

## 동수역학모형의 매개변수 산정 Evaluation of Parameters in Hydrodynamic Model

윤 태 훈\* / 이 중 욱\*\* / 제 갈 선 동\*\*\*

Yoon, Tae Hoon / Lee, Jong Wook / Jegal, Sun Dong

### Abstract

Generally speaking, a hydrodynamic model needs a friction coefficient (Manning coefficient or Chezy coefficient) and eddy viscosity. For numerical solution the coefficients are usually determined by recursive calculations. The eddy viscosity in numerical model plays physical diffusion in flow and also acts as numerical viscosity. Hence its value has influence on the stability of numerical solution and for these reasons a consistent evaluation procedure is needed. By using records of stage and discharge in the downstream reach of the Han river, 1-D models (HEC-2 and NETWORK) and 2-D model (SMS), estimated values of Manning coefficient and an empirical equation for eddy viscosity are presented. The computed results are verified through the recorded flow elevation data.

*keywords:* input parameter, roughness coefficient, eddy viscosity, water surface elevation, hydrodynamic model

### 요 지

일반적으로 동수역학모형은 마찰인자(조도계수 또는 Chezy계수)와 와점성계수를 필요로 하고 수치계산에서 이들 계수의 값은 통상 가정 또는 반복계산을 통하여 결정된다. 수치모형에서 와점성계수는 물리적인 확산뿐만 아니라 수치점성의 효과도 가지고 있어서 수치계산의 안정성에 영향을 미치므로 이들 계수의 일관된 결정방법이 필요하다. 수위 및 유량자료, 1차원 모형인 HEC-2와 NETWORK, 2차원 모형인 SMS를 이용하여 한강하류 구간에 대한 조도계수의 산정결과와 와점성계수의 산정식이 제시되었으며 실측수위와 비교를 통해 검증되었다.

**핵심용어 :** 입력매개변수, 조도계수, 와점성계수, 수위, 동수역학 모형

\* 한양대학교 토목공학과 교수

Professor, Department of Civil Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea

\*\* 한국건설기술연구원 수자원환경연구부 위촉연구원

Researcher, Water Resources & Environmental Research Div., KICT, Koyang, Kyunggido, 411-712, Korea

\*\*\* (주)금호엔지니어링 수자원부

Water Resources Team, Kumho Engineering, Co. LTD., Anyang, Kyunggido, 431-060, Korea

## 1. 서 론

관심의 대상이 되는 하천구간을 수치적으로 해석하기 위해서는 정확한 지형정보와 상·하류의 경계조건 등이 필요하다. 이외에도 계산결과의 신뢰도에 영향을 미치는 인자로는 수치모형에 따라 사용되는 조도계수와 와점성계수 등이 있다.

기존에 한강하류부에 적용되었던 연구들을 살펴보면 1차원 모형으로는 부등류 모형으로 한국수자원공사(1989)의 HEC-2와 한강관리사업소(1993)의 HEC-6이 있으며, 부정류 모형을 이용한 연구는 최병호와 서경석(1987), 이종태 등(1993), 김원 등(1995)의 연구가 있으며 전경수(1996), 황의준과 전경수(1997) 등은 월류흐름의 모의를 위하여 폐합형 부정류 계산모형을 수립한 바 있다. 2차원 모형의 경우, 윤용남 등(1995)에 의해 사용된 RMA-2와 윤용남과 박무종(1994)의 FESWMS-2DH 등이 있다. 김원 등(1995)에 의하면 조도계수를 산정하는 방법에는 부등류 해석에 의한 방법과 부정류 해석에 의한 방법이 있다. 부등류 해석에 의한 방법은 한국수자원공사(1989)와 한강관리사업소(1993)의 연구방법이 여기에 속하며 김원 등(1995)과 황의준과 전경수(1997)의 연구에서는 부정류 해석에 의한 방법이 자세하게 기술되어있다. 2차원 모형의 매개변수인 와점성계수는 흔히, 난류교환계수(turbulent exchange coefficient)라고도 하며 수심방향으로 평균된 값으로 수평방향 난류확산을 표현하는 계수로서 흐름의 특성을 표현하기도 하지만 수치계산의 안정성을 좌우하기도 한다. 윤용남 등(1995)의 연구에서 사용한 RMA-2의 와점성계수는 HEC-2의 배수위 계산

결과와 근접한 결과를 보이는 값을 선정하여 사용한 바 있다.

본 연구는 강동대교 상류의 서울특별시 경계에서부터 신곡수중보 상류의 약 45 km에 이르는 구간을 대상 하천구간으로 선정하고, 수치모형으로는 1차원 모형인 HEC-2와 NETWORK, 2차원 모형으로는 SMS를 선택하여 1차원 모형의 대표적인 매개변수인 조도계수의 산정방법으로 부등류와 부정류 해석 방법과 경험식에 의한 방법 등을 비교·검토하였으며, 2차원 모형의 변수인 와점성계수의 산정방법론을 제시하고자 한다.

## 2. 하류경계와 조도계수의 산정

### 2.1 하류의 경계조건

하류경계는 경기도구간에 속하는 신곡수중보의 직상류지점으로 정하고, 이 지점의 유량에 대한 수위와 유량자료를 수집하여 그림 1에 도시하였다. 신곡수중보의 수위-유량곡선은 서울지방국토관리청(1988)에서 개발된 자료가 있으며, 관측수위는 한강관리사업소의 자료가 있다. 이들 자료를 회귀분석하여 그림 1과 같은 수위-유량곡선을 설정하였다.

### 2.2 조도계수

Barnes(1967)는 홍수시에 50여개 하천의 현장조사를 통하여 하천의 평균적인 조도계수를 산정하였으며 그 외 조도계수를 산정하는 방법에는 문헌에 제시된 표 1에 의한 방법, 사진에 의한 방법, 유속측정에 의한 방법 및 경험식에 의한 방법 등이 있다.

