

방향성 소구경 굴착의 입자 이송특성에 관한 연구

한상목* · 김정환* · 황영규** · 우남섭*** · 김영주***

*한국조선해양기자재연구원 전북분원

**성균관대학교 기계공학부

***한국지질자원연구원 광물자원연구본부

An Experimental Study of Cuttings Transport in Directional Slim Hole Drilling

Sang-Mok Han*, Jeong-Hwan Kim*, Young-Kyu Hwang**, Nam-Sub Woo*** and Young-Ju Kim***

*Jeollabuk-do Branch Institute, KOMERI, Gumsan, Korea

**School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

***Mineral Resource Research, KIGAM, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Directional drilling 방향성굴착, Slim hole drilling 소구경굴착, Drilling fluid 굴착유체, Cuttings 굴착암편, Solid-liquid two phase flow 고-액 2상 유동

ABSTRACT: During drilling, the precipitation velocity of cuttings within an annulus depends on the density and configuration of the cuttings, and on the density, viscosity, and rheological characteristics of the drilling fluid. In directional drilling in particular, it is difficult to adjust and control the cuttings. In contrast to vertical drilling, it is very important to evaluate the flow characteristics of a drilling flow field. However, research on the transfer features of cuttings is inadequate. In this study, in order to identify transfer features of cuttings, an experiment was performed under wide-ranging conditions by constructing a slim hole annulus (44 mm×30 mm) device. In this experiment, the particle volume fraction were influenced by particle size, particle concentration within the flow, pipe rotation, flow volume, and inclination of the annulus. In addition, a mathematical formula for volumetric concentration was deduced and compared to the test results and behavior of cuttings under the other drilling condition was made to be predicted. Therefore, this study can provide meaningful data for vertical and horizontal drilling, and for directional drilling.

1. 서 론

고정된 플랫폼에서 Offshore 시추인 방향성 시추기술은 현재 많은 현장에 적용되고 있으며 특히 해양시추에서 상당히 경제적인 시추기술로 평가되어 최근에는 방향성 시추기술을 이용한 수평시추기술도 활발히 연구되고 있다(Willoughby, 2005).

이러한 이유에서 본 연구는 방향성 시추기술의 메카니즘을 이해하고 시추 작업에서 효율적인 암편 이송을 위한 기반 연구를 수행하고자 한다. 또한, 시추 작업시 벽면에서의 파괴적인 진동을 피하고 벽면 안정성을 높일 수 있는 시추기술인 Slim hole 시추 기법을 같이 적용하여 유체공학적 관점에서 시추 유동장의 유동 특성을 파악하고자 하였다.

시추유체가 드릴 파이프를 통해 밑으로 내려가서 드릴 파이프와 홀 사이의 간극을 통하여 회전하면서 위로 올라오는 유동에 의하여 암편이 제거되는데 수직 또는 거의 수직인 시추작업에서는 암편이송의 원활한 제어가 가능하다. 하지만 방향성 시추에서는 수직 시추 시 발생하지 않던 Stuck pipe와 같이 암편으로 인한 위

험요소가 생기므로 결과적으로 부주의하게 수직 환형관 모델을 경사 환형관에 적용하면 큰 오류가 발생할 수 있다.

시추작업시 환형관내 암편의 침전속도는 암편의 밀도 및 형상, 암편 크기, 시추유체의 밀도, 점도 및 유변학적 특성에 의존한다. 하지만 이러한 변수들은 시추된 지층과 사용된 비트의 종류에 따라 암편에 미치는 특성이 달라지며, 환형관의 축회전 속도는 암편의 이송 궤도를 변화시키게 된다. 이와 같이 시추 작업 시 발생하는 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서는 시추 유동장의 유동 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

일반적으로 환형관의 반경비에 따라 수행되는 회전속도가 달라지는데 반경비($\eta < 0.6$)에서 기존 수직시추작업에서의 회전속도는 150~200rpm정도이지만 반경비($\eta > 0.6$)인 Slim hole 시추에서는 드릴파이프의 회전수가 200~800rpm증가 할 수 있다. 하지만 실제 Slim hole 방향성시추에서는 굴착시 안정성을 고려하여 300~400rpm회전속도로 시추가 이루어진다(Chakrabandhu et al., 2005).

기존의 관련 연구로서 국내에서는 Han et al.(2008; 2009)이 Slim-

hole 환형관내 고액 혼합유동 특성 파악을 위해 환형관의 기울기와 회전에 대한 압력손실의 변화를 실험 및 수치해석 결과로 보고하였다. 축방향 압력강하는 일반적으로 내부 파이프의 회전과 기울기가 증가 할수록 같이 증가하며 비뉴튼유체보다 물에서 그 증가가 더 뚜렷하게 나타났다. 또한 Woo et al.(2011)은 다양한 Power-law유체를 이용하여 CMC(Carboxymethylcellulose) 수용액과 Bentonite 수용액을 비교하였을 때 점도가 큰 유체일수록 압력손실은 상대적으로 증가하였으나 입자이송에 좀 더 유리하다는 결과를 보여주고 있다.

