

머드시스템의 다상 유동 특성 연구

A Study on the Multiphase Flow Characteristics in an Mud System

이왕도^{1,2}, 한상목¹, 전중호^{3*}

Wang-Do Lee^{1,2}, Sang-Mok Han¹, Joong-Ho Chun^{3*}

〈Abstract〉

An investigation is conducted to study a solid-liquid mixture vertically upward hydraulic transport of solid particles by non-Newtonian fluids in the Mud system. Rheology of particulate suspensions in viscoelastic fluids is of importance in many applications such as particle removal from surfaces, transport of proppants in fractured reservoir and cleaning of drilling holes, etc. In this study a clear acrylic pipe was used in order to observe the movement of solid particles. Annular velocities varied from 0.4 m/s to 1.2 m/s. The mud systems which were utilized included aqueous solution of sodium carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. Main parameters considered in the study were inner-pipe rotary speed, fluid flow regime and particle injection rate. Solid volumetric concentration and pressure drops were measured for the various parameters such as inclination angle, flow rate, and rotational speed of inner cylinder.

Keywords : Mud System, Solid-Liquid Mixture Flow, Pressure Drop, Solid Concentration

1 정회원, 한국지질자원연구원, 자원개발플랜트연구실
E-mail: wdlee@kigam.re.kr

2 경상국립대학교 기계공학과

3* 정회원, 교신저자, (주)한국마린텍 대표
E-mail: ceo@koreamarinetec.com

1 Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KIGAM)
E-mail: wdlee@kigam.re.kr

2 Gyeongsang National University School of Mechanical Engineering

3* Corresponding Author, koreamarinetec.co.ltd, CEO
E-mail: ceo@koreamarinetec.com

1. 서론

시추유체의 역할은 시추비트(drill bit)에서 발생되는 암편(debris)을 제거하고 운할 및 냉각 작용을 하고 있으며, 시추벽면에 야기되는 응력과 내압을 조절하여 시추공을 안정시키며, 탄화수소가 시추공 속으로 유입되는 것에 대한 주요 안전 장벽(safety barrier)의 역할을 하게 된다.

실지로 시추유체는 본래 물 또는 연료 속에 용해된 벤토나이트(bentonite) 및 콜로이드(collide) 형태의 점토로 이루어져 있는 아주 정교한 유체이다[1].

주요 시추작업을 할 때는 ‘유성머드(oil based mud)’ 보다는 비용이 저렴하고 환경 친화적인 ‘수성머드(water based mud)’를 사용하며, 유성머드는 물에 아주 민감한 셰일층(shale formation)을 시추하게 될 때 더욱 효과가 있으며 비중이 더 높은 머드는 웰 구경(wellbore)의 유동 흐름을 지연시킬 수도 있다[2].

그러나 부가적으로 시추공에 안정성을 가져다 줄 수 있으므로 크게 편향된 유정(highly deviated well)지역에 시추할 때 더욱 효과적인 이수로 알려져 있다.

시추유체가 드릴 파이프를 통해 밑으로 내려가서 드릴 파이프와 홀 사이의 간극을 통하여 회전하면서 위로 올라오는 유동에 의하여 암편이 제거되는데 수직 또는 거의 수직인 시추작업에서는 그러한 문제가 적절하게 통제된다.

하지만 방향성 시추에서는 수직 시추 시 발생하지 않던 몇 가지 문제로 인해 결과적으로 부주의하게 수직 환형관 모델을 경사 환형관에 적용하면 큰 오류가 발생할 수 있다.

특히, 하나의 유정 시추시 2,000 ton의 잔재물이 발생하는 것을 고려할 때 시추시 발생하는 파편 등을 처리하는 과정에서 많은 문제점들이 생길 수 있다[3].

시추유체의 이동 경로 중에서 우리가 관심을 갖는 영역은 시추유체에 의해 암편이 이송되는 환

형관내 틈새이다. 시추유체의 주요 역할은 시추공 내 암편 제거, 공벽 보호 및 시추공 내 압력제어 등이다. 수직 환형관에서 유체와 잔재물의 이송속도에 대한 관계를 Fig. 1에 도시하였다.

