

Slim hole 환형관내 고-액 2상 유동에 관한 연구

한 상 목*, 우남섭**, 황영규***, 김영주****

Solid-liquid two phase helical flow in a Rotating Annulus

Sang-mok Han*, Nam-sub woo*, Young-kyu Hwang**, and Young-ju Kim***

Keywords : Solid-liquid mixture flow (고-액 혼합 유동), Drilling fluid (굴착유체), Slim hole annulus flow (환형관 유동)

Abstract

An experimental study is carried out to study two-phase vertically upward hydraulic transport of solid particles by water in a vertical and inclined (0-60 degree) concentric annulus with rotation of the inner cylinder. Rheology of particulate suspensions in shear-thinning fluids is of importance in many applications such as particle removal from surfaces, transport of proppants in fractured reservoir and cleaning of drilling holes, and so on. Annular fluid velocities varied from 0.2 m/s to 1.5 m/s for the actual drilling operational condition. Macroscopic behavior of solid particles, averaged flow rate, and particle rising velocity are observed. Main parameters considered in this study were radius ratio, inner-pipe rotary speed, fluid flow regime, 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

1. 서론

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

굴착 잔재물의 이송과 관련된 기존 연구들은 크게 유체 내에서 입자의 운동역학, 굴착 이수의 특성 및 작용 등에 대한 내용으로 나눌 수 있다.

입자의 운동역학과 관련된 연구로 1959년 Becker[1]는 고체 입자의 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 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 지속적인 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[5]의 실험결과는 경사진 환형관의 아래쪽에서 잔재물의 침전층이 형성됨을 보였다. 이러한 이유로 기존에 여러

* 성균관대학교 대학원, hanssam@skku.edu
** 성균관대학교 대학원, nswoo@skku.edu
*** 성균관대학교 기계공학부, ykhwang@skku.edu
**** 한국지질자원연구원, kyj7272@kigam.re.kr

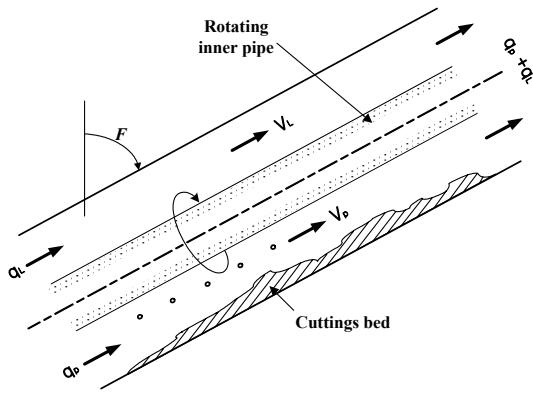


Fig. 1 Representation of inclined annulus with cutting bed.

연구자들이 제안한 이송식들은 경사 환형관에 대해서는 수정되어야 한다. 입자의 침전 이유를 Fig. 1에서 도식적으로 설명하였다. 수직 환형관에서도처럼 각 입자는 축방향 미끄럼 속도만을 가지는 것이 아니라 반경방향 미끄럼 속도도 가진다.

3. 실험 방법

실험장치는 반경비가 0.7, 높이가 1.7 m인 환형관 실험장치로 안쪽축($\phi=30\text{mm}$)은 스테인레스 강재 연마봉을 사용하였고 바깥 실린더($\phi=44\text{mm}$)는 투명한 아크릴 파이프로 제작하였다. 축 방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해 시험부(test section)까지의 길이를 수력직경의 116배 이상이 되도록 하여 1.7 m로 제작 하였다. 고-액 2상 환형관 유동 실험장치를 구성하는 부분은 크게 실린더부, 지지대, 유량 공급 및 회전부와 유량, 압력손실, 온도 등을 측정하는 측정부로 구성되어 있다.

