

경사 환형관내 고-액 혼합 유동특성에 관한 연구

김영주* · 김영훈** · 우남섭*

*한국지질자원연구원 광물자원연구본부

**경남대학교 조선해양IT공학과

Study on Solid-liquid Mixture Flow in Inclined Annulus

Young-Ju Kim*, Young-Hun Kim** and Nam-Sub Woo*

*Mineral Resources Research Division, KIGAM, Daejeon, Korea

**Naval Architecture, Ocean and IT Engineering, Kyungnam University, Changwon, Korea

KEY WORDS: Directional drilling 방향성 굴착, Particle volume concentration 입자 체적율, Pressure loss 압력 손실

ABSTRACT: This study carried out a series of experiments involving impact tests (Drop Weight type & Charpy type with a standard specimen and newly designed I-type specimen), hardness tests, and fracture surface observations of French-made roll shell steel (F), abnormal roll shell steel (M), reheated roll shell steel (R), and S25C steel under heat treatment condition. An experimental study was carried out to study the solid-liquid mixture upward hydraulic transport of solid particles in vertical and inclined annuli with a rotating inner cylinder. The lift forces acting on a fluidized particle play a central role in many important applications such as the removal of drill cuttings in horizontal drill holes, sand transport in fractured reservoirs, sediment transport, the cleaning of particles from surfaces, etc. In this study a clear acrylic pipe was used to observe the movement of solid particles. Annular velocities varied from 0.4 to 1.2 m/s. The effect of the annulus inclination and drill pipe rotation on the carrying capacity of a drilling fluid, particle rising velocity, and pressure drop in a slim hole annulus were measured for fully-developed flows of water and aqueous solutions of CMC (sodium carboxymethyl cellulose) and bentonite. The rotation of the inner cylinder was efficient at carrying particles to some degree. For a higher particle volume concentration, the hydraulic pressure loss of the mixture flow increased because of the friction between the wall and solids or between solids.

1. 서 론

국제 에너지 기구(IEA)에 따르면 다양한 재생에너지 기술의 발전에도 불구하고 원유 소비량은 2030년 기준 일산 1억 6백만 배럴로 예측되고 있으며 중국, 인도 등의 경제 성장에 따른 원유 수요 증대 어려움이 예상되고 있다. 즉, 다양한 에너지원 개발의 필요성에도 불구하고 원유가 당분간은 경제력 있는 에너지자원의 역할을 수행할 것이다. 또한 육상 및 연근해 등 비교적 생산이 용이한 지역에서의 원유 생산은 이미 그 한계에 도달하였고, 심해 및 극지 등이 유일하게 남아 있는 새로운 대형 공급처나 중단기적으로 극지 개발보다는 개발 저항이 적은 심해 개발이 급증할 것으로 예상되고 있다.

해양플랜트 시추시스템은 해저 원유와 가스의 부존 자원량 확인을 위한 Test Well 시추와 이를 경제성 있는 Production Well로 개발에 활용되는 기술로, 해양에서의 시추 작업은 작업 지역으로의 이동이 가능한 부유식 시추 시스템에 의해 수행되며, 크게 Rig(Semi-submersible rig)와 Drillship 등으로 구분할 수 있다.

구체적으로 시추 작업에 대해서 살펴보면, 최근에는 고정된

플랫폼에서 여러 방향으로 굴착을 진행하는 설계가 증가하고 있기 때문에 방향성 굴착의 중요성은 더욱 증대되고 있다. 굴착 기술에 있어서 중요한 문제 중의 하나는 굴착 잔재물의 효과적인 제거인데, 이 작업은 특수하게 합성된 시추액이 드릴 파이프를 통해 밑으로 내려가서 드릴 파이프와 외벽 사이의 간극을 통하여 위로 올라오는 헬리컬(Helical) 형태의 유동에 의해 이루어진다. 수직이나 거의 수직인 굴착작업에서는 압편의 제거가 적절하게 통제되지만 방향성 굴착에서는 경사진 시추공 내에서 압편의 침전, 시추관의 편심과 같은 여러 문제로 인해 압편의 제거에 많은 어려움이 발생한다.

압편의 이송과 관련된 변수들의 영향을 고려함에 있어 고-액 혼합 환형관 유동에 관련된 다양한 변수와 조건들이 포함되게 된다. 굴착작업 시 환형관내 잔재물의 침전속도는 잔재물의 밀도 및 형상, 잔재물 크기, 굴착유체의 밀도와 점도 및 유변학적 특성에 의존한다. 이러한 변수들은 굴착된 지층과 사용된 비트(Drill bit)에 의해 영향을 받을 뿐만 아니라 축 회전 속도는 잔재물의 이송 궤도를 변화시키게 된다. 이와 같이 굴착 작업 시 발생하는 여러 가지 문제점을 해결하기 위해서는 굴착 유동장의 유동특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.

