

안쪽축이 회전하는 동심환형관내 고-액 2상 유동연구

김영주[†] · 한상목* · 우남섭* · 황영규*

한국지질자원연구원, *성균관대학교 기계공학부
(2008년 8월 27일 접수, 2009년 3월 16일 수정, 2009년 3월 31일 채택)

Solid-liquid 2phase flow in a concentric annulus with rotation of the inner cylinder

Young-Ju Kim[†], Sang-Mok Han*, Nam-Sub Woo*, Young-Kyu Hwang*

Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

*School of Mechanical Engineering Sungkyunkwan Univ.

(Received 27 August 2008, Revised 16 March 2009, Accepted 31 March 2009)

요 약

본 논문은 안쪽축이 회전하는 동심환형관 물과 비뉴턴유체의 고-액 2상 유동연구를 수행하였다. 점탄성유체의 유변학은 굴착구멍의 청결, 입자의 밖으로 수송하는 등 여러 가지 응용에 중요하다. 연구에서 투명한 아크릴관은 고체입자의 이동을 관찰하기 위하여 사용하였다. 환형관 속도는 0.3m/s에서 2.0m/s로 변한다. 머드시스템은 물과 CMC 수용액을 혼합하여 사용하였다. 연구에서 고려된 주요 변수들은 축회전속도, 유체 유동영역과 입자 주입율이다. 입자이송속도와 압력강하는 유체유량(Q, LPM)이 5~30의 범위에서 측정하였다. 물과 0.2% CMC 수용액에서 고체입자의 농도가 높을수록 압력손실이 커짐을 알 수 있었다.

주요어 : 환형관유동, 비뉴턴유체, 미끄럼속도, 고-액 2상 유동

Abstract — An experimental investigation is conducted to study a 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 velocities varied from 0.3 m/s to 2.0 m/s. The mud systems included fresh water and CMC solutions. Main parameters considered in the study were inner-pipe rotation speed, fluid flow regime and particle injection rate. A particle rising velocity and pressure drop in annulus have been measured for fully developed flows of water and of aqueous solutions. For both water and 0.2% CMC solutions, the higher the concentration of the solid particles is, the larger the pressure gradients become.

Key words : Annulus flow, Non-Newtonian fluid, Slip velocity, Solid-liquid two phase flow

1. 서 론

천연자원 중 가장 중요한 석유, 가스의 경우 시추 및 개발 과정에서 손실되는 에너지의 양은 상당하다. 이를

게 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. 석유시추에 있어서 가장 중요한 관점중의 하나는 굴착 잔재물의 효과적인 제거인데 이 작업은 특별하게 합성된 굴착 유체가 드릴 파이프를 통해 밑으로 내려가서 드릴 파이프와 홀 사이의 간극을 통해

[†]To whom correspondence should be addressed
Gwahang-no 92, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea
E-mail : kyjp7272@kigam.re.kr

서 회전하면서 위로 올라오는 유동에 의하여 이루어진다. 특히, 수직 또는 거의 수직인 환형관에서는 그러한 문제들이 적절히 통제되는 것으로 보이지만 방향성 굴착에서는 수직 환형관에서는 발생하지 않는 몇 가지 문제가 발생하게 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 비 구형의 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 모델(Bingham plastic, Oswald de Waele, power law 모델)을 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 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, 안쪽 축의 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. V_L 은 입자들의 존재를 설명한 다음의 환형관에서의 유체의 평균 속도를 나타낸다. V_a 는 환형관으로 단지 유체만 흐를 경우의 평균 유체 속도를 나타낸다.

