

Slim hole 경사 환형관내 고-액 혼합유동 특성에 관한 연구

서 병 택*, 한 상 목**, 우 남 섭**, 김 영 주***, 황 영 규***

*용인송담대학, **성균관대학교 기계공학부, ***한국지질자원연구원

Solid-liquid mixture flow characteristics in an inclined slim hole annulus

Byung-Taek Suh, Sang-Mok Han, Nam-Sub Woo, Young-Ju Kim, and Young-Kyu Hwang[†]

ABSTRACT: An experimental study was carried out to study the solid-liquid mixture upward flow in a vertical and inclined annulus with rotating inner cylinder. Lift forces acting on a fluidized particle plays a central role in many importance applications, such as the removal of drill cuttings in horizontal drill holes, sand transport in fractured reservoirs, sediment transport and cleaning of particles from surfaces, etc. Field measurements have revealed that the pressure drop over a borehole during drilling of a slim oil well or a well with a long reach can depend significantly on the rotation speed of the drill pipe. An accurate prediction of the annular frictional pressure drop is therefore important for conditions where the annular clearance is small. Effect of annulus inclination and drill pipe rotation on the carrying capacity of drilling fluid, particle rising velocity, and pressure drop in the slim hole annulus have been measured for fully developed flows of water and of aqueous solutions.

Key words: Solid-liquid mixture flow (고-액 혼합 유동), Drilling fluid (굴착유체), Slim hole annulus flow (환형관 유동), Pressure drop (압력손실)

기호설명

- | | |
|----------------------------|--------------------------------------|
| dp/dz : 축방향 압력손실, [Pa/m] | μ : 절대점성계수 [Pa s] |
| D_h : 등가수력직경, [m] | ρ : 유체 밀도, [kg/m ³] |
| R_1 : 안쪽축 반경, [m] | ν : 동점성계수, [m ² /s] |
| R_2 : 바깥쪽 실린더 반경, [m] | η : 반경비, R_1/R_2 |
| Re : 유동레이놀즈수 | |
| v_z : 축방향 유동 속도, [m/s] | |

그리스 문자

1. 서론

일반적으로 바깥 실린더가 회전하는 환형관 유동보다는 안쪽축이 회전하는 환형관 유동에서 더 불안정한 유동 형태를 보인다. 즉, 회전하는 환형관에서는 어떠한 반경비와 안쪽축의 회전수에서 고전적인 쿨렛유동의 개념은 사라지고, 유동은 띠 형태의 Taylor 와를 형성한다. 파이프나 환형관에서 유체의 회전유동은 화학, 석유시추, 의료공정

[†]Corresponding author

Tel.: +82-31-290-7437; fax: +82-31-290-5889

E-mail address: ykhwang@skku.edu

등의 여러 공학적 응용 때문에 많은 관심을 받아왔다. 특히 유정의 굴착작업은 많은 진동과 유동교란을 발생시키며 낮은 축회전수에서 작동된다. 굴착 기술의 중요한 관심사로는 굴착 벽면에서의 안정성 문제, 굴착 잔재물의 효과적인 제거와 드릴 비트의 냉각문제를 들 수 있다.

굴착 이수에는 드릴 파이프와 케이싱 사이를 이동하면서 굴착 잔재물을 지상으로 운반한다. 굴착 이수로는 뉴튼 유체와 비뉴튼 유체 모두 사용되지만 특히 비뉴튼 유체에서도 전단연화 유체가 많이 사용된다.

현재 굴착작업에서 직접적인 굴착경비 뿐만 아니라 드릴링 유체 및 굴착물의 이송에 필요한 소요 동력까지 포함한 전체 굴착소요경비는 굴착경, 굴착벽면과 드릴링 축간의 간극면적에 비례하기 때문에 굴착경의 간극이 작은 slim hole 굴착 공법이 많이 적용되고 있는데 기존의 굴착 공법에서의 반경비는 대략 0.5 정도인데 비하여 slim hole 굴착 공법에서의 반경비는 0.75 이상이다.