최근 방향성 경사 굴착에 대한 관심이 증가하면서 관련 연구는 실험적인 방법으로 많이 이루어지고 있으며(Tomren, 1979; Iyoho, 1980; Larsen, 1990) 이 영역에서 많은 연구자들이 환형관 내 고-액 혼합 유동 특성을 밝혀나가고 있다. 이송유체에 대한 연구로는 이송유체의 다양한 유변학적 모델을 이용하여 이송유체의 이송성능을 실험적으로 평가한 바 있다(Lauzon and Reid, 1979). 하지만 기존 연구에서는 비현실적으로 큰 유속을 사용하거나 시험부의 길이가 짧아 정상상태에 도달하지 못하는 등의 문제점들이 제기되고 있다. 또한, 실험의 어려움으로 인해 아직까지 반경비 0.7 이상의 Slim hole 환형관 유동에 대한 연구는 발표되지 않고 있는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서는 Slim hole 시추 작업을 모사할 수 있는 실험 장치를 제작하여 반경비가 0.7인 환형관에서 환형관의 기울기, 작동유체 및 안쪽 축의 회전 등에 따른 입자 이송효율, 축 방향 압력손실의 변화와 같은 경사 환형관 내 고-액 혼합 유동 특성을 파악하여 해양플랜트 관련 기자재 개발을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 실험장치 및 방법

반경비가 0.7인 환형관의 경우 바깥쪽 실린더는 내경이 44mm인 투명 아크릴 관을 사용하였고, 안쪽 축은 외경이 30mm인 스테인레스 연마봉을 사용하였다. 실험장치의 자세한 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 실험장치는 이송 유체를 회전시키는 독립적인 장치 및 고체 입자 투입장치, 정상상태의 고-액 유동 조건을 만족시키기 위한 길이의 환형관, 입자를 분리할 수 있는 장치, 유량·입자주입속도·안쪽 축의 회전을 측정할 수 있는 장치, 입자의 평균 이동속도 및 환형관 내 입자 체적율을 측정할 수 있는 장치 등으로 구성되어 있다.

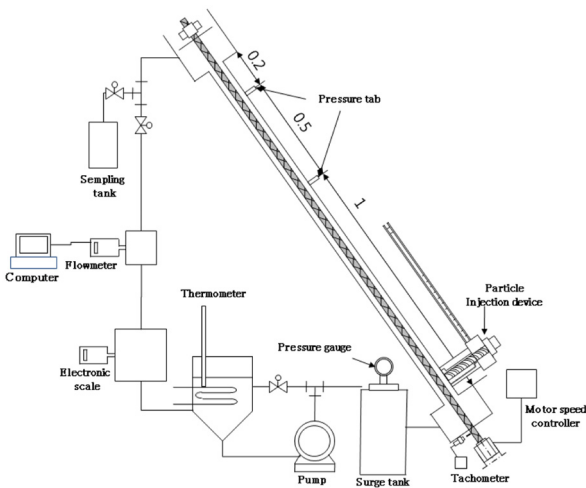


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up (all dimensions in meters)

80L의 용적을 가지는 수조로부터 작동유체를 공급하는 마그네틱 펌프는 전양정(펌프 흡입배관 입구에서 토출구까지의 높이)

9m일 때 최대 60L/min의 용량을 갖고, 펌프와 유량계 사이의 압력을 일정하게 유지시키기 위해서 서지탱크를 설치하였다. 안쪽 축은 600rpm까지 회전이 가능한 모터를 사용하여 회전시키고 회전수는 근접스위치와 연결된 회전속도계를 이용하여 측정하였으며, 모터의 회전수는 인버터를 이용하여 제어하였다. 유량은 1~60L/min의 측정범위를 갖고 정확도가 0.5% 이내로 보정된 마그네틱 유량계를 사용하여 측정하였다.

