

## 싸이클론 재순환, 냉각공정을 이용한 공정가스 정제 연구

김주호<sup>2</sup>, 조우진<sup>1</sup>, 최영태<sup>1</sup>, 조영민<sup>2</sup>, 김상범<sup>\*</sup>  
<sup>1</sup>한국생산기술연구원, <sup>2</sup>경희대학교 환경응용과학과

### Process gas purification using cyclone recirculation and cooling process

Ju-Hoe Kim<sup>2</sup>, Woo-Jin Jo<sup>1</sup>, Young-Tae Choi<sup>1</sup>, Young-Min Jo<sup>2</sup>, Sang-Bum Kim<sup>\*</sup>

<sup>1</sup>Korea Institute of Industrial Technology

<sup>2</sup>Department of Applied Environmental Science, Kyunghee University

**요약** 화석 연료의 고갈과 온난화 현상으로 인해 새로운 에너지원에 대한 관심이 급증하고 있다. 그 중에서 바이오가스는 유기성 폐기물 및 바이오매스를 혐기성 소화과정인 가수분해(hydrolysis), 산발효(acidogenesis), 유기산발효(acetogenesis), 메탄발효(methanogenesis)의 단계를 거쳐 발생되기 때문에 친환경적인 에너지자원으로 각광받고 있다.

그러나 바이오가스는 기존의 정제설비로는 제거할 수 없는 높은 미세분진 및 수분 함량으로 인해, 직접연소, 도시가스, 자동차용 연료 등 효율적인 이용을 위해서 정제시스템이 필요하다. 따라서 본 연구는 미세분진과 수분을 동시에 제거할 수 있는 정제과정의 전처리 방법으로써 원심력을 이용하는 냉각공정을 설계하였다. 원심력을 이용하여 분진을 제거하는 Cyclone 내외부에 열교환기와 ID fan을 구성하여 주입되는 가스를 어느점 이하로 냉각시킴으로써 물안개를 형성시켜 분진입자를 제거하고, 일부 가스를 ID fan을 이용하여 재순환시켜 제거하는 고효율 냉각제어공정을 개발하였다. 수분제거는 유량(25~150L/min) 및 상대습도(60~95%)의 조건에서 시험하였다. 수분제거율은 상대습도 95±5%일 때 평균 80.8%, 입자제거율은 입자크기 2.5 μm에서 평균 99.78%의 제거효율을 보였고, 수분과 입자의 동시제거효율은 수분 70.86%, 입자 99.67%의 평균 값을 보여주었다.

**Abstract** Renewable energy has been of interests in the area of modern alternative fuels. Biogas is produced in waste landfill sites through anaerobic digestion processes, including hydrolysis, acidogenesis, organic acid fermentation (acetogenesis), and methane fermentation (methanogenesis). High contents of fine dust and moisture limited its utilization for direct combustion, town gas and vehicle fuel. Thus, this study proposed a new design for a cooling device using a centrifugal cyclone for simultaneous removal of fine dust and moisture as a pretreatment in the purification processes. A heat exchanger and an ID fan, which are installed inside and outside of the cyclone, in order to cool the humid gas below the freezing point and form a foggy mist. Such an atmosphere enhanced to capture fine dust as recirculating the cold mist flow. The water removal rate was 80.8% at a relative humidity of 95%, and the particle removal efficiency was 98.3% for 2.5 μm. Simultaneous removal efficiency was 70.8% and 99.6% for particle and moisture respectively.

**Keywords** : Biogas, Centrifugal separation, Cyclone, Cooling, Dehumidification

### 1. 서론

화석 연료의 고갈과 온실가스로 인한 온난화 현상으

로 인해 친환경적인 새로운 대체 에너지 자원에 대한 관심이 급증하고 있다. 그 중에서 매립지에서 발생하는 높은 수분함량의 유기성 폐기물을 혐기성 소화에 의해 가

본 논문은 한국생산기술연구원 연구과제로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Sang Bum Kim (Korea Institute of Industrial Technology, KITECH)

