerning mass conservation as well as velocity distribution and water surface elevation. The results obtained in the present study may provide useful informations on the planning of river pollution abatement measures and artificial structures.

## 요 지

본 연구에서는 미국 교통성에서 개발된 2차원 수리계산모형인 FESWMS-2DH를 갈수기 감소구간인 잠실수중보와 신곡수중보 구간에 적용하여 모형의 적용성을 검토하고 수위관측자료와 유량자료를 이용하여 유속과 수위를 계산하였다. 이 모형은 Galerkin 유한요소법을 이용하여 부정류 해석을 할 수 있으며 삼각형 요소와 사각형 요소를 혼합하여 요소망을 구성할 수 있다. 모형의 적용결과 유속분포 및 수면형과 질량 유출입 보존 등의 면에서 정밀성과 안정성이 우수하게 나타났으며 연구결과는 수질관리 및 새로운 인공구조물 설치를 위한 기본자료로 사용될 수 있을 것이다.

## 1. 서 론

1970년대에 시작된 급격한 경제발전과 더불어 인구의 수도권 집중현상으로 인하여 한강은 각종 도시하수가 무분별하게 방류, 하천으로 유입되어 수질악화는 물론 각종 용수원으로서의 기능과 휴식, 위락장소로서의 기능이 크게 저하되었다. 뿐만 아

니라 홍수조절을 위한 다목적 댐들이 한강에 설치되고 하류에는 주운과 취수를 위한 잠실수중보와 신곡수중보가 설치되어 있어 이 구간에서 한강 본류는 하천의 특징 뿐만 아니라 저수지로서의 기능도 가지고 있다. 또한 한강 하구에서부터 잠실수중보 구간은 갈수기에 한강하구 조위의 영향을 받는 감소하천이 된다. 즉, 저조위일 때는 일반하천의 특성을 나타내다가 고조위가 되면 역류가 발생하여 그 효과가 상류로 전파된다. 또한 잠실수중보-신곡수중

\* 정희원 · 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

\*\* 고려대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정

보 구간은 중랑천 합류점과 반포천 합류점같은 만곡부, 여의도 부근에 위치한 3개의 섬의 영향과 각 지천유입유량과 하수처리장으로부터의 하수 배출에 의한 유량의 영향으로 인해 2차원 이상의 해석이 필요하다.<sup>(1)</sup>

국내에서 2차원 천수방정식에 관한 수치해석 기법은 주로 유한차분기법을 중심으로 연구되어 왔는데 최병호<sup>(2)</sup>가 경기만의 조석해석, 한건연 등<sup>(3)</sup>이 울산만의 조석해석, 이종태 등<sup>(4)</sup>이 항내의 장주기파 해석에 각각 적절한 유한차분모형을 적용하였고, 이길성 등<sup>(5)</sup>이 천수방정식의 유한차분특성을 연구하였다. 또한 윤태훈<sup>(6)</sup>이 항내의 토사이송 예측과 서승원 등<sup>(7)</sup>이 단면급변화에 의한 흐름을 유한요소법에 의하여 연구한 예가 있으나 자연 하천에서의 부등류해석 뿐 아니라 수위변화와 지천의 유입을 고려하는 부정류 해석에 적용할수 있는 2차원 유한요소모형의 적용에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 조석과 인공구조물의 영향을 받는 하천에서의 수위와 유속을 2차원적으로 계산하여 조위와 팔당댐 방류량의 변화에 의한 영향과 만곡부와 섬에 의한 유속과 유량의 변화를 파악하여 하천의 이수 및 치수관리를 위한 기본 자료를 제시하고자 하며 이를 위해 본 연구에서는 수심적분된 흐름의 2차원 연속 방정식과 운동량 방정식을 초기조건과 경계조건에 맞추어 유한요소법으로 풀이하는 미국 교통성에서 개발한 FESWMS-2DH 모형을 사용하였다.

## 2. 사용모형

### 2.1 지배방정식

수심평균치를 취한 2차원 천수방정식은 자유수면을 가진 물의 운동을 기술하는 3차원 Navier-Stokes의 일반식을 연직 방향으로의 유속과 가속도가 무시될 수 있다고 가정하고 수심방향으로 적분함으로써 유도될 수 있다. x, y방향에 대한 흐름의 운동량 방정식은 다음과 같다.<sup>(8,9,10)</sup>

$$\frac{\partial}{\partial t} (HU) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{uu}HUU) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{uv}HUV) + gH \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} - \Omega HV$$

$$+ \frac{1}{\rho} [\tau_x^b - \tau_x^s - \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{xx}) - \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{xy})] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (HV) + \frac{\partial}{\partial x} (\beta_{vu}HVU) + \frac{\partial}{\partial y} (\beta_{vv}HVV) + gH \frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{1}{2} g \frac{\partial H^2}{\partial x} + \Omega HU + \frac{1}{\rho} [\tau_y^b - \tau_y^s - \frac{\partial}{\partial x} (H\tau_{yx}) - \frac{\partial}{\partial y} (H\tau_{yy})] = 0 \quad (2)$$

한편 깊이 방향으로 평균된 흐름의 연속 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (HU) + \frac{\partial}{\partial y} (HV) = 0 \quad (3)$$

여기서 H는 수심,  $z_b$ 는 바닥면 표고, U, V는 수심평균치를 취한 x, y방향의 유속,  $\beta_{uu}$ ,  $\beta_{uv}$ ,  $\beta_{vu}$ ,  $\beta_{vv}$ 는 연직방향으로의 속도의 변동성을 나타내는 운동량 보정계수, g는 중력 가속도,  $\Omega$ 는 Coriolis 계수,  $\rho$ 는 물의 밀도이며 일정한 것으로 가정한다.  $\tau_{xx}$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yx}$ ,  $\tau_{yy}$ 는 난류에 의한 전단응력이며  $\tau_x^b$ ,  $\tau_y^b$ 는 x, y방향으로 작용하는 바닥에서의 전단응력이고,  $\tau_x^s$ ,  $\tau_y^s$ 는 x, y방향으로 작용하는 수표면에서의 풍력에 의한 전단 응력이다.