고-액 혼합유동에 관련된 변수들의 다양성 때문에, 굴착 잔재물의 이송과 관련된 변수들의 영향을 고려함에 있어 다양한 조건들이 포함되게 된다. 굴착 잔재물의 이송 능력에 대한 연구는 넓은 의미에 있어 고체 입자, 유체, 가스 등을 동반하는 다상 유동으로 분류되는 공학의 특별한 한 경우이다.

굴착 잔재물의 이송과 관련된 연구는 1940년대부터 진행되어 왔다. 초기의 연구는 침전속도의 결정에 초점이 맞추어졌다. 그 당시에는 대부분이 수직 유정이었기 때문에 문제해결에 큰 어려움이 없었다.

그 이후에 유정의 굴착작업이 방향전환 굴착 즉, 경사 굴착에 대한 관심이 증가하면서 관련 연구는 실험적인 방법(Iyoho⁽¹⁾, Larsen⁽²⁾, Tomren⁽³⁾ 등)으로 전환되었으며, 모든 경사각에서의 잔재물 이송을 설명하기 위한 기계공학적 모델 개발에 많은 연구가 진행되었다.

굴착이수에 대한 연구는 Lauzon 등⁽⁴⁾에 논문이 대표적인데 그들은 굴착이수의 다양한 유변학적 모델 (Bingham plastic, Oswald de Waele, power law 모델)을 이용하여 굴착이수의 정밀성을 실험

적으로 평가하였다. Kim 등⁽⁵⁾도 CMC 수용액 및 벤토나이트 수용액 등 비뉴튼유체의 유동특성에 대한 다양한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 환형관내 입자와 유체의 운동에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 고려하여 현실적인 유체의 속도, 안쪽축의 회전속도 등에 대하여 고체 입자의 거동을 관찰할 수 있는 실험 장치를 이용하여 고-액 혼합유동의 원리에 기초한 유동 특성을 규명하고자 한다.

2. 환형관내 고-액 혼합유동

굴착유체는 주로 유체의 축방향 유속에 의하여 지표면으로 굴착 잔재물을 이송할 수 있다. 중력 때문에 잔재물은 환형관을 통해서 이동될 때 아래쪽으로 미끄러지거나 유체 매개물에 침전되려는 경향을 보인다. 아래를 향하는 동작은 미끄럼 속도라 불리고 일반적으로 입자의 크기, 입자 형상, 유체와 입자의 비중, 유체의 유동영역, 그리고 유체의 유변학적 특성의 함수가 된다.

경사진 환형관에 대해서는 대부분의 굴착작업에서 우세한 것으로 알려진 정상상태 조건이 침전층이 이미 형성된 이후에 시작된다. 침전층과 유체의 흐름간에 계속적인 잔재물들의 교환 때문에 자유입자와 정상상태 침전층 운동역학을 모사하는 정확한 수학적 관계는 매우 어려운 문제이다. 결과적으로 반경험적 관계식들을 이용하여 이송현상을 모사하여 침전층 형성과 관계없이 어느 정도 정확한 결과를 도출하게 된다.

Tomren⁽³⁾의 실험결과는 경사진 환형관의 아래쪽에서 잔재물의 침전층이 형성됨을 보였다. 이러한 이유로 기존에 여러 연구자들이 제안한 이송식들은 경사 환형관에 대해서는 수정되어야 한다. 수직 환형관에서처럼 각 입자는 축방향 미끄럼 속도만을 가지는 것이 아니라 반경방향 미끄럼 속도도 가진다.

3. 실험장치 및 방법

반경비가 0.7인 환형관의 경우 바깥쪽 실린더는 직경이 44 mm인 투명 아크릴 파이프를 사용하여 제작하였고, 안쪽 축은 외경이 30 mm인 스테인레스 연마봉을 사용하였다. 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다.