바깥쪽 실린더는 내부 유동을 관찰할 수 있는 투명한 아크릴 재질로 제작하였다. 축 방향으로 유동을 완전히 발달시키기 위해서 시험부까지의 길이를 수력직경의 116배 이상이 되도록 하여 1.7m로 제작하였다(Kim et al., 2002a; 2002b). 안쪽 축이 회전할 때 편심도는 $\pm 0.1\text{mm}$ 이내이며 차압을 측정하기 위해서 시험부의 길이 방향으로 0.5m 간격으로 두 개의 압력 탭을 설치하였다. 압력 탭은 홀 직경이 0.5mm인 정압 탭을 사용하였다. 유동의 안정적인 발달을 위하여 환형관의 입구 부분에서도 유동이 두 방향으로 유입되도록 하였으며 또한 실험장치 윗부분에서 유동 정체에 의한 압력 증가가 발생하는 것을 방지하기 위해서 출구를 세 방향으로 하여 유체가 방해받지 않고 빠져나갈 수 있도록 하였다. 본 연구에서 사용된 모래 입자는 크기별로 분류하여 평균 지름은 0.2mm 정도로 선정된 모래 입자를 사용하였다. 모래 입자의 평균 밀도는 $2,550\text{kg/m}^3$ 으로 측정되었다.

굴착속도와 관계되는 시추 공간 내부의 입자 체적율을 고려하기 위한 모래 입자의 체적 농도는 입자 투입장치와 유량 탭의 하부 구조를 깔때기 모양으로 변경하여 탭의 구석 부분으로 침전되는 입자가 없도록 하여 조절하였다. 실험 전에 일정한 양의 모래 입자를 투입하여 실험장치 내를 순환하도록 하여 일정한 농도의 고-액 혼합 유체가 되도록 하였다. 전반적인 실험 과정은 다음과 같다.

정상상태에서 유량 및 압력손실 값을 측정하기 위해 유량 및 마노미터의 수두 값이 일정해질 때까지 기다린 후 수조의 온도를 전자식 온도계를 사용하여 측정하고 유량계의 유량과 마노미터의 차압을 측정한다. 동시에 환형관의 시험부에서 고체 입자의 거동을 관찰하고, 디지털 카메라를 이용하여 고체 입자의 거동을 촬영한다. 안쪽 축이 회전할 때 생기는 교란의 영향을 감소시키기 위해 축 회전수를 일정하게 하고 정상상태가 될 때까지 기다린 후 유량, 차압 등을 측정하고 유량 및 환형관의 경사각을 변화시키면서 실험을 반복한다.

2.2 작동유체의 특성

일반적으로 시추 작업에 사용되는 시추 액은 머드(Mud)가 많이 사용되며, 시추공 내에서 과도하게 발생하는 압력손실을 줄이고 요구되는 시추 액의 유변학적 물성을 맞추기 위해 폴리머 액이 첨가된다. 유체의 유변학적 특성으로 볼 때 머드액과 폴리머(Polymer) 액은 비뉴턴유체의 전단연화(Shear-thinning) 특성을 나타낸다. 실험에서는 고-액 혼합 유체 유동에서 입자의 거동을 파악하는 것이 중요하기 때문에 육안으로 입자의 거동을 관찰할 수 있는 투명한 액체인 CMC(Sodium carboxymethyl cellulose) 수용액을 사용하였다.

비뉴턴유체는 전단응력과 전단율이 비선형적인 관계를 가지며

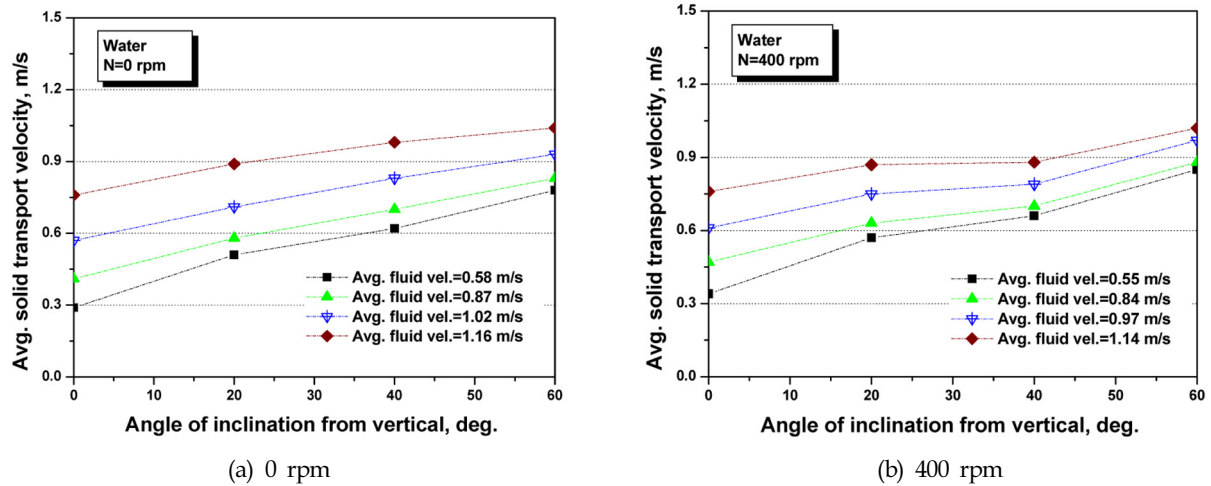


Fig. 2 Variation of solid particles velocity in water with inclination and flow rate