한편, 국외의 기존 연구들 중에서도 실험적인 방법(Iyoho, 1980; Larsen, 1990; Tomren, 1979 등)이 수행되었으며, 모든 경사각에서의 압편 이송을 설명하기 위한 기계공학적 모델 개발에 많은 연구가 진행되었다. Iyoho는 편심된 경사환형관에서 비뉴튼유체의 거동특성을 실험적으로 수행하였으며, Larsen은 경사환형관에서 유속에 대한 입자 이송특성을 나타내고 있다. 또한, Tomren의 연구에서도 편심 환형관에서의 실험결과를 보여주고 있지만 모두 환형관내 고액 유동 특성으로 압력손실이나 입자이송속도에 대한 결과를 보여주고 있다.

하지만 이러한 기존 연구들처럼 대부분의 관련 연구들이 기존굴착방식(Conventional drilling, 반경비 < 0.6)의 수직 또는 수평에 국한된 연구결과들이며 경사각에 대한 일부 연구들도 기울기 범위가 작아 유량, 기울기, 회전에 대한 일부 특성은 확인할 수 있으나 하나의 상관식으로 표현하기 힘든 점이 있다.

따라서 본 연구에서는 시추기술 중에서 효율성과 경제성을 높일 수 있는 새로운 기술인 방향성 소구경굴착(Directional slim-hole drilling)의 효과적인 운전을 위한 기반연구로서 시추작업시 압편의 침전량 및 이송특성을 예측하고자 상관식을 도출하였다. 이를 위하여 본 연구의 변수로서 적용되는 환형관의 반경비(η), 기울기(θ), 회전수(Ω), 유속(V_z), 입자농도(ϕ) 등에 대한 입자체적율(C_{VI})을 측정하여 환형관내 유동특성을 파악하였으며 압편의 이송능을 정립하기 위해 입자체적율에 대한 실험결과를 분석하여 정립하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

실험에 사용된 실험장치는 크게 입자 투입부와 실험을 위한 환형관 그리고 계측부로 나누어지며 Fig. 1과 같다. 환형관은 투명 아크릴 파이프로 제작되었으며, 바깥쪽 실린더 내경 44mm, 안쪽축의 외경 30mm로 반경비($\eta=0.7$)로 제작되었다. 환형관 상부에 0.5m 간격으로 탭을 뚫어 압력을 측정할 수 있게 제작되었으며, 환형관의 하부에 입자 투입장치를 설치하여 입자가 일정하게 투입될 수 있도록 하였다.

실험 장치내 계측부로서 샘플링을 할 수 있도록 볼 밸브를 설치하였으며, 환형관의 안쪽 축은 회전속도를 측정할 수 있는 장치, 평균 이송속도 및 고체 입자의 평균 질량 이송 속도를 측정할 수 있는 장치를 설치하였다. 이 외에 순환 유량을 일정하게 조절할 수 있도록 제작된 유체 투입부를 설치하였다. 이번 연구에 사용된 작동유체는 수성이수로 사용되는 물로서 실험장치의 체원 및 변수값은 Table 1에 나타내었으며 사용된 모래입자 투입율에 대한 혼합유체의 물성치 변화는 Table 2와 같다.

실험은 유체 투입부를 통하여 작동 유체를 투입한 후 입자 투입 장치를 통하여 모래입자를 투입 하는 순으로 이루어지며, 입자 투입 후 어느 정도의 시간이 흘러 이송상태가 안정화 되었을 때 진행되었다. 각 실험은 실험데이터의 정확성을 위하여, 수차례에 걸쳐 실행되어진 동일한 실험의 평균값을 사용하였다.

Table 1 Summary of parameter values and variables

Variable or Parameter	Range or Value
Annulus length, [m]	1.7
Annulus dimension, [mm×mm]	30×44
Annulus inclination, from Vertical [°]	0~75
Inner pipe rotational speed, [rpm]	0~400
Liquid flow rate, [l/min].	24~68
Temperature, [°C]	15
Fluid used:	Water
Particle Size, [mm]	2
Density, [kg/m ³]	2,381
Feed Concentration, [%]	4~16

Table 2 Sand slurry properties

Sand Concentration (%)	Water+sand Density (kg/m ³)	Injection rate (kg/s)			
		24 (l/min)	33 (l/min)	50 (l/min)	68 (l/min)
4	1053.4	0.037	0.052	0.079	0.108
8	1108.7	0.075	0.105	0.159	0.216
12	1164.0	0.112	0.157	0.238	0.324
16	1219.4	0.149	0.210	0.317	0.432

3. 실험 결과 및 고찰

일반적으로 단상유동의 유체역학적 특성은 잘 알려져 있다.