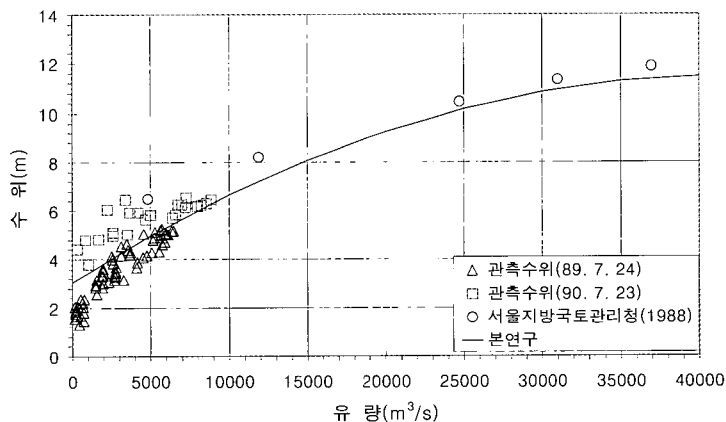


그림 1. 신곡에서의 수위-유량곡선

표 1. 일반하천의 조도계수(Chow, 1959)

수면폭 30m이상의 하천		
하천의 조건	최소값	최대값
규칙적인 단면으로 하상물질의 입도가 작고 식생이 없는 경우	0.025	0.060
단면이 불규칙적이고 거친 경우	0.035	0.100

경험식은 크게 하상물질 입경의 함수로 표현되는 식과 하상경사의 함수로 표현되는 식으로 나눌 수 있다. Stricker(Simons와 Senturk, 1976)는 하상물질 입경을 이용하여 조도계수를 산정하는 방법을 제안하였으며, 이 후 유사한 공식이 제시되었고, 건설부(1991)에 의하면 하상경사를 이용한 경험식으로 일본의 도네가와(利根川)에서의 경험공식과 한강홍수통제소의 홍수예경보 조사사업을 통해 구해진 경험공식이 있다(표 2).

일반적으로 조도계수에 영향을 미치는 인자는 하상물질 입경, 식생, 하상의 불규칙성, 하천 구조물, 하천의 형상과 크기, 수위 및 유량 등이 있다. 특히, 수위와 유량은 다른 인자에 비하여 짧은 기간동안 크게 변화하므로 중요하게 다루어야 할 요소이다. 하상물질의 입경이 작은 경우 그 영향이 미미하나, 입경이 큰 경우에는 보통 바닥으로 내려갈수록 큰 입경의 하상물질로 구성되므로 조도의 영향을 많이 받게 되며 또한, 낮은 수위에서는 하상의 불규칙성에 의한 영향이 커지므로 높은 조도계수를 갖게된다. 일반적으로 수위가 높아지면서 조도계수가 작아지는 경향이 있으나 홍수터에 흐름이 존재하게 되면 조도계수는 홍수터의 식생 등에 의해 지배되어 더 큰 값을 갖거나 거의 일정해진다. Cowan(1956)은 조도계수에 영향을 미치는 중요한 요소를 고려한 산정식을 소개하였다.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m_5 \quad (1)$$

여기서  $n_0$ 는 균일하도에서 하상물질 입경에 의한 조도계수,  $n_1$ 은 하상의 불규칙정도를 나타내는 보정계수(0.0~0.02),  $n_2$ 는 하천의 횡단면 크기나 형상에 대한 보정계수(0.0~0.015),  $n_3$ 은 하천의 구조물에 대한 보정계수(0.0~0.06),  $n_4$ 는 식생이나 흐름조건에 대한 보정계수(0.005~0.1)이며  $m_5$ 는 하천의 사행정도에 대한 보정계수(1.0~1.3)이다.

자연하천에서는 앞에서 기술된 인자들의 영향을 포함하는 정확한 계수의 산정은 실질적으로 매우 어려운 일이다. 따라서 본 연구에서는 수위관측소의 위치와 하상경사 및 하상물질 입경을 고려하여 한강하류구간(신곡수중보~상류서울시계)을 다시 1 구간(신곡수중보~한강대교), 2 구간(한강대교~잠실수중보) 및 3 구간(잠실수중보~서울시계)의 3개 구간으로 나누고 과거의 홍수사상을 부등류 모형과 부정류 모형에 적용하여 각 구간별 조도계수를 산정하였다.

### 2.2.1 부등류 모형에 의한 방법

부등류 모형을 사용하여 조도계수를 추정하는 방법은 과거 국내에서 주로 사용했던 일반적인 방법으로 대표적인 모형은 HEC-2가 있다. 이 모형은 식 (2)의 에너지 방정식을 표준축차법으로 해석한다.

$$WS_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = WS_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (2)$$

여기서  $WS_i$ 는 양단의 수위,  $V_i$ 는 유속,  $\alpha_i$ 는 에너지 보정계수,  $g$ 는 중력가속도,  $h_e$ 는 에너지 손실 수두이다.

