

## Semi-batch Jet Loop Reactor에서 연소 배가스중 CO<sub>2</sub>를 이용한 알칼리 폐수 중화

손민기\* · 성호진\*\* · 이제근\*\*

### Neutralization of Synthetic Alkaline Wastewater with CO<sub>2</sub> in a Semi-batch Jet Loop Reactor

Min-Ki Son, Ho-Jin Sung and Jea-Keun Lee

#### ABSTRACT

In this study, we tested the absorption of CO<sub>2</sub> in combustion gas into an alkaline wastewater to simultaneously control CO<sub>2</sub> and wastewater. During the experiment, we investigated the effects of operating parameters on neutralization characteristics of the wastewater by using CO<sub>2</sub> in a bench-scale semi-batch jet loop reactor (0.1 m diameter and 1.0 m in height). The operating parameters investigated in the study are gas flow rate of 1.0-2.0 L/min, liquid recirculation flow rate of 4-32 L/min, and liquid temperature of 20-25°C. It was shown that the initial pH of wastewater rapidly decreased with increased gas flow rate for a given liquid recirculation flow rate. This was due to the increase in the gas holdup and the interfacial area at higher gas flow rate in the reactor. At constant gas flow rate, the time required to neutralize the wastewater initial pH of 10.1 decreased with liquid recirculation flow rate ( $Q_L$ ), reached a minimum value in the range of  $Q_L = 16-24$  L/min, and then increased with further increase in  $Q_L$ . Further, the time required to neutralize the wastewater was shortened at higher temperatures.

**Key Words** : CO<sub>2</sub>, Absorption, Alkaline wastewater, Neutralization, Jet loop reactor

#### 1. 서론

염색공단이나 제철소에서는 다량의 알칼리 폐수가 발생되는데, 이때 발생하는 알칼리 폐수를 처리하기 위해 기존의 중화과정에서는 중화제로 황산을 사용하고 있다. 그러나 황산을 이용하여 NaOH를 중화하는 방법은 장치를 부식시켜 설비의 내구연한을 단축시키고, 강산이라서 취급상의 문제점이 있다. 또한 pH7부근에서는 소량의 황산이 투입되더라도 pH가 급격히 떨어져 NaOH를 재주입 해야 하는 문제점이 발생된다고 보고된 바 있다[1].

이에 대한 대처방안으로 대규모 공단에서 다량의 CO<sub>2</sub>가 배출되는 것을 고려하여 황산 대신에 CO<sub>2</sub>를 알칼리 폐수의 중화제로 활용하기 위한 연구가 진행되었다[2]. CO<sub>2</sub>를 사용하여 중화할 경우 안정화 과정인 완충영역이 존재하여 다소 과잉 투입되더라도 pH를 6-7 사이로 중화하는 것이 용이하며, 황산과는 달

리 무부식성, 무독성이기 때문에 폐수 처리공정에서 재질이나 취급상의 문제를 일으키지 않는 장점이 있다. 또한, 알칼리폐수 중화처리에 연소배가스 중의 CO<sub>2</sub>를 이용하게 되면 CO<sub>2</sub>의 배출량도 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 중화제인 황산을 CO<sub>2</sub>로 대체할 수 있어 매우 경제적인 수처리 방법이 될 수 있다[1].

현재까지 CO<sub>2</sub>를 이용한 알칼리폐수 중화에 관한 연구에는 bubble column[3], agitated vessel[4], packed tower[2] 등이 gas-liquid contactor로 사용되었다. Bubble column은 장치가 간단하고 내식성 재료에 의한 제작도 용이하나, 타 장치에 비해 물질전달효율이 낮은 단점이 있으며, agitated vessel은 임펠러의 교반으로 인해 액의 난류강도가 증가되고, 기포의 단위부피당 접촉면적을 향상시킴으로써 기-액간 접촉면적이 증가하여 물질전달율이 향상되는 특징이 있으나, 임펠러의 작동을 위한 추가적인 동력장치가 요구된다. 그리고 packed tower는 장치 내에 충전물을 채우고, 여기에 액을 분사함으로써 높은 기-액접촉면적을 가지는 장점이 있지만, 압력강하가 높은 단점이 있다[5].

