

크기 및 밀도가 다른 두 입자군으로 구성된 슬러리의 최소수송속도

조규태 · 배광수 · 이철수

고려대학교 공과대학 화학공학과
(1986년 8월 5일 접수, 1987년 2월 24일 채택)

Minimum Transport Velocity of Bidispersed Slurries with Different Sizes and Densities

Kyu Tae Cho, Kwang Soo Bae and Chul Soo Lee

Department of Chemical Engineering, College of Engineering, Korea University, Seoul 136, Korea

(Received 5 August 1986; accepted 24 January 1987)

요 약

수평관을 이용한 침강슬러리의 최소수송속도 상관식을 위하여 침강과 수송조건에서 유체에 대한 입자의 상대운동의 유사성에 기초를 둔 방법이 제시되었다. 이 상관식은 밀도가 다른 균일 입자계에 적용되어 그 가능성이 검토되었으며 혼합입자 침강이론을 기초로 하여 밀도 및 입도분포를 가지는 혼합슬러리의 수송조건 결정으로 확장되었다. 실험적으로 결정된 종말속도와 각 균일입자군의 부피분율 및 밀도를 알면 혼합입자 최소수송속도는 계산할 수 있으며 실험치와 비교해 본 결과 잘 일치하였다.

Abstract—A method based on the analogy of a particle motion relative to fluid in settling and transport condition was proposed for the correlation of the minimum transport velocity of settling slurries through horizontal pipes. The correlation was applied to uniform slurries with different density and the applicability was confirmed. Then the method was extended to include the multidispersed slurries with varying solid densities and sizes. This extension was based on a theory of settling for multidispersed slurries.

With experimentally determined settling velocity, density volume fraction of each group of nearly uniform particles, the minimum transport velocity of multidispersed slurries was calculated. Comparison with experimental values for multidispersed slurries with different sizes and densities showed good agreement.

1. 서 론

고-액 혼합물인 슬러리의 수송은 화학공정과 원료 및 폐기물의 수송에서 많이 이용되고 있으며 슬러리의 수송과 관련문제 중에서 슬러리 내의 고체를 침적시키지 않고 수송시킬 수 있는 속도, 즉 최소수송속도의 예측은 필요한 압력손실 예측과 함께 중요한 것이다. 슬러리의 수송시 유체역학적 취급은 몹시 복잡하며 최

소수송속도의 예측은 균일입자군에 대하여 주로 경험적 방법이 발전되었다[1-4]. 이들 방법의 대부분은 입자의 크기 및 저항계수를 포함하고 있어 입자의 비구형성을 취급할 수 있는 직접적인 방법이 없고 이들 방법이 만족스럽지 못하게 되는 원인의 하나가 되고 있는 것으로 생각된다. 또한 혼합입자군의 취급은 Condolios와 Chapus의 방법[5]이 있으나 더욱 만족스럽지 못한 상태이다. 이 어려움을 피하는 방법으로 수송조건

및 정제된 유체에서 고체입자의 유체에 대한 상대운동의 유사성에 근거하여 입자의 크기를 결정하지 않고 실험적으로 결정된 입자의 종말 낙하속도를 이용하여 균일입자 슬러리의 최소수송속도를 결정할 수 있는 방법이 연구된 바 있다[6, 7]. 본 연구에서는 이 연구를 기초로 하여 밀도 및 입도가 분포된 두 입자군 슬러리에 대한 최소수송속도를 예측할 수 있는 방법을 발전시키고자 한다.

2. 이론적 고찰

2-1. 균일입자 슬러리의 최소수송속도

균일입자 슬러리의 최소수송속도는 슬러리 수송계에 차원해석이 가능하다고 가정하여 얻은 다음식으로 표현된다[6].

$$V_c = (1 + \alpha C^{\beta}) V_{\infty} \quad (1)$$

$$V_{\infty} = \frac{\sqrt{2}}{\bar{k}_{\infty}} \sqrt{C_D} U_{\infty} \quad (2)$$

\bar{k}_{∞} 는 무한 희석 상태에서의 유체의 평균 난류강도로 1/2~1 inch 관에 대하여 다음과같은 상관식으로 표시된다[7].

$$\bar{k}_{\infty} = 13,303 \left(\frac{DV_{\infty} \rho_f}{\mu_f} \right)^{-0.4618} \quad (3)$$

그리고 입자의 저항계수 C_D 는 입자의 침강영역에 따라 구분되며 입자의 크기가 소거된 형태로서 표현가능하다.