표 2. 조도계수산정을 위한 경험식

제안자	변수명(단위)	경험식
Strickler(Simons와 Senturk, 1923)	하상물질 입경, $d$ (ft)	$n = 0.034 d^{1/6}$
Grade and Raju(1978)	하상물질 입경, $d$ (ft)	$n = 0.039 d_{50}^{1/6}$
Meyer-Peter and Müller(1948)	하상물질 입경, $d$ (m)	$n = 0.038 d_{90}^{1/6}$
Lane and Carlson(1953)	하상물질 입경, $d$ (in)	$n = 0.0264 d_{75}^{1/6}$
도네가와(利根川)(건설부, 1991)	하상경사, $S$	$n = 0.1 - 0.02 \log(1/S)$
한 강(건설부, 1991)	하상경사, $S$	$n = 0.04773 - 3.8124 \times 10^{-6} / S$

부등류 모형에 의한 조도계수 산정방법은 하상물질의 입경과 특성 등을 고려하여 적절한 값을 선택한 후, 관측치와 잘 일치하는 조도계수를 반복계산을 통해 찾아내는 방법이다. 이때 사용된 입력자료로 하상 단면자료는 한강관리사업소의 실측자료가 이용되었으며 상류의 경계조건은 팔당댐에서의 방류량을, 하류의 경계조건은 그림 1의 수위를 사용하였다. 홍수사상은 표 3과 같으며 평수위 조건을 포함시키기 위해 1990. 8. 31의 유량과 수위를 적용하였다.

표 4는 표 3의 홍수사상을 이용하여 산정된 조도계수를 나타낸 것이고 그림 2는 표 4의 조도계수를 사용한 계산수위와 관측수위를 도시한 것이다.

한강 하류부의 본류에는 잠실수중보가 위치하고 있으며 수리량 계산은 식 (3)의 웨어공식에 의해 계산하

였다.

$$Q = CLH^{1.5} \quad (3)$$

여기서  $Q$ 는 유량,  $L$ 는 웨어의 길이,  $H$ 는 웨어의 수두이며  $C$ 는 웨어계수로서 HEC-2 사용자 매뉴얼의 추천값인 1.44를 사용하였다.

### 2.2.2 부등류 모형에 의한 방법

본 연구에서 부등류 모형으로 선택한 것은 NETWORK로서 이 모형은 식 (4)와 (5)의 연속방정식과 운동량방정식을 유한차분법을 이용하여 해석하는 방법이다.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} + gA(s_f - s_o) = 0 \quad (5)$$

여기서  $Q$ 는 유량,  $A$ 는 흐름단면적,  $y$ 는 수위,  $\alpha$ 는 운동량 보정계수이며  $s_f$ 와  $s_o$ 는 에너지경사와 하상경사이다.

부등류 모형을 이용하여 조도계수를 산정할 경우, 부등류 모형을 이용하는 것과는 달리 홍수파의 시간에 대한 변화를 고려할 수 있는 장점이 있으며 특히, NETWORK는 조도계수 최적화기법(automatic calibration)이 모형내에 포함되어 있어 정량적인 조도계수의 산정이 가능하다. NETWORK의 조도계수

표 3. 부등류 모형에 이용된 홍수사상

사상	홍수기간	팔당댐 최대방류량 (m <sup>3</sup> /s)
1	1990. 06. 24-06. 27	8,600
2	1990. 09. 09-09. 13	31,303
3	1991. 07. 24-07. 26	15,302

표 4. 부등류 모형에서 산정된 조도계수

유 량	구간 1	구간 2	구간 3
10000 (m <sup>3</sup> /s)	0.026	0.031	0.038
5000 (m <sup>3</sup> /s)	0.030	0.04	0.050
1000 (m <sup>3</sup> /s)	0.050	0.055	0.060

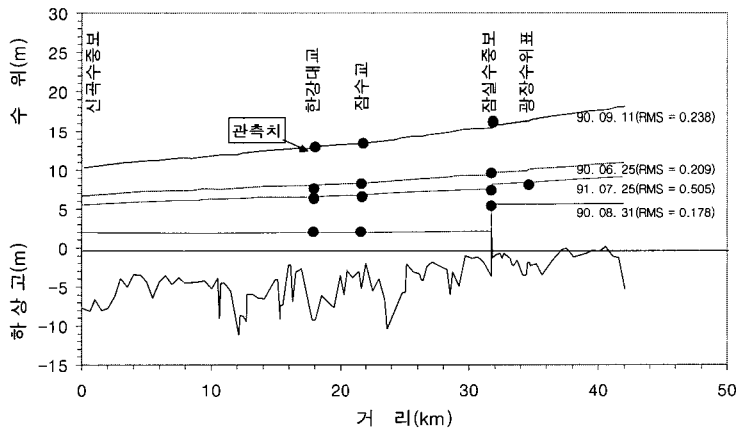


그림 2. 부등류 모형의 계산수면곡선

최적화기법은 김원 등(1995)의 연구에 상세히 기술되어 있으므로 여기에서는 생략하였다.

2.2.1절에서 사용된 3개의 유량등급을 사용하였으나 홍수사상의 경우 결측이 적고 연속자료가 양호한 3개의 홍수사상을 선택하여 표 5에 나타내었다. NETWORK 모형의 조도계수 최적화기법을 이용하기 위해서는 소하도내에 관측자료가 필요하다. 따라서 3구간을 고안수위관측소가 포함되도록 잠실수중보에서 팔당댐으로 수정하였다. 유량에 따라 한계류가 발생하는 잠실수중보상의 흐름은 건설부(1994)에 제시된 수위-유량곡선을 이용하여 계산할 수 있으나 조도계수를 산정할 때에는 하천구조물 자체의 영향이 조도계수에 반영되어 비현실적으로 커지거나 또는 모의가 불가능하게 될 수도 있다. 그러므로 2 구간(한강대교~잠실수중보)을 한강대교~잠수교와 잠수교~잠실수중보로 세분하여 한강대교~잠수교구간의 최적 조도계수를 구하였다. 표 6은 표 5의 홍수사상을 이용하여 산정된 조도계수를 나타낸 것이고 그림 3은 표 6의 조도계수를 사용한 NETWORK의 계산수위와 관측수위를 도시한 것이다.

