Journal of the Korean Society of Civil Engineers
Vol. 35, No. 5: 00-00/ October, 2015
DOI: http://dx.doi.org/10.12652/Ksce.2015.35.5.0000

ISSN 1015-6348 (Print)
ISSN 2287-934X (Online)
www.kscejournal.or.kr

Geotechnical Engineering **지반공학**

준설토 배송관로 내에서의 개질재 혼합효율에 대한 CFD 해석

박병준* · 강병윤** · 정민철*** · 신재렬****
Park, Byongjun*, Kang, Byungyoon**, Chung, Minchul***, Shin, Jaeryul****

Experiment Study on Mixing Efficiency of Material for Improving Reclamation Soil Quality in Dredging Soil Pipeline using CFD

ABSTRACT

This study utilised Computational Fluid Dynamics(CFD) for preliminary assessment of mixing efficiencies of 2-phase fluids in a pipe at which a slurry flow and an injected solidifier join, for the purposes of reducing trial-and-error-based instances of physical experiments and conducting the overall research in an economical way. Using OpenFOAM®, we simulated behavior of 3-phase fluids under 18 different settings generated by changing diameters of a dredged soil transportation pipe, a quality improving material injection pipe and the confluence angle. While difference in mixing efficiencies amongst the instances was insignificant, discernible boundary layers amongst the materials were observed in all of the instances. In order to break the boundary layers, we designed a substructure inside a pipe and found out that it could remarkably improve mixing efficiencies particularly for short distance applications.

Key words : Dredging, Reclamation, Mixing in the dredging pipe, Mixture ratio

초 록

본 연구는 3차원 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)을 활용하여 준설토 배송관과 개질재 주입관이 합류하여 물성이 다른 이상(2-phase)유체들의 혼합효율을 사전 평가함으로써 관중혼합 양상을 고찰하는 물리실험의 시행착오를 줄이고, 경제적으로 이행하기 위하여 수행되었다. 사용된 CFD 코드는 OpenFOAM®이고, 몇 가지의 기본가정 하에 배송관-주입관의 관경과 합류각을 변화시켜 총 18가지 경우에 대한 삼상(3-phase)유체 거동을 모의하였다. 그 결과 혼합효율에 대한 우열은 있었으나 그 차이는 미미하였고, 모든 경우에서 각 재료 사이의 경계층이 뚜렷하게 형성되었다. 이 현상을 극복하기 위한 보완 실험을 통해 경계층 파쇄(破碎)를 위한 관 내 부속 구조물이 고안되었으며, 본 연구에서 제시된 구조물은 단거리에 혼합효율을 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

검색어 : 준설, 매립, 관중혼합, 혼합효율

* 정회원 · 교신저자 · 한국농어촌공사 농어촌연구원, 공학박사(**Corresponding Author** · Korea Rural Community Corporation · jiwhaja1@ekr.or.kr)
** 정회원 · 한국농어촌공사 농어촌연구원, 공학박사, 토질 및 기초 기술사 (Korea Rural Community Corporation · rriyoon@ekr.or.kr)
*** 한국농어촌공사 농어촌연구원, 공학박사 (Korea Rural Community Corporation · jmc@ekr.or.kr)
**** (주)넥스트폼 기술연구소, 공학박사 (Nextfoam Co., Ltd. · jrshin@nextfoam.co.kr)

Received March 13, 2015/ **revised** August 24, 2015/ **accepted** August 25, 2015

Copyright © 2015 by the Korean Society of Civil Engineers
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

1.1 배경

최근 국내 매립공사는 실트 폰드(silt pond)의 대형화 추세로 준설과정에서 폰드 내 침강거리 밖에서는 준설과정에서 준설수에 의해 부유된 세립분 토사가 여수토(spillway) 부근에서 모여 초(超)연약지반을 형성하는 실트 포켓(silt pocket) 현상이 발생한다. 또한, 최근 준설시 환경적 문제를 차단하기 위해 법적강화와 먼 바다의 준설을 자제하는 움직임으로 먼 바다의 양질의 매립토 확보의 어려움이 있어 항로 및 하천하류의 퇴적토를 준설하여 매립하는 경우가 많아진다. 따라서 세립분 토질에 의해 장기적 방치와 방치 후 연약지반 개량공사를 위해 장비 진입을 목적으로 표층처리공법을 시행해야 하는데 이는 공사기간 및 공사비 증가의 요인으로 작용한다.

기존의 국내외 준설-매립공사는 준설 장비의 노후화로 준설 효율이 저하되어 이를 개선하기 위한 연구에 집중적으로 투자하는 경향이 있으며, 준설-매립 신공법에 대한 투자는 미비한 실정이다 (Fig. 1). 이를 위해 세립분 토질로 준설매립 공사를 시행할 경우 발생하는 문제점을 개선하기 위해 매립지 조기 활용을 목적으로 관중혼합 개질(改質)처리 기술개발이 절실히 요구되는 실정이다.

준설이송 관중혼합 처리란 Fig. 2와 같이 불량한 준설원을 배사관 이송 후 매립지에서 별도 개질하는 것이 아니라 준설토 이송 중에 관 내로 준설토 특성에 맞는 적절한 재료를 투입하여 관 내에서 토질을 개선하는 공정을 말한다. 관중혼합 공법과 관련하여 국내에서 시공한 사례는 전무한 실정이며, 기존의 준설-매립공사는 준설선과 조합한 단순한 매립공정으로 공사를 시행한 것으로 연구가 부족한 것으로 판단된다. 다시 말해, 과거의 준설-매립공사는 환경문제를 크게 고려하지 못하는 사회적 인식으로 양질의 토사 확보가 용이하고, 불량한 준설-매립재료로 시행할 경우 매립지를 장기적으로 방치하여 강도증진을 시행 후 추가적으로 표층처리 공법을 시행하여 매립지를 조성하는 방식으로 아주 장기적인 공기가 요구되는 단점이 있다.

해외에서의 관중혼합 처리공법 사례는 2002년 일본 아이치켄(愛知県) 이세만(伊勢湾)의 해상매립으로 조성된 츄부국제공항(中部国際空港)의 경우에서 찾아볼 수 있다. 이 경우 먼 바다 대수심 조건에서 공항건설을 위해 양질의 토사를 그랩(grab) 준설 방식을 이용하여 토취한 준설토를 바지선(barge ship)을 이용하여 매립 대상지까지 이동한 후 특정부위(구조물 배면, 호안 배면, 매립지 특정 성토지반 등)에 시멘트 플랜트 시설과 조합하여 관중으로 이송하는 방법으로 매립지에 배토하여 높은 강도를 발휘도록 하는 조건으로 시공하여 관중혼합 토체 자체의 변위를 최소화하는 방법으로 이루어졌다.

그러나 국내 실정에서의 관중혼합은 매립지 조기 활용이 가능하도록 매립공정에서 발생하는 방치기간 및 표층처리 공법의 처리기간을 최소화하는 기술을 개발하여, 매립지 전체 개질이 아닌 매립지 내 실트포켓의 저감, 준설매립 중 공정관리를 위한 장비 진입을 위한 표층강도 확보가 목적이며, 이러한 과정에서 현실적으로 관중혼합의 효율에 영향을 미치는 인자들에 대한 고찰이 필요하게 되었다.

Fig. 1. Problems in Dredging and Reclamation (Saemanguem Industrial Complex Reclamation Site)

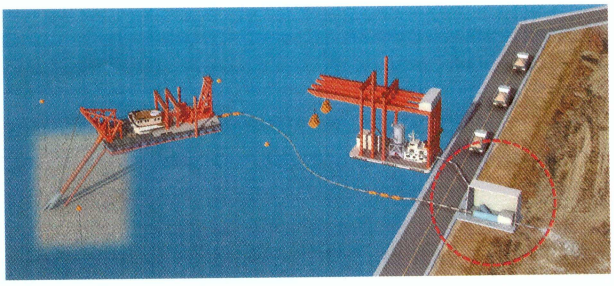


Fig. 2. Schematic of Mixing in Pipe Method for Modification of Dredged Soil Characteristic

1.2 목적

대부분의 준설현장에서의 준설토 이송은 준설된 흙을 양수기와 배송관을 이용하여 물과 흙의 혼합물 형태로 수력학적 배송을 하는 방법으로 이루어지고 있다. 이 때 배송관 내 형성되는 물-흙 혼합물의 흐름은 비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid) 유체 혹은 빙햄-소성(Bingham plastic) 등과 같이 복잡한 이상(2-phase) 흐름의 구조를 가질 수 있으며, 이러한 시간 독립적(time-independent behavior) 유체들의 전단응력(shear stress)과 전단율(shear rate) 사이의 관계를 알기 쉽게 도식화 하면 Fig. 3과 같다.

