

영상해석 기법을 이용한 난류 흐름 중 침강속도의 측정

Fall Velocity Measurement in the Turbulent Flow Using Image Analysis Method

윤 상 훈* / 유 권 규** / 윤 병 만***

Yoon, Sang Hoon / Yu, Kwonkyu / Yoon, Byungman

Abstract

Fall velocities of sand particles in the turbulent flow are analyzed through measurements using PTV. PTV is believed to be the only instrument to measure the fall velocity in the turbulent flow, since it can trace the individual particle.

The method is verified by comparison with existing formula for still-water case. The experimental results show that the fall velocity in the turbulent flow decreases compared with that in still water, and decreases by 40% as the turbulent intensity normalized by the friction velocity increases upto 1.

keywords : PTV, fall velocity, turbulence intensity

요 지

본 연구에서는 난류 흐름 중에서 모래의 침강속도를 PTV를 이용하여 측정하였다. PTV는 영상해석기법을 이용하여 입자를 추적하는 방법으로 흐름 중의 침강속도를 측정할 수 있는 유일한 방법이라 판단된다.

실험은 흐름이 없는 경우와 흐름이 있는 경우로 나누어 실시하였다. 흐름이 없는 경우에 PTV로 측정한 침강속도를 기존문헌과 비교한 결과 잘 일치하여 기법의 타당성을 입증하였다. 흐름이 있는 경우에는 유속이 증가함에 따라 침강속도가 감소하는 것으로 밝혀졌다. 이는 유속이 증가함에 따라 난류강도가 증가하여 난류강도가 침강속도의 감소에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 난류강도와 침강속도의 관계를 분석한 결과 마찬가지로 무차원화된 침강속도는 정지유체중일때에 비해 약 40% 감소됨을 알 수 있었다.

핵심용어 : PTV, 침강속도, 난류강도

* 명지대학교 대학원 토목공학과 석사과정
Master student, Dept. of Civil Engrg., Myong Ji Univ., Yongin-si, 449-728, Korea
(E-mail : yun0830@hitel.net)

** The Univ. of Iowa 토목환경공학과 박사과정
Ph. D student, Iowa Institute of Hydraulic Research 300 S. Riverside Dr. Iowa City, IA 52242

*** 명지대학교 공과대학 SOC공학부 부교수
Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Myong Ji Univ., Yongin-si, 449-728, Korea

1. 서론

침강속도는 토사 이동량 산정, 침전지 설계 등에 있어 중요한 관련 인자가 되며, 특히 이동상 수치 모형에서 중요한 기초변수가 되므로 이를 구하기 위한 여러 연구가 수행되어왔다. 침강속도의 산정은 양해법을 이용한 이론전개로도 구할 수 있으나 침강체 주위에 흐르게 되는 수류의 입경 레이놀즈수가 1 이상이 되면 흐름은 난류로 변하게 되어 더 이상의 이론전개로 침강속도 산정식 개발이 곤란하게 된다. 일반적으로 이동상 수치모형에서는 정지유체에서의 침강속도값(Rubey, 1933; Rouse, 1937)을 사용하고 있으나, 난류 흐름 중에서는 침강속도가 정지유체인 경우가 다르다는 견해가 꾸준히 제기되어 왔다. Lhermitte(1962)와 Tang(1963)는 난류 흐름 중 유사입자의 침강속도가 정지유체에서보다 작은 값을 가지는 것을 밝혀낸 바 있고, Field와 Houghton(1968)은 수직으로 진동하는 유체에서의 침강속도가 상대적으로 작은 값을 가지며, 이는 입자의 마찰저항, 형상항력 등의 항력과 유체의 흐름유속간 비선형적 관계로부터 유래된다는 것을 이론적 해석 및 실험으로 증명해냈다. 그러나 이들의 실험은 실험장비의 제한 때문에 난류강도와 침강속도를 동시에 측정할 수 없어 이들의 관계를 도출하는 것이 매우 어려운 점이 있다. 따라서 흐름에 의한 입자의 침강속도의 영향을 파악하기 위해서는 이를 측정하기 위한 적절한 방법을 개발할 필요성이 있다. 흐름이 있는 경우에 침강속도를 측정하기 위해서는, 관측기구에 의한 흐름의 교란을 최소화하고, 입자의 침강에 영향을 미치지 않고도 입자추적이 가능한 PTV가 가장 적절한 방법 중의 하나라 할 수 있다.

