



공 학 석 사 학 위 논 문

# Jet Loop Reactor에서 Struvite 결정화 및 CO<sub>2</sub> 흡수 특성



부경대학교대학원

지구환경시스템과학부 환경공학전공

강 대 엽

# 강대엽의 공학석사 학위논문을 인준함.

2015년 8월 27일



위원장 공학박사 여석준 (인)

- 위 원 공학박사 이 병 헌 (인)
- 위 원 공학박사 이제근 (인)

목 차i
List of Tablesiii
List of Figuresv
Abstract ······ viii
제1장서론]
제 2 장 이론적 배경
21 Jet loop reactor
2.1.2 펀더 ···································
2.2 Jet loop fluidized bed reactor
2.2.1 구조
2.2.2 특성
제 3 장 Jet Loop Fluidized Bed Reactor에서
Struvite 생성에 관한 층매질의 영향
3.1 서론 ···································
3.2 실험장치 및 방법
3.3 결과 및 고찰
3.3.1 액체순환유량 및 기체유입유량에 따른 유동층의 영향
3.3.2 층매질 충진량에 따른 유동층의 영향
3.3.3 Aeration에 따른 pH 상승27

목 차

- i -

3.4 결론	
--------	--

제 4 장 연속식 Jet Loop Reactor에서 CO2를 이용한
알칼리 폐수 중화36
4.1 서론 ···································
4.2 실험장치 및 방법
4.3 결과 및 고찰
4.3.1 Operating mode for start-up42
4.3.2 QL 및 QG 변화에 따른 outlet solution pH 변화
4.3.3 QL 및 QG 변화에 따른 CO2 제거율
4.3.4 Outlet solution pH 변화에 따른 CO <sub>2</sub> 제거율52
4.4 결론
제 5 장 결 론
A LI DI M

### List of Tables

Table 1. Major design parameters of jet loop reactor
Table 2. Optimum design parameters of jet loop reactor7
Table 3. Concentration of synthetic wastewater20
Table 4. Operating conditions of jet loop fluidized bed reactor21
Table 5. Characteristics of the alkaline wastewater and synthetic wastewater
used in the experiment40
Table 6. Operation parameters used in the experiment41
Table 7. Outlet solution $pH$ and $CO_2$ removal efficiency with respect to
operating parameters54



### List of Figures

Fig.	1	General jet loop reactor5				
Fig.	2	2 Principle of jet loop reactor with interal circulation9				
Fig.	3	3 Jet loop fluidized bed reactor. 11				
Fig.	4	4 Improved bottom of jet loop fluidized bed reactor				
Fig.	5	Schematic of the experimental apparatus used in this study19				
Fig.	6	Effect of Gas flowrate on height of fluidized bed24				
Fig.	7	Effect of amount of fluidized particles on height of fluidized bed				
Fig.	8	pH change with respect to the aeration time. $\cdots 27$				
Fig.	9	Effect of the gas flow rate on the pH change29				
Fig.	1(	) T-P removal efficiencies with respect to the operating time				
Fig.	11	NH <sub>4</sub> -N removal efficiencies with respect to the operating time				
Fig.	12	2 Schematic diagram of experimental apparatus uesd in the study				
Fig.	13	3 Operating mode for start-up42				
Fig.	14	4 Effect of the Q <sub>G</sub> on outlet solution pH45				
Fig.	15	5 Effect of the Q <sub>L</sub> on outlet solution pH46				
Fig.	16	5 Effect of the $Q_L/Q_G$ on outlet solution pH47				
Fig.	17	7 Effect of the $Q_G$ on $CO_2$ mole fraction at outlet				
Fig.	18	$3~Effect$ of the $Q_L$ on $CO_2$ removal efficiency. $\cdots \cdots 51$				
Fig.	19	$\Theta$ Effect of the outlet solution pH on CO <sub>2</sub> removal efficiency				
		a Li a				

# Study on the Characteristics of Struvite Crystallization and $CO_2$ Absorption in Jet Loop Reactors

#### Dae-Yeop Kang

Division of Earth Environmental System Sciences, Major of Environmental Engineering, The Graduate School, Pukyong National University

#### Abstract

A semi-batch jet loop fluidized bed reactor (JLFBR) was used as a crystallization reactor to remove nitrogen and phosphorus from synthetic wastewater through struvite crystallization. The reactor performance obtained in the JLFBR was compared with that in a same-size jet loop reactor (JLR). The time required to increase the initial pH of the synthetic wastewater from 7.3 to 8.0 by aeration in the JLFBR was shorter than in the JLR. Moreover the removal rates of ammonium nitrogen (NH<sub>4</sub>-N) and total phosphorus (T-P) were faster in the JLFBR. This may be due to the enhanced turbulent intensity that promoted struvite formation, as well by the fluidized particles in the JLFBR.

#### 제 1 장 서 론

하·폐수 중의 N 및 P 성분을 제거하기 위해 결정화 방법을 이용하게 되면, 폐수중의 T-N 과 T-P의 농도를 동시에 저감시킬 수 있다. 이로 인해 생물학 적 공법에 가해지는 부하를 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 발생하는 슬러지 양도 저감 시킬 수 있다(*Doyle and Parsons*, 2002). 또한 결정화된 struvite는 지효성 비료로서 재사용이 가능하여, struvite의 상업적 이용 가능성이 기대되고 있다 (*Munch and Barr*, 2001). 이러한 관점에서 일부 연구자들에 의해 하·폐수 중의 T-N과 T-P의 동시 제거 방안으로 struvite 결정화를 이용한 N 과 P 제거에 대한 연구가 진행된 바 있다(*Warmadewanthi and Liu*, 2009).

Struvite 결정화와 관련된 연구에서는 결정화 반응기로 대부분 유동층 반응 기를 이용하여 왔다. 유동층 반응기를 struvite 결정화를 위해 적용할 경우, 사 용된 유동화 매질(fluidized particles)에 의해 핵 성장 속도가 증진되어 struvite 결정화 속도가 증진 된다고 보고된 바 있다(*Battistoni et al.*, 2005). 또한 struvite seed를 유동화 매질(fluidized particles)로 사용할 경우 순도 높은 struvite 결정을 얻을 수 있다고 보고된 바 있다(*Kurt et al.*, 2000). 그러나 유 동층 반응기를 이용한 struvite 결정화 공정에서는 하·폐수의 pH를 최적의 pH 인 8.5~9.5로 조절하기 위해 별도의 약품을 주입해 왔다(*Corre et al.*, 2007).

Struvite 결정화 반응 시 pH 조절에 필요한 약품 비 절감을 위해 Ohlinger et al.(2000), Fattah et al.(2008) 은 외부에 aeration을 위한 별도의 반응조를 설치하여 폐수 중의 용존 CO<sub>2</sub>를 탈기시켜 pH를 상승시키는 연구를 수행한 바 있다. 이들 연구에 의하면 용존 CO<sub>2</sub> 탈기에 의해 pH가 상승될 뿐만 아니라 struvite 결정도 더 크게 성장된다고 보고하고 있다. 그러므로 struvite 결정화 반응에 소요되는 약품 비를 줄이기 위해서는 CO<sub>2</sub> stripping 공정의 추가가 필 요할 것으로 판단된다. 그러나 이들 연구에 따르면, CO<sub>2</sub> stripping에 의한 pH

- 1 -

상승에 의해 약품 비는 저감되지만, aeration을 위해 결정화 반응기의 외부에 별도의 반응기를 추가함에 따라 설치비용이 늘어나는 문제점이 있다.

그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위해 Cha et al.(2013)에 의해 jet loop reactor를 이용한 struvite 결정화 연구가 진행 된 바 있다. Jet loop reactor는 draft tube 내부에 설치된 이유체 노즐(two-fluid nozzle)로 인해 버블의 크기가 미세하게 형성된다. 그 결과, 기-액 접촉면적을 증가시켜 높은 물질 전달율을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 이유체 흐름(two-fluid flow)에 의해 높은 난류 강 도를 갖는다는 장점이 있다(*Chriastel and Fadavi*, 2006). 또한 이유체 노즐 (two-fluid nozzle)에 의해 미세기포로 aeration을 할 수 있고, 한 반응기에서 struvite 결정화가 동시에 일어나기 때문에 별도의 반응기를 설치할 필요가 없 다. 따라서 jet loop reactor를 struvite 결정화 반응기로 사용하게 되면, 폐수의 pH 상승을 위해 주입되는 약품비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, NH<sub>3</sub> 탈기에 의해 N 성분을 추가로 제거할 수 있다고 보고된 바 있다(*Cha et al.*, 2013).

한편 struvite 는 homogeneous nucleation 와 heterogeneous nucleation 과정 에 의해 결정핵이 생성되는데, heterogeneous nucleation에 의한 결정핵 생성 속도가 homogeneous nucleation에 의한 결정핵 생성 속도보다 빠르다고 보고 된 바 있다(*Hanhoum et al.*, 2013). 그러므로 jet loop reactor에 층매질을 주입 한 jet loop fluidized bed reactor를 이용하게 되면, struvite 결정화 반응에서 층매질이 heterogeneous nucleation에 필요한 site를 제공하게 되며, 그 결과 struvite 결정화 핵 생성 속도가 증진된다. 또한 jet loop fluidized bed reactor 에서는 층매질로 인해 난류 강도가 증가되므로 jet loop reactor 에 비해 struvite 결정의 성장속도를 증가시킬 뿐만 아니라, CO<sub>2</sub> 탈기속도가 증가되어 pH 상승속도를 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 지금까지 jet loop fluidized bed reactor를 이용하여 struvite 결정화 연구를 수행한 사례는 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 struvite 결정화와 aeration을 동시에 수행할 수 있는 jet loop fluidized bed reactor 에서의 struvite 결정화 성능을 검토하고자 하였 다. 또한 jet loop fluidized bed reactor 와 동일한 규모의 jet loop reactor에서 의 struvite 결정화 성능을 비교·검토하고자 하였다. 이를 위해 유입가스유량, 액체순환유량 등의 종업조건을 변화시키면서 pH 변화, T-N 및 T-P 성분의 제 거율을 살펴보았다.



