

ISSN 1738-8716(Print)

ISSN 2287-8130(Online)

Particle and Aerosol Research

Part. Aerosol Res. Vol. 15, No. 4: December 2019 pp. 139-148

<http://dx.doi.org/10.11629/jpaar.2019.15.4.139>

고속원심분리 사이클론을 이용한 오일 미스트 제거 성능 연구

김수연¹⁾ · 김진선¹⁾ · 성진호¹⁾ · 한방우¹⁾ · 김용진¹⁾ · 김학준¹⁾*

¹⁾한국기계연구원 환경기계연구실

(2019년 10월 29일 투고, 2019년 12월 3일 수정, 2019년 12월 10일 게재확정)

A Study on Performance Evaluation for Oil Mist Removal using a High-speed Centrifugal Cyclone

SooYeon Kim¹⁾ · Jin-Seon Kim¹⁾ · Jin-Ho Sung¹⁾ · Bangwoo Han¹⁾ · Yong-Jin Kim¹⁾ · Hak-Joon Kim¹⁾*

**Department of Environmental Machinery, Korea Institute of Machinery & Materials*

(Received 29 Oct 2019; Revised 03 Dec 2019; Accepted 10 Dec 2019)

Abstract

This study was performed for the application of a high-speed centrifugal cyclone to shale gas mining process. This device uses the centrifugal force to control particles similar to typical cyclones, and the disk located inside the cyclone is forced to rotate using a motor. The pressure difference occurred during the rotating of disk. Hence, inflow rate was generated without a blower fan. In addition, flow rate increased with elevating rpm of motor. The installing the disk in multiple stages on the inner rotor increased the instantaneous disk outlet flow. Hence, the control efficiency of oil particle increased from 1.05% to 31.2%. By modifying the structure of the disk so that the air flow to the opposite direction of the cyclone, the control efficiency of oil particles increased to 81.5%. By increasing the capacity of the motor and the size of the disk, the flow rate was increased to 2.5 m³/min because the rpm of motor and pressure difference increased. As rpm of motor increased, the cut-off diameter (d_{pc}) became smaller. Unlike the Lapple's equation, d_{pc} was inversely proportional to the effective number of rotations (N_e). The control efficiency was maintained even if the concentration of oil particles increased, for this reason, the higher the oil concentration, the more particles were accumulated and controlled.

Keywords: High-speed centrifugal cyclone, Oil mist, Motor rpm, Flow rate, Cut-off diameter

* Corresponding author.

Tel : +82-42-868-7775

E-mail : diayolk@kimm.re.kr

1. 서론

2011년 기준 세계 산업과 경제 시스템을 이끄는 에너지원은 석유(33%, 4,028 백만 TOE), 석탄(31%, 3,555 백만 TOE), 천연가스(24%, 2,858 백만 TOE)로 조사되었다(IEA, 2011). 그러나 천연가스 사용 비중은 미국과 중국의 셰일가스 탐사 및 채굴로 급격하게 증가하고 있다. 특히 미국은 셰일가스 개발·생산 및 수출 확대 계획을 가지고 있다(KEEI, 2017). 미국 연평균 천연가스 가격은 셰일가스 개발분으로 100만 BTU (1 BTU = 0.252 kcal/h)당 2008년 8.9달러에서 2012년 2.83달러로 하락하였고, 미국의 셰일가스는 LNG보다 22% 저렴하다. 이러한 이유로 셰일가스는 기존 석유 중심의 에너지역학 구도를 파괴할 정도로 파괴성이 높은 차세대 에너지원으로 주목받고 있다(Koo et al., 2014). 국내에서는 신 기후체제에 따른 탈원전, 온실가스 및 미세먼지 감축정책을 이행하기 위해 석탄화력 발전 대체 LNG발전량의 비율을 확대할 계획을 가지고 있다(KEEI, 2017).

셰일가스는 근원암인 셰일 내부에 존재하며, 이를 채굴하기 위해 대부분의 공정은 수압 파쇄(Hydraulic fracturing) 기술을 이용한다. 따라서 셰일가스의 채굴 과정에서 투입된 물의 역류(Flowback)와 함께 다량의 모래, 오일, 가스가 혼합되어 배출된다. 이후 셰일가스 추출과정에서는 입자 분리 및 탈수기술 등을 적용하여 셰일가스 추출물의 세정(Cleaning)이 필요하다(Sun et al., 2019). 기존 석유 및 가스 추출과정에서는 수분을 제거하기 위해 응축기를 이용한 수분 분리를 사용하였고, 오일 및 수분을 동시에 제거하기 위해 이상 또는 삼상 분리기(Two-phase or three-phase separator)를 적용하고 있다. 기존 개발되고 상용화된 수분 분리는 대부분 수평형태로 큰 설치공간을 요구한다는 단점이 있다(Stewart and Arnold, 2008). 또한 셰일가스 채굴공정의 특성상 설치 및 운영이 간단해야 하며, 이동형 설비로 구성되어야 한다. 따라서 이동성이 뛰어나며 작은 설치공간으로 대용량의 가스를 고효율로 세정할 수 있는 기술개발이 필요하다. 그러나 석유 및 가스 추출과정에서 사용될 수 있는 입자분리 관련 기술이 국내에는 전무한 실정이다.

