

Slim hole 환형관내 고-액 2상 헬리컬 유동에 관한 연구

우남섭*(성균관대원) 황영규*†(성균관대학교) 윤치호 · 김영주**(지질자원연구원)

A Study on the solid-liquid helical flow in a slim hole Annulus

Nam-Sub Woo, Young-Kyu Hwang Chi-Ho Yun, and Young-Ju Kim

Key Words: Two-phase flow(2상 유동), Non-Newtonian fluid(비뉴턴유체), Settling velocity(침전 속도), Directional drilling(경사굴착)

Abstract

An experimental investigation is carried out to study 2-phase vertically upward hydraulic transport of solid particles by water and non-Newtonian fluids in a slim hole concentric annulus with rotation of the inner cylinder. 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 fluid velocities varied from 0.2 m/s to 3.0 m/s. Pressure drops and average flow rate and particle rising velocity are measured. For both water and 0.2% 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]
 η : 반경비, R_1 / R_2
 R_1 : 안쪽축 반경, [m]
 R_2 : 바깥쪽 실린더 반경, [m]
 Re : 축방향 유동 레이놀즈수
 v_z : 축방향 유동 속도, [m/s]
 V_f : 체적 비율,

μ : 절대점성계수 [Pa s]
 ρ : 유체 밀도, [kg/m³]
 ν : 동점성계수, [m²/s]

1. 서론

천연자원 중 가장 중요한 석유, 가스의 경우 시추 및 개발 과정에서 손실되는 에너지의 양은 상당하다. 이렇게 손실되는 에너지를 줄이는 것은 새로운 대규모의 유전을 발견하는 것만큼이나 중요하다. 시추과정에서의 경비 절감은 물론이고 환경오염의 극소화도 배제할 수 없으며, 시추작업의 경제성과 효율성을 향상시켜야 한다. 이러한 목적을 제대로 구현할 수 있는 시추 기법이 slim hole 시추 공법이다.

† 성균관대학교 기계공학부
E-mail : ykhwang@skku.edu
TEL : (031)290-7437 FAX : (031)290-5889

* 성균관대학교 기계공학과 대학원

** 한국지질자원연구원 지반안전연구부

이수의 유동 경로 중에서 우리가 관심을 갖는 영역은 작동유체에 의해 압편이 운반되는 환형관 내 간극이다. 이러한 이수의 주요 역할은 시추공 내 압편제거, 공벽보호, 지층압 제어 등이며 점도가 증가하면 정수압 손실이 증가되어 비트의 충격력이 감소하게 된다.

기하학적 형상으로 단순화시켜볼 때 이 영역은 내벽이 회전하는 동심 환형관으로 가정될 수 있다. 이 영역의 유동은 일반적으로 회전방향의 평면 쿨렛유동과 축방향 간극유동이 합성된 나선유동으로 정의될 수 있다. 그러나 축방향의 유동과 내벽의 회전에 의해 유동은 반경 방향의 속도 성분을 갖게 될 뿐 아니라 각속도 성분들 사이의 상호작용으로 인하여 비선형성을 나타내게 되므로 앞서 언급한 두 유동의 단순한 중첩만으로 해석될 수 없는 복잡한 양상을 띠게 된다.

굴착 잔재물의 이송과 관련된 기존 연구들은 크게 유체 내에서 입자의 운동역학, 굴착 이수의 특성 및 작용, 편심 환형관에서의 비뉴턴유체의 속도분포 등에 대한 내용으로 크게 세 부류로 나눌 수 있다.

입자의 운동역학과 관련된 연구로 1959년 Becker⁽¹⁾는 고체입자의 항력계수(drag coefficient)에 관련된 연구를 수행하여 입자의 형태에 따른 유동특성을 고찰하였고, 항력계수의 관점에서 비구형의 입자가 더 잘 이송됨을 밝혔다. 최근에는 Hottovy 등⁽²⁾이 불규칙하게 생긴 입자의 미끄럼 속도에 대한 연구를 수행하였다. 그들은 큰 레이놀즈수에서는 불규칙한 입자에 대한 항력계수가 구에 대한 항력계수보다 높음을 보였다.

굴착이수에 대한 연구는 Lauzon 등⁽³⁾에 논문이 대표적인데 그들은 굴착이수의 다양한 유변학적 모델을 이용하여 굴착이수의 정밀성을 실험적으로 평가하였다. Kim 등⁽⁴⁾도 CMC 수용액 및벤토나이트 수용액 등 비뉴턴유체의 유동특성에 대한 다양한 연구를 수행하였다.

