

조립입자 침강속도에 대한 실험적 관찰 및 비교분석

Experimental Observation of the Settling Velocity of Coarse Particles and Comparative Analysis

손 무 락[†] · 장 병 식¹⁾

Moorak Son · Byungsik Jang

Received: August 7th, 2015; Revised: August 17th, 2015; Accepted: September 14th, 2015

ABSTRACT : This study conducted experimental observations of the settling velocity of a coarse particle in water varying material type and particle size and compared the results with preexisting empirical equations. Three types of materials, which are polyacetal, glass and steel, were used in this study and the diameter of particle ranged from 1 mm to 20 mm. Experiment results showed that the settling velocity of coarse particle had a significant difference from Stokes equation which is known applicable for a fine particle smaller than 50 μm . In addition, the observed particle velocity showed a significant difference when compared with other empirical equations, which was proposed for estimating the settling velocity of a particle regardless of particle size, depending on the material type and particle size. The results from experimental observations indicated that the settling velocity of a coarse particle was relatively in smaller difference to other empirical equations for the particle size smaller than 3 mm, but as the size increased the difference in the settling velocity also increased. This study clearly showed that the settling velocity of a coarse particle velocity can be significantly different depending on particle size and density and the empirical equations may not reliably estimate the settling velocity of a coarse particle so that they should not be used as it is and a verification of them is necessarily before any use. The study results would provide a useful information for a better understanding of settling velocity of a particle in water.

Keywords : Coarse particle settling velocity, Particle size, Material type, Experimental observation, Empirical equation

요 지 : 본 논문에서는 물속에서의 조립입자 침강속도에 대한 특성을 파악하기 위해 다양한 재료 및 입자크기에 대한 실험적 관찰을 수행하고 그 결과들을 재료별로 비교함과 더불어 기존에 발표된 입자침강속도 예측을 위한 경험식들과 상호비교하였다. 본 연구에서는 폴리아세탈, 유리 및 스틸의 세 가지 서로 다른 재료 및 크기로 구성된 구모양의 입자를 이용하였으며, 입자의 직경은 1mm에서 20mm까지 다양한 직경을 고려하였다. 실험결과, 조립입자의 침강속도는 아주 작은 크기(약 50 μm 이하)의 입자에만 적용된다고 알려진 Stokes 식과는 상당한 차이를 나타냈으며, 또한 입자의 크기에 관계없이 침강속도를 예측하는 다른 연구자들의 경험식들과도 입자의 크기 및 재료의 종류(밀도)에 따라 서로 상이한 결과를 나타냈다. 실험에서 관찰된 조립입자의 침강속도는 재료의 종류에 관계없이 입자의 크기가 상대적으로 작을 때는(약 3mm 이하) 기존의 입자 침강속도에 대한 경험식들과 유사하였으나 그 이상에서는 입자의 크기가 증가할수록 기존 경험식들과의 차이도 더 크게 발생하였다. 본 연구를 통해서 조립입자의 침강속도는 입자의 크기 및 재료밀도에 따라 상당한 차이가 발생할 수 있다는 것을 알았으며 기존 경험식들은 실제로 발생하는 조립입자의 침강속도를 잘 예측하지 못해 향후 조립입자의 침강속도를 예측하기 위해 기존 경험식들을 있는 그대로 적용하지는 말아야 하고 실험 등을 통해 검증 및 확인하는 과정이 반드시 필요하다는 것을 파악하였다. 본 연구결과는 향후 물속에서의 조립입자의 침강속도를 이해하는 데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 조립입자 침강속도, 입자크기, 재료종류, 실험적 관찰, 경험식

1. 서 론

강이나 바다, 하천 또는 저수지 등의 물속에서의 흙 입자의 침전과정은 흙의 퇴적환경 및 퇴적 흙의 물성치에 큰 영향을 미치게 된다. 가령 국내 기후환경에서 여름철에는 일반적으로 물결이 크게 일어나 큰 입자의 흙은 침전이 가능하나 작은 입자의 흙은 침전을 하지 못하고 부유한 상태로

