

개수로에서 소유사의 영향을 고려한 부유입자 유동에 관한 수치적 연구

A Numerical Analysis of Sediment-laden Flow in Open Channel with Bed-load Effect

윤 준 용* / 강 승 규** / 강 시 환***

Yoon, Joon-Yong / Kang, Seung-Kyu / Kang, See-Whan

Abstract

A numerical analysis of sediment-laden flow is carried out, and results are compared with the experiments of Coleman(1981, 1986) that included the several cases varying sediment size and quantity in open channel flow. $k-\omega$ turbulence model is selected for the fully turbulent flow field, and the concentration equation considering the fall velocity is adopted for the concentration field. The model of Einstein and Chien(1955) is applied to couple the velocity field and the concentration field. Most of researches have been carried out without considering the bed-load thickness, but it is found that the bed-load thickness cannot be ignored in case of a large amount of sediment or a large size of it. The bed-load thickness and surface roughness are considered in this study. Here, β value, which is defined by the reciprocal of turbulent Schmidt number and is related with the concentration profile, is found to be varied according to the sediment size and quantity. Even though most of researchers have insisted that β had always larger than 1.0, it may be concluded that β can have smaller value than 1.0, that is coincident with the report of recent research

keyword · suspended sediment, open channel flow, concentration equation, $k-\omega$ turbulence model, bed-load effect

요 지

본 연구에서는 부유입자를 포함하는 유동을 입자크기와 입자량을 달리한 몇 가지 경우에 대하여 수치적으로 해석하고 Coleman(1981, 1986)의 실험결과와 비교하였다. 완전 난류 유동장을 해석하기 위하여 $k-\omega$ 난류모형을 사용하였으며, 농도장 해석을 위해서는 침강속도를 고려한 일반화된 농도방정식을 적용하였다. 유동과 입자의 상호작용은 Einstein과 Chien(1955)의 모형을 도입하여 수치계산 하였다. 기존의 대부분 연구에서는 소유사의 두께를 고려하지 않은 연구를 수행하였으나, 입자량이 많아지거나 입자크기가 클 경우 이를 무시할 수 없는 것으로 밝혀졌다. 소유사의 두께와 하상에 의한 표면 거칠기 효과를 고려하여 본 연구를 수행하였는데 여기서 농도분포를 결정짓게 되는 β 값이 입자의 크기와 입자량에 관련 되어있다는 사실을 확인할 수 있었다. 기존 연구결과는 β 가 1.0보다 큰 값을 가진다고 보고되었으나, 본 연구를 통해 1.0보다 작아질 수 있음이 확인되었고, 이는 최근에 보고된 연구 결과와 일치되는 결과이다.

핵심용어 : 부유입자, 개수로 유동, 농도방정식, $k-\omega$ 난류모형, 소유사의 영향

* 한양대학교 공학대학 기계산업공학부 부교수
Associate Prof., Dept. of Mechanical Eng., Kyunggi 425-791, Korea
joyoon@email.hanyang.ac.kr

** 한양대학교 대학원 기계공학과 박사과정
Doctoral Student, Dept. of Mechanical Eng., Kyunggi 425-791, Korea

*** 한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 책임연구원
Principal Researcher, Coastal and Harbor Engrg. Research Center, Korea Ocean Research and Development Inst., Ansan, Kyunggi 425-170, Korea

1. 서 론

부유입자를 포함하는 유동에 관한 연구는 공학자들이나 환경학자, 또는 해양학자들에게 매우 관심 있는 연구분야이다. 강이나 하천에서의 토사운반, 수로를 통한 곡물이나 알갱이의 수송, 공업용수 속의 부유 물질 여과, 입자상 유기물에 의한 해저오염 등을 해석하기 위해서는 액체와 입자로 구성된 2상유동(two-phase flow) 분체를 다루어야 한다. 이러한 이유로 부유물질을 포함하는 유동에 대하여 지난 수십 년간 많은 연구자들에 의해서 연구되어 왔다. 초기 연구자중 Rouse(1937)는 이론적인 식을 이끌어내 개수로 유동의 농도 분포를 해석한 연구자이며, 그는 개수로 2차원 유동이 완전히 발달되었을 때 농도분포의 해석 해를 제공하였다. 이러한 이상적인 조건하의 해석 해는 그 후 수많은 연구자들에게 비교자료로서 큰 역할을 해왔다. Einstein과 Chien(1955)은 유체와 부유입자 사이의 역학관계를 나타내는 식을 제안하였다. Bechteler와 Schrimpf(1984)는 여러 가지 속도 분포식과 난류확산 계수에 관한 식을 비교하였고, van Rijn(1984)은 정상유동에서의 입자농도분포에 대한 식을 이끌어 내고, 이식에 중요한 영향을 미치는 인자인 입자의 침강속도와 확산계수에 관한 실험식을 발표하였다. Umeyama와 Gerritsen(1992)은 새로운 형태의 혼합거리 이론을 도입하고 Rouse의 농도 분포식을 이용하여 입자가 존재하는 유동에서의 속도분포를 예측하였다. Kovacs(1998)는 유동을 하상에서 가까운 근처의 내부영역과 멀리 떨어진 외부영역으로 나누어 유동장을 해석하였다.