### 2.2 유한요소 방정식

식 (1), (2), (3)과 같은 미분 방정식을 풀이함으로써 수역에 대한 흐름을 계산할 수 있으나 해석적으로 풀이되는 경우는 특수한 경우에 한정된다. FESWMS-2DH 모형에서는 Weighted Residual(가중잔차) 방법으로 지배방정식을 유한요소식으로 변환시킨다.<sup>(11,12,13)</sup> 식 (1), (2), (3)을 잔차의 형태로 표시하여 전개하면 다음과 같다.

$$f_{ii} = \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i \left[ H \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial H}{\partial t} + gH \frac{\partial z_b}{\partial x} - \Omega HV + \frac{1}{\rho} (\tau_x^b - \tau_x^s) + \frac{\partial N_i}{\partial x} \left[ -\beta_{uu}HUU - \frac{1}{2} gH^2 \right] + \bar{v}H \left( \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial N_i}{\partial y} \left[ -\beta_{uv}HUV + \bar{v}H \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x} \right) \right] \right\} A_e + \sum_e \int_{S_e} N_i \left[ (\beta_{uu}HUU + \frac{1}{2} gH^2) l_x + \beta_{uv}HUV l_y \right] dS_e$$

$$\begin{aligned}
 & - \sum_e \int_{S_e} N_i [\bar{v}H (\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial x}) \lambda_x \\
 & + \bar{v}H (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial U}{\partial x}) \lambda_y] dS_e \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{2i} = & \sum_e \int_{A_e} \left\{ N_i \left[ H \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial H}{\partial t} + gH \frac{\partial z_b}{\partial y} + \Omega HV \right. \right. \\
 & + \frac{1}{\rho} (\tau_x^b - \tau_x^s) + \frac{\partial N_i}{\partial x} [-\beta HUV + \bar{v}H (\frac{\partial U}{\partial y} \\
 & + \frac{\partial V}{\partial x})] + \frac{\partial N_i}{\partial y} [-\beta HVV - \frac{1}{2} gH^2 \\
 & \left. \left. + \bar{v}H (\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y}) \right] \right\} A_e \\
 & + \sum_e \int_{S_e} N_i [(\beta HUV) l_x + (\beta HVV + \frac{1}{2} gH^2) l_y] dS_e \\
 & - \sum_e \int_{S_e} N_i [\bar{v}H (\frac{\partial U}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial x}) \lambda_x \\
 & + \bar{v}H (\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial V}{\partial y}) \lambda_y] dS_e \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 f_{3i} = & \sum_e \int_{A_e} M_i \left[ \frac{\partial H}{\partial t} + H \frac{\partial U}{\partial x} + U \frac{\partial H}{\partial x} \right. \\
 & \left. + H \frac{\partial V}{\partial y} + V \frac{\partial H}{\partial y} \right] dA_e \quad (6)
 \end{aligned}$$

여기서  $\sum_e$ 는 전요소에 대한 합을,  $A_e$ 는 요소의 면적,  $S_e$ 는 요소의 경계,  $l_x, l_y$ 는 각각 요소경계 수직선과  $x, y$ 방향과의 방향여현을 의미한다. Galerkin F.E.M.에서는 보간함수와 가중함수를 동일하게 적용하며 이때 사용되는 보간함수는 삼각형 요소인 경우 선형보간함수는 식 (7), 2차 보간함수는 꼭지점 절점과 중간 절점에 대해서 각각 식 (8), (9)와 같다.<sup>(14,15,16)</sup>

$$N_i = \zeta_0 + \eta_0 + (1 - \zeta - \eta)(1 - \zeta_i)(1 - \eta_i) \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 N_i = & \zeta_0(2\zeta - 1) + \eta_0(2\eta - 1) + (1 - \zeta - \eta) \\
 & (1 - 2\zeta - 2\eta)(1 - \zeta_i)(1 - \eta_i) \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$N_i = 16\zeta_0\eta_0 + 8(\eta_0 + \zeta_0)(1 - \zeta - \eta) \quad (9)$$

또한 사각형 요소인 경우 선형보간함수는 식 (10), 2차 보간함수는 꼭지점 절점과 중간 절점에 대해서 각각 식 (11), (12)와 같다.

$$N_i = 0.25(1 + \zeta_0)(1 + \eta_0) \quad (10)$$

$$N_i = 0.25(1 + \zeta_0)(1 + \eta_0)(\zeta_0 + \eta_0 - 1) \quad (11)$$

$$N_i = 0.5(1 - \zeta^2)(1 + \eta_0); \zeta_i = 0 \quad (12a)$$

$$N_i = 0.5(1 - \eta^2)(1 + \zeta_0); \eta_i = 0 \quad (12b)$$

여기서,  $\zeta_0 = \zeta\zeta_i, \eta_0 = \eta\eta_i$ 이다.

### 2.3 시간미분항의 처리

시간미분항에 대한 Galerkin 방법의 적용은 유한 차분형으로 표현되며 가중치  $\theta$ 를 도입한 형태로 표현하면 식 (13)과 같다.<sup>(16,17)</sup>

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{1}{\theta \Delta t} (A - A_0) - \frac{(1 - \theta)}{\theta} \left( \frac{\partial A}{\partial t} \right)_0 \quad (13)$$

여기서  $\theta$ 는 시간 가중치로서  $\theta = 0$ 일 때는 explicit 기법,  $\theta = 0.5$ 일 때는 Crank-Nicholson 기법,  $\theta = 1.0$ 일 때는 fully implicit 기법이며  $\theta$ 는 현시간대를 의미한다. 여기서,  $A$ 는 각 격점에서의 미지의 값을 나타내는 벡터이며 이를 정리하면 식 (14)와 같다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \alpha U - \beta \quad (14)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{1}{\theta \Delta t} \quad (15)$$

$$\beta = \alpha A_0 + \frac{(1 - \theta)}{\theta} \left( \frac{\partial A}{\partial t} \right)_0 \quad (16)$$

식 (14)를 식 (1), (2), (3)에 대입하면 비선형 대수방정식을 얻게 되며 Newton-Raphson 방법에 의하여 그 해를 얻을 수 있으며 식 (16)과 같이 표현된다.<sup>(18)</sup>

$$A_{i+1} = A_i - J(A_i)^{-1} R(A_i) \quad (17)$$

여기서  $A_i$ 는 개선된 벡터값,  $J(A_i)$ 는 Jacobian 매트릭스이고  $R(A_i) = K(A_i)A_i - F$ 는 잔차로 표현되는 매트릭스이다. 이를 정리하여 실제로 해를 구할 때에는 식 (18)과 식 (19)와 같이 계산되며 반복계산 횟수  $k$  범위이내에서  $\Delta A_i$ 가 허용한계이내에 도달할 때까지 수행하게 된다.