· Stokes 영역, $Re, p < 2$

$$C_D = \left(\frac{32g \mu_f (s-1)}{\rho_f} \right)^{0.5} U_{\infty}^{-1.5} \quad (4)$$

· Intermediate 영역, $2 < Re, p < 500$

$$C_D = \left(\frac{172.71g \mu_f (s-1)}{\rho_f} \right)^{0.375} U_{\infty}^{-1.125} \quad (5)$$

여기서 s 는 입자와 유체의 밀도 비이다. 따라서 실험적으로 결정된 입자의 종말속도와 물리적 특성치만으로 균일입자 최소수송조건을 결정할 수 있다.

2-2. 혼합입자 슬러리의 최소수송속도

균일입자 슬러리의 최소수송속도를 계산 함에 있어서 (2)식에 의한 V_{∞} 는 순수유체가 수송매체인 경우, 즉 입자의 농도가 무한 희석되었을 때의 값이다. 그리고 이 식은 중력이 작용하는 방향에 대하여 반대 방향으로의 난류에너지 밀도(E), 즉 등방성 난류에너지 밀도

의 1/6이 입자를 부유시키기 위한 에너지 밀도 $1/2 \rho_f C_D u_{\infty}^2$ 와 같다고 가정하여 유도되었다[6]. 이제 이 매체가 순수 유체가 아니고 밀도 ρ , 부피분율 C 의 슬러리인 경우를 생각하자. 그러면 같은 가정에 의하여 매체에 포함된 입자군의 밀도와 부피분율을 ρ_M 및 C_M 이라 할 때

$$\frac{1}{4} \rho \bar{k}^2 V_{\infty}^2 (C_M) = \frac{1}{2} \rho U_{s,M}^2 C_D (C_M) = E \quad (6)$$

의 식을 쓸 수 있다. 즉 (2)식의 \bar{k}_{∞} , U_{∞} 및 (4), (5)식의 ρ_f , μ_f 가 매체의 변화에 따라서 \bar{k} , $U_{s,M}$, ρ , μ 로 변화한다. 매체의 평균밀도 ρ 는

$$\rho = \rho_f (1 - C_M) + \rho_M C_M \quad (7)$$

여기서 ρ_M , C_M 등은 매체역학을 하는 입자군의 밀도 및 부피분율을 나타낸다. μ 는 슬러리 혼합물의 유효점도(effective viscosity)로 여러 식들이 알려져 있으나 [8], 정지된 유체에서의 침강이론[9]과 일관성을 갖도록 하기 위하여 $\mu = \mu_f$ 로 가정한다. 또한 난류강도는 매체 농도의 영향을 받으며 Owen[10]은 난류강도가 입자의 영향을 받아 감소한다는 사실을 이론적으로 설명하였다. 본 연구에서는 (3)과 농도의 영향을 다음식으로 표현하여 실험적으로 결정하고자 하였다.

$$\bar{k} = \bar{k}_{\infty} \cdot f(C_M) \quad (8)$$

그리고 $U_{s,M}$ 은 매체 내에서 입자의 침강속도로서 침강이론에서 언급한다.

큰 입자군(부피분율 C_L , 입자밀도 ρ_L)과 작은 입자군(부피분율 C_s , 입자밀도 ρ_s)으로 구성된 슬러리를 생각하자. 일반적으로 혼합 입자군의 최소수송조건은 한 입자군에 의하여 지배된다. 자유 침강속도가 다른 두개의 입자군은 일반적으로 두개의 침강계면을 형성하면서 침강한다. 각각의 입자군으로 구성된 슬러리를 무한 희석 상태에서 부유시키기 위한 난류에너지 밀도는 U_{∞}^2 과 C_D 의 곱으로 표시되어 있으므로 U_{∞} 이 크다고 해서 에너지 밀도가 큰 것은 아니다. 즉 침강속도가 빠른 입자군의 슬러리가 수송조건을 반드시 지배하는 것은 아니다. 다시 말하면 수송조건에서 더 큰 에너지 밀도를 필요로 하는 입자군이 최소수송조건을 지배한다. 수송조건을 지배하는 입자군의 침강속도가 다른 입자군보다 빠른 경우를 생각하자. 그러면 침강속도가 느린 입자군은 침강상태에서 침강속도가 빠른 입자의 침강 경향을 다소 저지시키면서 마치 침강속도가 느린 입자군과 유체로 구성된 가상 유체와 같은 밀도를 가지는 매체 내에서의 침강과 같은 현상을 나타낸다[9]. 이때 매체를 이루는 입자가 점도에 영향을 미치는지는 확실