지금까지 여러 연구자들에 의해 연구된 입자수송 문제에 대한 해법은 실험에 의존한 방법이 대부분 이었다. 이러한 실험에 의한 입자수송의 예측은 시간적으로나 경제적으로 매우 많은 노력이 들기 때문에 입자수송을 예측하는 수리적인 모형의 필요성이 대두되고 있다. 그러나 아직도 부유입자 유동을 정확하게 해석할 수 있는 모형이 발표되지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 적절한 난류모형을 선정하여 개수로에서 부유입자 유동을 해석하기 위한 수리적인 모형을 연구하고자 한다. 부유입자를 포함하는 유동에서 적절한 난류모형의 선정이 매우 중요한데 여기서 사용될 난류모형은 Wilcox(1988)에 의해 제안된 $k-\omega$ 난류모형이다. 이 난류모형은 일반적으로 난류해석에 사용되는 $k-\epsilon$ 난류모형에서의 ϵ 에 대한 벽면경계조건의 불명확성과

는 달리 바닥경계에 있는 모래입자의 표면 거칠기 효과를 고려할 수 있다는 장점이 있다. 난류모형과 더불어 풀게되는 입자수송 모형의 개발은 기본적으로 두 가지 어려움이 있는데 그 하나는 유체와 부유하는 입자사이의 상호관계를 적절히 묘사하는 것이다. 입자를 수송하는 유체는 그 입자로 인하여 감속되어지며, 유체와 부유하는 입자의 속도 또한 서로 다르므로 이러한 유체와 입자의 상호작용을 적절하게 예측할 수 있는 모형의 개발이 쉽지 않다. 그리고 또 하나는 경계조건의 불확실성이다. 바다 또는 강바닥의 모래입자는 유동 조건에 따라 구르거나 점프하기도 하고 또한 퇴적되기도 하는데 이런 영향을 적절하게 묘사할 수 있는 이론은 아직 정립되지 않은 상태이다. 본 연구는 이러한 문제들을 고려하여 부유입자 유동을 수치적으로 해석하고 이 결과를 Coleman(1981, 1986)의 실험 자료와 비교하여 수치해석 방법의 타당성을 검토하고자 한다.

2. 이 론

2.1 기본방정식

본 연구는 주기적으로 완전히 발달된 유동 및 입자수송에 대해 정상, 비압축성, 난류유동장에 대하여 계산을 수행하였다. 지배방정식들은 직교 좌표계에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

운동량 보존법칙.

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (2\mu S_{ij} - \overline{\rho u_i u_j}) \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, μ 는 유체의 점성 그리고 P는 압력을 나타낸다. 식(2)와 같이 시간 평균한 운동량 방정식을 레이놀즈 방정식이라 하며 소위 레이놀즈 응력이라고 불리는 $-\overline{u_i u_j}$ 항이 새롭게 포함되어 있다.

이항은 Boussinesq의 가정에 의해 등방성 와점성계수 ν_t 와 평균변형을 사이의 관계로 나타낼 수 있다

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (4)$$

여기서, $k = \frac{u_i u_i}{2}$ 은 난류운동에너지이며, δ_{ij} 는 Kronecker delta이다.

2.2 k- ω 난류모형

농도장을 해석하기 위해서는 우선 속도장을 정확하게 해석해야 되는데, 기존의 연구에서는 속도장을 해석하기 위해 대수속도법칙을 적용하거나, 멱법칙을 적용하였고, 최근에는 혼합거리 이론을 적용하여 속도장을 해석한 바 있다. 본 연구에서는 더 신뢰성 있는 속도 분포를 얻기 위하여 2-방정식 난류모형인 k- ω 난류모형을 도입하여 속도장을 해석하고자 한다. k- ω 모형은 벽면에서 거칠기 효과를 고려할 수 있다는 점에서 부유입자 유동을 해석하기에 적합하다 할 수 있다. 유동 속에서 수송되는 입자는 부유하는 형태로 이동되거나, 바닥을 통하여 깔려서 이동하는 형태를 취하게 되는데, 이때 소유사의 크기에 의해 바닥은 이에 상응하는 거칠기를 가지게 된다. 그러므로 k- ω 모형을 사용할 경우 이러한 소유사에 의한 거칠기 효과를 고려할 수 있게 된다. 속도분포는 농도분포에 영향을 미치기 때문에 더 신뢰성 있는 속도장의 해석은 더 근사한 농도분포를 예측 가능하게 한다. k- ω 모형은 난류운동에너지(k)와 진동수치원을 갖는 비소산율(ω)의 항으로 다음과 같이 표현된다.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (5a)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (5b)$$