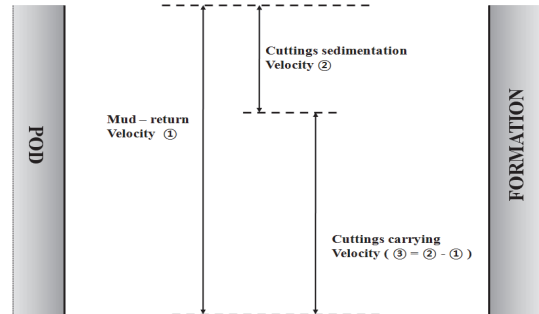


Fig. 1 Velocity and forces acting on drilling cuttings [3]

시추작업 시 환형관내 잔재물의 침전속도는 잔재물의 밀도 및 형상, 잔재물 크기, 시추유체의 밀도, 점도 및 유변학적 특성에 의존한다. 이러한 변수들은 시추된 지층과 사용된 비트에 의해 영향을 받을 뿐만 아니라 축회전 속도는 잔재물의 이송 궤도를 변화시키게 된다.

이와 같이 시추 작업 시 발생하는 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서는 시추 유동장의 유동 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치

이 시스템의 안쪽축은 스테인레스 강재 연마봉을 사용하였고 바깥축은 투명한 아크릴로 제작하여 가시화가 가능하도록 하였으며, 축 방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부(test section)의 길이를 수력직경의 116배 이상이 되도록 하여

1.7 m 로 제작 하였다. 드릴 파이프는 400 rpm 까지 회전하였으며 테스트 환형관 파이프는 현재 수평에서 수직까지 변화시킬 수 있다.

시스템내 유동의 안정적인 발달을 위하여 환형관의 입구 부분에서도 유동이 2 방향으로 유입되도록 하였으며 또한 실험장치 윗부분에서 부압이 발생하는 것을 방지하기 위해서 출구를 3 방향으로 하여 유체가 방향을 받지 않고 빠져나갈 수 있도록 제작하였다.

바깥쪽 실린더는 교체가 가능하도록 설계하였으며, 10여 가지의 작동 변수들의 데이터 획득과 조절 시스템에 의해 관찰되고 조절되었다. 반경비가 0.7 인 실험장치의 제원 및 변수값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Summary of parameter values and experimental variables

| Variable or Parameter | Range or Value |
|---|-------------------------|
| Annulus length, [m] | 1.7 |
| Annulus dimension, [mm x mm] | 30 × 44 |
| Annulus inclination, Degree from vertical | 0~75 |
| Inner pipe rotational speed, [rpm] | 0~400 |
| Liquid flow rate, [L/min] | 15~65 |
| Temperature, [°C] | 15 |
| Fluid used: | Water |
| | 0.2~0.8% CMC solution |
| | 2~5% Bentonite solution |
| | Diesel |
| Sand: Size (mm) | 2 |
| Density (kg/m ³) | 2,381 |
| Concentration (%) | 4~16 |
| Injection rate (kg/s) | 0.02~0.17 |

2.2 유체 주입 시스템

유체 주입 시스템은 액체 및 입자 혼합탱크와 마그네틱 펌프로 구성된다. 혼합탱크는 시스템으로 주입될 100 L의 작동유체를 저장할 수 있다. 시스템내 유동을 순환시키면서 입자이송 실험을 수행하며 동시에 유량 및 입자이송량 데이터를 수집하게 된다.

이 과정에서 유체의 순환량을 정확히 조절 가능하도록 혼합탱크가 그 역할을 하며 탱크내 유체를 지속적으로 공급할 수 있도록 한다.

2.3 입자 주입과 데이터 수집

입자이송에 사용된 잔재물은 모래이며, 이송 실험 중에 모래는 작동 유체로 주입되고 나중의 사용을 위해 유체로부터 분리된다.

