

수심적분 2차원 유사이동모형에 관계된 인자들의 민감도분석에 관한 연구

Sensitivity Analysis of Parameters in a Depth Averaged Two-Dimensional Sediment Transport Model

서 상 원* / 윤 병 만**

Seo, Sang Won / Yoon, Byung Man

Abstract

In this paper, a depth-averaged two-dimensional transport model is introduced, and its error bound is presented as the results of sensitivity analysis. The results show that the calculated SS concentration is highly dependant on Manning roughness coefficient, mixing coefficient, fall velocity, and critical shear stress. On the other hand, water level and dispersion coefficient are proved to be less significant in the variation of SS concentration.

Keywords: sensitivity analysis, Manning roughness coefficient, mixing coefficient, fall velocity, critical shear stress, water level, dispersion coefficient

요 지

본 논문에서는 수심적분 2차원 모형을 하나 소개하고, 이 모형이 가질 수 있는 오차의 한계를 민감도분석을 통해 제시하였다. 민감도분석 결과, Manning 조도계수, 혼합계수, 침강속도, 한계전단력 등이 부유사농도에 대해 모형에 미치는 영향은 매우 크게 나타났으며, 조위와 확산계수의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 민감도분석, Manning 조도계수, 혼합계수, 침강속도, 한계전단력, 조위, 확산계수

* 명지대학교 토목환경공학과 수공학전공 석사과정

** 명지대학교 토목환경공학과 부교수

1. 서 론

해안의 자연지형은 흐름의 변화에 대해서 자체적으로 조절하는 능력을 가지고 있다. 흐름의 변화는 자연적 변화와 인위적 변화로 구분할 수 있다. 자연적 변화는 해일, 조류, 취송류 등에 의한 변화가 있다. 또한, 댐 방류량 조절 및 운배수 제트 등은 인위적 변화로서 해안 흐름의 변화를 야기시키며, 항만 등 수공구조물의 건설에 의해 흐름이 인위적으로 변화된다. 흐름이 변화하게 되면 이전의 동적 평형상태에 있던 해안은 수리학적 특성과 유사 특성의 변화를 초래하여 평형상태는 깨지게 되며 해안지형이 새로운 평형상태에 도달할 때까지 침식 또는 퇴적이 발생하게 된다. 유사운송능력 이상의 유사가 유입되거나 유사운송능력이 저하되는 경우에는 퇴적현상이 발생하고, 오염물질의 이동을 방해하여 수질오염을 가속시키기도 한다. 또한 해수의 흐름에 변화가 생겨 바다로 유입하는 생활폐수나 공업시설로부터 방출된 오염물질들이 항내 또는 인근해역으로 확산되어 인근주민들에게 피해를 주는 경우도 발생하고 있다. 이러한 유사이동 변화를 규명하기 위해서는 흐름 및 유사이동 현상에 대한 정확한 이해가 필요하다.

유사이동모형은 적용가능영역 또는 모형의 차원에 따라 1, 2, 3차원 모형으로 구분된다. 하천에서의 유사이동 해석에는 주로 1차원 모형을 사용하고 있으며, 하구, 호수 등의 영역에서 부유사농도의 연직분포가 주요 관심사항일 경우에는 연직 2차원 모형을 사용한다. 연안, 하구, 항만, 호수 등과 같은 영역에서의 평면적인 유사이동문제 해석에는 평면 2차원 또는 3차원 유사이동모형을 사용한다. 비록 하천의 경우라도 사행현상 규명이나 수리구조물과 관련된 국부세굴을 규명하기 위해서는 평면 2차원 또는 3차원 유사이동모형이 사용되기도 한다(Olsen and Melaen, 1993; 이길성 등, 1994). 이러한 모형들은 모두 주어진 시스템을 어느 정도까지 단순화시켜서 개발되었기 때문에 필연적으로 자체적인 오차를 내포하고 있다. 따라서 비슷한 시스템에 대하여 여러 개의 모형들이 나름대로의 정당성이 부여되어 발표되고 있다.