여기에 사용된 모델링 상수는 $\beta=3/40$, $\beta^*=0.09$, $\gamma=5.9$, $\sigma=\sigma^*=0.5$ 로 Wilcox(1988)가 제안한 값을 사용하였다. 와점성계수(ν_t)는 난류운동에너지와 비소산

율과 관련되며, 다음과 같은 관계식을 가진다

$$\nu_t = \gamma^* \frac{k}{\omega} \quad (\gamma^*=1.0) \quad (6)$$

모래입자의 거칠기를 고려할 수 있는 표면 거칠기 효과는 벽면에서 비소산율을 다음과 같이 정의해준다.

$$\omega = u_\tau^2 S_R / \nu \quad (7)$$

$$S_R = \begin{cases} \left(\frac{50}{k_s^+} \right)^2 & , k_s^+ < 25 \\ \frac{100}{k_s^+} & , k_s^+ \geq 25 \end{cases} \quad (8)$$

여기서 u_τ 는 전단속도, ν 는 동점성계수 그리고 k_s^+ 는 모래 입자에 의한 표면 거칠기 효과를 나타내며 모래 입자의 지름에 대한 흐름 높이의 비($D50/h$)로 정의된다.

2.3 농도방정식

부유하는 모래입자는 난류확산에 의하여 부유하는 상태가 유지될 수 있다. 다시 말해서 연직 상방향으로 향하는 입자의 난류확산 속도는 연직 하방향의 지중에 의한 침강속도와 균형을 이루으로써 부유 상태를 유지하게 된다. 이와 같은 가정 하에서 유한점사 체적 안에서 부유하는 입자의 보존법칙을 적용하면, 일반화된 농도방정식이 세워진다.

$$\gamma \int_V \left(\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \vec{u}_p) - \nabla \cdot (\Gamma_s \nabla C) \right) dV = 0 \quad (9)$$

여기서 γ 는 비중량이고, C 는 무게에 기준한 입자의 농도로서 유체의 무게당 입자의 무게로 정의되며, Γ_s 는 입자의 와확산계수, \vec{u}_p 는 부유하는 입자의 속도벡터이다. 이식을 미분점사체적에 적용하여 미분방정식 형태로 나타내면,

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C \vec{u}_p) = \nabla \cdot (\Gamma_s \nabla C) \quad (10)$$

와 같이 되고, $\vec{u}_p = \vec{u}_f + \vec{w}$ (\vec{u}_f 는 유체속도, \vec{w} 는 입자의 침강속도)로 나타낼 수 있다. 여기서 유체가 비압축성 유체이고 입자의 크기와 모양이 균일하여 침강속도가 일정하다고 가정하면, 일반적인 비점

상 3차원 부유하는 입자의 농도방정식이 유도된다.

$$\rho \frac{\partial C}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = - \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma_s \frac{\partial C}{\partial x_j}) \quad (11)$$

여기서 $u_j = (u, v - w_s)$ 이며, w_s 는 입자의 침강속도를 나타낸다. 또한, 입자의 외확산계수(Γ_s)는 통상 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma_s = \beta \nu_t \quad (12)$$

여기서, β 는 turbulent Schmidt number (σ_c)의 역수이고, ν_t 는 유동의 외점성계수이다. 유동 내에서 입자의 영향을 나타내기 위하여 표준 k- ω 난류모형의 외점성계수를 수정할 필요가 있는데, 이에 대해서 Einstein과 Chien (1955)이 제안한 모형을 이용하였다.

$$\nu_t = \gamma^* \frac{k}{\omega} [1 + (1 - \frac{1}{s})C] \quad (13)$$

여기서 $s (= \rho_s/\rho)$ 는 부유하는 입자의 밀도에 대한 유체의 밀도 비이다. 이때 γ^* 는 1.0이다. 이로써 입자 수송모형과 유동모형이 연관되게 된다.

3. 계산방법

3.1 실험/계산조건

본 연구에서는 Coleman(1981, 1986)의 실험자료를 비교대상으로 선정하였다. Coleman은 길이 15m, 폭 0.356m의 직사각형 투명 유리로 이루어진 개수로 유