\* 부경대학교 환경공학과

\*\* 고등기술연구원

† 연락처자, leejk@pknu.ac.kr

위와 같은 문제점들을 보완해 주기 위해 최근 들어 jet loop reactor를 이용한 연구가 진행되었다. Jet loop reactor는 draft tube 내부에 설치된 이유체 노즐에서 가스와 액이 분사될 때 액체제트에 의해 버블의 크기가 미세하게 생성되어 기-액간 접촉면적을 증가시키고 이로 인해 물질전달율을 향상시킬 수 있다. 그리고 draft tube를 통과한 기체와 액체의 흐름이 annular space를 통해 상향류로 올라간 후, 기-액 흐름의 일부가 draft tube 내부로 재순환되어 버블의 체류시간이 증가하며, 사역(dead zone)이 없는 장점이 있다고 Christel와 Fadavi[6]에 의해 보고된 바 있다. 이런 장점이 있는 jet loop reactor를 이용하여 Maurizio 등[7]은 양조장폐수의 호기성 처리, Kang[8]은 돈사폐수중의 유기물 및 부유물질 등을 처리하기 위한 연구에 이용하였다. 또한, Park 등[9]은 jet loop reactor에 활성탄 담체를 적용하여 생물학적 공정을 이용한 중합염색폐수 처리에 관한 연구, Yildiz 등[10]은 폐수처리시 jet loop reactor의 성능평가에 관한 연구를 수행한 바 있으나 jet loop reactor를 적용하여 CO<sub>2</sub>에 의한 알칼리 폐수의 중화에 관한 연구는 아직까지 수행되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 연소 배가스와 알칼리 폐수가 동시에 발생하는 대규모 공단에서 연소 배가스 중에 함유된 CO<sub>2</sub>를 이용하여 알칼리 폐수의 중화에 적용하기 위한 기초자료를 얻기 위해 jet loop reactor의 semi-batch식 운전에서 공정변수에 따른 pH변화와 CO<sub>2</sub> 이용율을 측정하여 각각의 변수들이 중화에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1. 실험장치 및 운전

본 연구에서 사용한 lab-scale jet loop reactor를 포함한 알칼리폐수 중화처리 시스템에 대한 전체 흐름도는 Fig. 1과 같다. 시스템의 구성은 크게 jet loop reactor와 저장조, 정량펌프, 순환펌프, CO<sub>2</sub> bomb로 구성되어 있다. 실험에 사용된 jet loop reactor는 down flow 형태의 원통형구조이며 내부는 반응관, draft tube, 기-액 분리조, 이유체 노즐로 구성되어 있으며, 상세한 구조와 치수는 Velan과 Ramanujam[11]과 Prasad와 Ramanujam[12]의 문헌을 참조하여 제작하였다. 반응관, draft tube, 기-액 분리조는 원통형 구조의 투명한 아크릴을 사용하였다. jet loop reactor의 전체높이 1 m, 유효용적 14 L로 하였으며, 반응관은 높이 0.75 m, 내부직경 0.10 m로, draft tube는 높이 0.60 m, 내부직경 49 mm로, 기-액분리조는 높이 0.35 m, 내부직경 0.30 m로 하였다.

이유체노즐의 액체유입관은 내부직경 16 mm인 PVC 재질의 관을 사용하였고, 노즐 하부는 토출부로부터 상부 40 mm 지점부터 토출부로 갈수록 내부직경이 점점 작아져 토출부에서의 내부직경이 7 mm가 되도록 콘(corn) 형태로 제작하였다. 그리고 가스유입관은 내경 2 mm인 스테인레스 튜브를 사용하여 액체유입관 내부의 중심에 위치하였다.