남아 있다가 가을 또는 겨울로 접어들어 물결이 잔잔해지면 침전이 일어나기 시작한다. 이와 같은 이유로 강이나 호수에 침전된 흙 입자의 퇴적은 계절적 변화의 뚜렷한 영향을 나타내며 서로 다른 크기의 입자가 교대로 출현하게 되는 원인이 된다. 이와 같이 퇴적된 흙은 수평 또는 수직방향에서의 투수계수가 상당한 차이를 나타낼 수 있으며 또한 퇴적환경에 따라 흙의 간극비 등이 상당한 차이를 나타낼

[†] Department of Civil Engineering, Daegu University (Corresponding Author : mson@daegu.ac.kr)

¹⁾ Department of Civil Engineering, Daegu University

수 있다. 따라서 물속에서의 흙의 침전과정을 이해하는 것은 흙의 퇴적환경 및 흙의 물성치를 이해하고 더 나아가 기초지반의 공학적 거동을 이해하는 데 중요한 단서를 제공할 수 있다.

물속에서의 흙의 침전은 물의 환경조건 및 흙 입자의 조건, 외부환경 조건 등에서 큰 영향을 받는데 물의 환경조건으로는 물의 흐름 속도, 물의 온도, 염분농도 등이 있을 수 있으며 흙 입자의 조건으로서는 흙 입자의 크기, 흙 입자의 밀도, 흙 입자의 형상 등이 영향을 미칠 수 있다. 외부환경으로서는 비나 바람 등의 영향을 들 수 있다. 다시 말해서 물속에서의 흙의 침전과정은 다양한 요소에 의해서 영향을 받고 이로 인해 침전과정을 예측하는 것은 매우 복잡하고 난해하다. 그럼에도 불구하고 많은 연구자들이 흙의 침전과정을 파악하기 위해서 노력하였으며 이에 대한 초기연구로는 Stokes(1851), Ladenburg(1907), Oseen(1910), Goldstein(1929), Rubey(1933), Rouse(1936), Krumbein & Pettijohn(1938) 등이 있다. 이후에도 물속에서의 흙의 침전과 관련한 다양한 연구가 계속되었으며(Janke, 1965; Gibbs et al., 1971; Dietrich, 1982; Cheng, 1997; Ahrens, 2000; Ferguson & Church, 2004; Wu & Wang, 2006 등), 그중 많은 연구가 흙 입자의 크기에 따른 침강속도를 예측하는데 그 중심을 두고 있다. 국내에서도 Kim(2007)이 부유된 미립입자의 침강에 대해서 연구한 바 있고, Hwang et al.(2008)이 고령토 퇴적물의 침강에 대한 염도의 영향을 조사한 바 있다. 또한 Kim et al.(2009)은 입자의 응집에 따른 침강특성을 조사하는 등 다양한 입자침강에 대한 연구가 수행되었다.

다양한 국내·외 연구 중에서도 Gibbs et al.(1971)은 Stokes 법칙이 적용(약 50 μ m 이하 크기의 입자에만 적용)되지 못하는 보다 큰 크기의 입자에 대한 침강속도를 파악하기 위한 연구를 수행하였다. 그들의 연구는 입자의 크기 및 물의 온도 등을 변화시키면서 입자의 침강속도를 관찰하였으며 관련 실험결과를 토대로 하나의 경험식을 아래와 같이 제안하였으며 입자의 크기가 6mm 이하에 대해서 제한한다고 명시하였다. 또한 실험결과 물의 온도가 5°C에서 30°C 사이에서는 입자의 침강속도가 물의 온도에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

$$V = \frac{-3\eta + \sqrt{9\eta^2 + gr^2 P_f (P_s - P_f)(0.015476 + 0.19841r)}}{P_f(0.011607 + 0.14881r)} \quad (1)$$

Where, V = settling velocity in cm/sec
 η = dynamic viscosity of fluid in poises
 g = acceleration of gravity(cm/sec²)
 r = sphere radius in cm

P_f = density of fluid in g/cm³

P_s = density of sphere in g/cm³

한편 Furgerson & Church(2004)도 물속에서의 입자 침강 속도에 대한 연구결과를 발표하였으며 조립입자를 포함하면서 입자크기에 무관한 입자 침강속도를 예측하는 하나의 식을 Eq. (2)와 같이 제시하였다.