Tel: +82-41-589-8673 email: sbkim@kitech.re.kr

Received October 11, 2017

Revised November 9, 2017

Accepted January 5, 2018

Published January 31, 2018

수분해, 유기산 생성, 환원단계를 통해 생성되는 바이오 가스는 높은 메탄함량으로 인해 연료로서 가치가 충분하다. 그러나 바이오가스의 효율적인 이용을 위해서는 필연적으로 함유하고 있는 높은 함량의 수분 및 미세분진을 효과적으로 제거할 수 있는 정제장치를 개발하는 것이 필수적이다. 바이오가스의 주성분은 메탄( $\text{CH}_4$ , 40~75%)과 이산화탄소( $\text{CO}_2$ , 15~60%)이고 미량 성분의 불순물인 수분( $\text{H}_2\text{O}$ , 5~10%), 황화수소( $\text{H}_2\text{S}$ , 0.005~2%), 실록산(Siloxanes, 0~0.02%), 암모니아( $\text{NH}_3$ , <1%), 산소( $\text{O}_2$ , 0~1%), 일산화탄소( $\text{CO}$ , <0.6%), 질소( $\text{N}_2$ , 0~2%) 등으로 이루어져 있다 [1]. 실제로 난지 하수처리장에서 바이오가스를 연료로 사용하여 발전할 때 가스엔진에서 발생하는 고장사례에 대한 조사와 분석을 실시한 결과, 소화조나 매립지에서 배출될 때 포화 상태의 수증기는 온도가 감소하거나 압력이 증가할 때 가스배관에서 응축됨으로써 배관 속의 가스흐름에 대한 유효공간을 감소시키고, 압력손실이 증가하여 공정의 효율을 낮추는 역할을 한다 [2]. 또한 수분은 엔진을 비롯한 설비와 배관 부식, 응축수로 인한 계기 오작동 유발, 배관 및 노즐의 결빙을 야기한다 [3]. 한편, 다습한 악취성 가스를 제거하기 위한 활성탄 흡착탑은 수분으로 포화되면 흡착공정이 선택적으로 이루어지지 않고 악취성 부산물인 실록산이나 황화수소의 포집효율을 낮추는 원인이 된다. 따라서 활성탄 흡착탑으로 공급되는 가스를 사전에 건조시킬 필요가 있으므로 가스엔진 제조사에서는 가스 온도를 4℃ 전후로 냉각시킨 후 응집필터로 수분을 제거하곤 한다 [4]. 이러한 흡착방법은 가스의 상대습도가 50% 이상이 되면 흡착효율이 급격히 낮아지게 되므로 상대습도를 항상 50% 이하로 유지하고 있다. 미세분진 제거를 위해서 주로 사용되고 있는 싸이클론은 구조가 간단하며 유체로부터 고체나 액체, 기체를 분리하는 장치로써 운전과 보수가 용이하고 광물공정 및 석탄처리 등의 넓은 범위에서 활용되고 있다. 분진을 함유한 기체가 싸이클론 상단부에서 접선방향으로 유입되어 회전하여 하단부에서 나선형의 운동을 하는 과정에서 무거운 고체입자는 원심력에 의해 분리되어 싸이클론 하단부에 포집되고, 정화된 기체는 vortex부분에서 상승 나선형 흐름으로 전환되어 가스 배출구를 통해 빠져나가면서 유체로부터 분진을 제거하는 방법이다 [5]. 그러나 유체의 원심력과 관성력에 의해 입자상물질을 제거하므로 미세분진에 대해서는 효율이 낮다는 단점이 있다. 미세입자의 제거효율

이 낮기 때문에 대부분의 싸이클론은 백필터, 전기집진기 등의 전처리 장치로 활용하여 주된 집진기의 수명을 연장시키고, 입자 탈진 주기를 길게 할 수 있다 [6].

본 연구에서는 냉각과 여과기능을 통합한 싸이클론 장치를 설계하여 내, 외부 열교환기가 간접대류 분위기를 형성함으로써 냉각수가 증발되는 문제점을 보완하면서 동시에 분진을 제거할 수 있는 구조이다. 이에 따라 공정가스의 정제 및 회수 시스템을 적용시키기 위한 예비실험으로써 수분의 냉각 및 미세먼진 집진 기술이 결합된 가스정제 시스템을 구성하여 모사가스의 유속, 온도 및 상대습도에 따른 수분의 냉각효율과 분진 제거효율을 고찰해보았다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험장치

집진용 싸이클론은 선행연구자들의 결과를 근거로 구조가 간단하고 가장 범용적으로 사용하고 있는 접선유입식을 선택하였다 [7]. 시험용 싸이클론의 사양은 원통의 지름( $D_c$ )을 기준으로 그림 1에 요약한 바와 같이 설계하였다. 싸이클론은 투명한 아크릴로 제작하였으며, ID fan(180W, MINI-H300, HWANG HAE ELECTRIC)을 이용하여 장치 전체과정의 흐름을 유도하였다.

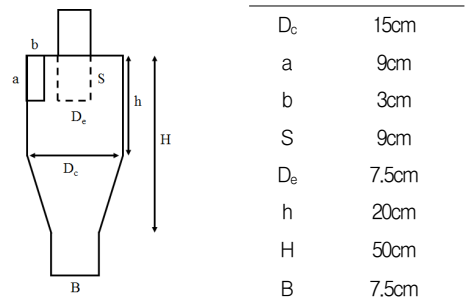


Fig. 1. Design specification of test cyclone

### 2.2 실험방법

#### 2.1.1 수분 및 분진제거 실험방법

본 연구는 쓰레기 매립지에서 발생하는 폐가스로부터 바이오가스를 제조하는 혐기성소화 공정의 수분과 미세분진을 제거하는 과정을 가정하였다. 이를 위해 약 50℃ 정도의 가스흐름 내에 수분을 주입시키기 위하여 증기

발생장치(steam generator)를 설치하였고, 그림 2에서와 같이 싸이클론 출구 쪽의 열교환기를 거쳐 가스를 재순환시키기 위하여 후단에 fan을 설치하였다.