† Corresponding author

Tel.: +82-31-290-437; fax: +82-31-290-5889

E-mail address: ykhwang@skku.edu

실험장치는 다음과 같은 주요한 부분들로 구성되어 있다. 이송 유체를 회전시키는 독립적인 장치, 고체-유체 유동의 정상 상태를 만들기 위한 충분한 길이의 환형관, 안쪽 축을 회전시키는 장치, 유량 조절 장치, 안쪽 축의 회전을 측정할 수 있는 장치, 평균 이동속도 및 환형관내 입자의 농도를 작동유체에 상관없이 예측할 수 있는 장치, 시험부의 기울기를 조절할 수 있는 장치 등으로 구성되어 있다. 또한 실험장치 윗부분에서 부압이 발생하는 것을 방지하기 위해서 출구를 3 방향으로 하여 유체가 방해받지 않고 빠져나갈 수 있도록 제작하였다.

실험장치를 순환하는 모래 입자의 농도 조절은 입자 투입장치를 이용하여 조절하던 방식 대신 유체의 순환 유량을 조절하기 위해서 설치하였던 탱크의 구조를 변경하여 설치하였다. 실험 전에 일정한 양의 모래 입자를 투입하여 실험장치 내를 순환하도록 하여 일정한 농도의 고-액 혼합유체가 설정될 수 있도록 하였다. 전반적인 실험 과정은 다음과 같다.

정상상태에서 유량 및 압력손실 값을 측정하기 위해 유량 및 마노미터의 수두 값이 일정해질 때까지 기다린 후, 수조의 온도를 멀티미터를 사용하여 측정하고 유량계의 유량과 마노미터의 차압을 측정한다. 동시에 환형관의 시험부에서 고체

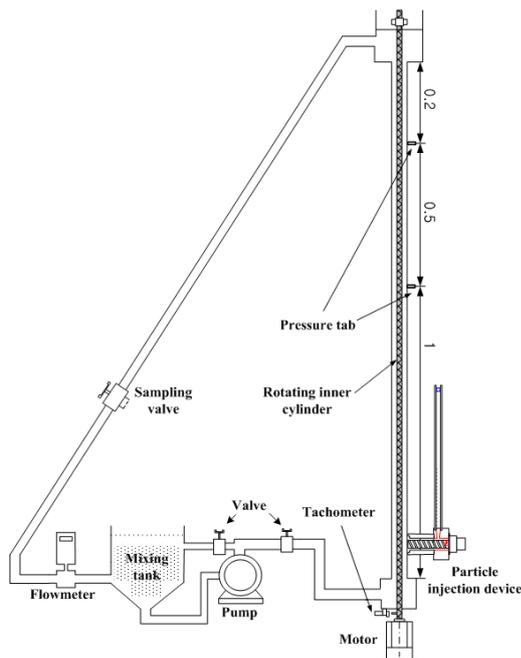


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental apparatus

입자의 거동을 관찰하고, 디지털 카메라를 이용하여 고체 입자의 거동을 촬영한다. 안쪽축이 회전할 때 생기는 교란의 영향을 감소시키기 위해 축회전수를 일정하게 하고 정상 상태가 될 때까지 기다린 후 유량, 차압 등을 측정한다. 유량 및 환형관의 경사각을 변화시키면서 상기 과정을 반복한다.

3. 결과 및 고찰

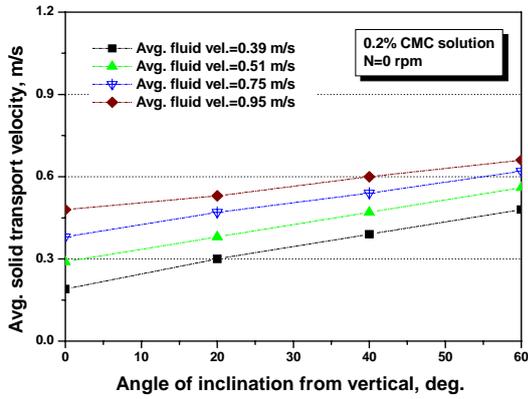
환형관의 경사각 변화, 축방향 유속 및 안쪽 축의 회전수 변화에 따른 고체입자의 평균 이동속도의 관계를 나타낸 그림이다. 동일한 실험 결과를 환형관의 경사각 변화와 유속 변화에 대하여 각각 나타내었다.