따라서 $V_L = V_a / (1 - C_V / 100)$ 은 V_L 이 항상 V_a 보다 크다는 것을 의미한다. 이 식에서 C_V 는 환형관 내에서 잔재물의 percent 농도를 나타낸다. 낮은 입자 농도에서는 ($C_V \ll 100$) $V_a = V_L$ 이다. 그러면 식 (2)는 식 (3)으로 간단해진다.

$$V_P = V_a - V_S \quad (3)$$

식 (1)~(3)은 입자들이 서로 부딪치거나 벽과 부딪치지 않고 자유롭게 부양되는 상황임이 강조되어야 한다. 이 이상적인 상황은 입자들이 수직 well bore에서 낮은 입자 농도로 부드럽게 이송될 때 발생할 수 있다.

3. 실험 및 수치해석

3-1. 실험장치 및 방법

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 다음과 같은 주요한 부분들로 구성되어 있다. 이송 유체를 회전시키는 독립적인 장치 및 고체 입자 투입장치, 고체-유체 유동의 정상 상태를 만들기 위한 충분한 길이의 환형관, 재순환 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 이동속도 및 환형관내 입자의 농도를 작동유체에 상관없이 예측할 수 있는 장치, 시험부의 기울기를 조절할 수 있는 장치로 구성된다.

80ℓ의 용적을 가지는 수조로부터 작동유체를 공급하는

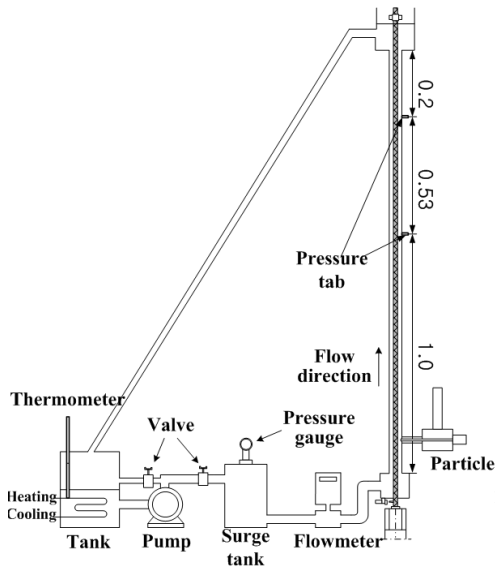


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

마그네틱 펌프는 온양정 9m일 때 최대 80LPM(ℓ/min)의 용량을 갖고, 펌프와 유량계 사이의 압력을 일정하게 유지하기 위해서 서지탱크를 설치하였다. 안쪽 축은 900 rpm 까지 회전이 가능한 모터를 사용하여 회전시키고, 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계를 통하여 측정하였으며, 모터의 회전수는 인버터에서 제어하였다. 유량은 1~60LPM의 측정범위를 갖고 정확도가 0.5%이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다. 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 시험부(test section) 까지의 길이를 수력직경의 116 배 이상이 되도록 하여 1.7m로 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. 유동의 안정적인 발달을 위하여 환형관의 입구 부분에서도 유동이 두 방향으로 유입되도록 하였으며 또한 실험장치 윗부분에서 부압이 발생하는 것을 방지하기 위해서 출구를 세 방향으로 설계하여 유체가 방해받지 않고 빠져나갈 수 있도록 제작하였다.

3-2. 수치해석

본 연구에서는 3차원, 비압축성 유체에 대하여 수치해석 상용코드인 Fluent를 사용하여 해석하였고 지배방정

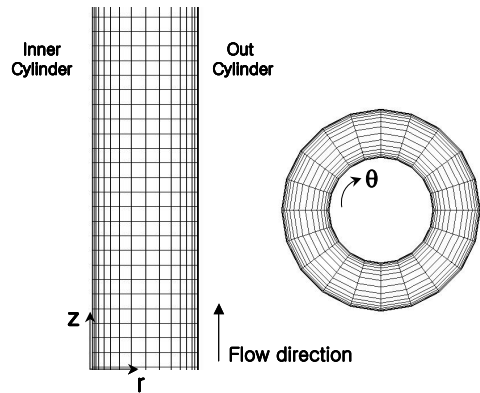


Fig. 2. Computational Grid.