Fig. 2와 같이 입자투입장치는 스크류 피더 타입의 축이 회전하면서 고체입자를 이송시키고, 고체입자 투입구 후단부에는 고압의 가스탱크와 연결된 레귤레이터를 설치하여 역류하는 유체를 일정하게 밀어줄 수 있게 하였고 동시에 공기의 유입을 방지하는 역할을 수행하였다.

고체입자의 투입율(4~16%)은 스크류 피더의 회

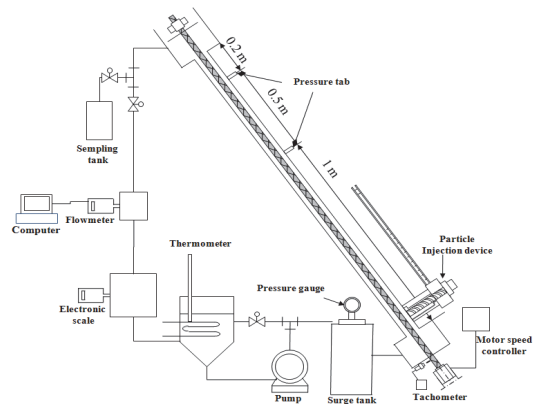


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus

전수를 변화시켜 조절하였다. 입자의 투입율을 여러 요소들의 의해 영향을 받을 수 있기 때문에 안정적인 투입율을 얻기 위하여 고-액 혼합 탱크를 사용하였으며 샘플링 할 수 있는 밸브를 설치하여 매 실험마다 고체입자의 투입율을 점검하였다.

이송되는 입자의 무게를 측정하기 위한 장치로 정확도 0.1g인 저울을 사용하여 필요시 샘플링 한 무게를 측정하거나 실험이 수행되는 내내 입자이송량을 실시간 데이터 수집이 가능하도록 하였다. 시간의 함수로서 모래 입자의 무게 변화는 잔재물 이송 및 체적점유율을 측정하기 위해 사용될 수 있다.

2.4 파이프 시스템

환형부는 반경비가 0.7 인 안쪽축 직경이 30 mm 스테인리스 강재 연마봉을 사용하였고, 바깥쪽 실린더는 직경이 44 mm인 투명 아크릴을 사용하였다.

축방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 아래 길이를 1.7 m로 하였다. 안쪽축이 회전할 때 생기는 편심도는 ± 0.1 mm 이내이며 차압을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.5 m 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였다.

안쪽축은 1500 rpm까지 회전이 가능한 모터(A.C. motor)를 사용하여 회전시키고, 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계(tachometer)를 통하여 알 수 있다. 모터의 회전수는 인버터에서 제어하였으며, 환형관의 출구부분은 직경 60 mm의 고무호스를 사용하여 배수를 원활히 하였다.

2.5 데이터 처리 방법

반경비 0.7 이상의 간극이 작은 slim hole 환형관에서 안쪽축의 회전과 경사를 고려하게 되면 축의 편심, 처짐 및 진동 등의 문제가 발생한다. 따라서 시험부의 길이는 장치 제작과 실험에 있어

서 중요한 고려요소였으며, 고-액 2상 유동장의 완전 발달 조건에 문제가 된다.

시험부의 길이는 단상 유동에서 유동발달 조건인 수력직경의 116배 이상으로 제작하였고, 고-액 2상 유동에서 유량과 압력손실의 관계를 이용하여 유동발달을 확인하였다.

균일한 고-액 혼합유체를 만들기 위해 실험 장치에서는 공급 수조를 원통 깔때기 모양으로 테이퍼지게 만들어서 순환되어온 모래 입자가 수조의 모서리로 침전되지 않고 펌프로 투입될 수 있도록 하였다. 실험 방법에서 우선 정해진 양의 유체만 순환시키면서 유동이 정상상태에 도달한 후 모래 입자를 조금씩 투입하였다.