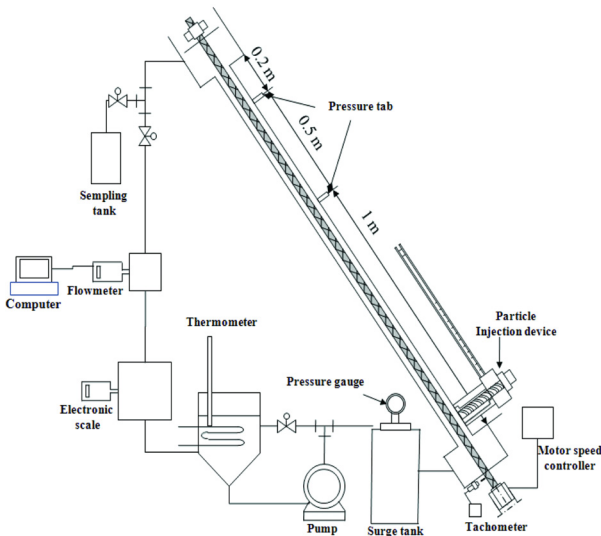


Fig. 1 Schematic diagram of the apparatus

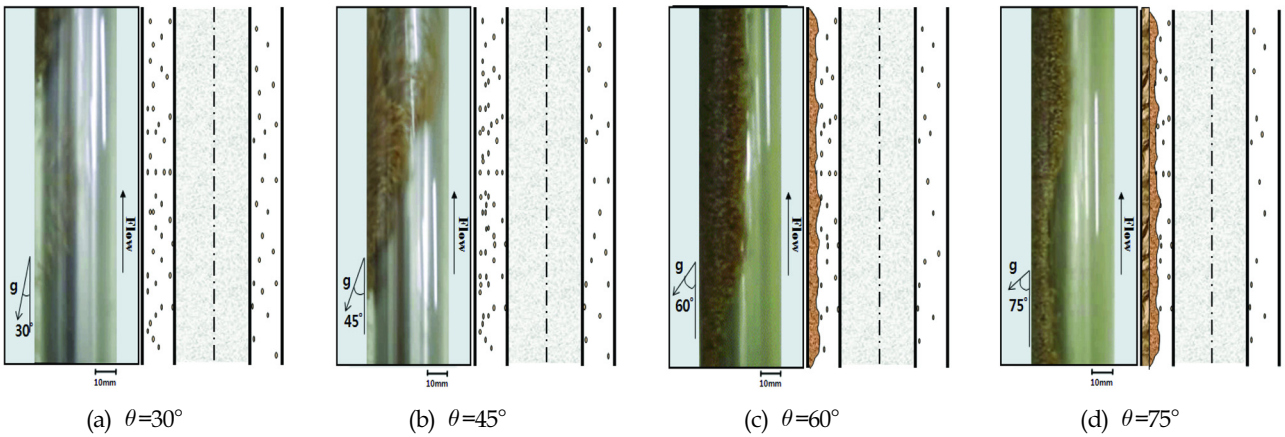


Photo 1 Photograph of sand particle movement in water($\phi = 8\%$, $Q=24\text{l/min}$)

그러나 이러한 특성은 고-액 혼합물이나 다상유동의 경우에는 적용되지 않는다. 본 연구에서는 고-액 혼합유동의 유동 특성을 다양한 조건에서 실험을 수행하였다.

Photo 1은 본 연구의 중요한 변수인 환형관의 경사각의 변화에 따른 현상으로, 환형관의 경사각이 증가할수록 증가하는 반경방향의 미끄럼속도 때문에 점점 더 많은 고체입자들이 환형관의 아래쪽으로 집중되고 결국 낮은 유량에서는 고체입자들이 침전층을 형성하기 시작한다. 고체입자들의 침전층은 작은 경사각에서는 일반적으로 작았고, 안쪽축의 회전수나 유체의 유속이 증가하면 매우 불안정해지면서 사라지는 경향을 나타내었다.

또한, Photo 1의 (c)와 (d)에서와 같이 환형관의 경사각이 증가함에 따라 입자의 침전층이 만들어내는 베드(Bed)는 2가지 모 형태로 발전할 수 있다. 즉, (c)에서와 같이 최초의 베드는 이송이 되며 움직이지만 (d)와 같은 모습에서는 이송베드(Moving bed)와 정체되어 있는 고정베드(Stationary bed)로 구분되는 현상을 보이고 있다. 이러한 이유에서 침전층의 발달정도에 따라 고-액 혼합유동을 모사할 때 사용되는 모형은 2-layer 모형이나 3-layer 모형을 선택할 수 있다(Kelessidis and Bandelis, 2004).