### 제 2 장 이론적 배경

#### 2.1 Jet loop reactor

#### 2.1.1 구조

Jet loop reactor는 내부에 유도관을 갖는 실린더형 반응조로 전체 모양은 tower형이다. 크게 반응조(jet loop reactor), 유도관(draft tube), 기-액 분리조, 이유체 노즐의 4부분으로 구성된다(강. 2001).

일반적으로 jet loop reactor 는 Fig. 1과 같이 up flow 와 down flow의 두 가지 형태로 나뉜다.

반응조는 중앙에 위치하며, 유도관은 반응조의 중앙에 위치하며 반응조의 형태와 같은 실린더형으로 제작 되었다. 또한 jet loop reactor 의 특징인 이유 체 노즐은 원추형으로 중심에 공기가 유입되는 가스유입관이 있고, 그 바깥으 로 동심원을 이루며 액체유입관이 있다. 따라서 액체유입관을 통해 액체가 제 트노즐로 분사될 때 가스유입관으로 통해 동시에 기체가 유입됨으로써 액체 제트에 생성되는 것이 특정이다.

Jet loop reactor 제작 시 중요한 설계인자에는 유도관의 내경(D<sub>e</sub>), 반응조 내 경(D), 유도관 길이(L<sub>e</sub>), 유도관의 두께(S<sub>e</sub>)등이 있다. Burkhard Lohrengel (1990)에 의해 최적의 설계 인자의 D<sub>e</sub>/D, L<sub>e</sub>/D, D/S<sub>e</sub> 값은 각각 0.5, 6.0, 33.3 의 비율로 제작 되었으며 Table. 1에 나타내었다. 또한 이번 연구에 사용된 jet loop reactor 의 최적 설계인자를 Table. 2에 나타내었다.

- 4 -



	Kang	Yildiz	Velan	Prasad	This study	
Н	800	1410	1400	1400(1200)	800	
D	100	150	192	192	100	
t	5				5	
Hs		X	Х	Х	300	
Ds		X	Х	Х	200	
ts	/	X	x AL	X	5	
H <sub>d</sub>	600	1000	1000	1000	600	
Dd	50	70	64,74,84,94, 112,127	64,74,84, 94,112	49	
t <sub>d</sub>	3	3~4			3	
D <sub>LN</sub>	7	12	10,12,14,16	12	7	
t <sub>LN</sub>	1	1		1)	3	
Doln		12	CH O	12	7	
D <sub>GN</sub>	2	6.4	3.3, 5.0	2.75	2	
t <sub>GN</sub>	0.5	1		0.125	0.5	
Ho <sub>GN</sub>	8	12			8	
H <sub>T</sub>		70	100,150,200	200	120	
H <sub>B</sub>		140			50	
H <sub>h</sub>		70		70	25	

Table 1. Major design parameters of jet loop reactor

X : 해당사항없음

구분	Lohrengel	This study
유도관의 길이/반응조의 내경	6	6
반응조의 내경/유도관의 내경	2	2.04
액체 분사면적/공기 분사면적	10	10

Table 2. Optimum design parameters of jet loop reactor



#### 2.1.2 원리

본 연구에서 사용한 jet loop reactor 의 구조를 Fig. 2.에 나타내었다. Jet loop reactor의 원리는 다음과 같다. 먼저 노즐의 토출부에서는 기체유도관을 통해 유입된 기체와 액체유도관을 통해 유입된 액체의 혼합이 이루어지고 미 세기포가 형성되어 이유체 노즐을 통해 분사된다. 노즐로부터 분사된 이유체 는 draft tube의 내부를 통해 하향류로 흐르고, annular space를 상향류로 통 과한다. 이 과정에서 draft tube 외벽 쪽에 근접한 stream line을 타고 상승한 기체와 액체의 일부는 노즐에서 분사되는 유속에 의해 다시 draft tube 내부로 재순환된다. 그러나 상향류의 유체 중 반응조 외벽에 가까운 유체(즉, draft tube 외벽으로부터 먼 쪽 유체)는 재순환되지 않고 기-액 분리조로 흘러 들어 간다. 기-액 분리조로 흘러 들어간 유체 중 기체는 분리되어 상부 가스유출밸 브를 통해 배출되고, 액체는 순환펌프를 통해 반응기 외부로 순환되어 다시 이유체 노즐로 분사된다(손, 2013).

CH OL IN

47 70



Fig. 2 Principle of jet loop reactor with interal circulation.

#### 2.2 Jet loop fluidized bed reactor

#### 2.2.1 구조

본 연구에서 사용한 jet loop fluidized bed reactor 의 구조를 Fig. 3.에 나타 내었다. Jet loop fluidized bed reactor는 jet loop reactor의 바닥 및 기-액 분 리조의 구조를 변경하여 제작 하였다.

Jet loop fluidized bed reactor 는 Fig. 2에서 사용한 jet loop reactor에 층 매질(주문진사, 입경 : 1.18 ~ 2 mm)을 충진하여 유동층이 형성될 수 있도록 구조를 개선한 것으로, 기존의 jet loop crystallizer의 기-액 분리조와는 달리 내경 0.10 m인 반응관에서 내경 0.3 m인 기-액 분리조까지 경사를 두어 내경 이 점진적으로 커지게 해 상향류로 흐르는 유체의 유속을 감소시켜 유동층이 보다 잘 형성될 수 있도록 개선하였다. 또한, Fig. 4와 같이 바닥은 원뿔모양으로 파여있던 기존의 jet loop reactor에서 바닥의 중앙에서부터 5 cm까지 원 뿔이 솟아 있는 형태(단면 = W 형)로 개선하여 층 매질 중 일부가 이유체에 의하여 유동하지 않고 쌓여있는 것을 방지하도록 하였다. 그 외의 상세한 구 조와 치수는 손(2013)의 논문을 참고하여 전체높이 1 m, 유효용적 18 L 가 되 도록 아크릴로 제작하였다.



Fig. 3 Jet loop fluidized bed reactor.



Fig. 4 Improved bottom of jet loop fluidized bed reactor.



#### 2.2.2 특성

Struvite 는 homogeneous nucleation 와 heterogeneous nucleation 과정에 의 해 결정핵이 생성되는데, heterogeneous nucleation에 의한 결정핵 생성 속도 가 homogeneous nucleation에 의한 결정핵 생성 속도보다 빠르다고 보고된 바 있다(Hanhoum et al., 2013). 그러므로 jet loop reactor에 층매질을 주입한 jet loop fluidized bed reactor를 이용하게 되면, struvite 결정화 반응에서 층매질 이 heterogeneous nucleation에 필요한 site를 제공하게 되며, 그 결과 struvite 결정화 핵 생성 속도가 증진된다. 또한 jet loop fluidized bed reactor에서는 층매질로 인해 난류 강도가 증가되므로 jet loop reactor 에 비해 struvite 결정 의 성장속도를 증가시킬 뿐만 아니라, CO<sub>2</sub> 탈기속도가 증가되어 pH 상승속도 를 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다.



## 제 3 장 Jet Loop Fluidized Bed Reactor에서 Struvite 생성에 관한 층매질의 영향

#### 3.1 서론

하·폐수 중의 N 및 P 성분을 제거하기 위해 결정화 방법을 이용하게 되면, 폐수중의 T-N 과 T-P의 농도를 동시에 저감시킬 수 있다. 이로 인해 생물학 적 공법에 가해지는 부하를 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 발생하는 슬러지 양도 저감 시킬 수 있다(*Doyle and Parsons*, 2002). 또한 결정화된 struvite는 지효성 비료로서 재사용이 가능하여, struvite의 상업적 이용 가능성이 기대되고 있다 (*Munch and Barr*, 2001). 이러한 관점에서 일부 연구자들에 의해 하·폐수 중의 T-N과 T-P의 동시 제거 방안으로 struvite 결정화를 이용한 N 과 P 제거에 대한 연구가 진행된 바 있다(*Warmadewanthi and Liu*, 2009).

Struvite 결정화와 관련된 연구에서는 결정화 반응기로 대부분 유동층 반응 기를 이용하여 왔다. 유동층 반응기를 struvite 결정화를 위해 적용할 경우, 사 용된 유동화 매질(fluidized particles)에 의해 핵 성장 속도가 증진되어 struvite 결정화 속도가 증진 된다고 보고된 바 있다(*Battistoni et al.*, 2005). 또한 struvite seed를 유동화 매질(fluidized particles)로 사용할 경우 순도 높은 struvite 결정을 얻을 수 있다고 보고된 바 있다(*Kurt et al.*, 2000). 그러나 유 동층 반응기를 이용한 struvite 결정화 공정에서는 하·폐수의 pH를 최적의 pH 인 8.5~9.5로 조절하기 위해 별도의 약품을 주입해 왔다(*Corre et al.*, 2007).

Struvite 결정화 반응 시 pH 조절에 필요한 약품 비 절감을 위해 Ohlinger et al.(2000), Fattah et al.(2008) 은 외부에 aeration을 위한 별도의 반응조를 설치하여 폐수 중의 용존 CO<sub>2</sub>를 탈기시켜 pH를 상승시키는 연구를 수행한 바 있다. 이들 연구에 의하면 용존 CO<sub>2</sub> 탈기에 의해 pH가 상승될 뿐만 아니라 struvite 결정도 더 크게 성장된다고 보고하고 있다. 그러므로 struvite 결정화 반응에 소요되는 약품 비를 줄이기 위해서는 CO<sub>2</sub> stripping 공정의 추가가 필 요할 것으로 판단된다. 그러나 이들 연구에 따르면, CO<sub>2</sub> stripping에 의한 pH 상승에 의해 약품 비는 저감되지만, aeration을 위해 결정화 반응기의 외부에 별도의 반응기를 추가함에 따라 설치비용이 늘어나는 문제점이 있다.