정상상태 조건을 확립하기 위해서 고-액 혼합 유체를 계속 순환시키면서 실험을 수행하였는데 유속이 감소하면 일부 모래입자들이 실험장치의 일부 구간에서 침전되어 순환하지 않는 문제가 발생하기 때문에 모래 입자의 침전을 방지하기 위해서 배관 라인은 최대한 수평하게 설치하였다.

환형관내 축방향 압력손실은 실린더 외벽에 정압 탭을 0.5 m 간격으로 설치하여 측정하였다. 경사진 환형관 내부에서의 고-액 2상 유동은 상당히 불규칙하지만 일정 시간 순환이 계속되면 혼합 유체의 거동은 불규칙하지만 주기적으로 반복되는 것을 관찰할 수 있었고, 유속이 감소될 때 침전층이 발달하고 유동이 불규칙해지면서 압력손실 측정 오차는 최소 6%에서 최대 10% 까지 증가하였다.

3. 실험 결과

반경비가 0.7인 slim hole 환형관내에서 작동유체가 0.2%, 0.4%, 0.8% CMC 수용액인 고-액 2상 유동에서의 유량에 따른 입자농도, 안쪽축 회전수, 환형관 기울기에 따른 마찰계수 변화를

Figs. 3~5에 도시하였다.

본 연구에서는 비뉴턴 유체인 CMC 수용액의 해석 모델로 Power-law 모델을 적용하였으며 Power-law 모델은 식 (3-1)으로 표현될 수 있다.

$$\tau = k\gamma^n \quad (3-1)$$

Lauzon 등[4]이 보여 주듯이, Power-law 비뉴턴 유체 모델은 정상적인 시추 작업 시 시추공의 환형관내에서 통산적으로 봉착하는 전단비에서 대부분의 시추유체의 특성을 충분히 설명할 수 있다.

Table 2의 0.2%, 0.4%, 0.8% CMC에 대한 유변학적 값을 참고할 수 있다. 비뉴턴 유체에 대한 걸보기 점도를 이용하여 입자농도에 따른 혼합 레이놀즈 식과 마찰계수, 압력 손실 값의 계산은 뉴턴 유체의 식과 동일한 방법으로 계산하였다.

Table 2. Rheological properties of fluids studied

| | 0.2% CMC | | 0.4% CMC | | 0.8% CMC | |
|------|----------|---------------|----------|---------------|----------|---------------|
| | <i>n</i> | <i>k</i> (cP) | <i>n</i> | <i>k</i> (cP) | <i>n</i> | <i>k</i> (cP) |
| 10°C | 0.81 | 8.0 | 0.63 | 14.3 | 0.48 | 26.0 |
| 15°C | 0.82 | 6.7 | 0.64 | 13.0 | 0.51 | 23.5 |
| 20°C | 0.83 | 5.9 | 0.66 | 12.0 | 0.55 | 21.5 |
| 25°C | 0.84 | 5.3 | 0.68 | 11.3 | 0.58 | 20.0 |
| 30°C | 0.85 | 4.8 | 0.69 | 10.5 | 0.61 | 19.0 |
| 35°C | 0.87 | 4.4 | 0.70 | 9.8 | 0.63 | 18.2 |

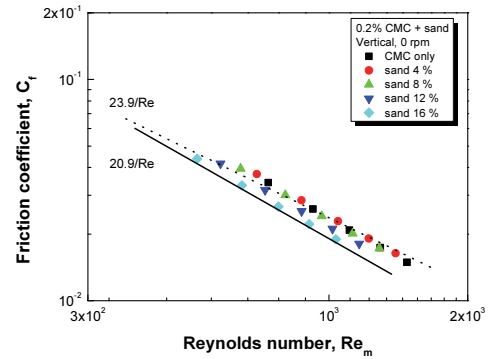
Fig. 3은 비뉴턴 유체인 0.2%, 0.4%, 0.8% CMC 수용액을 작동 유체로 사용하였을 때 고체입자 투입율 및 축방향 유속의 변화에 따른 관마찰 계수의 결과를 보여주고 있다.