기존 산업시설에서는 입자 및 오일 등을 제거하기 위해 다양한 원리를 이용한 방지기술(여과 집진기,

전기집진기, 사이클론)을 적용하고 있다. 여과 집진기는 유체 내 입자가 여과재 구성물에 충돌하여 제거되며, 매우 높은 입자 집진효율을 가진다. 하지만 여과재의 내구성 등에 의해 설치 가능한 유속조건이 한정적이며, 특히 설비 전후단의 압력 차이가 매우 크다는 단점이 있다. 따라서 대형시설에서는 차압에 따른 운영비의 문제가 되며, 셰일가스 채굴공정과 같이 유속이 빠른 조건에서는 여과재 내구성에 대한 문제가 있다. 전기 집진기는 정전기력을 이용하여 입자를 제거하며, 여과 집진기와 유사하게 매우 높은 입자 집진효율을 가진다. 하지만 여과 집진기와 마찬가지로 셰일가스 채굴공정과 같이 유속이 빠른 조건에서는 충분한 집진면적을 확보해야 하므로, 설비의 설치공간이 매우 커져야 한다(Cooper and Alley, 2011). 사이클론은 원심력을 이용하여 입자를 제거하며, 유지보수 및 운영비가 매우 저렴하다는 장점이 있다. 그러나 일반적인 사이클론은 입자의 집진효율이 높지 않으며, 대부분 전기 집진기 또는 여과 집진기 전단의 전 처리용으로 사용되고 있다. 사이클론의 경우 50%의 집진효율을 보이는 입자의 크기를 계산할 수 있으며, 이를 절단입경(Cut-off diameter, d_{pc})라 한다. 일반적인 상용 사이클론의 d_{pc} 는 5 μm 이다(Zhao, 2005). 그러나 사이클론의 형상과 관련된 다양한 변수 조건에 따라 내부의 유동이 영향을 받게 되어 입자 분리 효율이 많이 달라질 수 있다(Avci et al., 2003). 이러한 이유로 사이클론의 집진효율 향상과 분리 매커니즘을 확립하기 위해 다양한 연구가 진행되었고, 그 성능이 크게 개선되었다(Ma et al., 2015). 최근 Akhbarifar et al. (2019)의 연구에서는 0.3 ~ 40 μm (mode diameter : 1.6 μm)의 입경분포를 보이는 배가스 중 입자 집진효율을 최대 98%까지 개선시켰다.

본 연구에서는 기존 사이클론의 집진원리인 원심력을 이용한 새로운 구조의 고속원심 분리방식 사이클론(이하 사이클론)을 개발하였으며, 내부 회전체의 구조 등을 변경하여 대용량 설비로 발전시키 고자 하였다. 본 연구에서 개발한 사이클론의 성능평가는 오일 미스트를 대상입자로 하였으며, 내부 회전체의 회전수에 따라 오일 미스트의 입경별 집진효율과 제거량을 산정하였다.

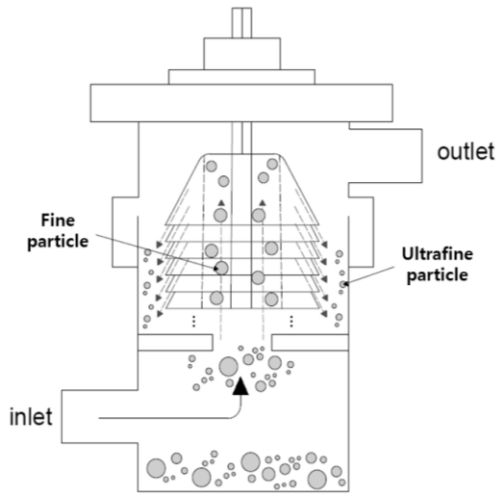


Figure 1. Schematic diagram of a high-speed centrifugal cyclone.

2. 실험장치 및 연구방법

2.1. 실험장치

그림 1은 본 연구에서 개발한 고속원심 분리방식 입자제거 설비를 나타내었다. 이 장치의 전체 높이는 300 mm, 직경 130 mm이며, 입구와 출구는 투입 및 세정 후 입자농도를 측정하기 위해 동일한 지름 55 mm 원형 파이프를 사용하였다. 아래의 그림 1과 같이 회전축을 중심으로 회전날개 및 콘 형태의 디스크가 단단으로 겹쳐있다. 이 장치는 기존 사이클론과 같이 원심력을 이용하여 입자를 분리하며, 유입되는 입자에 원심력을 가하기 위해 디스크를 회전시켰다. 디스크는 사이클론 내부 회전축에 모터(JungWoo, JEA00047)를 설치해 통해 회전시켰으며, 인버터(Invertor)를 통해 모터의 회전수를 조절하였다. 디스크의 회전과정에서 디스크 전·후단에서 압력 차이가 발생하였으며, 이로 인해 송풍기를 이용하지 않아도 사이클론 내로 유입되는 공기의 흐름이 형성되었다. 특히 기존 사이클론은 유체가 장치의 측면에서 유입되어 상부로 토출되지만(Cooper and Alley, 2011), 본 연구에서 개발한 사이클론은 장치의 하단에서 유입되어 상부로 토출된다. 고속 회전 시 회전 날개를 통해 유입되는 오일 입자는 디스

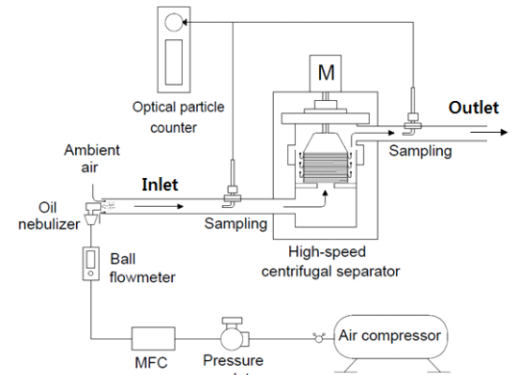


Figure 2. Experimental setup to evaluate a high-speed centrifugal cyclone.