동 실험 장치에서 입구로부터 12m되는 지점의 속도와 농도분포를 측정하였다. 먼저 모래가 없는 개수로 유동의 속도장을 측정하고 점차로 모래를 유입하여 얻어지는 유체의 속도 변화와 그에 따른 농도분포를 측정하였다. 세 가지 다른 크기의 모래입자에 대해 모래의 양을 다르게 하여 40번의 실험을 수행하였다. 본 연구는 입자의 크기와 입자의 양이 유동에 미치는 영향을 관찰하기 위해서 Coleman의 실험 가운데 입자가 전혀 없는 경우와 세 가지 입자크기에 대해 입자량이 아주 적은 경우 그리고 아주 많은 경우를 각각 선택하여 총 7가지 경우를 계산하고 Coleman의 실험자료와 비교하였다. 계산을 위한 유동 조건은 Table 1과 같다. 여기서, Q_s 는 모래의 양, Q 는 총 유량, h 는 유동의 높이, δ 는 경계층 두께, 그리고 C_b 는 하상에서의 농도를 나타낸다. U_m 는 평균유속(= Q/A)을 의미하고, Dh 는 수력지름을 나타내며, 2차원 유동이라는 가정하에서 평균유속과 수력지름을 기준한 레이놀즈수($Re = U_m Dh/\nu$)는 모든 경우에 대하여 10^3 보다 큰 값을 나타내고 있다. 개수로 유동에서 층류로부터 난류로 천이되는 임계 레이놀즈수는 수력지름을 기준으로 했을 때 2000정도로써(Schlichting, 1979) 본 연구대상의 유동은 완전 난류유동임을 확인 할 수 있다. 모래입자의 침강속도는 Rouse(1937)의 입자지름-침강속도 곡선으로부터 산출하였다. 계산을 위한 경계조건으로 속도에 대하여는 벽면에서 점착조건을 주고, 표면에서는 구배가 없다고 가정하여 Neumann 조건을 사용하였다. 농도에 대해서는 Coleman의 실험자료로부터 외삽의 방법으로 하상과 표면에서의 농도를 추정하여 경계값으로 사용하였다. 입구와 출구에서는 계산의 효율성을 높이기 위해 주기조건을 사용하였다. 속도와 농도의 최대

Table 1. Flow Conditions for Calculation [Coleman(1981, 1986)]

Run No.	D50 (mm)	Sand.Qs (kg)	Q (m ³ /s)	h (mm)	δ (mm)	U _m (m/s)	C _b ($\times 10^{-3}$)	s	T (°C)	D _h (m)	Re ($\times 10^3$)	ks+ ($\times 10^{-3}$)	w, (m/s) ($\times 10^{-3}$)
01	-	0	0.064	172	132	1.045	-	-	21.1	0.688	7.35	-	-
02	0.105	0.91	0.064	171	120	1.051	1.39	2.65	24.6	0.684	7.93	0.6104	1.0
09		17.27	0.064	172	136	1.045	15.5	2.65	24.4	0.688	7.88	0.6105	1.0
22	0.210	0.91	0.064	170	122	1.058	2.13	2.65	23.8	0.680	7.80	1.24	2.49
29		17.27	0.064	168	130	1.070	5.70	2.65	23.3	0.672	7.70	1.25	2.49
33	0.420	0.91	0.064	174	128	1.033	0.695	2.65	22.5	0.696	7.55	2.41	5.70
40		17.27	0.064	171	125	1.050	100	2.65	22.9	0.684	7.62	2.46	5.70

오차가 10^{-5} 보다 작을 때까지 반복 계산하여 수렴 해를 얻었다.

3.2 수치해법

수치 계산은 Yoon과 Patel(1996), Yoon 등(1996)이 사용한 방법을 적용하여 계산하였다. 이 방법은 Reynolds-averaged Navier-Stokes 방정식을 일반 곡선 좌표계에서 수학적으로 완전변환하여 해석한다. 또한 운동방정식과 난류 불성치들의 수송 방정식, 그리고 입자수송 방정식은 유한 해석법 (FAM, finite analytic method)을 이용하여 이산화 하였다.(Chen, 1982) 이때 입력 및 속도 보정을 위해 Patanker(1980)의 수정된 SIMPLER 알고리즘을 사용하였다.

4. 계산결과

4.1 속도분포

Fig. 1의 (a)와 (b)는 모래 양이 0.91kg일 때와 17.27kg일 때 속도분포를 실험 자료와 비교하였다. 여기에서 보면 입자가 존재하는 경우(Run 02, 09, 22, 29, 33, 40)가 입자가 존재하지 않는 경우(clear Water, Run 01)에 비해 입자와 유동의 상호작용에 의해 벽면근처에서는 속도가 감소되는 것을 볼 수 있다. 즉 이것은 입자의 농도가 높은 바닥 근처에서는 점성이 크게 증가하여 속도를 감소시키고 있는데 수치 계산 결과는 이러한 영향을 잘 예측하고 있다. 결국 유동과 입자의 상호작용을 모형화한 Einstein과 Chen의 제안이 부유입자 유동을 해석하는데 적합하다 하겠다. 반면 자유표면 부근에서 속도분포가 약간의 오

차를 보이고 있는데 이것은 계산에서는 유동을 2차원이라는 가정 하에 유동을 해석하였지만 Coleman의 실험은 이런 2차원 유동의 가정을 완전히 만족시키지 못하는데 있다. 개수로 유동을 2차원으로 가정하기 위한 조건으로, Lyn(1988)은 수로의 폭에 대한 유동의 높이 비(aspect ratio)가 4이상, Muste와 Patel(1998)은 7이상일 때라고 주장하였다. 그러나 Coleman의 경우는 aspect ratio가 2.1 정도로 2차원 유동 가정을 만족하기에 충분하지 못하다. 따라서 양측 벽면의 영향에 의한 2차 유동 때문에 계산 값과 실험 값이 속도분포에 있어서 오차를 유발했다고 볼 수 있다.