식은 다음과 같은 연속방정식과 모멘텀 방정식 및 고체 입자운동량 방정식을 사용하였다.

$$\Delta \cdot u = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u(\nabla \cdot u) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \bar{u}_s \bar{u}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \bar{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \bar{g} + \alpha_s \rho_s (\bar{F}_s + \bar{F}_{i,jt,s} + \bar{F}_{vm,s}) + K_s (\bar{u}_l - \bar{u}_s) + m_{ls} \bar{u}_l \tag{6}$$

위의 식에서 u, ρ, v, p 는 각각 유체의 속도, 밀도, 동점성계수, 압력을 의미한다. 위 지배방정식은 수학적으로 이산화하기가 편리하고 수렴성이 좋아 유체 유동장 해석에 많이 사용되는 유한체적법(Finite Volume Method)을 사용하였다. 대류항의 이산화는 1계 상류도식(Upwind Differencing Scheme)을 사용하였다. 본 환형관 유동장의 해석에 사용된 격자계는 Fig. 2에 간단히 도시하였다. 축 방향으로 200개의 격자점을, 반경방향과 회전방향에 대해서는 똑같이 11개씩의 격자점을 주었고, 특히 반경방향은 양쪽 벽면으로 조밀하게 주었다.

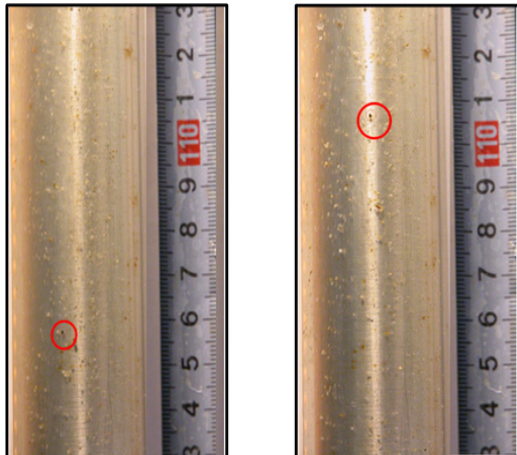
4. 결과 및 고찰

4-1. 실험결과

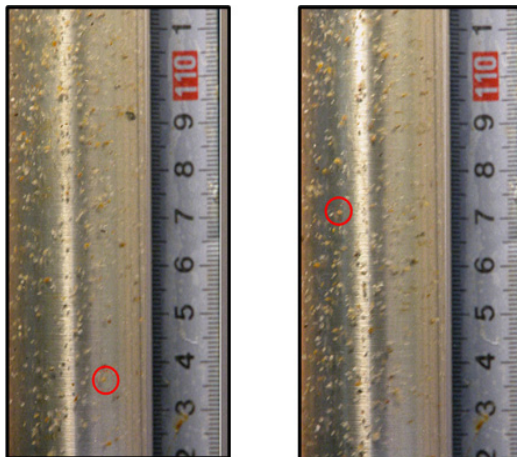
반경비 0.8에서 작동유체의 변화에 대한 축방향 유량과 축방향 압력손실이나 표면마찰계수와 레이놀즈수와 의 관계는 Kim 등⁽⁴⁾의 논문에서 이미 발표된 적이 있다. 유정의 굴착 작업에서의 유동은 일반적으로 층류영역에 속하며 본 연구에서도 층류영역에 대한 실험만을 수행하였다. 층류영역에서는 표면마찰계수와 축방향 유량의 관계는 선형적이다. 안쪽 축의 회전과 축방향 유속이 존재하는 환형관 유동은 일반적인 파이프 유동보다 복잡한 유동 형태를 나타낸다.

반경비가 0.8인 안쪽축이 회전하는 수직 환형관에서 작동유체가 물인 경우에 모래 입자의 유동을 Fig. 3에 나타내었고, Table 1에 정리하였다. 고속 카메라를 이용하여 다양한 조건에 대한 정밀한 실험을 수행하기 위한 실험 실험으로 디지털 카메라를 이용하여 모래 입자의 거동을 살펴보았다.