크의 회전에 의해 벽면방향으로 원심력을 받으며, 벽면과 충돌하여 제거되었다. 사이클론 내부의 선회유동 중 큰 입자는 디스크 내부에서 제거되었고, 제거되지 못한 미세한 입자는 디스크 사이로 토출되는 유선방향으로 선회하며 벽면과 충돌하였다.

2.2. 연구방법

그림 2는 사이클론의 성능을 평가하기 위한 실험 개략도를 나타내었다. 본 연구에서는 사이클론의 성능 평가를 위해 오일입자를 사용하였으며, 의약품 nebulizer (Salter labs, 8900-7)를 이용하여 오일을 입자화하였으며, 1.2 bar의 압축공기를 MFC (mass flow controller, Mykrolis, FC-2900)를 이용하여 3 ~ 4.3 L/min로 공급하였다. 압축공기가 아토마이저 노즐로 공급되는 과정에서 압력의 역구배가 발생하며, 이로 인해 nebulizer의 기계유가 노즐로 흡입되어 미스트화되어 분사된다. 이 때의 오일미스트 양은 노즐을 통과하는 유량과 아토마이저의 노즐직경, 노즐 밸브를 통해 조절하였다. 오일입자의 유동을 가시화하기 위해 사이클론의 전·후단에 투명 아크릴 파이프를 설치하였고, 2개의 샘플링 관(유속, 오일입자 농도 측정용)을 설치하였다. 본 연구에서 종합 계측기 (Testo, Teato 454)를 이용하여 관내유속을 측정하였으며, 광학입자계수기(OPC, Optical particle counter, Grimm, 1.109)를 이용해 오일입자의 수농도를 측정하였고, 입자 밀도를 1.0 g/cm³로 적용하여 질량농도로 환산하였다. 측정 결과는 아래의 식 (1)을 통해 집진효율을 계산하였다.

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

여기서, η : 고속 원심 분리 장치의 입경별 집진 효율(%), C_0 : 고속 원심 분리 장치 전단에서의 입자 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$), C_1 : 고속 원심 분리 장치 후단에서의 입자 질량 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)를 의미한다.

앞서 언급한 바와 같이 디스크가 회전하는 과정에서 설비 전·후단의 압력 차이가 발생하여 공기의 흐름이 형성되었다. 따라서 본 연구에서는 회전수에 따른 유입유량을 측정하였고, 다양한 형상의 디스크에 따른 유입유량을 비교하였다. 디스크의 형상은 회전 날개, 회전 날개에 원판 디스크 적용, 회전 날개에 큰 디스크 적용으로 구분하였다. 본 연구에서는 디스크 형상에 따른 유량 및 오일입자 집진효율 결과를 통해 디스크 형상을 최적화하였다. 또한 회전 날개의 스케일 업 및 모터출력을 120 W (JungWoo, K9DS120N3)급에서 750 W (JungWoo, JEA00047)급으로 증가시켜 장비를 대응량화하고자 하였다.

본 연구에서는 기존 사이클론의 이론 집진효율을 결정하는 d_{pc} 을 계산하기 위해 Lapple (1951)의 준경험식을 바탕으로 이론적 연구를 진행하였으며, 아래의

식 (2)를 통해 계산할 수 있다.

$$d_{pc} = \left[\frac{9\mu W}{2\pi N_e V_i (\rho_p - \rho_g)} \right]^{1/2} \quad (2)$$

여기서, N_e : 유효 회전수(rpm), V_i : 가스 유입 속도(m/s), ρ_p : 입자의 밀도(kg/m^3), ρ_g : 가스의 밀도(kg/m^3), μ : 가스의 점도($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$), W : 유입구 폭(m)를 의미한다. d_{pc} 는 가스의 점도, 유입구의 폭과 제곱근의 비례하며, 유효 회전수, 유입가스 속도, 입자와 가스의 밀도 차에 대해 제곱근의 반비례 관계가 있다.

3. 결과 및 고찰

그림 3에 실험에서 사용되어진 3가지 종류의 회전 날개 및 디스크 형상을 나타내었다. 사이클론의 디스크 회전에 의해 생성된 원심력을 통해 오일입자는 사이클론 내부에서 외부로 이동하고, 충돌하여 제거된다. 그림 3(a)는 사이클론의 회전날개이며, 외경 약 100 mm, 내경 약 55 mm, 높이 약 118 mm의 구조로 제작하였다. 그림 3(b)는 회전날개에 원판 디스크를