편심 환형관내 비뉴턴유체의 유동에 대한 최초의 연구 중 하나는 1955년 Tao 등⁽⁵⁾에 의해 이루어졌는데 그들은 환형관내 층류 및 난류 유동에 대한 실험 및 이론적 연구를 수행하였다. 최근에는 Escudier 등⁽⁶⁾에 의해서도 많은 연구가 실험 및 수치해석 적 방법으로 수행되고 있다.

하지만 기존 연구자들의 연구에서는 비현실적으로 큰 유속을 사용하거나 시험부의 길이가 짧

아 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 조사할 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.

만약 입자가 유체에서 자유롭게 떨어진다면

$$V_{pi} = V_{Li} - V_{Si} \quad (1)$$

여기서 V_{pi} 와 V_{Si} 는 i 번째 입자의 상승 및 침전 속도이고 V_{Li} 는 i 번째 입자에 인접한 유체의 순간적인 유속이다. 이는 비현실적이며 사실상 불가능하다. 이러한 이유로 기존 연구자들은 전체 입자를 다루었다. 그러면 식(1)은 다음과 같이 단순해진다.

$$V_P = V_L - V_s \quad (2)$$

여기서 속도에 대해서는 평균 또는 bulk 속도가 적용되었다.

경사환형관에서는 수직환형관에서처럼 각 입자가 축방향 미끄럼 속도만을 가지는 것이 아니라 반경방향 미끄럼 속도도 가진다. 따라서 이송유체의 반경방향 유동을 무시하면,

$$V_{pa} = V_a - V_s \cos \phi \quad (3)$$

$$V_{pr} = V_s \sin \phi \quad (4)$$

여기서 ϕ 는 수직으로부터 관의 기울어진 각도를 나타낸다. 식 (4)는 층류 유동에 적용되는 식이지만 난류유동에서도 반경방향 유동은 불규칙하며 축방향 유동에 비해 작으므로 식 (4)를 적용하는데 큰 문제는 없다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

반경비가 0.8인 환형관의 경우 바깥쪽 실린더는 직경이 36mm인 투명 아크릴 파이프를 사용하여 제작하였고, 안쪽 축은 외경이 30mm인 스테인레스 연마봉을 사용하였다. 실험장치의 개략을 Fig. 1에 도시하였다.

실험장치는 유체를 회전시키는 펌프 및 고체 입자 투입장치, 순환 전에 두 물질을 분리할 수 있는 필터, 안쪽 축을 회전시키는 장치, 유량 및 입자 주입속도 조절 장치, 안쪽 축의 회전을 측정할 수 있는 장치, 평균 이동속도를 측정할 수 있는 장치 및 시험부의 기울기를 조절할 수 있는 장치로 구성되어 있다.

바깥쪽 실린더는 내부 유동을 관찰할 수 있는 투명한 아크릴 재질로 제작하였고, 안쪽축은 직경이 30mm인 스테인레스 강재 연마봉을 사용하였고 개략적인 실험장치를 Fig. 1에 도시하였다. 축 방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부까지의 길이를 수력직경의 116배 이상 되도록 제작 하였다. 안쪽축이 회전할 때 생기는 편심도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 이내이다.

차압을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.5m 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였다. 압력 탭 내부 hole의 직경은 0.5mm인 정압 탭을 사용하였다.

3.2 실험방법

실험을 수행하기 전에 모든 작동유체를 잘 섞어주고 유변학적 물성치를 조절하였다. 기존 연구자들의 연구와 본 실험에서의 물성치 측정의 의해서 물을 제외한 유체들은 모두 비뉴튼유체의 power law 유변학 모델을 따르고 있다. 주요 실험 절차는 다음과 같다.

