

浚渫土의 管路流送 Pipeline Transport of Dredged Soils

유동훈* · 김성오* · 선우중호**

Dong Hoon Yoo*, Sung Oh Kim* and Jung Ho Sonu**

要 旨 : 간척지 매립에 있어서 최근에는 토사를 해저에서 준설하여 파이프라인을 통해 유송시켜 매립시키는 방법이 많이 쓰여지고 있다. 이러한 경우 토사와 혼합된 유체는 slurry fluid의 성질을 지닌다. slurry fluid는 점성도가 독특한 양상을 보이기 때문에 준설토 유송의 관련수치 산정에는 slurry flow 특성을 반영한 관마찰계수 산정식을 사용해야 한다. 준설토를 함유한 slurry fluid는 주로 함유된 입자의 크기에 따라 Newtonian fluid 또는 non-Newtonian fluid 특성을 갖는데, 본 연구에서는 각 특성조건별로 관마찰계수 산정식을 지수함수 형태로 제시하였으며, 이를 이용하여 준설토 유송을 위한 용량산정에 있어 펌프동력뿐만 아니라 관경 및 유량에 대하여도 양해법 형태의 산정식을 개발하였다.

Abstract □ Pipeline transport of dredged soils has been widely used for reclamation. In this case the fluid mixed with soils, so called slurries, has very much different characteristics from pure fluids. As the slurry fluid has a peculiar mode in the viscosity, a proper equation of friction factor has to be used which is pertinent to the characteristics of slurry flow for the estimation of pipeline transport of dredged soils. The slurry fluid has the characteristics of Newtonian fluid or non-Newtonian fluid largely depending on the size of particles. In the present study, new forms of pipe friction factor equations have been suggested for both conditions, and using these forms explicit equations have been developed for the computation of relevant pipe diameter and discharge as well as pumping power.

1. 서 론

간척지의 일반적인 준설 및 매립을 위하여 여러가지 방법이 사용되고 있는데 한 방법은 펌프 준설선에 의하여 해저의 토사를 흡입한 후 관로를 통하여 육상에서 매립하는 것이며, 다른 방법으로는 준설선으로 부터 파낸 토사를 버킷(bucket) 준설선, 디퍼(dipper) 준설선, 그레브(grab) 준설선, 펌프(pump) 준설선 등에 의하여 토사를 채취하여 토운선에 의하여 직접 매립하는 방법이 있다. 또한 토운선에 의하여 운반되어 온 토사를 펌프에 의하여 관로를 통하여 埋立地까지 펌프로 유송시키는 방법이 있다.

이중 최근 들어서 펌프(pump) 준설선에 의하여 준설된 海底土砂를 펌프에 의하여 관로를 통해 매립지까

지 유송하거나, 버킷(bucket) 준설선, 디퍼(dipper)준설선, 그레브(grab) 준설선, 펌프(pump) 준설선 등에 의하여 채취된 土砂를 펌프에 의해 간척지까지 관로를 통하여 유송시키는 방법이 많이 쓰여지고 있다. 다음으로 많이 쓰이는 방법은 山土를 성토하여 매립하는 방법이 있으나, 주위환경을 파괴하는 단점이 있으며, 새만금 방조제 지역과 같이 대부분의 간척지에서는 필요한 土量에 비하여 채취가능한 土量이 상당량 부족한 실정이다. 또한 대부분 사업지구 주변이 국립공원이나 도립공원으로 지정되어 있어 토취장 개발에도 많은 어려운 점이 있다. 그러므로, 대부분의 간척지에서 山土를 성토하여 매립하기에는 양적으로 부족하며, 필요한 토량의 상당분은 海底의 흙을 채취하여 매립하는 방향이 바람직하다 할 수 있다.

*아주대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Ajou University, Suwon 441-749, Korea)

**서울대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea)

해저에서 준설한 매립토는 대부분 가는 모래일 가능성이 큰 slurry로서 펌프선택시 slurry 펌프가 사용되어야 하며, 펌프의 용량 산정 및 관경 산정시도 일반 유체와는 다른 방법으로 산정되어야 한다. slurry는 일반적으로 non-Newtonian slurry와 Newtonian slurry로 나누어지며, 시료를 채취하여 viscometer로 실험을 행함으로써 그 성질을 파악할 수 있다. 이렇게 실험으로 얻어진 자료로부터 non-Newtonian slurry인지 아니면 Newtonian slurry인지를 결정하여 각 slurry의 특성에 알맞은 관마찰계수 산정식을 적용하여 관마찰계수를 산정하고 이러한 관마찰계수 산정식으로부터 펌프용량, 관경과 유출량 등을 산정함으로써 펌프유송을 적절하게 설계할 수 있다.

관로를 통해 海砂를 매립지까지 효과적으로 유송시키는 데 있어서, 펌프 용량과 유량을 정확히 산정하거나 적합한 관경산정을 선정할 필요가 있다. 본 연구에서는 우선 매립토의 특성에 따라 Newtonian slurry와 non-Newtonian slurry로 나누어 각각 지수함수 형태의 관마찰계수 산정식을 제시하였다. Newtonian slurry인 경우는 그 흐름에 가장 크게 영향을 미치는 농도(concentration)의 함수로 관마찰계수 산정식을 개발하였으며, non-Newtonian slurry인 경우는 그 흐름의 특성을 나타내는 power law index(n)의 함수로 관마찰계수 산정식을 제시하였다. 또한 지수함수 형태의 관마찰계수 산정식을 관경 및 펌프용량 산정식(유, 1995)에 적용함으로써 준설토의 유송과 같은 slurry fluid의 효과적인 유송을 위하여 적합한 관경과 펌프용량, 유량 등을 바로 산정할 수 있는 양해법 산정식들을 개발하였다.