$$V = \frac{RgD^2}{C_1\nu + (0.75C_2RgD^3)^{0.5}} \quad (2)$$

Where, V = settling velocity
 R = submerged specific gravity
 g = acceleration of gravity
 D = particle diameter
 C_1 = constant(18 for smooth spheres)
 C_2 = constant(0.4 for smooth spheres)
 ν = kinematic viscosity of fluid

Wu & Wang(2006)도 다양한 자료를 활용하여 조립입자를 포함하면서 입자크기에 무관한 입자 침강속도 예측에 관한 식을 Eq. (3)과 같이 제시하였다.

$$V = \frac{M\nu}{Nd} \left[\sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{4N}{3M^2} D_*^3 \right)^{\frac{1}{n}} - \frac{1}{2}} \right]^n \quad (3)$$

Where, V = settling velocity
 $M = 53.5e^{-0.65sf}$, $N = 5.65e^{-2.5sf}$, $n = 0.7 + 0.9S_f$
 S_f = Corey shape factor(1.0 for spheres)
 $D_* = d[(\rho_s/\rho - 1)g/\nu^2]^{1/3}$
 d = nominal diameter of particle
 ρ_s = particle density, ρ = water density
 g = gravitational acceleration

본 연구에서는 상대적으로 입자크기가 큰 조립입자를 대상으로 다양한 재료 및 입자크기를 고려한 실험적 관찰을 수행하고 그 결과를 제시하여 관련 분야의 연구에서 활용할 수 있도록 하고자 하였다. 또한 실험결과를 기존에 발표된 경험식들과 상호비교함으로써 기존 경험식들에 의한 입자의 침강속도 예측의 신뢰성을 파악하고자 하였다. 더 나아가 서로 다른 입자크기 및 밀도를 가진 조립입자의 침강속도에 대한 특성을 파악하고자 하였다. 본 연구의 결과는 향후 물속에서의 조립입자의 침강속도를 이해하는 데 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 1. Materials and particle sizes used in this study

Material type	Diameter, mm	Density, g/cm ³
Polyacetal	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 16, 18	1.41
Glass	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 18	2.56
Steel	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	7.86

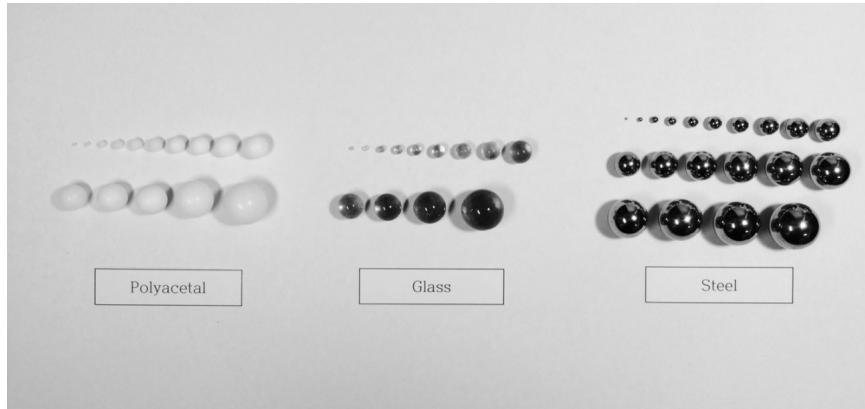


Fig. 1. Various materials and particle sizes

2. 실험방법 및 분석

본 연구에서는 상대적으로 입자크기가 큰 조립입자를 대상으로 다양한 재료 및 입자크기를 고려한 물속에서의 침강 속도에 대한 실험적 관찰을 수행하였다. 본 연구를 위해서 폴리아세탈, 유리 및 스틸의 세 가지 서로 다른 재료로 구성된 구모양의 입자를 이용하였으며, 입자의 직경은 1mm에서 20mm까지 다양한 직경을 고려하였다(Table 1 & Fig. 1).

서로 다른 재료 및 크기로 구성된 조립입자의 물속에서의 침강속도를 파악하기 위하여 먼저 5cm 직경의 투명실린더에 물을 채워 실험을 준비하고 물의 온도(25.3°C)를 측정하였다. 그런 다음 재료 및 입자크기별로 침강속도를 조사하였다. 입자는 물의 표면에서의 표면장력의 영향 때문에 표면 바로 아래에서 핀셋을 이용하여 자유낙하 하도록 하였으며(Fig. 2), 입자의 총 침강깊이는 입자의 최저부에서 30cm가 되도록 하였다.