$$J(A_i) \Delta A_i = -R(A_i) \quad (18)$$

$$A_{i+1} = A_i + \Delta A_i^k \quad (19)$$

### 2.4 격자망의 구성

유한요소법에 의한 2차원 수리계산에 있어서 격자

망의 구성은 매우 중요하다. 본 연구에서는 6절점 삼각형 요소와 8 절점 사각형요소를 혼합하여 구성하였으며 만곡부나 불규칙한 단면 혹은 계산결과가 불안정한 하도구간에서는 삼각형 요소와 사각형 요소를 혼합하여 사용하였다. 이때 격자망의 크기는 하천 흐름 방향으로 300 m 내외, 폭 방향으로는 150 m 내외로 하여 가로 : 세로 비율이 3 : 1 이내가 되도록 하였다.<sup>(19,20,21)</sup>

### 2.5 초기 조건

유한 요소법에 의한 계산의 초기 조건은 정적 계산시작(cold-start) 조건과 동적 계산시작(hot-start) 조건의 두가지로 나누어 생각할 수 있다. 정적조건에서는 해석 영역내의 모든 점에서의 수위를 동일하게 가정하고, x 및 y방향 유속이 없는 것으로 하여 부정류 계산의 초기조건으로 하며 동적조건에서는 이전 계산에서의 결과치를 새로운 부정류 조건의 초기치로 사용한다.<sup>(18)</sup>

### 2.6 경계조건

상류단의 경계조건으로는 유입 경계에서의 유량을, 하류단의 경계조건으로는 수위변화를 입력하였다.

## 3. 모형적용 대상 하천구간

대상 하천 구간은 신곡수중보에서 잠실수중보 구간까지의 약 40 km 구간을 선택하였다. 현재 신곡

수중보는 본류에 길이 883 m(폭 5.1 m×높이 4 m)인 고정보와 백마섬과 남단 사이에 길이 124 m(폭 20 m×높이 5 m인 수문 5개)인 가동보로 구성되어 있으며, 잠실수중보는 본류상에 길이 700 m인 고정보(폭 12.2 m×높이 6.5 m)와 길이 200 m(폭 36 m×높이 3.7 m인 수문 5개)인 가동보로 구성되어 있다. 신곡수중보는 하천 수위를 유지하여 주운을 가능하게 하고 잠실수중보는 본류에 위치한 각 취수구의 노출을 막기 위해서 설치되었다. 그림 1은 대상 하도 및 요소망을 나타낸다. 본 연구에서는 먼저 계산에 필요한 계수들을 검정하고 모형의 타당성을 검증하였고 다음에 신곡수중보에서의 관측 수위를 하류단 경계조건으로 하여 하도구간내에서의 유속과 수위를 계산하여 그 특성과 수위의 영향을 분석하였다.

### 3.1 수위 및 유속 관측자료

수치모델 실험의 검증자료로 이용하기 위하여 신곡수중보 상류 1 km 지점에서 30일간(1993년 4월 17일~1993년 5월 16일) 수위관측과 15일간(1993년 4월 17일~1993년 5월 1일)의 유속관측을 실시하였으며 본 연구에서는 신곡수중보 상류 1 km 지점에서의 수위는 신곡 수중보에서의 수위와 동일한 것으로하여 계산하였다. 표 1을 보면 신곡수중보의 가동보는 저조위시에는 수문을 완전히 열고, 고조위에는 수문을 닫아서 조절할 뿐만 아니라 신곡수중보의 고정보에 의한 저류 효과 때문에 수위가 E.L. 2.8 m 이상에서 유지되며 급격히 증가하고 감소함을

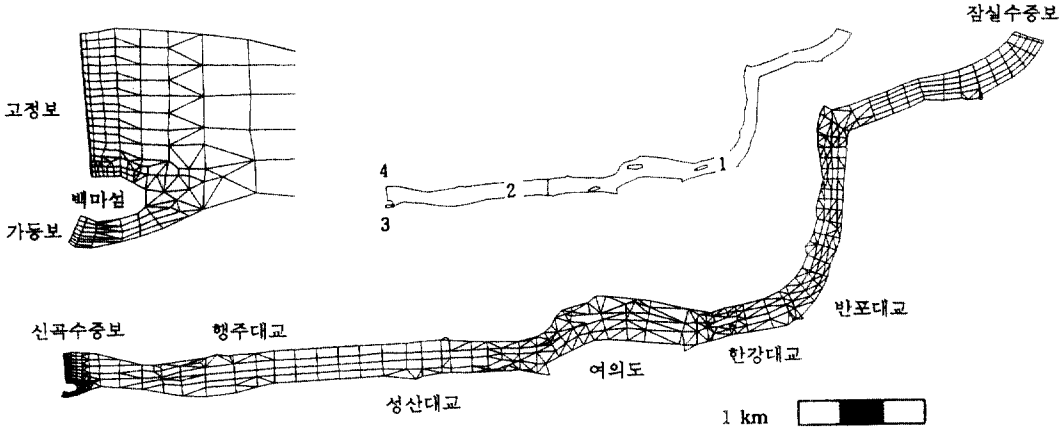


그림 1. 잠실수중보-신곡수중보 대상 하도 및 격자망 및 4 개의 대구역(절점의 수 : 2024, 요소의 수 : 732)

표 1. 신곡수중보에서의 관측수위(93. 4. 18~4. 23)

(단위 : E.L. cm)

日 時	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
18	289	289	289	289	289	289	287	289	285	284	284	281	280	277	276	277	276	278	280	294	289	289	293	290
19	293	294	292	292	289	289	289	306	308	291	298	293	289	289	289	290	290	289	289	304	316	293	305	303
20	299	300	299	298	297	295	293	310	335	314	313	312	302	302	299	297	295	293	293	294	327	319	310	315
21	308	308	305	303	300	297	295	293	337	348	316	320	314	307	305	304	302	301	296	294	321	340	310	319
22	316	308	306	301	297	293	290	289	319	359	335	320	315	302	296	290	287	282	280	271	275	319	318	294
23	295	290	289	289	283	279	275	271	311	370	363	325	316	307	293	288	280	271	264	259	254	297	318	286

