슬러리 이송을 위한 관내 유속 추정 방법 연구

The Research of Velocity Estimation Method
in Pipe Pumping for Slurry Transportation권 승 희¹⁾ · 정 순 용²⁾ · 김 유 승[†]

Seunghye Kwon · Soonyong Jeong · Yuseung Kim

Received: December 8th, 2013; Revised: December 18th, 2013; Accepted: January 22nd, 2014

ABSTRACT : This Research have suggested the new estimation method using parameter estimation algorithm to substitute established velocity and friction factor calculation equation. Established calculation equation has some difficulties for estimation and reflecting exactly flow specification cause parameter uncertainty and material uncertainty governed real phenomenon, so this research has used system modeling method for flow specification estimation and suggested estimation method.

Keywords : Slurry transport, Flow velocity estimation, Flow transfer function, Parameter estimation, Friction coefficient estimation

요 지 : 본 연구에서는 매개변수 추정을 통하여 기존 배관 유동에 사용되는 유속 및 마찰계수 산정식을 대신할 수 있는 추정방법을 제안하고, 이를 실험을 통하여 증명하였다. 기존 유동에 관한 운동방정식이 반영하는 파라미터가 유체 유동에 초점이 맞춰져서 실제 현장 적용 시 매개변수의 불확실성과 재료 불확도 등의 지배를 받게 되어 정확한 유동특성을 반영하기 어려운 반면에 이를 극복하기 위하여, 본 연구에서는 유동방정식의 시스템 모델링 기법을 통해 입출력 관계를 통한 유동특성 매개 변수를 산정하여 마찰계수를 추정할 수 있도록 하였다.

주요어 : 슬러리 이송, 유속추정, 유체전달함수, 매개변수 추정, 마찰계수추정

1. 연구 배경

환경문제 등으로 인하여 준설토 해양투기가 금지되어 가는 세계적 추세와 더불어 각종 슬러리의 육상 이송 방법으로 펌프와 배관을 이용한 이송 방식이 설계에 반영되고 있으며, 실제 원유 수송 및 폐기물 수송 등에서 이루어지고 있다. 이에 슬러리의 배관을 이용하여 효율적으로 이송하는 방법에 관한 연구는 매우 중요한 부분으로 대두되고 있으며, 이와 관련한 선진국들의 연구사례들도 증가하고 있는 실정이다. 이중 슬러리의 유동 상태를 효율적으로 판정하고 분석하기 위해서는 배관 내 유동 프로파일 및 유동 상태 정보 (속도 등) 등의 파라미터를 확보하여 체계적인 분석이 이루어져야 하지만, 기존의 동작유체와 달리 슬러리는 자체 점도 및 입도와 유체항력 등의 문제로 인하여 관내 유속을 측정하기가 매우 어렵다. 현재 제안되거나 사용되는 대부분의 유량·유속계는 직접적으로 배관 내 삽입되어 유속을 측정하기 때문에 유동에 직접적으로 영향을 받게 되고, 또한 관내 유속을 측정하기 위한 비접촉 장비들도 고가의 장비와

전문적인 분석 프로그램 등이 사용되어야 하므로, 현장에서 적용하기 어렵고 실용적이지 못한 부분들이 많은 한계를 갖고 있다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 슬러리의 배관 유동 시 유속 프로파일을 추정하기 위한 실험적 연구가 진행되어 왔으나, Suspension을 고려한 Feys et al.(2005) 등 연구의 경우 슬러리의 유동계 복잡성을 극복하기 어려운 부분이 있고, 슬러리의 다상 유동을 고려한 Ingber et al. (2009)의 경우 현장 적용이 어렵고 난해하며, 이를 실험과 수치해석으로 비교하였을 때 Lam et al.(2002)의 경우도 많은 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

이에 본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위하여 배관 내 유동 정보를 압력 정보를 통해 추정하여 관내 유속을 파악할 수 있는 방법을 제시하고, 제시된 방법을 실험을 통해 검증하여 현장에서 적용할 수 있는 유속 추정 방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 시스템 모델링 기법을 도입하여 매개변수 추정 알고리즘을 적용하여 시스템의 전달함수를 상태방정식 형태로 기술하여 유동 매개변수를 추정하였다. 이를 위해 다상 유동에서의 시스템 매개변수 추정에 최적화 문제

1) Myong-Ji University

2) Nada Construction

† Korea Salvage (Corresponding Author : nocontrol@hanmail.net)

를 풀기 위한 Bortz et al.(1997) 등이 제안한 Trust Region Algorithm을 적용하여 유동 마찰계수 및 유속을 산출하였다.

