

환형관내 고-액 2상 유동의 압력손실 변화특성에 대한 연구

우남섭[†]·한상목(성균관대원)·황영규*(성균관대학교)·윤치호·김영주**(한국지질자원연구원)

A Study on the pressure loss of solid-liquid 2 phase flow in an annulus

Sang-Mok Han, Nam-Sub Woo, Young-Kyu Hwang, Byung-Taek Seo,
Chi-Ho Yoon, Young-Ju Kim, and Dong-Kil Lee

Key Words: Annulus flow(환형관유동), Solid-liquid two phase flow(고-액 2상 유동), Pressure loss(압력손실), Solid concentration(입자체적율)

Abstract

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. An experimental study was carried out to study solid-liquid two phase flow in a slim hole annulus. Annular velocities of carrier fluids varied from 0.2 m/s to 1.5 m/s. The carrier fluids which were utilized included tap water and CMC water solutions. Pressure drops and average flow rates were measured for the parameters such as inner-pipe rotary speed, carrier fluid velocity, hole inclination and particle injection rate. For both water and CMC solutions, the higher the concentration of the solid particles is, the larger the pressure gradients become.

그리스 문자

기호설명

dp/dz : 축방향 압력손실, [Pa/m]
 D_h : 등가수력직경, [m]
 R_1 : 안쪽축 반경, [m]
 R_2 : 바깥쪽 실린더 반경, [m]
 Re_p : 입자 유동레이놀즈수
 v_z : 축방향 유동 속도, [m/s]

μ : 절대점성계수 [Pa s]
 ρ : 유체 밀도, [kg/m³]
 ν : 동점성계수, [m²/s]
 η : 반경비, R_1 / R_2
 ϕ : 입자 농도율 [%]
 θ : 환형관 기울기 [°]

1. 서론

굴착작업에 있어서 가장 중요한 관심사 중의 하나는 굴착 잔재물의 효과적인 제거인데 이 작업은 특별하게 합성된 굴착 유체가 드릴 파이프를 통해 밀므로 내려가서 드릴 파이프와 홀 사이의 간극을 통하여 회전하면서 위로 올라오는 유동에 의하여 이루어진다. 수직 또는 거의 수직인

[†] 성균관대학교 대학원
E-mail : ykhwang@skku.edu
TEL : (031)290-7499 FAX : (031)290-5889
^{*} 성균관대학교 기계공학부
^{**} 한국지질자원연구원 지반안전연구부

굴착에서는 그러한 문제가 적절하게 제어되지만 경사 굴착 (directional drilling)에서는 경사진 환형관은 수직 환형관에서는 발생하지 않는 몇 가지 문제를 가지고 있다.

고-액 2상 유동에 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 경우이다.

굴착 잔재물의 이송과 관련된 연구는 1940년대부터 진행되어 왔다. 초기의 연구는 terminal 속도의 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 실험적으로 평가하였다. Kim 등⁽⁵⁾도 CMC 수용액 및 벤토나이트 수용액 등 비뉴턴유체의 유동특성에 대한 다양한 연구를 수행하였다.

하지만 기존 연구자들의 연구에서는 비현실적으로 큰 유속을 사용하거나 test section의 길이가 짧아 정상상태에 도달하지 못하는 등의 문제점들이 있다.

따라서 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 실험장치를 이용하여 고-액 2상 유동의 원리에 기초한 유동특성을 규명하고자 한다.

2. 환형관내 고-액 2상 유동

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 대부분이 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. 실험장치와 실험방법에 대한 자세한 설명은 Woo 등⁽⁶⁾의 논문에서 자세하게 설명되어 있고, 본 연구에서는 변경된 내용만 설명하였다.

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

세 방향으로 하여 유체가 방해받지 않고 빠져 나갈 수 있도록 제작하였다.

실험장치 내를 순환하는 모래 입자의 농도 조절은 기존에 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 고액 2상 유체가 설정될 수 있도록 하였다.

모래 입자는 크기별로 분류하여 최대한 균일한 입자들이 되도록 하였으며, 본 실험에서는 평균 지름은 2 mm 정도로 측정된 모래입자를 사용하였다.

