

2단 실린더형 싸이클론의 물 및 오일 액적 제거 성능 분석 연구

김수민^{1),2)} · 김학준¹⁾ · 김명준¹⁾ · 한방우¹⁾ · 우창규¹⁾ · 김용진^{1)*}
¹⁾한국기계연구원 환경기계연구실, ²⁾충남대학교 기계공학과
(2017년 8월 17일 투고, 2017년 8월 23일 수정, 2017년 8월 24일 게재확정)

Evaluation of removal performance of a novel two-stage cylinder type cyclone against water and oil droplets

Sumin Kim^{1),2)}, Hak-Joon Kim¹⁾, Myungjoon Kim¹⁾, Bangwoo Han¹⁾, Chang Gyu Woo¹⁾, Yong-Jin Kim^{1)*}
¹⁾*Department of Eco-Machinery Systems, Environmental and Energy Systems Research Division,
Korea Institute of Machinery & Materials*
²⁾*Mechanical engineering, Chungnam National University*
(Received 17 August 2017; Revised 23 August 2017; Accepted 24 August 2017)

Abstract

A novel two stage cylindrical cyclone was developed for a 3 phase separator in shale oil production industry. The cyclone performance was compared with a cone type cyclone and multi cyclone at the same experimental condition using water and oil mists generated by a humidifier and atomizer at the flow rate 1 to 2 m³/min. The removal efficiency of total suspended water droplets by the novel cyclone, calculated using inlet and outlet concentrations measured by an optical particle counter, was 99% which is higher than 90% of oil droplet removal efficiency at 2 m³/min. It might be due to the evaporation of small water droplets during the tests. The water and oil droplet removal performance of the novel cyclone based on the quality factor which is a function of pressure drop and removal efficiency was the highest among three cyclones. The results indicate that the cyclone could be an economical device to remove water and oil mists from shale gas generation processes where a huge three phase separator is commonly used.

Keywords: Cyclone, Three phase separator, Removal, Water, Oil, Droplet, Shale gas

* Corresponding author.

Tel : +82-2-2123-5821; Fax : +82-42-868-7284
E-mail : whryu@yonsei.ac.kr

1. 서론

세일가스는 입자지름이 1/16~1/256 mm인 미사(Silt)가 퇴적 고결되어 형성된 세일 층에 함유되어 있는 천연가스이다 (Koo et al., 2014). 특히, 전 세계적으로 고르게 분포되고 있고 천연가스 이상의 매장량을 가진 자원으로서, 기존 석유 중심의 에너지역학 구도를 파괴할 정도로 파급성이 높은 미래유망 차세대 에너지원으로 각광을 받고 있다 (Han, 2012). 북미를 중심으로 세일가스의 급격한 성장에 따라, 가스처리 지상설비의 수요시장이 급증하여 2035년까지 세일가스 관련 지상설비의 시장규모가 300억불로 예상하고 있다. 특히, 세일가스 생산 시 다량의 물, 모래, 오일, 가스가 함께 배출 되고 다량의 수분과 산성가스를 함유하고 있어, 효율적인 분리, 탈수 기술 확보가 필요하다. 한편 국내에서는 관련 원천기술이 전무하여 대외의존도가 높아 관련 기술 개발이 시급한 실정이며, 최근 세일가스 유정의 경우, 소형 유정이 넓게 분포되어 있어 분리효율이 우수하면서 현장 이동성이 높은 3상 분리장치가 필요하다. 전통적인 수평방식의 천연가스 3상 분리장치의 경우, 챔버 내에서 수평방향으로 유동을 형성하여 중력에 의한 침강 및 유체의 관성 충돌에 의해 물, 오일, 가스를 분리하는 기술로써, 장치가 조대하여 이동이 불가능하다 (Kharoua et al., 2013).