준설 배송관로를 통하여 압송되는 유체의 물리적 상태는 물과 흙이 혼합된 상태이기 때문에 흙의 비중과 물-흙의 농도, 배송관의 직경과 압송속도가 변화하면 관내 유황과 마찰손실 등 물리적 인자들의 다양한 변화가 발생한다. 이러한 물-흙 혼합물의 배송흐름 영역에 대한 메커니즘은 많은 연구에 의하여 실험적 검증 노력들이 있었으나 아직까지 명확하게 규명되지 않고 있는 실정이고, 여러

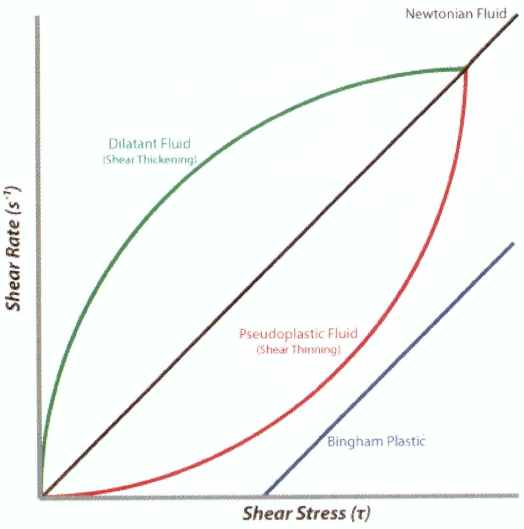


Fig. 3. Rheology of Time Independent Fluids

가지 지배 인자를 고려한 물리실험의 수행은 많은 시간과 비용을 요구한다.

본 연구는 준설토 배송관과 개질재 주입관이 합류되는 지점을 3차원 전산유체역학(CFD, Computational Fluid Dynamics)으로 물성이 다른 이상(2-phase)유체들이 혼합되는 과정을 모사하여 그 양상과 혼합효율에 영향을 미치는 인자를 분석하고 개선안을 검토함으로써 경제적인 물리실험을 위한 가이드라인(guideline) 수립에 기여하는데 그 목적이 있다.

2. 기본가정

준설토 이송관 내에 형성된 물-흙 혼합물 형태의 슬러리(slurry) 이송은 Figs. 4 and 5와 같이 관의 단면에 형성된 입자의 분포에 따라 분류할 수 있다. 균일분포 흐름(homogeneous flow)은 토사 입자들이 각 입경에 고루 혼합되어 등분포하는 경우이며, 비균일분포 흐름(heterogeneous flow)은 토사 입자들이 각각 입경별로 층을 이루고 있으나 모두 이송이 되는 경우로 관저부로 갈수록 흐름이 느려지는 형태를 가지게 된다. 이동상 흐름(flow with a moving bed)은 침강된 토사가 퇴적층을 이루고 있으나 그 상(床, bed)이 유동에 따라 변화가 있는 경우이고, 정지상 흐름(flow with a stationary flow)은 퇴적층이 형성되어 있으나 퇴적층의 상변화가 없는 경우라 할 수 있다.

본 연구의 관심영역은 준설토 배송관로와 개질재 주입관로가 합류되는 위치이고, 해당 위치에서의 혼합양상을 관심대상으로 한다. 여기서, 개질재 주입량은 준설토 배송관로를 통하여 배송되는 물-흙 혼합물 중 흙의 중량에 따른 배합비를 적용하게 되는데, 현실에서는 준설 현장의 토성(입경, 중량, 함수비 등)에 따라 여러 가지 경우가 발생할 수 있으므로 다음과 같은 가정을 수립하여 연구의 집중도를 높였다.

첫째, 준설토 배송관로와 개질재 주입관로 경계부에서 입자들은 균일하게 분포하여 물과 함께 유입된다. 배송관로에서 침강으로 인한 재료분리는 배송속도가 느리거나 함수율이 낮은 경우에 해당하므로 본 연구에서는 모형화 된 준설토 배송관로의 유입부 이전에서 재료분리 발생은 고려하지 않았다.

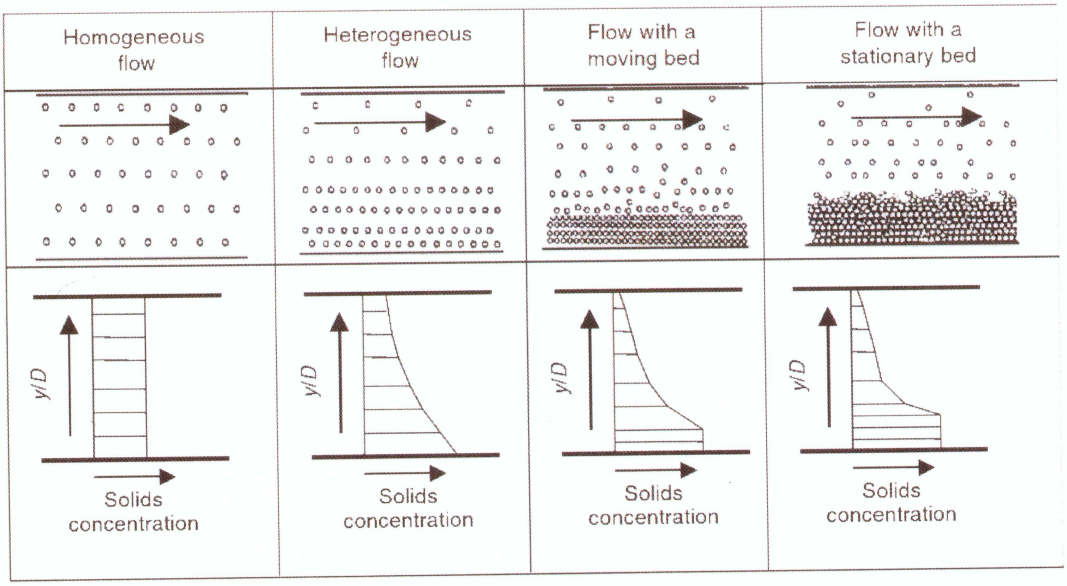


Fig. 4. Illustration of Particle Distributions and Solids Concentration Profiles in Pipe for Different Slurry

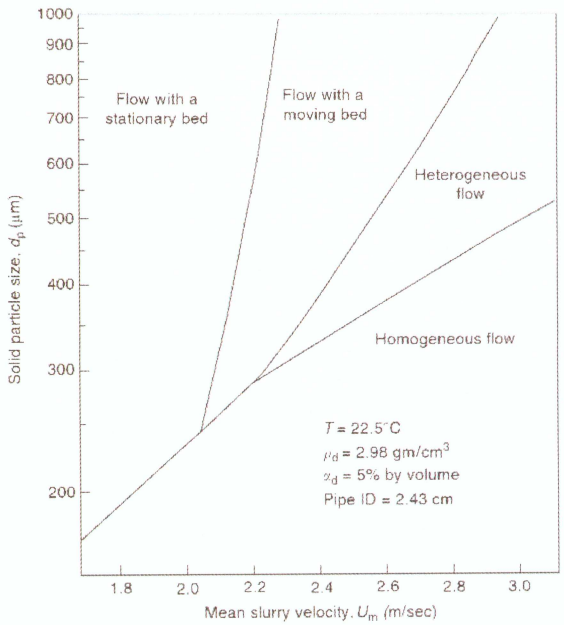


Fig. 5. Flow Regime Diagram for Slurry Flow in 25mm Pipe

둘째, 개질재 주입량은 준설토 배송관에 형성된 물-흙 혼합물 중 흙의 함량(중량)에 따라 설계된 배합비를 준수한다. 만약, 동일 관경 조건에서 주입유속을 임의로 증가시키면 시간당 재료 주입량이 증가하므로 배합비가 성립되지 않음을 유의한다.

셋째, 흙은 비균질 입자들의 혼합물이지만 CFD에서 물과 섞여 있는 흙의 입자들을 모두 모형화 하는 것은 현실적으로 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 입상체의 입경은 무시되나 물과 혼합된 상태에서의 비중과 점성은 고려한다. 따라서 각 상의 거동은 독립성을 유지하되 입상체 입경은 모두 등가환산으로 취급된다.

3. 적용코드

3.1 OpenFOAM®

OpenFOAM®(Open Field Operation and Manipulation)은 범용 3차원 전산유체역학 코드로 1993년 영국의 Imperial College의 Gosman 교수 연구실에서 FOAM이라는 이름으로 Henry Weller와 Hrvoje Jasak에 의하여 C++ 언어 기반의 CFD 솔버(solver)를 목적으로 개발이 시작되었고, 2004년 OpenFOAM®으로 개명하고 소스(source)가 공개되어 지속적인 보완이 진행되고 있다.

OpenFOAM®은 라이브러리(library) 형태로 개발되며 솔버는 사용자가 직접 개발할 수 있다. 이 라이브러리들은 해석하고자 하는 편미분 방정식과 최대한 유사한 형식으로, 지배방정식을 잘 이해하고 있다면 C++ 언어에 대해 자세히 알지 못하더라고 쉽게 소스 코드를 수정할 수 있으며 그 예는 Table 1과 같다.

OpenFOAM®은 또한 C++ 라이브러리들의 소스 파일 뿐 아니라 사전에 컴파일(compile)된 많은 어플리케이션(application)들을 함께 제공하는데, 솔버와 유틸리티(utility)로 구분된다. 기본적으로 제공되는 표준 솔버들은 특정 문제에만 맞도록 만들어져 있으며, 비압축성유동, 압축성유동, 화학반응, 다상유동, 구조해석, 전자기장해석, 분자동역학해석 등 80여 가지를 지원하고, 유틸리티들은 전·후처리, 데이터(data) 파일 관리, 병렬연산 등을 지원한다. Fig. 6은 OpenFOAM®의 구조에 대한 개요도이다.