이러한 수학적 모형들에는 모형을 구성하고 있는 인자들이 있고, 각 인자들은 각각 다른 정밀도로 모형의 예측성에 영향을 미치게 된다. 이러한 인자들은 대부분 정도의 차이는 있지만 오차를 가지고 있으며 각 인자들이 갖는 오차가 모형에 미치는 영향을 파악하는 것은 매우 중요하다. 특히 모형에 큰 영향을 주는 인자들은

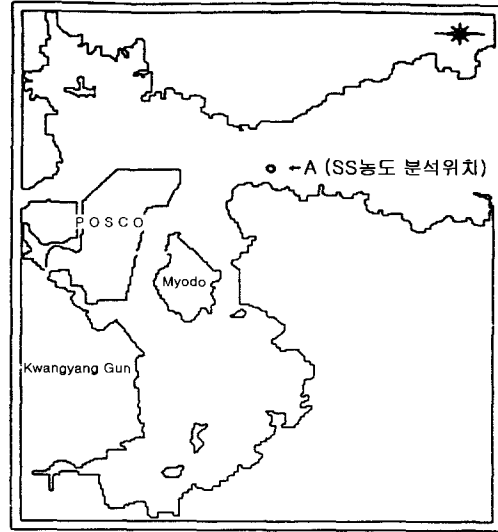


그림 1. 부유사농도 분석 위치도

결정할 때에는 보다 높은 정확도를 얻을 수 있도록 세심한 주의를 하여야 한다. 많은 오차를 내포한 모형을 사용한 경우 환경영향의 예측이 불확실해질 뿐 아니라 심각한 자원의 낭비를 초래할 수 있다. 그러므로 모형의 인자들에 대한 민감도분석(sensitivity analysis)은 필수적인 요소이다.

본 논문에서는 광양만에 적용되었던 수심적분 2차원 유사이동모형(윤병만 등, 1996)을 소개하고, 이 모형이 가질 수 있는 오차의 한계를 민감도분석을 통해 제시하였다. 본 연구의 대상지역으로는 광양만(그림 1)을 선택하였으며 각 매개 변수의 민감도를 분석하기 위한 자료로서 A지점(그림 1)의 농도값을 이용하였다.

2. 모형의 개요

본 모형은 유사가 '부상→이류→확산→침강'을 반복하면서 이동한다고 생각하여, 이들의 제반 현상을 유체에 관한 연속방정식, 운동량방정식 및 부상, 침강항을 포함한 이류확산방정식을 사용하여 나타내었다. 한편, 우리나라 서·남해안의 경우 흐름을 일으키는 주원인은 조석이므로, 본 연구에서는 조석에 따른 조류유동 수치해석을 실시하여 유사이동 수치계산에 필요한 외력조건을 얻고자 하였다. 흐름에 관한 연속방정식과 x, y 방향에 대한 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{H} \right) + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{H^{7/3}} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial M}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial M}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{H} \right) + \frac{gn^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{H^{7/3}} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(K_H \frac{\partial N}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_H \frac{\partial N}{\partial y} \right) = 0 \quad (2.3)$$

여기서 x, y, t 는 공간 및 시간좌표이며, η 는 수위, M, N 은 x, y 방향 수평 선유량성분이고, g 는 중력가속도, $H(=h+n)$ 는 실제의 수심, h 는 정수시의 수심이며, n 은 Manning 조도계수, K_H 는 수평혼합계수이다. 부유된 유사 및 실트에 관한 농도이동 해석은 다음과 같은 이류확산방정식에 의해 구할 수 있다.

$$\frac{\partial(HC)}{\partial t} + \frac{\partial(HuC)}{\partial x} + \frac{\partial(HvC)}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} \left(H\epsilon_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(H\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) = P - D \quad (2.4)$$

여기서 C 는 수심방향으로 적분된 평균 부유사농도, u, v 는 각각 수심방향으로 평균된 평균유속의 x, y 성분, ϵ_x, ϵ_y 는 각각 수심방향으로 평균된 수평확산계수의 x, y 성분이다. P, D 는 단위시간, 단위면적당 저면으로부터의 부상량 및 침강량으로 다음과 같이 표현된다.