2. 기존 유동성 평가의 한계

2.1 기존 이론적 유동성 평가 방법 및 한계

슬러리 유동 시 마찰계수 산정을 위해서는 직접적인 압송 실험을 통해 마찰 유동을 일으키고, Fanning 방정식에 압력 강하량과 토출량을 대입하여 마찰계수를 산정하는 것이 일반적인 방법이다. 이때 사용되는 Fanning 방정식은 Eq. (1)과 같다.

$$\Delta p = \lambda \times \frac{L}{d} \times \frac{\delta}{2} \times V^2 + \Delta h \times \delta \quad (1)$$

여기서 마찰계수 λ 를 산출하는 것이 일반적인 실험의 목적이고, 이러한 마찰계수를 관리함으로써 현장에서 슬러리 이송 시 펌프의 토출량 관리 및 압력 관리를 진행할 수 있다.

일반적인 슬러리 유동의 경우 레이놀즈수가 매우 낮은 층류영역의 배관유동이기에 때문에 이론적으로 마찰계수는 Eq. (2)와 같은 레이놀즈수만의 함수가 된다.

$$\lambda = f(Re) = \frac{64}{Re} = \frac{64 \cdot \mu}{\rho V D} \quad (2)$$

그러나 슬러리의 점성계수를 확보하는 것은 대단히 어려운 일이고, 또한 점성이 시간과 온도 등 외부 환경변수의 영향을 받게 될 경우 Eq. (2)를 사용하기가 어려워진다. 이에 비해 Fanning 방정식은 유속과 압력강하량의 함수로 결정되기 때문에 현장에서 유동성 평가 진행을 위해 보다 효율적이라고 할 수 있다. 그러나 현장에서 Eq. (1)을 적용하기

위해서는 슬러리의 유속을 엄밀하게 측정할 수 있어야 한다는 제약조건이 붙는다. 현장에서 Eq. (1)을 사용하기 위해서 압력은 압력센서를 이용하여 실시간 시간 이력을 확보할 수 있지만, 유속을 측정하기 위해서는 단위 Mock up을 제작하여 Mock up이 채워지는 시간을 측정하며 유량을 계산하고 이를 바탕으로 유속을 추정하는 간접적인 방법을 이용하게 된다. 그러나 이 경우 각각의 개별 압력 파형에 대응하는 유속정보를 확보할 수 없으므로 전체적인 압송의 경향만을 파악할 수 있고, 압력파형의 분산치가 클 경우 마찰계수의 편차가 매우 커지는 한계를 갖는다. 일반적으로 슬러리 유동은 고점성의 층류유동이라고 판단할 수 있으나, 점성이 낮고 유체가 자유표면을 갖거나 압송 기제가 실린더 펌프 방식의 맥동형 가압방식의 경우 층류가 아닌 난류영역의 유동이 배관 내 유도되어 마찰계수를 레이놀즈수의 함수만으로 판단할 수 없다.

Fig. 1과 Fig. 2는 각각 콘크리트의 점도에 따른 압력파형의 예를 보여 주고 있다. 점도에 따라 작용하는 압력의 파형이 서로 다른 동특성을 갖게 되므로 인하여 이에 대한 대표 압력 파형을 어떤 값으로 산정할 것인가는 아직까지 많은 논란이 되고 있다. 특히나 실제 테스트 시 압력파형의 값을 비교해 보면, 압력 파형의 최대값과 최소값 사이에 큰 편차가 발생하고 있음을 알 수 있다.

따라서 이러한 각각의 압력파형으로부터 어떤 대표 압력 값을 선정하는가에 따라서 유동성 평가를 위한 마찰계수 값이 많은 편차를 보이게 되고, 따라서 이러한 각각의 압력의 시간 이력에 대응하는 유속의 시간 이력을 산정하는 것이 매우 중요한 요소가 된다.

그러나 현실적으로 배관 내의 유동에 영향을 주지 않으면서 슬러리의 유속을 측정한다는 것은 거의 불가능한 일이다. 현재 골재 등이 혼입되지 않은 몰탈과 진흙 및 시멘트의 유동을 초음파 장비 등을 이용해 검출한 사례는 있지만 골재가 혼입되었을 경우 이러한 측정방법은 사용할 수 없다.