고-액 2상 유동에서 고체 입자의 투입율은 실험장치를 순환하는 작동유체의 체적에 대해서 일정한 양의 모래 입자를 혼합탱크에 투입하여 원하는 입자 농도를 맞춘다. 모래 입자는 크기별로 분류하여 최대한 균일한 입자들이 되도록 하였으며, 본 실험에서는 평균 지름은 0.2 mm 정도로 측정된 모래입자를 사용하였다. 모래 입자의 밀도는 $2,550 \text{ kg/m}^3$ 로 측정되었다.

레이놀즈수($500 < \text{Re} < 3000$)의 범위에서 압력손실과 평균 유량을 측정하였다. 축방향 압력손실을 측정하기 위해 시험부의 길이 방향으로 0.5 m 간격으로 2개의 압력 탭을 설치하였다. 압력 탭에서 측정되는 차압은 마노미터를 이용하여 계측하였다. 압력 탭 내부 hole의 직경은 0.5 mm이다. 안쪽 축은 1,500 rpm까지 회전이 가능한 모터(A.C. motor)를 사용하여 회전시키고, 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계를 통하여 측정하였으며, 모터의 회전수는 인버터에서 제어한다. 유량은 2~80LPM의 측정범위를 갖고 정확도가 0.5% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다. 실린더부의 유동이 완전히 발달한 측정부에 초고속 카메라를 설치하여 고체 입자의 이송 속도를 측정하였다. 시험부는 지지대에 있는데 지지대는 수직(0°)에서 수평(90°)까지 경사를 조절할 수 있도록 제작하였다.

4. 결과 및 고찰

단상(Single phase)의 유체역학적 특성은 이미 잘 알려져 있지만 2상이나 다상유동의 경우 그 특성에 대한 연구가 아직은

부족하다. 본 연구에서 다양한 실험조건에 따른 고-액 2상 혼합유체의 유동특성에 대해 조사하였다. 여러 실험조건 변수로는 투입되는 입자의 농도, 환형관내 혼합물 속도, 환형관 회전수, 경사각, 안쪽축의 편심비 등이다. 또한, 중요한 사실은 압력손실과 혼합물 유속과의 관계와 입자 이송율에 대한 특성이라고 할 수 있다.

반경비가 0.7인 경사진 환형관에서 작동유체가 물인 경우에 대한 모래입자의 유동을 Figs. 2에 나타내었다.

일반적으로 큰 경사각은 잔재물의 축적을 변화시켜 수직환형관에서 요구되는 유량보다 훨씬 큰 유량을 필요로 하게 된다. 기존 연구자들에 따르면 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 난류 유동에서는 안쪽축의 회전의 효과는 더욱 미미해 보인다.