Table 1. Equation Representation

Equation	$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot \Phi \mathbf{U} - \nabla \cdot \mu \nabla \mathbf{U} = -\nabla p$
Code Representation	solve (fvm::ddt(rho, U) + fvm::div(phi, U) - fvm::laplacian(mu, U) == -fvc::grad(p));

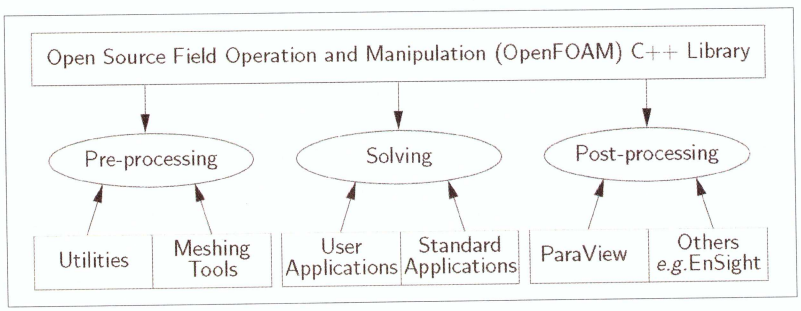


Fig. 6. Overview of OpenFOAM Structure

3.2 적용솔버 및 기본이론

본 연구에서는 물, 공기, 그리고 연속상으로 간주할 수 있는 상의 거동을 해석하여야 하므로 OpenFOAM®이 사전 컴파일 하여 제공하는 80여개의 솔버 중 multiphaseEulerFoam을 사용하였다. 이 솔버는 열-전도를 포함한 압축성 다상흐름의 해석에 이용된다.

다상 모형은 다상 유동의 거동을 서술하기 위해 질량 보존과 운동량 보존 방정식에 기반하고 있다. 이들 방정식은 평균화 절차를 거치게 되고 이로부터 상 분율로 알려진 가 평균화 절차를 통해 나타난다. 방정식의 평균화를 통해 보존방정식의 추가 항들이 모형화 된다. 다상 모형에 대한 자세한 이론 및 식에 대해서는 Ishii (1975), Drew and Prassman (1998), Bove (2005)를 통해 확인할 수 있다.

본 연구에서 각 상의 경계면 인장응력 효과가 중요하지 않다면 임의의 지점에서 모든 상들은 같은 압력을 갖는다고 가정할 수 있다. 이 경우 평균화된 다상 유동 방정식은 다음과 같다.

• 질량보존

$$\frac{\partial \alpha_\phi \rho_\phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\phi \rho_\phi \mathbf{U}_\phi) = 0 \tag{1}$$

여기서, α는 체적분율, ρ는 밀도, 하첨자 ϕ는 상의 개수, 그리고 $\mathbf{U}_\phi$는 각각 상의 속도이다.

• 운동량보존

$$\frac{\partial \alpha_\phi \rho_\phi \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_\phi \rho_\phi \mathbf{U}_\phi \mathbf{U}_\phi) = \nabla \cdot (\alpha_\phi \mathbf{T}_\phi^{eff}) + \mathbf{M}_\phi + \alpha_\phi \rho_\phi \mathbf{g} \tag{2}$$

여기서, $\mathbf{M}_\phi$는 각각 상에 대한 운동량 교환, $\mathbf{g}$는 중력 가속도이다. 우변의 확산항에서 $\mathbf{T}_\phi^{eff}$는 ϕ상에 대한 점성텐서와 난텐서로 구성된 유효텐서를 나타낸다. 뉴턴 함수(Newtonian function)의 형태를 사용하여 모델화 된 것을 사용하고 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{T}_\phi^{eff} = -p_\phi \mathbf{I} + \tau_\phi^{eff} \tag{3}$$

$$\tau_\phi^{eff} = \mu_\phi^{eff}\left[2\mathbf{D}_\phi - \frac{2}{3}(\nabla \cdot \mathbf{U}_\phi)\mathbf{I}\right] - \frac{2}{3}\rho_\phi k_\phi \mathbf{I} \tag{4}$$

$$\mathbf{D}_\phi = \frac{1}{2}\left[\nabla \mathbf{U}_\phi + (\nabla \mathbf{U}_\phi)^T\right] \tag{5}$$

여기서, p_ϕ는 각 상의 압력, τ_ϕ^{eff}는 유효텐서, μ_ϕ^{eff}는 유효점성, k_ϕ는 ϕ상의 난류 운동 에너지를 나타낸다. 본 연구에서는 n+1개의 상을 고려하고 그 중 연속상은 하첨자 0으로 표기하고 나머지 분산상에 대해서는 하첨자 n으로 표시한다.

• 운동량 교환

$\mathbf{M}_\phi$은 ϕ상에 작용하는 단위 체적당 힘 또는 경계면을 통한 운동량 교환을 나타낸다. 이 힘은 일반적으로 항력, 양력, 가상질량 등과 같은 상호 작용력으로 나누어 볼 수 있다.

본 연구에서는 액상재, 입상재가 혼합되는 유동으로 입상재의 저항이 크게 나타나는 유동으로 간주하여 저항만 고려한다. 확산상 ϕ의 저항은 다음과 같이 모델화 될 수 있다.

$$\mathbf{M}_\phi = \frac{1}{2}\alpha_\phi A_\phi \rho_0 C_{D,\phi} |\mathbf{U}_r| \mathbf{U}_r \tag{6}$$

$$\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_0 - \mathbf{U}_\phi \tag{7}$$

여기서, $\mathbf{U}_r$는 확산상의 상대속도, $\mathbf{U}_0$는 연속상의 속도, $\mathbf{U}_\phi$는 확산상인 각각 상의 속도를 의미한다. A_ϕ는 상대속도의 법선 방향에 대한 입자의 투영 면적을 입자의 체적으로 나눈 값이고, 구형 입자로 가정하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_\phi = \frac{\frac{\pi d_\phi^2}{4}}{\frac{\pi d_\phi^3}{6}} = \frac{3}{2d_\phi} \tag{8}$$

항력계수, $C_{D,\phi}$는 일반적으로 입자의 크기 d_ϕ에 의존하는 상호관계를 포함하고 있으며, 여기에서는 Schiller와 Naumann의 상호관계를 사용하였다.

$$C_{D,\phi} = \frac{24}{Re}(1 + 0.15 Re^{0.687}) \tag{9}$$

여기서, Re는 입자 직경 d_ϕ과 상대속도 $\mathbf{U}_r$에 기반을 둔 레이놀즈(Reynolds) 수를 나타내며 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$Re = \frac{\rho_0 |\mathbf{U}_r| d_\phi}{\mu_0} \tag{10}$$

전체 상들의 대한 운동량 교환은 평형을 이루어야하기 때문에 연속상과 확산상 사이에서의 경계면 운동량 교환은 다음과 같이

나타낼 수 있다.

$$\mathbf{M}_0 = -\sum_{o=1}^{n} \mathbf{M}_o \tag{11}$$

4. 모형구성

4.1 기하자료(geometry) 및 격자(mesh)의 구성

OpenFOAM®에는 수치모형의 격자를 구성하기 위한 TUI (Text User Interface) 기반의 유틸리티(utility)들이 내장되어 있으나, 사용자가 유연하고 정밀하게 구성할 수 없는 한계도 있어, 본 연구에서는 경미한 기하형상 수정이 많은 여러 안의 모형을 검토해야 하는 특성상 격자작성 작업을 배치(batch)화 할 필요성이 있어 GUI (Graphic User Interface) 기반의 상용 격자작성 소프트웨어(software)를 이용하였으며, 기하형상을 결정하는 매개변수(parameter)들만을 입력하면 기하형상과 격자를 빠르고 수월하게 자동으로 만들 수 있도록 스크립트(script) 파일을 개발하여 활용하였다.

관로의 제원은 Fig. 8과 같이 관로의 중심선을 기준으로 정의되며, 배송관 길이는 합류 전 10m, 합류 후 50m, 주입관 길이는 10m로 구성된다.

4.2 물성(property)의 구성

본 연구에서 다룰 준설토 배송관 및 개질재 주입관 사이의 거동에 적용되는 상은 Fig. 9와 같이 물과 다른 입상체(준설토, 개질재)가 혼합이 되어 있으나, 각 상이 서로 독립적인 형태로 구성되는 형태로 총 3개의 상으로 이루어져 있다. 기본가정에서 언급한 바와 같이 각 상을 구성하는 입자의 입경은 고려되지 않지만, 각 상은 독립적으로 비중과 점성이 적용되므로 그 유동 또한 독립적인 결과로 계산된다.

4.3 경계조건

구축된 모형은 Fig. 9를 참고로 총 5개의 경계면을 가지고 있으며, 정리하면 Table 2와 같다.