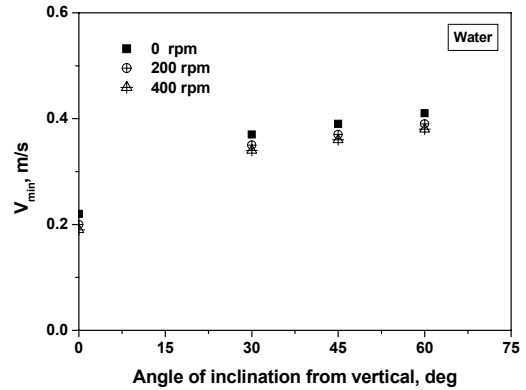
4. 결과 및 고찰

반경비 0.7에서 작동유체의 변화에 대한 축방향 유량과 축방향 압력손실이나 표면마찰계수와 레이놀즈수와 관계는 Kim 등⁽⁵⁾의 논문에서 이미 발표된 적이 있다. 안쪽 축의 회전과 축방향 유속이 존재하는 환형관 유동은 일반적인 파이프 유동보다 복잡한 유동 형태를 나타낸다.

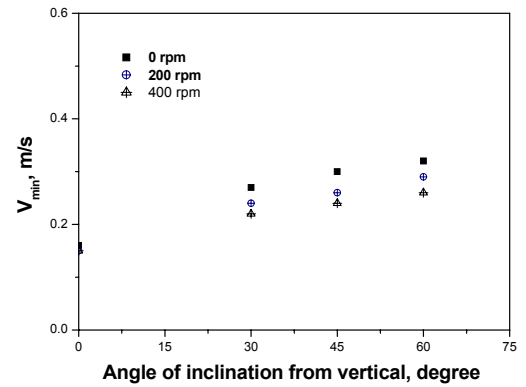
모래 입자가 섞인 고액 2상 유동에 있어서 가장 중요한 유동변수 중의 하나는 고체 입자의 최소 이송속도이다. 이 속도 이하로 유동이 진행될 때에는 유동영역이 비정상상태로 되고, 관의 아래쪽으로 고체 입자의 축적이 계속되기 때문에 매우 위험하다. 반경비가 0.7인 환형관에서 환형관의 경사, 안쪽축의 회전 및 유량에 따른 고체 입자의 최소 이송속도를 Fig. 1에 나타내었다.

그림에 보이는 바와 같이 환형관의 경사각이 증가할수록 고체 입자의 최소 이송속도는 증가하게 된다. 이는 30° 이상의 경사 환형관에서는 중력의 영향으로 관의 아래쪽으로 고체 입자들이 물리면서 침전층을 형성하기 때문이다. 따라서 큰 덩어리의 침전층을 이송시키기 위해서는 높은 유속이 필요하게 된다. 또한 안쪽축의 회전은 침전층의 형성을 방해하면서 최소 이송속도를 감소시키는데 효과를 나타내지만 400 rpm에서는 그 효과가 줄어드는 것을 알 수 있다.

0.2% CMC 수용액의 경우는 물에 비해 점도 (4.5 cP)가 증가하면서 고체 입자의 최소 이송속도는 물에 비해 감소하는 것을 알 수 있다. 고체



(a) Water



(b) 0.2% CMC solution

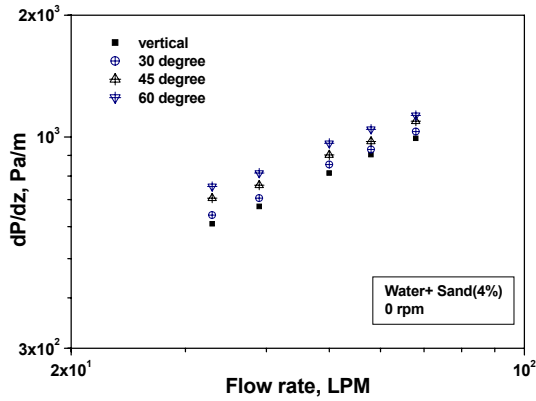
Fig. 1 Minimum rising velocity of solid particle in inclined annulus.

입자의 최소 이송속도 영역은 물의 경우는 난류 유동영역이고, 0.2% CMC 수용액의 경우는 층류 유동영역이다. 일반적으로 환형관의 큰 경사각은 고체 입자의 축적을 유발하여 수직 환형관에서 요구되는 유량보다 훨씬 큰 유량을 필요로 하게 된다.