대형 3상 분리 장치를 대체하기 위해 수직형 실린더 구조의 가스 및 액체 사이클론(Gas liquid cylindrical

cyclone, GLCC)이 개발되었고, Chevron사에서 성공적으로 상용화에 성공하였으나 (Kouba et al., 1995), 벽면에서 포집된 오일 및 액적의 재비산 문제가 존재한다 (Wang et al., 2001).

본 연구에서는 수직형 선회유동부를 2단 구조의 실린더형로 구성하고, 추가적으로 액막 차단부 및 디퓨저를 추가하여 오일 및 물 액적의 재비산을 최소화 하고자 하였다. 그리고, 전통적인 기존, 고효율 멀티를 각각 제작하여 물, 오일 미스트에 대한 유속 및 입경 별 제거효율, 압력 손실 등을 정성 및 정량적으로 비교 분석하고자 하였다.

2. 실험 방법

그림 1은 실험에서 사용되어진 3가지 종류의 싸이클론을 간단하게 도식화한 것이다. 그림 1(a)는 일반적으로 널리 사용되고 있는 기존 싸이클론과 같은 형태이고 (Copper and Alley, 2011), 높이 약 470 mm, 직경 약 120 mm, 입구사이즈는 가로 25 mm, 세로 50 mm의 사각 덕트 구조이며, 출구사이즈는 지름 40 mm의 원형 구조로 제작하였다. 기존 싸이클론의 상부에서 액적을 포함한 유동이 유입되면 회전 유동이 생성되고, 액적은 이 회전류로 인해 벽면 방향으로의 원심력을 받게 되며, 큰 입자의 경우 유동을 벗어나 벽면에 충돌하여 중력에 의해 하부로 포집되고, 나머지 포집 되지 않은 미세 액적과

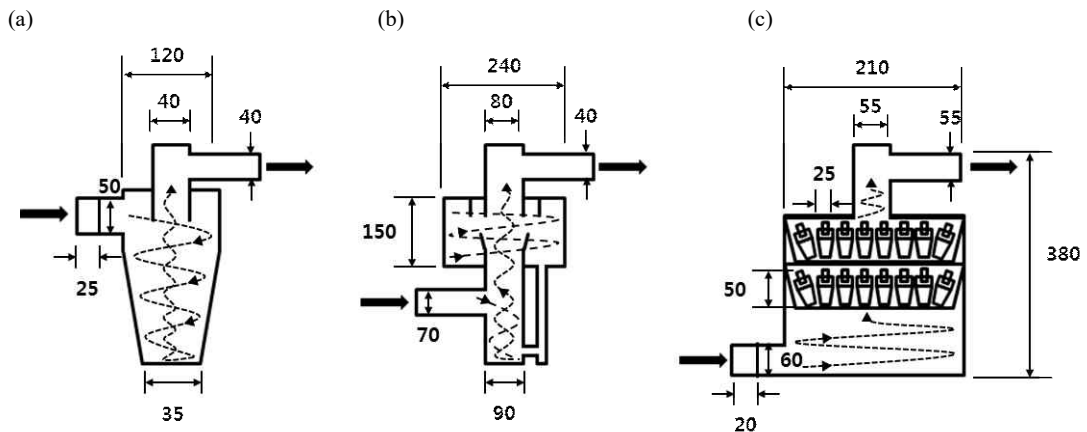


Fig. 1. Schematic of cyclones; (a) conventional cyclone, (b) 2 stage cyclone, (c) multi cyclone

이송 유체는 상부의 관을 통해 후단으로 배출된다.