4.2 농도분포

본 연구에서는 입자의 양에 따라 소유사의 두께를 고려하여 계산을 수행하였다. 기존의 부유입자 유동에 관한 수치계산에서는 이러한 소유사의 두께를 무시하고 계산하였으나 입자량이 많아지거나, 입자의 크기가 커질 경우 이를 간과할 수 없게 된다. 소유사의 두께에 대해서는 아직 정확한 이론은 없으나, Einstein(1950)은 입자의 크기가 미세하고 전단력이 적은 경우 입자 크기의 1~2배 정도라 하였고, Englund(1981)와 Wilson(1988)은 전단력이 커지게 되면 입자크기의 수 배 정도로 증가한다고 하였다. 본 계산에서는 모래의 양이 0.91kg 인 경우에는 입자크기의 2~6배 그리고 17.27kg인 경우에는 10~16배로 하였을 때 좋은 결과를 얻을 수 있었다. Fig. 2에서 소유사의 두께를 표시하였다 입자량이 아주 적은 Run02, 22, 33의 경우에는 거의 무시할 수 있을 정도

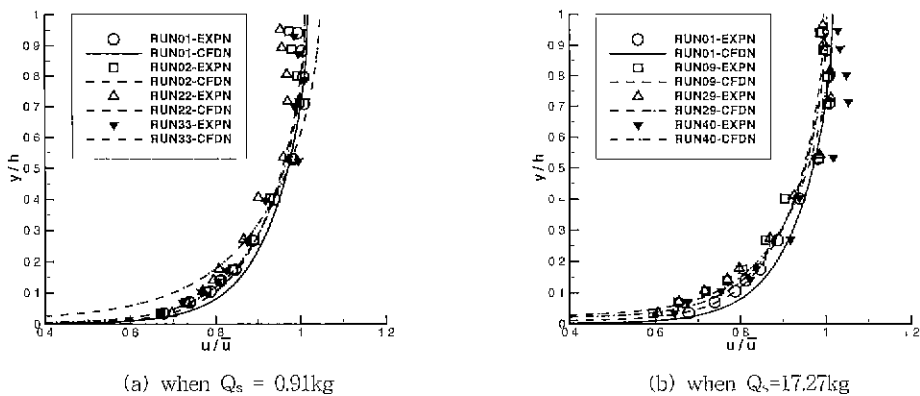


Fig. 1. Non-dimensional Velocity Profiles

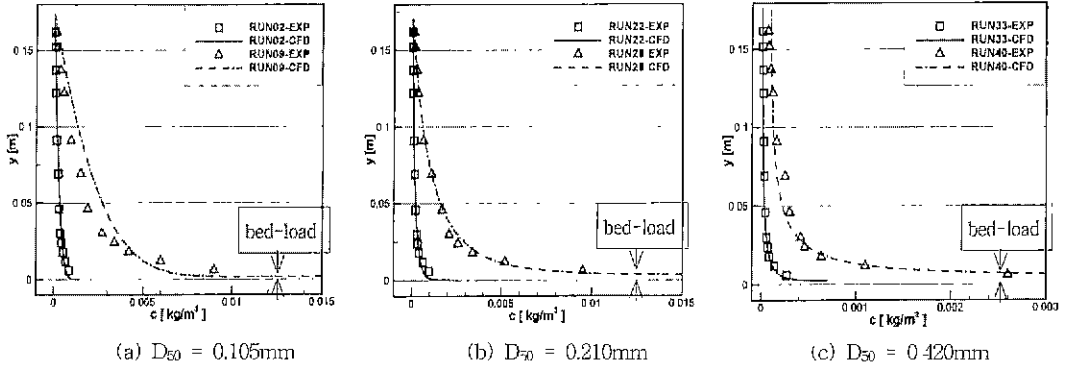


Fig. 2. Concentration Profiles

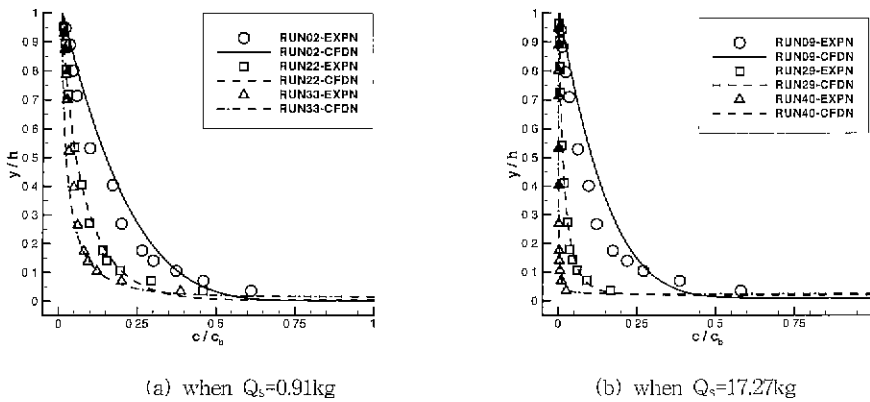


Fig. 3. Non-dimensional Concentration Profiles

로 작게 나타나지만 입자량이 많은 Run09, 29, 40의 경우에는 소유사의 두께가 상당히 크게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 또한 입자의 지름이 커지면서 두께가 증가하고 있다. 이것은 결국 입자량이 많아지고 입자의 크기가 커질 때 유동장에 큰 영향을 미칠 수 있음을 말해 준다. 따라서 소유사의 두께를 무시할 수 없게 된다 Fig. 3(a)~(b)는 모래의 양이 같은 조건에서 모래입자의 크기에 따른 농도분포를 비교하였다. 농도 분포를 살펴보면 입자의 크기가 증가할수록 기울기가 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 입자의 크기와 농도분포가 상관관계를 가지고 있음을 보여준다. 이러한 영향은 turbulent Schmidt number (σ_c)의 크기로 조절이 되는데, 기존의 연구에서는 σ_c 가 0.5~1.0사이의 값에서 좋은 결과를 나타내는 것으로 보고되었다. Jobson과 Sayre(1970)는 실험을 통해서

1.0을 제시하였고 Karim(1981)과 Celik(1983)은 이 보다 낮은 값인 0.5 1.0 사이의 값을 제안하였다. van Rijn (1984)은 $\beta(=1/\sigma_c)$ 가 입자의 침강속도 및 전단 속도와 관련 있다고 보고 다음과 같은 실험식을 제안 하였다.

$$\beta = 1 + 2 \left[\frac{w_s}{u_\tau} \right]^2 \quad (14)$$

Celik과 Rodi(1988)는 모의(simulation)를 통해서 입구 근처의 발달구간에서는 σ_c 가 1.0의 값을 취하다가 완전 발달된 구간에서는 0.5의 값을 가지게 된다고 주장하였다. 그리고 Galland 등(1997)은 레이놀즈 응력 모형을 사용하여 수치계산 한 결과 turbulent Schmidt number가 0.7일 때 좋은 결과를 얻었다.