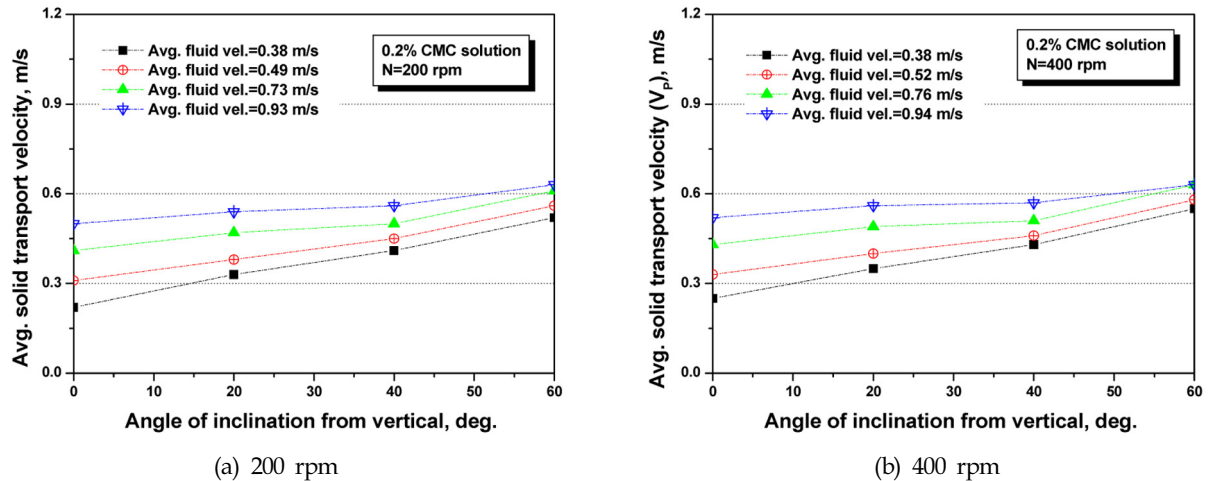


Fig. 3 Variation of solid particles velocity in 0.2% CMC solution with inclination and flow rate

본 연구에서 사용한 비뉴턴유체는 유동거동지수 n 값이 1보다 작은 경우로 다음과 같은 Power law 모델 관계식이 적용된다.

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (1)$$

여기서 유동거동지수 n 값은 뉴턴유체에서 벗어남의 정도를 나타내는 값이고, 상수점도 K 값은 유체의 점도에 관계된 값이다. 뉴턴유체의 물의 경우 n 값은 1, K 값은 1 cP이다. 본 연구에서는 작동유체로 물과 0.2%, 0.4 CMC 수용액 및 5% 벤토나이트 수용액을 사용하였으며 점도는 Brookfield사의 DV-III+ 점도계로 측정하였다. Power law 모델을 적용하였을 때 0.2% CMC 수용액의 n 값은 0.87, K 값은 6.5cP를 나타내었다.

3. 해석결과 및 고찰

실험은 환형관 경사각과 안쪽 축 회전수 및 유량 변화에 따른 고액 혼합 유동에서 축 방향 압력손실의 변화와 고체 입자의 거동 특성을 파악하기 위한 단계로 수행되었다. 환형관의 경사각은 수직 환형관을 기준으로 기울어지는 각도로 정의하였다.

Figs. 2와 3은 환형관 경사각, 축 방향 유속 및 안쪽 축의 회전수 변화에 따른 고체 입자의 평균 이송속도의 변화를 보여주고 있다. 고체 입자의 평균 이송속도 측정 실험은 투명한 유체인 물과 0.2% CMC 수용액에 대해서 수행하였다. 고체 입자의 이송속도는 입자의 체적 점유율에 따라 달라지는데, 본 연구에서는 일정한 양의 고체 입자가 흐르는 유동에서 입자의 이송속도를 정량적으로 측정하였다.