그림 1(b)는 본 연구에서 개발된 2단 구조의 실린더형 싸이클론의 모식도이다. 크기는 높이 약 720 mm, 직경 약 240 mm이다. 입구는 지름 70 mm 원형 파이프 구조에서 파이프의 절반 이상을 막아 벽면으로 유동이 형성 되도록 하였다. 출구사이즈는 지름 40 mm의 원형 파이프를 사용하였다. 2단 실린더형 싸이클론은 측면에서 유동이 10 m/s 이상으로 유입되며, 선회 유동 중 큰 입자는 벽면과 충돌하여 하부로 떨어지고, 제거되지 못한 입자는 상부로 토출된다. 한편, 기존의 실린더형의 경우, 물 및 오일 액적들이 벽면에 포집되더라도 수막 또는 오일 막을 형성하여 벽면을 따라 선회하면서 상부로 이동하게 되어 재비산되는 문제가 있다. 하지만 본 연구에서는 하부 실린더에 비해 상대적으로 넓은 실린더 챔버를 두고 상부와 하부를 2단으로 분리하고, 상부 측 유입구에 벽면에서의 선회 유동에 의해 상부로 이동하는 수막 및 오일액막의 차단부를 두어 벽면을 통한 재비산을 최소화 하였다. 재비산 억제용 실린더 및 차단부의 형상은 육안으로 재비산이 되지 않는 조건으로 설계 및 제작하였다.

그림 1(c)는 멀티 싸이클론의 모식도로 전체 높이 약 380 mm, 직경 약 210 mm, 입구는 가로 20 mm, 세로 60 mm의 사각 덕트 구조이며, 출구는 지름 55 mm의 원형 파이프로 제작하였다. 소형 (높이 50 mm, 직경 25 mm)의 기존 싸이클론 32개를 2단으로 구조화하여 1단에서 16개 소형 싸이클론에 의해 최대한 입자를 제거하고, 2단에서 16개의 소형 싸이클론에 의해 미세 입자를 제거하고자 하였다.

그림 2는 각 싸이클론의 성능을 비교 평가하기 위해 구성한 실험 모식도이다. 싸이클론을 통과하는 유동의 유량은 후단의 송풍기 (Kijeon, KJB3-2600)를 통해 제어 하였으며, 실험 조건에 따라 1, 1.5, 2 m³/min (이하 CMM; cubic meter per minute)의 유량 조건이 사용되었다. 입자는 물과 오일을 각각 사용하였고, 물 입자의 경우 대용량 초음파 가습기 (JB natural, UH-303)를 이용하여 발생시켰으며, 시간당 가습량은 3.3 kg/h이었다. 또한 오일 입자는 공작기 계용 냉각 오일 (이래산업, ST-501 (DCT-99))을 사용하였으며, 2개의 nebulizer (Salter labs, 8900-7)를 이용하여 발생시켰으며, 각 nebulizer에는 MFC (mass flow controller, Mykrolis, FC-2900)에 의해 3 lpm의

공기를 주입하였다.

싸이클론 및 전, 후단에 투명 아크릴 파이프를 설치하여 입자 유동이 가시화 될 수 있도록 하였고, 전, 후단 덕트에 2개의 샘플링 관을 설치하였다. 차압과 습도, 관내 유속은 종합 계측기 (Testo, Testo 454)를 이용해 계측하였으며, 입자의 질량 농도 분포는 광학계수기 (OPC, Optical particle counter, Grimm, 1.109)를 이용해 측정하였다. 광학계수기는 광학적인 원리를 이용해 입자의 입경 별 수농도를 측정하는 장비로, 본 연구에서는 입자를 구형으로 가정하여 이를 입경 별 질량농도로 환산하여 사용하였다.

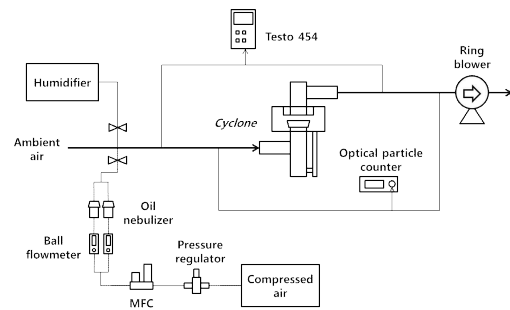


Fig. 2. Experimental setup to evaluate cyclones.