그림에서 좌, 우 두 장의 사진의 시간 간격을 0.3초이



(a) Sand concentration: 4%



(b) Sand concentration: 8%

Fig. 3. Photograph of sands particle movement in water.

Table 1. Comparison of sand-water flow velocities($C_s=4\%$).

축방향(V_z)	유체속도[m/s]	입자속도[m/s]
0 rpm	0.18	0.16
200 rpm	0.15	0.10
400 rpm	0.14	0.12
600 rpm	0.10	0.09

다. 따라서 모래 입자의 속도는 이동거리와 시간 간격을 이용하여 구하였으며 물의 유속은 마그네틱 유량계에서 측정된 유량을 환형관의 단면적으로 나누어 평균값을 계산하였다.

Table 1의 결과와 같이 안쪽축 회전수 변화에 따른 고체 입자의 최소 이송속도를 측정하여야 했다. 일정한 양의 입자가 흐르는 유동에서 입자의 최소 이송속도를 정량적으로 관찰한 것이다. 안쪽축 회전은 입자의 이송에 유리하게 작용하기 때문에 최소 이송속도를 감소시키는 효과가 있다.

2상 유동에 있어서 가장 중요한 유동 특성 중 하나는 2상 유동의 속도와 압력손실과의 관계이다. 모래 입자는 크기별로 분류하여 최대한 균일한 입자들이 되도록 하였으며, 본 실험에서는 평균 지름은 0.4mm 정도로 측정된 모래입자를 사용하였다. 배관의 환수부분에 필터를 설치하여 모래 입자를 회수하였는데 시간에 대한 모래입자의 회수량을 조사하여 모래 입자의 volume fraction을 계산하였다. 모래 입자가 최대한 균일하게 투입될 수 있도록 입자 투입구의 스크류 피더의 회전수와 투입구 측으로 역류하는 유체에 압력조절기로 적절하게 압력을 조절하였다.

축방향 압력손실 측정 실험에서는 우선 물을 이용해서 실험을 수행하여 실험장치의 신뢰성을 확인하였고, 이후 고-액 2상 유동에 대한 실험을 수행하였다.

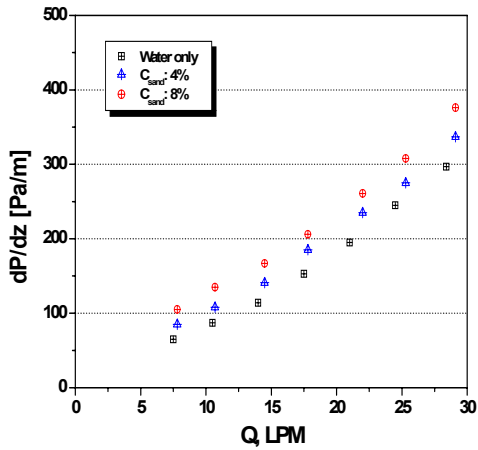
축방향 압력손실은 이송 물질이 단일 유체일 때보다 고-액 2상 유동의 경우에서 더욱 큰 압력손실이 발생한다. 물과 0.2% CMC 수용액에 대해서 축방향 유량과 압력손실과의 관계를 Fig. 4에 나타내었다.

유량이 작을 때, 몇몇 고체 입자는 가라앉는 경우가 발생하고 유속이 증가하면서 원활하게 환형관을 따라 이송된다. 따라서 축방향 유량이 증가하면서 환형관 내 축방향 압력손실도 증가하는 것을 볼 수 있다. 하지만 축방향 유량이 계속 증가에 따른 압력손실의 증가율은 감소한다.