펌프의 전원을 연결하기 전에 우회 밸브(bypass valve)와 출구 쪽 밸브를 완전히 개방하

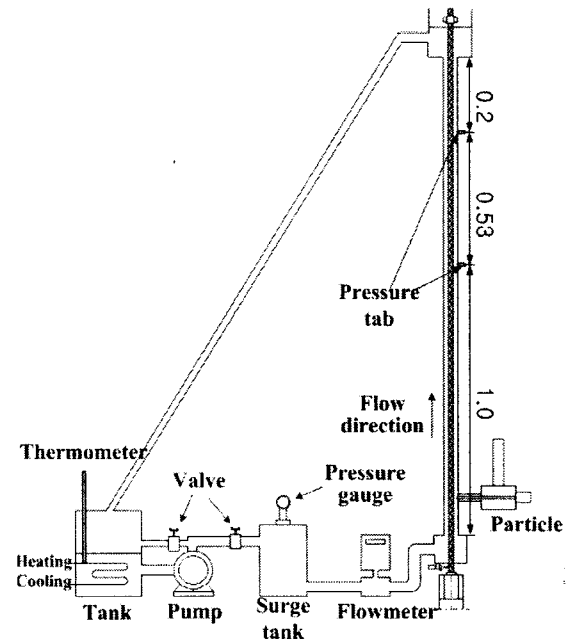


Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus.

고, surge tank 입구 밸브를 닫는다. Surge tank에 유체가 충분히 채워질 수 있도록 하고, 차압 측정을 위하여 마노미터와 정압 탭 사이의 튜브 안을 작동유체로 채운다. 유량이 거의 0인 상태에서 마노미터 안에 있는 유체의 수두 값을 일치시킨다. 정상 상태에서 입자투입장치를 가동시키고 유체의 역류상태에 따라 모래 투입구 후단의 압력을 적절히 조절하고 스크류 피더의 회전속도를 조절하여 고체 입자의 투입율을 일정하게 조절한다. 정상상태가 이루어지면 수조의 온도를 멀티미터를 사용하여 측정하고 유량계의 유량과 마노미터의 차압을 측정한다. 초고속 카메라를 이용하여 고체 입자의 이송 속도를 측정한다. 동시에 환형관 전 부분에서의 고체 입자의 거동을 관찰하고, 디지털 카메라를 이용하여 고체 입자의 특별한 거동을 촬영한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 실험 결과

반경비 0.8에서 작동유체의 변화에 대한 축방향 유량과 축방향 압력손실이나 표면마찰계수와 레이놀즈수와의 관계는 Kim 등⁽⁴⁾의 논문에서 이

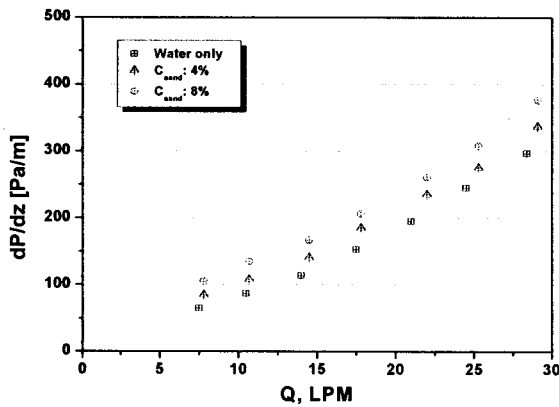
미 발표되었다.

굴착 작업에서 굴착작업의 진행상황을 파악하는데 매우 중요한 변수인 축방향 압력손실에 대한 물과 0.2% CMC 수용액의 2상 유동에 대한 측정 결과를 Figs. 3과 4에 나타내었다. 축방향 유속이 증가할수록 고체 입자의 투입율이 증가할수록 축방향 압력손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 고체 입자의 투입율이 증가할수록 축방향 압력손실이 증가하는 이유는 고체 입자간의 충돌, 고체 입자와 벽면의 충돌로 인한 마찰의 증가 때문이다.

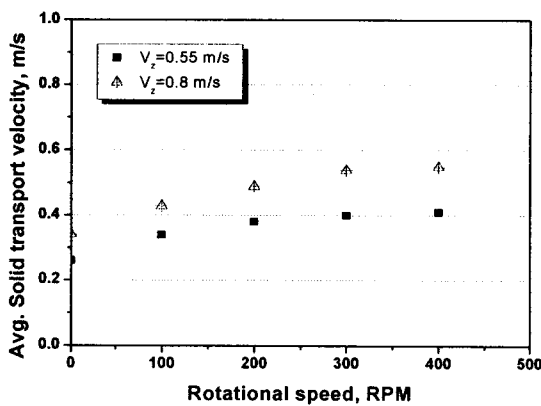
두 작동유체에서 모두 축방향 유속과 환형관의 경사각이 증가함에 따라 고체 입자의 이송 속도도 증가하였다. 또한 안쪽축의 회전도 잔재물의 이송 속도를 증가 시키지만 300 rpm 이후에는 회전의 영향의 거의 나타나지 않는 것으로 파악

되었다. 높은 점성의 유체인 0.2% CMC 수용액은 물에 비해 층류에 해당하는 낮은 유속에서도 고체 입자의 이송이 원활하게 수행되었다. 굴착 작업에 있어서 굴착 잔재물의 이송과 굴착 벽면의 안정성 확보는 모두 매우 중요한 사항이므로 축방향 유속에 따른 굴착 잔재물의 이송과 이때의 벽면에 작용하는 전단응력 및 축방향 압력손실의 제어는 매우 중요한 문제이다.