경사 환형관에서 물과 0.2% CMC 수용액의 고액 2상 유동의 특성을 살펴보면 축 방향 유속과 환형관의 경사각이 증가함에 따라 고체 입자의 이송속도는 증가하고, 또한 안쪽 축의 회전도 고체 입자의 이송속도를 증가시키지만 400rpm 이상에서는 회전의 영향이 거의 나타나지 않는 것으로 보인다.

0.2% CMC 수용액에서 고체 입자의 거동 특성은 Fig. 3에 보이는 바와 같이 물의 경우와 유사한 경향을 나타내지만, 고액 혼합 유체의 점도를 이용한 축 방향 레이놀즈수를 계산한 결과 유동 영역은 층류이다. 0.2% CMC 수용액의 점도가 물에 비해 6배 정도 크기 때문에 작은 유속으로 고체 입자의 이송이 가능하며, 축 방향 유속과 환형관 경사각이 증가함에 따라 고체 입

자의 이송 속도도 증가하였다. 다만 환형관의 경사각 20~40° 부근에서 일시적으로 평균 이송속도가 감소하는 것은 이 부근의 경사각에서 환형관의 아래쪽에 침전된 고체 입자층이 유속의 반대 방향으로 미끄러지는 현상이 발생하기 때문인 것으로 사료된다.

수직 환형관에서 고체 입자의 이송과는 달리 경사 환형관에서 굴착 이수의 성능을 평가하기 위해서 고체 입자의 평균 이송속도를 이용하는 것은 오류를 유발할 수 있다. 왜냐하면 유체와 고체 입자의 유동 과정에서 환형관의 아래쪽으로 입자의 침전층 형성과 이에 수반되는 유효 유동 면적이 감소하여 유체와 고체 입자의 높은 유효 속도를 유발할 가능성이 존재하기 때문이다.

또한 비뉴턴유체의 유동영역은 층류이기 때문에 뉴턴유체의 경우에 비해 난류 특성이 크지 않아 입자의 침전층 형성을 방해하는 힘이 약하다. 따라서 고체 입자의 침전층 형성이 환형관내 고-액 2상 유동이 통과하는 유효 단면적을 감소시켜 상대적으로 빠른 유속이 발생할 수 있다. 경사 환형관 내 비뉴턴유체에서 고체 입자의 이송성능을 파악하기 위해서 입자 이송속도를 이용하는

것은 뉴턴유체에서 보다 더욱 잘못된 결과를 유발할 수 있다.

고체 입자의 이송성능을 파악할 수 있는 다른 방법으로 고-액 혼합 유체의 유속과 경사각 및 안쪽 축 회전수에 대한 환형관 내 고체 입자의 체적 점유율, C_{VT} 의 변화를 관찰할 수 있다. 환형관 내부 고체 입자의 체적 점유율, C_{VT} 는 고-액 혼합 유동에서 입자의 이송성능을 평가할 수 있는 중요한 변수이다. 고체 입자의 체적 점유율이 작을수록 이송성능이 우수함을 나타내는데, C_{VT} 는 식 (2)에 보이는 바와 같이 고체 입자에 의해 점유되는 체적을 전체 환형관 체적으로 나누어 계산할 수 있다. 본 연구에서는 시험부의 출구 부근에서 유량을 샘플링 할 수 있는 장치를 설치하여 입자 체적 점유율을 직접 측정하였다.

$$C_{VT} = \frac{\text{Volume occupied by solids}}{\text{Volume occupied by mixture}} \times 100 \quad (2)$$

0.2%, 0.4% CMC 수용액과 5% 벤토나이트 수용액에서의 C_{VT} 의 변화를 Figs. 4와 5에 도시하였다. C_{VT} 가 작을수록 입자 이송성능이 우수함을 나타내는데 전체적인 특징을 살펴보면, 유속과 안쪽 축 회전수가 증가할수록 C_{VT} 는 감소하지만 환형관 경사각