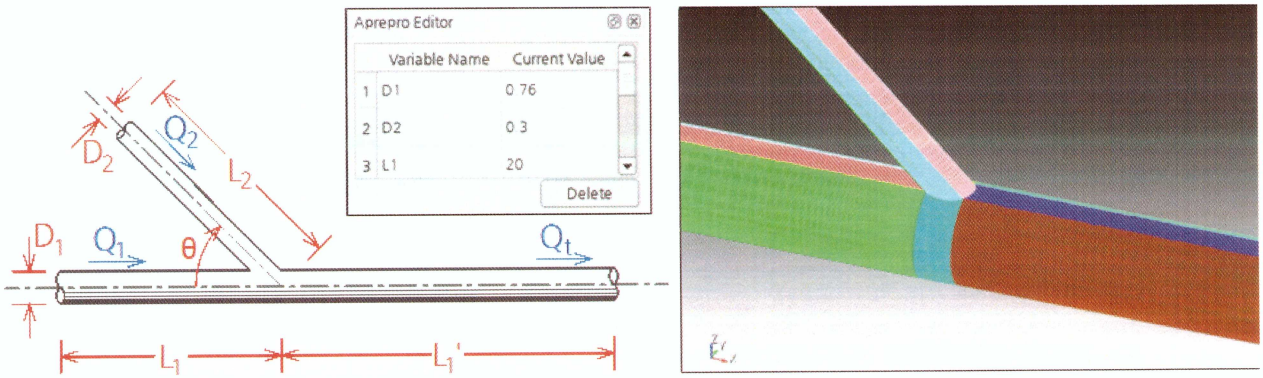


Fig. 7. Generating Geometry & Mesh by Geometry Parameters

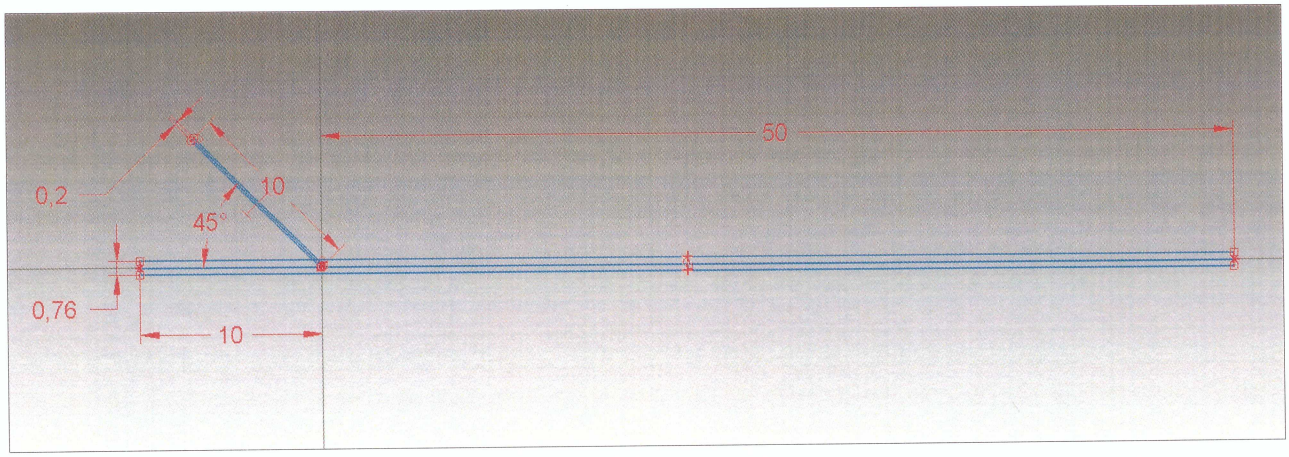


Fig. 8. Dimension of Model (Case10)

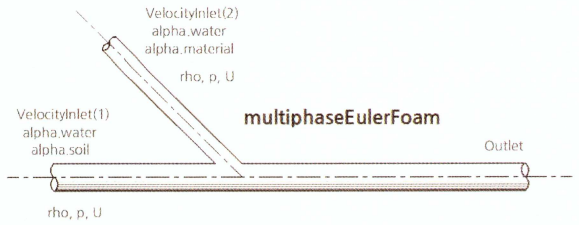


Fig. 9. Layout of Numerical Model

4.4 모의안 수립

준설-매립이 동시에 이루어지는 현장에서의 관중혼합 거동을 모사하기 위하여 본 연구에서는 펌프(pump)준설의 경우와 그랩준설의 경우로 구분하여 접근하였다. 펌프 준설의 경우 수중에서 물과 흙을 동시에 흡입하여 배송하는 구조로 그랩준설에 비하여 상대적으로 대구경 관로를 통해 고함수비의 준설토가 배송이 된다. 따라서 고함수비 흙의 고화처리를 위한 개질재가 주입이 되어야 한다. 반면, 그랩준설의 경우 수중에서 취토 후 일부 탈수 과정을 거치기 때문에 상대적으로 저함수비의 준설토가 배송이 되며, 양질의 매립토로 개량하기 위한 재료의 주입이 요구된다. 본 연구에서는 그랩준설의 경우와 펌프준설의 경우에 대해 배송토-개질재 각 한 쌍의 물성만을 고려하였다.

구성된 모형은 펌프준설의 경우 배송관의 관경을 760mm, 그랩준설의 경우 배송관의 관경을 500mm로 취하였다. 이는 국내 대규모 장거리 준설·매립 현장에 사용되고 있는 제원을 참고로 하여 반영한 것이며, 국내에 아직 적용되지 않은 주입관은 펌프 준설의 경우 200, 250, 300mm, 그랩 준설의 경우 100, 150, 200mm로 변화를 주기로 하였다.

Table 2. Boundary Type of Numerical Models

Location	Inlet of Soil Transportation Pipe (Left)	Inlet of Injection Pipe (Top)	Outlet of Soil Transportation Pipe (Right)	Soil Transportation Pipe	Injection Pipe
Name	In1	In2	out	pipe1	pipe2
Type	inlet	inlet	outlet	wall	wall

Table 3. Scenarios for Numerical Simulation

Case №	Pipe for Transportation								Pipe for Injection								Ang. (°)	Remark
	Pipe Dia. (mm)	Vel. (m/s)	Discharge (m^3/s)			Wtr. Cont. (%)	Ptcl. Dia. (mm)	Ptcl. Den. (t_f/m^3)	Pipe Dia. (mm)	Vel. (m/s)	Discharge (m^3/s)			Wtr. Cont. (%)	Ptcl. Dia. (mm)	Ptcl. Den. (t_f/m^3)		
			Total	Wtr	Soil						Total	Wtr	Soil					
Case01	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	200	2.188	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	45	Grab
Case02	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	200	2.188	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	90	Grab
Case03	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	200	2.188	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	135	Grab
Case04	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	150	3.889	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	45	Grab
Case05	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	150	3.889	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	90	Grab
Case06	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	150	3.889	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	135	Grab
Case07	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	100	8.750	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	45	Grab
Case08	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	100	8.750	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	90	Grab
Case09	500	5.000	0.982	0.895	0.086	400	0.008	1.300	100	8.750	0.069	0.049	0.020	100	0.011	2.300	135	Grab
Case10	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	300	2.355	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	45	Pump
Case11	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	300	2.355	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	90	Pump
Case12	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	300	2.355	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	135	Pump
Case13	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	250	3.392	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	45	Pump
Case14	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	250	3.392	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	90	Pump
Case15	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	250	3.392	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	135	Pump
Case16	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	200	5.299	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	45	Pump
Case17	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	200	5.299	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	90	Pump
Case18	760	5.000	2.268	2.184	0.084	1000	0.008	1.300	200	5.299	0.166	0.121	0.045	100	0.075	1.495	135	Pump

취토된 준설토의 배송속도는 국내 준설현장의 작업일보를 근거로 하여 초기 유속을 산정한 결과 최대 유량 기준으로 12,000HP (760mm)의 경우 5.02m/s, 20,000HP (900mm)의 경우 4.72m/s인 것으로 나타났으며, 시공실적으로 추정한 결과, 배사관 연장, 토질 조건에 따라 변동 폭이 크게 나타나 12,000HP, 평균 준설함수율 700% 기준으로 평균 5.14m/s인 것으로 계산되어 모형의 경계조건에는 5.00m/s로 입력하기로 하였다.

배송관-주입관의 합류로 이루어지는 합류각은 펌프준설, 그랩준설 모두 배송방향 기준으로 45, 90, 135°로 두었다. 주입 조건은 기본 가정에서 언급한 바와 같이 배송관으로 이송되는 흙의 함량에 따른 개질재와의 배합비에 맞도록 주입량이 결정되며, 주입량이 고정되므로 주입유속은 주입관경의 크기가 지배한다. 이와 같은 조건을 조합하여 구성된 모형은 총 18개이며, 상세한 모의 시나리오는 Table 3과 같다.

4.5 판단기준

본 연구의 관심대상인 관 내에서의 각 상별 혼합효율을 판단하는 기준은 구성된 관로 모형의 말단 단면에 형성되는 밀도분포(distribution of density)에 대한 표준편차를 분석하는 방법을 이용하였고, 그 값이 작을수록 상대적으로 개질재의 혼합이 잘 이루어진 것으로 우열을 가리기로 하였다.