표 2. 신곡수중보에서의 관측 유속(93. 4. 18~4. 23)

(단위 : cm/sec)

日 時	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
18	7	9	8	9	7	7	7	7	5	7	5	4	4	6	6	5	6	6	6	-2	-10	-4	8	6
19	8	9	9	9	9	9	7	5	-13	-15	10	9	9	9	9	8	10	8	8	-17	-25	8	10	
20	9	12	-10	11	10	9	9	5	-16	-46	-8	11	12	12	11	11	11	10	10	8	-5	-48	10	11
21	11	15	11	13	10	9	7	8	-7	-67	-27	9	13	-16	13	14	14	13	14	10	6	31	35	12
22	11	15	15	15	13	11	12	10	7	-57	-68	-10	10	20	17	15	12	7	9	9	7	-6	-43	-19
23	15	16	20	13	14	10	8	8	7	-49	-66	-32	11	18	21	19	15	11	11	15	11	-4	-28	-27

주) (-)는 상류 방향으로의 흐름

알 수 있다. 표 2에서 보면 유속은 수위의 영향에 의해 상류 방향으로 역류할 경우 정상적인 흐름 특성을 나타낼 때 보다 큰 유속이 발생함을 알 수 있다.

### 3.2 주요 입력 자료

#### 3.2.1 계산 요소망의 구성

1992년 10월에 측정된 한강(서울지구) 정기 측량 수심도(1:5000)를 사용하였으며 모형 검정시 불안정한 결과를 보이는 부분에서 요소망을 4회 수정하였으며 신곡수중보에 인접한 상류 구간의 경우는 하천단면에 보가 설치되어 있어 속도 경사가 크게 계산되므로 격자망을 흐름방향으로 20m 내외로 구성하였다. 대상 하도 구간에서의 격자망은 그림 2에 표시된 바와 같이 2024개의 절점과 732개의 요소로 구성되어 있다.

#### 3.2.2 경계조건

경계조건은 계산 구간의 상류단과 하류단에서의 흐름 조건을 말하며 잠실수중보에서의 유량이 팔당

댐 방류량과 같다고 가정하고 상류단 경계조건으로, 신곡수중보에서의 수위를 하류단 경계조건으로 입력하였다. 그리고, 계산구간내에 있는 탄천, 중랑천, 안양천의 유입량과 난지 하수처리장과 가양 하수처리장의 방류량에 대해서는 팔당댐의 방류량과 물수지를 고려하여 경계조건으로 하였다. 반포천과 창릉천, 홍제천은 유입량이 매우 적기 때문에 고려하지 않았다.

#### 3.2.3 기타 주요입력 자료

2차원 부정류 계산을 수행함에 있어서 입력시켜 주어야 할 자료는 계산의 초기조건, Manning 조도 계수, 난류확산계수, 에너지 보정계수, 계산시간 간격, 총 계산시간과 같은 물리적인 자료와 계산을 위해 필요한 시간적분계수가 있다. 부정류 계산은 15분 시간 간격으로 하였으며 각 격자의 조도계수는 1차원에서와는 달리 각각의 특별한 부분을 별도로 고려해 줄 수 있으나, 실제관측 결과가 불충분하므로 전체를 크게 4개의 대구역으로 나누어 적용하였다. 잠실수중보에서 행주대교 구간에서는 0.0259, 행주

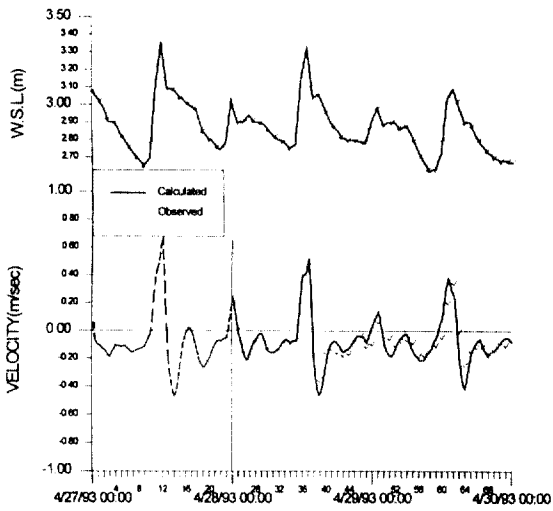


그림 2. 하류단 수위관측치와 계산치('93. 4. 27. 00 : 00~'93. 4. 30. 00 : 00)

대교에서 신곡수중보 상류 500 m 지점까지는 0.02 12, 백마섬과 남단 사이에 위치한 접근수로와 신곡 가동보 연결부분은 0.210, 신곡가동보 마루에는 0.160을 입력하였다. 이는 표 4와 같이 Chow가 제안한 범위내에서 모형을 검정하여 결정하였다.<sup>(23,24,25)</sup> 또한 난류확산계수는 800~2200 N·sec/m<sup>2</sup>의 범위 내에서 에너지 보정계수는 1, 시간적분계수는 0.67을 사용하였다.<sup>(26,27)</sup>

#### 4. 모형의 검정 및 유량의 영향에 관한 분석

##### 4.1 모형의 매개변수 추정

조도계수와 난류확산계수와 같은 모형의 매개변수 산정을 위해서 1993년 4월 27일부터 4월 30일까지 3일 동안 실측자료를 상하류단 경계조건으로 하여 계산하였다. 잠실수중보-신곡수중보 구간에서 신곡수중보에서의 수위를 하류 경계조건으로, 잠실수중보에서의 유량(팔당댐 방류량)을 상류 경계조건으로 하여 계산하였으며 물수지 분석에 의한 각 지천과