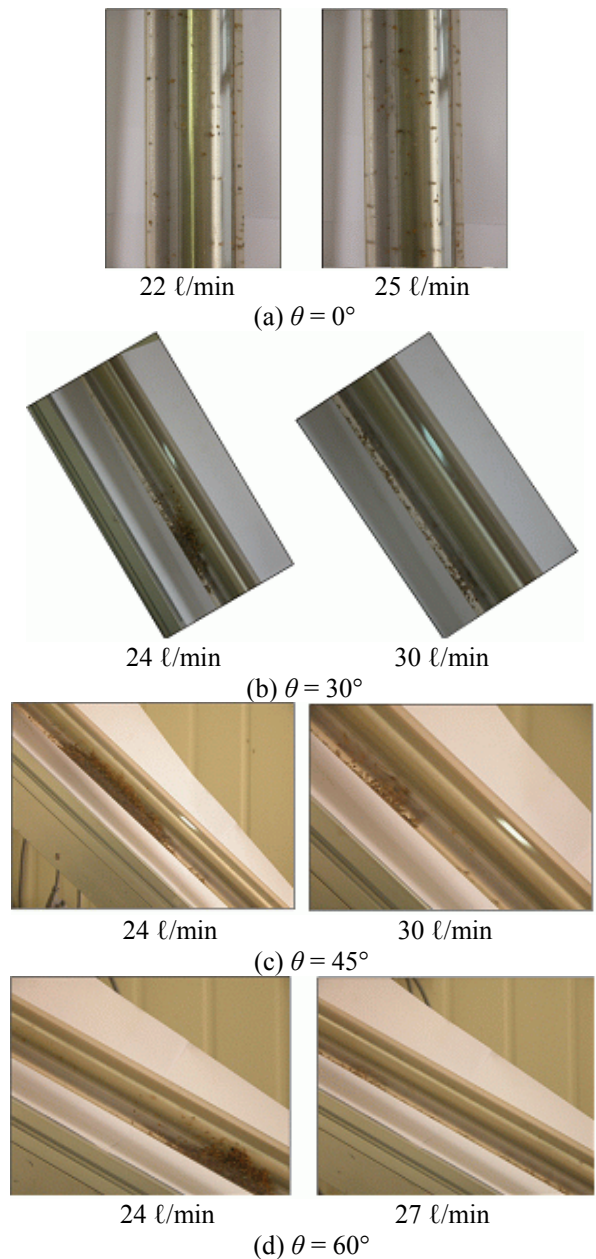


Fig. 2. Photograph of sands particle movement in water ($0^\circ < \theta < 60^\circ$).

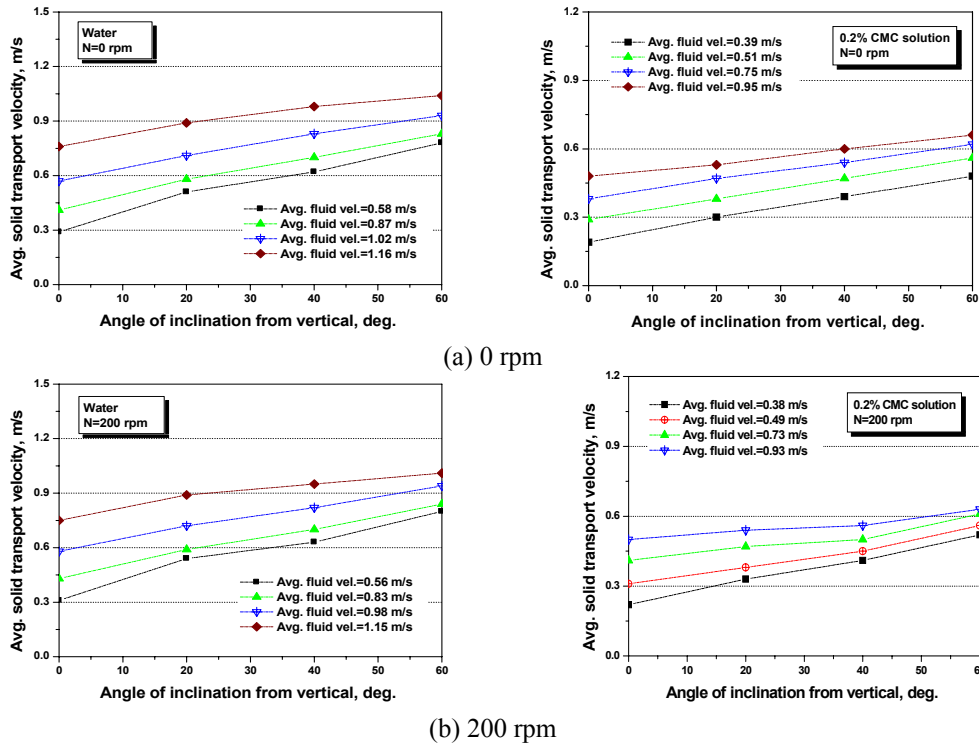


Fig. 3 Variation of cuttings velocity with inclination in water and 0.2% CMC solution.