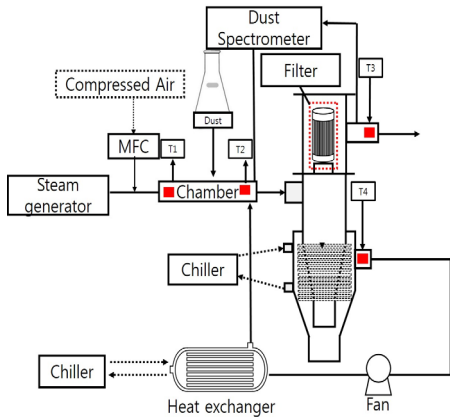


Fig. 2. Schematic diagram of experimental set-up

수분제거율을 산출하기 위하여 유량과 상대습도를 변화시키며 가스를 장치 내로 유입시켰다. 상대습도는 다기능 트랜스미터(Model:C310, KIMO Ins., France)를 이용하여 95%, 80%, 60%로 조절하면서 공급하였다. 내, 외부 열교환기 온도는  $-10^{\circ}\text{C}$ 로 고정하였고, 부분적으로 냉각된 가스를 열교환기를 거쳐 재주입하는 recycle ratio를 1로 유지하면서 실험을 진행하였다. 그림 2에 표기한 각 부분의 온도, T1, T2, T3, T4는 각각 스팀 유입 온도, recycle 후 주입되는 온도, 유출온도, recycle을 위한 fan에 의해 가스를 흡입하는 온도를 나타내었다. 한편, 입자상물질의 제거를 위한 실험은 석탄화력발전소에서 배출되는 fly ash를 시험용 분진으로 사용하였고, 분체분산기(Powder generator, HCT 4801, HCT Korea)를 이용하여 정량적으로 비산공급하였다. 싸이클론의 전단과 후단에서 입자시료를 분당 10회 포집하여 표1과 같은 사양의 Particle Counter(Model:3313, Met One, USA)을 이용하여 입자개수 기준 효율을 측정하였다. 수분제거 및 입자포집의 동시처리 효율시험을 위하여 분진 입자는 5 L/min의 유량으로 발생시켰으며, 공기는 45 L/min, 즉, 총 유체 유량을 50 L/min로 정하였다. 장치 내 흐름에서의 상대습도는  $95\pm 5\%$ 로 조성하였고, 싸이클론 내, 외부 열교환기의 온도는  $-10^{\circ}\text{C}$ 로 유지시키면서 실험을 진행하였다.

### 2.1.2 여과재 성능시험 방법

싸이클론 재순환을 이용한 가스정제 설비에 적용하기 위한 여과재 중 PM2.5를 효과적으로 포집할 수 있는 여과재를 선택하기 위하여 여과재 성능 시험장비(APSI 3160, TSI, US)를 이용하여 입자제거효율과 압력강하를 측정해보았다. 여과재는 glass fiber 재질로 제조된 것으로서 기본적인 여과재의 특성은 표 2에 요약하였다. 성능시험 조건은 표 3과 같으며, 시험입자를 NaCl로 선택하여 BS EN 1822-3 기준에 따라 10 L/min의 유량으로 공급하였다. 여과재 전, 후단의 입자 수를 측정하여 개수 기준 입자 제거효율과 여과가 진행되면서 발생하는 압력손실을 측정하였다.

Table 1. Specification of particle counter

Size Channels	0.3 ~ 10.0 $\mu\text{m}$
Flow Rate	1 cfm
Location Labels	0 to 999, appears on printout
Sample Time	1 second to 24 hours

Table 2. Specification of test filter medium

	Unit	Filter media
Basic weight	$\text{g/m}^2$	76
Thickness	mm	0.41
Max. pore diameter	$\mu\text{m}$	6
Mean flow pore	$\mu\text{m}$	1.5
Tensile strength	kN/m	1.1
Elongation	%	1.5
Ignition loss	%	6.5

Table 3. Test condition of filter medium

Condition	
Testing equipment	TSI 3160 (Fractional Efficiency Filter Tester)
Test method	BS EN 1822-3 (Testing Flat Sheet Filter Media)
Filter size	11.29 cm diameter
Test aerosol	NaCl
Flow rate	10 L/min

## 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 싸이클론 원리를 이용하여 바이오가스 제조과정에서 가스특성에 유해한 영향을 줄 수 있는 수분과 미세분진을 동시에 처리하는 구조를 설계하였다.  $50^{\circ}\text{C}$ 로 공급되는 처리대상 공정가스에 함유되어 있는