2. Newtonian Slurry의 관마찰계수

펌프용량 산정과 관경 계산을 위하여 우선 slurry flow의 마찰계수를 산정할 필요가 있다. slurry는 일반적으로 non-Newtonian fluid의 성질을 가지나 입자의 크기가 어느 정도 커지면 Newtonian fluid의 성질을 가지기도 한다.

Newtonian slurry의 점성계수는 일반적으로 다음과 같이 일반화된다.

$$r = \frac{\mu_m}{\mu} \quad (1)$$

위의 식에서 r은 상대점성비이며 μ 는 일반

Newtonian fluid의 점성계수이며, μ_m 은 slurry fluid의 평균점성계수를 나타낸다. Newtonian slurry flow에서 상대점성비 r을 구한 후 μ 대신 μ_m 이 쓰이며, 비교적 많은 의미를 내포하고 있고, r에 영향을 주는 요소는 다음과 같다(나열된 순서와 r에 대한 영향정도는 무관하다).

- a) 유체의 농도(concentration), c
- b) 입자의 크기와 분포상태
- c) 입자의 형태
- d) 표면 특성
- e) 유체내 전하의 농도와 이온의 충전상태
- f) 온도

농도가 증가함에 따라 입자 상호간의 접촉과 입자들 사이에 미끄러지는 상호 작용은 더욱더 활발해진다. 입자들끼리의 접촉으로 인한 더 높은 에너지의 손실은 상대점성비 r의 증가를 야기시킨다. 또한, 매우 높은 농도는 입자들의 거친 정도와 입자크기의 넓은 분포상태에 의해 대부분 그 성질이 결정되어질 수 있다. 농도가 입자들이 더 이상 들어갈 수 없을 정도로 뽁뽁해지게 되는 한계까지 다다르면 전단응력의 메커니즘은 토류체들(soils)과 파우더류(powders)와 같은 상태에 이르게 된다(Cheng and Richmond, 1978; Cheng, 1984).

혼합물에는 다양한 크기를 가진 입자가 존재하므로 그 크기의 폭은 중요한 관심사가 될 수 있다. 실험결과들로부터 입자 크기의 폭이 커지면 점성계수는 상대적으로 떨어지는 경향이 있다. 그러므로 최대농도 c_{max} 는 입자 크기의 폭이 커질수록 증가한다. 또한 입자의 형태는 slurry 점성계수에 영향을 줄 수 있다. 예를 들면 입자의 형태가 구형(sphere)에서 벗어난다면 벗어날수록 점성계수는 증가한다.

Electroviscosity는 적어도 두 가지의 형태로 slurry 유체에 영향을 줄 수 있다. 첫번째의 영향은 유체안 입자들 주위의 전하구름들이 왜곡되어 나타난다. Booth (1950)는 이러한 효과가 고유점성계수(intrinsic viscosity)를 증가시키는 경향이 있음을 밝힌 바 있다. 높은 농도에서는 입자들의 전하구름들이 서로 작용하여 전단응력이 미치는 동안 마치 개개의 입자들처럼 개별적으로 움직이면서 유송된다. 이러한 작용은 전단응력에 저항하는 힘을 증가시키는 결과도 가져오게 된다. 두번째는 입자들의 응집작용이며, 주로 매립토의 입자가 실트질에 가까워질 경우와 같이 고운 입자들일

경우에 생기며 입자들이 응집하는 경향은 입자표면의 전하효과에 의하여 생긴다. 이렇게 많은 전기적인 요인은 전단응력에 대한 저항력에 영향을 줄 수 있다.

Newtonian fluid의 점성계수 μ_m 에 영향을 미치는 요인중 농도는 가장 중요한 요인이며, 대부분의 slurry flow에 상당한 영향을 미친다. 전형적인 형태로 입자들이 유체의 막으로 둘러싸여 있고 이 막의 외측 표면은 균등하게 존재하는 slurry들로 둘러싸여 있는 경계면의 상태를 생각해 보면 다음과 같은 r 과 c 와의 관계로 유추되는 식을 제시할 수 있다.

$$r = \frac{\exp(\beta c)}{1 - c/c_{\max}} \quad (2)$$

또는,

$$r = \left(\frac{1-c}{c_{\max}}\right)^{-\beta \cdot c_{\max}} \quad (3)$$

여기서 β 는 상수이다. 상기 두 수식은 Krieger(1972)에 의해 제시된 이론과 실험결과에 바탕을 두고 있다. 상기 식에서 낮은 농도에서 $(r-1)/c$ 값을 제한시킨다면 이는 작은 농도에 따르는 slurry의 거동을 나타내며 이를 고유 점성계수(intrinsic viscosity)라 한다. Eilers의 다른 형태의 식을 제시하여 보면(Shook and Roco, 1991),

$$r = \left[1 + \left(\frac{0.5Bc}{1 - c/c_{\max}}\right)\right]^2 \quad (4)$$

와 같이 나타내어진다.