환형관의 경사각이 45°이상에서는 유동 및 입자농도에 따라 환형관의 아래 부분에 형성되는 고체입자의 침전층이 유동방향과 반대 방향으로 즉, 아래 방향으로 미끄러지는 현상이 발생하

였다. 이러한 현상은 실제 시추작업에 있어서 매우 위험한 상황을 초래할 수 있다. 이와 같이 경사 환형관내 침전층 형성은 입자 이송율을 떨어뜨리는 요인이 되고 있다는 것이 많은 연구로 알려져 있으며, 본 연구에서는 다양한 조건의 실험을 통해 이송율 파악 및 침전층의 크기와 직접적으로 관련하여 입자체적율을 예측할 수 있는 경험식을 만들게 되었다.

3.1 입자체적율(C_{VT})

환형관 내 고체입자의 입자체적율은 입자이송율 값과 함께 환형관 내 고-액 2상 유동에서 입자의 이송효율을 평가하는 중요한 변수이다. 입자체적율은 식 (1)에 정의된 바와 같이 고체입자에 의해 점유되는 체적을 전체 환형관 체적으로 나누어 구할 수 있다(Kleinsteuer, 2003).

$$C_{VT} = \frac{\text{Volume occupied by solids}}{\text{Volume occupied by mixture}} \times 100 \quad (1)$$

본 연구에서는 시험부의 출구 부근에서 유량을 샘플링 할 수 있는 장치를 설치하여 실시간 또는 평균 입자의 체적율을 직접 측정하였으며 뉴턴 유체인 물에 대해 고-액 2상 혼합유체의 유속과 입자농도, 경사각 및 안쪽축 회전수에 대한 환형관 내 고체입자의 입자체적율의 변화를 Fig. 2에 도시하였다.

일반적으로 입자체적율이 작을수록 입자이송성능이 우수하다

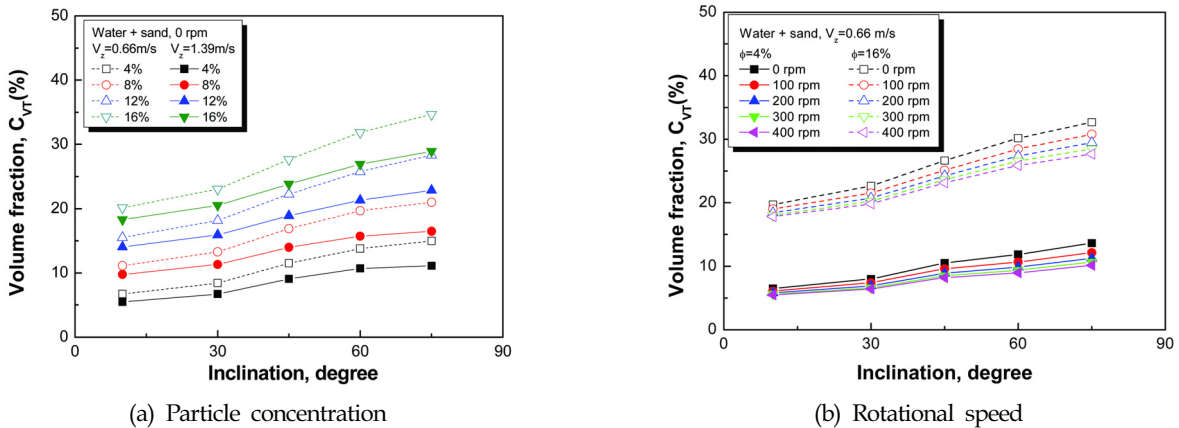


Fig. 2 Variation of the particle volume fraction

고 할 수 있다. 먼저 Fig. 2(a)와 같이 비회전시 환형관내 유속이 빠르거나 입자농도가 작을수록 C_{VT} 가 상대적으로 작아지며 입자이송에 유리하게 작용함을 알 수 있다. 또한, 경사각에 대한 특성으로 경사각이 30°이상에서 급격하게 C_{VT} 가 증가하는 모습을 보였으며 60° 이상이 되면 침전물이 바닥에 거의 정체되는 현상으로 인해 C_{VT} 의 증가폭이 줄어드는 결과를 나타내고 있다.