물속을 통한 조립입자의 침강 과정은 고속카메라를 이용하여 촬영하였으며(Fig. 3) 촬영 후 분석프로그램을 통해 입자의 침강속도를 파악하였다.

3. 실험결과 및 비교

Fig. 4는 다양한 크기 및 재료를 이용한 조립입자의 침강 속도 실험결과를 재료 및 입자크기별로 정리한 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 폴리아세탈구슬의 밀

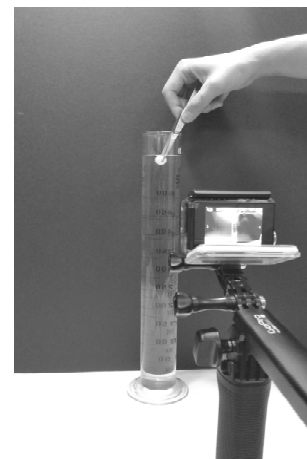
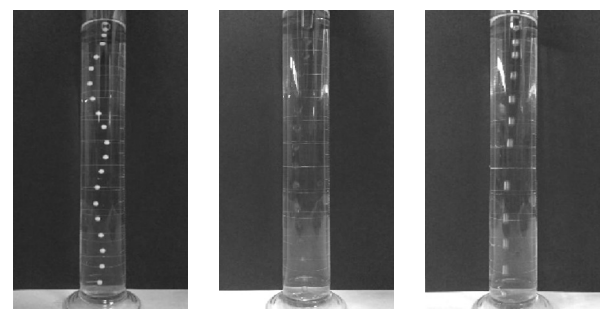


Fig. 2. Test preparation for measuring particle settling velocity



(a) Polyacetal (b) Glass (c) Steel

Fig. 3. Recording settling process of a particle with high speed camera

도가 가장 작아 침강속도가 가장 느리게 나타났으며 스틸구슬의 밀도가 가장 커 침강속도가 가장 크게 나타났다. 실험에 사용된 폴리아세탈구슬(밀도=1.41g/cm³)보다는 유리구슬

(밀도=2.561.41g/cm³)의 밀도가 약 1.82배 정도 더 컸으며, 폴리아세탈구슬보다 스틸구슬(밀도=7.86g/cm³)의 밀도가 약 5.57배 정도, 유리구슬보다는 스틸구슬의 밀도가 약 3.07배 정도 더 크게 측정되었음에도 불구하고 재료별 침강속도는 입자의 크기가 2mm에서 18mm 범위 내에서 유리구슬이 폴리아세탈구슬보다 2~2.4 정도 더 크게 발생했고, 스틸구슬은 폴리아세탈구슬보다 침강속도가 약 3.7~4.6 정도 더 크게 발생했으며, 스틸구슬이 유리구슬보다 침강속도가 약 1.8~2배 정도 더 크게 발생했다(Fig. 5). 이와 같은 결과로부터 재료의 밀도비에 따른 침강속도의 비는 선형적인 비례관계를 형성하지 않는다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과를 발생시킨 이유에는 재료표면의 미세적인 구조 차이도 있겠지만 물속에서의 재료별 침강력에 대한 항력(drag force)의 복잡한 관계, 사용한 유리관의 직경 및 길이와 관련된 경계 조건 등에 더 기인한 것으로 판단된다. 따라서 향후 이와 같은 조건들을 반영한 침강속도 발생특성에 대한 추가연구가 더 필요할 것으로 판단된다. 또한 폴리아세탈구슬의 경우 직경이 1mm에서는 침강속도가 매우 느려 유리구슬이나 스틸구슬과의 속도비가 각각 13.9 및 19.1로 나타났다. 이와 더불어 스틸구슬의 경우 직경이 18mm 이상에서 침강속도가 급격하게 증가하는 특징이 나타났으며 이는 침강하는 입자에 선행해 난류조건이 형성되었기 때문인 것으로 판