β 를 2.5로 하고 c_{\max} 값이 0.63일 때 Thoma(1965)는 다음과 같은 수식을 제안하였다.

$$r = 1 + 2.5c + 10.05c^2 + 0.00273 \exp(16.6c) \quad (5)$$

상기 Thoma의 수식은 구체(sphere)로 가정한 같은 크기의 입자들을 이용한 많은 실험자료로부터 얻어진 결과이다. 입자를 구체(sphere)라 가정하면 slurry flow의 평균밀도 ρ_m 은 다음과 같은 Einstein의 식으로 산정된다(Shook and Roco, 1991).

$$\rho_m = \rho_s c + \rho(1-c) = [1+c(s-1)] \quad (6)$$

여기서 ρ_s 는 입자의 밀도, ρ 는 유체의 밀도이며, s 는 유체밀도에 대한 입자밀도의 비이다.

마지막으로, 제시되지 않은 많은 다른 식들도 역시 r 은 c 의 함수로 표현되어지나, 농도가 유일한 매개변

수는 아니므로 상기 제시된 식들중 완전한 형태의 식은 존재하지 않는다. 이렇게 기존 식들은 Newtonian slurry fluid의 점성계수를 농도의 함수로 나타내고 기존 점성계수를 수정하여 사용하고 있으나 경험적으로 충분히 검증되고 이용이 편리하며 유효 적절한 식의 선정이 상당히 까다롭다 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 굳이 점성계수를 수정하여 사용하지 않고도 일반 점성계수를 적용한 레이놀즈수와 농도로부터 직접 Newtonian slurry flow의 관마찰계수(f)를 산정하는 방법을 개발하였으며, 다음과 같다.

$$f = \eta R^\kappa \quad (7)$$

여기서 제한된 범위에서 $\kappa = -1$ 이고

$$\eta = \exp(371.7c^9 + 7.33) \quad (8)$$

상기 식은 Shook(1985)의 완난류 실험자료를 회귀 분석하여 추정하였으며 입자는 0.3 mm polystyrene이다. 그의 실험결과를 Fig. 1에 도시된 바와 같이, 농도에 따라 관마찰계수 분포는 평행이동함을 알 수 있다. 상기 식은 지수함수 형태의 관마찰계수 산정식으로써 펌프용량 산정식 뿐아니라 관경이나 유출량 산정식(유, 1995)도 양해법으로 개발할 수 있어 편리하다.

본 연구에서는 제한된 자료를 이용하여 지수 $\kappa = -1$ 로 고정하였는데 이는 $0.45 \leq c \leq 0.52$ 범위에서만 사용될 수 있다. $c=0$ 인 일반유체인 경우 $\eta = 0.316$, $\kappa = -0.25$ 이므로 $0 \leq c \leq 0.45$ 범위에서는 지수 κ 가 -0.25에서 -1.0으로 농도에 따라 점차 감소할 것으로 추론된다. 이러한 경향은 $c=0.45$ 와 $c=0.49$ 인 관측자료에서도 경사가 완만해지는 것으로 확인되고 있다.

3. Non-Newtonian Slurry의 관마찰계수

준설토를 함유한 유체가 non-Newtonian flow의 성질을 가질 때도 역시 유량, 펌프용량, 관경 등을 산정하기 위해서는 먼저 마찰계수 f 의 산정이 선행되어야 한다. 일반적으로 준설한 매립토의 입자가 작아지면 non-Newtonian slurry가 될 가능성이 많은데, 이 때 non-Newtonian slurry의 마찰계수 f 는 레이놀즈수만의 함수는 아니다. 일반적인 non-Newtonian model로 알려진 power law model에서 마찰계수 f 는 레이놀즈수와 power law index(n)의 함수이다. power law index(n)는 Couette viscometer를 통한 준설토의 시료실험으로

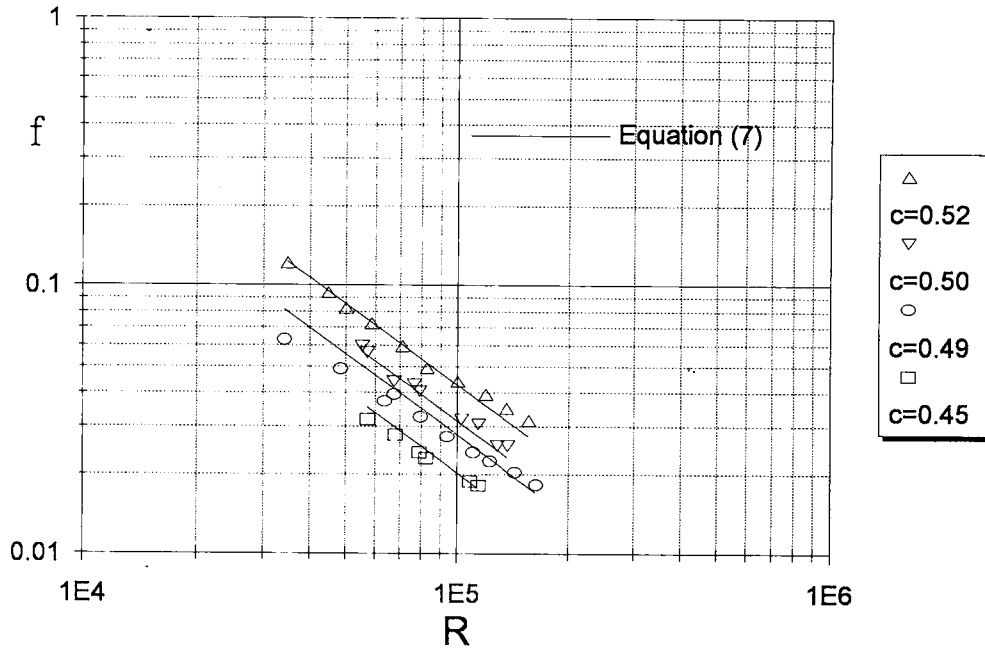


Fig. 1. Distribution of Newtonian slurry's friction factor.