한편, Fig. 2(b)에서는 안쪽축의 회전에 대한 특성을 보여주고 있으며, 결과에서와 같이 입자농도가 클수록 회전에 의한 C_{VT} 의 변화폭이 크게 나타나고 비회전보다 안쪽축 회전수가 증가할수록 C_{VT} 는 감소한다. 하지만 100rpm의 경우 C_{VT} 의 감소율이 최대 10%이나 400rpm의 C_{VT} 의 감소율은 최대 5% 정도로 낮아지는 결과를 보이므로 C_{VT} 에 대한 회전의 영향이 점차 줄어드는 결과를 알 수 있다.

3.2 입자체적율 실험식

환형관내 굴착유동의 특성중에서 입자체적율의 값은 입자의 이송능력과 직접적인 관계가 있는 결과이므로 입자체적율을 예측하기 위해 기존의 많은 관련 연구들이 수행되었다. 하지만 아직까지 굴착유동의 입자체적율을 정량화하여 표현하는 연구결과는 없으며 특히 최근에는 방향성굴착이 부각되기에 더욱 입자체적율에 대한 연구가 중요하다고 할 수 있다.

한편, 본 연구와 유사한 연구로서 Duan et al.(2008)이 입자체적율을 예측할 수 있는 실험식을 보이고 있으나 Duan et al.이 제시한 실험식의 특징은 경사각이 70°이상의 수평굴착에만 적용가능하며 입자 투입율의 변화에도 적용할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 가능한 굴착유동의 물리적 변수를 최대한 반영하여 입자이송 특성을 예측할 수 있는 실험식을 만들고자 하였다. 이러한 입자체적율에 대한 일반화된 수식을 도출하기 위하여 관련 변수들로서 환형관에 대한 유속, 환형관 기울기, 회전수, 입자투입율, 유체의 물성치 등으로 선정하여 수차례 반복실험으로 오차를 최소화하고 실험식 도출에 필요한 충분한 데이터를 확보하였다.

이러한 다양한 변수들을 하나의 상관식으로 표현하기 위하여 우선 아래의 식 (2)와 (3)과 같이 무차원수인 입자투입율(ϕ)을 제외한 변수들의 조합을 위해 입자의 중력특성과 관성력의 비로서 Froude 수(F_r)를 정의하였으며, 유체의 물성치와 환형관의 회전의 관계로서 Taylor 수(T_a)를 정의하였다. 또한 두 수식에는 환형관의 조건이 공통적으로 포함되어 있어 연구에 적용되는 모든 조건변수들의 상관관계를 무차원수로 나타낼 수 있었다.

$$F_r = \frac{V_z}{\sqrt{g \cos \theta (D-d)}} \quad (2)$$

$$T_a = \frac{\rho_m (\Omega d) (D-d)}{4 \times 0.001} \quad (3)$$

위와 같이 3개의 무차원수(F_r , T_a , ϕ)를 이용하여 입자체적율의 개별적인 특성과 경향을 Figs. 3~5에 나타내었다. 실험변수들의 조합으로 만들어진 무차원수의 특성을 파악하기 위하여 입자체적율에 대한 각각의 결과를 도시하였다. 그 결과 Taylor 수(T_a)와 입자투입율(ϕ)에 대한 입자체적율의 특성은 단순한 선형적인 증감을 나타내고 있기에 정확한 수식 표현이 가능하였

으나 Froude 수(F_r)에 대해서는 상대적으로 수식표현에 어려운 결과를 보여주고 있다.

이러한 결과는 무차원수를 정의한 식에서도 알 수 있듯이 Froude 수(F_r)의 경우에는 다른 무차원수와는 달리 유체의 축방향속도와 경사각에 대한 입자의 중력방향 속도가 독립적으로 변화하는 원인이라고 할 수 있다. 또한 Froude 수(F_r)는 환형관 경사각의 변화를 나타내고 있으므로 기울기가 크게 증가할 때 입자체적율의 오차범위가 증가하는 결과를 Fig. 3의 결과에서 확인할 수 있다. 따라서 Froude 수(F_r)에 대한 분석은 다른 무차원수의 경우처럼 도시된 결과를 수식 표현이 가능한 방정식을 선정함에 있어서 실험결과와의 오차를 최소화하기 위하여 방정식의 결정계수(R^2)의 값을 비교하여 수식을 선정하였다.