하지 않으나 Filderis와 Whitmore[11]는 두 입자군의 밀도가 같은 계에서 입도비(작은입자 대 큰 입자의 비)가 1/10 보다 작으면 작은 입자는 매체의 점도에 영향을 미친다고 보았다. 침강과 수송조건에서 수송조건을 지배하는 입자의 유체에 대한 상대운동의 유사성을 확장하면 다음과 같이 표현된다.

$$V_c = (1 + \alpha C_T) \frac{\sqrt{2}}{k} \sqrt{C_D} U_{s, M} \quad (9)$$

여기서 C_T 는 두 입자군의 전체 농도이고 저항계수는 다음과 같이 표시된다.

$$C_D' = C_D'(\rho, \mu_f, U_{s, M}, \rho_p, g) \quad (10)$$

그러나, 두 혼합 입자군 가운데서 수송조건으로 부터 더 큰 에너지 밀도를 필요로 하지만 침강속도가 느린 입자가 수송조건을 지배할 경우에는 크기가 작은 입자의 큰 입자에 대한 상대밀도 및 입도차가 큰 경우에 나타날 수 있으며 침강속도가 빠른 입자가 침강속도가 느린 입자의 침강 경향에 영향을 미치지 못한다. 이 경우에는 침강속도가 빠른 입자가 작은 침강속도 입자 주위의 유체에 밀도나 점도에 영향을 준다고 보기는 어려우므로 균일 입자에 대한 최소수송속도식으로써 최소수송조건을 나타낼 수 있다. 즉 (1)식과 (2)식을 사용하되 (1)식의 C 는 전체 입자의 부피분율, 그리고 (2)식의 V_∞ 는 수송조건을 지배하는 입자의 유체에 대한 값으로 표시된다.

2-3. 혼합 입자군의 침강속도

침강속도가 서로 다른 혼합물이 침강하는 경우 서로 다른 침강계면을 형성하여 침강하는데 2 차 계면에서는 혼합 입자가 침강하는 영역이고 1 차 계면에서는 침강속도가 느린 입자들만이 침강 영역을 형성한다. 2 차 계면에서 침강속도가 빠른 입자의 침강시에는 유체와의 상대속도 뿐 아니라 침강속도가 느린 입자와의 상대속도도 고려해야 한다. 이 경우 빠른 침강속도를 가지는 입자 주위의 유체밀도 변화로 인한 부력효과에 의해서 균일 입자의 침강속도에 비해서 더 감소한다. 침강속도가 빠른 입자가 침강할 때 2 차 계면 아래에서는 유체 및 침강속도가 느린 입자들의 영향을 받으며 Selim 등 [9]에 의하여 제시된 식을 이용하여 2 차 계면에서 침강속도가 빠른 입자의 종말속도를 구할 수 있다. 균일 입자의 침강속도식[12]을 2 차 계면에 적용시키면

$$U_{s, L, 2} = U_{t, L, 2} \epsilon^{\frac{n}{2} L, 2-1} \quad (11)$$

따라서

$$U_{s, M} = \lim_{C_L \rightarrow 0} U_{s, L, 2}$$

$$= U_{t, L, 2} (1 - C_{s, 2})^{\frac{n}{2} L, 2-1} \quad (12)$$

2 차 침강계면은 유체와 침강속도가 느린 입자들로 구성된 매체로 간주되며 보정계수 C_f 는 순수한 유체의 밀도를 이 매체의 밀도로 대체하기 위하여 고려된 것으로서 각 침강영역에 따라서 다음과 같이 표현된다.

• Stokes 영역 $Re_{e, P, L} < 2$

$$U_{\infty, L} = \frac{g d^2 (\rho_p - \rho_f)}{18 \mu_f}, C_f = \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho_p - \rho_f} \right) \quad (13)$$

• Intermediate 영역 $2 < Re_{e, P, L} < 500$

$$U_{\infty, L} = \frac{0.153 g^{0.71} d^{1.14} (\rho_p - \rho_f)^{0.71}}{\rho_f^{0.29} \mu_f^{0.43}} \quad (14)$$

따라서 $U_{t, L, 2}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$U_{t, L, 2} = U_{\infty, L} \cdot C_f \quad (15)$$

(11)식에서 침강 경향을 나타내는 지수 $n, L, 2$ 는 균일 입자에서와 다른 값을 가지므로 (15)식을 기초로 하여 Al-Dibouni가 제시한 상관식[11]을 사용하여 계산된다.

$$\frac{n-5.1}{2.7-n} = 0.1 Re_{e, P, L}^{0.9} \quad (16)$$

여기서 입자의 레이놀즈 수는 다음과 같다.

$$Re_{e, P, L} = \frac{d U_{t, L, 2} \rho}{\mu_f} \quad (17)$$

(15)식을 이용해서 실험적으로 결정된 종말속도 $U_{\infty, L}$ 로 부터 $U_{t, L, 2}$ 를 얻고 이 값과 (17)식에서의 $Re_{e, P, L}$ 을 통하여 (16)식에서 얻은 $n, L, 2$ 를 이용하면 $U_{s, M}$ 을 구할 수 있다.