수분을 응축시키기 위하여 사이클론 내부에 냉각용 튜브를 설치하였고, 동시에 다습가스를 외부 열교환기로 재순환시키면서 추가 냉각하였다. 이러한 2단계 냉각과정으로 수분을 충분히 응축시켜 사이클론 하부에서 분리 및 제거하는 구조이다. 또한, 미세분진이 공기 중에 분산되어 있는 수분에 의해 제거되는 현상은 일반적인 배출가스 처리용 세정집진기의 원리와 유사하다. 가스의 주 흐름으로부터 고체입자를 분리해내는 관성력은 가스흐름 내의 수분에 의해 미세입자들이 서로 응집함으로써 증가되고, 동시에 원심력에 의해 강제적으로 분리되어 낙하시킬 수 있다 [8]. 그러나 미세입자의 경우, 여전히 관성집진장치의 포집효율이 낮으므로 사이클론 상부의 토출부문에 항습 소재의 여과필터를 장착함으로써 입자상 오염물질의 분리를 강화하였다.

### 3.1 필터여과재 성능고찰

공정상에서 생산되는 바이오가스를 순환시키면서 수분과 미세분진을 동시에 제거하기 위한 사이클론 장치 내에 삽입할 여과필터를 선정하고자 기본적인 여과효율과 차압을 평가하였다. 처리가스가 접선방향으로 사이클론에 유입하면서 유속에 따라 강한 선회류(vortex)가 형성된다. 이러한 선회류의 30-70%가 주 가스의 흐름에는 남아있고, 여전히 일정량의 수분이 함유되어 있으므로 필터는 소수성 재질을 사용해야 하고, 동시에 압력손실을 최소화할 수 있는 구조가 바람직하다[9]. 본 연구에서 사용한 여과재는 glass fiber 재질이며, 그림 2에 도시하였듯이 사이클론의 유출부(vortex finder)에 장착하여 초미세먼지입자를 최종적으로 포집하는 역할을 한다.

표 4에 요약한 입경별 여과효율을 살펴보면, 0.6  $\mu\text{m}$  크기까지 분석한 결과로부터 99.9999% 이상의 고효율을 보여주고 있었으며, 7.87-7.94  $\text{mmH}_2\text{O}$ 의 압력손실을 나타내었다. 이러한 낮은 압력손실 값은 주름형 필터를 가로지르는 평균 속도가 1.67  $\text{cm/s}$  인 낮은 유속으로 인한 것으로 판단된다. 복합형 사이클론 집진기(hybrid cyclone)에서 종종 발견되는 유출부 압력저항은 하부 사이클론에서의 원심력을 감소시키면서 입자분리효율을 저감하는 요인이 될 수 있다[10]. 본 연구대상 장치인 사이클론에서는 유입속도가 약 1.2  $\text{m/s}$  이하이고 원심력에 의한 하부 사이클론의 미세분진 여과효율은 낮을 것으로 판단되었으므로 유출부 여과필터의 집진이 상대적으로 중요하게 작용될 것으로 사료되었다. 그러나 수분함량이

높은 가스 흐름 내 습도가 입자의 주 흐름을 유지시키는 관성력을 저감하는 효과가 있으므로 상당량의 입자상물질이 하부에서 분리 및 포집되는 것을 관찰할 수 있었다.

### 3.2 입자제거 실험

사이클론 전단에 분체분산기로 공급되는 공기의 유량을 5-15  $\text{L/min}$ 로 변화시켜가며 분진을 정량적으로 조절하면서 비산시켜 사이클론 장치 내부로 공급하였다. 동시에 carrier gas 개념의 주 흐름을 조성하기 위한 공기 유량을 45-195  $\text{L/min}$ (유속: 0.3  $\text{m/s}$ -1.2  $\text{m/s}$ )으로 변화를 주어가며, 사이클론 장치의 유입부와 유출부에서의 분진입자 개수를 측정함으로써 포집효율을 산출하였다. 분진입자 유입농도는 분체분산기에 공급되는 공기량에 비례하였으며, 5  $\text{L/min}$ 에서 10  $\mu\text{m}$  입자의 경우, 971  $\text{개}/\text{m}^3$ 에서 1,583  $\text{개}/\text{m}^3$ 의 분포를 보였다. 15  $\text{L/min}$ 의 유량에 대하여는 6,837  $\text{개}/\text{m}^3$ 에서 7,449  $\text{개}/\text{m}^3$ 의 농도분포를 보여주었는 바, 사이클론이나 필터의 경우 분진의 농도에 따라서 포집효율이 비례적으로 증가하는 경향이 있다 [11]. 그러므로 동일한 유속에서 분진의 개수 농도가 증가할수록 관성력이 지배하는 여과장치에서는 집진효율이 증가할 것으로 예측되었다. 그러나 그림 3에서 볼 수 있듯이 본 연구에서 시험한 장치의 구조에서는 각각의 유속과 분진농도에서 서로 간의 분명한 차이를 발견하지 못하였다. 현장 운전조건에 준하여 설정한 낮은 유입속도는 원심력이 주요 추진력인 사이클론의 입자분리성에 큰 기여를 하지 못하는 것으로 판단되었다. 따라서 대부분의 입자포집효율은 사이클론 상부의 여과필터에서 결정되는 것으로 사료되었다. 다만 유속이 상대적으로 높은 조건인 1.2  $\text{m/s}$ 에서 유입농도에 따른 효율변화가 다소 발견되었다. 즉, 분진발생 유량이 5  $\text{L/min}$ 인 적은 농도의 흐름에서는 입자의 크기에 관계없이 분리효율이 99.518%로서 거의 동일하게 나타났고, 15  $\text{L/min}$ 의 높은 분진 함유농도에서도 99.622%(10  $\mu\text{m}$ )와 99.621%(2.5  $\mu\text{m}$ )로서 미세한 정도의 차이만을 보여주었다. 표 4에서 이미 고찰하였듯이 본 장치에 적용한 여과필터는 0.6  $\mu\text{m}$ 의 미세입자에 대하여 99.999% 이상의 절대포집성능을 나타내었는 바, 실제 실험장치에 장착한 분진흐름 시험에서도 2.5  $\mu\text{m}$ 의 입자에 대하여 고성능의 여과효율을 보이면서, 10  $\mu\text{m}$  크기의 분진과 차이가 거의 없음을 알 수 있다.