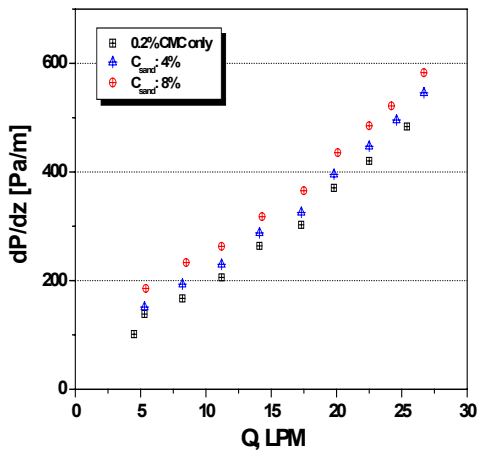
4-2. 수치해석 결과

안쪽축이 회전할 때 Taylor vortex는 원심력의 작용으로 인해서 발생하므로 Taylor vortex의 발달은 압력손실과 마찰계수값을 증가시키는 요인으로 작용한다.

입자의 체적 점유율이 4%인 고-액 2상 slim hole 환형관 유동에서 비회전 시 유량에 따른 축방향 압력손실 변화에 대한 수치해석 결과를 Fig. 5(a)에 도시하였다. 반경비가 0.7인 환형관에서 유체가 물인 경우는 난류유동으로 해석하였고, 0.2% CMC 수용액의 경우는 점도가 물에 비해 6배 정도 증가하므로 층류유동으로 해석하였다. 물과 0.2% CMC 수용액 모두 실험과 수치해석의 결과가 10%의 오차 범위에서 일치하였다.



(a) Water



(b) 0.2% CMC solution

Fig. 4. Two-phase frictional pressure drop versus mixture velocity for $dp=0.04\text{cm}$.

고-액 2상 환형관 유동의 수치해석에 있어 수직 환형관에서 고체 입자의 이송에 대한 해석 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 수직 환형관에서는 작동유체의 속도가 입자의 미끄럼속도보다 크면 입자의 침전층이 형성되지 않기 때문에 고-액 2상 유동이 통과하는 간극의 중심부에서 유체와 입자의 최대속도가 발생한다. 0.2% CMC 수용액의 경우 물보다 축방향 유속이 작은 경우에도 고체 입자들의 원활한 이송이 가능하다. 또한 그래프에 보이는 바와 같이 입자의 속도는 물의 경우 유체 속도의 50% 정도의 속도로 이송되었고, 0.2% CMC 수용액에서는 유체속도의 85% 정도의 속도로 이송되는 것을 볼 수 있다. 일정 범위 내에서는 작동유체의 점도가 잔재물 이송에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

0.2% CMC 수용액의 고-액 2상 환형관 유동에서 안쪽

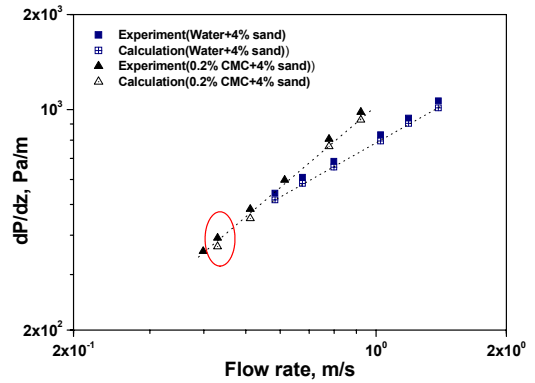
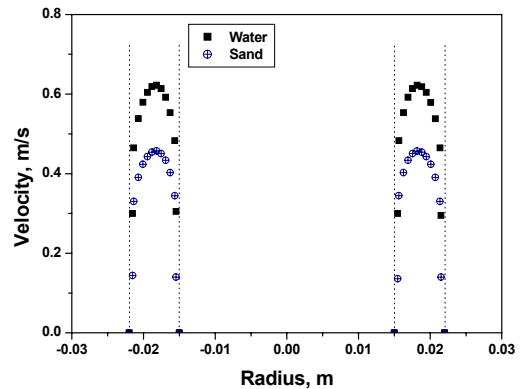
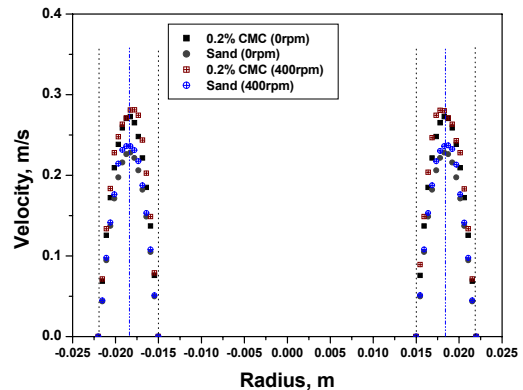