그러므로 이러한 문제점을 해결하기 위해 Cha et al.(2013)에 의해 jet loop reactor를 이용한 struvite 결정화 연구가 진행 된 바 있다. Jet loop reactor는 draft tube 내부에 설치된 이유체 노즐(two-fluid nozzle)로 인해 버블의 크기가 미세하게 형성된다. 그 결과, 기-액 접촉면적을 증가시켜 높은 물질 전달율을 얻을 수 있을 뿐만 아니라, 이유체 흐름(two-fluid flow)에 의해 높은 난류 강 도를 갖는다는 장점이 있다(*Chriastel and Fadavi*, 2006). 또한 이유체 노즐 (two-fluid nozzle)에 의해 미세기포로 aeration을 할 수 있고, 한 반응기에서 struvite 결정화가 동시에 일어나기 때문에 별도의 반응기를 설치할 필요가 없 다. 따라서 jet loop reactor를 struvite 결정화 반응기로 사용하게 되면, 폐수의 pH 상승을 위해 주입되는 약품비를 절감할 수 있을 뿐만 아니라, NH<sub>3</sub> 탈기에 의해 N 성분을 추가로 제거할 수 있다고 보고된 바 있다(*Cha et al.*, 2013).

한편 struvite 는 homogeneous nucleation 와 heterogeneous nucleation 과정 에 의해 결정핵이 생성되는데, heterogeneous nucleation에 의한 결정핵 생성 속도가 homogeneous nucleation에 의한 결정핵 생성 속도보다 빠르다고 보고 된 바 있다(*Hanhoum et al.*, 2013). 그러므로 jet loop reactor에 층매질을 주입 한 jet loop fluidized bed reactor를 이용하게 되면, struvite 결정화 반응에서 층매질이 heterogeneous nucleation에 필요한 site를 제공하게 되며, 그 결과 struvite 결정화 핵 생성 속도가 증진된다. 또한 jet loop fluidized bed reactor

- 15 -

에서는 층매질로 인해 난류 강도가 증가되므로 jet loop reactor 에 비해 struvite 결정의 성장속도를 증가시킬 뿐만 아니라, CO<sub>2</sub> 탈기속도가 증가되어 pH 상승속도를 증가시킬 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 지금까지 jet loop fluidized bed reactor를 이용하여 struvite 결정화 연구를 수행한 사례는 없는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서는 struvite 결정화와 aeration을 동시에 수행할 수 있는 jet loop fluidized bed reactor 에서의 struvite 결정화 성능을 검토하고자 하였 다. 또한 jet loop fluidized bed reactor 와 동일한 규모의 jet loop reactor에서 의 struvite 결정화 성능을 비교·검토하고자 하였다. 이를 위해 유입가스유량, 액체순환유량 등의 종업조건을 변화시키면서 pH 변화, T-N 및 T-P 성분의 제 거율을 살펴보았다.



#### 3.2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 jet loop reactor에 층매질을 주입한 lab-scale의 jet loop fluidized bed reactor 시스템을 이용하여 struvite 결정화 성능을 검토하였다. 시스템은 크게 저장조(storage tank), jet loop fluidized bed reactor, 정량펌프 (volimetric pump), 순환펌프(circulation pump)로 구성되어 있으며, 시스템 구성 도를 Fig. 5에 나타내었다. 실험에 사용된 jet loop fluidized bed reactor는 하 향류 형태의 원통형 구조(downstream circular cylinder shape)로 반응관 (reaction tube), draft tube, 기-액 분리조(gas-liquid separation tank), 이유체 노즐(two-fluid nozzle)로 구성되어 있다. Jet loop fluidized bed reactor 는 Son et al.,(2013)의 문헌을 참고하여 전체 높이 1 m, 유효용적(effective volume) 18L 가 되도록 아크릴로 제작하였다. 기존의 jet loop reactor 의 기-액 분리조 (gas-liquid separation tank)와는 달리 내경 0.10 m 인 반응관(reaction tube)에 서 내경 0.3 m 인 기-액 분리조(gas-liquid separation tank)까지 경사를 두어 내경이 점진적으로 커지게 해 층매질이 기-액 분리조에 정체하는 현상을 방지 하였다. 또한 바닥은 원뿔모양으로 파여있던 기존의 jet loop reactor에서 바닥 의 중앙부에서부터 45° 각도로 원뿔이 솟아 있는 형태(단면 = ₩ 형)로 개선 하였다. 그래서 층매질 중 일부에 이유체에 의하여 유동하지 않고 쌓여있는 것을 방지하도록 하였다.

본 시스템의 작동원리는 다음과 같다. 먼저 정량펌프(WT600-2J, Longer Co., China)로 jet loop fluidized bed reactor에 합성폐수 18L를 채운 뒤, 순환펌프 (PM-300PM, WILO., South Korea)로 합성폐수를 이유체 노즐(two-fluid nozzle) 의 액체유도관(liquid induction tube)으로 유입(Q<sub>L,in</sub>)한다. 그리고 공기는 송풍기 (DOA-p704-AA, GAST., USA)에 의해 이유체 노즐(two-fluid nozzle)의 기체유도 관(gas induction tube)으로 유입된다. 이유체 노즐의 토출부(nozzle tip)에서는 기체유도관을 통해 유입된 공기와 액체유도관을 통해 유입된 합성폐수의 혼합

- 17 -

(Q<sub>c</sub>+Q<sub>t</sub>)이 이루어지고 미세기포가 형성되어 토출부로 분사된다. 노즐로부터 분사된 유체는 draft tube의 내부를 통해 하향류로 흐르고, 층매질이 충진되어 있는 annular space(반응관과 draft tube 사이)를 상향류로 통과한다. 이때 층 매질이 충진되어 있는 annular space 에 유체가 상향류로 흐르면서 유동층이 형성 된다. 이후 draft tube 외벽쪽에 근접한 stream line을 타고 상승한 기체 와 액체의 일부는 노즐에서 분사되는 유속에 의해 다시 draft tube 내부로 재 순환 된다. 그러나 상향류의 유체 중 반응조 외벽에 가까운 유체(즉, draft tube 외벽으로부터 먼 쪽 유체)는 재순환되지 않고 기-액 분리조로 흘러 들어 간다. 기-액 분리조로 흘러 들어간 유체 중 기체는 분리되어 상부 가스유출밸 브를 통해 배출(Q<sub>G,out</sub>)되고, 처리수는 순환펌프를 통해 반응기 외부로 순환(Q<sub>R</sub>) 되어 다시 이유체 노즐로 분사된다.

본 연구에 적용된 합성폐수는 Kim et al.,(2006)이 제시한 혐기성 소화조 상 등액 합성폐수(초기 pH 7.3)를 조제하여 사용하였다. 또한 합성폐수의 성상을 Table 3에 나타내었다. 실험은 반응기 내에 합성폐수 18L를 채운 다음, 유입가 스유량(Q<sub>G</sub>), 액체순환유량(Q<sub>L</sub>), 층매질 유무 등의 조업조건을 변화시키면서 진 행되었다. 그리고 Table 4 에 본 실험의 조업조건을 나타내었다.

Jet loop fluidized bed reactor 에 적용된 층매질은 입경 2 mm ~ 2.2 mm 의 주문진사를 이용하였으며, 700g(밀도 1.78g/cm<sup>3</sup>)를 충진 하였다.

한편 조업조건 변화에 따른 struvite 결정화 특성을 파악하기 위해 반응 시 간에 따라 pH, T-P농도, NH4-N 농도를 측정하였다. 이때, T-P 농도는 Standard methods의 아스코르빈산 혼액법, NH4-N 의 농도는 Nessler법을 이용 하여 분석하였다.



Fig. 5. Schematic of the experimental apparatus used in this study

- 1 : Storage tank
- 2 : Valve
- 4 : Check valve
- 5 : Liquid flowmeter
- 7 : Two-fluid nozzle
- 10 : Gas flowmeter
- 8 : Jet loop fluidized
- bed reactor
- 3 : Metering pump
- 6 : Circulation pump
- 9 : Draft tube

- 19 -

Component	Concentration(mg/L)	
Glucise	1,000	
Poly Peptone	1,200	
NH4Cl	1,600	
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	140	
FeCl <sub>3</sub> ·6H <sub>2</sub> O	8	
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	680	
NaHCO <sub>3</sub>	1,500	
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	3600	
OVAU A A A A A A	ERSI71	

Table 3. Concentration of synthetic wastewater

Operating parameters	Conditions		
Method of pH increment	NaOH injection, NaOH injection after aeration		
Mg/P molar ratio	1.05		
Mg source	$MgCl_2$		
Aeration	With or without aeration after adding Mg source		
Gas flow rate(Q <sub>G</sub> )	1, 1.5, 2, 2.5, 3 L/min		
Liquid circulation flow $rate(Q_L)$	18 L/min		
pH	8.5		
A a ch or m			

Table 4. Operating conditions of jet loop fluidized bed reactor

#### 3.3 결과 및 고찰

#### 3.3.1 액체순환유량 및 기체 유입유량에 따른 유동층의 영향

층 매질이 재순환되어 부유하거나, 기-액분리조의 상부까지 유체에 휩쓸려 상승하지 않는 적절한 액체순환유량(Q<sub>R</sub>) 및 기체유입유량(Q<sub>G</sub>) 조건을 파악하기 위하여 본 연구에서는 액체순환유량(Q<sub>R</sub>) 12 - 20 L/min의 범위에서 기체유입 유량(Q<sub>G</sub>)의 변화에 따른 유동층의 높이 변화를 측정하여, Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6의 그래프 중 유동층의 높이가 75 cm이상 일 경우에는 층 매질이 유 동층을 형성하지 않고 draft tube로 재순환되거나 일부 비산되어 펌프로 유입 되는 것을 확인 할 수 있었으며 10 cm이하인 경우는 층 매질이 유동하지 않 고 고정되어있는 상태로 반응기 바닥에 쌓여만 있기만 하는 것이다.

Fig. 6에 따르면 기체유입유량과 층 매질 주입량이 동일한 조건에서 액체순 환유량이 높을수록 형성되는 유동층의 높이는 높아지는 경향을 볼 수 있으며, 이는 액체순환유량이 높을수록 유체가 annular space를 통과할 때의 유속이 빠르기 때문인 것으로 판단된다.