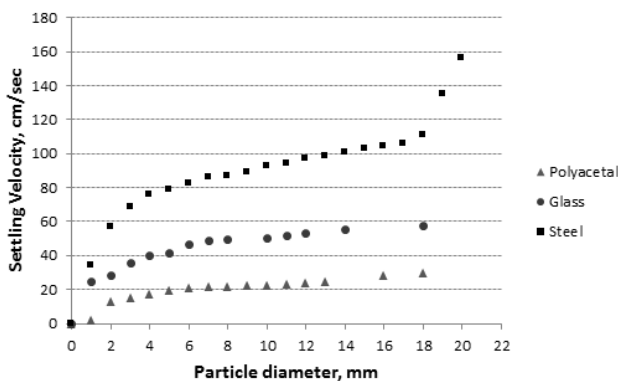


Fig. 4. Experimental results of settling velocity

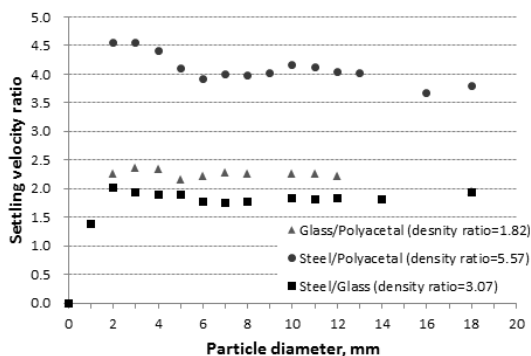


Fig. 5. Settling velocity ratio under varying particle diameter

단된다.

Fig. 6은 폴리아세탈구슬에 대한 실험결과와 기존의 Stokes (1851) 식 및 다른 경험식들을 이용한 예측결과들을 상호 비교하고 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 조립입자의 침강속도는 작은 크기(약 50 μ m 이하)의 입자에만 적용된다고 알려진 Stokes (1851) 식과는 상당한 차이를 나타냈으며, 실험에서 관찰된 조립입자의 침강속도는 입자의 크기가 상대적으로 작을 때(약 3mm 이하)에는 기존의 경험식들과 비교하여 그 차이가 작게 나타났으나 입자의 크기가 증가할수록 기존 경험식들과의 차이도 더 크게 발생하는 경향을 나타냈다. Gibbs et al. (1971)의 식은 입자의 크기를 6mm 이하로 제한한다고 하였지만 약 3mm 이상의 입자부터 실측치와 차이가 발생한다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 측정한 폴리아세탈구슬에 대한 실험값과 경험식들에 의한 침강속도 예측치를 비교해 보면 입자의 크기가 6mm 일 때 Gibbs et al.(1971)의 식은 약 38%, Furgerson & Church(2004)의 식은 약 31%, Wu & Wang(2006)의 식은 약 15% 정도 더 크게 침강속도를 예측하는 것으로 나타났다. 입자의 크기가 증가하여 18mm 일 때는 Furgerson & Church(2004)의 식은 약 66%, Wu & Wang (2006)의 식은 약 51% 정도 더 크게 침강속도를 예측하는 것으로 나타났다. 기존의 경험식들 중 Wu & Wang(2006)의 식이 입자의 크기가 증가함에 비록 실험값과는 큰 차이가 발생하였지만 다른 경험식들과 비교하여 침강속도를 상대적으로 더 잘 예측하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 유리구슬에 대한 실험결과와 기존의 Stokes(1851) 식 및 다른 경험식들을 이용한 예측결과들을 상호 비교하고 있다.

앞에서와 마찬가지로 입자의 침강속도는 작은 크기(약 50 μ m 이하)의 입자에만 적용된다고 알려진 Stokes(1851) 식과는 상당한 차이를 나타냈으며, 실험에서 관찰된 조립입자의 침강속도는 입자의 크기가 상대적으로 작을 때(약 4mm 이하)

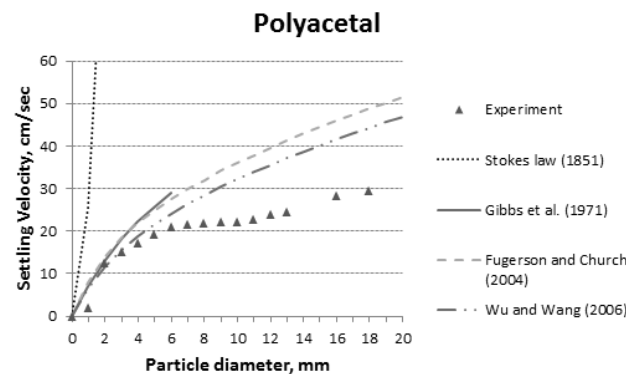


Fig. 6. Comparison of experimental results to preexisting methods (Polyacetal)