본 연구에서는 난류가 유사의 침강속도에 어떠한 영

향을 미치는가를 밝히기 위하여 PTV를 이용, 정지 유체 및 흐름이 있는 경우의 침강속도와 흐름의 난류강도를 구하고 이에 따른 입자의 침강속도의 변화를 파악하였다.

2. PTV의 개요

최근 흐름 중에 추적입자를 투여한 후 적당한 조명을 가한 뒤에 카메라를 이용, 유동장을 촬영하여 유체 흐름에 대한 특성을 파악하는 가시화(visualization)기법이 많이 이용되고 있다. 이러한 영상데이터에는 유체의 유동현상을 규명하는데 유용한 정량적인 정보를 포함하고 있다. 따라서, 이러한 영상데이터를 적절히 처리하여 신뢰성있는 정보를 추출할 수 있다면 유체흐름에 대한 다양한 공학적인 문제를 해결하는데 많은 기여를 할 수 있을 것이다. 현재 이러한 영상기법을 이용하여 유체의 기본 물리량을 측정하기 위한 PIV(Particle Image Velocimetry)에 대한 연구와 응용이 활발히 진행되고 있다.

PIV는 속도벡터의 추출에 이용되는 입자의 종류가 개별입자인가 아니면 입자의 검사영역(interrogation area)내의 입자군인가의 여부에 따라 PTV(Particle Tracking Velocimetry)와 PIV로 구분할 수 있다. PTV는 영상을 이용한다는 면에서 넓은 의미의 PIV에 포함되기도 하지만 좁은 의미로는 개개의 입자를 추적한다는 의미에서 입자군의 움직임을 추적하는 PIV와 구별하기도 한다(Raffel 등, 1998). 본 연구에서는 입자 개개의 침강속도를 측정하는 것이 목적이므로 PTV 기법을 사용하였다.