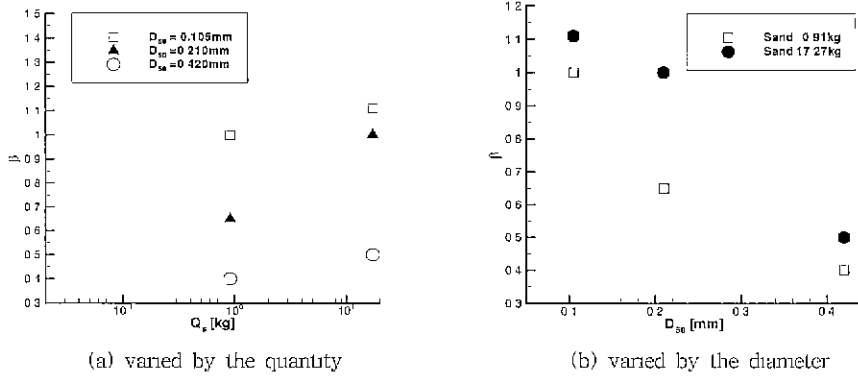


Fig. 4. β Profiles

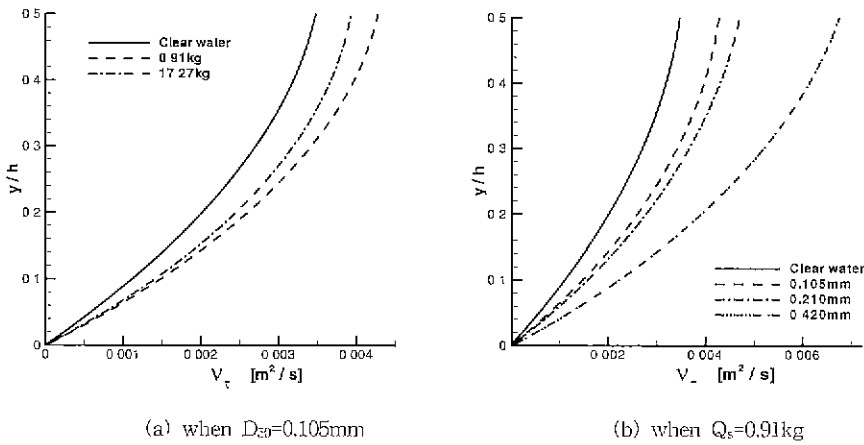


Fig. 5. Comparison of Eddy Viscosity Profiles Near the Bed

이상의 연구결과들은 모두 σ_c 가 1.0보다 작은 값에서 좋은 결과를 얻었다. 즉, β 가 1.0보다 크다는데 의견을 같이 하고있다. 그러나 최근에 Cellio와 Graf (1999)는 그들의 실험에서 1.0보다 작은 β 값을 제시하였다. 본 연구에서는 Run02, 09, 22, 29, 33, 40의 각각의 경우에 대하여 β 가 10, 1.11, 0.65, 1.0, 0.4, 0.5일 때 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 β 가 1.0보다 작아질 수 있음을 확인한 것이며 결국 기존의 연구에 의한 β 값 결정방식이 개선되어야 함을 보여주는 결과라 하겠다. Fig. 4에서 (a)는 입자량에 따른 β 값 분포이고, (b)는 입자크기에 따른 β 값 분포를 나타낸다. 이것은 β 가 입자량과 크기에 관련 있음을 보여준다. 즉, 입자량이 많아질 수록 β 가 증가하는

반면, 입자의 크기가 증가할 수록 감소하는 경향을 보이고 있다. 관계식(12)에 의하면 입자량이 많아질 때 β 가 증가하는 것은 입자가 많아질 때 입자의 외점성계수가 증가함을 의미하며, 반면에 입자의 크기가 커짐에 따라 β 값이 감소하는 것은 유동의 외점성계수가 증가함을 설명해 준다. 본 연구 결과는 입자의 양이 많을 때 즉, 입자의 수가 많아질 때, 입자간의 충돌이 증가하여 상대적으로 입자에 의한 확산이 활발해 지는 것을 설명하며, 입자의 크기가 커지면 난류 전달 거리가 증가하여 상대적으로 외점성계수가 증가하는 것을 나타냄으로 물리적으로 타당한 결과라 볼 수 있다. Fig. 5는 하상 근처에서의 외점성계수 분포를 나타낸다. (a)는 모래 양에 따른 외점성계수의 분포를 비교한