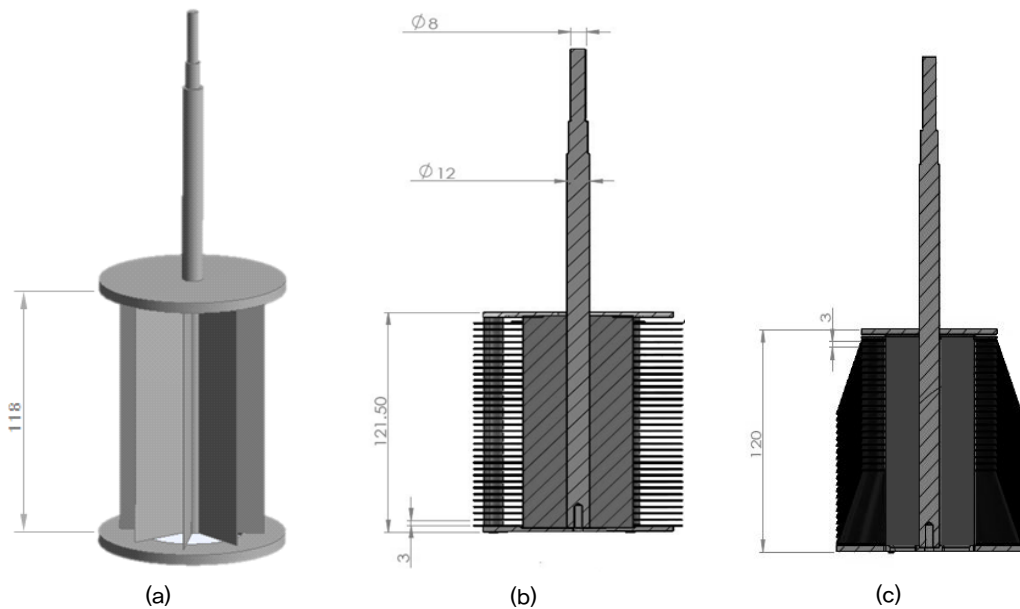


Figure 3. Schematics of disk; (a) propeller, (b) propeller + flat disk, (c) propeller + cone disk.

부착한 모식도이며, 원판 직경 110 mm, 두께 3 mm로 약 30단으로 구성되어있다. 본 연구에서는 디스크를 추가하며 출구 직경을 감소시켰으며, 이를 통해 디스크의 통과유속을 증가시키고자 하였다. 앞서 언급한 것과 같이 통과유속이 증가함에 따라 오일입자는 외벽으로 이동하는 관성력이 커지므로 집진효율이 증가할 수 있다. 그림 3(c)는 콘형 디스크로, 수평면으로부터 60°의 경사를 가지며, 직경 110 mm, 두께 3 mm로 원판 디스크와 동일한 개수(30단)로 구성되어있다. 앞서 언급한 것과 같이 콘형 디스크의 출구 유속을 순간적으로 증가시키며, 유선의 방향을 사이클로 후단과 역방향으로 향하게 하여 입자의 집진효율을 증가시키고자 하였다.

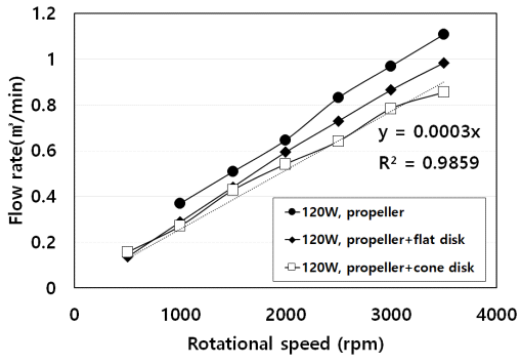


Figure 4. Variation of flow rate according to disk geometry at different RPM in a high-speed centrifugal cyclone (120 W).

그림 4는 사이클론의 회전 날개 및 디스크 형상을 최적화하기 위해 120 W급 모터를 사용하여 디스크 형상에 따른 유량을 비교한 결과이다. 모터의 회전수가 증가함에 따라 디스크 전·후단의 압력 차이는 증가하였고, 이로 인해 유량은 선형적으로 증가하였다. 모터 회전수가 3500 rpm일 때, 회전날개(그림 3(a))만 적용한 경우 유량은 1.10 m³/min (7.7 m/s)이었다. 그러나 회전날개에 원판형, 콘형 디스크를 추가할 경우 유량이 0.98 (6.9 m/s), 0.85 m³/min (6.2 m/s)로 각각 감소하였다. 이는 디스크를 추가함에 따라 출구유속은 순간적인 증가할 수 있지만, 디스크를 통과하는 공기의 흐름(장애물에 의한 충돌)을 방해하여 유량이 감소한 것으로 판단된다. Choi et al. (2019)의 연구에서는 사이클론에 콘형 디스크를 적용

하여 유속을 향상시켰다. 그러나 본 연구에서는 모터 회전수가 1500 rpm이하에서는 원판형과 콘형의 유량은 유사하였으나, 모터의 회전수가 지속적으로 증가함에 따라 유선의 방향에 변화를 준 콘형 디스크의 유량이 원판형 디스크를 설치한 유량보다 더 작은 유량을 얻게 되었다. 이는 유선의 방향에 변화를 주어 생성된 와류에 의해 유속이 감소한 것으로 판단된다.