Fig. 1. Example of high viscosity slurry pressure wave form

Fig. 2. Example of low viscosity slurry pressure wave form

Fig. 3. Pressure time history data max/min trend graph

Fig. 4. High and low viscosity slurry pressure wave form

또한 MRI 등을 이용한 방법 등이 도입되고 있지만, 가격이 고가이고 현장에 장비를 설치하기가 어려우므로 현실적으로 적용하기가 어렵다. 이로 인하여 보다 간편하고 현장 적용이 쉬운 유속 측정방법이 요구되고 있다.

3. 유속 측정 방법(시스템 모델링 기법)

Fig. 4를 보면 슬러리의 점성에 따라 압력파형의 동특성

이 다르게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 배관에 작용하는 힘에 대한 시간 이력 응답이 서로 다른 동특성을 갖고 있음을 나타내며, 이러한 동특성을 수학적으로 모델링 했을 때 모델링된 미분방정식을 통해 시스템의 상태를 추정할 수 있음을 알 수 있다. 만약 배관 내 슬러리 유동이 LTI(Linear Time Invariant) 시스템이고, 배관 내 작용하는 힘을 Fig. 5와 같이 모델링 할 수 있다면 주파수 응답함수를 통한 시스템 식별이 가능하다.

Fig. 5. Free Body Diagram of Conc. Flow in circular pipe

(a) Numerical Analysis Model

(b) Site Config.

(c) Pipe installation

(d) Pressure sensor

Fig. 6. Configuration test equipment

$$F = m \frac{dV}{dv} + cV \quad (3)$$

Eq. (3)은 배관에 작용하는 힘은 펌프에서 슬러리를 압송하기 위한 압력이 인가된 F 와 배관 내 슬러리의 운동에 의한 관성력과 마찰로 인하여 저항하는 점성력만이 존재한다고 모델링 할 수 있다. 베르누이 방정식을 사용하기 위한 기본가정에서 슬러리의 유동을 비압축성 유동이라고 가정하였기 때문에 탄성력의 영향은 없다고 할 수 있다. 이러한 시스템 식별을 위하여 본 연구에서는 다음과 같은 방법을 통해 시스템을 모델링하여 파라미터를 추정하였다.

- ① 실험데이터의 주파수 응답함수 추정
- ② 주파수 응답함수의 시스템 구조 결정
- ③ 지배방정식의 전달함수 모델링
- ④ 전달함수의 상태방정식화
- ⑤ Parameter Estimation
- ⑥ 지배방정식을 통한 유속 추정

3.1 실험장치

실험은 600 m 길이의 파이프 배관을 설치하여 강도별, 거리별로 압력데이터와 유량을 측정하였다. 유량은 Mock up을 통해 타설량을 시간으로 측정하여 평균유속을 산출하였고, 압력센서는 압송을 위한 펌프카로부터 단위길이별로 11개소를 설치하였다.

3.2 실험결과

실험결과는 Fig. 7, Table 1과 같다.

3.3 유속 추정

3.3.1 주파수 응답 함수 추정

(1) 수치해석 전달함수 구조 비교

주파수 응답함수 추정을 위해 CFD 해석을 통하여 Reference 전달함수를 추정하였다.

수치해석을 위한 슬러리의 기본 물성은 Table 2와 같이 대입하였다.

Fig. 7. 600 m pumping test result

Table 1. Test pumping result

	Pump	0 m	100 m	200 m	420 m	520 m	600 m
Average	187.58	87.58	74.55	62.62	30.26	17.49	10.30
Std. Error	0.41	0.23	0.20	0.16	0.08	0.04	0.02
Center Value	213.93	102.93	88.03	73.64	35.14	20.33	11.65
Freq. Value	235.74	6.37	91.81	76.36	36.88	21.43	12.75
Std	59.07	33.24	28.82	23.29	10.89	5.75	2.81
Dist.	3,488.88	1,105.03	830.55	542.25	118.64	33.02	7.89
Kurtosis	1.20	0.14	0.11	0.13	-0.04	-0.60	-0.96
Skewness	-1.46	-1.15	-1.15	-1.18	-1.11	-0.89	-0.74
Range	233.86	118.86	103.91	82.97	37.95	19.27	10.44
Min	15.14	4.49	3.05	4.93	4.33	4.86	4.24
Max	249.00	123.35	106.96	87.90	42.28	24.13	14.68
Observation No	20,804.00	20,804.00	20,804.00	20,804.00	20,804.00	20,804.00	20,804.00
Trust range (95 %)	0.80	0.45	0.39	0.32	0.15	0.08	0.04