2.1 PTV의 기본원리

PTV를 이용하여 유동장에 대한 영상을 획득하기

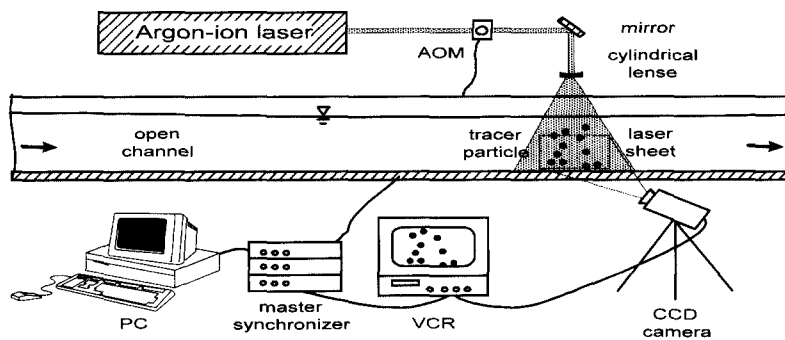


그림 1. PTV 실험 장치 개요

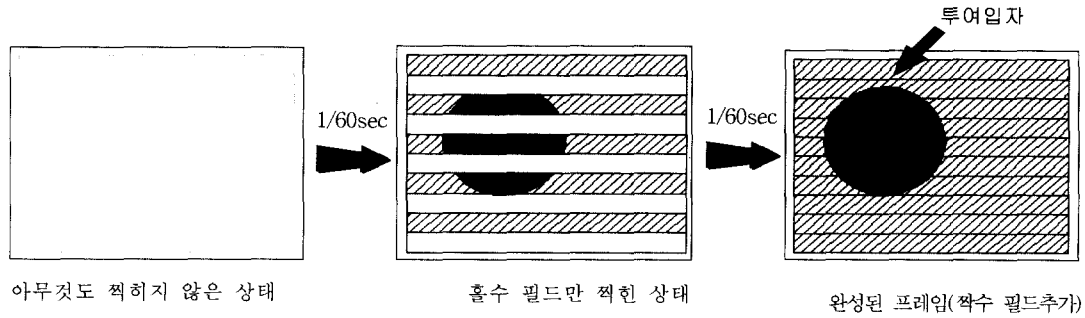


그림 2. 프레임의 구성

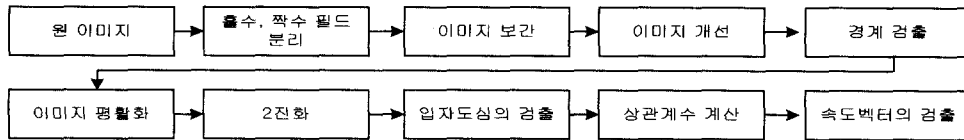


그림 3. PTV의 영상처리과정

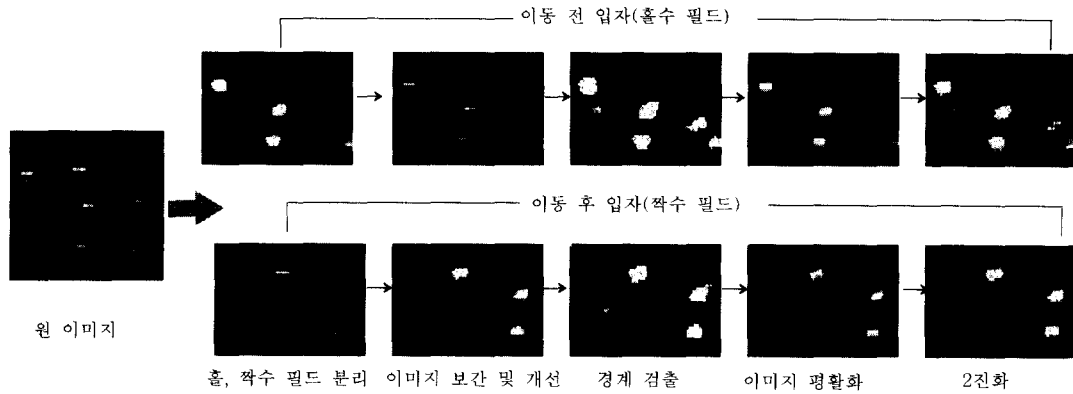


그림 4. 영상처리과정의 예

위한 개론적인 원리를 살펴보면 그림 1과 같다. 유체 중에 추적 입자(tracer particle)를 투입한 후 레이저 광선을 흐름 중에 비추면 입자가 레이저 광선을 반사한다. 이 반사된 빛을 비디오나 일반 카메라를 이용하여 촬영하여 두 영상 사이의 움직인 거리를 두 영상이 찍힌 사이의 시간으로 나누면 유속을 구할 수 있다. 이때 레이저 광선은 하나의 선이므로 이것을 실린더 렌즈를 이용하여 평면광(laser sheet)으로 바꾸어 주어야 한다. 또한 영상이 찍히는 시간을 조절하는 방법으로 기계적 또는 전기적인 셔터를 이용하여 레이저광의 노출시간을 조절한다.

2.2 영상획득 과정

영상은 1초당 30 프레임으로 이루어져 있으며 프레임은 다시 시간별로 홀수 필드(odd field), 짝수 필드(even field)가 합성되어 완성된다(그림 2 참조). PTV는 이러한 연속된 프레임에서의 입자의 미세한 움직임을 포착하여 입자의 궤적을 추적하는 기법이다.

레이저 광선은 AOM의 작용에 의해 n 번째 프레임의 홀수 필드와 짝수 필드에서 각 한 번씩 비추게 된다. 따라서 홀수 필드로 이루어진 이동전 입자와 짝수 필드로 이루어진 이동 후 입자간의 거리를 레이저 조사 시간간격으로 나누어 각 추적 입자의 유속을 구할 수

있다.

2.3 영상처리과정

촬영된 이미지는 640×480 픽셀 또는 512×512 픽셀의 크기로 디지털화된다. 디지털화된 이미지는 영상의 질을 개선하거나 특정한 목적에 알맞도록 변환시키기 위해 다음과 같은 영상처리 과정을 거쳐야 한다. 그림 3은 영상처리과정을 모식도로 나타낸 것이며, 그림 4는 각 단계의 영상처리를 거침에 따라 이미지가 변화하는 양상을 예시한 것이다.

표 2. 흐름유속 및 침강입자의 직경

case	투여입자 기하평균입경(mm)	흐름유속
F1	0.162	still water
	0.229	
	0.290	
F2	0.162	0.129m/s
	0.229	
	0.290	
F3	0.162	0.178m/s
	0.229	
	0.290	
F4	0.162	0.281m/s
	0.229	
	0.290	

(침강입자 : 모래(비중=2.65))

- (1) 원 이미지 : 촬영된 영상은 픽셀당 256단계의 밝기정보와 2차원의 위치정보를 갖는 파일로 변환된다. 홀수 필드에는 이동전 입자, 짝수 필드에는 이동 후 입자의 이미지가 기록되어 있다.
- (2) 홀수, 짝수 필드분리 : n프레임의 이동전·후입자가 담긴 영상을 속도벡터의 검출을 위해 분리한다.
- (3) 이미지 보간 및 개선 : 비월주사에 따른 공백을 보간하고 입자의 모양을 강조하고 선명하게 하기 위해 사용된다.
- (4) 경계 검출 : 입자를 나타내는 영역의 경계를 검출하여 입자의 윤곽을 뚜렷이 한다.
- (5) 이미지 평활화 : 위에 언급한 영상처리과정을 거치면서 거칠어진 입자를 부드럽게 하여 입자의 원래 형상에 가깝도록 표현하는 과정으로 입자

를 나타내는 픽셀값과 그 주변을 고려하여 극한값을 제거한다.