Table 4. Filtration efficiency and pressure drop of filter media

Particle size( $\mu\text{m}$ )	Fractional Efficiency(%)	Penetration (%)	Resistance (mmH <sub>2</sub> O)	Filter media (Thickness : 0.41mm)	
				99.999999	E [%]
0.1	99.999989	0.000011	7.943		
0.12	99.999985	0.000015	7.931		
0.2	99.999981	0.000019	7.909		
0.25	99.999987	0.000013	7.899		
0.3	99.999994	0.000006	7.896		
0.4	99.999984	0.000016	7.890		
0.5	99.999991	0.000009	7.873		
0.6	99.999973	0.000027	7.881		

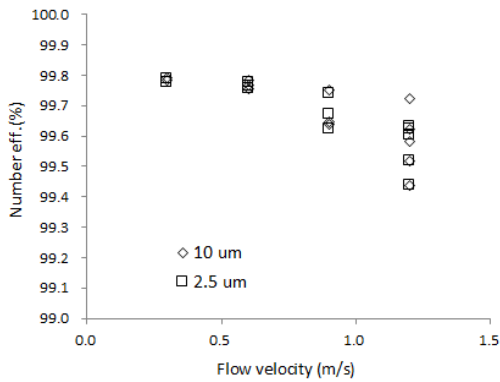


Fig. 3. Collection efficiency across the experimental set-up

### 3.3 수분제거 실험

폐기물 매립지의 침출수 처리시설의 소화조에서 주성분이 메탄인 바이오가스를 생산하는 혐기성 소화공정은 고온(45~58℃), 중온(30~38℃), 저온(20℃이하)으로 나눌 수 있으며, 통상 소화온도는 35℃ 정도의 중온소화법이 이용되는 것으로 알려져있다[12]. 실제로 국내 수도권 매립지 현장에서 생산하고 있는 바이오가스는 약 40.0℃이며, 1-5%(v/v)의 수분이 함유되어 있다. 따라서 연료가스의 발열량과 순도를 향상시키기 위하여 공정의 초기 단계에서 미량의 분진입자와 수분을 제거하는 다양한 시도가 진행되고 있다[13]. 기존의 수분제거 기기들은 냉각수와 가스가 직접 접촉하여 수분을 제거하는 원리인 습식 개방형 냉각탑은 수분을 제거하기 위해 충전재를 설치하여 수분의 증발잠열을 이용해 제거하는 것이 일반적이다. 그렇지만 개방형 구조로 인하여 공기 중의

오염물질에 의해 냉각수가 오염될 수 있고, 스케일 등의 부작용이 발생할 뿐만 아니라 냉각수 자체가 증발되는 문제점이 야기된다. 본 연구에서 설계한 분진-수분 동시 제거장치는 공정가스를 2 단계로 냉각시킴으로써 수분을 제거하는 원리로 구성되어있다. 열교환 과정을 통하여 합습가스 내의 수분을 제거하는 본 장치에서 수분제거율을 구하기 위해서는 싸이클론의 inlet과 outlet 부분의 온도, 상대습도와 절대습도 값이 필요하다. 상대습도는 공기 중에 포함되어있는 수증기의 양이 일정하더라도 온도에 따라 다른 값을 보이기 때문에 본 연구에서는 절대습도 차트를 이용하여 수분제거율을 산출하였다. 그림 1에 도시한 싸이클론 냉각장치에서 열교환 과정을 통한 수분응축은 소화공정에서 발생하는 다습 분진을 효과적으로 처리할 것으로 기대하였다. 수분에 의한 상부 필터의 눈막힘 현상을 억제하고, 궁극적으로 필터 수명을 연장할 수 있는 구조이다. 장치로 유입되는 흐름의 온도(T1)는 50℃였으며, 혼합챔버의 가스는 chiller의 열교환기를 거치게 함으로써 1차 냉각(T2)을 시도하였고, 그로 인하여 싸이클론으로 주입되는 혼합가스는 약 30℃ 정도를 유지하였다. 싸이클론으로 진입한 다습 가스는 원심력에 의해 장치의 내측면을 따라 하강하면서 cone 부위를 감싸고 있는 열교환용 tube에 의해 열을 뺏기게 된다. 튜브 내부는 chiller에서 냉각된 -10℃의 냉각수가 흐르도록 설계되어 있다. 따라서 수증기상의 수분은 응축수 형태로 싸이클론 하부의 호퍼로 낙하함으로써 주 가스흐름으로부터 분리될 수 있다. 이때 장치 중심축을 따라 상승하는 기류의 약 4%를 팬을 이용하여 강제적으로 회수하여 냉각시킨 후, 싸이클론 장치 입구의 챔버로