하수 처리장에서의 유량을 경계조건으로 입력하였다. 그림 2에서 보면 4월 27일부터 약 12시간 동안은 정적조건에 의한 계산이므로 유속 계산치는 실제 관측치와는 상이한 결과를 보인다. 그러므로 4월 27일부터 24시간을 가동시간(warmup length)으로 제외하면 4월 28일부터 48시간 동안의 계산치와 관측치는 거의 유사한 것으로 나타났다. 또한 모형의 타당성을 검토하기 위해서는 여러개의 지점에서의 일시 관측 유속과 수위가 필요하지만, 실제로 이런 자료는 관측하기가 어려우므로 정상류 상태로 계산한 대상구간내 여러 하천 단면에서의 유량을 상류로부터의 유입량과 비교함으로써 모형의 타당성을 평가하기 위하여 잠실수중보-신곡수중보 구간에서 신곡수중보에서의 수위를 2.89 m로, 갈수기의 팔당댐 방류량인 300 m<sup>3</sup>/sec과 물수지 분석에 의한 각 지천과 하수 처리장에서의 유량을 경계조건으로 가정하여 입력하였다. 이때, 계산시작 후 약 44시간 후에 안정상태를 보이며 그림 3은 상류 유입량에 대한 15개 단면에서의 계산유량의 백분율을 표시하고 있다. 이때 계산유량은 각각 x방향, y방향의 유속과 요소의 한변에서 꼭지점 절점의 거리와 수심을 단면적으로 하여 중앙과 꼭지점 절점의 유속 가중치를 4 : 1 : 1로 하였다. 그림 3에서 보면 반포대교 부근에서는 통과 유량이 2.8% 정도 작게 계산되었는데 이는 단면축소에 의한 영향으로 보이며, 제1중지도에서의 통과유량이 3.2% 정도 크게 계산된 것은 하도구간내에 만곡부와 섬이 존재하는데 격자의 크기가 상대적으로 크기 때문에 오차가 나는 것으로 판단된다. 하도 구간내에서 대부분의 단면에서 3% 내외의 오차를 보이는 것으로 보아 정상류 상태일 경우에는 그 결과가 비교적 양호한 것을 확인할 수 있다.

##### 4.2 부정류 계산 결과 및 유량의 영향에 관한 분석

1993년 4월 18일부터 4월 19일까지 2일 동안 잠

표 3. 각 지천과 하수처리장에서의 한강 본류 유입량

(단위 : m<sup>3</sup>/sec)

위 치	탄 천	중량천	반포천	홍제천	안양천	창릉천	난지도*	가 양*	비 고
유입량	11.67	19.64	0.01	0.03	2.6	0.13	8.66	21.78	

주) \*하수처리장

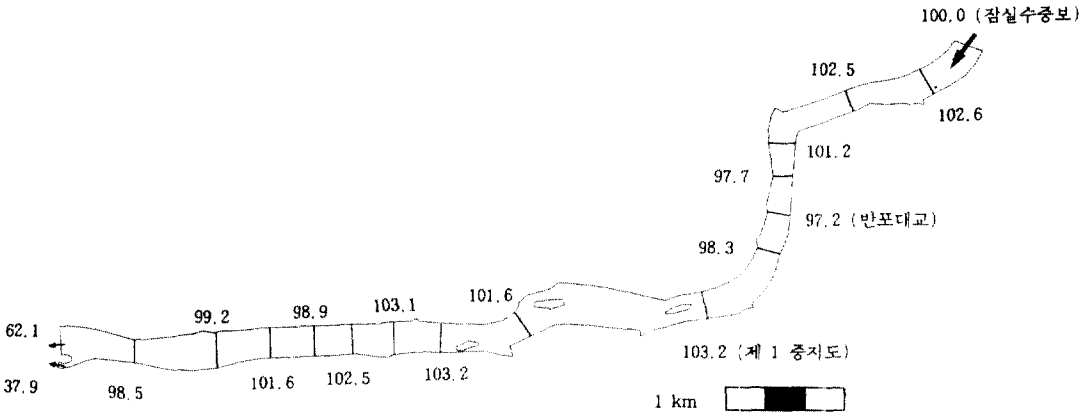


그림 3. 정상류 상태를 가정한 경우의 단면별 계산유량 백분율(상류 유입량 300 m<sup>3</sup>/sec, 하류수위 E.L. 2.89 m)

표 4. 기존에 제안된 Manning 조도계수 n의 범위

조 건	n
잠긴나무가 없는 수심이 얇은 강	0.025~0.035
수심이 깊은 강	0.018~0.025
수중식물이 없는 얇은 하구	0.020~0.030
깊은 하구	0.015~0.020
식생피복이 조밀한 습윤지	0.050~0.100

실수중보-신곡수중보구간에서 실측자료를 경계조건으로 하여 계산하였으며 모형의 검정시와 동일하게 처음 계산된 24시간을 제외하였다. 4월 19일 오후 7시 30분과 오후 8시의 유속을 도시하면 그림 4와 같다. 이때, 하류에서의 수위 영향에 의해 역류가 발생하고 이에 의해 정체 현상이 발생함을 알 수 있다. 그리고 이러한 정체 현상은 하류의 수위가 상승함에 따라서 상류로 계속 이동하게 되고 수위가 하강함에 따라 역류 효과가 급속하게 감소됨을 알 수 있다. 신곡수중보에서의 수위의 영향에 의해 하도 구간내에서 정체 현상이 발생하는 구간을 시간별로 도시해보면 그림 5와 같다. 그림 5에서 굵은 실선은 계산 시작 5시간 후부터의 수위 변화이며 직사각형은 하도구간내에서 신곡수중보에서의 수위의 영향에 의해 하도 구간내에서 정체 현상이 발생하는 구간을 나타낸다. 계산시작 5.5시간 후에는 신곡수중보로부터 상류 4 km까지는 정체 현상이 발생하고 계산시작 6시간 후에는 신곡수중보로부터 10 km 하도 구간내에서는 역류가 발생하며 이로부터 상류

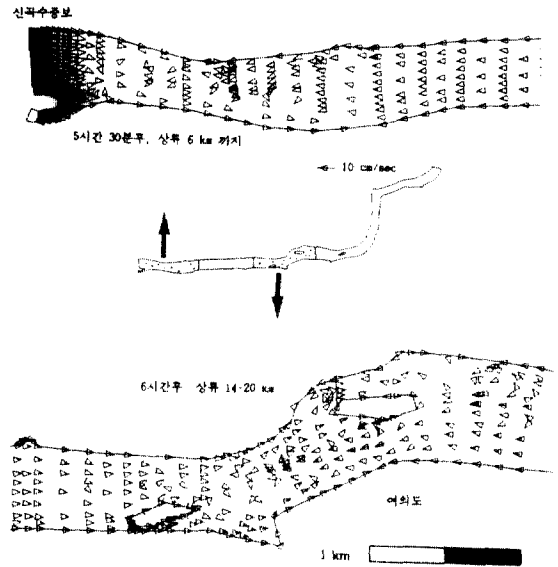


그림 4. 부정류 계산에 의한 유속 벡터('93. 4. 19. 19:30시 및 20:00시)

7 km 구간에서 정체현상이 일어남을 보인다. 즉, 수위가 상승함에 따라 정체 현상이 발생하는 부분이 상류로 이동함을 알 수 있다. 약 6.5 m인 평균수심에 대한 조류전파속도( $C = \sqrt{gh}$ )를 구하면 7.98 m/sec 이고 그림 5에서 1시간 30분 동안 상류방향으로 약 29 km까지 정체현상이 발생하므로 이때 전파속도를 구하면 5.37 m/sec로 하도의 저류효과 및 하류방향으로의 유량의 효과 때문에 전파효과가 감소됨을 알 수 있다.