또한, 층 매질 주입량이 600 g이고 액체순환유량이 20 L/min인 경우를 제외 한 액체순환유량과 층 매질 주입량이 동일한 조건일 경우에는 기체유입유량이 높을수록 형성되는 유동층의 높이는 점차 낮아지는 경향을 보인다. 이는 이유 체 노즐에서 기체와 액체가 함께 분사될 때 액체순환유량이 증가함에 따라 분 사되는 유체의 유속이 증가하고 동시에 주입되는 기체의 양이 많아짐에 따라 분사되는 방향과는 반대방향으로 상승하려는 힘이 커지기 때문인 것으로 판단 된다.

한편 Son et al.(2013)의 연구결과에 따르면 jet loop reactor에서 액체순환유 량 8 -32 L/min의 범위에서 반응기 내 유체의 난류강도가 가장 높은 구간은 16 - 24 L/min라고 보고한 바 있으며, 본 실험에서도 struvite 결정화 반응 속 도의 촉진을 위해서는 높은 난류강도를 형성 할 필요가 있다. Fig. 6의 결과 중 액체순환유량 18 L/min 조건에서 층 매질이 유동층을 형성하는 기체유입유 량은 2 L/min 일 때뿐인 것으로 확인되었다.

따라서 jet loop fluidized bed crystallizer에서 액체순환유량은 18 L/min, 기 체유입유량은 2 L/min인 경우가 최적의 조업조건인 것으로 판단된다.





Fig. 6 Effect of Gas flowrate on height of fluidized bed.

#### 3.3.2 층매질 충진량에 따른 유동층의 영향

반응기 내부에 층 매질을 유입하면 기존의 jet loop crystallizer에서 결정핵 이 생성되는 방식인 homogeneous nucleation과 동시에 층 매질을 seed로 하여 heterogeneous nucleation이 일어날 수 있으며, 접촉면적을 넓힐 수 있을 뿐만 아니라 층 매질이 유체와 함께 유동하기 때문에 반응기 내부에 더욱 높은 난 류강도가 형성된다. 이러한 이유로 본 연구에서는 기존의 jet loop crystallizer 에 층 매질을 유입하여 struvite 결정 생성속도를 촉진시키고자 jet loop fluidized bed crystallizer system에서 적절한 층 매질의 충진량을 파악할 필요 가 있다.

이를 위해 선행연구를 참고하여 액체순환유량(Q<sub>R</sub>) 18 L/min, 기체유입유량 (Q<sub>G</sub>) 2 L/min의 조건에서 실험을 진행하였으며, 층 매질의 주입양에 따라서 형 성되는 유동층의 최대높이를 측정하여 아래 Fig. 7에 나타내었다.

Fig. 7을 보면, 이유체 노즐팁이 바닥에서 부터 33 - 53 cm위에 있도록 설치 되어 있는 경우 층 매질 충진량이 증가할수록 유동화 높이는 감소하는 경향이 나타났다.

층 매질을 600 g 주입하였을 때에는 이유체 노즐이 설치된 높이와는 무관하 게 모든 경우 유동층을 형성하지 않고 일부 층 매질은 draft tube를 통하여 재 순환되어 부유하게 되며, 일부 층 매질은 비산되어 순환펌프내부로 유입되는 것을 확인할 수 있었다.

층 매질을 700 g 주입한 경우에는 모든 경우 반응관 바닥에서부터 45 - 60 cm 위쪽까지 유동층을 형성하는 것을 확인할 수 있었으며, 부유하거나 펌프에 유입되지 않았다.

층 매질을 800 g 주입한 경우에는 이유체 노즐이 33 - 38 cm에 위치한 경 우에만 반응관 바닥에서부터 45 - 55 cm 위쪽까지 유동층을 형성하였고, 이유 체 노즐이 43 cm 이상의 높이에 위치한 경우에는 층 매질이 모두 가라앉아 있는 것을 확인할 수 있었다.

따라서, 선행연구에서 액체순환유량(Q<sub>R</sub>)이 8 - 20 L/min, 기체유입유량(Q<sub>G</sub>) 0 - 5 L/min의 범위내에서 모사폐수의 탈기속도가 가장 빠른 조건으로 보고된 액체순환유량(Q<sub>R</sub>) 18 L/min, 기체유입유량(Q<sub>G</sub>) 2 L/min의 조건에서 유동층 형 성에 가장 적합한 층 매질의 주입량은 700 g인 것으로 판단된다.



Fig. 7 Effect of amount of fluidized particles on height of fluidized bed.

#### 3.3.3 Aeration에 따른 pH 상승

Jet loop fluidized bed reactor 는 jet loop reactor 에 층매질을 주압하여 유 동층을 형성시킨 장치이며, 결정화와 동시에 aeration 에 의한 CO<sub>2</sub> stripping 이 pH 상승에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다. 이를 위해 jet loop fluidized bed reactor 내에 pH 7.3 인 합성폐수를 18L 채운 다음 2L/min 유량으로 공기 를 주입하여 CO<sub>2</sub> stripping을 실시 하였다. 이후 시간에 따른 pH 변화를 살펴 보았으며, 이를 jet loop reactor 에서의 결과와 비교 하였다.



Fig. 8 pH change with respect to the aeration time.  $(Q_L = 18 \text{ L/min}, Q_G = 2 \text{ L/min})$ 

Fig. 8는 jet loop fluidized bed reactor 와 jet loop reactor 에서의 시간에 따 른 pH 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 jet loop fluidized bed reactor에서 aeration 시간이 증가할수록 pH 가 점차 상승하였다. 그리고 pH 는 8.0 까지 도달한 후 일정하게 유지 되는 것으로 나타났다. 이는 jet loop reactor 에서의 pH 변화특성과 유사하다. 이와 같이 CO<sub>2</sub> stripping 에 의해 pH 가 상승하는 이유는 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 가 함유되어 있는 폐수에 aeration을 하면 반응식 (1)과 같은 반응이 일어나기 때문이다(*Battistoni et al.*, 1997). 또한 pH 가 8.0 까지 점차 상승한 후 일정하게 유지되는 것은 일부 연구자들에 의한 연구결과 와 유사하다. 그 이유는 폐수 중에 존재하는 많은 종류의 이온에 의한 완충효 과 때문으로 여겨진다(*Cha et al.*, 2013).

# $HCO_3^- + H^+ \longrightarrow CO_2 \uparrow + H_2O \tag{1}$

한변 Fig. 8에서 보는 바와 같이 jet loop fluidized bed reactor 와 jet loop reactor에서 pH 8까지 도달하는데 걸린 시간은 각각 50 분, 58 분으로, jet loop fluidized bed reactor 에서의 소요시간이 적은 것으로 나타났다. 그 이유 는 층매질의 유동화에 의해 반응기 내부에서 난류강도가 증가함에 따라 물질 전달속도가 빨라져 CO<sub>2</sub> 탈기속도가 증진되었기 때문으로 판단된다.

한편 jet loop fluidized bed reactor에서 유입가스유량(Q<sub>G</sub>)의 변동에 따른 pH 변화를 살펴보았다. Fig. 9에 나타낸 바와 같이 모든 유입가스유량(Q<sub>G</sub>) 조건에 서 aeration time 이 증가함에 따라 합성폐수의 pH 는 8.0 까지 상승하였다. 그 이유는 앞서 설명한 것과 같이 aeration에 의해 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 CO<sub>2</sub>로 탈기되기 때문이다. 또한 유입가스유량(Q<sub>G</sub>)이 증가됨에 따라, pH 상승속도는 더욱 증가 하는 것으로 나타났다. 이는 유입가스유량이 증가할수록 기-액 접촉면적이 증 가될뿐만 아니라, 난류강도가 증가하여 물질전달속도가 빨라지기 때문으로 판 단된다.

따라서 jet loop fluidized bed reactor을 이용하여 aeration을 실시할 경우, 난류강도 증가로 물질전달속도가 빨라져 pH 상승속도를 증가시킬 수 있는 것 으로 판단된다. 또한 유입가스유량을 적정수준으로 증가시킬 경우 pH 상승속 도를 더욱 증가시킬 수 있을 것으로 판단되었다.



Fig. 9 Effect of the gas flow rate on the pH change.

#### 3.3.4 T-P, NH<sub>4</sub>-N 제거효율

Struvite 결정화를 위해서는 반응식 (2) 에서 보는 바와 같이 Mg, N, P 성분 이 일정 비율로 존재해야 한다(*Dowani et al.*, 2007). 일반적으로 혐기성 소화 조 상등액, 축산 폐수 등과 같은 폐수에는 N 과 P 성분은 다량으로 존재하지 만 Mg 성분은 부족하기 때문에 struvite 결정화 반응을 유도하기 위해서 Mg 성분의 외부 주입이 필요하다.

$$Mg^{2+} + NH_4^+ + PO_4^{3-} + 6H_2O \rightarrow MgNH_4PO_4 \bullet 6H_2O$$
 (2)

본 연구에서 사용된 합성폐수의 경우도 N 및 P 성분에 비해 Mg 성분이 낮 은 편이었으며, struvite 결정화 특성을 파악하기 위한 실험을 위해 추가로 Mg 성분을 준비하였다.

본 연구에서는 jet loop reactor 내에 층매질을 주입하여 유동화 시키는 경우 struvite 결정화에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 이를 위해 동일한 조건 으로 조제된 합성폐수를 이용하여 jet loop fluidized bed reactor 와 jet loop reactor에서 시간에 따른 T-P 및 NH<sub>4</sub>-N 제거율을 살펴보았으며, 이를 Fig. 10 와 Fig. 11 에 각각 나타내었다. 본 실험에 사용한 합성폐수는 Cha et al.(2013) 의 연구를 바탕으로 우선 CO<sub>2</sub> stripping 으로 합성폐수의 pH를 7.3에 서 8.0 으로 상승시킨 후 합성폐수 중 Mg/P 몰비가 1.05 가 되도록 MgCl<sub>2</sub>를 주입하였다. 그런 다음 최종 pH 가 8.5 가 되도록 NaOH를 주입한 후 실험에 적용하였다. 또한 두 반응기 모두 조제된 합성폐수 내로 일정유량(Q<sub>G</sub>=2 L/min) 의 aeration 용 공기를 공급하면서 실험을 수행하였다.



ot u

Fig. 10 T-P removal efficienies with respect to the operating time.