이러한 방법으로 Figs 3~5에 나타난 각각의 변수와 입자체적율의 관계를 아래의 식 (4)~(6)과 같이 일반화하여 나타냈다. 이는 실험결과에서 나타난 유속, 기울기, 회전수에 대한 경향을 확인한 결과라고 할 수 있다.

$$C_{F_r} = 0.162 \times (\tan \theta^{-0.5} \times F_r)^{-0.5} \quad (4)$$

$$C_{T_a} = -0.0486 \times (1 - e^{(-1.4 \times 10^{-4}) T_a}) \quad (5)$$

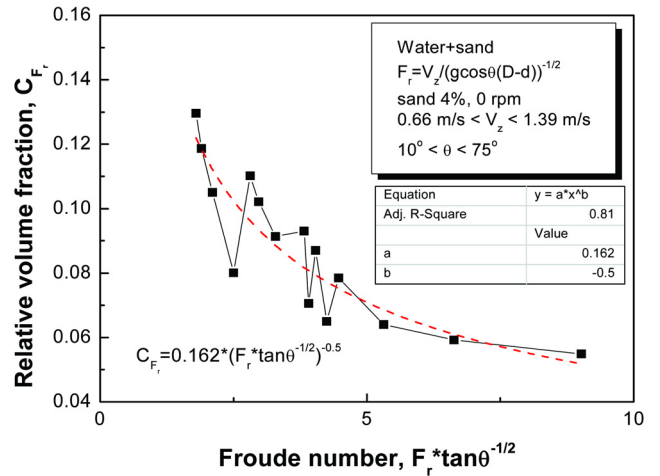


Fig. 3 Relative volume fraction versus Froude number

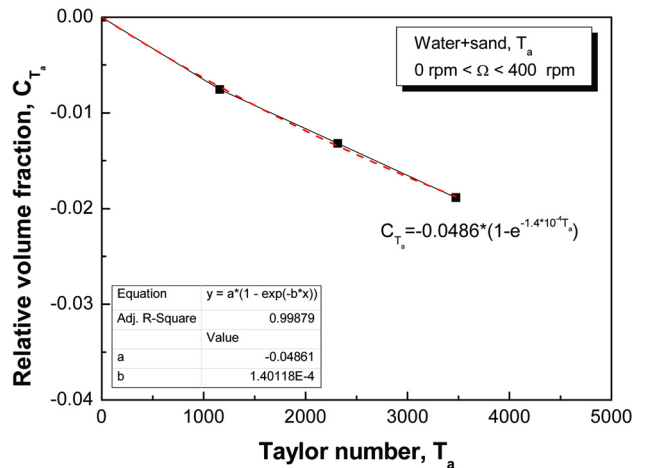


Fig. 4 Relative volume fraction versus Taylor number

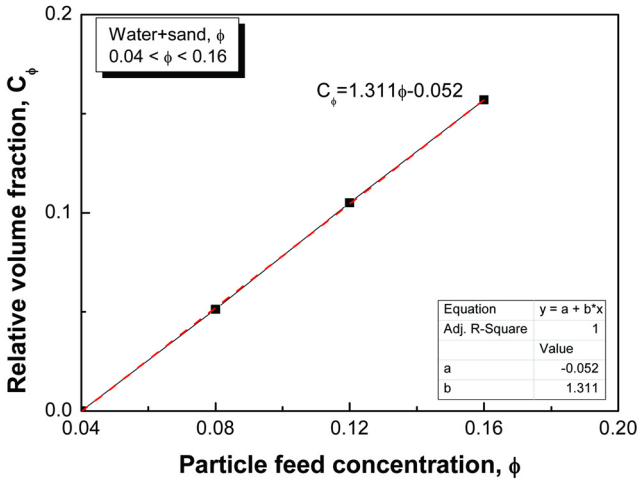


Fig. 5 Relative volume fraction versus particle feed concentration

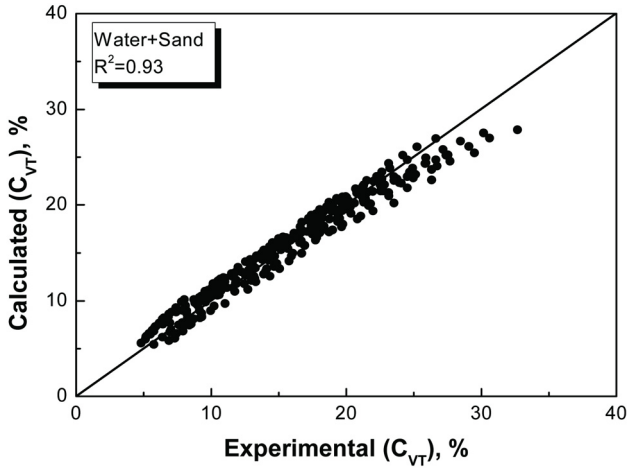


Fig. 6 Calculated particle volume fraction versus experimental data

$$C_\phi = 1.311 \times \phi - 0.052 \quad (6)$$

따라서 전체 입자체적율은 식 (4)~(6)의 일반화식을 조합하여 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