3. 실험 방법

최소수송속도는 일반적으로 두가지 방법에 의하여 결정된다. 먼저 투명한 관을 통하여 관내 입자가 침적되지 않는 최소수송조건을 육안으로 결정짓는 직접적인 방법과 최소수송속도 부근에서 압력차와 속도를 측정하여 이 실험치로 부터 압력차가 최소가 되는 속도를 결정짓는 간접적인 방법이 있으나 간접적인 방법은 압력차가 최소가 되는 조건이 불분명해지는 경우가 많고 최소수송속도 이하에서는 유동상태가 불안정하므로 수송조건을 결정하는데 어려움이 따른다. Stevens[14]는 간접적인 방법과 직접적인 방법이 거의 일치한다는 것

Table 1. Detailed information on the particles used in the experiment.

material	mean particle size (μm)	sieve size (mesh)	density (g/cm^3)	terminal falling velocity (cm/sec)
heavy sand	230	-60/+70	2.634	2.41
	163	-80/+100		1.92
	137	-100/+120		1.37
	115	-120/+150*		0.98
cast iron	163	-80/+100	5.233	3.49
	137	-100/+120	5.138	3.10
	96	-140/+170	5.185	1.95

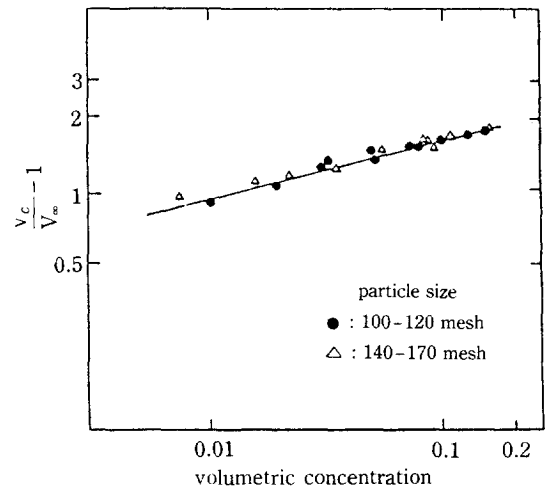
*: U.S Tyler Sieve, Others ASTM.

을 실험적으로 확인하였고 따라서 본 연구에서는 직접적인 방법을 택하여 최소수송조건을 결정하였다. 이를 위한 실험장치는 균일농도의 슬러리를 공급하기 위한 혼합탱크와 수송을 위한 1 마력 짜리 원심펌프 및 측정을 위한 유리관이 loop system으로 연결되었다. 실험 장치 및 방법은 Kim 등[6]의 논문에서 상세히 설명되어 있다. 실험에 사용한 시료는 입도가 163-89 μm 인 모래와 194-95 μm 인 주철분이며 이 시료의 물리적 특성은 Table 1에 나타내었다. 수송매체는 15°C의 물을 사용하였고 슬러리의 부피농도를 15%까지 변화시켰다. 최소수송속도의 결정은 입자들이 침적되어 있는 상태에서 유속을 천천히 증가시키면 모든 입자들이 유동하기 시작하며, 이 상태에서 압력차와 최소수송속도를 결정하였다. 이 때에 미량의 입자는 관바닥을 따라 미끌어진다. 이 경우 측정의 재현성은 5% 이내이다. 혼합 슬러리는 입자의 크기가 서로 다르거나 밀도가 다른 입자를 균일한 농도비로 혼합하여 같은 방법으로 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

최소수송속도는 고체입자의 농도가 증가할수록 입자별로 증가하는 경향이 거의 비슷하다고 볼 수 있으며 [7], 이 경향의 밀도 변화에 따른 영향을 Fig. 1에 나타내었다. 이로 부터 입자의 밀도에 관계없이 (1)식의 α 및 β 는 각각 2.745와 0.218로서 모래에 대한 값과 같이 사용될 수 있으며 Durand식이 입자의 밀도 변화에 대한 영향을 충분히 나타내지 못하고 있으나[15], 본 연구에 의한 식은 최소수송속도의 무한 회색 상태에서 값이 입자의 밀도에 대한 영향을 충분히 포함하고 있다는 것을 나타낸다.