3. 결과 및 고찰

그림 3은 유량이 2 CMM일 때, 각 싸이클론의 입경별 물 입자 제거 효율을 나타낸 것이다. 이때 입자 제거 효율은 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\eta = \left(1 - \frac{C_1}{C_0}\right) \times 100 \quad (1)$$

여기서, C_0 : 싸이클론 전단에서의 입자 질량 농도, C_1 : 싸이클론 후단에서의 입자 질량 농도

기존 싸이클론은 입자크기 0.2~0.7 μm 에서 약 90% 효율을 보였으며 그 이상의 입자 크기에서는 99% 이상의 효율을 보였다. 2단 실린더형 싸이클론은 입자크기 0.3 μm 이하에서 약 50% 가량의 낮은 효율을 보였지만 입자크기 0.4 μm 이상에서는 99%

이상의 효율을 보였다. 멀티 사이클론은 전 입경 때에서 99% 이상의 높은 효율을 보였다.

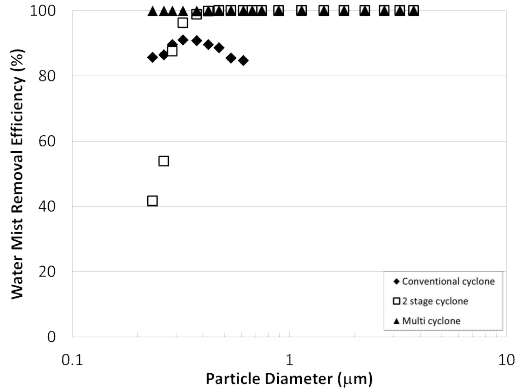


Fig. 3. Water mist removal efficiency distribution of each cyclone when flow rate was 2 CMM.

그림 4는 그림 3과 같은 조건에서 오일 입자에 대한 사이클론 형상 및 입경 별 제거 효율을 나타낸 것이다. 오일 입자를 사용하였을 경우, 각 사이클론의 입자 제거 효율이 물 입자를 사용하였을 때의 효율에 비해 전체적으로 낮아졌다. 물 입자를 사용하였을 때는 $0.7 \mu\text{m}$ 이상에서 모든 사이클론이 99% 이상의 효율을 보인 반면, 오일 입자를 사용하였을 때는 $3 \mu\text{m}$ 이상에서 99% 이상의 효율을 보였다.

이는 물 입자는 오일 입자보다 쉽게 증발하기 때문에 발생한 현상인 것으로 사료되며, 특히 질량 대비 표면적의 비율이 높아져 증발률이 커지는 작은 입자에서 효율 차이가 많이 나는 것으로 나타났다. 멀티 사이클론의 경우 입자크기 $0.2 \mu\text{m}$ 에서 오히려 후단의 입자가 증가하여 약 -150%의 효율을 보였다. 이는 오일 입자에 가해지는 원심력의 크기가 너무 큰 경우, 입자가 사이클론의 벽면에 부딪힐 때 완전히 사이클론의 벽에 포집되는 것이 아니라 더 작은 여러 개의 입자로 분리되며 재비산 되었기 때문에 발생한 현상으로 판단된다.

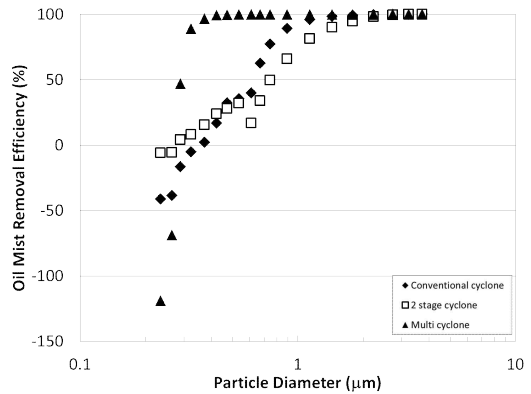


Fig. 4. Oil mist removal efficiency distribution of each cyclone when flow rate was 2 CMM.