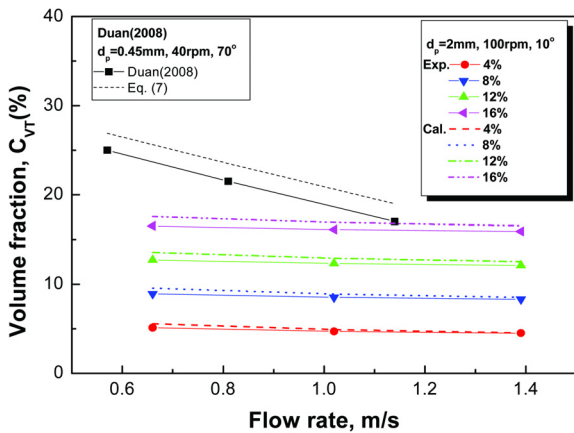
$$C_{VT} = (C_{Fr} + C_{Ta} + C_\phi) \times 100 = \left[0.162(\tan^{-0.5}\theta F_r)^{-0.5} - 0.0486(1 - e^{(-1.4 \times 10^{-4})T_a}) + 1.311\phi - 0.052 \right] \times 100 \quad (7)$$

; $0.66 \leq V_z \leq 1.4$ (m/s), $10 \leq \theta \leq 75$ (degree), $0 \leq \Omega \leq 400$ (rpm), $0.04 \leq \phi \leq 0.16$

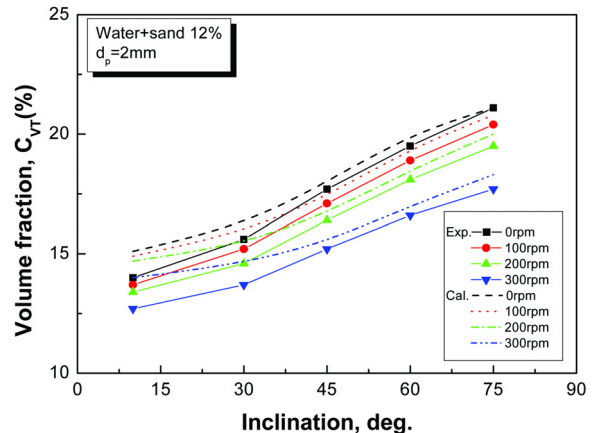
환형관내 입자체적율의 실험식인 식 (7)을 바탕으로 본 연구의 모든 실험결과와의 상관관계를 Fig. 6에 도시하였다. Fig. 6과 같이 식 (7)의 계산값과 실험결과 값의 상관관계를 비교하였을 때, 최대 오차범위는 7%이내에서 일치하고 있으며 입자체적율이 25%를 넘어가면서 실험식과의 오차가 다소 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이러한 오차가 증가하는 시점은 각각의 실험조건에서 환형관의 기울기가 급격하게 증가하는 시점과 일치하는 것으로 나타났다. 이는 실험조건에서 환형관의 경사각이 큰 경우 중심축의 회전에 의한 진동이나 편심이 증가하여 발생하는 실험적 오차를 고려할 때 전반적으로 일반화된 입자체적율의 실험식이 실험결과와 유사하게 나타난다고 할 수 있다.

본 연구에서 나타난 입자체적율의 식 (7)을 확인하기 위하여 기존의 타 연구결과에 적용하여 Fig. 7(a)에 비교하여 도시하였다. 기존의 경사환형관의 입자체적율에 대한 결과중에서 Duan et al.(2008)이 발표한 환형관에서의 연구결과와 식 (7)에 반영된 결과를 비교하였다. Duan et al.은 본 연구와 유사한 방식으로 실험을 수행하였으나 실험조건은 환형관의 사이즈(20.32cm×11.43cm× 30.48cm), 반경비(0.56), 안쪽축 회전수(100rpm미만), 경사각(70°) 등으로 본 연구와는 많은 차이를 보이고 있다. 그럼에도 불구하고 Fig. 7(a)와 같이 본 연구에서 제시한 입자체적율 실험식의 적용 결과 10% 이내로 비슷한 결과를 나타내었다. 따라서 일부 제한적인 조건에 대한 결과 비교이지만, 환형관내 입자체적율에 대한 상관식의 적용 가능성을 확인할 수 있었으며 향후 좀 더 다양한 결과들과의 추가 검증을 통해 타당성을 확인할 수 있을 것이다.