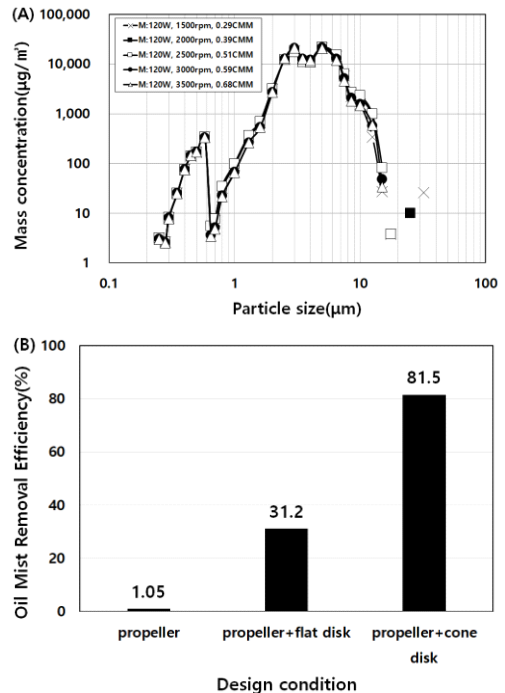


Figure 5. Comparison of (a) particle size distribution at inlet with different flow rate (b) PM₁₀ removal efficiency at 3500 rpm with different disk type.

그림 5(a)는 본 연구에서 투입한 오일 미스트의 입경분포를 나타내었다. 유량이 커질수록 발생시키는 오일 미스트의 양을 증가시킴으로 모든 조건에서 투입한 오일 미스트의 질량농도는 약 33 mg/m³로 고정하였다. 이 때 오일 미스트의 입자크기 분포는 0.6 ~ 0.7 µm의 크기에서 입자농도가 낮아지는 특성을 나타내었으며, 주요한 입자 사이즈는 3 ~ 5 µm로 나타났다.

그림 5(b)는 사이클론의 모터 회전수가 3500 rpm 일 때 디스크의 형상에 따른 오일입자(particle size : 10 μm)의 집진효율을 나타내었다. PM₁₀ 집진효율은 회전날개만 부착(그림 3(a))했을 때 1.05%, 회전날개에 원판 디스크를 부착(그림 3(b))하였을 때 31.2%, 큰 디스크를 적용(그림 3(c))하였을 때가 81.5%까지 증가하였다. 회전날개에 디스크가 추가됨에 따라 디스크를 통과하는 입자가 외벽에 충돌하는 속도가 빨라졌으며, 이로 인해 집진효율이 증가하였다. 비록 디스크 형상의 변화를 통해 유선 방향을 변경할 경우 고속 회전조건에서 유량 차이가 발생하였지만, 큰형 디스크는 사이클론의 출구각과 역방향으로 유선이 형성되어 입자의 집진효율이 급격하게 증가하였다.

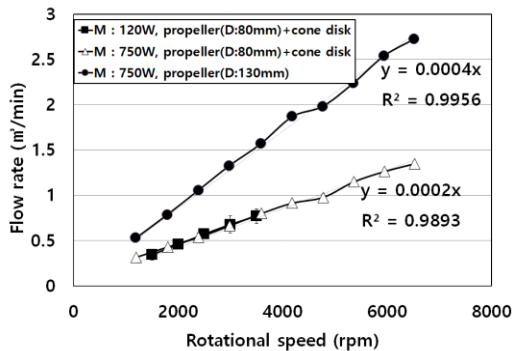


Figure 6. Comparison of flow rate according to motor capacity and disk diameter at different RPM in a high-speed centrifugal cyclone (120 W and 750 W).

그림 6은 사이클론의 모터출력과 회전날개 스키일 업에 따른 사이클론 유입유량의 비교결과이다. 모터출력이 120 W에서 750 W로 증가함에 따라 모터 회전수와 유입유량이 선형적으로 증가하였으며, 회전날개 직경이 80 mm에서 130 mm로 증가할 때 같은 회전수에서 유입유량이 약 2배정도 증가함을 확인하였다. 모터출력 750 W, 회전날개 직경이 130 mm 일 때, 회전수가 6000 rpm에서 사이클론 유입유량은 2.5 m³/min까지 증가하였고, 회전수가 더욱 증가하게 된다면 유량 또한 선형적인 증가가 예상된다. 따라서 사이클론의 처리유량은 모터와 회전날개의 출력과 크기변화를 통해 조절이 가능하며, 이는

디스크 전·후단의 압력 차이가 증가하여 유입유량이 증가한 것으로 판단된다.

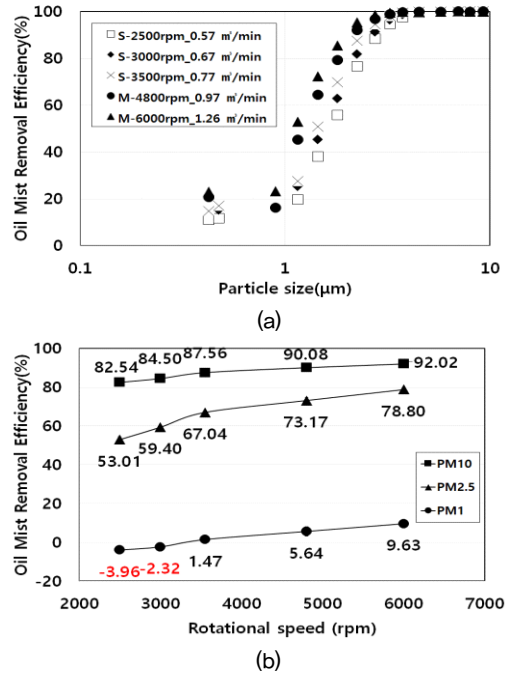


Figure 7. Comparison of (a) oil mist removal efficiency distribution and (b) PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ removal efficiency distribution with different RPM in a high-speed centrifugal cyclone (120 W and 750 W).