$$P = \begin{cases} M(\tau/\tau_e) & \text{for } \tau > \tau_e \\ 0 & \text{for } \tau \leq \tau_e \end{cases} \quad (2.5)$$

$$D = w_f \alpha C \quad (2.6)$$

여기서 M 은 경험계수이며 τ 는 저면에서의 전단응력, τ_e 는 부상이 되기 위한 한계전단응력, w_f 는 침강속도, α 는 저면에서의 농도와 평균농도의 비, 즉 $\alpha = C/C_0$ 이다. 본 모형에서는 ADI법과 완전음해법의 단점을 보완하기 위해 운동방정식내의 수평혼합항과 이류항을 기지의 값으로 처리한 준음해법을 사용하였다.

3. 매개변수의 민감도분석

측정된 값과 문헌으로부터 구했거나 상호관계식을 갖고 구한 값들에 대한 오차의 범위는 표 1과 같이 가정하였다. 그림 2와 그림 3은 기준값에 대한 대상영역의 유속 평면분포이고, 그림 4와 그림 5는 농도의 평면분포를 나타낸 것이다. 표 1에는 각 매개변수의 오차범위를 제시하였는데 조위는 실측자료를 고려하여 5% 내의

표 1. 각 매개변수의 기준값과 오차범위

주요 매개변수	기준값	오차범위(%)
조위	1.805 m	±5
Manning 조도계수	0.03	±10
혼합계수	10 m ² /s	500
확산계수	10 m ² /s	500
침강속도	0.01 cm/s	±10
한계전단력	0.64 N/m ²	±10

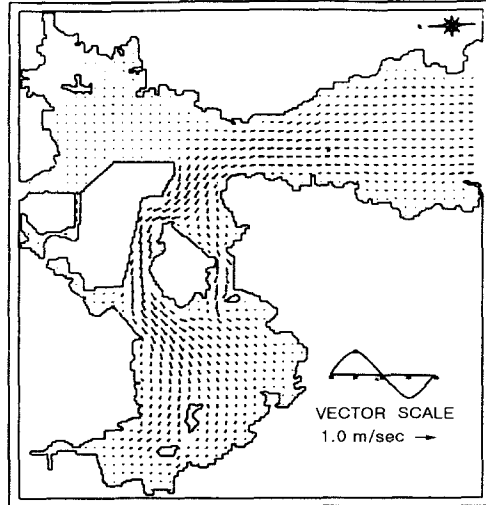


그림 2. 유속분포(창조시)

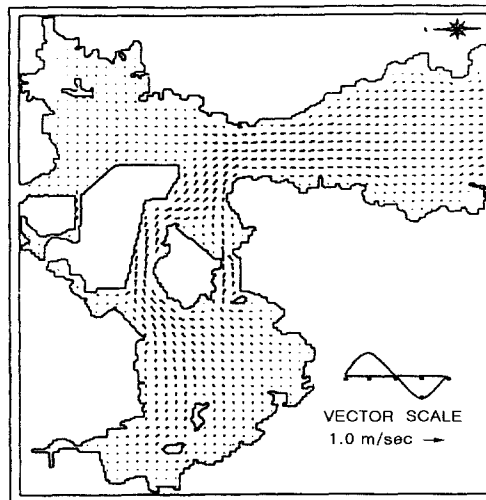


그림 3. 유속분포(낙조시)

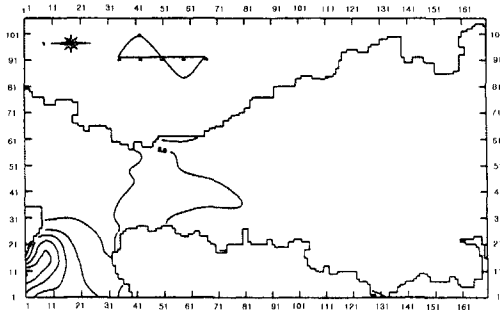


그림 4. 농도분포(창조시)