부터 얻어지고, 이는 마찰계수에 많은 영향을 주며 n 값이 1에 가까와 질수록 Newtonian flow 경향을 나타낸다. power law model에서 이론적으로 확립되었으며, 모든 non-Newtonian 유체 영역에 대하여 적합한 것으로 알려진 Dodge-Metzner(1959)의 마찰계수 산정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4n^{0.75} \log(R_n f^{(1-0.5n)}) - 0.4n^{-1.2} \quad (9)$$

다른 형태의 매끈한 관에서의 난류영역에 적용이 가능한 Kemblowski-Kolodziejcki(1973) 식을 제시하면 다음과 같다.

$$f = 2.25 \times 10^{-3} \exp(3.57n^2) \frac{\psi^{1/R}}{R_n^m} \quad (10)$$

$$\psi = \left\{ \exp \left[0.572 \left(\frac{1-n^{4.2}}{n^{0.435}} \right) \right] \right\}^{1000} \quad (11)$$

$$m = 0.314n^{2.3} - 0.064 \quad (12)$$

그러나 상기식들은 대부분포형태의 식들이며 반복법에 의해 관마찰계수를 산정해야 되므로 사용시 매우 복잡하나 할 수 있다. 유(1995)는 일반 Newtonian flow에 대하여 관마찰계수를 지수함수 형태로 도출하고 여러 관련수치를 양해법으로 구할 수 있는 근사식

을 개발한 바 있다. non-Newtonian flow에 대하여서도 사용이 간편하고 양해법의 형태로 유량, 관경, 펌프용량 등의 산정식을 개발할 수 있는 지수함수 형태의 관마찰계수 산정식을 개발하였으며 다음과 같이 간단히 표기된다.

$$f = \omega R^\chi \quad (13)$$

$$\omega = 0.179n + 0.171 \quad (14)$$

Fig. 2는 Farooqi(1981)의 non-Newtonian 유체의 실험결과와 식 (13)의 산정결과를 비교하여 제시한 결과이다(Shook and Roco, 1991). 도시된 바와 같이 관마찰계수는 n값에 따라 평행이동함을 알 수 있다. 일반적인 Newtonian fluid와 같이 완난류 구간에서 레이놀즈수 약 15,000까지 $\chi = -1/4$ 로 추정하였고, ω 는 power law index(n)의 함수로서 구할 수 있음을 알 수 있다. 레이놀즈수가 15,000 이상이 될 때는 지수 χ 를 -1/6 등으로 작게 취하여 적합한 관마찰계수 산정식을 구할 수 있는데, 본 연구에서는 실험자료의 부족으로 생략하였다. 레이놀즈수 약 15,000까지 제한된 범위에서 사용되나 상기 식은 정확하면서도 지수함수 형태로 나타내어지므로 사용이 편리하다. 또한 유(1995)가 시도하였던 바와 같이 간단한 수식전개로 양해법 형태의 펌프용량, 유량, 관경 등의 산정식을 개발할 수 있어

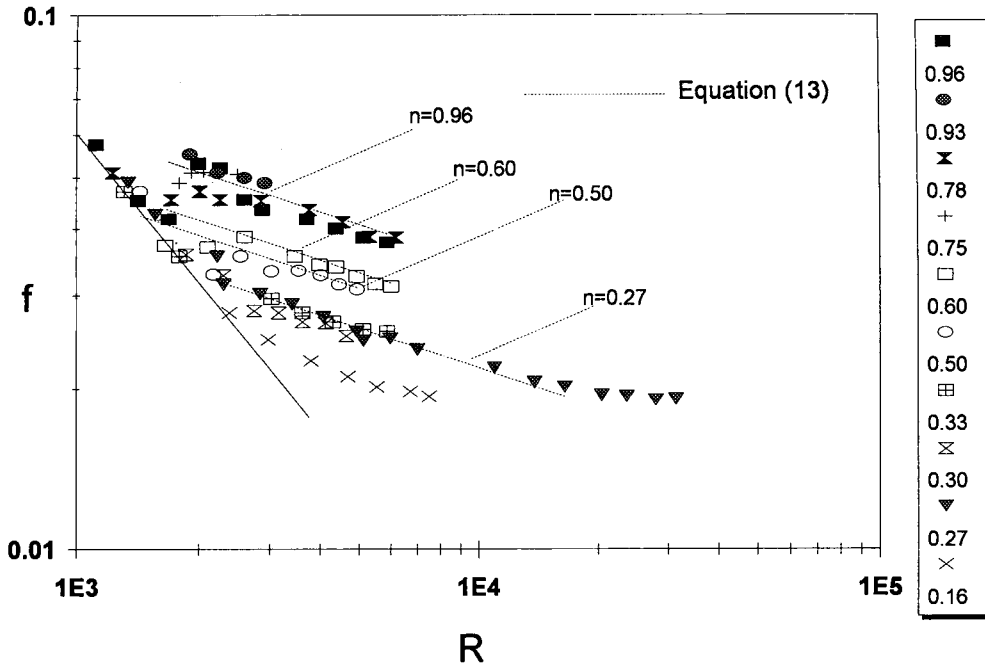


Fig. 2 Distribution of non-Newtonian slurry's friction factor.