그림 7(a)은 사이클론의 유량에 따른 입자크기별 집진효율을 나타내었다. 앞서 언급한 것과 같이 사이클론의 성능평가를 위해 투입된 오일입자 질량농도는 약 33 mg/m³으로 유지하였으며, 오일입자를 발생시키기 위해 투입된 압축공기는 3 ~ 4.5 L/min 이었다. 앞의 그림 6에서 나타낸 것과 같이 모터의 회전수를 증가시키에 따라 사이클론으로 유입되는 유량은 선형적으로 증가하였다. 2 ~ 10 μm의 크기를 보이는 오일입자는 사이클론에서 약 99%이상 제거되었다. 그러나 입자의 크기가 감소함에 따라 집진효율은 감소하였다. 그러나 1 ~ 2 μm의 크기를 보이는 오일입자의 집진효율은 유량이 따라 증가하였다. 모터 회전수가 증가할수록 오일입자에 가해지는

원심력이 증가하여 집진효율이 증가한 것으로 판단된다. 모터의 회전수가 6000 rpm (1.26 m³/min) 조건에서 d_{pc} 는 약 1.1 μm으로 나타났고, 모터의 회전수가 2500 rpm (0.57 m³/min)으로 느려질 경우 d_{pc} 은 약 1.9 μm으로 커졌다. 원심력에 의해 입자 집진효율이 변화하는 사이클론의 이론계산을 위해서는 위의 식 (2)와 같이 d_{pc} 을 도출해야 하며, d_{pc} 는 회전수의 제곱근에 반비례한다. 본 연구 장비에서는 회전수가 증가함에 따라 d_{pc} 가 반비례하는 결과를 나타내었다. Han et al. (2010)의 연구에서는 회전날개가 존재하는 사이클론을 이용하여 유입된 가스의 회전수에 따른 오일입자의 거동을 확인하였다. 이 논문에 의하면 사이클론 내부에서의 회전수가 작을 경우 입구에서 출구로 이어지는 유속이 사이클론의 내부에서의 회전유동보다 강하여, 입구에서 출구로 오일 미스트가 유동을 따라 이동을 하여 출구부분 근처에서 오일 미스트가 밀집되었다. 그러나 사이클론의 회전수가 급격히 증가하면, 오일 미스트도 따라서 회전날개 입구를 통과하자마자 회전벽 근처로 모이는 것을 확인하였다. 본 연구에서도 회전수의 증가에 따라 유속이 증가하며, 이에 따라 원심력이 증가하거나 벽면에 충돌하는 입자의 수가 많아지며 집진효율이 증가하고, d_{pc} 이 작아진 것으로 판단된다.

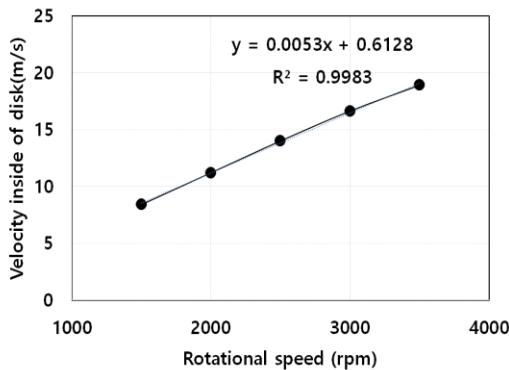


Figure 8. Velocity inside of dist by RPM of a high-speed centrifugal cyclone.

그림 7(b)은 회전수 변화에 따른 PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 집진효율을 정리하였다. 회전수가 6000 rpm일 때

유량이 1.26 m³/min이며, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁의 집진효율은 각각 92%, 78%, 10%를 나타내었다. 특히 모터의 회전수가 3000 rpm이하인 조건에서 오일입자의 쪼개짐 현상이 발생하여 PM₁의 입자수가 증가한 것으로 판단되며, 이로 인해 오히려 초기농도보다 높은 결과를 나타내었다. 입자의 쪼개짐에도 불구하고 PM₁의 집진효율을 확보하기 위해서는 3000 rpm이상 조건에서 사이클론을 운전해야하며, 회전수를 증가시킬 경우 집진효율은 증가할 것이다. 세일가스의 채굴공정은 고압조건에서 운전되므로 이 공정에서 발생하는 모래와 같은 입자는 충분히 고효율로 제거할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 기존 사이클론의 이론 집진효율을 결정하는 d_{pc} 을 계산하기 위해 Lapple (1951)의 준경험식을 바탕으로 이론적 연구를 진행하였으며, 사이클론의 회전특성과 유입속도가 집진효율에 미치는 영향을 파악하였다. 그림 8은 모터 회전수에 따른 디스크 출구의 유속 계산한 결과를 나타내었다. 디스크 사이의 유속은 전·후단에 유량을 디스크와 디스크 사이의 면적으로 나누어 계산하였다. 일반 사이클론의 d_{pc} 은 식 (4)과 같이 성립된다.