**FH** 

A 2



Fig. 11 NH<sub>4</sub>-N removal efficiencies with respect to the operating time.

ot n

Fig. 10에서 보는 바와 같이 jet loop fluidized bed reactor에서 struvite 결정 화에 의한 합성폐수 내 T-P 제거율은 82.4%로 jet loop reactor 에 비해 약간 높게 나타났다. 그리고 반응시간에 대한 T-P 제거율은 초기 10 분 이내에 도 달되어 반응시간을 증가시켜도 일정 수준으로 유지되었다. 이러한 결과는 jet loop reactor 에서의 T-P 제거율을 나타낸 곡선과 약간 상이한 것이다. 즉, 그 립에서 보는 바와 같이 jet loop reactor 의 T-P 제거율은 반응 시간이 5, 10, 30 분일 때 각각 69.0%, 73.2%, 80.6%로 초기 10분이 경과한 이후에도 T-P 제 거반응이 상당량 지속된 것으로 나타났다. 그러나 jet loop fluidized bed reactor에서 동일 반응시간에 대한 T-P 제거율은 각각 79.9%, 81.4%, 83.5%로 나타나, 대부분의 T-P 제거반응이 초기 10분 이내에 이루어진 것으로 판단되 었다.

이는 jet loop fluidized bed reactor 내에 주입된 층매질이 결정화 핵생성을 촉진시키는 역할을 할 뿐만 아니라 유동화에 의해 기-액 접촉면적을 넓히고 강한 난류강도를 형성시켜 생성된 struvite 결정의 성장속도를 증가시키는 역 할을 하므로, 이로 인해 합성폐수 내 struvite 결정화 속도가 촉진되었기 때문 으로 판단된다.

또한 두 반응기에서 모두 반응시간 10분 경과시 T-P 제거율이 70% 이상으 로 대부분의 struvite 결정이 생성된 것으로 나타났으며, 이러한 결과는 산업 폐수에서 struvite 결정화에 대한 Diwania et al.(2007)의 연구결과와 유사하다.

한편 반응시간 별 NH<sub>4</sub>-N 제거율 변화를 나타낸 Fig. 11에서 보는 바와 같이 두 반응기에서 모두 유사하게 반응시간을 60 분 정도로 증가시켜도 제거율이 20% 부근에서 유지 되었으며, jet loop fluidized bed reactor 에서의 제거율이 약간 높은 것으로 나타났다. 또한 T-P 제거율과 유사하게 jet loop fluidized bed reactor에서 보다 짧은 반응시간 내에 일정 수준의 제거율에 도달하는 것 으로 나타났다. 그리고 본 연구에서 NH<sub>4</sub>-N 제거율이 T-P 제거율에 비해 현저하게 낮은 것 으로 나타났는데, 이는 본 실험에 사용한 합성폐수의 NH<sub>4</sub>-N 농도가 T-P 농도 에 비해 10 배 이상 높기 때문으로 합성폐수 내 NH<sub>4</sub>-N 제거량은 T-P 농도의 2.5 배 이상으로 높다. NH<sub>4</sub>-N 제거량이 높은 이유는 struvite 결정화에 의해 NH<sub>4</sub>-N 이 제거된 이외에도 aeration 에 의하여 추가로 제거되었기 때문으로 판단되며, 이러한 결과는 Liao et al.(1995)이 돼지 분뇨 폐수(swine manure wastewaters)를 aeration 하여 NH<sub>4</sub>-N를 제거한 연구결과와 유사하다.



#### 3.4 요약

본 연구에서는 struvite 결정화와 aeration을 동시에 수행할 수 있는 특징을 가진 lab-scale jet loop fluidized bed reactor에서 T-P 및 NH<sub>4</sub>-N 제거율을 통 해 struvite 결정화 성능을 검토하였다. 또한 jet loop fluidized bed reactor 와 동일한 규모의 jet loop reactor 의 struvite 결정화 성능을 비교·검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

 CO<sub>2</sub> stripping에 의한 pH 변화는 jet loop reactor의 경우와 유사하게 반응시 간을 증가시켜도 8.0 정도에서 유지되었으나, jet loop fluidized bed reactor에 서 일정수준의 pH 까지 상승되는데 소요되는 시간이 보다 짧은 것으로 나타 났다. 이러한 결과는 층매질의 유동화에 의한 난류강도 증가로 물질전달 속 도가 빨라져 CO<sub>2</sub> 탈기속도가 증진되었기 때문으로 판단된다.

2. Struvite 결정화 반응에 의한 T-P, NH4-N 제거율은 jet loop reactor에 비해 jet loop fluidized bed reactor에서 약간 높았으며, 특히 반응초기 10분까지의 제거율이 매우 높은 것으로 나타났다. 이는 jet loop fluidized bed reactor내에 주입된 층매질이 결정화 핵 생성을 촉진시키는 역할을 할 뿐만 아니라, 유동 화에 의해 기-액 접촉면적을 넓히고 강한 난류강도를 형성시켜 생성된 struvite 결정의 성장속도를 증가시키는 역할을 하여 합성폐수 내 struvite 결정화 속도가 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다.

## 제 4 장 연속식 Jet Loop Reactor에서 CO2를 이용한 알칼리폐수 중화

#### 4.1 서론

산업공정에서 배출되는 알칼리폐수의 중화를 위해 주로 강산이 사용되고 있 다. 그러나 강산을 사용할 경우 설비 부식 및 취급상의 위험이 항상 존재 하 고 있다(고, 2010). 이에 대한 해결 방안으로 알칼리폐수를 CO<sub>2</sub>를 이용하여 중 화하는 연구가 수행된 바 있으며 기체의 흡수율을 증진시키고자 흡수장치 개 발에 초점을 맞추어 왔다.

알칼리 폐수를 CO<sub>2</sub>를 이용하여 중화하기 위한 장치로 bubble column(Darmana et al., 2007), agitated vessel(박, 2003), packed tower(Lue et al., 2004) 등 여러 종류의 흡수 반응기가 사용되었다. Gaddis(1990)의 연구에 따르면 bubble column은 장치가 간단하지만 다른 장치에 비해 물질전달율이 낮은 특징이 있다. 또한 agitated vessel은 임펠러의 교반에 따른 높은 난류강 도로 물질전달율이 높지만, 임펠러의 작동을 위해 추가 동력비가 요구 된다. 그리고 packed tower는 충진물에 의한 높은 기-액 접촉면적을 가진다는 장점 이 있지만, 압력강하가 높은 단점이 있다.

한편 기-액 흡수 반응에서 기존의 흡수반응기에 비해 더욱 높은 흡수율을 얻기 위해 jet loop reactor가 Bohner et al.(1972)에 의해 개발되었다. Jet loop reactor는 draft tube 내부에 설치된 이유체 노즐에서 생성된 액체 제트에 의 해 미세한 기포가 형성 되어 기-액간의 접촉 면적이 넓어지며 난류강도가 증 가한다는 장점이 있다. 또한 draft tube 로 인하여 기-액 흐름의 일부가 재순 환 되어 기포의 체류시간이 증가한다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인해 타 반응기에 비해 흡수율이 높다는 특징이 있다. Jet loop reactor(JLR)가 갖고 있는 이와 같은 장점을 이용해 jet loop reactor(JLR)는 알칼리페수를 CO<sub>2</sub>를 이용하여 중화하는 연구에 진행된바 있다. Son et al.(2013) 및 Cha et al.(2014) 은 jet loop reactor의 장점을 gas absorption system 에 이용하고자 하였으며, jet loop reactor 에서의 CO<sub>2</sub>흡수 특성을 파악한 바 있다. 그러나 이들 연구는 semi-batch 식 운전에서 연구가 진행되었으며, 실제 현장 적용에 어려움이 있다. 그러므로 jet loop reactor(JLR)의 현장 적용을 위해서는 연속식 jet loop reactor를 이용한 알칼리 폐수에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 jet loop reactor(JLR)의 현장 적용 가능성을 평가하기 위해, 연속식 jet loop reactor를 이용하여 알칼리페수와 CO<sub>2</sub>함유 조제가스를 연속적으로 주입하면서 가스와 알칼리페수 주입량에 따른 jet loop reactor의 알칼리페수 중화 특성 및 CO<sub>2</sub>의 제거특성을 파악하고자 하였다.



#### 4.2 실험장치 및 방법

본 연구에서는 CO<sub>2</sub>를 이용한 알칼리 폐수 중화에 lab-scale의 jet loop reactor시스템을 이용하였다. 시스템은 크게 저장조, jet loop reactor, 정량펌 프, 순환펌프, CO<sub>2</sub>bomb로 구성되어 있으며, 시스템의 구성도를 Fig. 12에 나타 내었다.

실험에 사용된 jet loop reactor는 하향류 형태의 원통형 구조로 반응관, draft tube, 기-액 분리조, 이유체 노즐로 구성되어 있다. Jet loop reactor의 성세한 구조와 치수는 Son et al. (2013) 의 문헌을 참고하여 전체 높이 1 m, 유효용적 24 L 가 되도록 아크릴로 제작하였다.