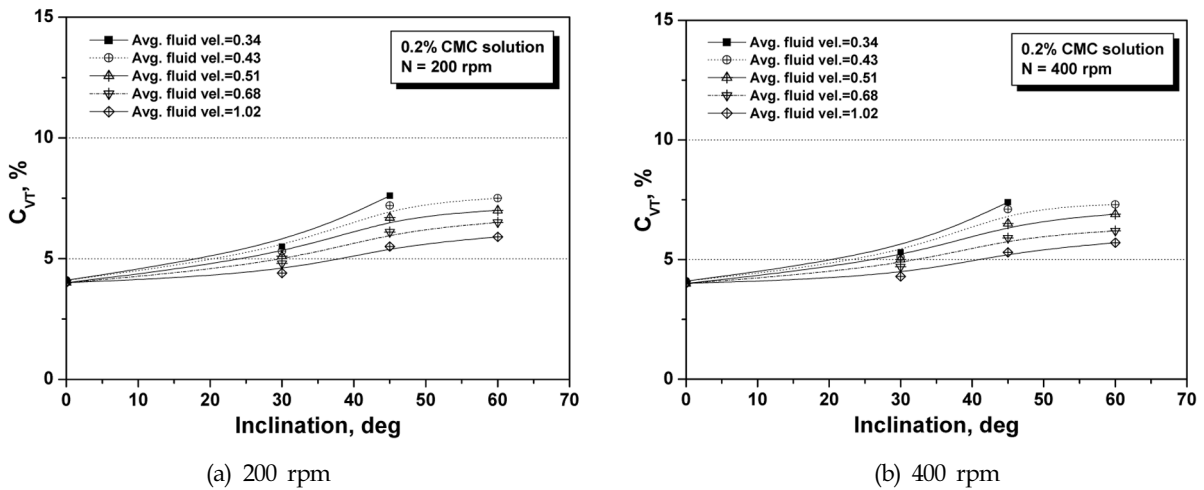


Fig. 4 Variation of particle volume concentration in 0.2% CMC solution with inclination and flow rate

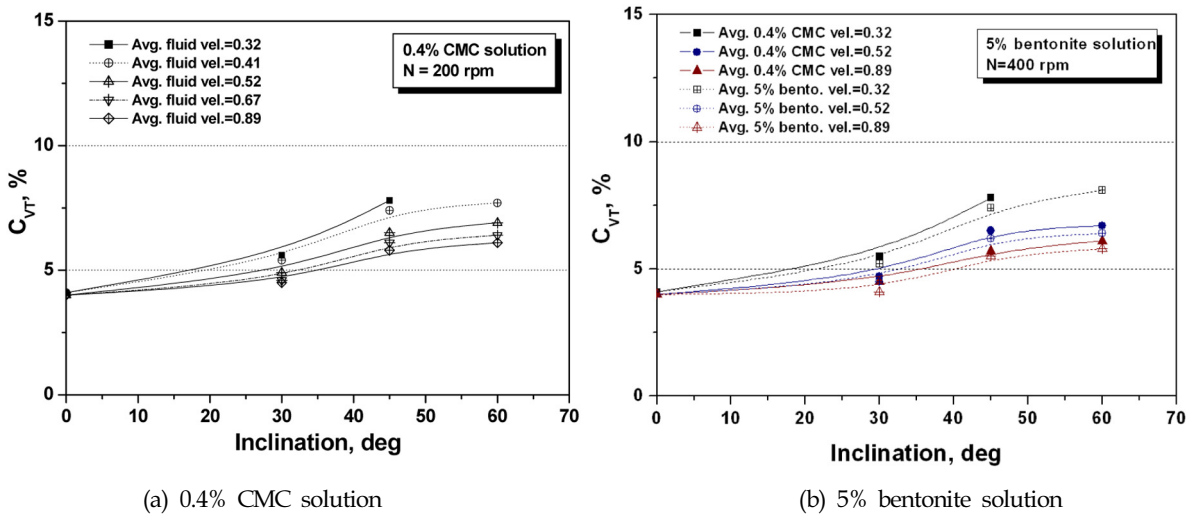


Fig. 5 Variation of particle volume concentration in 0.4% CMC and 5% bentonite solutions with inclination and flow rate

이 증가할수록 CVT는 증가한다. 하지만 일정 회전수 이상에서는 CVT에 대한 회전의 영향이 증가하지 않는다. 또한 환형관 경사각 30~45° 부근에서는 CVT가 갑자기 증가하는데 이 역시 평균 이송속도에서 설명한 환형관 아래쪽에 형성되는 입자 침전층의 미끄러짐 현상과 관련된 것으로 판단된다.