유체의 난류유동상태는 혼합길이 개념(mixing

**Fig. 1. Minimum transport velocity correlation for the nearly uniform particles of cast iron.**

-length concept)으로 설명이 가능하다[16]. Owen [10]은 유체의 난류에너지가 유체에 의하여 발생한다고 가정하여 입자를 포함하고 있는 상태에서의 유체의 난류에너지 소실율이 순수유체에 대한 것보다 크다는 것을 이론적으로 설명하고 난류강도는 입자의 영향을 받아 감소한다는 사실을 주장하였다. 이 경우 난류의 에디운동량 확산계수(eddy momentum diffusivity)는 혼합길이 이론으로 나타낼 수 있으며 입자의 영향으로 감소하는 경향을 나타낸다. Drew[17]는 난류상태에서 입자의 영향을 고려하여 혼합길이를 레이놀즈수와 농도의 함수로 두어 설명하였다. 슬러리 수송상태에서 수송관의 마찰계수는 입자의 영향으로 인하여 순수유체에 의한 마찰계수보다 크다. 이는 입자에 의한 저항이 증가됨으로써 설명이 되는데 이때 입자가 난류에너지를 감소시킴으로써 karman 상수에 영향을 미치고 순

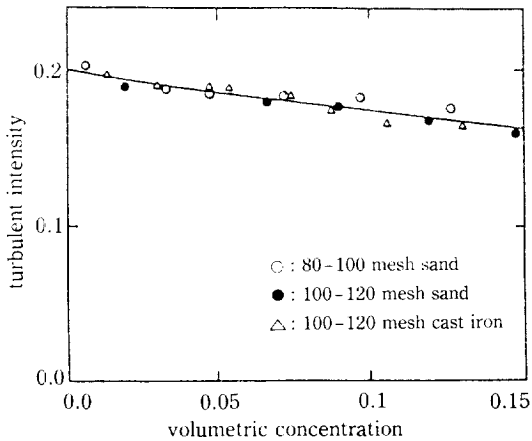


Fig. 2. Average turbulent intensity as a function of concentration.

수유체에 의한 값보다 작은 값을 나타낸다. 이 값이 농도에 따라서 감소하는 경향이 Roberts[18]에 의하여 연구되었다. 본 연구에서는 혼합입자의 최소수송 조건을 결정짓기 위하여 균일입자의 최소수송 속도 실험치로부터 난류강도에 대한 영향을 실험적으로 결정하였다. (6)식으로 부터 균일입자에 대한 난류강도의 농도 의존성을 구한 결과 입자의 크기나 밀도에 관계없이 농도증가에 따라 난류강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 이를 Fig. 2에 나타내었다. 입자의 크기나 밀도의 영향은 \bar{k}_∞ 에 의존하게 되므로 입자농도의 영향은 독립적으로 두어 다음 상관식을 구하였다.

$$\bar{k} = \bar{k}_\infty (1 - C_w)^{0.937}$$

이 상관식의 상관계수는 97% 이상이었다. 여기서 \bar{k}_∞ 는 관 직경 의존성에서 살펴본 바와 같이[7] 25mm 관에서는 0.2가 실험치와 잘 일치하였다. 혼합입자에 대한 최소수송속도 실험결과를 Fig. 3-5에 균일입자 최소수송속도 실험치와 비교하여 나타내었다. Fig. 3은 입자의 종말 속도가 거의 비슷한 입자를 혼합한 경우로써 모래(80-100 mesh)의 종말 낙하속도는 1.92 cm/sec이고 주철(140-170 mesh)의 종말 낙하속도는 1.95 cm/sec이다. 이 경우 최소수송조건은 입자의 난류에너지 밀도가 큰 주철입자가 지배한다. 이 두가지 입자를 모래 : 주철의 부피농도비율 2 : 1로 일정하게 혼합하여 실험한 결과 서로의 침강속도가 비슷하므로 농도의 영향만 받는다. 따라서 수송조건을 지배하는 입자에 대한 최소수송속도와 같은 경향을 나타낸다. 또한 침강속도가 2.4 cm/sec인 모래(60-70 mesh) 입자를 주철(140-170 mesh)과 혼합한 경우도 마찬가지로 모래