$$d_{pc} \propto \left[\frac{1}{N_e V_i} \right]^{1/2} \quad (3)$$

기존 사이클론에서의 d_{pc} 은 회전수와 유입속도의 제곱근에 반비례하지만 본 연구에서 개발한 사이클론에서 d_{pc} 은 회전수 또는 유입속도에 반비례하는 결과를 나타내었다. 유입속도는 회전수에 비례함을 아래의 그림 9를 통해 확인하였다. 고속 원심 분리 방식장치의 절단입경은 식 (5)과 같이 성립된다.

$$d_{pc} \propto \left[\frac{1}{N_e} \right] \propto \left[\frac{1}{V_i} \right], \quad V_i = \alpha \times N_e, \quad (4)$$

앞서 진행한 연구와 같이 회전수의 증가에 따라 유량이 증가하기 때문에 본 연구에서는 집진효율을 처리용량을 환산하여 계산하였다. 이때 입자 저감량은 식 (6)과 같이 정의하였다.

$$\text{저감량}(mg/\text{min}) = Q \times \eta \times C_0 = Q \times (C_0 - C_1) \quad (5)$$

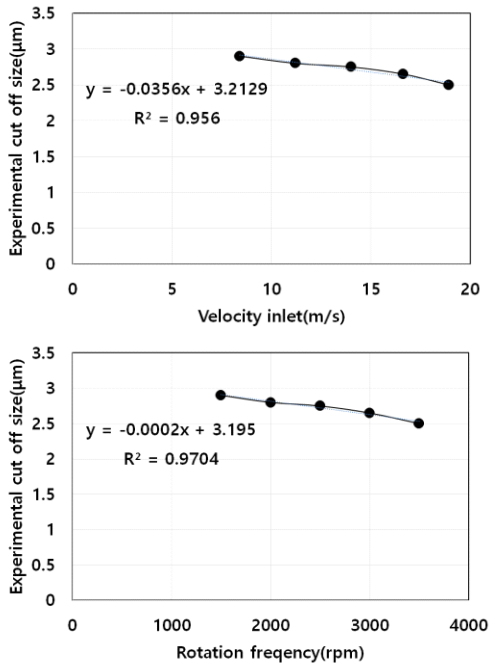


Figure 9. Experimental cut off size according to inlet velocity and RPM of a high-speed centrifugal cyclone.

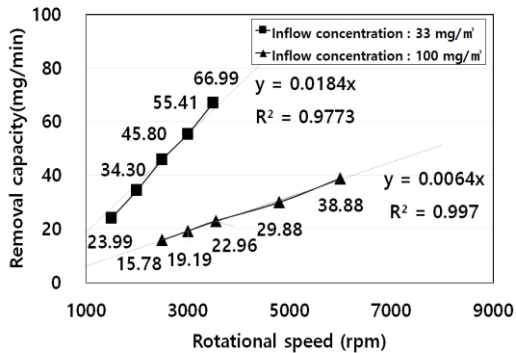


Figure 10. Oil mist removal capacity according to inlet velocity of a high-speed centrifugal cyclone.

여기서, η : 고속 원심 분리 장치의 입경별 저감량(mg/min), Q : 고속 원심 분리 장치 처리 유량(m^3/min), C_0 : 고속 원심 분리 장치 전단에서의 입자 질량 농도($\mu g/m^3$), C_1 : 고속 원심 분리 장치 후단에서의 입자 질량 농도($\mu g/m^3$)를 의미한다. 그림 10은

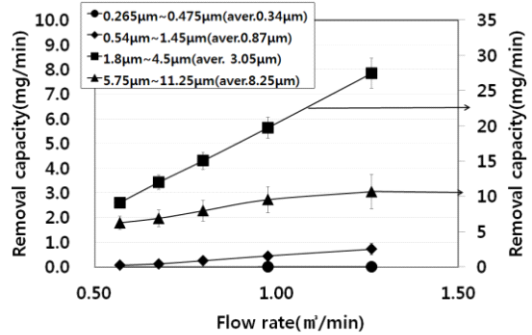


Figure 11. Oil mist removal capacity according to flow rate of parts at a high-speed centrifugal cyclone.

오일 입자 투입농도를 33, 100 mg/m^3 조건에서 회전수 증가에 따른 저감량을 계산한 결과를 비교하였으며, 3600 rpm에서의 집진효율은 약 81%로 유사하여 농도에 크게 영향받지 않음을 확인하였다. 그 결과, 유입농도가 3배 증가함에 따라 누적 저감량은 3배로 증가하였다. 일반적으로 고농도의 조건에서 많이 사용되는 사이클론이 고속 원심 분리 장치로 변경되어 적용될 경우 매우 높은 집진효율을 보일 것으로 판단된다. 그림 11은 입자의 크기를 임의 구간을 나누어 제거량을 비교한 결과이다. 평균 3.05 μm 의 크기를 가지는 오일 입자는 유량이 0.6 m^3/min 에서 1.26 m^3/min 로 2배 증가함에 따라 제거량이 3배 이상 증가함을 확인하였으며, 제거량은 유입유량에 따라 선형적으로 증가하였다. 입자의 직경이 클수록 강한 원심력을 받아 집진 효율이 증가함을 확인하였다. 비록 평균 0.34 μm 의 크기를 가지는 오일은 거의 제거되지 않았지만, 일반적인 형태의 사이클론보다 절단입경이 작기 때문에 미세한 입자까지 제거 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 세일가스를 시추할 때 가스 내에 포함된 오일입자를 분리할 수 있는 컴팩트형 고효율 가스-입자 분리장치를 개발하였고, 회전속도에 의해 변하는 유속에 따른 오일미스트의 입경별 제거효율을 정성적/정량적으로 비교 분석하였다.