매립토 유송시 최적 펌프용량과 관로의 적합한 관경을 시산법이 아닌 양해법으로 쉽게 산정해낼 수 있다.

4. 매립토 유송을 위한 적합 관경 및 유량

펌프동력은 손실수두 h_f 를 구함으로써 산정될 수 있고, 다음과 같다.

$$h_f = f \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g} \tag{15}$$

여기서 l 은 관의 길이, d 는 관경, V 는 평균유속, g 는 중력가속도이다. 또한, 펌프동력 P 는 다음식으로 산정된다.

$$P = \rho g Q h_f \tag{16}$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도이며, Q 는 유량이다. Newtonian slurry의 경우 관마찰계수 f 는 식 (7)로부터 쉽게 산정되며, non-Newtonian slurry인 경우는 식 (13)으로부터 산정된다.

준설도의 펌프유송시 관경이 정해져 있고, 유송되어 질 준설토 유체의 농도를 알고 있을 때, 매립토의 유출량은 다음과 같은 무차원수 B 를 도입하면 굳이 반복

시산법을 쓰지 않아도 양해법으로 쉽게 구할 수 있다.

$$B = \frac{1}{v} \left[\frac{Pd^2}{\rho} l \right]^{1/3} \tag{17}$$

여기서 v 는 동점성계수이다.

상기 무차원수 B 는 유동훈(1995)에 의해서 유출률 산정을 위하여 도입되었으며 동력-관경 무차원수라 칭한다. 동력관경수 B 로부터 레이놀즈수를 쉽게 구해낼 수 있고, 레이놀즈수는 유속을 포함하고 있으므로, 유속(V)과 유출량(Q)을 양해법으로 직접 산정해 낼 수 있다.

Newtonian slurry인 경우, 식 (7)을 식 (15)에 대입하고 이를 다시 식 (16)에 대입하면 다음과 같이 미지수인 레이놀즈수 R 과 동력-관경수 B 의 관계가 구해진다.

$$R = \gamma B^\delta \tag{18}$$

여기서

$$\gamma = \left[\frac{8}{\eta\pi} \right]^{\delta/3} \tag{19}$$

$$\delta = \frac{3}{(3+\kappa)} \tag{20}$$

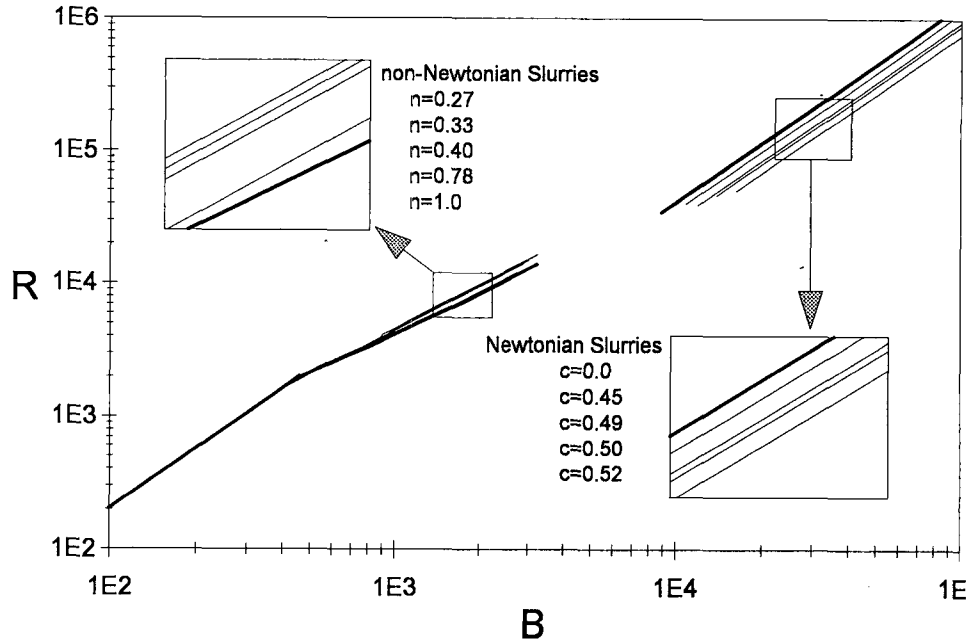


Fig. 3. Variation of R against B for slurry flow.

레이놀즈수가 150,000 이하인 완난류 구간에서 $\kappa = -1$ 이고, η 는 농도의 함수로서 식 (8)을 이용하여 구한 수치를 대입하면 된다. Fig. 1에 도시된 바와 같이 $0.45 < c < 0.52$ 범위에서 $\kappa = -1$ 인데 이때 $\gamma = (8/\eta \pi)^2$ 이며, $\delta = 1.5$ 이다.