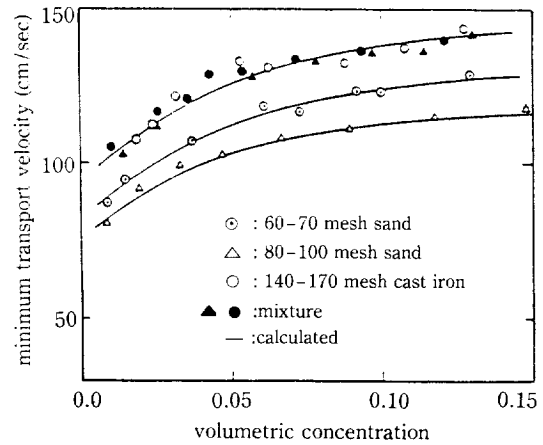


Fig. 3. Effects of concentration on the minimum transport velocities for the mixture and the nearly uniform slurries.

▲ : volumetric concentration ratio of heavy sand (-80/+100) to cast iron (-140/+170) is 0.5
● : volumetric concentration ratio of heavy sand (-60/+70) to cast iron (-140/+170) is 0.7

입자가 주철입자의 침강경향에 영향을 미치지 못하므로 같은 결과를 나타낸다. Fig. 4는 모래입자 대 주철입자의 자유침강속도의 비가 1 : 2 정도로서 모래와 주철분의 농도비를 1 : 1로 유지하여 실험한 결과이다. 이 경우는 최소수송조건을 지배하는 입자의 종말낙하속도가 크므로 침강속도가 느린 입자의 간섭영향을 받는데

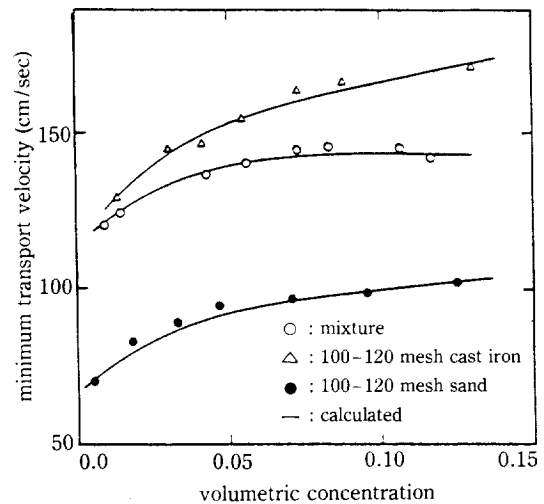


Fig. 4. Effects of concentration on the minimum transport velocities for the mixture and the nearly uniform slurries.

○ : volumetric concentration ratio of heavy sand (-100/+120) and cast iron (-100/+120) is 1

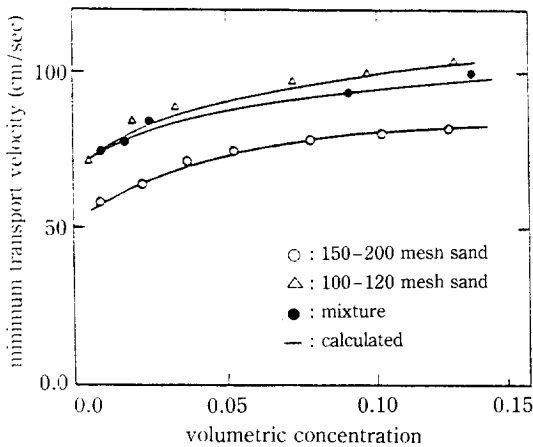


Fig. 5. Effects of concentration on the minimum transport velocities for the mixture and the nearly uniform slurries.

● : volumetric concentration ratio of large to small particles of heavy sand is 2