1. 고속 원심 분리 장치의 회전 날개 및 디스크 형상에 최적화하는 과정에서 동일한 출력을 가진 120 W급 모터를 사용하였다. 3500 rpm일 때 유량을 측정 한 결과, 공기를 흡입하여 원심력을 발생시키는 회전 날개만 적용하였을 경우 1.10 m³/min에서 회전 날개에 콘 디스크를 결합하였을 경우 0.85 m³/min으로 0.25 m³/min 정도 감소한 결과를 보였다. 또한, 오일 입자의 집진효율은 회전 날개에 원판 디스크를 적용한 경우 오일 입자의 집진효율은 31%이며, 콘 디스크를 적용한 경우 80% 이상이었고 최종적으로 회전날개에 콘 디스크 적용하여 실험을 진행하게 되었다.

2. 모터 출력이 120 W에서 750 W로 증가하는 회전축의 회전수를 증가시키기에 따라 처리 유량이 선형적으로 증가하였으며, 회전 날개 크기가 직경 80 mm에서 130 mm로 증가할 때 같은 회전수에서 유량이 2배정도 증가함을 확인하였다. 모터 출력이 750 W이며, 회전 날개의 직경이 130 mm 일 때 최대 6000 rpm 정도의 고속 회전시 처리 유량이 2.5 m³/min을 만족하였다.

3. 투입된 오일 입자 농도는 약 33 mg/m³으로 유지하여 실험을 진행하였을 때, 1 μm 이상의 입자 집진효율이 매우 높은 것으로 나타났다. 회전수가 6000 rpm일 때 유량이 1.26 m³/min이며, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁ 집진효율은 각각 92%, 78%, 10%를 나타내었다. 회전수 증가에 따라 유량이 증가하였으며, 입자의 집진효율도 함께 상승하였다.

4. 기존 사이클론의 이론 집진효율을 결정하는 절단입경을 계산하기 위해 Lapple (1951)의 준경험식을 바탕으로 이론적 연구를 진행하였으며, 실험 결과를 통해 절단입경은 회전수 또는 유입속도에 반비례하며, 유입속도는 회전수에 비례함을 확인하였다.

5. 오일 입자 투입농도를 33, 100 mg/m³ 조건에서 회전수 증가에 따른 저감량을 계산한 결과를 비교하였으며, 3600 rpm에서의 집진효율은 약 81%로 유사하여 농도에 크게 영향받지 않음을 확인하였다. 그 결과, 유입농도가 3배 증가함에 따라 누적 저감량은 3배로 증가하였다.

Acknowledgement

본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제이며 (No. 20181110200170), 한국기계연구원의 일반 사업 (SC1320)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Reference

- Akhbarifar, S., and Shirvani, M. (2019). Improving cyclone efficiency for small particles, *Chemical Engineering Research and Design*, 147, 483-492.
- Alley, F.C., and Cooper, C.D. (2011). *Air pollution control a design approach*, 4th Ed., Illinois, Waveland press, pp 135-160.
- Arnold, K., and Stewart, M. (2008). *Gas-Liquid And Liquid-Liquid Separators*, Houston, Gulf Professional Publishing, pp 66-130.
- Avcı, A., and Karagoz, I. (2003). Effects of flow and geometrical parameters on the collection efficiency in cyclone separators, *Journal of Aerosol Science*, 34, 937-955.
- Cheong, C., Choi, J.H., Lee, K.H., and Ryu, S.Y. (2019). Blade shape optimization of centrifugal fan for improving performance and reducing aerodynamic noise of clothes dryer, *The Journal of the Acoustical Society of Korea*, 38(3), 321-327.
- Feng, Y., Ok, Y.S., Sun, Y., Tsang, D.C.W., Wang, D., and Wang, L. (2019). A critical review of risks, characteristics, and treatment strategies for potentially toxic elements in wastewater from shale gas extraction, *Environment International*, 125, 452-469.
- Fu, P., Ma, L., Wang, F., Wang, H., and Wu, J. (2015). CFD simulation study on particle arrangements at the entrance to a swirling flow field for improving the separation efficiency of cyclones, *Aerosol and Air Quality Research*, 15, 2456-2465.

- Han, J.H., and Ma, S.J., (2010). Trajectory characteristics of liquid drops inside the cyclone of an air cleaner, Proceedings of the KSME 2010 Autumn Conference, 3401-3403.
- International Energy Agency (IEA) (2011). Key world energy statistics 2011, Paris.
- Koo, Y.D., Kim, Y.I., and Park, K.S. (2014) Global trends of shale gas development information, Economic and Environmental Geology, 47(2), 193-204.
- Korea Energy Economics Institute (KEEI) (2017). World energy issue insight, 17(1), Ulsan.
- LexInonova (2013) Shale oil & gas : A study on refining, San Francisco.
- Zhao, B. (2005). Development of a new method for evaluating cyclone efficiency, Chemical Engineering and Processing, 44(4), 447-451.