Table 2. Material parameter for numerical analysis

Property	Units	Method	Value (s)	
Density	kg/m ³	constant	2,400	<p>Grid</p> <p>Sep 30, 2010 FLUENT 6.3 (3d, pns, iam)</p>
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	constant	1,006.43	
Thermal Conductivity	W/m-K	constant	0.0242	
Viscosity	kg/m-s	constant	4.2	
Molecular Weight	kg/kgmol	constant	28.966	
L-J Characteristic Length	angstrom	constant	3.711	
L-J Energy Parameter	K	constant	78.6	
Thermal Expansion Coefficient	1/K	constant	0	
Degrees of Freedom		constant	0	
Standard Strength	MPa	-	80	
AD	B*%	-	3.3	
Flow	mm	-	223	
Inlet Pressure	MPa	20	-	
Outlet Pressure	MPa	1	-	
Mesh	-	2,000,000	-	
Flow Condition	-	Unsteady State	-	
Pipe Length	m	constant	600	
Pipe Diameter	m	constant	0.125	
Viscosity	Pa*s	constant	22.5	

실험과 동일한 배관 길이를 적용하여 모델링을 수행하였고, 실험 데이터의 압력 파형을 입력부위에 인가하여 100 m 지점의 압력을 예측값과 비교하였다.

Fig. 9는 테스트 데이터의 전달함수와 해석 데이터의 전달함수, 그리고 실제 계측 데이터의 STFT를 통한 전달함수

데이터 셋을 비교한 그림이다. 실제 계측 데이터의 경우 본 연구의 관심 주파수 대역에서 1차 시스템 감쇠성분의 대역폭은 1 Hz 근처에서 나타나고 있으며, 해석 데이터의 전달함수 대역폭은 7 Hz 까지 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 해석에 적용된 점성의 특성과 실제 점성특성의 차이에서 나

(a) Inlet pressure

(b) Inlet velocity

(c) 100 m pressure

(d) 100 m velocity

Fig. 8. Numerical analysis result of pumping flow

Fig. 9. STFT of pumping pressure data analysis result

(a) Magnitude of Transfer function

(b) Phase of Transfer function

(c) Coherence

(d) Coherence

Fig. 10. Estimation of transfer function

타나고 있으나 그 구조는 1차 시스템으로 표현될 수 있음을 알 수 있으며, 파라미터값을 추정할 경우보다 실제에 가까운 점성 특성을 획득할 수 있음을 알 수 있다.

(2) 실험데이터의 전달함수 추정

전달함수를 정확하게 추정하기 위해서는 주파수 응답을 수행하여야 하나 시스템에 인가할 수 있는 입력의 주파수가 제한적이므로 본 연구에서는 입력에 대한 출력의 관계를 Matlab 함수의 전달함수, 추정함수를 사용하여 추정해 내었다. 주파수 응답함수를 구하기 위해 시간 이력 데이터의 PSD (Power Spectral Density)를 구하였다. 이때 주파수 응답함수를 통한 전달함수는 Eq. (4)와 같이 정의된다.

$$T_{xy} = \frac{P_{yx}(f)}{P_{xx}(f)} \quad (4)$$

여기서 x 는 입력 데이터 벡터이고, y 는 출력 압력 데이터 벡터이다.

Fig. 10의 (a)와 (b)는 계측된 데이터의 전달함수의 Magnitude와 phase를 표시하고 있으며, 2개의 우세극점이 나타나고

있음을 알 수 있다. 이 전달함수의 Coherence를 통하여 선형성을 비교해 보면 1 Hz 이후의 데이터는 선형성이 떨어지는 잡음의 영향이란 것을 알 수 있다. 입력인 펌프카의 최대 인가 주파수는 최대 0.366 Hz로써 우리의 관심대역을 0.5 Hz로 설정하였다¹⁾.