이송유체가 0.2% CMC 수용액인 경우(Fig. 4 참조) CVT는 층류 유동에서 혼합유체의 유속이 증가할수록 일정하게 감소하였고, 환형관 경사각이 증가할수록 증가하였다. 안쪽 축의 회전은 환형관 아래부분의 입자 침전층 형성을 방해하지만 200 rpm과 400rpm에서의 CVT를 비교해보면 400 rpm 이후에서는 더 이상 회전의 효과가 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

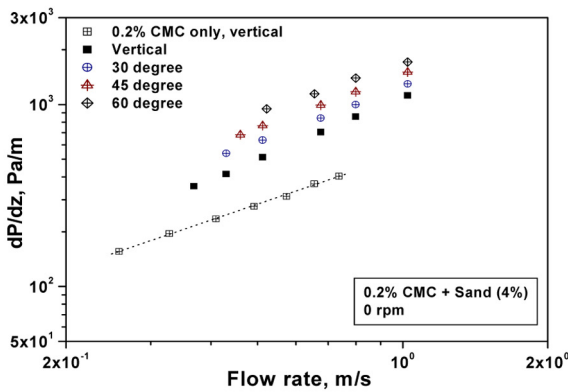
이송유체가 0.4% CMC 수용액인 경우를 살펴보면(Fig. 5(a) 참조), 0.2% CMC 수용액과 비교해서 입자 이송 관점에서 뚜렷한 성능 향상을 관찰할 수 없다. 즉, 이송유체의 점도 증가만으로는 지속적인 입자 이송성능 향상을 기대할 수 없다. 반면, 5% 벤토나이트 수용액에서의 이송성능은 Fig. 5(b)에 보이는 바와 같이 0.2%와 0.4% CMC 수용액에 비해서 우수하게 평가되었다. 일반적으로 높은 점도의 유체가 저점도의 유체에 비해서 우수한 이송성능을 보이지만 5% 벤토나이트 수용액의 이송 성능이 특히 우

수하게 나타난 것은 5% 벤토나이트 수용액의 밀도가 0.4% CMC 수용액에 비해서 증가하였기 때문이다. 이송유체와 입자 사이의 밀도 차이가 감소하면서 입자 이송에 유리하게 작용한다. 즉, 일정 수준의 점도와 밀도가 적절하게 조화된 이송유체가 고체 입자의 이송에 효과적임을 알 수 있다.

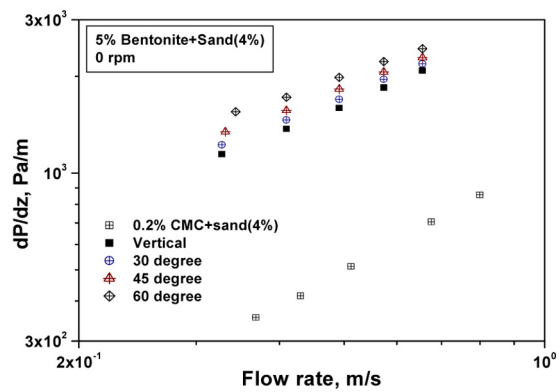
시추 작업에서 주요한 고려 요소인 압력손실을 살펴보면, 고액 혼합 유동에서 경사 환형관에서는 고체 입자에 대한 중력의 영향으로 경사각이 증가할수록 압력손실이 점진적으로 증가한다(Fig. 6 and 7 참조). 고액 혼합 비뉴턴유체 유동에서 압력손실은 환형관 경사각과 안쪽 축의 회전수가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다.

작동유체가 0.2% CMC 수용액인 경우 유동의 전반적인 경향은 층류 유동임에도 불구하고, 압력손실의 증가와 구배가 물에 비해 크게 나타난다. 0.2% CMC 수용액의 유동은 층류유동에 해당하기 때문에 직접적인 비교는 힘들지만 유량 변화에 따른 압력손실의 증가폭이 물에 비해 매우 크다. 안쪽 축의 회전수 변화에 따른 압력손실 변화는 물에 비해 비교적 일정하게 증가하는 양상을 보인다(Woo et al, 2008).