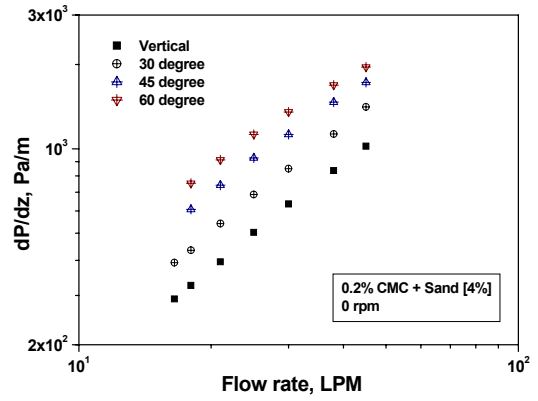
고체 입자가 섞인 고액 2상 유동에 있어서 가장 중요한 유동특성 중의 하나는 2상 유동의 유량에 따른 압력손실의 변화이다. 고체 입자의 이송유체가 물인 경우에 대한 축방향 유량과 압력손실의 관계를 Fig. 2에 나타내었다.

고체 입자가 섞이지 않은 순수한 유체의 유동에서는 환형관의 경사에 따른 압력손실은 발생하지 않는다. 하지만 고체 입자가 섞인 고액 2상 유동에서는 중력의 영향에 의해 환형관의 경사각 변화에 따라 압력손실이 변하게 된다.

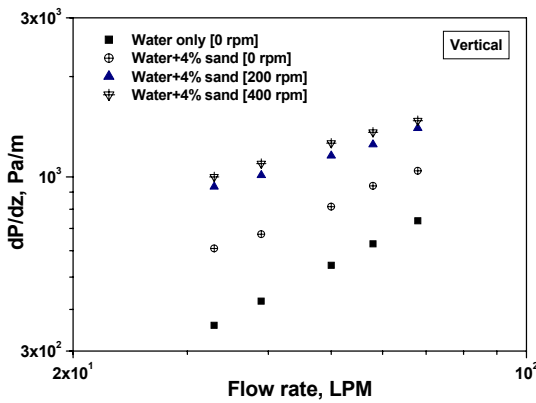
고액 2상 유동에서 압력손실은 Fig. 2에 보이



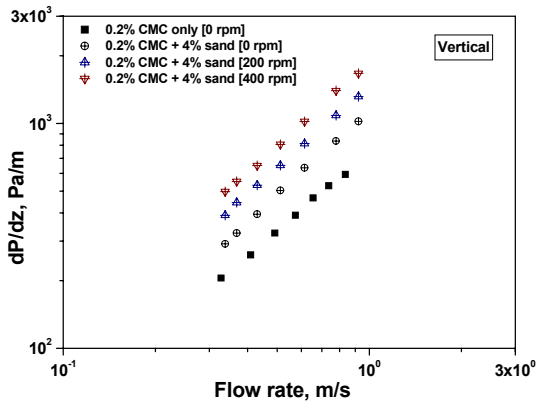
(a) dP/dz with inclination



(a) dP/dz with inclination



(b) dP/dz with rotational speed



(b) dP/dz with rotational speed

Fig. 2 Pressure loss of sand-water mixture as a function of mixture velocity.

Fig. 3 Pressure loss of sand-0.2% CMC solution mixture as a function of mixture velocity.

는 바와 같이 환형관의 경사각과 안쪽축의 회전수가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 경사 환형관에서 중력의 추가적인 영향은 경사각이 증가할수록 압력손실의 점진적인 증가를 야기한다. 압력손실은 환형관의 경사각 보다는 안쪽축의 회전에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

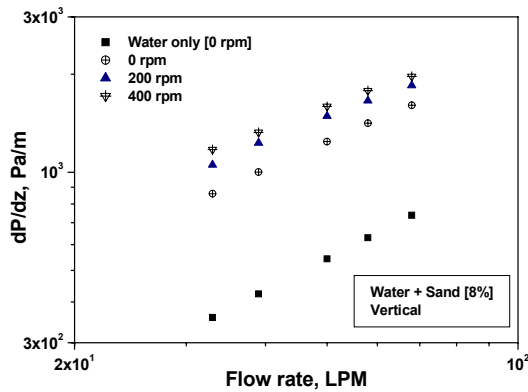
안쪽축의 회전수에 따른 압력손실의 변화는 순수한 유체의 유동에 비해 훨씬 크게 나타난다. 이는 고체 입자가 안쪽축의 회전에 크게 영향을 받기 때문이다. 또한 압력손실에 대한 안쪽축의 회전의 영향은 400 rpm에서는 그 효과가 현저하게 감소하고 있다. 고체 입자의 이송속도에 대한 회전의 영향에서도 400 rpm에서는 그 효과가 줄어드는 것을 확인하였다.