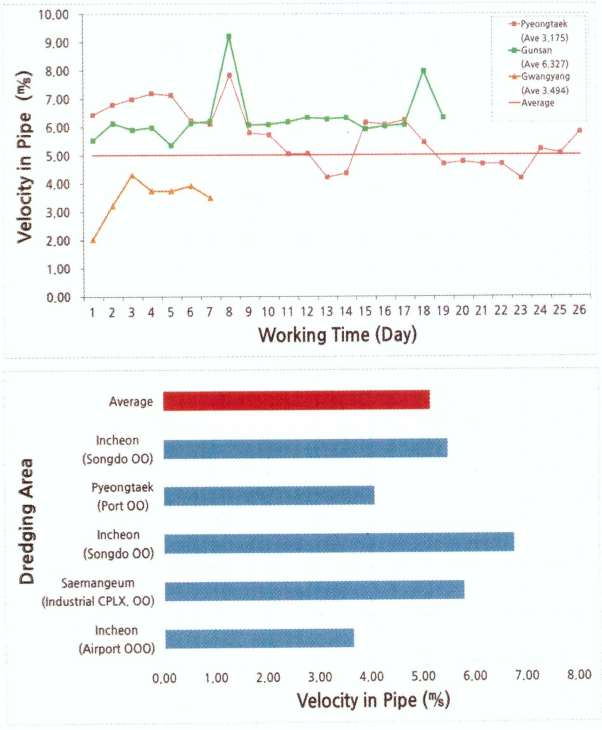
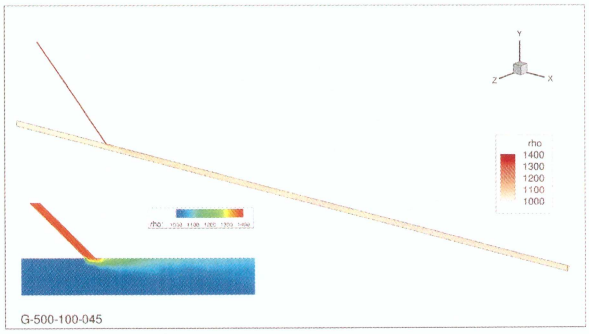


Fig. 10. Estimation Result of Initial Velocity at Each Site

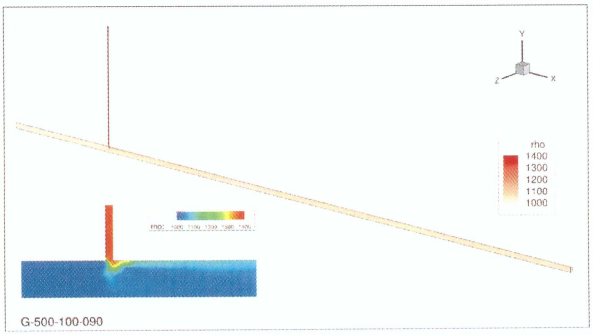
5. 모의결과

5.1 그랩준설

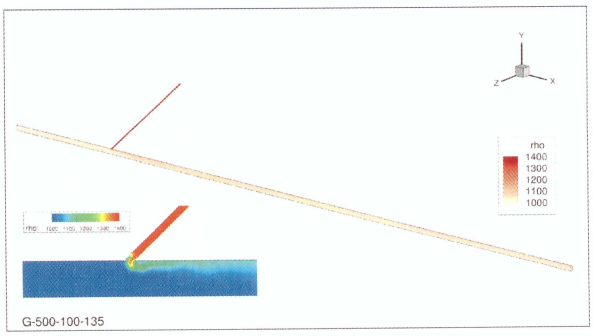
그랩준설의 경우 배송토 함수율은 400%로 배송관의 관경은 500mm이고, 주입재 입경은 0.011mm, 주입관 관경은 100mm, 150mm, 200mm 세 가지 종류이며, 이들이 합류되는 조건에서 합류각은 각각 45°, 90°, 135°인 경우로 모의되었다. 해석결과를 살펴보면 Figs. 11~13과 같이 주입관의 관경이 작아질수록 상대적으로 주입 유속이 빨라지기 때문에 두 혼합 유체와의 혼합효율이 상승되는 것으로 나타났으나 그 차이는 미미하였다. 합류각에 따른 혼합의 특성은 합류각이 45°인 경우에 비하여 135°인 경우가 합류 직후 혼합 효율을 높여주는 난류성 거동이 더 많이 발생하나, 합류각



(a) Angle of Confluence – 45° (Case01)

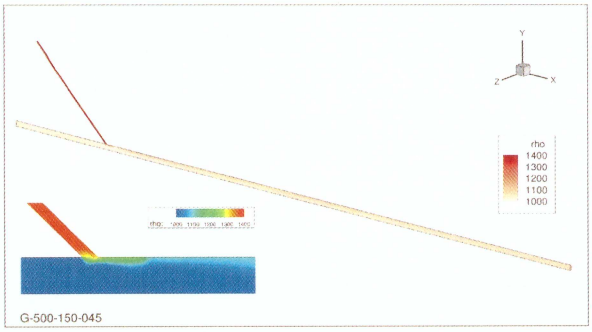


(b) Angle of Confluence – 90° (Case02)

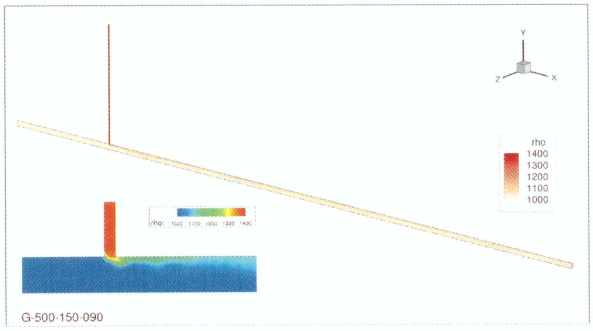


(c) Angle of Confluence – 135° (Case03)

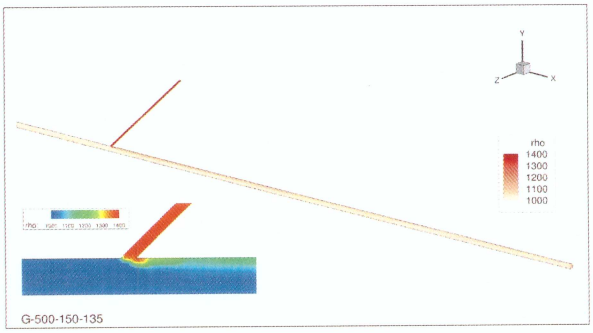
Fig. 11. Density Distribution (Grab, Dia. of Injection Pipe - 100mm)



(a) Angle of Confluence – 45° (Case04)

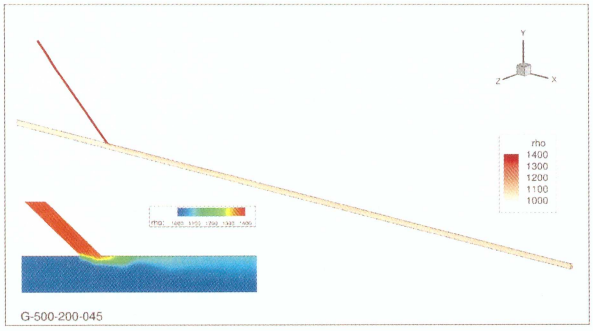


(b) Angle of Confluence – 90° (Case05)

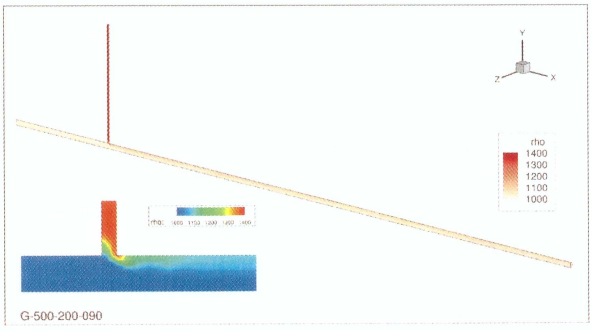


(c) Angle of Confluence – 135° (Case06)

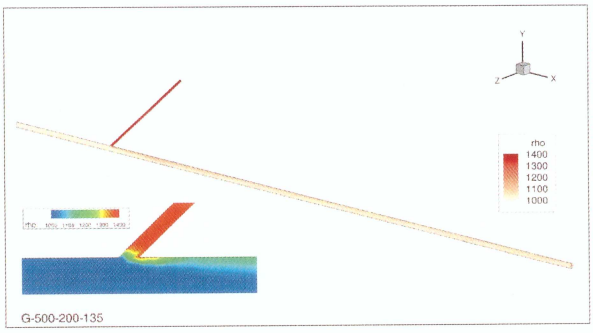
Fig. 12. Density Distribution (Grab, Dia. of Injection Pipe - 150mm)



(a) Angle of Confluence – 45° (Case07)



(b) Angle of Confluence – 90° (Case08)



(c) Angle of Confluence – 135° (Case09)

Fig. 13. Density Distribution (Grab, Dia. of Injection Pipe - 200mm)

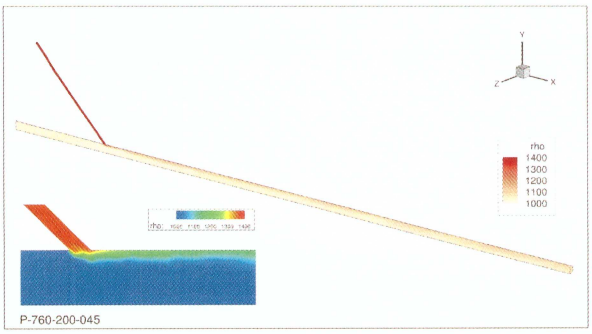
45°, 90°, 135° 모두 와란(渦亂)이 종료된 이후에는 각 상이 혼합되지 않고 배송관의 진행 방향에 따라 평행하게 이동하는 형태로 나타나 혼합효율에 대한 우열은 가릴 수 없었다.