환형관 내의 축방향 유속 및 고체입자 투입율의 증가에 따른 마찰 계수의 변화는 뉴턴 유체인 물의 경우와 비슷한 경향을 보여주지만 비뉴턴 유체인 CMC 수용액은 유동영역이 층류에 해당되면서 뉴턴 유체인 물에 비해 유량

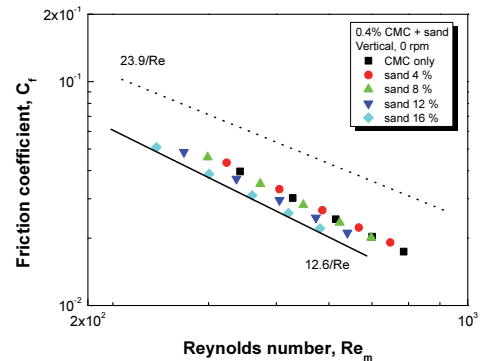
및 입자 투입량의 변화에 의한 마찰계수의 변화가 상대적으로 크게 나타났다.

본 연구와 관련하여 동심 환형관의 이론적 마찰계수 값은 식 (3-2)과 같다[5].

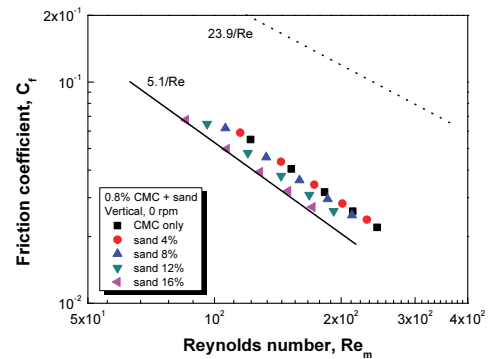
$$C_f = \frac{23.9}{Re} \quad (3-2)$$



(a) 0.2% CMC



(b) 0.4% CMC



(c) 0.8% CMC

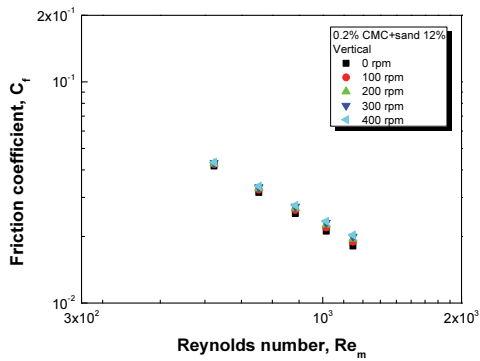
Fig. 3 Variation of friction coefficient with sand concentration

마찰계수의 변화 경향은 점도가 증가할수록 뉴턴 유체의 식 (3-2)과 비교해서 기울기가 점차 증가하는 결과를 보이며 각각의 유체에 대한 마찰계수 값은 Fig. 3의 결과와 같이 식 (3-3), (3-4), (3-5)로 나타내었다. 마찰계수의 특성은 Power

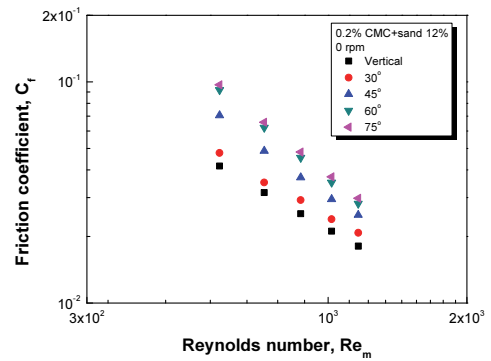
law 유체의 점도가 증가할수록 마찰계수 변화폭이 점차 크게 나타났다.