것이고, (b)는 모래입자의 크기에 따른 외점성계수의 변화를 비교한 것이다. 여기에서 외점성계수의 절대값은 입자가 없을 때 보다 입자가 존재할 때 증가하는 것을 볼 수 있으며, 다시 입자량이 더 증가할 때 오히려 외점성계수는 감소하는 분포를 보이고 있다. 또 입자의 크기가 커질 수록 외점성계수는 계속 증가하는 것을 확인할 수 있다. Prandtl의 혼합거리 이론에 의하면 외점성계수는 다음과 같이 정의된다(Schlichting, 1979).

$$\nu_t = l^2 \left| \frac{d\bar{u}}{dy} \right| \quad (15)$$

이식에 의해서 외점성계수는 난류 전달거리와 속도구배에 비례하게 된다. 결국 부유입자를 포함하는 유동에서 외점성계수가 증가하는 것은 난류 전달거리의 증가로 인한 것이며, 입자량이 증가하면서 다시 감소하는 것은 난류가 발달하면서 속도구배가 감소하기 때문으로 해석된다. 앞에서도 언급되었듯이 입자의 크기가 커지면서 외점성계수가 증가하는 것은 난류전달 거리의 증가로 인한 현상임을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 부유입자를 포함하는 유동을 입자크기와 입자량을 달리한 몇 가지 경우에 대해서 수치적으로 해석하여 실험결과와 비교하였다. 완전 난류 유동장을 해석하기 위하여 2-방정식 난류모형인 $k-\omega$ 모형을 사용하였으며, 농도장 해석을 위해서는 침강속도를 고려한 일반화된 농도방정식을 적용하였다. 유동과 입자의 상호작용을 모델링하기 위하여 Einstein과 Chien의 모형을 도입하여 수치계산 하였다. 본 연구결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1.기존의 연구에서는 소유사의 두께를 무시하고 수치계산을 수행하였으나, 입자량이 많아지거나 입자크기가 클 경우 이를 무시할 수 없다. 본 연구에서는 소유사의 두께를 고려하여 계산을 수행하고, 하상에 의한 표면 거칠기 효과를 고려하기 위하여 $k-\omega$ 난류모형을 사용하여 좋은 결과를 얻었다.

2.농도분포를 결정짓게 되는 β 값이 입자의 크기와 입자량에 관련 되어있음을 알았다. 기존에는 β 가 1.0보다 큰 값을 가진다고 생각되었으나, 최근의 연구나 본 연구를 통해 1.0보다 작아질 수 있음을 확인하였으며 β 값을 결정하기 위한 일반화된 식을 얻는 연구가 필요하다고 사료된다.