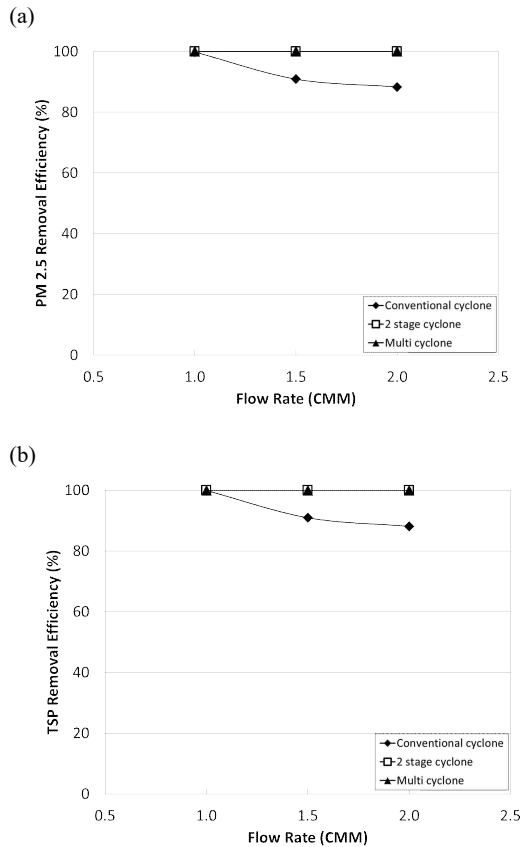


Fig. 5. (a) PM 2.5 and (b) TSP removal efficiency of each cyclone with varying flow rate (water mist).

그림 5(a)는 유량에 따른 각 싸이클론의 물 입자 PM 2.5 제거 효율로, 기존 싸이클론은 유량이 2 CMM일 때는 99% 가량의 효율을 보였으나, 유량이 1 CMM으로 감소함에 따라 약 90%까지 감소하였다. 반면 2단 실린더형 싸이클론과 멀티 싸이클론은 1~2 CMM 유량 범위에서 99% 이상의 PM 2.5 제거 효율을 유지하였다. 이는 기존 싸이클론은 1단 구조이므로 유량이 증가할수록 포집된 물 액적에 의해 발생된 수막이 상부 측으로의 선회유동 증가로 인하여 재 비산되는 액적이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 5(b)는 유량에 따른 각 싸이클론의 물 입자 TSP 제거 효율로 PM 2.5 제거 효율과 거의 동일한 경향을 보였다.

그림 6(a), (b)는 각기 유량에 따른 각 싸이클론의 오일 입자 PM 2.5, TSP (Total suspended Particulate) 제거 효율을 나타내었다. 물 액적과 달리, 유량에 대한 효율이 선형적인 증가 경향을 나타내었고, 이는 물과 같이 증발 또는 재비산 효과가 없었기 때문인 것으로 판단된다. PM 2.5 제거 효율의 경우 기존 싸이클론은 유량이 1 CMM에서 2 CMM으로 증가함에 따라 약 50~85%의 효율을 보였고 2단 실린더형 싸이클론은 유량변화에 따라 약 10~80%의 효율을 보였다. 멀티 싸이클론은 유량변화에 따라 약 95~99%의 효율을 나타내었다.

TSP 효율의 경우 PM 2.5 결과와 같이, 유량과 선형적인 관계를 나타내었고, 기존 싸이클론은 유량변화에 따라 약 80~90%의 효율을 보였으며 2단 실린더형 싸이클론은 유량변화에 따라 약 60~90%의 효율을 보였다. 멀티 싸이클론은 유량변화에 따라 약 98~99%의 효율을 보였다. PM 2.5 제거 효율과 TSP 제거 효율이 거의 비슷했던 물 입자와 달리 오일 입자는 그림 4와 같이 2.5 μm 이하 입자의 제거 효율보다 2.5 μm 이상 입자의 제거 효율이 높았기 때문에 PM 2.5 제거 효율보다 TSP 제거 효율이 높게 나타났다.