Fig. 5. Comparison of pressure loss in water and 0.2% CMC solution as a function of flow rate(0rpm).



(a) $V_z = 0.58 \text{ m/s}$, 0rpm



(b) $V_z = 0.1 \text{ m/s}$

Fig. 6. Axial velocities of water and sands in laminar flow regime.

축 회전수 변화에 따른 유체와 입자의 속도 분포를 Fig. 6(b)에 도시하였다. 안쪽축의 회전수가 400 rpm까지 증

가할 경우 유체의 속도 형상은 최대 유속의 위치가 간극의 중심에서 약간 안쪽측 방향으로 이동되면서 유속도 증가한다. 이는 전단연화 유체의 특성으로 안쪽측 회전에 의한 유체 전단율이 증가하면서 그 부근에서의 전단 응력이 감소하기 때문이다. 입자 이송 속도는 안쪽측의 회전과 유체의 최대속도 크기 및 위치의 변화로 비회전 시보다 이송 속도가 증가하지만 속도분포는 큰 변화가 없다.

5. 결 론

본 연구에서는 유정의 굴착작업에서 발생하는 굴착 잔재물의 이송과 관련하여 환형관 내 고-액 2상 유동의 거동을 실험과 수치해석 방법을 이용하여 살펴보았다. 안쪽측의 회전은 고체 입자의 이송에 유리하게 작용하여 높은 회전수에서는 낮은 유속에서 고체 입자를 이송할 수 있었다. 고-액 2상 유동에서의 축방향 압력손실이 단일 유동에서보다 크게 측정되었다.

수치해석 연구에서는 실험에서 관찰하기 힘든 유체와 고체입자의 유동을 층류영역에 대하여 살펴보았다. 이 기초 연구결과들은 실제 굴착이수의 성질을 가지는 CMC 및 벤토나이트 수용액과 고속 카메라를 이용한 연구의 기초 자료로 사용될 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 에너지기술혁신사업(ETI)의 “CTD 시추시스템 구축 및 운전 자립화 연구” 과제에서 지원되었다.

참고문헌

1. Becker, H. A.: “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.*, pp.85-91, (1959).
2. Hottovy, J. D. and Sylvester, N. D.: “Drag Coefficients of Irregularly Shaped Particles”, *I&EC Process Design and Development*, Vol.18, pp.443, (1997).
3. Lauzon, R. V. and Reid, K. I. B.: “New Rheological Model Offers Field Alternatives”, *Oil and Gas Journal*, Vol.77, pp.51-57, (1979).
4. Kim, Y. J. and Hwang, Y. K.: “Experimental study on the vortex flow in a concentric annulus with a rotating inner cylinder”, *International Journal of KSME*, Vol.17, No.4, pp.562-570, (2003).
5. Tao, L. N. and Donovan, W. F.: “Through Flow in Concentric and Eccentric Annuli of Fine Clearance With and Without Relative Motion of the Boundaries”, *Trans. ASME*, pp.1291-1301, (1955).
6. Escudier, M. P., Oliveira, P. J. and Pinho, F. T.: “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, (2002).