에는 기존의 경험식들과 비교하여 그 차이가 작게 나타났으나 입자의 크기가 증가할수록 기존 경험식들과의 차이도 더 크게 발생하는 경향을 나타냈다. 앞에서와 마찬가지로 Gibbs et al.(1971)의 식은 입자의 크기를 6mm 이하로 제한한다고 하였지만 약 4mm 이상의 입자부터 실측치와 차이가 발생한다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 측정한 유리구슬에 대한 실험값과 경험식들에 의한 침강속도 예측치를 비교해 보면 입자의 크기가 6mm 일 때 Gibbs et al.(1971)의 식은 약 22%, Furgerson & Church(2004)의 식은 약 17%, Wu & Wang(2006)의 식은 약 4% 정도 더 크게 침강속도를 예측하는 것으로 나타났다. 입자의 크기가 증가하여 18mm 일 때는 Furgerson & Church(2004)의 식은 약 66%, Wu & Wang(2006)의 식은 약 52% 정도 더 크게 침강속도를 예측하는 것으로 나타났다. 폴리아세탈구슬에서와 마찬가지로 기존의 경험식들 중 Wu & Wang(2006)의 식이 입자의 크기가 증가함에 비록 실험값과는 큰 차이가 발생하였지만 다른 경험식들과 비교하여 침강속도를 상대적으로 더 잘 예측하는 것으로 나타났다.

Fig. 8은 스틸구슬에 대한 실험결과와 기존의 Stokes(1851) 식 및 다른 경험식들을 이용한 예측결과들을 상호 비교하고 있다.

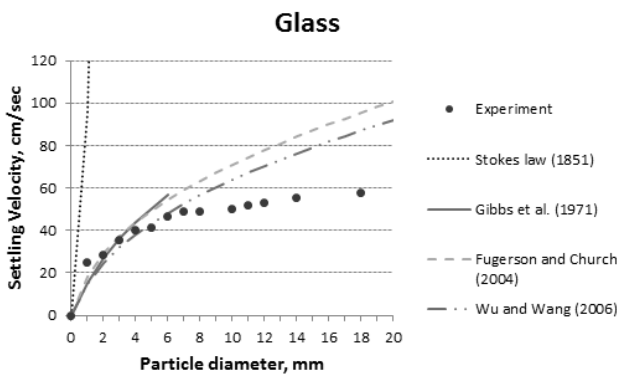


Fig. 7. Comparison of experimental results to preexisting methods (Glass)

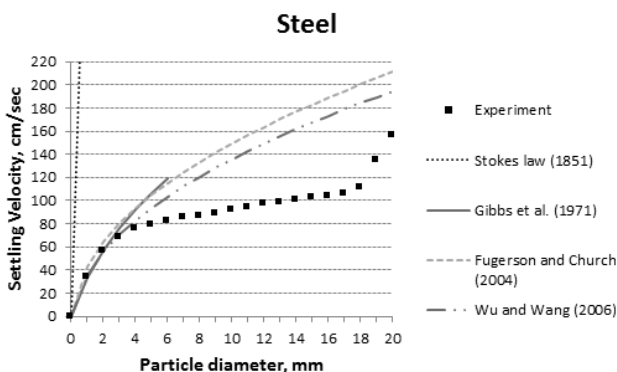


Fig. 8. Comparison of experimental results to preexisting methods (Steel)

Fig. 8에서 보는 바와 같이 입자의 침강속도는 앞에서와 마찬가지로 Stokes(1851) 식과는 상당한 차이를 나타냈으며, 실험에서 관찰된 입자의 침강속도는 입자의 크기가 작을 때 (약 3mm 이하)에는 기존의 경험식들과 비교하여 큰 차이가 없었으나 입자의 크기가 일정크기(약 18mm)까지 증가할수록 기존 경험식들과의 차이도 더 증가하는 경향을 나타냈다. 하지만 입자의 크기가 18mm보다 더 크게 되면 입자의 침강속도는 기존의 경험식들에 다시 근접하는 경향을 나타냈다. 본 연구에서 측정한 스틸구슬에 대한 실험값과 경험식들에 의한 침강속도 예측치를 비교해 보면 입자의 크기가 6mm 일 때 Gibbs et al.(1971)의 식은 약 45%, Furgerson & Church(2004)의 식은 약 40%, Wu & Wang(2006)의 식은 약 26% 정도 더 크게 침강속도를 예측하는 것으로 나타났다. 입자의 크기가 증가하여 18mm 일 때는 Furgerson & Church(2004)의 식은 약 81%, Wu & Wang(2006)의 식은 약 66% 정도 더 크게 침강속도를 예측하는 것으로 나타났다. 앞의 다른 재료의 경우에서와 마찬가지로 기존의 경험식들 중 Wu & Wang(2006)의 식이 입자의 크기가 증가함에 비록 실험값과는 큰 차이가 발생하였지만 다른 경험식들과 비교하여 침강속도를 상대적으로 더 잘 예측하는 것으로 나타났다.