5.2 펌프준설

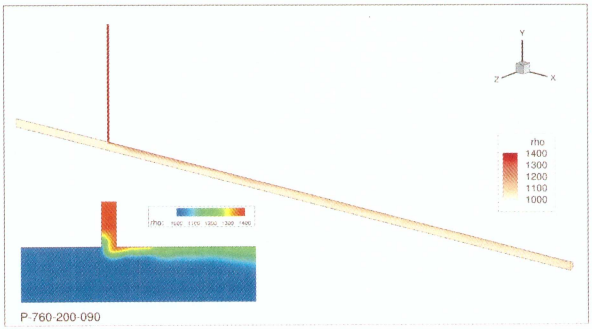
펌프준설의 경우 배송토 함수율은 1,000%로 배송관의 관경은 760mm이다. 주입재 입경은 0.075mm, 주입관 관경은 200mm, 250mm, 300mm 세 가지 종류이며, 이들이 합류되는 조건에서 합류각은 각각 45°, 90°, 135°인 경우로 모의되었다. 해석결과를 살펴보면 Figs. 14~16과 같이 주입관의 관경이 작아질수록 상대적으로 주입 유속이 빨라지기 때문에 두 혼합 유체와의 혼합효율이 상승되는 것으로 나타났으나 그 차이는 미미하였다. 합류각에 따른 혼합의 특성은 합류각이 45°인 경우에 비하여 135°인 경우가 합류 직후 혼합 효율을 높여주는 난류성 거동이 더 많이 발생하나, 합류각 45°, 90°, 135° 모두 와란이 종료된 이후에는 각 상이 혼합되지 않고 배송관의 진행 방향에 따라 평행하게 이동하는 형태로 나타나 혼합효율에 대한 우열은 가릴 수 없었다. 이는 관경, 배송토 함수율 등의 조건이 다른 그랩준설의 경우와 동일한 결과이다.

5.3 결과정리

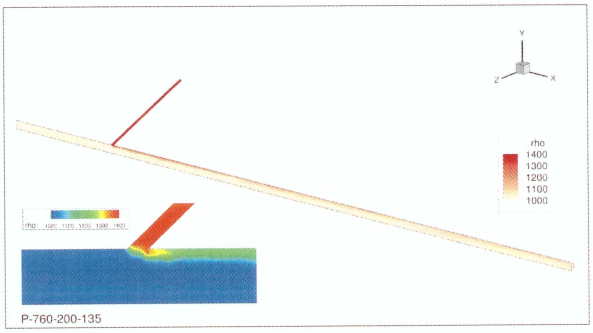
총 18개의 모의 안에 대한 수치해석 결과물로부터 배송관 진행 방향으로 4m 씩 총 10개의 횡단면에서의 밀도분포와 개질재에



(a) Angle of Confluence – 45° (Case10)

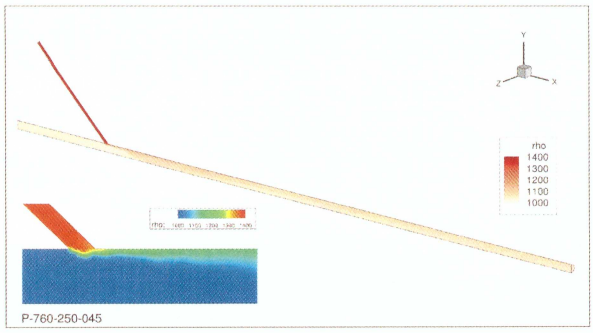


(b) Angle of Confluence – 90° (Case11)

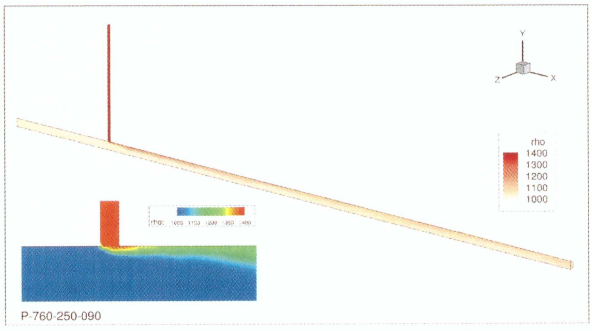


(c) Angle of Confluence – 135° (Case12)

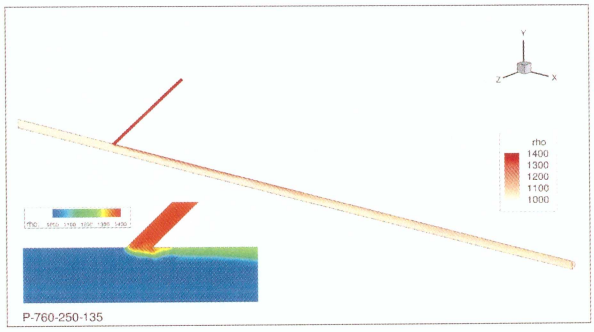
Fig. 14. Density Distribution (Pump, Dia. of Injection Pipe - 200mm)



(a) Angle of Confluence – 45° (Case13)



(b) Angle of Confluence – 90° (Case14)



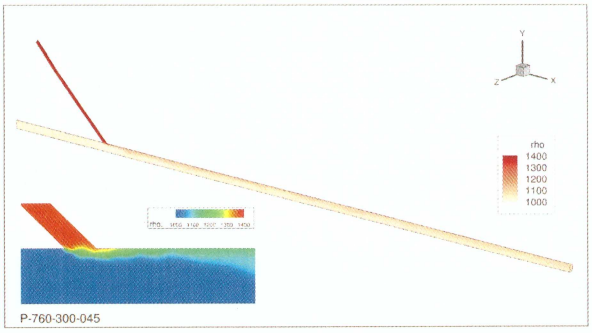
(c) Angle of Confluence – 135° (Case15)

Fig. 15. Density Distribution (Pump, Dia. of Injection Pipe - 250mm)

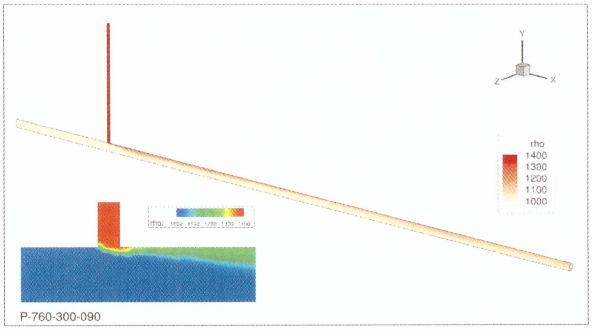
대한 혼합효율을 살펴보았다. 그 결과는 Table 4와 같으며, 검사단면에서 Mixture Ratio 열의 값이 50%일 때 물-혼합재료(준설토와 개질재)가 최대로 혼합된 것을 의미한다. Table 4에 의하면 배송관과 주입관의 직경에 관계없이 모두 개질재의 혼합 효율은 10% 미만인 것으로 나타났다. 주입관이 45°와 90°로 합류하는 경우 효율은 배송관 진행 방향으로 평균 5%를 보여주었다. 특히 135°로 합류하는 경우 합류지점으로부터 하류 4m 지점에서 최대의 혼합효율을 보여주었다. 또한, 배송관 직경에 따라 그랩준설의 경우 유동이 하류로 진행하면서 진행 방향에 따라 거의 일정한 수준인 5%의 혼합효율을 보여주었고, 이와는 달리 펌프준설의 경우 유동이 하류 진행할수록 혼합 효율이 점진적으로 증가하는 것으로 나타나 배송관과 주입관의 합류지점은 4%이지만 합류 40m 이후 지점에서는 6%으로 증가함을 확인할 수 있었다.

6. 개선안 모색

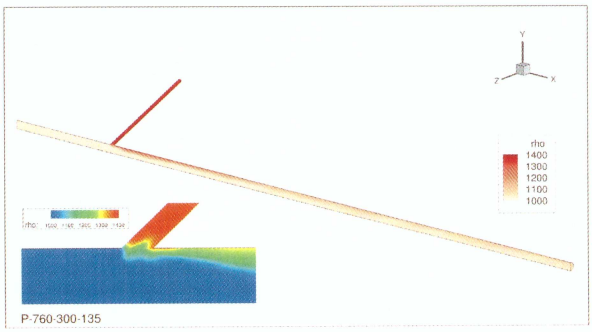
5.3과 같이 몇 가지의 기본가정 하에 배송관-주입관의 관경과 합류각을 변화시켜 총 18가지 경우에 대한 삼상유체의 거동을 모의한 결과 혼합효율에 대한 우열은 있었으나 그 차이는 미미한 것으로 확인되었다. 특히, 모든 경우에서 각 재료 사이의 경계층이 뚜렷하게 형성되었다. 이는 배송토와 개질재의 배합비를 준수하는 조건에서 주입 유속을 올리기 위해서는 관경을 가능한 한 줄여야



(a) Angle of Confluence – 45° (Case16)



(b) Angle of Confluence – 90° (Case17)