장치의 작동원리는 먼저, 정량펌프(Longer Co., China)로 jet loop reactor에 폐수 24 L를 채운 뒤 순환펌프 (WILO, South Korea)로 폐수를 이유체 노즐의 액체유도관으로 유입하고, 가스는 CO2bomb(Air 85%, CO2 15%)의 레귤레이터 를 통해 이유체 노즐의 가스유입관으로 연속적으로 흘려보낸다. 이때 액체순 환유량(Q<sub>LN</sub>)은 Cha et al. (2014)의 연구결과를 참고하여 높은 난류강도를 형성 할 수 있도록 20 L/min으로 설정하였다. 노즐의 토출부에서는 기체유도관을 통해 유입된 가스와 액체유도관을 통해 유입된 모사폐수의 혼합이 이루어지고 미세기포가 형성되어 토출부로 분사된다. 노즐로부터 분사된 유체는 draft tube의 내부를 통해 하향류로 흐르고, annular space(반응관과 draft tube 사 이)를 상향류로 통과한다. 이 과정에서 draft tube 외벽쪽에 근접한 stream line을 타고 상승한 기체와 액체의 일부는 노즐에서 분사되는 유석에 의해 다 시 draft tube 내부로 재순환 된다. 그러나 상향류의 유체 중 반응조 외벽에 가까운 유체(즉, draft tube 외벽으로부터 먼 쪽 유체)는 재순환되지 않고 기-액분리조로 흘러 들어간다. 기-액분리조로 흘러들어간 유체중 중 기체는 분리 되어 상부 가스유출밸브를 통해 배출되고, 처리수는 순환펌프를 통해 반응기 외부로 순환되어 다시 이유체 노즐로 분사된다.

한편 폐수는 Son et al. (2013)이 제시한 B시의 공업단지에서 배출되는 알칼 리폐수와 유사한성상의 모사폐수를 조제하여 사용하였으며, 성상은 Table 5.에 나타내었다.



Fig. 12 Schematic diagram of experimental apparatus uesd in the study.

1 : Storage tank

5 : Liquid flowmeter

- 2 : Valve
- 3 : Volumetric pump 4 : Check valve
- 6 : Circulation pump
- 7 : Two-fluid nozzle
- 8 : Jet loop reactor
- 9 : Draft tube
- 10 : Gas flowmeter
- $11\ :\ CO_2\ bomb$

Synthetic wastewater			
Contents	Value		
pH	10.1		
NaOH(mg/L)	Adjusting pH		
NH <sub>3</sub> -N(mg/L)	60		
Tap water(L)	1		





Jet loop reactor를 초기 작동하는 데는 semi-batch to continuous mode와 continuous mode가 있다. Semi-batch to continuous mode의 경우 알칼리페수 24L를 정량펌프를 이용하여 jet loop reactor를 채운 뒤, 알칼리페수의 유입은 없고 가스는 지속적으로 유입되는 semi-batch mode로 pH를 7 까지 하강한 뒤 연속적으로 알칼리 폐수를 주입하였다. Continuous mode는 알칼리페수 24L를 jet loop reactor에 채운 뒤 연속적으로 알칼리 폐수 및 모사가스를 주입하였 다.

실험은 알칼리페수 24 L를 jet loop reactor에 채운 다음 semi-batch to continuous operation, continuous mode에 따라 Q<sub>L,in</sub>, Q<sub>G,in</sub>변화에 따른 pH 및 유출가스중의 CO<sub>2</sub>몰분율을 측정 하였으며, 조업조건은 Table 6.에 나타내었다. 그리고 폐수의 pH는 pH meter(Orion 4Star, Thermo scientific, Singapore)로 측 정하였으며, 유출가스 중의 CO<sub>2</sub>몰분율은 CO<sub>2</sub>가스 분석기(Optima 7, MRU Instruments, Inc., Germany)을 이용하여 분석하였다.

Parameters	Value	
$Q_{G,in}$	1 ~ 7 L/min	
Q <sub>L,in</sub>	0.9 ~ 6.67 L/min	
$Q_{LN}$	20 L/min	
Temp	25 °C	
Conc. of $CO_2$	15 %	
Operating mode	Semi-batch to continuous, Continuous	

Table 6. Operation parameters used in the experiment.





Fig. 13 Operating mode for start-up.

알칼리 폐수의 중화공정에서 먼저 고려되어야 할 것은 장치 초기 가동 시 정상상태에 도달하기 전까지 발생되는 폐수에 대한 처리 방안이다. 본 연구에 서는 장치 초기 가동 시 유출되는 알칼리 폐수의 처리 방안으로 별도의 초기 폐수 집수 설비를 두는 것과 알칼리폐수를 순환하여 초기 폐수 유출량을 제어 하는 방법에 대해 검토하고자 하였다. 이를 위해 장치의 초기 운전모드를 semi-batch to continuous mode, continuous mode로 하여 실험을 실시하였으 며, 각 운전 모드별로 반응기내 pH, 유출수의 pH를 측정하였다.

Fig. 13에 나타낸 바와 같이 semi-batch to continuous mode는 jet loop reactor 내부에 알칼리페수(초기 pH 10.1) 24 L 를 투입 한 후 알칼리페수의 유입 없이 모사가스를 2 L/min 으로 주입한 후 반응기 내의 pH 가 7 이 되었 을 때 (중화 되었을 때) 알칼리페수를 주입하는 방법으로 운전한 것이다. 그리 고 continuous mode는 jet loop reactor 내부에 알칼리페수 24 L 주입 후 알칼 리페수 및 모사가스를 2 L/min으로 연속적으로 주입한 것이다.

Semi-batch to continuous mode의 경우 jet loop reactor 내의 알칼리폐수가 중화되기 전까지 유출되는 알칼리폐수는 없다. 그러나 continuous mode의 경 우, 연속적으로 알칼리폐수가 유입되기 때문에 작동 초기에는 pH가 높은 알칼 리폐수가 유출된다. 이는 하루 8시간 가동 시 전체 처리량의 11%가 유출되는 것이다. 따라서 작동 초기에 알칼리폐수의 유출을 방지하기 위해서는 semi-batch to continuous mode로 작동 하는 것이 필요하다.

또한 Fig. 13에 나타난 바와 같이 semi-batch to continuous mode로 초기 운 전 할 때 pH가 7.1 까지 중화되는 시간은 17.5분으로 continuous mode가 55분 이 소요 되는 것에 비하여 중화 되는 시간이 짧게 나타났다. 이로 인해 작동 초기에는 semi-batch to continuous mode로 운전 하는 것이 알칼리폐수의 유 출 및 적정 pH로 유지하는데 유리하다.

- 43 -

#### 4.3.2 QL 및 QG 변화에 따른 outlet solution pH 변화

연속식 jet loop reactor을 이용한 알칼리폐수 중화에 필요한 유입폐수유량 (Q<sub>L</sub>)및 유입가스유량(Q<sub>G</sub>)을 선정하기 위해 본 실험 조건(유입가스 중 CO<sub>2</sub>몰분 율 0.15, 알칼리 폐수의 초기 pH 10.1, Q<sub>LN</sub> = 20L/min)에서 유입폐수유량(Q<sub>L</sub>)및 유입가스유량(Q<sub>G</sub>)에 따른 유출수의 pH 변화를 측정하여 Fig. 14, 15에 나타내 었다.

낮은 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>에서는 Q<sub>G</sub>가 증가함에 따라 가스 유입량에 영향을 받아 Q<sub>G</sub> = 6L/min까지 운전을 하였으며, 높은 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>에서는 Q<sub>L</sub>이 증가함에 따라 일정 Q<sub>L</sub> 이상에서는 Q<sub>LN</sub>의 유입을 방해하여 Q<sub>L</sub>=6.67L/min까지 운전을 실시 하였다. 그 리고 장치의 초기 작동 이후 Q<sub>L</sub>, Q<sub>G</sub>에 따라 정상상태에 도달하는 시간은 15~23분이 소요 되었으며 이에 따라 30분 경과 후 유출수의 pH를 측정하였다. Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 1.1 이하인 조건에서는 Q<sub>G</sub>를 증가시킴에 따라 유출수의 pH는 감소 하는 경향을 보인다. 이는 Q<sub>G</sub>를 증가시킴에 따라 CO<sub>2</sub> 유입량이 증가하여 유출 수의 pH 가 감소하는 것으로 판단된다. 또한 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 1.1 이상인 조건에서는 Q<sub>G</sub>를 증가시킴에 따라 유출수의 pH가 상승하는 경향을 보인다. 이는 Q<sub>G</sub>가 증 가하면 CO<sub>2</sub> 유입량이 증가하지만, Q<sub>LN</sub>이 일정한 조건에서 Q<sub>L</sub>이 증가하면 알칼 리폐수 유입량이 증가하므로 유출수의 pH가 상승하는 것으로 판단된다.

한편 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 1.1인 조건에서는 Q<sub>G</sub>가 증가하여도 유출수의 pH는 7.2로 유지 되었다.

Q<sub>G</sub> = 1 ~ 6L/min, Q<sub>L</sub> = 1 ~ 6.67L/min범위 내에서 운전을 실시하였으며 폐 수의 배출 허용기준인 pH 5.8 ~ 8.6 의 기준에는 모두 배출허용기준을 만족하 였다. 따라서 lab-scale jet loop reactor를 이용하여 연속식으로 알칼리폐수 중 화 및 CO<sub>2</sub>흡수할 때에는 Q<sub>G</sub> = 5L/min, Q<sub>L</sub> = 6.67L/min으로 조업 시 시간당 가

- 44 -

장 많은 양의 알칼리 폐수를 중화처리 할 수 있었으며 이때, 유출수의 pH 는 7.5로 폐수의 배출 허용기준에 만족하는 결과를 얻을 수 있었다.



Fig. 14 Effect of the  $Q_G$  on outlet solution pH.





Fig. 16 Effect of the  $Q_L/Q_G$  on outlet solution pH.

Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>값의 변화에 따른 유출수의 pH를 살펴보기 위해 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>에 따른 유출수 의 pH를 Fig. 16에 나타내었다.

Fig. 16를 보면 앞서 Fig. 14에 나타낸 바와 같이 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 1.1일 때 Q<sub>G</sub>값이 증가하여도 유출수의 pH는 일정하게 유지 되었다. 또한 Q<sub>G</sub>값이 작을수록 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 증가함에 따라 유출수의 pH가 완만하게 증가하였으며 Q<sub>G</sub>값이 클수록 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 증가함에 따라 유출수의 pH가 급격히 증가하는 경향을 보였다.