그림 6-a와 6-b는 하류단 경계에서의 수위 변화에

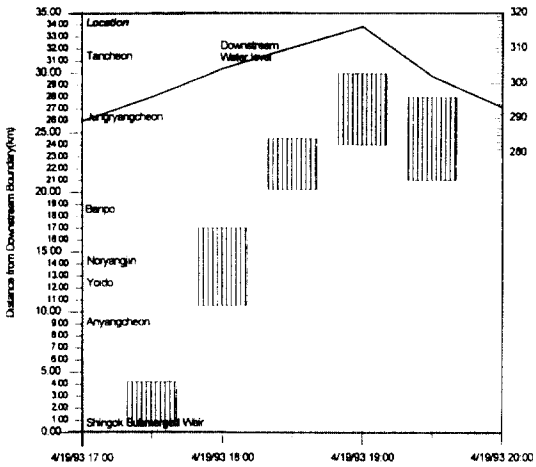


그림 5. 부정류 계산에 의한 시간별 정체 하도 구간 ('93. 4. 19. 19 : 00시~22 : 00시)

따른 대상구간내 6개 단면(신곡수중보, 홍제천 합류점, 여의도, 노량진, 반포, 탄천 합류점)에서의 수위와 평균 유속의 시간적 변화를 도시한 것이다. 그림 6-a에서 보면 굵은 실선은 하류 수위변화를 나타낸 것으로 수위가 상승함에 따라 하류지점으로부터 유속이 점차 감소하고(계산 시작 후 5.5시간부터) 수위가 최대치에 도달하는 시각(7시간)까지는 평균 유속이 지점에 관계없이 감소하다가, 수위가 하강함에 따라 지점별 평균 유속이 다시 커지기 시작하여 원상태로 회복됨을 알 수 있다. 계산된 유속은 대부분이 상하류 방향으로 각각 최대 25 cm/sec 이내에서 변화함을 알 수 있다. 그림 6-a에서 여의도 우안부에서의 유속변화는 다른 지점에 비해 하류단 수위에 훨씬 민감한 변화를 보이는데 이는 여의도 우안부에 위치한 밤섬의 영향으로 이 부분이 파천 형태의 단면을 나타내고 있고 또한 만곡부를 이루고 있기 때문인 것으로 판단된다. 한편, 그림 6-b는 신곡수중보에서의 수위 변화에 따른 지점별 수위 변화를 표시하는 것으로 수위가 상승하면 약간의 지체시간을 두고 수위도 상승하다가 수위의 감소와 더불어 수위가 감소함을 알 수 있었다.

여의도 전면에서의 횡방향의 유속 변화를 도시하면 그림 7과 같다. 유속은 각 절점에서의 계산유속이 화살표 방향과 동일한 방향일 경우에 양의 값으로 표현하였다. 그림 7에서 M과 S는 여의도와 밤섬사이에서의 유속으로 수위변화에 의한 유속의 변화가

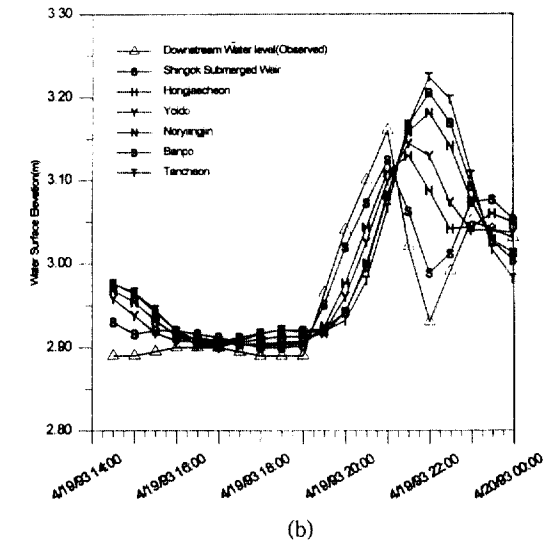
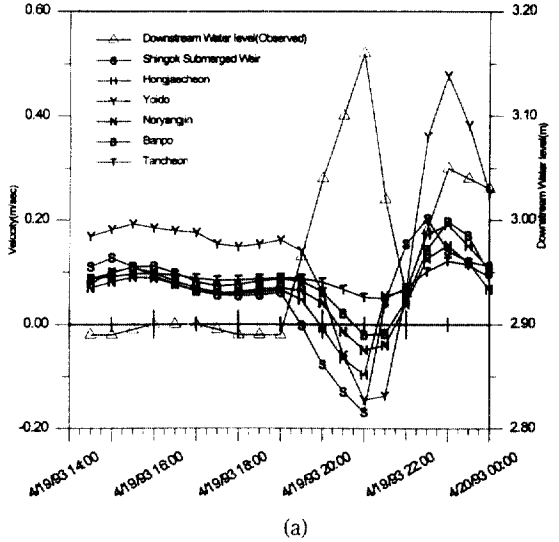


그림 6. (a) 하류단 수위 변화에 따른 지점별 평균유속 ('93. 4. 19. 14 : 00시~24 : 00시)  
(b) 하류단 수위 변화에 따른 지점별 수위 변화('93. 4. 19. 14 : 00시~24 : 00시)