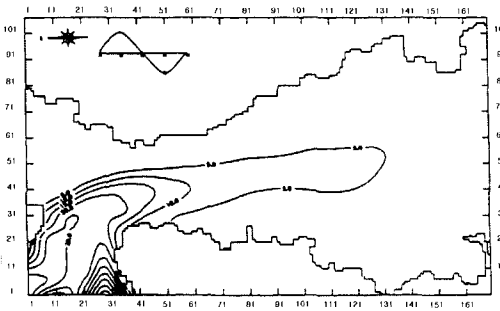


그림 5. 농도분포(낙조시)

에서 오차가 있을 수 있다고 판단하였고, Manning 조도계수는 조도에 따라 0.01~0.05 사이에서 변하지만 여기서는 10% 정도의 오차를 가정하였다. 침강속도는 여러 가지 실험식이 있지만 본 논문에서는 Rouse (1937)의 침강속도-입경관계곡선을 이용하여 산정하였고, 한계전단력은 Hayter and McCutcheon(1989)이 제시한 값을 사용하였다. 이와 같이 침강속도와 한계전단력은 실험이나 문헌을 통하여 구하게 되는데 여러 요인에 의하여 오차의 범위가 크게 나타날 수 있으나 본 논문에서는 10% 정도의 오차로서 부유사농도의 정상적인 변화를 알아보고자 하였다. 그 외에 혼합계수와 확산계수의 선정에 대한 연구는 미흡한 편으로, 본 논문에서는 윤병만 등(1996)이 평양만에 사용한 값을 적용하였고, 오차의 범위는 일반적으로 해안에서 적용되는 값 10~60 m²/s 내에서 계수값을 변화시켜 보았다(이은주와 권정곤, 1995). 그리고 수치계산시 초기농도를 전영역에 걸쳐 부하량에 의한 농도 증가분 5.4 mg/ℓ로 가정하고 계산을 진행하였다.

본 논문에서는 각 매개변수의 민감도에 대한 상대적 크기 보다는 실제로 일어날 수 있는 상황에서 매개변수들이 미칠 수 있는 정도를 예를 통하여 보여 주려고 시도하였다. 각 매개변수들이 모형의 결과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 기준값을 오차범위내에서 조정하여 모형을 실행시켰을 경우에 대한 산정결과를 표 2에 정리하였다.

표 2. 오차범위내에서 각 매개변수들이 모형에 미치는 영향

Case	조위		Manning 조도계수		혼합계수		확산계수		침강속도		한계전단력	
	오차 범위 (%)	부유사 농도의 상대치 (%)	오차 범위 (%)	부유사 농도의 상대치 (%)	오차 범위 (%)	부유사 농도의 상대치 (%)	오차 범위 (%)	부유사 농도의 상대치 (%)	오차 범위 (%)	부유사 농도의 상대치 (%)	오차 범위 (%)	부유사 농도의 상대치 (%)
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	-0.2	2	10.4	50	-6.2	50	-0.4	2	-4.3	2	-7.0
2	2	-0.4	4	24.0	100	-10.9	100	-0.5	4	-8.6	4	-11.8
3	3	-0.7	6	34.1	150	-14.6	150	-0.7	6	-11.2	6	-18.8
4	4	-0.9	8	44.0	200	-17.5	200	-0.9	8	-14.4	8	-24.4
5	5	-1.1	10	56.1	250	-19.9	250	-1.1	10	-17.3	10	-34.6
6	-1	0.2	-2	-10.0	300	-22.0	300	-1.4	-2	3.5	-2	6.2
7	-2	0.4	-4	-19.5	350	-24.8	350	-1.6	-4	7.8	-4	13.5
8	-3	0.6	-6	-28.6	400	-29.8	400	-1.8	-6	12.4	-6	21.1
9	-4	0.8	-8	-37.2	450	-34.8	450	-2.0	-8	17.3	-8	29.2
10	-5	1.0	-10	-45.4	500	-39.6	500	-2.2	-10	22.6	-10	40.9