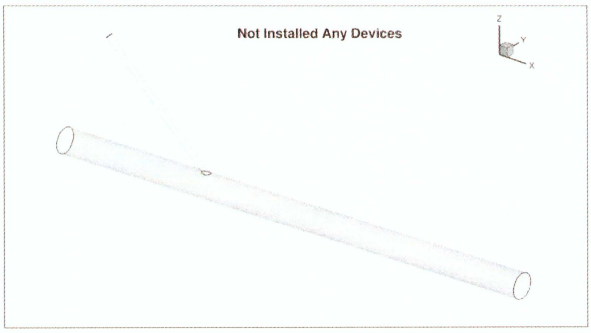


(c) Angle of Confluence – 135° (Case18)

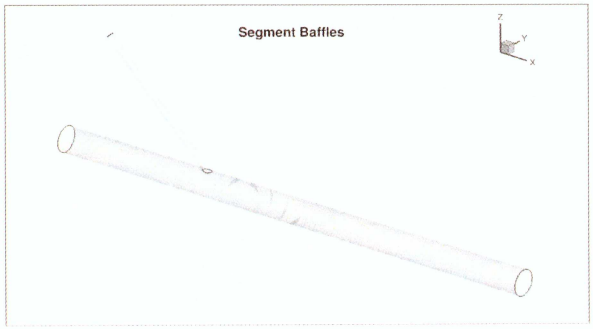
Fig. 16. Density Distribution (Pump, Dia. of Injection Pipe - 300mm)

Table 4. Analysis Result of Mixture Efficiency

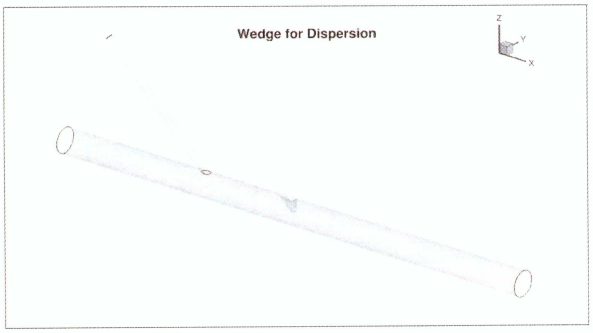
Case №	Volume Fraction of Additives					Total Fraction ③	Mixture Ratio ①/③ (%)	Initial ④	Eta. 1-②/④
	Avg. ①	Max. ②	Min.	Var.	Std. Dev.				
Case01	0.0159	0.0240	0.0063	0.0492	0.0026	0.1821	8.72	0.0572	57.96
Case02	0.0130	0.0251	0.0063	0.0752	0.0031	0.1810	7.20	0.0572	56.04
Case03	0.0133	0.0305	0.0009	0.0009	0.0032	0.1811	7.35	0.0572	46.72
Case04	0.0120	0.0520	0.0004	0.0004	0.0013	0.1806	6.64	0.0858	39.36
Case05	0.0145	0.0543	0.0003	0.0003	0.0032	0.1816	7.99	0.0858	36.75
Case06	0.0183	0.1122	0.0000	0.0000	0.0044	0.1830	9.99	0.0858	-30.74
Case07	0.0176	0.0364	0.0002	0.0002	0.0030	0.1828	9.63	0.1144	68.20
Case08	0.0114	0.0590	0.0001	0.0001	0.0022	0.1804	6.30	0.1144	48.41
Case09	0.0160	0.0832	0.0000	0.0000	0.0040	0.1822	8.81	0.1144	27.31
Case10	0.0148	0.0878	0.0000	0.1626	0.0024	0.1817	8.15	0.0753	-16.65
Case11	0.0113	0.1238	0.0000	0.2397	0.0027	0.1803	6.24	0.0753	-64.49
Case12	0.0119	0.1419	0.0000	0.2428	0.0029	0.1806	6.61	0.0753	-88.48
Case13	0.0167	0.0748	0.0008	0.1089	0.0018	0.1824	9.16	0.0941	20.48
Case14	0.0107	0.1060	0.0000	0.2192	0.0023	0.1801	5.92	0.0941	-12.64
Case15	0.0151	0.1858	0.0000	0.2402	0.0036	0.1818	8.32	0.0941	-97.53
Case16	0.0122	0.0813	0.0000	0.1693	0.0021	0.1807	6.74	0.1129	28.02
Case17	0.0168	0.1425	0.0000	0.1951	0.0033	0.1825	9.23	0.1129	-26.23
Case18	0.0151	0.1926	0.0000	0.2465	0.0037	0.1818	8.32	0.1129	-70.59



(a) Not Installed Any Devices (Case10-1)



(b) Segment Baffles (Case10-2)

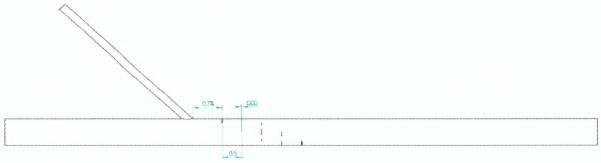


(c) Wedge for Dispersion (Case10-3)

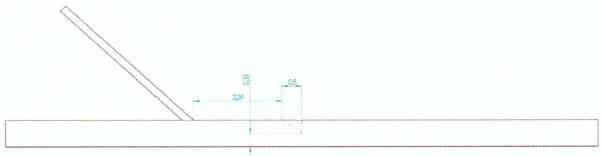
Fig. 17. Proposed Geometries for Improvement of Mixing Efficiency

하는데, 개질재의 주입이 분체(粉體) 혹은 분체에 가수가 된 형태로 이루어진다는 현실을 감안하면 관경 축소만으로는 경계층 형성을 파쇄하기에는 한계가 있음을 인정할 수밖에 없다.

따라서 앞서 모의한 18가지의 결과를 근거로 한 경계층 형성 현상을 극복하기 위한 보완 실험이 필요하게 되었고, 단거리에 혼합효율을 향상 시킬 수 있도록 경계층 파쇄를 위한 관 내 부속물을 고안하여 그 결과를 비교고찰해 보기로 하였다. 고안된 관 내 부속물의 형태는 Fig. 17과 같이 활형 철판을 나선으로 배열하는 방법과 흐름 분산을 유도하기 위한 삼각쐐기를 부착하는 방법이며, Case10 모형의 관장을 각각 1/2로 줄여서 모형을 구성하였다.

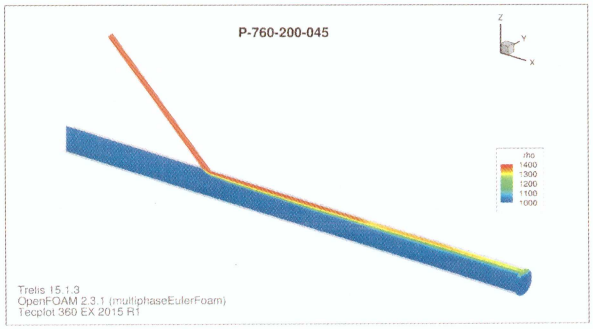


(a) Segment Baffles (Case10-2)

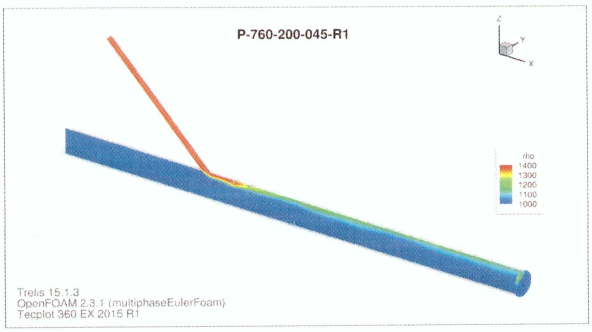


(b) Wedge for Dispersion (Case10-3)

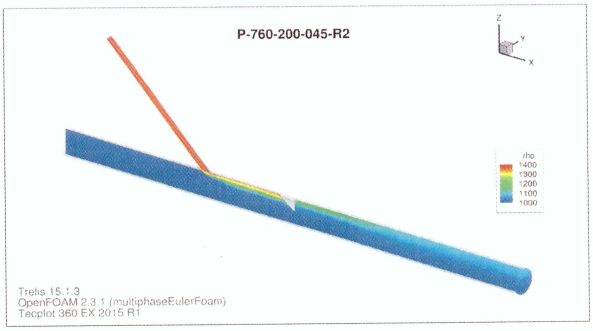
Fig. 18. Dimension of Modified Models



(a) Not Installed Any Devices (Case10-1)

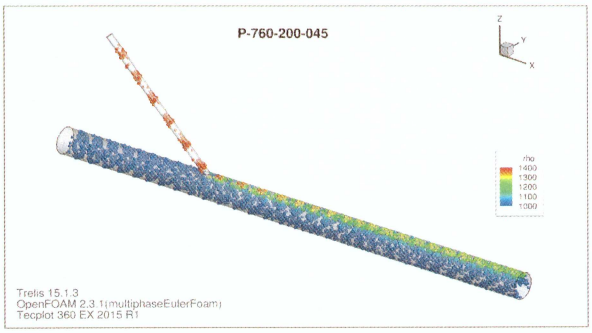


(b) Segment Baffles (Case10-2)