$$0.2\% \text{ CMC solution: } C_f = 20.9/Re_m \quad (3-3)$$

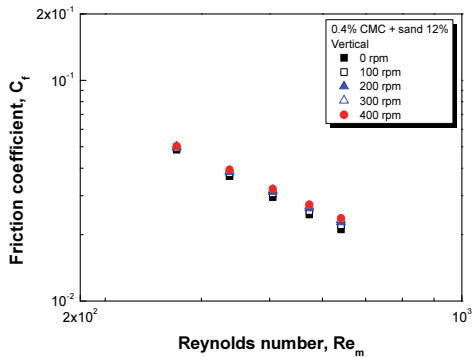
$$0.4\% \text{ CMC solution: } C_f = 12.6/Re_m \quad (3-4)$$



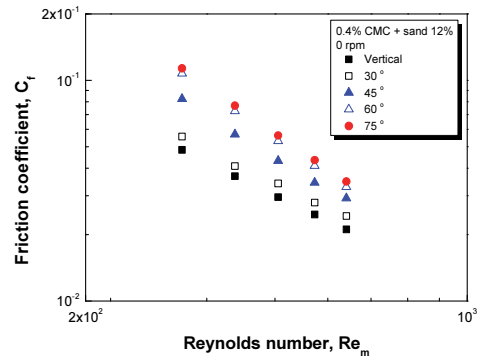
(a) 0.2% CMC



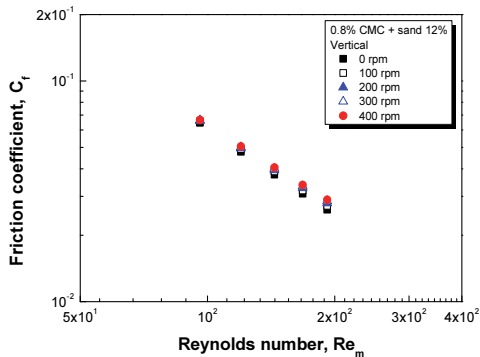
(a) 0.2% CMC



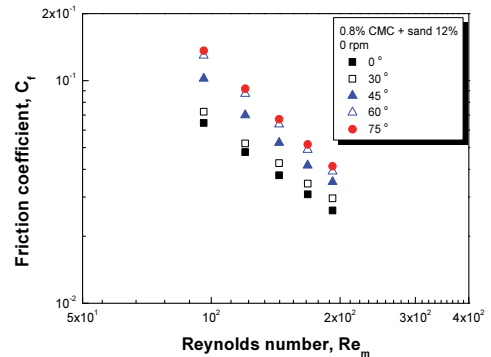
(b) 0.4% CMC



(b) 0.4% CMC



(c) 0.8% CMC



(c) 0.8% CMC

Fig. 4 Variation of friction coefficient with rotational speed

Fig. 5 Variation of friction coefficient with inclined annulus

$$0.8\% \text{ CMC solution: } C_f = 5.1/Re_m \quad (3-5)$$

CMC 수용액에서 수직 환형관 내의 안쪽축 회전수의 영향을 Fig. 4에 도시하였다. 뉴턴 유체와 같이 안쪽축 회전수의 증가에 따라 관마찰 계수가 증가하는 반면에 안쪽축 회전이 마찰계수에 미치는 영향은 물에 비해서는 상당히 작게 나타나고 있다.

내부 회전에 의해 입자간의 충돌이나 마찰이 커지겠으나 비뉴턴 유체의 전단박화 특성에 의해 압력손실변화가 작게 나타나는 것으로 보인다.

경사진 환형관을 사용하는 경우에는 Fig. 5에서 보이는 바와 같이 환형관내 입자에 대한 중력의 영향으로 뉴턴 유체인 물의 경우와 같이 경사각이 증가함에 따라 마찰계수가 증가하는 경향을 나타낸다.

하지만 비회전에서 30°로 경사가 증가하는 구간에서 관마찰 계수의 변화폭이 크게 나타났던 물의 경우와는 달리 CMC 수용액에서는 30~45°로 경사가 증가하는 구간에서 관마찰 계수의 변화폭이 크게 나타났다.