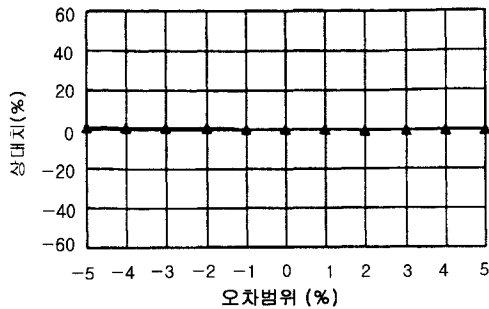


그림 6. 조위 변화에 따른 부유사농도의 변화

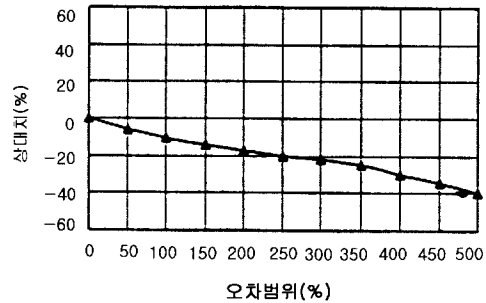


그림 8. 혼합계수 변화에 따른 부유사농도의 변화

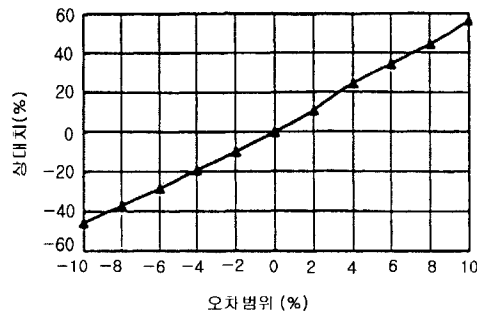


그림 7. Manning 조도계수 변화에 따른 부유사농도의 변화

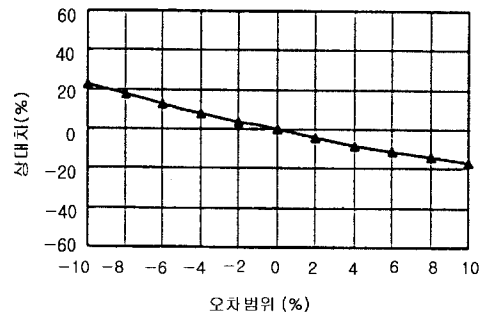


그림 9. 침강속도 변화에 따른 부유사농도의 변화

그림 6은 조위를 0~5%사이에서 1%씩 증감시켰을 경우 농도의 결과를 나타낸 것이다. 조위를 증가시켰을 경우의 부유사농도 최저치는 5.1 mg/l로 초기치와 비교하여 1.1%의 농도감소를 나타냈고, 계수를 감소시켰을 경우의 부유사농도 최고치는 5.3 mg/l로 초기치와 비교하여 1.0%의 농도증가를 나타냈다.

그림 7은 Manning 조도계수를 0~10% 사이에서 2%씩 증감시켰을 경우 Manning 조도계수의 변화가 농도에 미치는 결과를 나타낸 것이다. Manning 조도계수를 증가시켰을 경우의 부유사농도 최고치는 8.1 mg/l로 초기치와 비교하여 56.1%의 농도증가를 나타냈고, 계수를 감소시켰을 경우의 부유사농도 최저치는 2.8 mg/l로 초기치와 비교하여 45.4%의 농도감소를 나타냈다.

그림 8은 혼합계수를 10~50 m²/s범위내에서 5 m²/s씩 증가시켰을 경우 와동점성계수가 농도에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 혼합계수를 증가시키면 농도가 작게 되는데 이 경우 부유사농도 최저치는 3.1 mg/l로 초기치와 비교하여 39.6%의 농도감소를 나타냈다.

그림 9는 침강속도를 0~10%사이에서 2%씩 증감시

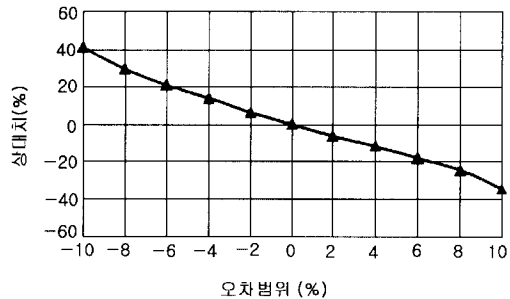


그림 10. 한계전단력 변화에 따른 부유사농도의 변화

켰을 경우 농도의 결과를 나타낸 것이다. 침강속도를 증가시켰을 경우의 부유사농도 최저치는 4.3 mg/l로 초기치와 비교하여 17.3%의 농도감소를 나타냈고, 계수를 감소시켰을 경우의 부유사농도 최고치는 6.4 mg/l로 초기치와 비교하여 22.6%의 농도증가를 나타냈다.