농도가 증가함에 따라서 그 영향이 커짐을 알 수 있다. 또한 저농도에서는 침강속도에 대한 간섭영향이 약화되어 최소수송조건을 지배하는 입자의 최소수송속도 값에 접근함을 알 수 있다. Fig. 5는 입자의 크기가 서로 다른 모래를 혼합한 경우로서 Fig. 4와 같은 경향을 나타낸다. 실험치와 계산치는 총괄 RMS 편차 5% 이하의 범위에서 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이 결과는 농도증가에 따라 혼합입자의 최소수송속도가 증가하는 경향이 수송조건을 지배하는 균일입자에 대한 값보다 다소 작으며 이는 침강속도가 빠른 입자의 침강경향이 침강속도가 느린 입자에 의하여 감소되기 때문이며 이는 Ludwig[19]의 견해와 일치한다. 혼합입자에 대한 최소수송속도 계산방법은 수송조건을 지배하는 입자의 난류에너지 밀도가 크고 입자의 종말낙하속도도 큰 경우 실험적으로 결정된 입자의 종말낙하속도와 물리적 특성치를 대입하여 (12)식으로 부터 2 차 계면에서의 유체에 대한 상대침강속도를 계산한다. 이 경우 작은 입자들의 영향을 고려하여 (15)식의 $U_{L, L, 2}$ 에서 유체의 밀도가 보정이 되어야 한다. 또한 입도차가 크지 않으므로 유체의 점도는 보정될 수 없다. 이 값으로 부터 (16)식에 의하여 2 차 계면에서 침강경향을 나타내는 지수 n , L , 2가 계산된다. 침강과 수송상태에서 입자와 유체와의 상대속도에 대한 유사성이 혼합입자에 대해서도 적용할 수 있으므로 (9), (10)식에 의하여 최소수송속도가 계산된다. n , L , 2와 $U_{s, M}$ 은 침강속도가 작은 입자의 영향을 고려하였으므로 같은

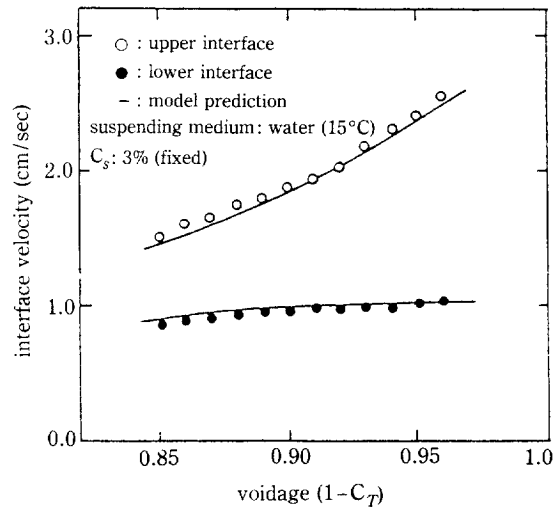


Fig. 6. Comparison of the present model with experimental data of settling velocity for the mixture of sand (-100/+120) and cast iron (-100/+120).

농도에서 (18)식에 의하여 \bar{k} 를 계산하여 사용하여야 한다.

혼합입자에 대한 침강속도 실험결과를 Fig. 6, 7에 나타내었다. 이 경우 침강 계면이 2 개가 형성되므로 입자의 농도변화에 따라서 각 계면이 낙하하는 속도를 측정하였다. Selim[9]은 Stokes 영역에 속하는 입자들이 혼합된 경우에 대하여 실험하였고 침강속도 계산 방법을 밀도가 같은 입자들에 대해서만 적용한데 반해

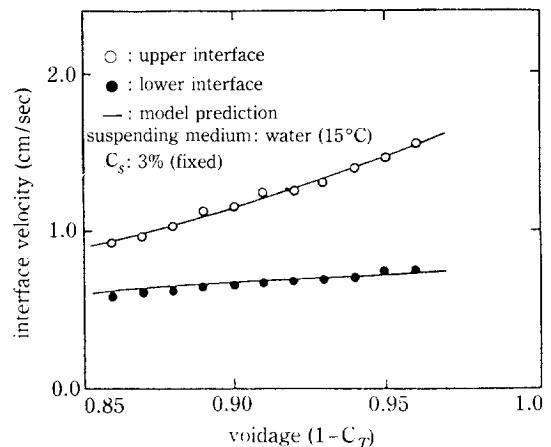


Fig. 7. Comparison of the present model with experimental data of settling velocity for the mixture of sand (-80/+100) and sand (-120/+140).

서 본 연구에서는 그들의 방법을 기초로 중간영역에 속하는 입자의 입도 및 밀도가 다른 혼합입자 침강속도 계산으로 확장되었다.

5. 결 론

균일입자 슬러리의 최소수송속도 V_c 의 예측을 위한 다음 상관식을 밀도와 크기가 다른 두 입자군으로 구성된 슬러리에 적용할 수 있도록 확장하였다.

$$V_c = V_\infty (1 + \alpha C^\beta)$$

$$V_\infty = \frac{\sqrt{2}}{k_\infty} \sqrt{C_d} U_\infty$$

혼합입자 슬러리의 최소수송속도 계산에서 C 는 전체 입자의 부피분율이며 $\alpha = 2.745$, $\beta = 0.218$ 로 입자의 물리적 성질에 의존하지 않는다. C_d 계산에 필요한 점도 μ 는 순수한 유체의 값, 그리고 유체의 밀도는 매체의 밀도 ρ 로 대체되며

$$\rho = \rho_f (1 - C_s) + \rho_p C_s$$

입자의 종말속도 U_∞ 는 매체내에서 종말속도 $U_{s, m}$ 으로 대체된다.

$$U_{s, m} = U_{t, L, 2} (1 - C_{s, 2})^{n_{L, 2} - 1}$$

그리고 난류강도 \bar{k}_∞ 는 매체 농도의 영향을 받으며 다음 식에 의하여 계산된다.

$$\bar{k} = \bar{k}_\infty (1 - C_s)^{0.937}$$

감 사

본 연구의 수행을 위하여 연구비를 지원하여 주신 한국과학재단에 감사드립니다.