표 5. 부정류 모형에 이용된 홍수사상

사상	홍수기간	팔당댐 최대방류량 (m <sup>3</sup> /s)
1	1992. 08. 26~08. 30	8,379
2	1993. 07. 10~07. 17	9,398
3	1994. 06. 29~07. 02	5,613

### 2.2.3 수치모형에 의한 방법과 경험식의 비교

경험식에 의한 조도계수의 산정방법은 크게 하상물 질 입경과 하상경사를 이용하는 방법이 있다. 서울특별시(1983)의 하상물질 입경과 한강관리사업소(1997)의 하상경사를 이용한 경험식에 의한 조도계수를 산정하였으며 이 값을 수치모형에서 산정한 값과 함께 그림 4에 도시하였다.

그림 4에서와 같이 본 연구에서 산정한 값은 부정류 모형이나 부정류 모형에 의한 방법 모두 유량이 증가하면서 조도계수가 점점 작아지는 것으로 나타났으며 그 값의 차이에서도 아주 미소하지만 경험식을 이용하여 계산한 값은 상당한 차이를 보이고 있고 이는 경험식에 의해 계산된 값은 식 (1)에서  $n_0$ 에 해당하기 때문인 것으로 판단되지만 여기에 하천의 형상, 식생이나 구조물에 의한 보정계수를 고려한다면 근사한 결과를 제공할 것으로 사료된다. 산정된 조도계수의 검증은 일반적으로 홍수사상을 이용하는 방법이 있다. 그러나 하류경계조건인 신곡수중보의 수위자료가 양호하지 않다. 따라서 부정류 모형에서 사용한 홍수사상이외에 적당한 홍수사상을 선정할 수 없어서 수치모형에서 산정된

표 6. 부정류 모형에서 산정된 조도계수

유 량	구간 1	구간 2	구간 3
10000 (m <sup>3</sup> /s)	0.026	0.030	0.035
5000 (m <sup>3</sup> /s)	0.029	0.037	0.045
1000 (m <sup>3</sup> /s)	0.045	0.050	0.060

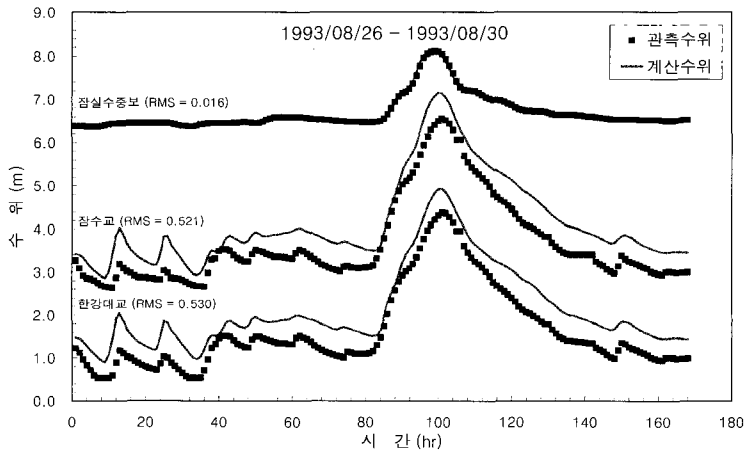


그림 3. 부정류 모형의 계산수면곡선

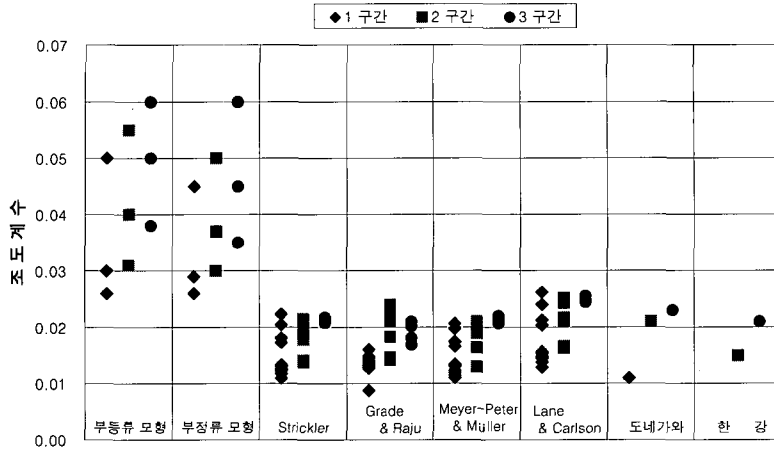


그림 4. 수치모형에서 산정된 조도계수와 경험식의 비교

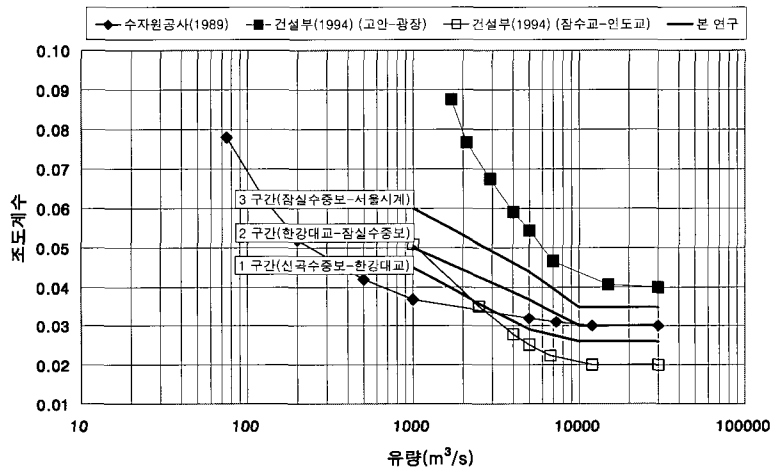


그림 5. 최종 산정된 조도계수와 기존 연구결과 비교

조도계수를 검증할 수는 없었다. 본 연구에서는 부정류 흐름의 해석모형이며 조도계수 최적화기법이 포함되어 있는 NETWORK모형에서 산정된 조도계수가 객관적이라고 판단되어 최종적인 값으로 채택하였으며 이는 그림 4와 5에 나타낸 것과 같다.