또한 수치해석 데이터의 전달함수와 비교하여 실제 계측 데이터에서 동특성의 영향이 저주파 대역에서 강하게 반영되고 있음을 알 수 있다. 이는 실제 실험 시 수치해석에서 반영되지 않는 과도응답의 특성이 반영된 것으로 볼 수 있으며, 수치해석만으로는 유동성 평가가 어렵다는 것을 알 수 있다.

3.3.2 Transfer function modeling of Government Equation

본 연구에서는 지배방정식을 관성과 점성력의 항으로 모델링하였다. 기존 연구에서 정연식은 슬러리 유체의 거동을 그림과 같은 질량-스프링-댐퍼로 모델링한 역학모델 해석을

1) 펌프카 최대 동작 주파수는 0.36 Hz로써 관심대역을 0.5 Hz로 설정하였을 때 이는 시스템에 작용하는 입력의 최대 주파수 범위를 반영한다고 할 수 있다.

소개한 바 있으나, 이 경우 슬러리 유체를 압축성 유체로 가정하여 탄성항을 모델링하여야 되나 이는 베르누이 방정식 적용의 기본 가정에 위배가 되므로 탄성항을 직접적으로 모델링 할 수는 없다. 다만 배관의 탄성 및 펌프에서의 동특성으로 발생하는 탄성항을 고려할 수는 있지만, 실제 탄성의 영향보다 점성력과 관성력의 지배가 훨씬 크게 되므로 탄성항은 모델링 하지 않았다.

$$f(t) = m \frac{dv}{dt} + cv \quad (5)$$

이때 슬러리의 빙행특성을 고려한다면 지배방정식을 Eq. (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$c v = (\tau_0 + \mu \frac{du}{dy}) * \pi DL \quad (6)$$

그러나 본 연구에서는 빙행특성의 항복응력이 입력항인 펌프의 압력보다 매우 작다고 보고, 이에 대한 검토도 점도로서 점성력을 가정하여 선형으로 점성항을 모델링 하였다.

LTI 시스템으로 가정된 시스템의 지배방정식 Eq. (5)를 라플라스 트랜스폼하여 Eq. (7)을 얻을 수 있다. 이때 변환시 각 변수의 초기치는 0으로 가정한다. 이후 Eq. (6)을 입력의 라플라스 변환품 $F(s)$ 와 출력의 라플라스 변환품 $V(s)$ 로 정리하면 전달함수 $G(s)$ 는 Eq. (7)과 같이 표현된다. 여기서 m 은 질량, c 는 점성계수이다.

$$L[f(t)] = (ms + c) V(s) \quad (7)$$

$$G(s) = \frac{s * V(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms + c} \quad (8)$$

이렇게 가정된 미분방정식은 1계 비제차 미분방정식의 형태로써 Green's formula를 이용하여 일반해를 구해보면 Eq. (9)와 같다.

Fig. 11. Pumping state modelling

$$v(t) = \frac{1}{m} * e^{-\frac{c}{m}t} * \int_0^T e^{\frac{c}{m}t} * f(t) dt \quad (9)$$

이 전달함수의 상태 파라미터를 추정하기 위해서는 파라미터 추정을 위한 상태방정식 모델로 변환하여 시계열 데이터 분석을 수행하여야 한다.

3.3.3 State Equation Transform

위에서 얻은 전달함수는 주파수영역의 함수로 우리가 원하는 시간 영역에서의 과도응답에 대한 파라미터 추정을 위해서 상태방정식으로 전달함수식을 변환하여야 한다. 이를 위해 전달함수를 상태방정식으로 만들기 위한 인자 $E(s)$ 를 도입하여 Eq. (8)을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$G(s) = \frac{s * V(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms + c} = \frac{\frac{1}{m}s^{-1}}{1 + \frac{c}{m}s^{-1}} \quad (10)$$

$$E(s) = \frac{F(s)}{1 + \frac{c}{m}s^{-1}}, \quad V(s) = \frac{1}{m}s^{-1} * E(s)$$

Eq. (10)을 상태선도로 표현하기 위한 다이어그램으로 표현하면 Fig. 12와 같다.

이 선도를 바탕으로 상태방정식을 표현해 보면 Eq. (11)과 같다.

$$\dot{x}_1 = \frac{-c}{m}x_1 + f(t)$$

$$v(t) = \frac{1}{m}x_1 \quad (11)$$

3.3.4 Parameter Estimation

상태방정식으로 표현된 시스템 모델의 파라미터를 추정하기 위하여 Parameter Adaptation Algorithm을 사용하여 매 개변수의 추정치를 검출한다. 이를 위한 기본적인 파라미터 추정 구성의 개념도는 Fig. 13과 같다.