공급하여 초기 공정가스와 혼합시키는 구조를 구성하였다. 장치 내에서 수분함량을 낮춘 가스는 상부 여과필터를 통하여 최종 배출되는데 이때 온도(T4)는 약 20℃ 전후였다. 한편, 싸이클론 냉각장치의 수분제거율을 구하기 위해서 포화수증기량과 비교해서 현재 함유되어있는 수증기의 양을 의미하는 상대습도(%)는 온도가 증가함에 따라 가스가 팽창하면서 낮아지게 된다. 즉, 가스흐름 중에 포함되어 있는 수증기의 양이 일정하더라도 가스의 온도에 따라 차이가 나므로 본 연구에서는 절대습도로 환산한 후 수분제거율을 구하였다. 시험가스 1m<sup>3</sup> 중에 포함된 수증기의 양을 건조공기에 대한 상대적인 무게(kg/kg)로 나타낸 것으로써 온도차이가 클수록 수분제거율이 높아지게 된다.

시험가스의 주입 상대습도는 95±5%, 80±5%, 60±5%이었으며, 유량별 제거효율을 산출하여 표 5,6,7에 나타내었다. 상대습도가 95±5%와 80±5% 일 때, 유량이 75

L/min에서 수분제거율이 83.9%와 82.4%로 높았으며, 이를 기점으로 유량이 증가할수록 수분제거율은 감소하는 경향을 보였다. 이는 가스흐름이 일정한 유량까지 증가할수록 싸이클론 내부에서 냉각되어 응축되는 효과가 증가하지만, 75 L/min 이상의 유량에서는 제거율이 오히려 감소하는데, 결국 장치의 규모에 준하여 적절한 유량을 초과하면 싸이클론 내부에서의 짧은 체류시간 및 높은 수분함량으로 인해 열교환기를 통한 충분한 열 교환이 이루어지지 못하는 현상이 발생하는 것을 알 수 있다.

한편, 시험 상대습도가 가장 낮은 60±5%인 표 7에서는 실험 시 가장 낮은 유량인 25 L/min에서 수분제거율이 80.5%로 가장 높은 결과가 나왔다. 25 L/min을 제외한 유량에서의 유출부 상대습도는 평균 62.6%이지만, 25 L/min의 경우는 48.1%로 상당히 낮게 유지됨으로써 상대적인 수분 제거율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

**Table 5.** Moisture removal efficiency at 95±5% of relative humidity

Relative humidity : 95±5%									
Air flow rate (LPM)	RH <sub>in</sub> (%)	RH <sub>out</sub> (%)	AH <sub>in</sub> (kg-H <sub>2</sub> O/kg-dry air)	AH <sub>out</sub> (kg-H <sub>2</sub> O/kg-dry air)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	Removal efficiency (%)
25	94.7	92.7	0.0849	0.0146	50.7	33.6	20.9	12.8	82.7
50	94.9	90.9	0.0827	0.0146	50.1	32.4	21.4	13.4	82.2
75	93.9	95.2	0.0822	0.0131	50.2	31.3	18.9	12.8	83.9
100	94.4	99.9	0.0843	0.0163	50.6	35.4	21.6	13.8	80.5
150	94.4	93.9	0.0567	0.0143	43.5	31.5	20.5	12.1	74.6

\*RH: relative humidity, AH: absolute humidity

**Table 6.** Moisture removal efficiency at 80±5% of relative humidity

Relative humidity : 80±5%									
Air flow rate (LPM)	RH <sub>in</sub> (%)	RH <sub>out</sub> (%)	AH <sub>in</sub> (kg-H <sub>2</sub> O/kg-dry air)	AH <sub>out</sub> (kg-H <sub>2</sub> O/kg-dry air)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	Removal efficiency (%)
25	82.3	82.9	0.0724	0.0133	50.6	32.4	21.4	14.3	81.5
50	82.6	92.1	0.0733	0.0148	50.8	32.0	21.4	13.3	79.7
75	80.0	96.6	0.0780	0.0135	52.5	32.5	19.2	13.1	82.4
100	82.1	93.3	0.0715	0.0144	50.4	36.5	20.7	12.1	79.8
150	81.5	83.0	0.0483	0.0125	43.5	31.1	20.4	11.7	74.0