PM 2.5, TSP 제거 효율 모두 멀티 싸이클론, 기존 싸이클론, 2단 실린더형 싸이클론 순으로 나타났으나, 압력 강하에 대한 고려 없이 서로 같은 유량 조건에서 입자 제거 효율을 비교한 것이기 때문에 이를 통해 각 싸이클론의 성능을 직접 비교하는 것은 적절하지 않다. 일반적으로 싸이클론의 입자 제거 효율은 차압이 높을수록 상승하며, 따라서 차압을

고려한 성능 비교가 필요하다.

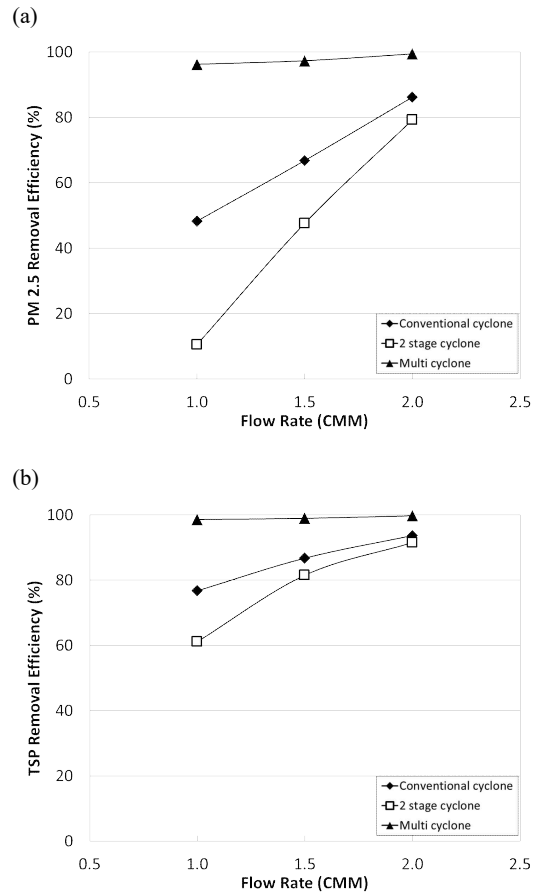


Fig. 6. (a) PM 2.5 and (b) TSP removal efficiency of each cyclone with varying flow rate (oil mist)

그림 7은 각 싸이클론 별 유량에 따른 압력강하를 나타낸 것이다. 유량이 1 CMM에서 2 CMM으로 증가하는 동안 압력강하는 유량의 제곱에 비례적으로 나타났고 (정진도, 2003), 멀티 싸이클론이 약 5 kPa에서 약 17 kPa로 증가하였으며, 기존 싸이클론은 약 1.8 kPa에서 약 6.5 kPa로, 2단 실린더형 싸이클론은 약 1.8 kPa에서 약 5 kPa로 압력강하가 상승하였다. 압력강하 측면에서는 2단 실린더형, 기존, 멀티 싸이클론 순으로 낮게 나타났다.

입자 제거 효율과 압력강하를 모두 고려하여 각 싸이클론의 성능을 비교하기 위해 양질계수 (qF ; quality factor)가 사용되었다. 양질계수는 필터의 성

능을 입자 제거 효율과 압력강하로 나타낸 것으로 식 (2)와 같다 (Chen et al., 1992; Chen et al., 1993).

$$qF = \ln(1/(1-\eta/100))/\Delta P \quad (2)$$

여기서, η 는 입자제거효율, ΔP 는 압력강하

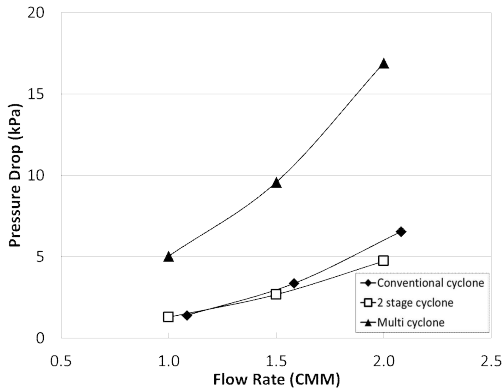


Fig. 7. Pressure drop of each cyclone against flow rate.