### 3. 외점성계수의 산정

본 연구에서 2차원 동수역학모형으로 선정한 것은 RMA-2의 SMS모형이다. RMA-2는 이미 국내에도 소개되어 많이 사용되고 있으며 현재는 전·후처리기를 보완하여 미국 BOSS INTERNATIONAL에서 상업용으로 판매하고 있다. SMS모형은 이외에도 유사

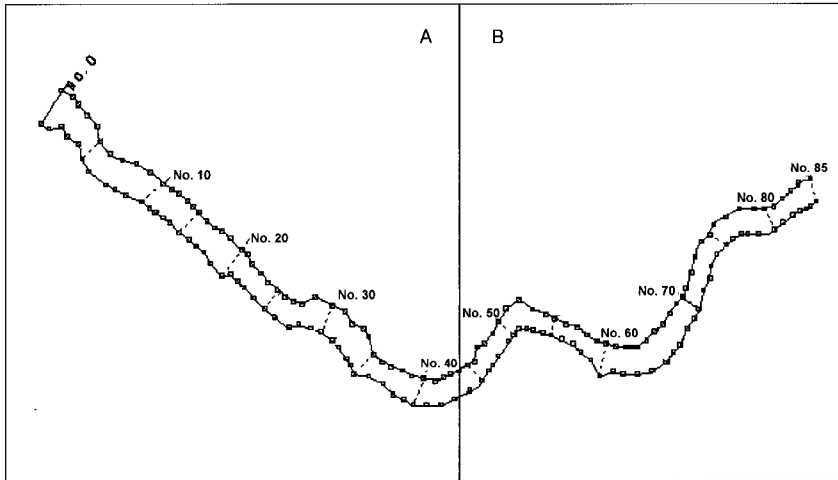
이송 모형인 SED-2D와 추적물이송 모형인 RMA-4 등으로 구성되어 있으며 이중 2차원 자유수면 유한요소 프로그램인 RMA-2는 식 (6)~(8)의 천수방정식을 Galerkin 가중잔차법을 이용하여 해석한다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

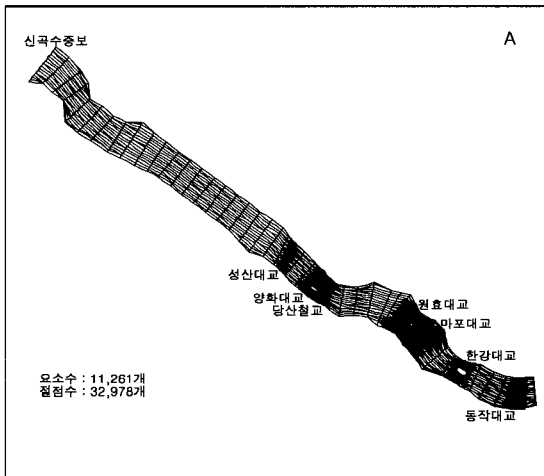
$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_o}{\partial x} \right) + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (7)$$

표 7. 대표적인 외점성계수값

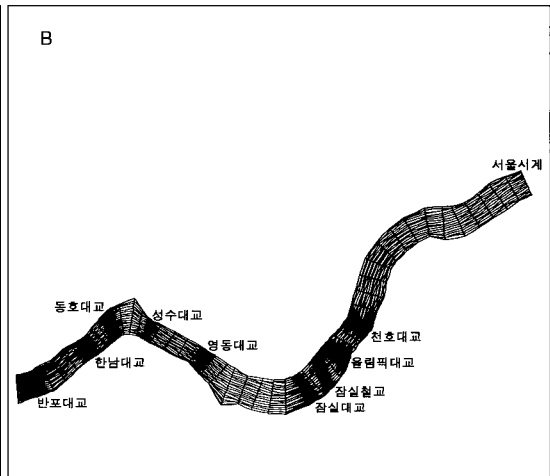
상 태	$\epsilon$ 값 [lb · sec / ft <sup>2</sup> ]	$\epsilon$ 값 [N · sec / m <sup>2</sup> ]
얇은 하천(완류)	5-25	240-1200
얇은 하천(급류)	25-50	1200-2400
깊은 하구(작은 요소)	50-100	2400-4800
깊은 하구(큰 요소)	200-300	9500-14400
감조 습지	100-200	4800-9500
구조물 주위의 흐름 이탈	1-5	50-240



(a) 계산 수역도



(b) 계산격자망 A



(c) 계산격자망 B

그림 6. 유한요소 계산격자망

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_o}{\partial y} \right) + \frac{g v}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\epsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\epsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \quad (8)$$

여기서  $u$ ,  $v$  는  $x$  와  $y$  방향 유속,  $h$  는 수심,  $a_o$  는 하상표고,  $\epsilon_{ij}$  는 난류교환계수이며  $C$  는 Chezy 계수이다.