또한, non-Newtonian slurry의 경우 관마찰계수는 식 (13)에 의하여 계산되어질 수 있으며 ω 는 power law index(n)의 함수로써 식 (14)에 의하여 계산된다.

$$\gamma = \left[\frac{8}{\omega \pi} \right]^{\delta/3} \quad (21)$$

$$\delta = \frac{3}{(3+\kappa)} \quad (22)$$

χ 값은 레이놀즈수가 15,000 이하인 완난류 구간에서 $-1/4$ 이다. 이때 $\gamma = (8/\omega \pi)^{0.364}$, $\delta = 1.091$ 이 된다.

다음에 제시되는 Fig. 3은 동력-관경 무차원수에 대한 레이놀즈수의 변이를 나타낸 결과이며, Newtonian slurry의 경우는 농도에 따라서, non-Newtonian slurry의 경우는 n값에 따라 변이하고 있음을 보이고 있다. 원칙적으로 $n=1$ 인 non-Newtonian slurry와 $c=0$ 인 Newtonian slurry는 일치해야 되는데 도시된 바와 같이 정확히 일치하지는 않는다. 이는 특히 Newtonian slurry의 경우 농도의 감소에 따라 지수 κ 가 $-1/4$ 에 접

근하는 경향을 반영하지 않은 결과인데 추후 이에 대한 재조정이 필요하다.

만약 매립토를 유송시키는 관로가 지형조건 등과 같은 이유로 기울어져 있다면 관내의 흐름은 중력에 의하여 자연유하될 수 있으며, Chezy 식과 경사후루드수를 이용하면, 시산법에 의해 복잡하게 계산을 하지 않고도 양해법으로 기울어진 관로에서의 유량을 구할 수 있다.

먼저 Chezy식을 표기하면 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{2gdi}{f}} \quad (23)$$

여기서 i 는 동수경사 (h_f/l)이다.

상기식에 관마찰계수 산정식 (7) 또는 식 (13)을 적용하여 자연경사관의 유량을 산정하는 식을 개발할 수 있는데 Newtonian slurry flow인 경우 식 (7)을 식 (23)에 대입하여 다음과 같은 경사후루드수 F의 산정식이 유도된다.

$$F = \left(\frac{2}{\eta} \right)^{\frac{1}{(2+\kappa)}} \cdot N^{\frac{-\kappa}{(2+\kappa)}} \quad (24)$$

여기서

$$F = \frac{V}{\sqrt{gdi}} \quad (25)$$

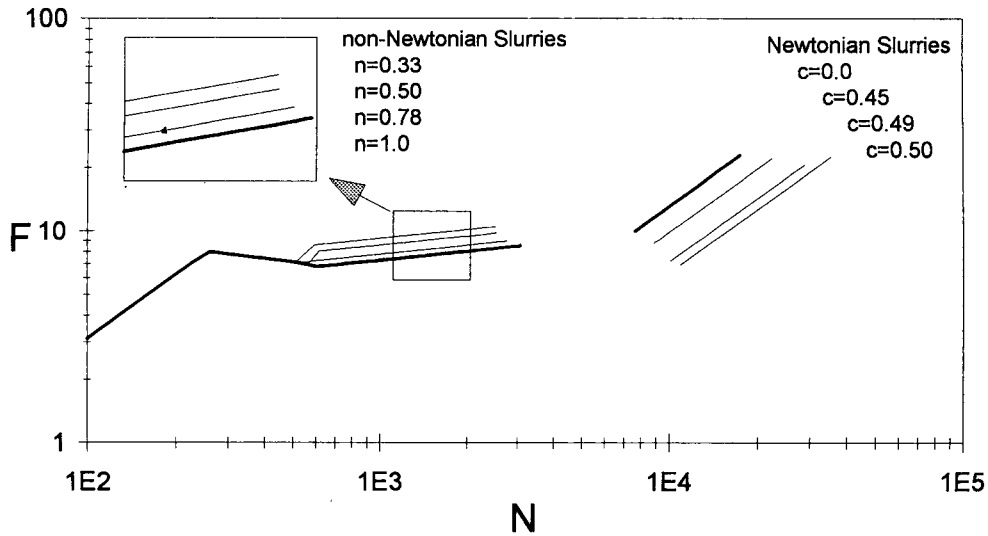


Fig. 4. Variation of F against N for slurry flow.

$$N = \frac{R}{F} = \frac{\sqrt{gd^3i}}{v} \tag{26}$$

상기식 (25)는 일반 후루드수에 기울기를 포함하여 표기가 간단할 뿐만 아니라 보다 일반적인 형태로 표현이 가능하며, N도 무차원수로 레이놀즈수를 경사후루드수로 나눈 수이다. 상기식에서 레이놀즈수가 150,000 이하인 완만류구간에서 $\kappa = -1$ 이고, η 는 농도의 함수로서 식 (8)로 구해진다. $\kappa = -1$ 이면 $F = 2N/\eta$ 이다.

non-Newtonian slurry에서도 Newtonian slurry와 마찬가지로이며, 이 경우 F값의 계산은 식 (13)을 식 (23)에 대입하여 구하여지며 다음과 같다.

$$F = \left(\frac{2}{\omega}\right)^{\frac{1}{2+\chi}} \cdot N^{\frac{-\chi}{2+\chi}} \tag{27}$$

상기식 (27)에서 레이놀즈수가 15,000 이하일 때 $\chi = -1/4$ 이며, ω 는 power law index(n)의 함수로서 식 (14)를 이용하여 산정된다. $\chi = -1/4$ 일 때 $F = (2/\omega)^{0.571} N^{0.143}$ 이다.