NOMENCLATURE

C	: volume fraction of solid
C_d	: drag coefficient for a particle settling at terminal velocity in quiescent fluid
D'_d	: drag coefficient, equation (10)
C_f	: correction factor, equation (1)
C_T	: total volume fraction of solid in multidispersed slurry
D	: diameter of pipe, m
d	: diameter of particle, m
E	: turbulent energy density, J/m ³
g	: acceleration due to gravity, m/sec ²
\bar{k}_∞	: average turbulent intensity at infinite dilution
\bar{k}	: average turbulent intensity of suspension

n	: index of settling velocity tendency, equation (16)
Re	: pipe Reynolds number, $Pv_\infty \rho_f / \mu_f$
$Re_{p,L}$: particle Reynolds number, $dU_{t, L, 2} \rho / \mu_f$
s	: ratio of solid particle to fluid density
U_∞	: terminal falling velocity of a particle, m/sec
U_s	: settling velocity of suspension relative to fluid, m/sec
U_l	: settling velocity of suspension relative to wall, m/sec
V_c	: minimum transport velocity, m/sec
V_∞	: minimum transport velocity at infinite dilution, m/sec

Subscripts

L	: large particle
S	: small particle
1	: 1st interface
2	: 2nd interface
M	: media

Greek Letters

α, β	: regression constants, equation (1)
ϵ	: volume fraction of fluid in suspension, dimensionless
ρ_f	: density of fluid, kg/m ³
ρ_p	: density of particle, kg/m ³
μ_f	: viscosity of fluid, kg/m.sec

REFERENCES

1. Hughmark, G.A.: *Ind. and Eng. Chem.*, **53**, 389 (1961).
2. Sinclair, C.G.: *Proc. Sym. Interaction Between Fluids and Particles*, Instn. of Chem. Engrs (London), June (1962).
3. Durand, R. and Condolios, E.: *Proceedings International Association for Hydraulic Research*, Minneapolis, Minn, Sept, 1-4 (1953).
4. Spells, K.E.: *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, **33**, 79 (1955)
5. Condolios, E. and Chapus, E.E.: *Chem. Eng.*, **70**, 131 (1963).
6. Kim, H.T., Han, K.S., Park, C.K. and Lee, C.S.: *Hwahak Konghak*, **22**, 115 (1984).
7. Ryu, S.H., Bae, K.S. and Lee, C.S.: *Hwahak Konghak*, **24**, 39(1986).
8. Thomas, D.G.: *J. Colloid Sci.*, **20**, 267 (1965).
9. Selim, M.S. Kothari, A.C. and Turian, R.M.: *AIChE J.*, **29**, 1029 (1983).
10. Owen, P.R.: *J. Fluid Mech.*, **39**, 407 (1969).

11. Filderis, V. and Whitmore, R.N.: *Rheol. Acta.*, **1**, No. 4-6 (1961).
12. Richardson, J.F. and Zaki, W.N.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **32**, 35 (1954).
13. Garside, J. and Al-Dibouni, M.R.: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, **16**, 206 (1977).
14. Stevens, G.S.: Ph. D. Thesis, Univ. Toronto (1971).
15. Wasp, E.J., Kenny, J.P. and Grandhi, R.L.: "Solid-Liquid Flow, Solid Pipeline Transportation", *Trans. Tech. Pub.*, Clausthal, Germany, 90 (1979).
16. Hinze, J.O.: "Turbulence", McGraw-Hill, New York, 361 (1975).
17. Drew, D.A.: *Trans. ASME*, **97**, *J. Applied Mech.*, **42**, 38 (1975).
18. Roberts, C.P.R. and Kennedy, J.F.: "Advances in Solid Liquid Flow in Pipes and Its Application", Zand, I. ed. Pergamon Press, New York, 59 (1971).
19. Ludwig, K.: *International Sci. and Tech.*, 68 (Feb. 1964).