그림 10은 한계전단력을 0~10%사이에서 2%씩 증감시켰을 경우 농도의 결과를 나타낸 것이다. 한계전단력을 증가시켰을 경우의 부유사농도 최저치는 3.41 mg/l로 초기치와 비교하여 43.3%의 농도감소를 나타

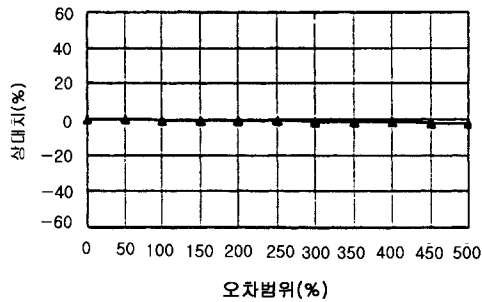


그림 11. 확산계수 변화에 따른 부유시농도의 변화

냈고, 감소시켰을 경우의 부유시농도 최고치는 7.3 mg/ℓ로 초기치와 비교하여 40.9%의 농도증가를 나타냈다.

그림 11은 확산계수를 10~50 m²/s 범위내에서 5 m²/s씩 증가시켰을 경우 확산계수가 농도에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 확산계수를 증가시켰을 경우의 부유시농도 최저치는 5.1 mg/ℓ로 초기치와 비교하여 2.2%의 농도감소를 나타냈다.

4. 결 론

수치모형실험에 사용되는 유사이동모형들은 여러개의 인자들을 내포하고 있는데, 이러한 인자들은 서로 다른 형태로 계산결과에 영향을 미친다. 본 논문에서는 국내에서 몇 번 적용된 바 있는 2차원 유사이동모형의 민감도를 분석함으로써 각 인자들이 계산결과에 영향을 미치는 정도와 형태를 파악하여 모형이 궁극적으로 가질 수 있는 오차의 한계를 알 수 있도록 하였다.

분석 결과, Manning 조도계수, 혼합계수, 침강속도, 한계전단력의 변화가 부유시농도에 대하여 계산결과에 미치는 영향은 매우 큰 것으로 나타났으며, 특히 주요 매개변수 중 Manning 조도계수는 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 한편 조위와 확산계수의 변화가

계산결과에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 앞으로 본 모형을 적용할 경우 계산결과에 큰 영향을 주는 Manning 조도계수, 혼합계수, 침강속도, 한계전단력 등의 값을 설정할 때 세심한 주의를 기울여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 명지대학교 부설 산업기술연구소의 '97 교내 연구비 지원으로 수행된 과제입니다.

참 고 문 헌

- 윤병만, 편종근, 여운광, 백승화 (1996). U-1 비축지 입출하부두 수치모형 실험, 명지대학교.
- 이길성, 이남주, 오성택 (1994). 유사이동모형을 이용한 잠실수중보 주변 하상변동의 수치모의, 서울대학교.
- 이은주, 권정곤 (1995). "수영만 해역의 오염물질 거동에 대한 수치평가모델의 개발." 대한환경공학회지, 대한환경공학회, 제17권, 제8호, pp. 723-733.
- Hayter, E.J. and McCutcheon, S. (1989). *Finite element hydrodynamic and cohesive sediment transport modeling system FCSTM-H*. Draft.
- Olsen, N.R.B. and Melaaen, M.C. (1993). "Three-dimensional calculation of scour around cylinders." *J. of Hyd. Eng.*, ASCE, Vol. 119, No. 9, pp. 1048-1054.
- Rouse, H. (1937). *Nomogram for the settling velocity of spheres*. Division of Geology and Geography, Exhibit D of the Report of the Commission on Sedimentation, 1936-1937, National Research Council, Washington, D.C., pp. 57-64.

<최종본 접수일 : 1998년 1월 8일>