또한, Fig. 7(a)는 입자투입농도의 변화에 따라 실험식의 비교 결과로서, 유량이 작거나 입자투입농도가 커질수록 실험식의 결과가 다소 높게 형성되지만 최대 오차가 5%이내로 유사한 값을 나타내고 있다. Fig. 7(b)에서는 경사각과 회전수의 변화에 따른



(a) Concentration



(b) Rotational speed

Fig. 7 Comparison of measured and calculated particle volume fraction

결과를 비교하고 있으며 그림에서와 같이 수직에 가까운 기울기 영역에서 다소 오차가 크지만 기울기가 증가할수록 실험식의 결과가 실험값의 경향을 잘 따라가고 있음을 알 수 있다. 이는 굴착작업에서 입자침전물에 의한 위험요소(Stuck pipe) 등은 수직환형관보다는 경사환형관에서 나타나기 때문에 본 연구의 실험식은 환형관의 경사각변화를 중요하게 적용하였으며 실험식을 통한 환형관 기울기의 증가에 따른 입자체적율의 예측이 가능하다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 고-액 2상 환형관 유동에 대한 실험적 연구를 통해 경사굴착에서 입자체적율의 특성을 파악하였다. 본 실험은 수성미수(Water based mud)에 대표적인 물을 작동유체로 사용하였으며, 유동의 주요 변수인 안쪽축 회전수와 환형관의 경사각 그리고 고체입자의 투입율을 변화시키면서 수행하였다.

(1) 경사 환형관 내부에서 시추유체의 이송능력에 영향을 미치는 요소들 중에서 굴착 작업의 안정성과 관련있는 입자체적율은 유속과 안쪽축 회전수가 증가에 따라 낮아지며, 입자투입율과 경사각이 증가될 때 커지게 되므로 동시에 굴착시 압편의 이송이 어려워짐을 나타낸다.

(2) 경사각이 수직에서 30°이상 기울어질 때 환형관내부에 중력방향으로 중력의 영향을 받아 관내에 이송되는 고체입자가 침전되어 침전층을 형성하였으며, 경사각이 더욱 증가할수록 입자침전층의 두께가 크게 형성되었다. 고체입자의 침전층이 형성되는 시점은 유속이나 입자투입율의 조건 등에 따라 조금씩 다르게 나타남을 확인하였다.

(3) 굴착유체중 수성미수에 해당하는 물에서 입자이송 특성과 시스템의 효율을 예측할 수 있는 입자체적율에 대한 실험식을 정립하여 본 연구의 실험결과와 비교해 보았을 때 최대오차가 7%로서 유사하게 적용되는 결과를 확인하였다. 따라서 실제 머드시스템의 최적설계나 운전 및 효율을 예측하기 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이라 생각된다.

후 기

이 논문은 성균관대학교의 2008학년도 성균학술연구비에 의하여 연구되었음을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

Chakrabandhu, K. and Singh, R.K. (2005). "Rheological Properties of Coarse Food Suspensions in Tube Flow at High Temperatures", *Journal of Food Engineering*, Vol 66, No 1, pp 117-128.

Duan, M., Miska, S., Yu, M., Takach, N. and Ahmed, R. (2008). "Transport of Small Cuttings in Extended-Reach Drilling", *SPE Drilling and Completion*, Vol 23, No 3, pp 258-265.

Han, S.M., Kim, Y.J. Woo, N.S. and Hwang, Y.K. (2008). "A Study on the Solid-liquid 2 Phase Helical Flow in an Inclined Annulus", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol 22, pp 1914-1920.

Han, S.M., Woo, N.S. and Hwang, Y.K. (2009). "Solid-liquid Mixture Flow Through a Slim Hole Annulus with Rotating Inner Cylinder", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol 23, pp 569-577, 2009.

Iyoho, A.W. (1980). "Drilled-Cuttings Transport by Non-Newtonian Drilling Fluids Through Inclined Eccentric Annuli", Ph.D. Dissertation, University of Tulsa, Tulsa, OK-USA.

Kelessidis, V.C. and Bandelis, G.E. (2004). "Flow Patterns and Minimum Suspension Velocity for Efficient Cuttings Transport in Horizontal and Deviated Wells in Coiled-Tubing Drilling", *SPE Drilling & Completion*, Vol 19, No 4, pp. 213-227.

Kleinstreuer, C. (2003). "Two-Phase Flow: Theory and Applications", Taylor & Francis Group, New York.

Larsen, T.I. (1990). "A Study of Critical Fluid Velocity in Cuttings Transport for Inclined Wellbores", M.S. Thesis, University of Tulsa, Tulsa, OK-USA.

Tomren, P.H. (1979). "The Transport of Drilled Cuttings in an Inclined Eccentric Annulus", M.S. Thesis, University of Tulsa, Tulsa, OK-USA.

Willoughby, D.A. (2005). "Horizontal Directional Drilling (HDD): Utility and Pipeline Applications", McGraw-Hill, New York.

Woo, N.S., Kim, Y.J., Kwon, J.K., Chung, S.K. and Park, E.S. (2011). "A Study on the Solid-Liquid Rotating Flow for Cuttings Transportation in Inclined Annulus", *Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference*.

2011년 11월 30일 원고 접수
 2012년 4월 18일 심사 완료
 2012년 4월 19일 게재 확정