그림 8.(a), (b)는 각각 물 입자와 오일 입자에 대해 각 싸이클론의 qF 를 나타낸 것이다. 물 입자의 경우 2단 실린더형 싸이클론이 약 2.0~6.5 kPa^{-1} 로 가장 높았고, 기존 싸이클론은 약 0.3~5.2 kPa^{-1} 의 qF 값을 보였다. 반면 멀티 싸이클론은 0.6~2.4 kPa^{-1} 으로 가장 낮은 qF 값을 보였다. 이는 동일한 성능의 팬을 사용하였을 때 입자 제거 효율이 2단 실린더형 싸이클론이 가장 우수함을 의미한다.

또한, 오일 입자의 경우 기존 싸이클론은 약 0.4~1.0 kPa^{-1} 의 qF 값을 보였으며, 2단 실린더형 싸이클론은 약 0.5~0.7 kPa^{-1} , 멀티 싸이클론은 약 0.3~0.8 kPa^{-1} 의 qF 값을 보였다. 물 입자와 달리 1 CMM 조건에서 2단 실린더형 싸이클론의 qF 성능이 낮게 나타났으나, 1.5, 2 CMM 조건에서는 2단 실린더형 싸이클론의 qF 성능이 상대적으로 높게 나타났고, 유량이 커질수록 성능 차이도 커지는 것으로 나타났다. 실제 세일가스 채굴 환경은 고유량이 예상되므로, 2단 실린더형 싸이클론이 일반 기존 및 멀티 싸이클론 보다 경제적으로 액적 입자들을 제거한다고 볼 수 있다.

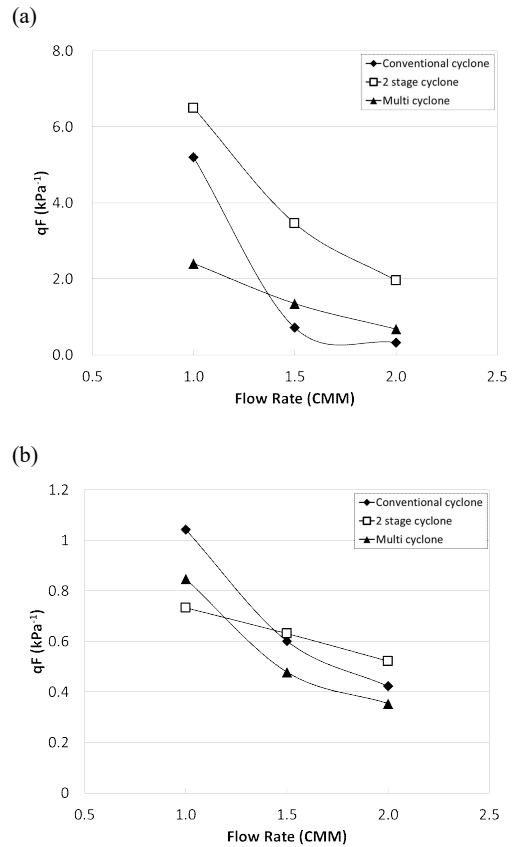


Fig. 8. Quality factor of each cyclone according to flow rate for (a) water mist, (b) oil mist

4. 결론

본 연구에서는 세일가스를 시추할 때 가스 내에 포함된 물과 오일 입자를 분리할 수 있는 대형의 3상 분리장치를 대체하기 위한 콤팩트 구조의 싸이클론을 개발하고 기존에 널리 사용되고 있던 기존 싸이클론과 멀티 싸이클론과 비교 평가하였다.