고체 입자의 평균 이동속도 측정 실험은 물과 0.2% CMC 수용액에 대해서만 수행하였다. 0.2% CMC 수용액에서 입자의 거동 특성은 Fig. 2에 보이는 바와 같은 특성을 나타낸다. 축방향 유속과 안쪽축의 회전이 증가함에 따라 고체 입자의 이송 속도도 증가하였다. 하지만 일정 회전속도 이후에는 회전의 영향의 거의 나타나지 않았다.

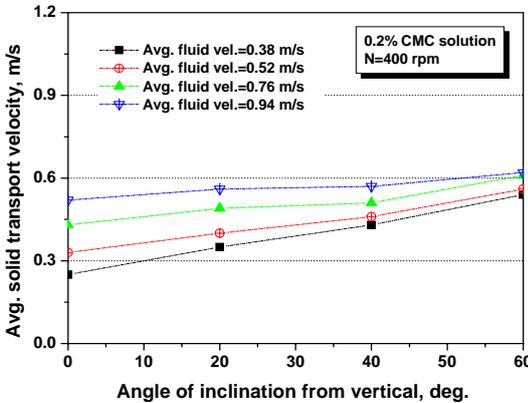
수직 환형관에서의 잔재물 이송과는 달리 경사 환형관에서의 굴착이수의 성능을 평가하기 위해서 평균 잔재물 이송속도를 이용하는 것은 오류를 유발할 수 있다. 유체와 고체입자의 유동에 있어서 입자의 침전층 형성과 이에 수반되는 유효 유동면적의 감소가 유체와 고체입자의 높은 유효속도를 유발할 수 있기 때문이다.

경사진 환형관에서 고-액 혼합유체의 특성을 살펴보면 축방향 유속과 환형관의 경사각이 증가함에 따라 고체입자의 이송속도는 증가하는 것으로 관찰되었다. 또한 안쪽축의 회전도 잔재물의 이송속도를 증가시키지만 300 rpm 이상에서는 회전의 영향이 거의 나타나지 않는 것으로 파악되었다.

환형관의 경사각이 증가하면 동일한 축방향 유속에 대하여 고체입자의 이송속도가 증가하는데 경사각 40° 부근에서는 이 속도의 증가가 눈에 띄게 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 이 부근의 경사각에서 고체입자가 유속의 반대 방향으로 미끄러져서 발생하는 현상 때문인 것으로 사료된다.



(a) 0 rpm



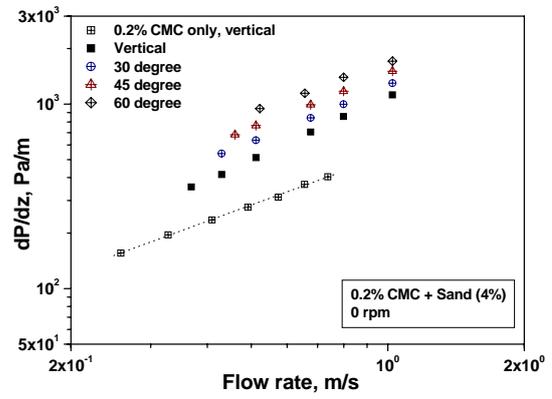
(b) 400 rpm

Fig. 2 Variation of cuttings velocity in 0.2% CMC solution with flow rate at 0 and 400 rpm

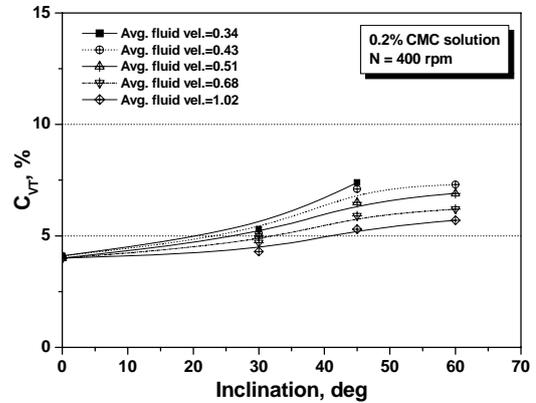
고-액 혼합유동에서의 압력손실은 Fig. 3(a)에 보이는 바와 같이 환형관 경사각과 안쪽축 회전수가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 고체 입자의 체적 점유율이 증가할수록 압력손실도 증가한다. 경사 환형관에서 입자에 대한 중력의 영향은 경사각이 증가할수록 압력손실의 점진적인 증가를 야기한다. 또한 그래프에 보이듯이 압력손실 변화는 환형관 경사각 보다는 안쪽축 회전에 의해 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