와점성계수는 조도계수와는 달리 2차원모형에서만 사용되는 변수로서 흐름의 분포와 와류 등을 표현하는 계수이다. 그러나 이 계수는 흐름의 특성뿐만 아니라 수치계산의 안정에도 영향을 미치므로 해의 안정성에 영향을 미치지 않는 범위내에서 물리적으로 타당한 값을 산정해야 한다. 유한요소모형인 SMS는 흐름조건과 유한요소망의 특성에 따라 개략적인 와점성계수 값을 제공하며 이는 표 7과 같다. 표 7에서 알 수 있듯이 와점성계수는 유속과 요소의 크기에 비례하므로 흐름 조건이나 유한요소망이 달라지면 그때마다 적절한 값을 다시 산정하여야 하는 불편함이 있으므로 와점성계수 또는 난류교환계수는 식 (9)를 이용하여 내부적으로 계산할 수 있도록 하는 선택사항을 제공한다.

$$P_e = \frac{\rho V \Delta x}{\epsilon_{ij}} \quad (9)$$

여기서  $P_e$  는 Peclet 수,  $\rho$  는 밀도,  $V$  는 유속,  $\Delta x$  는 격점의 간격, 그리고  $\epsilon_{ij}$  는 난류교환계수를 나

타낸다. 사용자가 Peclet 수의 값을 정의해주면 각 격점에서 인접 격점과의 간격과 전 시간단계에서 계산된 유속을 이용하여 와점성계수를 계산하며 해의 안정을 위하여 50보다 작은 Peclet 수를 권장한다. 식 (9)에서 알 수 있듯이 유속이 커지면 와점성계수도 커져서 수치점성의 효과를 가지게 되며 그 결과로 불안정한 계산을 억제해 준다. 그러나 유속과 격점간격의 변화가 심하면 난류교환계수도 상대적으로 큰 변화폭을 나타내어 물리적인 흐름분포를 올바르게 계산하지 못하게 된다. 그러므로 본 연구에서는 이 방법을 이용하지 않고 수위점정을 통하여 직접 산정하였다. 여기에 이용된 수위관측소는 한강본류의 수위관측소 중 기록이 가장 오래되고 비교적 수위자료의 신빙성이 높은 한강대교의 한강대교 수위표이다. 유한요소격자망은 한강관리사업소(1993, 1997)의 횡단측량결과를 이용하여 구성하였으며 이를 그림 6에 도시하였다.

#### 와점성계수의 산정방법

- ① 과거의 홍수사상중 하나를 선택하고 와점성계수를 변화시키면서 계산을 수행한다.
- ② 계산된 수위를 와점성계수에 따라 도시하고 그 중 관측수위에 가장 가까운 값을 취한다.
- ③ ①과 ②의 과정을 여러 홍수사상에 대하여 반복한다.
- ④ 각각의 홍수사상에서 선택된 와점성계수를 홍수량에 대해 도시하면 하나의 상관곡선을 얻을 수 있으며 그림 7은 와점성계수를 후르드수에 대하여 도시한

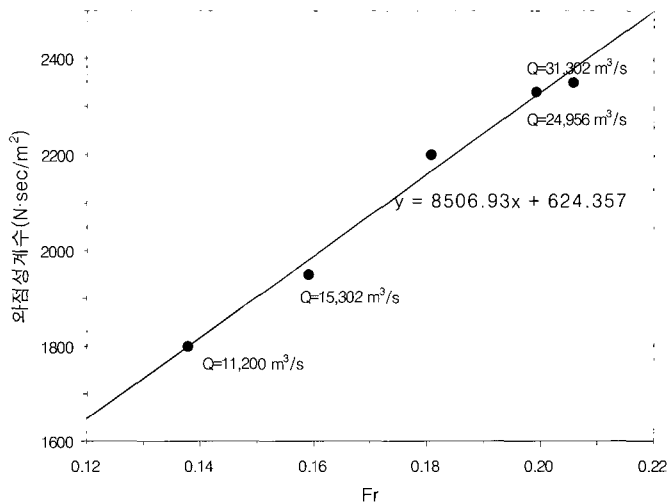


그림 7. 한강 하류구간의 후르드수-와점성계수 관계



결과이다.

$$\epsilon = 8506Fr + 624 \quad (10)$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} = \frac{Q/A}{\sqrt{gA/B}} \quad (11)$$

여기서  $\epsilon$  은 와점성계수이며,  $Fr$  은 횡단면의 평균 후르드수로서 단면평균유속( $Q/A$ )과 수리수심(hydraulic depth,  $A/B$ )의 함수이며,  $Q$  는 유량,  $A$  는 흐름단면적,  $B$  는 수면폭이다.

그림 7로부터 와점성계수를 후르드수의 선형함수로 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 그림 8은 3개의 입의 와점성계수와 그림 7에 의한 와점성계수

( $\epsilon = 2,200N \cdot \text{sec}/m^2$ )를 이용하여 계산된 수위를 도시한 것으로 수위의 변화는 이 계수와 비례관계가 성립함을 알 수 있으며 흐름이 빨라질수록 큰 와점성계수값이 필요하다.

그림 9와 10은 그림 5에서 산정한 조도계수와 그림 7에서 구한 와점성계수를 이용하여 1차원과 2차원 모형으로 계산한 결과를 비교한 것이다. 그림 9에서 SMS의 계산수면곡선은 단면 평균한 값으로 1차원 모형인 HEC-2의 계산결과보다 10~20 cm 정도 높게 나타났으며 그림 10으로부터 국부유속을 필요로 하는 경우에도 편의상 단면평균유속을 사용하면 결과에 오류가 포함될 수도 있음을 알 수 있다. 2차원 모형의 유속분포의 적정성을 검증하기 위해 서울특별시(1998)