- 47 -

#### 4.3.3 Q L 및 Q G 변화에 따른 CO2 제거율

연속식 jet loop reactor을 이용한 알칼리페수 중화에 유입폐수유량(Q<sub>L</sub>)및 유 입가스유량(Q<sub>G</sub>)에 따른 배출가스 중 CO<sub>2</sub> 몰분율을 살펴보기 위해 Q<sub>G</sub>변화에 따 른 배출가스 중의 CO<sub>2</sub> 몰분율을 Fig. 17 에 나타내었다. 이후 식 (3)을 이용 하여 CO<sub>2</sub>제거 효율을 구하여 Fig. 18에 나타내었다.

$$\eta_{CO_{2}(t)}(\%) = \frac{Q_{G,in} \times y_{CO_{2},in} - Q_{G,in} \times y_{CO_{2},out} \times \frac{y_{air,in}}{y_{air,out}}}{Q_{G,in} \times y_{CO_{2},in}} \times 100$$
(3)

위 식에서  $\eta_{CO_2}$ 는  $CO_2$ 제거효율,  $Q_G$ 는 가스유량,  $y_{CO_2}$ 는  $CO_2$ 의 몰분율, 첨자 in과 out은 반응기로의 유입과 유출을 나타낸다.

Fig. 17을 보면 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 1.1이하 일 때 Q<sub>G</sub>가 증가함에 따라 유출가스 중의 CO<sub>2</sub> 몰분율이 증가하는 경향을 보인다. 이는 Fig. 14을 보면 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 1.1 이하 일 때 Q<sub>G</sub>가 증가함에 따라 유출수의 pH가 감소하여 CO<sub>2</sub> 몰분율이 증가한 것 으로 판단된다.

유출수의 pH가 감소함에 따라서 유출가스 중의 CO<sub>2</sub> 몰분율이 증가하는 이 유는 CO<sub>2</sub>를 이용한 알칼리 용액의 중화반응 메커니즘으로 설명이 가능하다. CO<sub>2</sub>를 이용한 알칼리 용액의 중화는 반응식 (4) ~ (6)으로 요약 할 수 있다. 먼저, 반응식 (4)에 의하여 용액 중으로 흡수된 CO<sub>2</sub>(aq)는 OH 와 반응하여 반 응식 (5)와 (6)이 진행된다.

$$CO_2(g) + H_2O \rightarrow CO_2(aq) \tag{4}$$

$$CO_2(aq) + OH^- \rightarrow HCO_3^-$$
 (5)

$$HCO_3^- + OH^- \rightarrow CO_2^{2-} + H_2O \tag{6}$$

이때 알칼리 용액의 pH가 높은 용액에서 OH 농도가 높기 때문에 용액에 흡 수된 CO<sub>2</sub>(aq)가 반응(5)에 의하여 빠르게 소모된다. 이에 따라 반응식 (4)가 연 속적으로 진행된다. 용액 내의 OH 농도가 감소함에 따라서 알칼리 용액의 pH 가 낮을수록 유출가스 중의 CO<sub>2</sub>몰분율이 증가한다. 따라서 Q<sub>1</sub>/Q<sub>6</sub>가 1.1 이하 일 때 Q<sub>6</sub>가 증가함에 따라 유출수의 pH가 감소하여 유출가스중의 CO<sub>2</sub> 몰분율 이 증가 한 것으로 판단된다. 따라서 Q<sub>1</sub>/Q<sub>6</sub>가 1.1이하일 때 Q<sub>6</sub>가 증가하면 CO<sub>2</sub>제거율은 감소하는 경향을 보인다. 반면 Fig. 18을 보면 Q<sub>1</sub>/Q<sub>6</sub>가 1.1 이상 일 때, Q<sub>6</sub>가 증가함에 따라 유출수의 pH는 상승하지만 CO<sub>2</sub>제거율은 감소하는 경향을 보인다. 이는 Q<sub>6</sub>가 증가함에 따라 유입된 CO<sub>2</sub>가 모두 반응하지 않고 일부 유출되므로 CO<sub>2</sub> 몰분율이 증가함에 따라 CO<sub>2</sub>제거율이 감소하는 것으로 판단된다.

또한 실험 조건 내에서 CO<sub>2</sub> 제거효율은 85%이상으로 타 반응기의 CO<sub>2</sub> 제거 효율이 66~85%에 비해 높은 CO<sub>2</sub> 제거효율을 얻을 수 있었다. 이는 jet loop reactor 가 jet 노즐로 인해 버블의 크기가 미세하게 형성되며, 높은 난류 강도 를 갖고 있기 때문이다.



Fig. 17 Effect of the  $Q_G$  on  $CO_2$  mole fraction at outlet.



#### 4.3.4 Outlet solution pH 변화에 따른 CO2 제거효율

연속식 jet loop reactor 운전 시 유출수의 적정 pH 에 따른 CO<sub>2</sub>제거효율을 살펴보기 위해 유출수의 pH 에 따른 CO<sub>2</sub>제거 효율을 Fig. 19에 나타내었다.

Fig. 19을 보면 유출수의 pH에 대한 CO<sub>2</sub>제거율은 높은 pH에서 높게 나타나 고, pH가 낮아짐에 따라 감소함을 보인다. 이와 같은 결과는 앞서 설명한 바 와 같이 알칼리 용액에서 CO<sub>2</sub>의 흡수반응은 pH가 높은 용액에서 OH 농도가 높기 때문에 용액에 흡수된 CO<sub>2</sub>(aq)가 반응(5)에 의하여 빠르게 소모되기 때문 이다.

또한 pH가 7.6이상에서 CO<sub>2</sub>제거율이 96%이상으로 높은 값을 보이며, pH가 7인 중성 영역에서도 86%이상의 높은 CO<sub>2</sub>제거율을 보였다. 이는 semi-batch 식 jet loop reactor 을 이용해 알칼리폐수 중화에 CO<sub>2</sub>를 이용한 son et al.(2013)의 연구 결과와 유사하다.

그리고 앞서 설명한 가장 많은 양의 알칼리 폐수를 중화 처리 할 수 있는 조건(유출수 pH 7.5)에서의 CO<sub>2</sub>제거효율은 95.43%로 semi-batch 식 jet loop reactor을 이용한 연구결과와 동일하게 높은 CO<sub>2</sub>제거효율을 얻을 수 있었다.

이는 semi-batch 식 운전을 실시할때와 마찬가지로 연속식으로 운전시 높은 CO<sub>2</sub> 제거효율을 얻을 수 있었으며, 현장에 연속식으로 적용시 높은 CO<sub>2</sub> 제거 효율을 얻을 수 있을것이라 판단된다.



Fig. 19 Effect of the outlet solution pH on CO<sub>2</sub> removal efficiency.

$Q_{G}$	$Q_L/Q_G$	$Q_{L}$	Outlet solution pH	$\eta_{CO_2}$
[L/min]		[L/min]		[%]
	0.9	0.9	6.94	88.25
	1.0	1.0	7.12	89.42
1	1.1	1.1	7.19	90.01
1	1.25	1.25	7.25	92.83
	1.33	1.33	7.29	93.01
	1.5	1.5	7.45	97.21
	0.5	1.0	6.69	63.51
	0.9	1.8	6.92	87.18
	1.0	2.0	7.11	88.36
0	1.1	2.2	7.2	89.02
Z	1.25	2.5	7.28	92.77
	1.33	2.66	7.35	95.89
	1.5	3.0	7.5	97.04
	2.0	4	8.43	98.06
	0.9	2.7	6.88	86.92
	1.0	3.0	7.06	88.10
0	1.1	3.3	7.19	88.88
3	1.25	3.75	7.32	92.25
	1.33	4.0	7.39	95.72
	1.5	4.5	7.59	96.98
	0.9	3.6	6.84	86.54
	1.0	4.0	7.02	87.73
4	1.1	4.4	7.19	88.32
4	1.25	5.0	7.34	91.95
	1.33	5.33	7.45	95.60
	1.5	6.0	7.69	96.69
	0.9	4.5	6.81	86.24
	1.0	5.0	6.98	87.43
5	1.1	5.5	7.2	88.02
	1.25	6.25	7.35	91.84
	1.33	6.67	7.5	95.43
	0.9	5.4	6.76	85.53
6	1.0	6.0	6.94	86.72
	1.1	6.6	7.18	87.31

Table 7. Outlet solution pH and  $CO_2$  removal efficiency with respect to operating parameters

각 조업 변수에 따른 outlet solution pH 및 CO<sub>2</sub> 제거효율을 Table 7 에 나 타내었다.

동일한 Q<sub>G</sub>에서 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>가 증가할수록 pH가 증가하며 CO<sub>2</sub> 제거효율은 증가하 는 경향을 보인다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 유출수의 pH가 높을수록 CO<sub>2</sub> 제거효율이 증가하기 때문이다. 또한 동일한 Q<sub>L</sub>/Q<sub>G</sub>에서 Q<sub>G</sub>가 증가할수록 CO<sub>2</sub> 제거 효율은 감소하는 경향을 보인다.

한편 Q<sub>G</sub> = 2L/min, Q<sub>L</sub> = 4 L/min 인 조건에서 유출수의 pH 는 8.43 이였으 며, 그때 CO<sub>2</sub> 제거효율은 최대치인 98.06%를 얻을 수 있었다. 그리고 일정한 반응기 부피에서 Q<sub>G</sub> = 5 L/min, Q<sub>L</sub> = 6.67 L/min 인 조건에서 가장 많은 양의 알칼리페수를 처리할 수 있었으며, 그때 유출수의 pH 는 7.5로 폐수의 배출 허용 기준을 만족하며 CO<sub>2</sub> 제거효율은 95.43%로 높은 CO<sub>2</sub> 제거 효율을 얻을 수 있었다.