고-액 혼합유동에서 압력손실은 뉴턴 유체에서와 마찬가지로 환형관 경사각과 안쪽축 회전수가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다.

작동유체가 0.2% CMC 수용액인 경우 유동의 전반적인 경향은 층류유동임에도 불구하고 물의 경우와 유사하지만, 압력손실의 증가와 구배가 물에 비해 크게 나타난다. 0.2% CMC 수용액의 유동은 층류유동에 해당하기 때문에 직접적인 비교



(a) Pressure drop



(b) Particle volume concentration

Fig. 3 Variation of pressure drop and particle volume concentration in 0.2% CMC solution

는 힘들지만 0.2% CMC 수용액에서는 유량변화에 따른 압력손실의 증가폭이 매우 크다. 안쪽축 회전수 변화에 따른 압력손실 변화는 뉴턴유체에 비해 비교적 일정하게 증가하는 양상을 보인다.

고-액 혼합유체의 유속과 경사각 및 안쪽축 회전수에 대한 환형관 내 고체 입자의 체적 점유율, C_{VT} 의 변화를 Fig. 3(b)에 도시하였다. 환형관 내 고체 입자의 체적 점유율은 환형관 내 고-액 혼합유동에서 입자의 이송효율을 평가하는 중요한 변수이다. C_{VT} 는 고체 입자에 의해 점유되는 체적을 전체 환형관 체적으로 나누어 구할 수 있다. 본 연구에서는 시험부의 출구 부근에 유량을 샘플링 할 수 있는 장치를 설치하여 입자의 체적 점유율을 직접 계측하였다.

고체 입자의 체적 점유율이 작을수록 입자 이송성능이 우수함을 나타내는데 전체적인 특징을 살펴보면, 유속과 안쪽축 회전수가 증가할수록

C_{VT} 는 감소하지만, 환형관 경사각이 증가할수록 증가한다. 하지만 일정 회전수 이상에서는 C_{VT} 에 대한 회전의 영향이 증가하지 않는다.

5% 벤토나이트 수용액의 압력손실 변화를 Fig. 4(a)에 도시하였다. 동일한 조건에 대해서 5% 벤토나이트 수용액의 고-액 혼합유동에서의 압력손실 변화를 살펴보면, 0.2% CMC 수용액 보다 압력손실이 2.5배 정도의 증가하였다. 이는 점도의 증가와 이에 따른 고체 입자의 마찰이 급격하게 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

5% 벤토나이트 수용액의 고체 입자의 이송성능은 Fig. 4(b)에 보이는 바와 같이 동일한 입자 체적율에서 0.2% CMC 수용액에 비하여 우수하게 나타났다. Figure 4에서 5% 벤토나이트 수용액과 0.4% CMC 수용액의 C_{VT} 를 비교하였는데, 0.4%

CMC 수용액의 입자 이송성능은 0.2% CMC 수용액과 거의 동일한 성능을 나타내었다. 압력손실은 5% 벤토나이트 수용액이 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다.

일반적으로 고점도의 유체가 저점도의 유체에 비해서 우수한 이송 성능을 보이지만 5% 벤토나이트 수용액의 이송 성능이 특히 우수하게 나타난 것은 5% 벤토나이트 수용액의 밀도가 0.2% CMC 수용액에 비해서 크기 때문이다.

이송유체와 입자 사이의 밀도 차이가 감소하면서 입자 이송에 유리하게 작용한다. 즉, 일정 수준의 점도와 밀도가 적절하게 조화된 이송유체가 잔재물 이송에 효과적이다.