크게 나타남을 알 수 있다. 또한 s는 한강우안과 밤섬사이에서의 유속으로 변화가 크지 않은 것으로 계산되었다. 또한 m은 밤섬 남단에서의 유속으로 밤섬과 만곡부의 영향으로 인해 유향이 동일 횡단 면상에서 반대방향을 보이고 있다. 또한 22 : 00시 경에는 신곡수중보 상류의 수위가 감소함에 따라 유속이 다시 하류방향으로 회복하며 이때는 불규칙한 단면의 영향에 의해 유속의 횡방향 분포가 크게



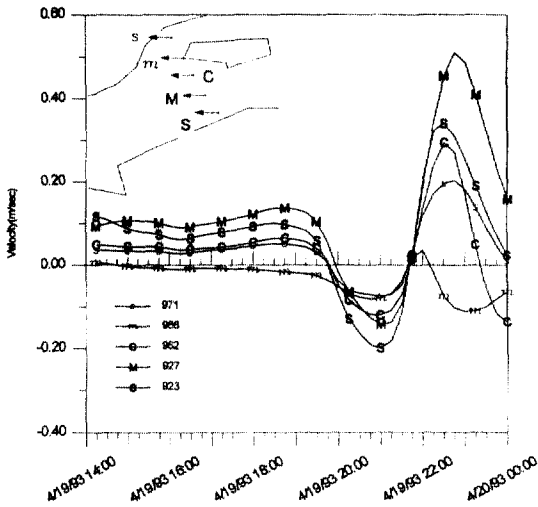


그림 7. 하류단 수위 변화에 따른 여의도 부근의 횡방향 유속변화('93. 4. 19. 14 : 00시 ~ 24 : 00시)

나타남을 알 수 있다.

그림 8은 수위변화에 따른 계산 수면 곡선으로 하류 신평수중보에서의 거리별 수위를 나타내며 매 15분마다 도시되어 있다. 또한 관측수위를 하류 경계조건으로 일정하게 하고 상류 유입량이 흐름에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해 갈수기일 때의 팔당 방류량인 125, 200, 500 m<sup>3</sup>/sec을 상류 경계조건으로 하여 수면곡선을 도시하였다. 즉, 300 m<sup>3</sup>/sec 유량은 실제 관측에 의한 값이고 상류 유입량의 영향을 비교해 보기 위해서 유입량의 크기를 125, 200, 500 m<sup>3</sup>/sec로 하여 계산하였다. 이때 하류에서의 관측 수위는 4월 19일 오후 5시부터 2시간 동안은 하류 수위가 상승하고 오후 8시까지의 수위가 급격히 감소하였다. 또한 오후 9시까지는 다시 수위가 상승하였다가 감소하고 있다. 수위가 상승하면 수면은 역경사가 발생하고 이에 따라 역류가 발생함을 알 수 있다. 신평수중보에서 20 km 이상 떨어진 상류 지점에서는 하류 수위의 변화에 비해 수면곡선이 둔감한 변화를 보이는데 이는 여의도 부근에 위치한 3개의 섬과 만곡부의 영향에 의해 유속이 저하되고 통수능이 감소되어 수위 상승효과가 지체되는 것으로 생각된다. 그림 8에서 보면 상류 유입량이 125 m<sup>3</sup>/sec에서 500 m<sup>3</sup>/sec으로 4배 증가 하더라도 유량별 수면 곡선을 비교해 보면 그 변

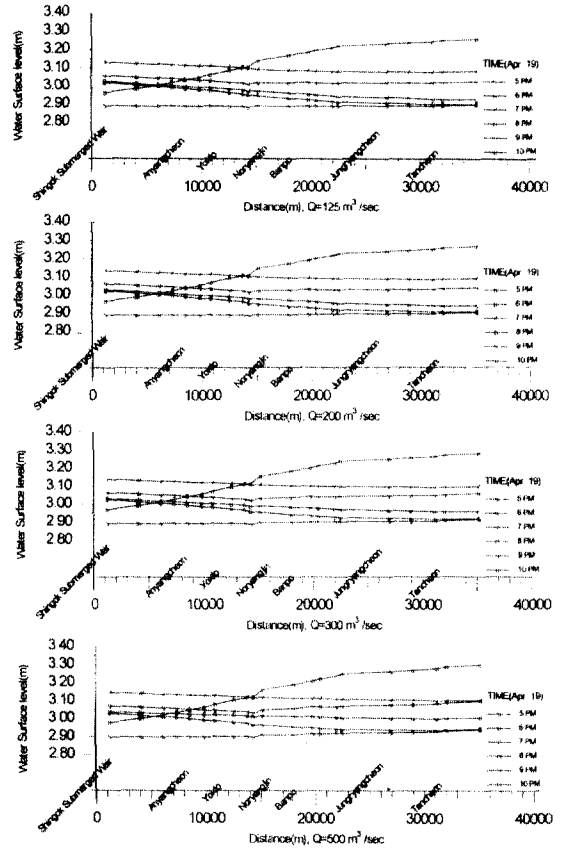


그림 8. 하류단 수위 변화에 따른 수면 곡선 변화('93. 4. 19. 14 : 00시 ~ 24 : 00시)

동폭이 크게 차이가 나지 않고 흐름 형태도 거의 일정함을 알 수 있었다. 즉, 한강 하류부에서는 갈수기때의 유입량인 500 m<sup>3</sup>/sec 이하의 유량 조건에서는 하류단 수위의 변화가 흐름 형태를 결정하는 지배적인 요소가 됨을 알 수 있었다. 그러므로 2차원 수리해석을 통하여 이수관리를 위한 팔당댐의 방류량을 결정하거나 혹은 새로운 인공 구조물의 영향을 계산하여 그 위치와 규모를 결정하는 기본자료로 이용할 수 있을 것이다.

## 5. 결 론

2차원 흐름 계산 모형인 FESWMS-2DH를 한강 하류부의 잠실수중보에서 신평수중보까지의 구간에 적용하여 조석의 영향을 받는 구간내 흐름의 수리특성을 2차원적으로 분석하였으며 분석 결과를 요

약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서의 2차원 수리계산을 통하여 파천 형태이거나 만곡부에 있어서의 유속이나 수위의 횡방향 분포 특성을 분석할 수 있었고, 새로운 인공 구조물의 위치선정이나 만곡부의 영향 등을 파악하기 위해 본 연구에서 사용한 FESWMS-2DH 모형의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 하류단에서의 수위가 시간에 따라 상류로 전파된다는 사실을 알 수 있었으며, 수위 변화에 따른 흐름 단면별 평균 유속 및 수위 변화 특성을 분석할 수 있었다.