환형관의 경사각이 10° 를 넘어가면서 입자의 거동이 점차적으로 변화한다. Figure 2에 보이는 바와 같이 환형관의 경사각이 증가할수록 증가하는 반경방향의 미끄럼속도 때문에 점점 더 많은 고체 입자들이 환형관의 아래쪽으로 집중되고 결국 낮은 유량에서는 고체 입자들이 침전층을 형성하기 시작한다.

고체 입자들의 침전층은 작은 경사각에서는 일반적으로 작았고, 안쪽 축의 회전수나 유체의 유속이 증가하면 매우 불안정해지면서 사라지는 경향을 나타내었다.

환형관내 유속이 일정 유속 이상으로 증가하면 고체 입자들은 안정적인 층을 형성하지 못하고 환형관의 아래 부분을 통해서 빠져나갔다. 고체 입자들이 뭉쳐서 흐르는 slug 유동은 층류 및 난류 모두에서 관찰되었다. 이는 처음 유동이 층류일 경우에도 환형관 내부에서 상당한 난류 상태를 야기할 수 있다는 것을 의미한다.

환형관 경사각 $30^\circ \sim 60^\circ$ 사이에서는 2상 유동의 천이가 존재하는 것으로 예상된다. 환형관의 경사각이 증가할수록 침전층이 형성되는 속도가 증가하였다. 축방향 유속 증가로 인한 난류의 발생과 안쪽 축의 회전은 고체입자의 침전층을 불안정하게 만드는 것으로 관찰되었다.

환형관의 경사각이 $40^\circ \sim 50^\circ$ 사이에서는 환형관의 아래 부분에 형성되는 고체입자의 침전층이 유동방향과 반대 방향으로 즉, 아래 방향으로 미끄러지는 현상이 발생하였다. 이러한 현상은 실제 굴착작업에 있어서 매우 위험한 상황을 초래할 수 있다.

수직 환형관에서의 잔재물 이송과는 달리 경사 환형관에서의 굴착이수의 성능을 평가하기 위해서 평균 잔재물 이송속도를 이용하는 것은 오류를 유발할 수 있다. 왜냐하면 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 유체와 고체입자의 유동에 있어서 입자의 침전층 형성과 이에 수반되는 유효 유동면적의 감소가 유체와 고체입자의 높은 유효속도를 유발할 수 있기 때문이다.

Figure 3은 환형관의 경사각 변화, 축방향 유속 및 안쪽축

의 회전수 변화에 따른 고체입자의 평균 이송속도의 관계를 나타낸 그림이다. 동일한 실험 결과를 환형관의 경사각 변화와 유속 변화에 대하여 각각 나타내었다.

경사진 환형관에서 고-액 2상 유동의 특성을 살펴보면 축방향 유속과 환형관의 경사각이 증가함에 따라 고체입자의 이송 속도는 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 이속도의 증가가 눈에 띄게 감소하는 현상이 관찰되었다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 이 부근의 경사각에서 고체입자가 유속의 반대 방향으로 미끄러지려는 현상이 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

환형관의 경사각이 증가하면 안쪽 축의 회전에 따른 편심과 진동의 발생 등으로 실험에 어려움이 존재하지만 추가 실험을 통해서 경사각 70° 이상에서 고체입자의 유동특성에 대한 세밀한 연구가 수행되어야 한다.

고-액 2상 유동에서 압력손실은 Fig. 4에 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 2상 비뉴턴유체의 유동에서 압력손실은 뉴턴유체에서와 마찬가지로 환형관 경사각과 안쪽축 회전수가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 경사 환형관에서 입자에 대한 중력의 영향은 경사각이 증가할수록 압력손실의 점진적인 증가를 야기한다.