작동유체가 물인 경우의 유동영역은 기본적으로 난류유동에 해당하며 축방향 유량이 증가할

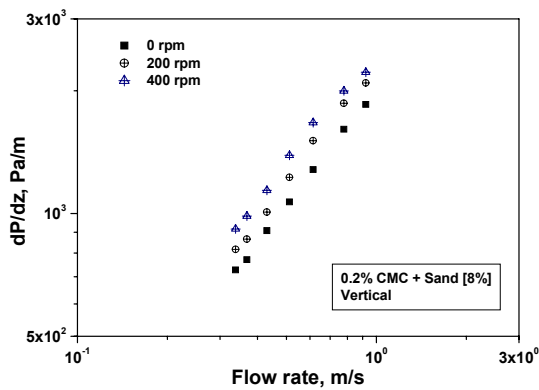
수록 경사각과 회전의 영향이 점차적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 축방향 유속의 영향이 상대적으로 증가하기 때문이다.

작동유체가 0.2% CMC 수용액인 Fig. 3의 경우 전반적인 경우는 Fig. 2와 유사하지만 압력손실의 변화 구배가 물에 비해 크게 나타난다. 이는 0.2% CMC 수용액의 유동은 층류유동에 해당하기 때문에 직접적인 비교는 힘들지만 0.2% CMC 수용액은 유량 변화에 따른 압력손실의 증가폭이 매우 크다. 환형관의 경사각과 안쪽축의 회전에 따른 압력손실의 변화는 비슷한 증가폭을 갖는다. 또한 안쪽축의 회전수 변화에 따른 압력손실의 변화는 비교적 일정하게 증가하는 양상을 보인다.

높은 점도의 유체에서는 난류의 발생이 어렵기 때문에 경사각이 큰 환형관에서는 두꺼운 침전층



(a) Water



(b) 0.2% CMC solution

Fig. 4 Variation of cuttings velocity with inclination of water at 200 rpm

의 형성을 막기 힘들기 때문에 낮은 점도의 유체가 높은 점도의 유체보다 환형관 내에서 침전층의 형성을 방해하는데 더 우수한 성능을 나타낸다. 0.2% CMC 수용액의 경우도 물에 비해서 침전층의 형성 방해 효과가 적기 때문에 환형관의 아래 부분으로 많은 고체 입자가 흘러가고 이러한 이유로 압력손실의 변화가 더욱 가파른 것으로 사료된다.

고체 입자의 체적 점유율을 8%로 높인 고-액 2상 유동에 대한 압력손실의 변화를 Fig. 4에 도시하였다. 고체 입자의 증가에 따라 압력손실도 증가하며 증가의 폭은 4%의 경우에 비해 작게 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 유정의 굴착작업에서 발생하는

굴착 잔재물의 이송과 관련하여 환형관 내 고-액 2상 유동에서의 압력손실 변화를 살펴보았다.

유체의 진행방향으로 환형관의 경사각이 증가하면 중력의 추가적인 영향으로 높은 압력구배를 갖게 된다. 고-액 2상 유동에서 안쪽축의 회전은 순수 유체의 유동에서보다 압력손실의 변화에 큰 영향을 나타내었다.

이송되는 입자의 높은 체적점유율은 경사 환형관에서 높은 압력손실을 유발하였다. 이는 많은 양의 고체 입자가 쌓인 침전층을 유지하거나 이송시키기 위해서 큰 평균 유속이 필요하기 때문이다.

후기

이 논문은 2007년도 두뇌한국21사업과 한국지질자원연구원의 지원에 의해 수행되었음.

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) Woo, N. S., Hwang, Y. K., Yoon, C. H., and Kim, Y. J., 2006, A Study on the solid-liquid helical flow in a slim hole Annulus, Proceeding of the 4th National Congress on Fluid Engineering 2006, pp. 956-961.