3. 여의도 우안부에 위치한 밤섬 부근과 중지도와 같이 하도구간에 섬이 위치하는 경우 하천 단면의 축소와 만곡부의 영향으로 수위에 따라 유속과 유량이 횡방향 단면상에서 크게 다르게 나타남을 알 수 있었다.

4. 갈수기에 있어서 하천 유지유량을 상류경계 조건으로 하여 125, 200, 300, 500 m<sup>3</sup>/sec으로 유량을 변화시켜도 유속이나 수위의 변화는 크지 않았고 하류 경계조건인 수위의 시간 변화에 의해 유속이나 수위가 영향을 받는다. 즉, 한강 하류부에서는 수위의 변화가 갈수기 흐름을 결정하는 지배적인 요소가 된다.

### 감사의 글

본 연구는 서울시의 1993년도 한강 하류 수질보전 대책수립 조사의 일부로 수행되었으며 고려대학교 토목환경공학과 김중훈 교수님께 감사를 드립니다. 또한 자료 협조에 많은 지원을 해주신 관계당국과 한국 종합기술개발공사 및 한국 해양과학기술(주)에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. Gray, W.G., "Do Finite Element Models Simulate Surface Flow?", *Finite Elements in Water Resources III*, Univ. of Mississippi Press, 1980, pp. 1.122-1.136.
2. Choi, B.H., "A Tide and Surge Computation for Kyonggi Bay", *Bulletin of KORDI*, Vol. 3, No. 1, 1981.
3. 한건연, 김정욱, "수치모델에 의한 만내의 2차원

동수역학 해석", *한국수문학회논문집*, 제 15호, 제 4권, 1982, pp. 45-53.

4. 이종태, 이원환, "항내의 장주기파 해석을 위한 2차원 부정류의 수학적 모형", *대한토목학회 논문집*, 제 3권, 제 1호, 1983, pp. 13-24.
5. 이길성, 강주환, "천수방정식의 유한차분 특성", *대한토목학회 논문집*, 제 9권, 제 1호, 1989, pp. 41-52.
6. 윤태훈, "유한요소법에 의한 항만에서의 토사이동 추정모형", *대한토목학회 논문집*, 제 2권, 제 2호, 1982, pp. 19-28.
7. 서승원, 박정용, 윤태훈, "흐름단면의 급변화에 의한 순환의 수치모형", *대한토목학회 논문집*, 제 3권, 제 4호, 1983, pp. 21-31.
8. Chaudhry, M.H., *Open-Channel Flow*, Prentice Hall, 1993, pp. 331-405.
9. Cooley, R.L. and Moin, S.A., "Finite Element Solution of Saint-Venant Equation", *Journal of Hyd. Div.*, ASCE, Vol. 102, No. 6, 1976, pp. 759-775.
10. Froehlich, D.C., "Finite Element Surface-Water Modeling System: Two-Dimensional Flow in a Horizontal Plane", U.S. Department of Transportation, 1989.
11. Gallagher, R.H., Oden, J.T., Taylor, C., and Zienkiewicz, O.C., *Finite Elements in Fluids*, John Wiley & Sons, Ltd, 1975.
12. Zienkiewicz, O.C., *The Finite Element Method*, 3rd ed., McGraw-Hill, 1977.
13. Gee, D.M. and MacArthur, R.C. Evaluation and Application of the Generalized Finite Element Hydrodynamics Model, RMA-2, Two-Dimensional Modeling, Hydrologic Engineering Center, 1981, pp. 97-113.
14. King, I.P. and Norton, W.R., "Recent Application of RMA's Finite Element Models for Two-Dimensional Hydrodynamics and Water Quality", *Finite Elements in Water Resources*, Pentech Press, 1978, pp. 2.81-2.99.
15. Sokolnikoff, I.S. and Redheffer, R.M., *Mathematics of Physics and Modern Engineering*(2nd ed.), McGraw-Hill, New York, 1966, 752 p.
16. Lee, J.K. and Froehlich, D.C., "Review of Literature on the Finite-Element Solution of the Equations of Two-Dimensional Surface-Water Flow in the Horizontal Plane", U. S. Geological Survey Circular 1009, 1986, pp. 1-65.
17. Strang, G. and Fix, G.J., *An Analysis of the Finite Element Method*, Englewood Cliffs, NJ., Prentice-Hall, 1973, 306 p.

18. 한건연, 이종태, 김홍태, “하천에서의 동수역학적 유동해석을 위한 유한요소법의 개발”, **한국수문학 회지**, 제 15권, 제 2호, 1993, pp. 87-101.
19. Bradley, J.N., *Hydraulics of Bridge Waterways*(2nd ed.), **Federal Highway Administration Hydraulic Design Series**, No. 1, 1978, 111 p.
20. Buell, W.R. and Bush, B.A., “Mesh Generation—A Survey”, *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Engineering for Industry*, ser. B., Vol. 95, No. 1, 1973, pp. 332-338.
21. Thomas, W.A., and McAnally, W.H., *Users' Manual for the Generalized Computer Program System: Open-Channel Flow and Sedimentation TABS-2*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1990.
22. 한국 해양과학기술, *신곡수중보 상하류 조위 및 유속 측정 보고서*, 1993.
23. Arcement, G.J. and Schneider, V.R., “Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channel and Flood Plains”, *Report No. FHWA-TS-84-204*, Federal Highway Administration 1984, 62 p.
24. Barnes, H.H., Jr., “Roughness Characteristics of Natural Channels”, *Water-Supply Paper 1849*, U. S. Geological Surevey 1967, 213 p.
25. Chow, V.T., *Open-Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 1959. 680 p.
26. Fischer, H.B., List, E.J., Koh, R.C.Y., Imberger, J. and Brooks, N.H., *Mixing in Inland and Coastal Waters*, Academic Press, 1979.
27. Rodi, W., “Hydraulics Computation with the k-ε Turbulence Model”, in Smith, P.E., ed., *Applying Research to Hydraulic Practice*, Conference of Hydraulics Division of the American Society of Civil Engineers, Jackson, Miss., 1982, Proceedings, New York, American Society of Civil Engineers, 1982, pp. 44-54.

(接受 : 1994. 1. 11)