환형관의 경사각이 증가하면 동일한 축방향 유속에 대하여 고체 입자의 이송 속도가 증가하는데 경사각 40° 부근에서는 속도의 증가가 눈에 띄게 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이 이 부근의 경사각에서 고체 입자가 유속의 반대 방향으로 미끄러지려는 성질이 발생하기 때문인 것으로 사료된다. 환형관의 경사각이 증가하면 안쪽축의 회전에 따른 편심의

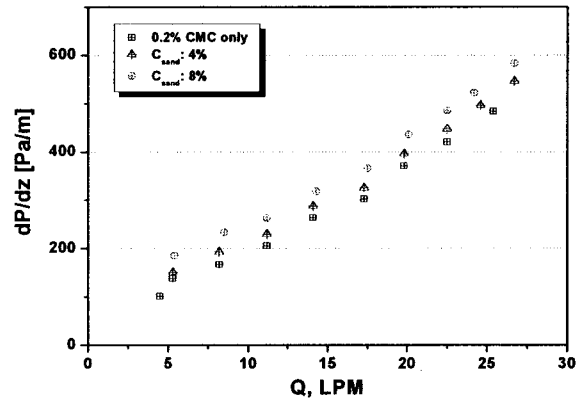


(a) Pressure loss vs. flow rate

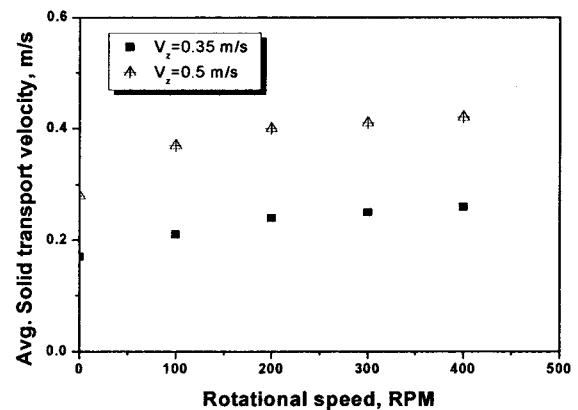


(b) Solid transport velocity vs. rpm

Fig. 3 Two-phase frictional pressure drop versus mixture velocity in the case of water.



(a) Pressure loss vs. flow rate



(b) Solid transport velocity vs. rpm

Fig. 4 Two-phase frictional pressure drop versus mixture velocity in the case of 0.2% CMC solution.

발생 등으로 실험의 어려움이 존재하지만 추가 실험을 통해서 경사각 80° 부근에서의 고체 입자의 유동특성에 대한 연구가 더 수행되어야 한다.

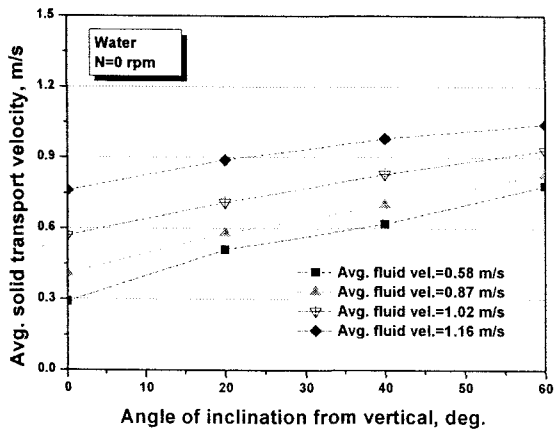
환형관 경사각과 유량 변화에 따른 고-액 2상 유동의 특성을 Figs. 5~6에 나타내었다. 각각의 작동유체에 대하여 안쪽축의 회전수와 축방향 유량을 변화시키면서 실험을 수행하였다.