**Table 7.** Moisture removal efficiency at 60±5% of relative humidity

Relative humidity : 60±5%									
Air flow rate (LPM)	RH <sub>in</sub> (%)	RH <sub>out</sub> (%)	AH <sub>in</sub> (kg-H <sub>2</sub> O/kg-dry air)	AH <sub>out</sub> (kg-H <sub>2</sub> O/kg-dry air)	T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	T4 (°C)	Removal efficiency (%)
25	61.5	48.1	0.0499	0.0097	49.6	26.5	22.4	13.8	80.5
50	62.0	68.1	0.0545	0.0120	51.0	27.0	23.0	13.6	77.7
75	61.2	63.1	0.0464	0.0119	48.4	26.3	24.1	13.9	74.1
100	61.4	62.3	0.0485	0.0125	48.0	27.4	25.1	14.4	73.2
150	61.0	56.6	0.0298	0.0101	40.4	24.0	23.2	11.6	65.8

### 3.4 입자 및 수분 동시제거 실험

바이오가스 제조공정에서 발생하는 수분 및 미세분진을 효과적으로 제거하기 위한 공정변수 실험을 실시하였다. 안정적인고, 상대적인 평가를 위해 앞서 실시한 필터와 싸이클론에서의 입자포집성능과 냉각을 통한 수분응축실험으로부터 가장 효과적이었던 조건으로 실험하였다. 즉, 분진을 함유한 다습가스의 유량을 50 L/min(유속, 0.3 m/s)으로 일정하게 고정하고, 이때의 상대습도를 95±5%로 조절하였다. 수분제거 실험에 있어서 실제로는 유량이 75 L/min일 때, 상대적으로 제거효율이 높았으나 효율 면에서 차이가 크지 않았고, 분진입자 제거율이 높았던 50 L/min을 시험조건으로 선정하였다. 이때 장치 전체를 가로지르는 압력강하는 10 pa을 나타냈다. 표 8의 시험결과에서 볼 수 있듯이 10 μm 크기의 입자포집효율은 99.71%였고, 2.5 μm의 분진입자에 대한 개수농도 기준 평균 제거효율은 99.67%이었으며, 수분제거율은 평균 70.86%로 측정되었다. 수분이 많은 가스흐름의 분위기에서 미세입자들이 상호응집하는 현상이 일부 발생할 것으로 추측되며, 이로 인한 입자분리효과가 높을 것으로 기대하였다. 그러나 건조가스흐름에서의 입자포집효율이 99.784%(10 μm)와 99.785%(2.5 μm)이었던 결과에 비하여 다습가스에서의 입자포집효율은 오히려 약간 낮은 값으로 얻어졌다. 입자 성장에 따른 개수농도의 감소는 궁극적으로 포집효율산정을 낮추는 효과가 있기 때문인 것으로 추측된다.

Table 8. Simultaneous removal of moisture and particle

	Inlet	Outlet	Removal efficiency
Particle/10 μm (Particle/L)	1,416,206	4,107	99.71%
Particle/2.5 μm (Particle/L)	2,765,582	8,946	99.67%
Moisture (kg-H <sub>2</sub> O/kg-dry air)	0.084	0.025	70.86%

한편, 95±5%의 습도조건에서 82.2%의 수분감축 효과를 나타냈던 결과에 비하여 분진입자가 함유된 가스흐름에서는 10% 이상 효율이 감소하였다. 이는 싸이클론 하부에서의 외부 냉각기에 의한 열교환 시, 분진에 의한 열전달 방해요소로 인한 것으로 판단된다. 즉, 고체입자의 존재는 증기상 수분이 냉각되어 응축할 때 싸이클론 외부에서 공급 되어 냉각열의 감소를 야기할 수 있다. 유

사한 상황이 열교환기를 거치는 가스순환에 의한 냉각과정에서도 발생할 것으로 사료된다. 결국 분진입자의 농도에 따라 이러한 열손실들이 수증기의 응축효율을 저해할 수 있다 [14].

## 4. 결론

매립지의 유기성폐기물로부터 바이오가스를 생산하는 혐기성 공정에서 발생하는 다습한 분진가스 흐름에 함유되어 있는 다량의 수분을 싸이클론을 이용하여 냉각시켜 수분을 제거하고, 원심력과 여과필터를 통해 미세분진을 포집하는 장치를 고안하여 처리성능을 고찰하였다.