- (6) 영상의 2진화 : 입자는 흰색, 비입자는 검은색으로 처리하여 입자,비입자간 구분을 더욱 명확히 한다.

3. 실험

본 실험은 Univ. of Iowa IIHR 대형 수로에서 수행하였다. 실험에 이용된 수로는 길이 30m, 폭 0.91m, 수심 0.135m이며, 주어진 흐름유속 및 침강입자의 직경은 표 1에 나타내었다. 이용된 레이저는 Argonion 레이저이며 이용하는 주요 파장은 514nm와 488nm이고, 레이저의 강도는 최대 2W이다. 침강 입자의 거동을 녹화하기 위한 카메라는 Minton 사의 CCD 카메라이며 녹화기는 SONY 사의 EVO-9650 이다.

4. 결과 및 분석

4.1 영상의 분석 및 침강속도 산출

PTV의 유속산정원리를 이용하여 침강입자의 궤적을 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5는 1/60초 동안 이동한 입자의 궤적을 나타내고 있다.



그림 5. 입자의 순간침강속도 벡터도(F4)

그림 5에서 나타낸 영상에서의 속도벡터 추출을 바탕으로 입자의 침강속도를 산출하여 보았다(표 2). 먼저 PTV를 이용, 정지유체에서의 침강속도를 구하여 기존문헌(Rubey, 1933; Rouse, 1937)과 비교하여 기법의 적정성을 검토하였다.

정지유체시 본 실험에 의한 침강속도는 기존문헌에 의한 침강속도와 오차범위 1.01~5.71%로 잘 일치함을 알 수 있었다.

표 2. 침강속도 측정결과

Case	투입자 기하평균입경(mm)	기존문헌에 의한 침강속도		본 연구의 측정결과	w/w0
		Rubey	Rouse		
F1	0.162	0.0188	0.017	0.0172	1.00
	0.229	0.0299	0.028	0.0296	1.00
	0.290	0.0389	0.039	0.0399	1.00
F2	0.162	×		0.0172	1.00
	0.229	×		0.0232	0.78
	0.290	×		0.0355	0.89
F3	0.162	×		0.0147	0.85
	0.229	×		0.0244	0.82
	0.290	×		0.0304	0.76
F4	0.162	×		0.0137	0.80
	0.229	×		0.0224	0.76
	0.290	×		0.0312	0.78

w/w0 : 정지유체시의 침강속도에 대한 침강속도의 비

표 3. 기존연구결과와의 비교(난류 흐름 중)

Author	실험입자	$\frac{w_0 D}{\nu}$	Results (w/w0)
Lhermitte	Plastic spheres, $\gamma=1.45$, $D=0.19\sim1.38\text{mm}$	2~140	0.72
Fan et al.	Plastic spheres	33~171	≈ 1
Tang	Mixture Spheres of talcum & tung oil $\gamma = 1.56\sim1.61$, $D=2.88\sim9.15\text{mm}$	555~3350	0.72~0.80
본 연구	Quartz spheres, $\gamma=2.65$, $D=0.149\sim0.350\text{mm}$	2.5~14.0	0.76~0.89

한편 흐름유속이 주어진 경우, 유속이 증가할수록 침강속도는 감소하는 경향을 나타냈으며, 각 입자마다의 침강속도의 분포도 다양화되는 것으로 나타났다. Lhermitte(1962)와 Tang(1963)은 흐름이 있는 경우, 정지유체시의 침강속도에 대한 비 w/w0를 약 0.72 ~0.80의 값으로 규정한 바 있다(표 3). 본 실험에서는 실험의 신뢰성에 의심이 가는 한가지 경우(F2- 0.162mm)를 제외하면, 흐름유속에 따라 w/w0가 0.76~0.89의 범위에 분포하고 있다.