경사각 10° 실험은 수직과 동일한 유동조건에서 수직 환형관 유동과의 유사성 또는 차이점을 파악하기 위해서 수행하였다. 굴착 잔재물 이송의 관점에서 경사각 10° 실험에서의 이송 성능이 수직 환형관과 비교해서 약간 나빠지는 것으로 관찰되었다. 이상의 결과로부터 10° 정도까지의 부주의한 hole의 기울어짐은 굴착 작업에 특별한 영향을 미치지 않는다는 것을 예측할 수 있다.

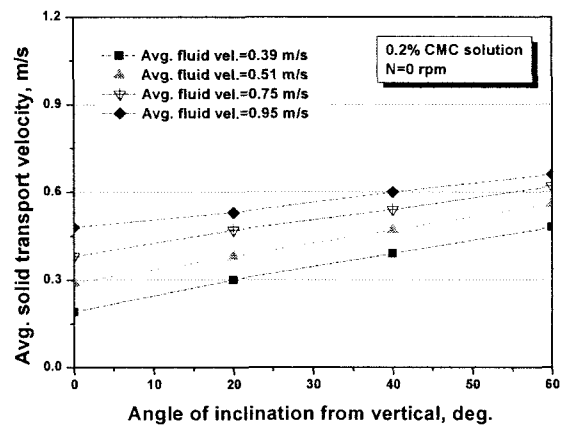
일반적으로 큰 경사각은 잔재물의 축적도 (buildup)를 변화시켜 수직 환형관에서 요구되는

유량보다 훨씬 큰 유량을 필요로 하게 된다. 이와 관련되어 기존 연구자들에 의해서 발표된 잔재물 이송 현상을 살펴보면 다음과 같다. 층류 수직유동에서 입자는 이론적 속도 형상을 따르고 환형관의 중앙 부근에서 빠르고 부드럽게 이동한다. 벽면 근처에서는 비록 정체되기는 하지만 안쪽축의 회전에 의해서 입자들이 나선형 형태로 이송되는 것이 명확하지는 않다. 특히 안쪽 축 회전의 효과는 난류유동에서는 더 미미해 보인다. 또한 낮은 유속에서는 입자들이 뭉쳐서 이동하는 현상이 더 자주 발생한다.

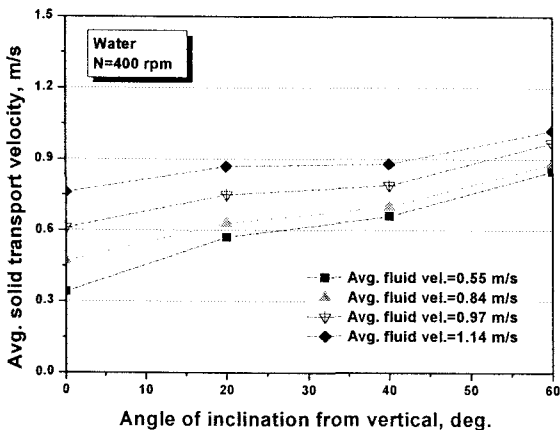
환형관의 경사각이 10°를 넘어가면서 고체 입자의 거동도 점차적으로 변화하지만 특별한 현상은 관찰되지 않았다. 증가하는 반경방향의 미끄럼속도 때문에 점점 더 많은 고체 입자들이 환형관의 아래쪽으로 집중되었고, 결국 낮은 유량에서는 고체 입자들이 층을 형성하기 시작하였다.



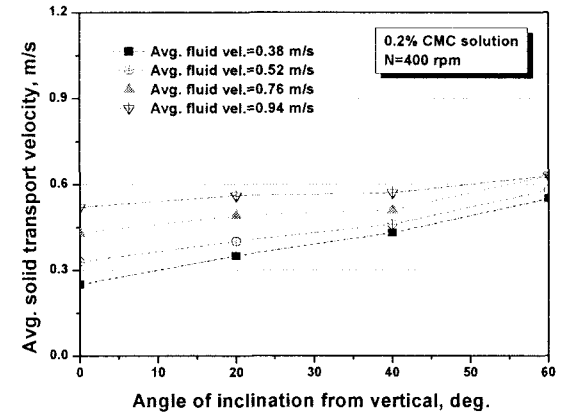
(a) 0 rpm



(a) 0 rpm



(b) 400 rpm



(b) 400 rpm

Fig. 5 Axial velocities of water and sands in laminar flow regime.

Fig. 6 Axial velocities of 0.2% CMC solution and sands in laminar flow regime.