이러한 경향은 실험시 환형관 내에 생성되는 고체입자의 침전층이 발달되는 시점으로 설명할 수 있으며 물에 비해서 비뉴턴 유체의 경우에는 침전층 형성이 좀 더 지연된다고 할 수 있다. 한편, 60° 이상의 경사각에서는 마찰계수가 증가되는 변화가 둔화되는 현상으로 나타나고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 고-액 2상 환형관 유동에 대한 실험적 연구를 통해 환형관 내부의 고-액 2상 유동 특성을 파악하였다. 실험은 비뉴턴 유체인 CMC 수용액을 작동유체로 사용하였으며, 유동의 주요 변수인 안쪽축 회전수와 환형관의 경사각 그리고 고체입자 투입율을 변화시키면서 수행하였다.

경사 환형관 내부의 시추유체의 이송능력에 영향을 미치는 주요 요인은 유속, 안쪽축 회전수, 환형관의 경사각, 입자체적을 그리고 유체의 유변학적 특성이다. 입자이송성능은 유속과 안쪽축 회전수 그리고 유체의 점성에 비례하여 개선되었고, 입자투입율과 경사각이 수직(0°)에서 수평(90°)으로 증가될 때 반비례하여 변하였다.

경사각 30° 이상에서 환형관내부에 중력방향으로 중력의 영향을 받아 관내에 이송되는 고체입자가 침전되어 침전층을 형성하였으며, 경사각이 증가함에 따라 침전층의 두께가 크게 형성되었다. 고체입자의 침전층이 형성되는 시기는 변수 조건 변화에 따라 조금씩 다르게 나타났다.

유체의 유속에 대한 결과로서 보다 큰 유속 조건에서 경사각 증가에 따른 압력구배가 작게 나타났다. 유속이 증가함에 따라 고체입자의 이송성능이 향상되고 이로 인하여 관내부에 형성되는 침전층의 두께가 감소하기 때문이다.

높은 고체입자의 체적점유율은 환형관 내부에 큰 압력구배를 초래하므로 적정수준 이하로 고체입자의 침전층을 유지시키기 위해서 적절한 유체의 유속을 유지하는 것이 원활한 이수를 위한 중요 요인이다.

전반적으로 안쪽축의 회전은 입자이송에 어느 정도 유리하게 작용하는 것을 알 수 있으나 300rpm 이상으로 증가하면서 그 영향이 감소하게 된다. 고-액 2상 유동에서 유량증가는 특히 고체입자들의 마찰에 의하여 압력손실이 증가하며, 환형관의 기울기가 증가할수록 대부분의 입자가 환형관의 아래 부분으로 치우쳐 이송되기 때문에 압력손실은 더욱 증가하게 된다.

결과적으로 고-액 2상 유동에서 압력손실에 미치는 영향은 환형관의 경사각이 가장 크게 작용하는 것으로 나타났으며, 본 연구를 통해 실제 머드시스템의 최적설계나 운전 및 효율을 예측하기 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(21IFIP-B139526-05, 육상 특화형 이수 혼합·처리시스템 개발, 시운전 지원)

참고문헌

- [1] A. Mather, "Offshore Engineering: An introduction," 2nd Edition, Witherby & Company Limited, London, (2000).
- [2] C. Gatlin, "Petroleum Engineering: Drilling and Well Completion," New Jersey Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, (1960).
- [3] R. A. Delwiche, M. W. D. Lejeune, P. F. B. N. Mawet and R. Vighetto, "Slimhole Drilling Hydraulics," Paper SPE 24596, Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Washington, D.C., 4-7 October, pp. 527-541, (1992).
- [4] R. V. Lauzon and K. I. B. Reid, "New Rheological Model Offers Field Alternatives," Oil and Gas Journal, Vol. 77, No. 21, pp. 51-57, (1979).
- [5] F. T. Pinho and J. H. Whitelaw, "Flow of non-Newtonian Fluids in a Pipe," Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, Vol. 34, No. 2, pp. 129-144, (1990).

(접수: 2021.10.15. 수정: 2021.11.02. 게재확장: 2021.11.05.)