작동유체가 0.2% CMC 수용액인 경우 유동의 전반적인 경

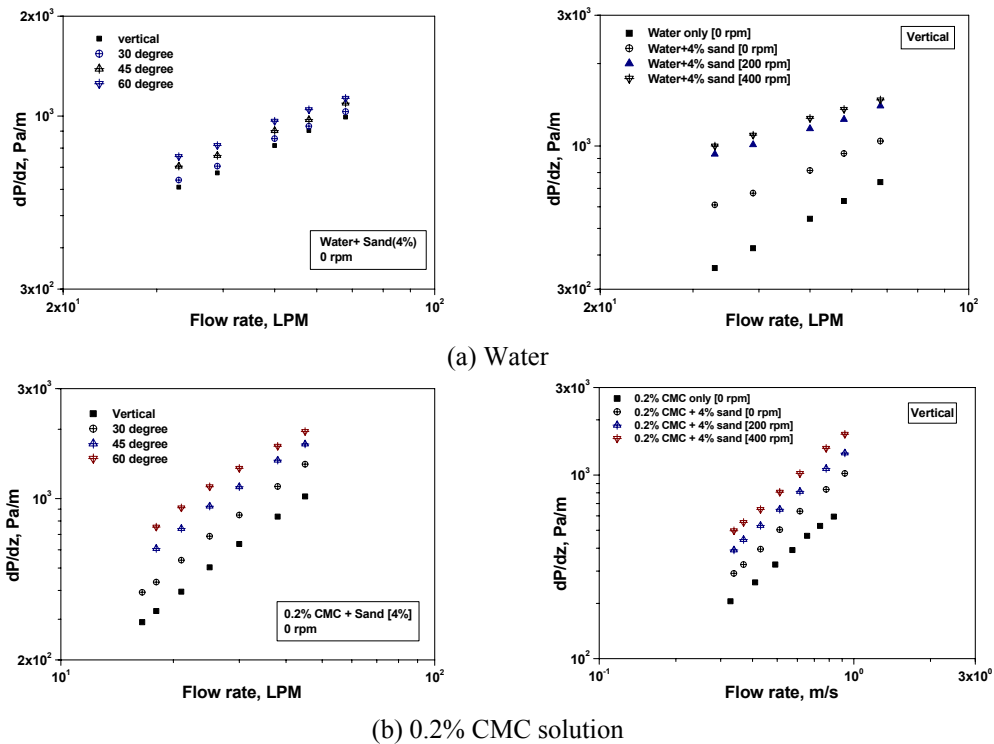


Fig. 4 Variation of pressure loss in water and 0.2% CMC solution with sand volume fraction of 4%.

향은 층류유동임에도 불구하고 물의 경우와 유사하지만, 압력 손실의 증가와 구배가 물에 비해 크게 나타난다. 0.2% CMC 수용액의 유동은 층류유동에 해당하기 때문에 직접적인 비교는 힘들지만 0.2% CMC 수용액에서는 유량변화에 따른 압력 손실의 증가폭이 매우 크다. 안쪽축 회전수 변화에 따른 압력 손실 변화는 뉴튼유체에 비해 비교적 일정하게 증가하는 양상을 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 유정의 굴착작업에서 발생하는 굴착 잔재물의 이송과 관련하여 환형관 내 고-액 2상 유동의 거동을 실험을 통해서 살펴보았다.

안쪽축의 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.

유효 유동영역을 심각하게 감소시키는 잔재물의 침전층은 경사각이 40° 보다 큰 경우에는 빠른 유체의 속도에서도 관찰되었다. 침전층의 두께는 유체속도가 감소할수록, 환형관의 경사각이 증가할수록 두꺼워진다. 유효 유동영역이 감소하면서 침전층에 속하지 않는 일부 고체 입자들은 낮은 유속에서도 더 빠르게 이송된다. 이러한 환경에서 잔재물의 이송성능을 측정하는 것은 잘못된 결과를 제공할 수 있다.

후기

이 논문은 2007년도 두뇌한국21사업 및 한국지질자원연구원의 지원에 의하여 수행되었음.

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, International Journal of KSME, Vol. 14, No. 10, pp. 833-843.
- [5] Tomren, A.W. Iyoho, and J.J. Azar, 1986, An experimental study of cuttings transport in directional wells, SPE Drilling Engineering, SPE 12123.
- [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