본 연구에서 사용한 역기류식 싸이클론은 내부에 강한 선회류를 구성함으로써 입자분리와 열전달 효과가 우수하였는 바, 실제현장에서 빈번하게 발생하는 수분함량을 적용하며, 2.5 μm 크기의 분진에 초점을 두어 관찰한 결과, 수분은 평균 70.86%, 분진은 평균 99.67%의 제거 결과를 얻었다. 이러한 장치는 바이오가스 제조를 위한 공정가스에 적용할 때 수분과 미세 분진을 동시에 제거하는 방식으로써 운전비용의 절감효과가 예상된다. 그러나 본 실험에서는 수분 및 입자제거 측면에서 높은 효율을 보여주었으나, 플랜트 및 실제 공정에서 배출되는 가스는 다양한 입자크기, 부식성, 함수량 등이 상이하므로, 수분 및 입자 동시제거 시스템을 활용하기 위해서는 공정가스의 부식성, 함수량 등을 고려하여야 한다.

## References

- [1] SUDOKWON Landfill Site Management Corp., "Adsorption Characteristics of Adsorbents for Purification of Sulfur Compounds and Siloxane in Biogas", pp. 20-21, Feb, 2013.
- [2] G.J Kim, L.H Kim, "Analysis of cause of engine failure during power generation using biogas in sewage treatment plant", The Journal of Energy Engineering, vol. 25, no. 4, pp. 13-29, Dec, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2016.25.4.013>
- [3] Beatrice Castellani, Federico Rossi, Mirko Filipponi, Andrea Nicolini, "Hydrate-based removal of carbon dioxide and hydrogen sulphide from biogas mixtures : Experimental investigation and energy evaluations", The Journal of Biomass and Bioenergy, Vol. 70, pp. 330-338, Nov, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.026>
- [4] Tower, P., Wetzel, J, "Removing siloxanes from a gas

stream using a mineral based adsorption media”. Patent. US20060000352 A1, Jan, 2006.

- [5] K.S Kim, “Analysis of flow characteristics and particles behavior of cyclone particle separator”, Graduate School of Education Kongju National University, Dec, 2000
- [6] Miles L. Croom, “Filter Dust Collectors - Design and Application”, McGraw-Hill, Inc. US, Mar, 1994
- [7] David Lelth, Dilip Mehta, “Cyclone performance and design”, Atmospheric Environment Pergamon Press 1973, vol. 7, pp. 527-549, Printed in Great Britain, 1972.
- [8] S.H Kang, H.G An, P.J Ryu. “Dust Colection Technology; Theory and Practice”, Yeungnam University Press, 2004
- [9] S.K Hong, “A study on development of high efficient multi-precipitator combined with the principle of cyclone, baffle and bag filter”, Graduate School of Environmental Engineering of Hanseo University, 2013.
- [10] Y.O Park, “Cybag filter”, The magazine of the Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, vol. 36, no. 12, pp. 4-12, 2007.
- [11] Yan J. Boehm R. Yang H, “Handbook of clean energy system”, Wiley, pp. 1670-1675, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118991978>
- [12] Rehm, H. J. G. Reed, A. Phler, P. J. W. Stadler. “Biotechnology”, vol. 11A, Environmental processes I, 2nd ed. New York, Wiley, 2000.
- [13] Gabriela Soreanu, Michel Be'land, Patricia Falletta, Kara Edmonson, Lewina Svoboda, Mohamad Al-Jamal and Peter Seto, “Approaches concerning siloxane removal from biogas - A review”, Canadian biosystems engineering, vol. 53, 8.1 - 8.18, 2011.
- [14] J.H Ku, H.H Cho, J.H Koo, S.G Yoon, “Heat transfer characteristics of liquid-solid suspension flow in a horizontal pipe”, KSME International Journal, vol. 14, no. 10, pp. 1159-1167, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03185070>

**김 주 회(Ju-Hoe Kim)**

[준회원]



- 2015년 2월 : 강원대학교 건설공학부 환경공학과 (공학사)
- 2016년 9월~현재 : 경희대학교 일반대학원 환경응용과학과(공학석사)

<관심분야>  
환경/대기질관리

**조 우 진(Woo-Jin Jo)**

[준회원]



- 2011년 2월 : 한국산업기술대학교 생명화학공학과 (생명화학 학사)
- 2012년 2월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 연구원

<관심분야>  
화학공학

**최 영 태(Choi-Young Tai)**

[정회원]



- 1991년 2월 : 한국과학기술원 화학공학 (화학공학박사)
- 1988년 8월 ~ 현재 : 한국산업인력관리공단 화공기술사
- 1982년 5월 ~ 1999년 12월 : 삼성중공업(주) 수석연구원
- 2000년 7월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원

<관심분야>  
화학공학

**조 영 민(Young-Min Jo)**

[정회원]



- 1984년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학사)
- 1986년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 1997년 5월 : 뉴사우스웨일즈 대학교 화학공학과 (공학박사)
- 1998년 3월 ~ 현재 : 경희대학교 환경공학과 교수

<관심분야>  
대기오염제어



김 상 범(Sang-Bum Kim)

[정회원]



- 1990년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 고려대학교 화학공학과 (공학박사)
- 2004년 1월 ~ 현재 : 한국생산기술연구원 수석연구원

<관심분야>

대기환경, 에어로졸