Fig. 4는 slurry flow의 n값과 c값에 대하여 레이놀즈-경사후루드 무차원수 N에 대한 경사후루드수 F의 변이를 실험자료들을 토대로 해서 그린 결과이다. 이상의 결과에서도 원칙적으로 n=1인 non-Newtonian slurry와 c=0인 Newtonian slurry는 일치해야 되는데 도시된 바와 같이 일치하지 않는다. 이는 특히 Newtonian slurry의 경우 농도의 감소에 따라 지수 κ 가

-1/4에 접근하는 경향을 반영하지 않은 결과인데 실험 자료의 추가 확보 후 이에 대한 재조정이 필요하다.

준설토를 유송시킬 때 펌프의 동력, 유량과 농도를 알고 있다면 새롭게 제시된 무차원수들을 이용하여 복잡한 시산법을 거치지 않고 관경을 쉽게 계산해낼 수 있다(유, 1995). 관경을 구하기 위한 근사식 개발에 있어 도출되는 무차원수는 S와 E이다. S는 레이놀즈수 R에 역비례하는 무차원수로서 다음과 같다.

$$S = \frac{vd}{Q} \tag{28}$$

E도 무차원수로서 식 (29)와 같으며 이를 동력-유출 무차원수라고 칭한다.

$$E = \frac{1}{v} \left(\frac{PQ^2}{\rho l}\right)^{1/5} \tag{29}$$

Newtonian slurry flow인 경우 식 (7)을 식 (15)와 식 (16)에 도입하면 무차원수 S와 E는 다음과 같은 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$S = \epsilon E^\xi \tag{30}$$

여기서

$$\epsilon = \left[\frac{\eta}{2} \left(\frac{4}{\pi}\right)^{2+\kappa}\right]^{-5/5} \tag{31}$$

$$\xi = \frac{-5}{5+\kappa} \tag{32}$$

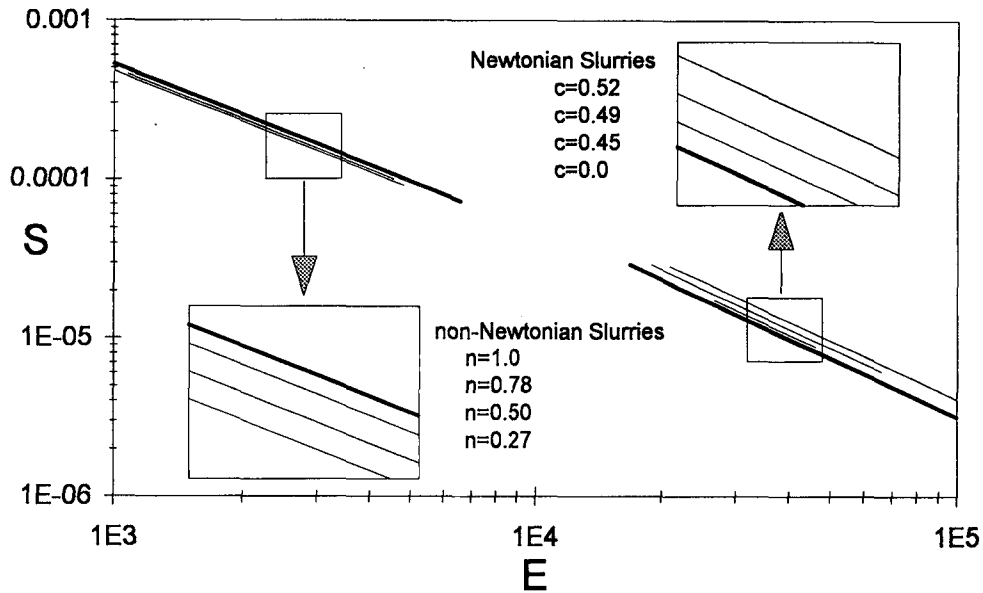


Fig. 5. Variation of S against E for slurry flow.

Fig. 5는 동력-유출 무차원수에 대한 레이놀즈 역수의 변이를 나타낸 그림이며, Newtonian slurry는 농도의 변이에 따라서, non-Newtonian slurry의 경우는 n값에 따라 변이하고 있음을 보이고 있다. 굵은선으로 표시된 선은 각각 c=0.0 또는 n=1.0일 때를 나타내며 이때에는 slurry flow의 성질을 가지지 않으며 물과 같은 일반적인 유체의 경우를 나타낸다.