일반적으로 환형관 유동장으로 입자가 투입되면 입자들은 환형관의 아래쪽으로 이동되었고, 축방향으로 이동하면서 환형관의 중간 부근에서 다시 속도가 빠른 영역으로 이동하면서 환형관을 빠져나갔다. 이러한 현상이 계속 반복되었다.

고체 입자들은 환형관의 아래쪽으로 점점 더 많은 중력을 받는다. $30^\circ \sim 60^\circ$ 사이의 환형관 기울기에서 2상 유동의 천이가 존재하는 것으로 예상된다. 일반적으로 유속이 0.76 m/s 이하에서 고체 입자의 층이 형성되기 시작하였다. 환형관의 경사각이 증가할수록 층이 형성되는 속도가 증가하였다.

두 작동유체에서 모두 축방향 유속과 환형관의 경사각이 증가함에 따라 고체 입자의 이송 속도도 증가하였다. 또한 안쪽축의 회전도 잔재물의 이송 속도를 증가 시키지만 300 rpm 이후에는 회전의 영향의 거의 나타나지 않는 것으로 파악되었다. 높은 점성의 유체인 0.2% CMC 수용액은 물에 비해 층류에 해당하는 낮은 유속에서도 고체 입자의 이송이 원활하게 수행되었다.

환형관의 경사각이 증가하면 동일한 축방향 유속에 대하여 고체 입자의 이송 속도가 증가하는데 경사각 40° 부근에서는 속도의 증가가 눈에 띄게 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 앞 절에서 설명한 바와 같이 이 부근의 경사각에서 고체 입자가 유속의 반대 방향으로 미끄러지려는 성질이 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 안쪽축이 회전하는 환형관내 고-액 2상 유동의 유동 특성을 고찰해 보고자 하였다. 고체 입자의 투입율, 축방향 유속, 안쪽축의 회전수, 환형관의 기울기의 변화에 따른 고-액 2상 유동의 유동 특성을 실험과 수치해석을 이용하여 파악하였으며 중간 결과를 정리하면 다음과 같다.

유효 유동영역을 심각하게 감소시키는 잔재물 침전 층은 경사각이 40° 보다 큰 경우에는 빠른 유체의 속도에서도 관찰되었다. 침전의 두께는 유체 속도가 감소할수록, 환형관의 경사각이 증가할수록 두꺼워진다. 환형관의 단면 면적이 감소하면서 침전에 속하지 않는 일부 잔재물은 낮

은 유속에서도 더 빠르게 이송된다.

경사진 환형관에서는 평평한 난류 유동 형태는 대부분 환형관의 낮은 쪽으로 가라앉으려고 하는 특성을 나타내는 굴착 잔재물에 대해서 우수한 이송 성능을 제공한다. 층류 유동에서는 환형관 벽면 근처에서의 속도는 매우 작다. Power law 유체는 일반적으로 층류영역에서도 약간 평평한 속도 형상을 가지는 경향이 있다. 따라서 경사진 환형관에서 굴착 잔재물의 이송은 이러한 환경에서도 개선되어야 한다.

후 기

이 논문은 에너지관리공단의 학술진흥사업과 한국지질자원연구원의 ‘자원개발사업’에 의하여 지원되었음.

참고문헌

- (1) Becker, H. A., 1959, The effects of Shape and Reynolds Number on Drag in the Motion of a Freely Oriented Body in an Infinite Fluid, *Can. J. Chem. Eng.*, (April), pp.85-91.
- (2) Hottovy, J. D., and Sylvester, N. D., 1997, Drag Coefficients of Irregularly Shaped Particles, *I&EC Process Design and Development*, Vol. 18, pp. 443.
- (3) Lauzon, R. V., and Reid, K. I. B., 1979, New Rheological Model Offers Field Alternatives, *Oil and Gas Journal*, Vol. 77, pp. 51-57.
- (4) 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, Vol. 14, No. 10, pp. 833-843.
- (5) Tao, L. N., and Donovan, W. F., 1955, Through Flow in Concentric and Eccentric Annuli of Fine Clearance With and Without Relative Motion of the Boundaries, *Trans. ASME* (November), pp. 1291-1301.
- (6) Escudier, M. P., Oliveira, P. J., and Pinho, F. T., 2002, Fully developed laminar flow of purely viscous non-Newtonian liquids through annuli, including the effects of eccentricity and inner-cylinder rotation, *I. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, pp. 52-73.