0.4% CMC 수용액의 압력손실 변화를 살펴보면, 동일한 조건에 대해서 0.2% CMC 수용액 보다 압력손실이 2.5배 정도의 증가

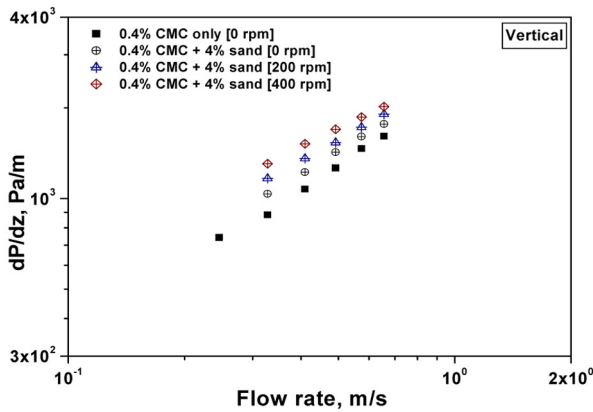


(a) 0.2% CMC solution

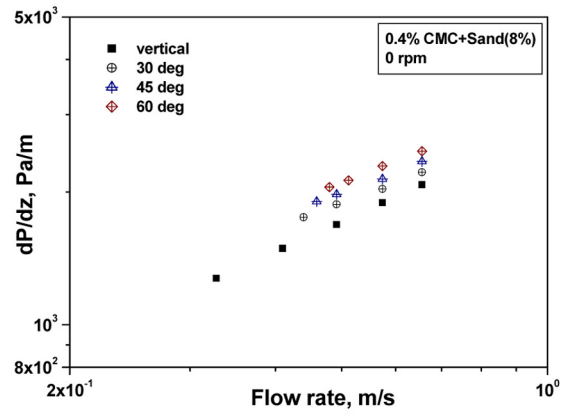


(b) 5% bentonite solution

Fig. 6 Variation of pressure loss in 0.2% CMC and 5% bentonite solutions with inclination and flow rate



(a) rotational speed



(b) inclination

Fig. 7 Variation of pressure loss in 0.4% CMC solution with rotational speed and inclination

하였다. 이는 점도의 증가와 이에 따른 고체 입자의 마찰이 급격하게 증가하기 때문인 것으로 사료된다. 5% 벤토나이트 수용액의 동일한 입자 체적율에서 고체 입자의 이송성능은 CMC 수용액에 비하여 우수하게 나타났지만 압력손실 또한 0.4% CMC 수용액에 비해서 10% 정도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 고체 입자의 이송성능과 압력손실 변화를 고려한 이송유체의 선정이 매우 중요함을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 유정의 굴착작업에서 발생하는 굴착 잔재물의 이송과 관련하여 환형관 내 고-액 혼합 유동에서의 입자의 거동과 이에 따른 압력손실 변화 등을 살펴보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

경사 환형관에서 굴착유체의 이송능력과 관련하여 고려되어야 할 주요 변수는 유체 속도, 환형관 경사, 굴착유체의 유변학적 특성 및 입자 체적율 등으로 굴착유체의 입자 이송성능은 유체의 속도와 점도에 비례하여 변하고 환형관의 경사와 입자의 체적율에 반비례적으로 변화하였다.

경사 환형관 유동에서 환형관의 경사각이 증가하면 고체 입자에 대한 중력의 추가적인 영향으로 높은 압력구배를 갖게 되는데, 고-액 혼합 유동에서 안쪽 축의 회전은 순수 유체의 유동에서보다 압력손실의 변화에 큰 영향을 나타내었다. 또한 이송되는 입자의 높은 체적점유율은 경사 환형관에서 높은 압력손실을 유발하였다. 이는 많은 양의 고체 입자가 쌓인 침전층을 유지하거나 이송시키기 위해서 큰 평균 유속이 필요하기 때문이다.

안쪽축의 회전은 입자이송에 어느 정도 유리하게 작용하는 것을 알 수 있고 400 rpm으로 회전수를 증가시키는 것은 200 rpm에 비해서 효과가 크게 나타나지 않는다. 고-액 혼합 유동에서 유량의 증가는 특히 고체 입자들의 마찰에 의하여 압력손실이 증가하며, 환형관의 기울기가 증가할수록 대부분의 입자가 환형관의 아래 부분으로 치우쳐 이송되기 때문에 압력손실은 더욱 증가하게 된다.

후 기

본 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 지식경제부 산업원천기술개발사업의 'Drill Riser System 기술개발(11-9220)' 과제에서 지원되었습니다.

참 고 문 헌

- 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.
- 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.
- Tomren, P.H. (1979). The Transport of Drilled Cuttings in an Inclined Eccentric Annulus, M.S. Thesis, University of Tulsa, Tulsa, OK-USA.
- Lauzon, R.V. and Reid, K.I.B. (1979). "New Rheological Model Offers Field Alternatives", Oil and Gas Journal, Vol 77, pp 51-57.
- Kim, Y.J., Hwang, Y.K. and Woo, N.S. (2002a). "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.
- Kim, Y.J., Hwang, Y.K. and Woo, N.S. (2002b). "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.
- Woo, N.S., Kim, Y.J., Hwang, Y.K., Yoon, C.H., Han, S.M., Lee, D.K., Park, J.M. and Park, Y.C. (2008). "Flow Characteristics of Solid-Liquid Mixture Flow in a Slim Hole Annulus", Geosystem Engineering, Vol 45, No 1, pp 8-17.

2011년 8월 25일 원고 접수

2011년 10월 4일 심사 완료

2011년 10월 17일 게재 확정