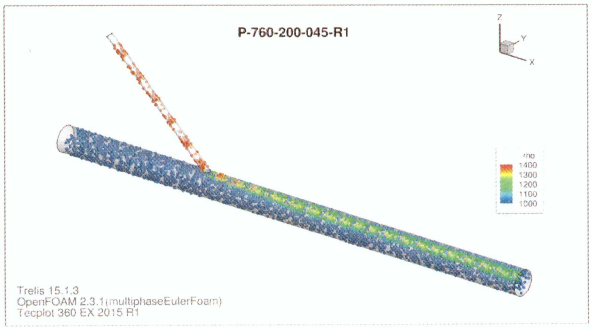


(c) Wedge for Dispersion (Case10-3)

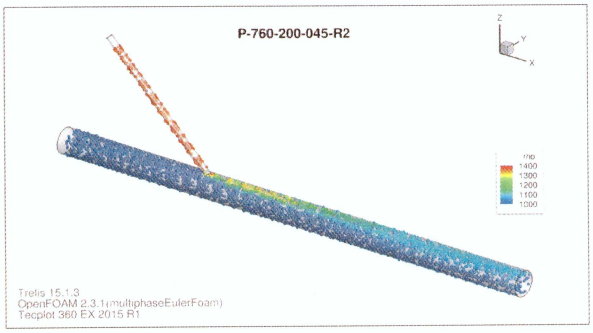
Fig. 19. Density Distribution (Sectional View - Case10-1, Case10-2, Case10-3)



(a) Not Installed Any Devices (Case10-1)



(b) Segment Baffles (Case10-2)



(c) Wedge for Dispersion (Case10-3)

Fig. 20. Density Distribution (Strick Tracer - Case10-1, Case10-2, Case10-3)

6.1 활형(segment)판

배송관과 주입관 합류 후부에 높이 0.11m의 활형판을 0.5m 간격으로 45°씩 회전시켜 총 5열로 배열한 구조로 경계층을 분리하고 흐름을 나선방향으로 회전을 유도함으로써 와란으로 단거리에

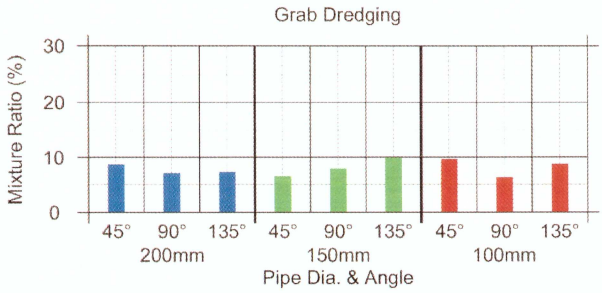


Fig. 21. Analysis Result of Mixture Efficiency (Grab Dredging, Case01~09)

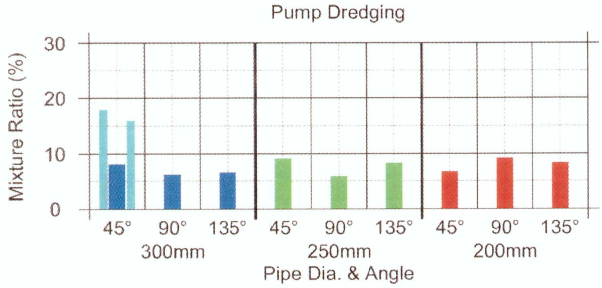


Fig. 22. Analysis Result of Mixture Efficiency (Pump Dredging, Case10~Case18, Case10-2&3)

혼합효율을 올려보고자 하였다. 활형판 높이는 과도하게 커 질 경우 배송관 폐색의 우려가 있고, 펌프의 부하가 높아지기 때문에 Case10의 결과에서 경계층이 형성되는 영역을 근거로 하여 결정하였다.

6.2 삼각쐐기

관 내 부속물을 설치함에 있어 시공성과 유지보수의 편의성 또한 무시할 수 없다. 이러한 관점에서 배송관의 흐름 방해는 최소화하되, 경계층을 분리하기 위한 단순한 형상을 삽입하는 방안으로 피라미드(Pyramid)형 삼각쐐기 설치안을 적용해 보았다.

6.3 모의결과

유동 방해물이 없는 모의안(Case10-1)은 전체적으로 10% 미만의 혼합효율을 보여주고 있어, 혼합을 원활히 수행할 수 있도록 주입관 합류부 후부에 활형판(Case10-2)과 삼각쐐기(Case10-3)

Table 5. Analysis Result of Mixture Efficiency (for Modified Models)

Case №	Volume Fraction of Additives					Total Fraction ③	Mixture Ratio ①/③ (%)	Initial ④	Eta. 1-②/④
	Avg. ①	Max. ②	Min.	Var.	Std. Dev.				
Case10-1	0.0148	0.0878	0.0000	0.1626	0.0024	0.1817	8.15	0.0753	-16.65
Case10-2	0.0227	0.1882	0.0000	0.0779	0.0018	0.1264	17.94	0.0753	-150.12
Case10-3	0.0192	0.0382	0.0029	0.0255	0.0005	0.1205	15.94	0.0753	49.23

형식의 유동 방해물을 삽입해 보았다. 그 결과 종단 및 관말에서의 횡단면상 밀도분포는 Figs. 19 and 20과 같이 활형관의 경우 흐름을 나선으로 돌릴 수는 있었지만 경계층이 형성됨을 확인할 수 있고, 삼각쐐기의 경우 경계층이 감쇄되는 것으로 나타났다. 또한, 유동 방해물이 없는 모의 안에 비해 두 대안 형상에 대한 혼합효율은 약 두 배 가량 향상되어 15.94~17.94%임을 확인할 수 있었으며, 혼합효율에 대한 결과물은 Table 5에 정리하였다.

7. 결론

준설토사를 매립재로 즉각 활용하기 위해서는 인력과 장비가 진입할 수 있는 수준의 초기 재현강도가 중요하며, 준설토의 수력학적 배송 환경에서 개질재와의 혼합이 필수적이다. 본 연구에서는 균질의 개질 준설토를 얻기 위한 방법으로 관 내에서 사전에 혼합을 시도하는 관중혼합에 초점을 맞추어 준설토 배송관과 개질재 주입관이 합류함으로써 발생하는 거동을 분석하여 혼합효율을 평가해 보았다. 평가는 오픈소스 3차원 CFD 코드인 OpenFOAM®을 활용하여 그랩 준설 및 펌프 준설에 대하여 각 9가지 조건을 모사하였으며, 최적 배합비로 혼합하는 경우에는 준설토와 개질재 사이에 경계층이 형성됨을 확인하였고, 이 현상을 개선하기 위한 경계층 파쇄를 위한 관 내 부속물을 제안하였다. 경계층 파쇄를 위해 시도된 관 내 부속물은 활형관 배열안과 삼각쐐기 설치안이며, 활형관의 경우 흐름을 나선으로 혼합을 유도할 수 있었으나 다시 경계층이 형성됨을 확인할 수 있고, 삼각쐐기의 경우 비교적 간단한 형상으로 경계층을 감쇄시켜 혼합효율을 높일 수 있는 것으로 확인되었다. 또한, 유동 방해물이 없는 모의 안에 비해 두 대안 형상에 대한 혼합효율은 두 배 가량 향상됨을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 "환경 친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30km 이상급 이송기술 개발" 연구단 과제의 연구 성과임을 밝히며, 유익한 논평과 제언을 해주신 심사위원 세 분께 감사의 말씀을 드립니다.

References

Bove, S. (2005). *Computational fluid dynamics of gas-liquid flows including bubble population balances*, PhD Thesis, Esbjerg Institute of Engineering, Denmark.

Drew, D. A. and Passman, S. L. (1998). "Theory of multicomponent fluids." *Springer*, 1st Ed.

Hwang, D., Yoo, S. S. and Park, H. K. (2008). "Pulsatile flow simuation of a non-newtonian fluid through a bifurcation tube using the CFD analysis." *Proc. of 2008 Fall Conf. on Korean CFD*, KSCFE, pp. 177-180 (in Korean).

Institution of Civil Engineers (2005). *2nd International Conference on Maintenance Dredging*, Thomas Telford Ltd, London, UK.

Ishii, M. (1975). "Thermo-fluid dynamic theory of two-phase flow." *Eyrolles*, Paris.

Marc S. Ingbera, Alan L. Grahamb, Lisa A. Mondyc, Zhiwu Fangd (2009). "An improved constitutive model for concentrated suspensions accounting for shear-induced particle migration rate dependance on particle radius." *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 35, No. 3, pp. 270-276.

OpenFOAM Foundation (2014). *Open ∇FOAM User Guide: The Open Source CFD Toolbox*, Available at: http://www.openfoam.org/docs/ (Accessed: March 13, 2015).

PIANC (2009). "Dredging management practices for the environment: A Structured Selection Approach." Report No. 100, Brussels, Belgium.

Satoh, T. (2003). "Application of pneumatic flow mixing method to central japan international airport construction." *Journal of Civil Engineering*, JSCE, Vol. 61, No. 749, pp. 33-47 (in Japanese).

Song, K. S. (2003). "Method for solidification process of dredged soils." *KSCE Magazine*, KSCE, Vol. 51, No. 5, pp. 31-43 (in Korean).

Yoon, G. L. (2015). "Considering benefical reuse of dredged materials in Korea." *KSCE Magazine*, KSCE, Vol. 63, No. 4, pp. 27-34 (in Korea).