본 연구를 통해 조립입자의 침강속도는 입자의 크기뿐만 아니라 재료특징에도 크게 영향을 받는다는 것을 파악하였으며, 또한 조립입자의 침강속도는 재료의 밀도에 선형적으로 비례하지 않는다는 것을 파악하였다. 뿐만 아니라, 조립입자의 침강속도를 예측하는 다른 선행연구자들의 경험식들과의 비교로부터 기존 경험식들(입자의 크기에 무관하게 침강속도를 예측하는 식들 포함)은 실제로 발생하는 침강속도와는 입자의 크기 및 밀도에 따라 상당한 차이가 발생할 수 있다는 것을 알았다. 따라서 향후 조립입자의 침강속도를 예측하기 위해 본 연구에서 조사된 기존 경험식들뿐만 아니라 다른 경험식들도 있는 그대로 적용하지는 말아야 하고 실험 등을 통해 검증 및 확인하는 과정이 반드시 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 조립입자의 크기(1mm~20mm 직경) 및 재료밀도(1.41g/cm³~7.86g/cm³)에 따른 물속에서의 조립입자 침강속도를 실험을 통해 관찰하였으며 그 결과를 기존의 Stokes(1851) 식 및 그 외 침강속도를 예측하는 몇 가지 방법들과 상호비교하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험에 사용된 폴리아세탈구슬 보다는 유리구슬의 밀도

가 약 1.82배 정도, 폴리아세탈구슬보다 스틸구슬의 밀도가 약 5.57배 정도, 유리구슬보다는 스틸구슬의 밀도가 약 3.07배 정도 더 크게 측정되었음에도 불구하고 재료별 침강속도는 입자의 크기가 2mm에서 18mm 범위 내에서 유리구슬이 폴리아세탈구슬보다 2~2.4 정도 더 크게 발생했고, 스틸구슬은 폴리아세탈구슬보다 침강속도가 약 3.7~4.6 정도 더 크게 발생했으며, 스틸구슬이 유리구슬보다 침강속도가 약 1.8~2배 정도 더 크게 발생했다. 이와 같은 결과로부터 재료의 밀도비에 따른 침강속도의 비는 선형적인 비례관계를 형성하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

- (2) 조립입자의 침강속도는 아주 작은 크기(약 50 μ m 이하)의 입자에만 적용된다고 알려진 Stokes(1851) 식과는 상당한 차이를 나타내 조립입자의 침강속도 예측을 위해 Stokes(1851) 식은 적절하지 않다는 것을 다시 한 번 확인하였으며, 실험에서 관찰된 조립입자의 침강속도는 입자의 크기가 작을 때(약 3mm 이하)에는 조립입자를 포함하는 기존의 경험식들에 의한 예측과 비교하여 유사하였으나 입자의 크기가 증가할수록 기존 경험식들에 의한 예측과의 차이도 더 크게 발생하는 경향을 나타냈다.
- (3) 본 연구에서 조사된 기존의 조립입자를 포함하는 침강속도 예측 경험식들 중 Wu & Wang(2006)의 식이 입자의 크기가 증가함에 비록 다른 경험식들과 마찬가지로 실험값과는 큰 차이가 발생하였지만 다른 경험식들에 비해 침강속도를 상대적으로 더 잘 예측하는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서 조사된 침강속도를 예측하는 기존 경험식들에 의한 예측 침강속도는 실제로 발생하는 조립입자의 침강속도와는 입자의 크기 및 재료밀도에 따라 상당한 차이가 발생할 수 있다는 것을 알았다. 따라서 향후 조립입자의 침강속도를 파악하기 위해서 본 연구에서 조사된 기존 경험식들(입자의 크기에 무관하게 침강속도를 예측하는 식들)뿐만 아니라 다른 경험식들도 그대로 적용하지는 말아야 하고 실험 등을 통해 검증 및 확인하는 과정이 반드시 필요할 것으로 나타났다.
- (5) 향후 조립입자의 침강속도에 대한 보다 신뢰성 있는 예측식을 제시하기 위해서 입자의 침강속도에 대한 재료 표면의 미세적인 구조 차이, 밀도에 따른 물속에서의 침강력에 대한 항력(drag force)의 관계, 사용한 유리관의 직경 및 길이와 관련된 경계조건 등에 대한 추가연구가 더 필요할 것으로 나타났다. 또한 침강하는 입자에 선형해 발생하는 난류조건 형성요소 등에 대한 연구도 필요할 것으로 나타났다. 그럼에도 불구하고 본 연구를 통해