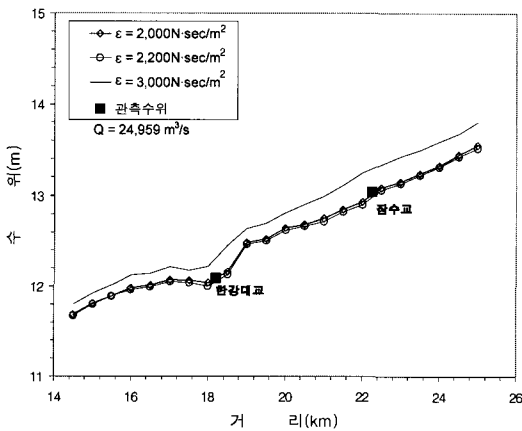


그림 8. 와점성계수의 변화에 따른 수위의 변화

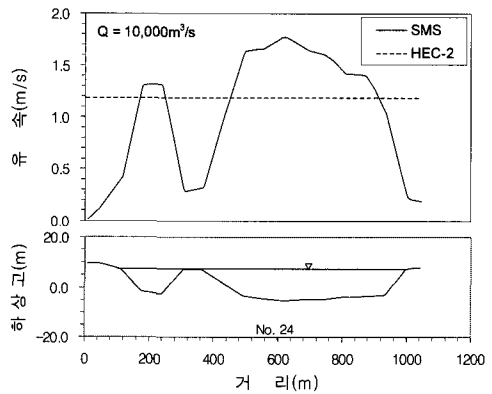


그림 10. HEC-2과 SMS의 계산유속 분포(양화대교 하류)

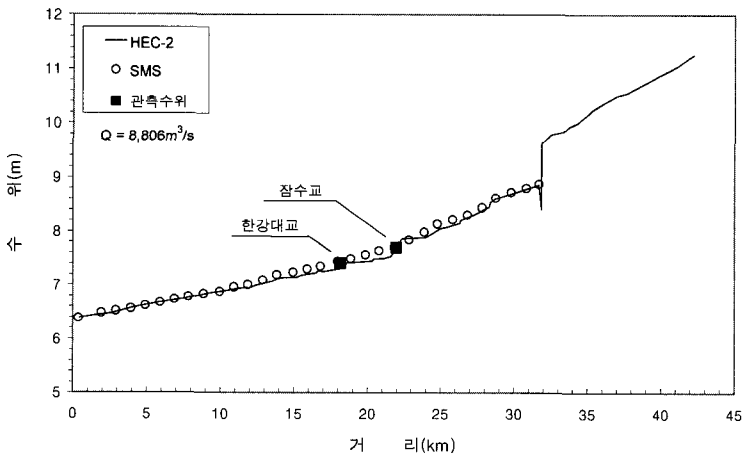


그림 9. HEC-2와 SMS에 의한 계산수위와 관측수위의 비교

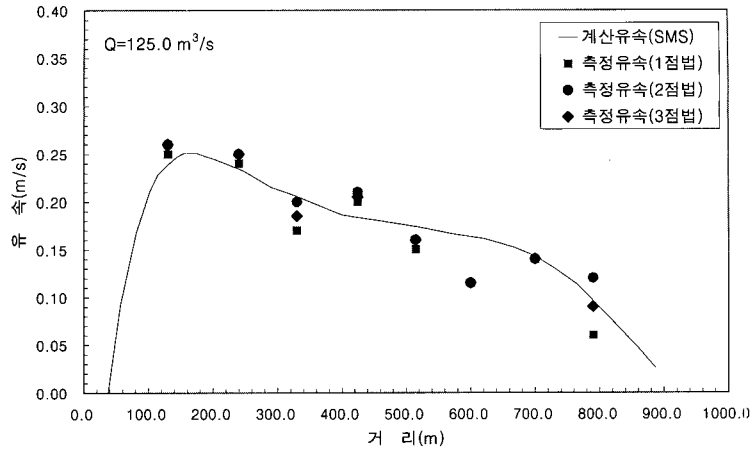


그림 11. 측정유속과 SMS의 계산유속 비교(양화대교 하류)