4.2 난류강도 산정

흐름이 있는 경우의 침강속도 산정시, 먼저 PTV 기법의 적용성을 검증하기 위하여 식 (2)에 나타낸 기존의 난류강도(Nakagawa, 1975)값과 비교하여 보았다.

$$\sqrt{v'^2}/U_* = 1.27 \exp(-y/h) \quad (2)$$

여기서 v' = 연직방향 변동성분, U_* = 마찰속도를 가리킨다.

그림 6은 수심방향의 난류강도를 나타내고 있다. 실선은 식(2)에 의한 난류강도를, 점선은 본 실험에서 구한 각각의 흐름조건에 대한 값을 나타낸다. 난류강도 산정시에는 비중 1.0에 가까운 추적입자(flow tracer)를 투입하여 물의 움직임을 반영하도록 하였다.

난류강도를 산정을 위해, 평균 유속 분포를 이용하여 마찰 속도를 산정하였다. 마찰 속도는 velocity defect law를 이용하였으며 관계식은 식(3)과 같다.

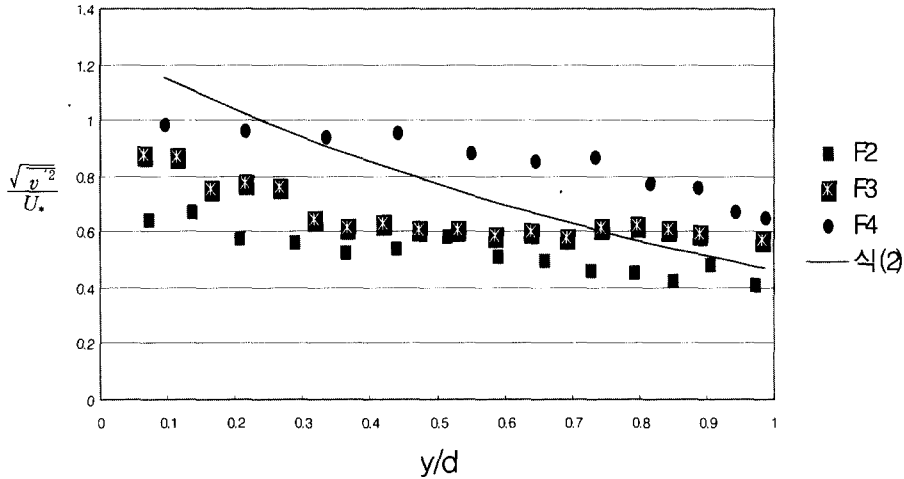


그림 6. 기존 문헌과의 난류강도 비교(수심방향)

$$\frac{u - u_{\max}}{u_*} = \frac{1}{x} \ln\left(\frac{y}{h}\right) \quad (x = 0.41) \quad (3)$$

이 관계에서 구한 마찰 속도는 흐름조건 F2, F3, F4에 대해 각각 0.009, 0.017, 0.029m/s 와 같다. PTV를 적용하여 측정된 난류강도는 기존 실험식과 정확히 일치하지는 않지만 비슷한 분포를 갖는 것으로 나타났다.

4.3 난류강도 - 침강속도 관계분석

3가지의 흐름유속조건(F2, F3, F4)에 3종류의 입경을 투여하여 난류강도와 입자의 침강속도를 무차원화하여 난류 강도와 침강속도 관계를 분석하였다(그림7). 그림 7(a)는 난류강도와 침강속도를, (b)는 침강속도를 정지유체시의 침강속도로 나누어 무차원수로 표시한 것이다. 그림7(a)를 보면 각 입자 공히 난류강도가 증가