얻어진 재료 및 입자크기에 따른 제한된 조립입자의 침강속도 결과 및 특성은 향후 조립토의 퇴적 관련 분야의 연구에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

1. Ahrens, J. P. (2000), A fall velocity equation, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, ASCE, Vol. 126, pp. 99~102.
2. Cheng, N. S. (1997), Simplified settling velocity formula for sediment particle, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 123, pp. 149~152.
3. Dietrich, W. E. (1982), Settling velocity of natural particles, *Water Resources Research*, Vol. 18, pp. 1615~1626.
4. Ferguson, R. I. and Church, M. (2004), A simple universal equation for grain settling velocity, *Jour. of Sedimentary Research*, Vol. 74, No. 6, pp. 933~937.
5. Gibbs, R. J., Matthews, M. D. and Link, D. A. (1971), The relationship between sphere size and settling velocity, *Jour. of Sedimentary Petrology*, Vol. 41, No. 1, pp. 7~18.
6. Goldstein, S. (1929), The steady flow of viscous fluid past a fixed spherical obstacle at small Reynolds numbers, *Royal Soc. [London] Proc.* Vol. 123A, pp. 225~235.
7. Hwang, B. H., Hong, S. W. and Hwang, G. N. (2008), Effect of salinity on settling velocities of cohesive sediments, *Proceeding of Korea Water Resources Association*, pp. 1813~1817.
8. Janke, N. C. (1965), Empirical formula for velocities and Reynolds numbers of single settling spheres, *Jour. of Sedimentary Petrology*, Vol. 35, pp. 745~750.
9. Kim, J. W. (2007), Experiment on settling velocity of suspended mineral particles, *Jour. of Korea Water Resources Association*, Vol. 40, No. 9, pp. 723~734.
10. Kim, S. J., Lee, H. S. and Kim, S. W. (2009), Sedimentation characteristics of various spherical cohesive particles in laminar and turbulent flow, *Jour. of Korea Society of Urban Environment*, Vol. 9, No. 1, pp. 23~29.
11. Krumbein, W. C. and Pettijohn, F. (1938), *Sedimentary Petrography*, Appleton Century Croft, NY., pp. 549.
12. Ladenburg, R. (1907), Under den Einfluss von Wänden auf die Bewegung einer Kugel in einer reibenden Flüssigkeit: *Annalen der Physik*. s. 4, Vol. 23, pp. 447.
13. Oseen, C. W. (1910), Über den Gültigkeitsbereich der Stokes'schen Widerstandformel, *Ark. Mat., Astron. Fys.*, Vol. 6, pp. 12~28.
14. Rouse, H. (1936), Nomogram for the settling velocity of spheres, *National Reserach Council on Sedimentation Publ.*, pp. 57~64.
15. Rubey, W. (1933), Settling velocities of gravel, sand and silt particles, *Amer. Jour. Sci.*, Vol. 25, pp. 325~338.
16. Stokes, G. G. (1851), On the effect of the internal friction on the motion of pendulums, *Cambridge Philo. Trans.*, Vol. 9, Part 2, pp. 8~106.
17. Wu, W. and Wang, S. S. Y. (2006), Formulas for sediment porosity and settling velocity, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 8, pp. 858~862.