물 입자 제거 효율은 멀티 싸이클론의 경우 0.2 μm 이상의 입자에 대해 99% 이상의 효율을 보여 가장 우수한 입자 제거 성능을 보였으며, 기존 싸이클론과 2단 실린더형 싸이클론은 각기 0.4, 0.8 μm 이상에서 99% 효율을 나타내었다. 오일 입자 제거 효율은 물 입자와 비교해 전반적으로 감소하여 기

준 사이클론, 2단 실린더형 사이클론, 멀티 사이클론이 각기 2.7, 1.4, 0.4 μm 이상에서 99% 이상의 효율을 보였는데, 이는 물 입자의 경우 작은 입자가 쉽게 증발하기 때문에 증발에 의한 저감 효과가 반영된 것으로 판단된다. 입경별 입자 제거 효율을 PM 2.5 제거 효율, TSP 제거 효율로 환산하였을 때, 물 입자의 경우 멀티 사이클론, 2단 실린더형 사이클론, 기존 사이클론 순으로, 오일 입자의 경우 멀티 사이클론, 기존 사이클론, 2단 실린더형 사이클론 순의 입자 제거 성능을 보였다.

압력강하에 따른 입자 제거 효율인 양질계수를 이용하여 사이클론의 비교한 결과, 물 입자에 대한 양질계수의 경우 기존 사이클론, 2단 실린더형 사이클론, 멀티 사이클론이 각각 2 CMM 유량을 기준으로 0.3, 2.0, 0.6 kPa^{-1} 이고, 오일 입자에 대한 양질계수는 각각 0.4, 0.5, 0.3 kPa^{-1} 로 나타나 물, 오일 입자 모두에서 2단 실린더형 사이클론이 가장 높은 양질계수 값을 보였다. 이는 2단 실린더형 사이클론이 다른 두 사이클론과 비교하여 같은 압력 강하 조건에서 더 효율적으로 물 입자와 오일 입자를 제거 할 수 있음을 의미한다. 이를 통해 본 연구에서 개발된 2단 실린더형 사이클론이 컴팩트한 셰일 가스 정제용으로 경제적인 방식임을 확인하였다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 선진화사업(GG2790)과 한국기계연구원 주요사업(SC1250)에서 지원된 연구이며, 이에 감사드립니다.

Reference

- 구영덕, 김영인, 박관순. (2014). 셰일가스 개발정보의 글로벌 동향 분석, *자원환경지질*, 47(2), 193-204.
- 정진도. (2003). 고효율 사이클론의 집진효율 및 특성 연구, *대한환경공학회지*, 25(9), 1184-1189.
- 한원희. (2012). 셰일가스 (Shale Gas) 개발 현황 및 전망, *Journal of the Electrical World/Monthly Magazine, Special Issues 2*, 46-52.
- Chen, C.C., Lehtimäki, M., Willeke, K. (1992). Aerosol penetration through filtering facepieces and respirator cartridges, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 53(9), 566-574.
- Chen, C.C., Lehtimäki, M., Willeke, K. (1993). Loading and filtration characteristics of filtering facepieces. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 54(2), 51-60.
- Cooper, C.D., and Alley, F.C. (2011). *Air pollution control: A design approach*, 4th Edition, Waveland Press, Inc., Long Grove, IL, US.
- Kharoua, N., Khezzar, L., and Saadawi, H. (2013). CFD Modeling of a horizontal three-phase separator: A population balance approach, *American Journal of Fluid Dynamics*, 3(4), 101-118.
- Kouba, G.E., Shoham, O., and Shirazi, S. (1995). Design and performance of gas liquid cylindrical cyclone separators, Presented at the BHR Group 7th International Conference on "Multiphase 95", Cannes, France, June 7-9.
- Wang, S., Gomez, L.E., Mohan, R.S., and Shoham, O. (2001). Gas-liquid cylindrical cyclone (GLCC) compact separator for wet gas applications, Presented at ETCE 2001 Engineering Technology Conference on Energy, Houston, TX, February 5-7.