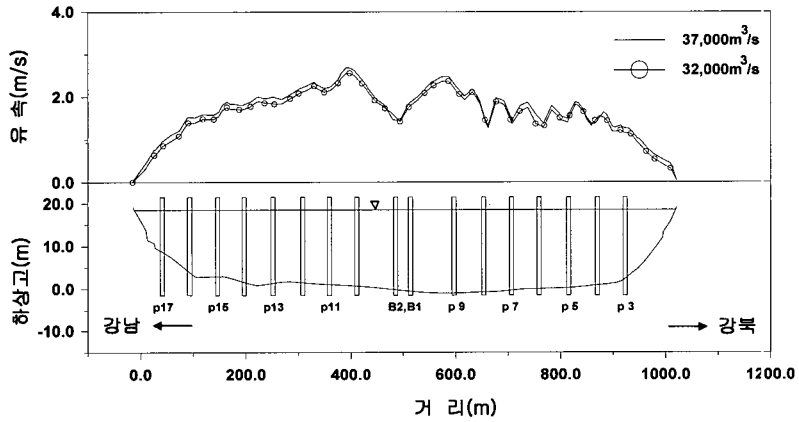


그림 12. 올림픽대교의 접근유속과 수심

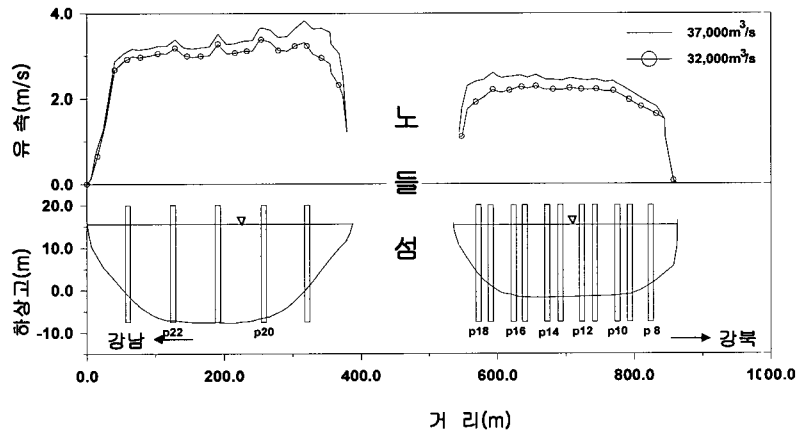


그림 13. 한강대교의 접근유속과 수심

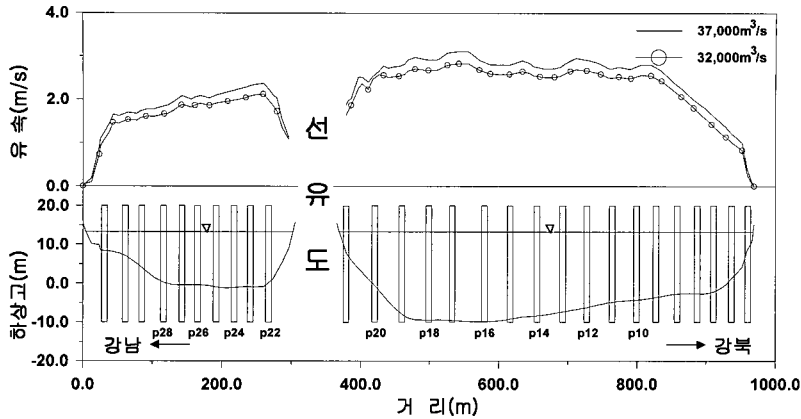


그림 14. 양화대교의 접근유속과 수심

의 영동대교 상류 50 m에서 측정된 유속자료와 계산 유속을 비교하여 그림 11에 나타내었다. 그림 12~14는 한강의 100년 빈도( $32,000\text{m}^3/\text{s}$ )와 200년 빈도( $37,000\text{m}^3/\text{s}$ )홍수량에 대한 2차원 모형의 계산결과이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 수치모형의 입력변수인 조도계수와 와점성계수의 검증방법을 제시하였다. 조도계수는 한강 하류구간의 하상경사와 하상물질 입경에 따라 3개의 하도구간과 유량 및 수위에 대하여 다른 값이 산정되었다. 이와 같이 산정된 조도계수의 적정성은 HEC-2와 NETWORK에 의한 수면곡선과 관측수위의 비교에서 증명된다. 와점성계수는 후르드수와 선형함수관계임이 밝혀졌고 후르드수의 향으로 나타난 와점성계수의 적정성 또한 2차원 모형을 이용한 수면곡선이 관측치와 일치하는 사실에서 입증된다. 이러한 결과는 수치모형의 적용시마다 조도계수와 와점성계수를 가정하고 반복 계산하는 작업의 제거가 기대된다.

#### 참 고 문 헌

건설부 (1991). 한강수계 유출 프로그램 개선방안.  
 건설부 (1994). 홍수자료관리시스템 구축.  
 김원, 김양수, 우효섭 (1995). “부정류 모형을 이용한 한강 하류부 하도의 조도계수 산정.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제28권, 제6호, pp. 133-146.  
 서울지방국토관리청 (1988). 한강하류 연안개발 기본 계획보고서.

서울특별시 (1983). 한강종합개발현지조사보고서(토질 및 지질, 측량).  
 서울특별시 (1998). 한강교량기초 수리모형실험 보고서.  
 이종태, 한건연, 서병하 (1993). “한강의 홍수규모에 따른 인도교수위의 조석영향분석.” 한국수문학회지, 한국수문학회, 제26권, 제2호, pp. 67-77.  
 윤용남, 박무중 (1994). “FESWMS-2DH 모형에 의한 한강 하류부의 수리특성 분석.” 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제14권, 제4호, pp. 847-857.  
 윤용남, 윤재영, 이재수 (1995). “2차원 수리모형을 이용한 홍수시 교량에서의 최대세굴심도 예측.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제15권, 제6호, pp. 1689-1696.  
 전경수 (1997). “월류흐름을 포함한 부정류 계산모형에 관한 연구.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제29권, 제2호, pp. 153-165.  
 최병호, 서경석 (1987). “한강갑조구간의 홍수추정.” 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제7권, 제3호, pp. 133-139.  
 한강관리사업소 (1993). 한강수로용역조사보고서.  
 한강관리사업소 (1997). 한강수로용역조사보고서.  
 한국수자원공사 (1989). 한강주운개발사업 타당성 조사보고서. 건설부.  
 황의준, 전경수 (1997). “한강 본류에 대한 부정류 계산모형: 모형의 보정.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제30권, 제5호, pp. 549-559.  
 Barnes, H.H., Jr. (1967). *Roughness*

- Characteristics of Natural Channels*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1984, U.S. Geological Survey, Washington.
- BOSS International (1995). *BOSS SMS user's manual*.
- Chow, V.T. (1959). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, pp. 101-114.
- Cowan, W.L. (1956). "Estimation hydraulic roughness coefficient." *Agricultural Engineering*, Vol. 37, No. 7, pp. 473-475.
- French, R.H. (1985). *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill Book Company, pp. 159-161.
- Garde, R.J., and Ranga Raju, K.G. (1978). *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*. Wiley Eastern, New Delhi.
- Lane, E.W., and Carlson, E.J. (1953). "Some factors affecting the stability of canals constructed in coarse granular materials." *Proceedings of the Minnesota International Hydraulics Convention, ASCE*, pp. 37-48.
- Meyer-Peter, E., and Müller, R. (1948). "Formulas for bed-load transport." *Proceedings of the 3rd Meeting of IAHR*, Stockholm, pp. 39-64.
- Simons, D.B., and Senturk, F. (1976). *Sediment transport technology*. Water Resources Publications, Fort Collins.
- U.S. Army Corps of Engineers (1990). *HEC-2 flood hydrograph package user's manual*. The Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- U.S. Army Corps of Engineers (1995). *User's guide to RMA2 (version 4.3)*. Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory.
- (논문번호:99-031/접수:1999.10.08/심사완료:1999.10.28)