#### 4.4 요약

본 연구는 연속식 jet loop reactor(JLR)을 이용한 알칼리폐수의 CO<sub>2</sub> 중화에 대한 특성을 파악하기 위해서 초기 pH 10.1인 알칼리 용액에 유입가스중의 CO<sub>2</sub> 몰 분율이 0.15인 가스를 연속적으로 주입하면서 Q<sub>L</sub> 및 Q<sub>G</sub> 변화에 따른 pH 변화 및 CO<sub>2</sub> 제거 특성을 파악하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Jet loop reactor를 초기 작동하는데는 semi-batch to continuous mode 와 continuous mode가 있으며, semi-batch to continuous mode로 초기 운전 하는 것이 작동 초기 알칼리 폐수의 유출을 방지할 수 있으며 중화 시간 또한 continuous mode에 비해 짧게 나타났다.

2. 연속식 jet loop reactor에서 CO<sub>2</sub>를 이용하여 알칼리 폐수(pH = 10.1)를 중 화 처리 할 때 Q<sub>G</sub> = 1 ~ 6 L/min, Q<sub>L</sub> = 1 ~ 6.67 L/min 범위 내에서 유출수의 pH는 폐수의 배출허용기준인 pH 5.8 ~ 8.6 의 기준에는 모두 배출허용 기준을 만족하였다. 또한 Q<sub>G</sub> = 5 L/min, Q<sub>L</sub> = 6.67 L/min 으로 조업 시 시간당 가장 많은 알칼리폐수를 처리 할 수 있었으며, 그때 유출수의 pH 는 7.5로 배출허 용기준을 만족하였다.

3. 연속식 jet loop reactor에서 CO<sub>2</sub> 제거 특성은 유출수의 pH가 증가할수록 CO<sub>2</sub> 제거효율은 상승하는 경향을 보였으며, 시간당 가장 많은 폐수를 처리할 수 있는 조건(유출수 pH = 7.5)에서의 CO<sub>2</sub> 제거율은 95.43%로 높은 CO<sub>2</sub> 제거 효율을 얻을 수 있었다. 이 결과는 semi-batch 식 jet loop reactor을 이용한 연구결과와 동일하게 높은 CO<sub>2</sub> 제거 효율을 보인다.

-56-

#### 제 5 장 결 론

본 연구에서는 struvite 결정화와 aeration을 동시에 수행할 수 있는 특징을 가진 lab-scale jet loop fluidized bed reactor에서 T-P 및 NH<sub>4</sub>-N 제거율을 통 해 struvite 결정화 성능을 검토하였다. 또한 jet loop fluidized bed reactor 와 동일한 규모의 jet loop reactor 의 struvite 결정화 성능을 비교·검토하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- CO<sub>2</sub> stripping에 의한 pH 변화는 jet loop reactor의 경우와 유사하게 반응시 간을 증가시켜도 8.0 정도에서 유지되었으나, jet loop fluidized bed reactor 에서 일정수준의 pH 까지 상승되는데 소요되는 시간이 보다 짧은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 층매질의 유동화에 의한 난류강도 증가로 물질전 달 속도가 빨라져 CO<sub>2</sub> 탈기속도가 증진되었기 때문으로 판단된다.
- 2. Struvite 결정화 반응에 의한 T-P, NH<sub>4</sub>-N 제거율은 jet loop reactor에 비해 jet loop fluidized bed reactor에서 약간 높았으며, 특히 반응초기 10분까지 의 제거율이 매우 높은 것으로 나타났다. 이는 jet loop fluidized bed reactor내에 주입된 층매질이 결정화 핵 생성을 촉진시키는 역할을 할 뿐만 아니라, 유동화에 의해 기-액 접촉면적을 넓히고 강한 난류강도를 형성시켜 생성된 struvite 결정의 성장속도를 증가시키는 역할을 하여 합성폐수 내 struvite 결정화 속도가 촉진되었기 때문인 것으로 판단된다.

또한 연속식 jet loop reactor(JLR)을 이용한 알칼리폐수의 CO<sub>2</sub> 중화에 대한 특성을 파악한 바 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- Jet loop reactor를 초기 작동하는데는 semi-batch to continuous mode 와 continuous mode가 있으며, semi-batch to continuous mode로 초기 운전 하는 것이 작동 초기 알칼리 폐수의 유출을 방지할 수 있으며 중화 시간 또 한 continuous mode에 비해 짧게 나타났다.
- 4. 연속식 jet loop reactor에서 CO<sub>2</sub>를 이용하여 알칼리 폐수(pH = 10.1)를 중 화 처리 할 때 Q<sub>G</sub> = 1 ~ 6 L/min, Q<sub>L</sub> = 1 ~ 6.67 L/min 범위 내에서 유출 수의 pH는 폐수의 배출허용기준인 pH 5.8 ~ 8.6 의 기준에는 모두 배출허 용 기준을 만족하였다. 또한 Q<sub>G</sub> = 5 L/min, Q<sub>L</sub> = 6.67 L/min 으로 조업 시 시간당 가장 많은 알칼리폐수를 처리 할 수 있었으며, 그때 유출수의 pH 는 7.5로 배출허용기준을 만족하였다.
- 5. 연속식 jet loop reactor에서 CO<sub>2</sub> 제거 특성은 유출수의 pH가 증가할수록 CO<sub>2</sub> 제거효율은 상승하는 경향을 보였으며, 시간당 가장 많은 폐수를 처리 할수 있는 조건(유출수 pH = 7.5)에서의 CO<sub>2</sub> 제거율은 95.43%로 높은 CO<sub>2</sub> 제거효율을 얻을 수 있었다. 이 결과는 semi-batch 식 jet loop reactor을 이용한 연구결과와 동일하게 높은 CO<sub>2</sub> 제거 효율을 보인다.

### 참고문헌

- Badoual, M., Derbez P., Aubert M., Grammaticos B., (2009) Simulating the migration and growth patterns of *Bacillus subtilis*, *PhysicaA*, 388, pp.549-559.
- Battistoni, P., Fava, G., Pavan, P., Musacco, A., Cecch., F., (1997) Phosphate Removal in Anaerobic Liqiors by Struvite Crystallization without Addition of Chemicals : Priliminary Result, Water Res. 31, pp.2925-2929.
- Cha, G. E., Sung, H. J., Lim, J. H., Lee, T. Y., Lee, J. K., (2014) CO<sub>2</sub> absorption characteristics of a jet loop reactor with a two-fluid swirl nozzle in an alkaline solution, *Korean J. Chem, Eng.*, **31**, pp.701-705
- Chriastel, L., Fadavi, A, (2006) Neo concept of jet loop bioreactor, *Nova Biotechnologica*, **5**, pp.89-100.
- Clesceri, L. S., Greenberg, A. E., Eaton, A. D., Frason, M. A., (2005) Standard methods for the examination of water and wastrwater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, pp. 4-153-4-154.
- Corre, K. S. L., Valsami-Jones, Hobbs, E, P., Parsons, S. A., (2007) Impact of Reactor Operation Success of Struvite Precipitation from Synthetic Liquors, Environ. Technol., 28, pp.1245-1256.
- Diwania, G. El., Rafiea, Sh. El., Ibiaria, N. N. El., Aliab, H. I. El., (2007) Recovery of ammonia nitrogen from industrial wastewater treatment as struvite slow releasing fertilizer, *Desalination*, **214**, pp.200-214.
- Favabi, A., Chisti, Y., (2005) Gas-liquid mass transfer in a novel forced circulation loop reactor, *J. Chem, Eng*, **112**, pp.73-80.
- Gaddis E. S., (1990) Mass transfer in gas-liquid contactors, *Chemical Engineering* and Processing, **38**, pp.503-510.

- Gustin, S. and Marinesek-Logar, R., (2011) Effect of pH, temperature and air flow rate on the continuous ammonia stripping of the anaerobic digestion effluent, *Process safety and Environmental protection*, **89**, pp.61-66.
- Hanhoun, M., Montastruc, L., Azzaro-Pantel, C., Biscans, B., Freche, M., Pibouleau, L., (2013) J. Chem, Eng, **215**, pp.903-912.
- Liao, P. H., Chen, A., Lo, K. V., (1995) Removal of nitrogen from swine manure wastewaters by ammonia stripping, *Bioresource Technology*, 54, pp.17-20
- Mesequer-Lloret, S., Molins-Legua, C., Molins-Legua, CampinsFalco, P., (2002) Ammonium Determivation in water samples by suing opa-nac reagent : a comparative study with nessler and ammonium selective electrode methods, Interm. J. Environ. Anal. Chem., 82, pp.475-489
- Ohlinger, K. N., Young, T. M., Schroeder, E, D., (1998) Predicting struvite formation in digestion, *Wat. Res.*, **14**, pp.1695-1703.
- Taylor, A. W., Frazier, A. W., Gurnet, E. L., (1963) Solubility products of magnesium ammonium and magnesium potassium phosphates, *Transactions of the Faraday Socity*, 59, pp.1580-1584.
- Warmadewanthi, Liu, J. C., (2009) Recovery of phosphate and ammonium as struvite from semiconductor wastewater, Separation and Purification Technology, 64, pp.368-373.
- 고광섭, (2010) 이산화탄소 함유 배가스를 이용한 알칼리성 폐수의 pH 조절에 관 한 연구, 박사학위논문, 순천대학교, 한국.
- 손민기 (2013) Jet Loop Reactor에서 연소배가스중 CO<sub>2</sub>를 이용한 알칼리폐수 중 화, 석사학위논문, 부경대학교, 한국.
- 손민기, 성호진, 이제근 (2013) Semi-batch jet loop reactor에서 연소배가스 중 CO<sub>2</sub>를 이용한 알칼리폐수 중화, 대한환경공학회, **18**, pp.17-22.
- 손성명 (2009) Jet Loop 반응기를 이용한 고로폐수처리에 관한 연구, 박사학위논 문, 서울시립대학교, 한국.
- 차고은 (2014) CO<sub>2</sub> 흡수 및 Struvite 결정화에 Jet Loop Reactor의 적용 연구, 석 사학위논문, 부경대학교, 한국.

차고은, 김미란, 이제근 (2013) Jet Loop Crystallizer에서 Struvite 생성에 의한 폐 수 중의 인 제거, *한국폐기물자원순환학회*, **30**, pp.923-930