$f(t)$ 는 측정된 입구 압력의 시간 이력항이고, $\frac{c}{m}$ 는 모델링

Fig. 12. State equation block diagram

Fig. 13. Concept figure of parameter estimation algorithm

된 Reference model의 매개변수이며, $\frac{\hat{c}}{\hat{m}}$ 는 추정 파라미터이다. 여기서 x 와 $\hat{x}$ 의 차이인 $e(t)$ 가 0으로 수렴하도록 하게 되면 Reference model은 실제 시스템의 전달함수에 근사하게 되고, 이때 추정된 $\frac{\hat{c}}{\hat{m}}$ 을 실제 시스템의 매개변수로 대입할 수 있다.

Parameter estimation을 하기 위하여 Parameter Adaptation Algorithm은 Non-linear least squares method를 사용하였고, 알고리즘은 Trust-Region Reflective 알고리즘을 사용하였다.

Fig. 14(a)는 계측된 파형에 대한 추정 결과로 계측값에 대한 추정된 압력파형을 나타내고 있다. Fig. 14(b)는 상태 방정식의 파라미터 추정 결과이고, 최종값이 상태 추정식

의 파라미터의 수렴곡선이다. Fig. 14(c)는 측정치와 추정값의 잔차를 나타내고 있으며, 잔차(Residue)는 0.1 % 이하이다.

3.3.5 Velocity and Friction factor Time history data Estimation

Parameter estimation을 통해 추정된 parameter 값을 지배방정식에 대입하여 지배방정식의 일반해를 구하여 속도의 시간 이력을 생성하고, 생성된 속도 이력을 바탕으로 각각의 속도에서의 마찰계수를 구하면 Fig. 15와 같이 마찰계수의 시간 이력데이터가 형성된다.

3.4 결과 비교

결과는 Table 3과 같다.

4. 결과검증

4.1 검증 실험(1 km 슬러리 압송)

위에서 제안된 추정식을 바탕으로 실제값과 추정식 및 기존 유량산출식과의 차이를 검증하기 위하여 1 km 배관을

(a) Measured Vs Simulated

(b) Trajectories of Parameters

(c) Residuals

(d) Cost Function

Fig. 14. Parameter estimation result

Fig. 15. Estimated Velocity and Friction factor time history data

(a) Pipe Design Model

(b) Installation pipe config.

(c) Pressure sensor

Fig. 16. Config of 1 km pumping test equipment

Table 3. Test data analysis result

Exp No.	Distance	Strength	Pump Pressure (Bar)	Outlet Pressure (Bar)	Pressure gradient (Pa)	Stroke Time (sec)	Velocity (m/sec)		Friction factor		Viscosity
							General	Suggest	General	Suggest	
1	200	60	112.32	24.67	8,765,000	3.23	1.14	0.89	3.39	4.31	18.83
2	420	60	115.96	8.18	10,778,000	3.30	1.11	0.80	2.07	2.89	11.26
3	600	60	112.71	13.26	9,945,000	4.09	0.90	0.62	2.37	3.43	10.40
7	200	80	104.19	28.57	7,562,000	2.91	1.26	0.99	2.38	3.03	14.63
8	420	80	119.37	12.04	10,733,000	3.35	1.10	0.88	2.79	5.00	14.95
9	600	80	119.78	10.81	10,897,000	4.96	0.74	0.52	3.83	5.40	13.83
10	200	40	65.05	20.76	4,429,000	2.92	1.26	0.97	1.40	1.81	8.60
11	420	40	122.00	12.34	10,966,000	3.49	1.05	0.62	3.10	5.28	15.91
12	600	40	109.43	6.64	10,279,000	3.86	0.95	0.68	2.42	3.37	11.23
13	600	100	108.59	7.97	10,062,500	5.16	0.71	0.54	4.23	5.57	14.69

Fig. 17. Inertia force Vs Viscosity force ratio

설치하고 슬러리를 압송하여 추정식과 계측된 값의 차이를 비교·분석하였다.