4. 결론

본 연구에서는 유정의 굴착작업에서 발생하는 굴착 잔재물의 이송과 관련하여 환형관 내 고-액 혼합유동의 거동을 실험을 통해서 살펴보았다.

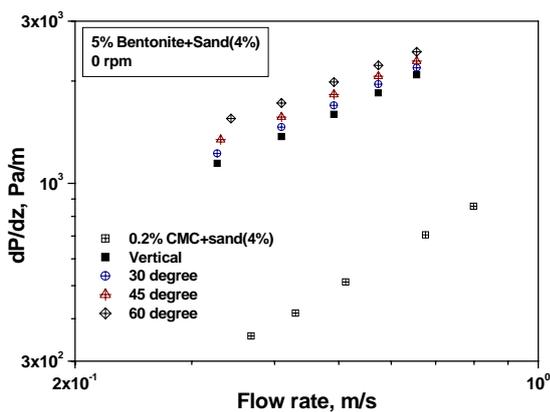
경사 환형관에서 안쪽축의 회전 효과는 난류에서는 크게 나타나지 않았으며, 환형관 기울기에 상관없이 층류에서는 중요하게 작용하였다. 이는 원심력이 소용돌이를 일으켜 고체 입자들이 속도가 빠른 환형관의 중심부로 이동시키는 경향이 있는 수직 유동에서 더 효과적이다. 그러나 실제 경사 환형관에서 이러한 경향은 침전층을 형성하는 고체 입자들 때문에 약해진다.

경사 환형관 유동에서 환형관의 경사각이 증가하면 고체 입자에 대한 중력의 영향으로 압력손실이 증가하게 된다. 고-액 혼합유동에서 안쪽축 회전은 순수 유체의 유동에서보다 압력손실의 변화에 큰 영향을 나타내었다. 이송되는 입자의 높은 체적점유율은 경사 환형관에서 높은 압력손실을 유발하였다.

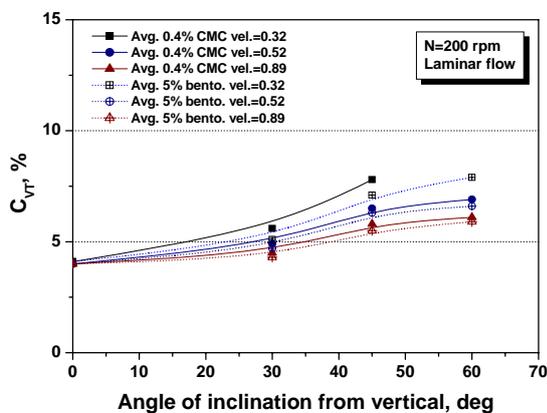
고점도의 유체가 저점도의 유체에 비해서 우수한 이송 성능을 나타내는데 5% 벤토나이트 수용액의 이송성능이 특히 우수하게 나타난 것은 5% 벤토나이트 수용액의 밀도가 0.2% CMC 수용액에 비해서 크기 때문이다.

후 기

이 논문은 2008년도 두뇌한국21사업 및 한국지질자원연구원의 지원에 의하여 수행되었음.



(a) Pressure drop



(b) Particle volume concentration

Fig. 4 Variation of pressure drop and particle volume concentration in 5% bentonite solution

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Tomren, P. H., 1979, The Transport of Drilled Cuttings in an Inclined Eccentric Annulus, M.S. Thesis, University of Tulsa, Tulsa, OK-USA.
4. Lauzon, R. V., and Reid, K. I. B., 1979, New Rheological Model Offers Field Alternatives, Oil and Gas Journal, Vol. 77, pp. 51-57.
5. Kim, Y. J., Hwang, Y. K., and Woo, N. S., 2002, A Study on the Transitional Flows in a Concentric Annulus with Rotating Inner Cylinder, International Journal of KSME, Vol. 14, No. 10, pp. 833-843.
6. Aniekan W. I., 1980, Drilled-cuttings Transport by Non-Newtonian Drilling Fluids through Inclined, Eccentric Annuli, The University of Tulsa, Canada.