3.부유입자를 포함하는 유동의 외점성계수는 입자를 포함하지 않는 유동에서 보다 증가하게 되지만, 입자량이 증가하게 됨에 따라 다시 감소하는 경향을 보인다. 또 입자의 크기가 커짐에 따라서는 난류전달 거리의 증가로 인하여 계속 증가하게 된다

후 기

이 논문은 1999년 한양대학교 교내연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- Bechteler, W., and Schrimpf, W. (1984). "Improved numerical model for sedimentation." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 110, No. 3, pp. 234~246.
- Celik, I. (1983). "Numerical modelling of sediment transport in open channel flows." *Mechanics of sediment transport*, A.A. Balkema Publishers, Netherlands, pp. 173~181.
- Celik, I., and Rodi, W. (1988). "Modeling suspended sediment transport in nonequilibrium situations." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 114, No. 10, pp. 1157~1190.
- Cellino, M., and Graf, W.H. (1999). "Sediment-laden flow in open-channels under noncapacity and capacity conditions." *J. Hydr. Eng.*, Vol. 125, No. 5, pp. 455~462.
- Chen, C.J., and Chen, H.C., (1982). *The Finite Analytic Method*. IHR Report No. 232-IV, The University of Iowa
- Coleman, N.L. (1981) "Velocity profiles with suspended sediment." *J. Hydr. Research*, Vol. 19, No. 3, pp. 211~229.
- Coleman, N.L. (1986). "Effects of suspended sediment on the open channel velocity distribution." *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 10, pp. 1377~1384.
- Einstein, H.A. (1950). *The bed-load function for sediment transportation in open channel flows*. Technical Bulletin No. 1026, Department of Agriculture, Washington,

D.C

- Einstein, H.A., and Chien, N. (1955). *Effects of heavy sediment concentration near the beds on velocity and sediment distribution*. MRD series No.8. U.S Army Eng. Division, Missouri River, Corps of Engineers Omaha, Nebraska.
- Engelund, F (1981). *Transport of bed load at high shear stress*. Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, ISVA, Technical University of Denmark, Progress Rep. 53, pp. 31~35.
- Galland, J.C, Laurence, D., and Teisson, C. (1997). "Simulating turbulent vertical exchange of mud with a Reynolds stress model." *4th Nearshore and Estuarine Cohesive Sediment Transport Conference*, pp. 439~448.
- Jobson, H.E., and Sayre, W.W. (1970). "Vertical transfer in open channel flow." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, 96(HY3), pp. 703~724.
- Karim, Md. F. (1981). *Computer-based predictors for sediment discharge and friction factor of alluvial streams*. Ph.D Thesis, University of Iowa.
- Kovacs, A.E. (1998). "Prandtl's mixing length concept modified for equilibrium sediment-laden flows." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 124, No. 8, pp. 803~812.
- Lyn, D.A (1988). "A similarity approach to open channel sediment-laden flows." *J. Fluid Mech.*, Vol. 193, pp. 1~26
- Muste, M., and Patel, V.C. (1998). "Velocity profiles for particles and liquid in open channel flow with suspended sediment." *J. Hydr. Eng.*, Vol. 123, No. 9, pp. 742~751.
- Patankar, S.V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation, pp. 113~137
- Rouse, H. (1937). "Modern conceptions of the mechanics of fluid turbulence." *Transactions, ASCE*, Vol. 102, No. 1965, pp. 463~543.
- Schlichting, H. (1979). *Boundary-layer theory*. 7th ed., McGraw-Hill, pp. 449~595.
- Umeyama, M., and Gerritsen, F. (1992). "Velocity distribution in uniform sediment-laden flows." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 118, No.2, pp. 229~245.
- van Rijn, L.C. (1984). "Sediment transport. Part II: Suspended load transport." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol 110, No. 11, pp 1613~1641.
- Wilcox, D.C. (1988) "Reassessment of the scale determining equation for advanced turbulence models." *AIAA Journal*, Vol 26, No. 11, pp. 1299~1310.
- Wilson, K.C. (1988). *Frictional behaviour of sheet flow*. Progress Rep. 67. Institute of Hydrodynamic and Hydraulic Engineering, Technical University of Denmark, pp. 11~22
- Yoon, J.Y., and Patel, V.C. (1996). "Numerical model of turbulent flow over sand dune." *J. Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 122, No. 1, pp. 10~17.
- Yoon, J.Y., Patel, V.C., and Ettema, R. (1996). "Numerical model of flow in ice-covered channel." *J Hydr. Eng.*, ASCE, Vol 122, No 1, pp.19~26.

(논문번호:00-004/집수:2000.01.22/심사완료:2000.06.22)