본 실험은 사전 200 m 압송을 통해 획득된 슬러리의 파라미터를 사용하여 1 km 압송 시 슬러리의 유속 및 유동파라미터를 추정하고, 기존식으로 추정한 값과 본 연구에서 제안한 방법으로 추정한 값을 실제 계측값과 비교하여 검증하였다.

4.2 데이터 검증

본 연구에서 핵심적인 부분은 파라미터 추정(Parameter Estimation)을 통한 기초 실험을 통해 추정한 유속과 1 km 슬러리 압송 실험의 상사성을 확보하는 것이다. 상사성 확보를 위해 가장 중요한 부분은 상사성 파라미터의 정확성이

며, 이는 최초에 가정한 운동방정식의 파라미터가 올바르게 설정되었는지를 확인해야만 한다. 최초 운동방정식은 슬러리 압송을 위하여 배관에 인가한 압력이 배관 내 슬러리의 관성력과 점성마찰력의 향으로 표현된다고 기술하였으며, 이 때 관성력과 점성마찰력의 합은 배관에 인가한 압력의 합과 동일하여야 한다.

Fig. 17은 추정된 질량 m 과 점성계수 c 의 인자를 비교한 것으로 유속변화에 대하여 파라미터값이 변화없이 상수항처럼 나타나고 있음을 알 수 있으며, 이는 최초 모델 방정식을 도입할 때 세운 가정에 합치한다. 이 파라미터를 기초로 점성력과 관성력을 추정하여 나타내면 Fig. 18과 같다.

다음은 이를 바탕으로 추정 마찰계수와 Full Scale 실험 결과를 비교하여 Semi Scale에서의 상사성이 Full Scale 실험 결과를 추정할 수 있는지를 검토한다.

Fig. 19에서 200 m 압송 실험결과를 가정했을 때의 값을 바탕으로 1 km 압송 실험의 마찰계수(Semi Scale Estimation)를 추정한 값을 도시하였으며, Full Scale은 실제 계측값이다. 기존 슬러리에서의 마찰계수 산정값에 비해 본 연구에서 제안된 식이 보다 실제 계측값에 유사함을 알 수 있으며, 이때 유속의 실제값에 대한 불확도는 $\pm 5\%$ 로써 기존 유속 및 마찰계수 산정식보다 훨씬 정밀하게 유속을 추정함을 알 수 있다.

Fig. 18. Inertia force Vs viscosity force by test distance

Fig. 19. Estimation data analysis

5. 결 론

본 연구를 통해 제안된 유속 산정식을 바탕으로 슬러리의 펌핑 유동 상태에서의 마찰계수를 산정하였을 때 기존 제안되었던 식에 비하여 최대 90 %까지 마찰계수가 일치함을 알 수 있다. 또한 본 추정방법은 실시간 샘플링을 통해 압력파형의 샘플이 3~4개 정도 약 15 sec 주기의 데이터 샘플링을 통해 정밀한 유속을 추정할 수 있음을 보였다. 본 방법을 현장에 적용할 경우 실시간 모니터링을 통해 배관의 유동 상태를 판단할 수 있을 뿐 아니라, 펌핑 상태에서의 물성 변화에 대한 즉각적인 대응 및 제어를 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부와 국토교통과학기술진흥원의 연구단 과제인 “환경친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30 km 이상급 이송 기술 개발(12기술혁신E12)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Bortz, D. M. and Kelly, C. T. (1997), The simplex gradient and noisy optimization problems. Technical Report CRSC-TR97-27, North Carolina State University, Department of Mathematics, Center for Research in Scientific Computation Box 8205, Raleigh, N. C. 27695-8205. pp. 87~95.
2. Feys, D., Fetys, R. V. and Schutter, G. D. (2005), Pipe flow velocity profiles of complex suspensions, like concrete. Gent University, pp. 37~56.
3. Ingber, M. S., Mondy, L. A, Mondy, A. L. G. and Fang, Z. (2009), An improved constitutive model for concentrated suspensions accounting for shear-induced particle migration rate dependence on particle radius. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 35, No. 3, pp. 270~276.
4. Lam, Y. C., Lam, X. C., Tan, K. W., Ma, J., Tam, K. C. and Yu, S. C. M. (2002), Experimental measurements and simulation of particle migration in a pressure-driven tube flow : application to flow in runner. Journal of Injection Molding Technology, Vol. 6, No. 1, pp. 45~57.