상기식 (31)에서 η는 농도의 함수로써 식 (8)을 이용하여 구해지며, 식 (32)에서 κ값은 레이놀즈수가 15,000 이하인 완난류 구간에서 -1이며 κ=-1일 때 $S = (2\eta/\pi)^{0.2} E^{-1.25}$ 이다. 이렇게 구해진 레이놀즈수의 역수 S로부터 유량 Q를 알고 있으므로 쉽게 적합한 관경을 산정해 낼 수 있다.

non-Newtonian flow인 경우 관경을 산정하고자 할 때 펌프의 동력과 유량(Q)과 power law index(n)을 알고 있다면, Newtonian flow의 경우와 마찬가지로 식 (30)으로부터 관경을 쉽게 계산해 낼 수 있으며 이때 ε값과 ξ의 산정식은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \left[\frac{\omega}{2} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{2+\chi} \right]^{-\xi/5} \quad (33)$$

$$\xi = \frac{-5}{5+\chi} \quad (34)$$

상기식 (33)에서 ω는 power law index(n)의 함수로 식

(14)를 이용하여 구해지며, 식 (34)에서 χ값은 레이놀즈수가 15,000 이하인 완난류 구간의 non-Newtonian flow에서 χ=-1/4이며 χ=-1/4일 때 $S = (0.328\omega)^{0.21} E^{-1.05}$ 이다. 이상의 non-Newtonian slurry flow 경우에 대한 S와 E의 관계도 Fig. 5에 도시되어 있다.

5. 결론 및 토의

관로를 통하여 해저에서 준설한 준설토(slurries)를 펌프유송할 경우에 대하여 펌프동력, 유량 그리고 관경을 양해법으로 산정하는 수식을 개발하였다. 이를 위하여 준설토를 함유한 유체를 Newtonian slurry와 non-Newtonian slurry로 나누어 각각의 특성에 알맞는 새로운 관마찰계수 산정식을 제시하였다. slurry flow에 관한 새로운 관마찰계수 산정식은 지수함수 형태를 가졌는데, 이를 적합한 관련식에 적용하면 구하고자 하는 물리량에 대하여 여러번 시산하여야 하는 반복과정을 굳이 거치지 않고도 원하는 해를 바로 구해낼 수 있게 되었다.

그러나 새로이 제시된 산정식들은 Newtonian slurry인 경우 레이놀즈수가 150,000 이하이고 농도가 0.45 < c < 0.52본 연구에서 개발된 산정식은 n=1인 non-Newtonian slurry일 때에는 15,000다. 분석된 자료로부터 ω, χ, κ, η 등의 계수만의 수정으로 수식의 확장이

가능하므로 폭넓은 수리자료의 분석만 이루어진다면, 전 수리구간에 걸쳐 유송되는 준설토의 펌프용량, 유출류르 환경 등을 쉽게 결정할 수 있을 것이다.

본 연구에서 개발된 산정식은 $n=1$ 인 non-Newtonian slurry와 $c=0$ 인 Newtonian slurry 조건에서 일치하지 않는데 이는 전적으로 관측자료의 부족 때문이다. 충분한 관측자료가 확보되는대로 이러한 결함을 수정하여야 할 것이며, 수정 완료전까지는 Newtonian slurry인 경우 농도가 $0.45 < c < 0.52$ 의 범위에서 크게 벗어나지 않는 조건에서만 본 연구에서 개발된 산정식을 사용하여야 할 것이다. 또한 대부분의 실험관측자료는 완난류 특성만을 나타내고 있는데, 관경과 유속이 대체적으로 클 것으로 예상되는 현장조건에서는 천이난류나 전난류 현상이 발생할 가능성도 배제할 수 없기 때문에 이에 대한 검토가 요망된다. 만일 이러한 수리특성이 발생할 가능성이 있으면 실험조건을 보다 대형화해야 할 필요성이 있으며, 각 수리특성의 경계조건을 구하고 각 수리조건에서의 관마찰계수 분포 특성을 파악한 후 적합한 관마찰계수 산정식을 개발하여야 할 것이다.

謝 辭

본 연구는 심재문화재단의 재정지원에 의한 "서해안 간척개발에 관한 연구"의 일환으로서 이루어졌으며, 당재단에 심심한 감사를 표합니다.

참고문헌

- 유동훈, 1995. 균일조도관의 양해법 설계 기준식, 한국수자원학회지, 28(5): 175-189.
- Booth, F., 1950. The electroviscous effect in suspensions of solid spheres, *Proc. Roy. Soc.*, 203: 533-551.
- Cheng, D.C. -H., 1984. Flow properties of suspensions of inlet spheres, Report LR 548 (MH) M, Warren Spring Laboratory, Stevenage, U.K.
- Cheng, D.C. -H. and Richmond, R.A., 1978. Some observations on the rheological behavior of dense suspensions, *Rheologic Acta*, 17: 446-453.
- Cheremisinoff, P.N., and Cheng, S.L., 1988. *Civil Engineering Practice*, 2: 251-295.
- Churchill S.W., 1988. *Viscous Flows*, Butterworth Series in Chemical Engineering: 17-89.
- Dodge, D.W. and Metzner, A.B., 1959. Turbulent flow of non-Newtonian system, *AIChE J.*, 5: 189-204.
- Kemblowski, Z. and Kolodziejcki, J., 1973. Flow resistances of non-Newtonian fluids in transitional and turbulent flow, *Int. Chem. Eng.*, 13: 265-279.
- Krieger, I.M., 1972. Rheology of monodisperse alitices, *Advances Colloid Interface Sci.*, 3: 111-136.
- Shook, C.A., 1985. Experiments with concentrated suspensions of particles with densities slightly greater than the carrier fluid, *Can. J. Chem. Eng.*, 63: 861-869.
- Shook C.A. and Roco M.C., 1991. *Slurry Flow*, Butterworth-Heinenmann Series in Chemical Engineering: 1-93.
- Thoma, A.D., 1965. Transport characteristics of suspensions: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles, *J. Colloidal Sci.*, 20: 267-277.