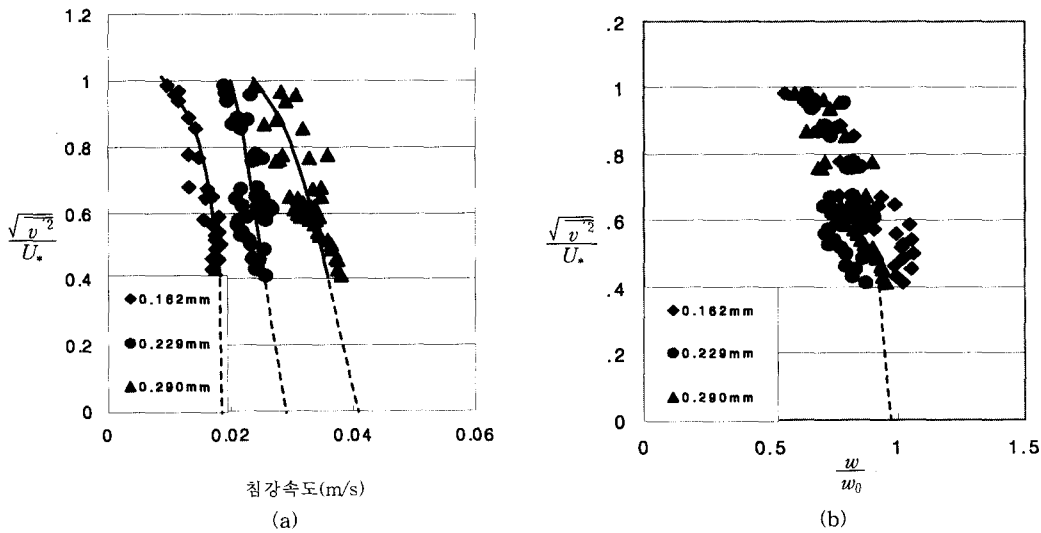


그림 7. 난류강도 - 침강속도 Relation

함에 따라 침강속도가 감소함을 알 수 있다. 또한, 난류 강도가 작아질수록 입자의 침강속도는 해당입자의 정지 유체시 침강속도에 가까워짐을 발견할 수 있다. 난류강도에 따른 침강속도비의 변화는 그림 7(b)에서 알 수 있듯이 무차원 난류강도가 0.4에서 1로 증가함에 따라 침강속도비는 0.9에서 0.6으로 감소되었다. 또한, 본 연구의 범위내에서는 난류 강도가 커짐에 따라 침강속도의 감소율이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 본 연구의 결과만 가지고 난류강도와 침강속도의 관계식을 제시하기에는 다소 무리가 따른다고 판단되므로 본 논문에서는 관계식을 제시하지는 않았다. 관계식을 제시하기 위해서는 좀 더 다양한 경우에 대한 정밀한 실험이 이루어진 후에 가능하리라 판단된다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 영상해석 기법의 일종인 PTV를 이용하여 흐름이 있는 경우의 침강속도를 측정하여 이를 검증하고, 난류강도가 침강속도에 끼치는 영향을 살펴 보았다. 본 실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) Lhermitte 등이 규정한 바와 같이 난류흐름 중 입자의 침강속도가 정지유체시와 비교하여, 11 ~ 24 % 감소됨을 확인하였다.
- 2) 난류강도와 침강속도는 서로 영향을 주어, 난류강도가 증가할수록 입자의 침강속도는 감소함을 알 수 있었다. 본 실험의 결과에 따르면, 난류강도값이 0.4에서 1로 증가하는 동안, 입자의 침강속도비 w/w_0 는 0.9내외에서 0.6내외로 감소하였다.
- 3) 향후, 흐름유속, 투여입자입경, 해당유체의 점성 및 밀도를 다양화한 실험을 실시하면, 침강속도에 대한 난류의 영향 규명을 더욱 명확히 할 수 있으리라 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부가 주관하는 2000년 환경기술연구 개발사업의 '해양생태계 수치모델화에 관한 연구'의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- Chien, N and Wan, Z. (1998). *Mechanics of Sediment Transport*, ASCE Press.
- Field, W. G. (1968). *Effects of Density Ratio on Sedimentary Similitude*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 94, No. HY3, Proc. Paper 5948, pp. 705-719.
- Houghton, G. (1968). *Particle Retardation in Vertically Oscillating Fluids*, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 46, No. 2, pp. 79-81.
- Lhermitte, P. (1962). *Influence de la Turbulence sur la Vitesse de Chute des Particules Solides dans les Fluides Pesants*, Annales des Ponts et Chaussees, Vol. 132, No. 3, pp. 245-273.
- Nezu, I., and Nakagawa, H. (1993). *Turbulence in Open-Channel Flows*, A.A.Balkema, Rotterdam.
- Raffel, M, Millert, C. and Kompenhans, J. (1998). *Particle Image Velocimetry, A Practical Guide*, Springer-Verlag.
- 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, 1936-37, National Research Council, Washington, D.C., pp. 57-64
- Rubey, W. W. (1933). *Settling Velocities of Gravel, Sand and Slit Particles*, American J. of Science, 5th series, vol. 25, no. 148.
- Tang, Y. (1963). *Study on settling of sediment particles in flow*, Shaangxi Industry University.
- Vanoni, V. A. (1975). *Sedimentation Engineering*, ASCE Manual.

(논문번호:01-070/접수:2001.10.10/심사완료:2001.12.06)