액체 저장조는 높이 1.15 m, 지름 0.92 m의 총 용량 600 L인 HDPE 재질의 탱크를 사용하였고, 정량 펌프(WT600-2J, Longer Co. China)는 회전수가 60-600

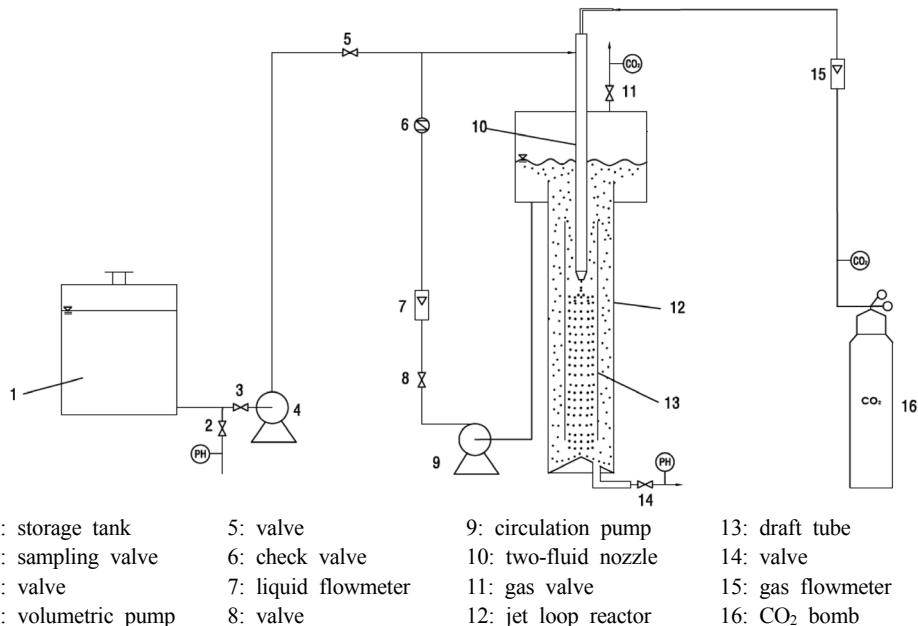


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus used in the study.

rpm(유량 180-6000 mL)인 펌프를, 순환펌프(PSS 80-066, Hanil Co. Korea)는 온양정이 0일 때 양수량이 80 L/min인 유체펌프를 사용하였으며, CO<sub>2</sub> bomb는 Air 85%와 CO<sub>2</sub> 15%의 혼합가스로 조제하여 충전하였다.

장치의 작동원리는 먼저, 정량펌프로 jet loop reactor에 모사폐수를 채운 뒤 순환펌프로 모사폐수를 공급하여 이유헤 노즐의 액체유입관으로 흘러보내고, 가스는 CO<sub>2</sub> bomb의 레귤레이터를 통해 이유헤 노즐의 가스유입관으로 연속적으로 흘러보낸다. 노즐의 토출부에서 가스유입관을 통해 유입된 가스와 액체유입관을 통해 유입된 폐수의 혼합이 이루어지고 미세버블이 형성되어 토출부로 분사된다. 노즐로부터 분사된 유체는 draft tube의 내부를 통해 하향류로 흐르게 되고, 반응조 바닥에 설치된 원뿔에 순환되는 기포가 충돌되어 더 미세한 기포로 쪼개진 후 annular space(draft tube과 반응관 사이)를 상향류로 통과하며 기포 중의 용질이 액체 중으로 흡수된다. 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 들어간다. 기-액 분리조로 흘러 들어간 유체 중 기체는 분리되어 상부 가스유출밸브를 통해 배출되고, 처리수는 순환펌프를 통해 반응기 외부로 순환되어 다시 이유헤 노즐로 분사된다. 이와 같이 가스는 연속 주입되고 반응기 내의 액체는 재순환되는 과정을 통해 중화가 이루어진다.

## 2.2. 실험방법

### 2.2.1. 모사폐수의 조제 및 중화특성 분석

본 실험에서는 실제 알칼리폐수와 유사한 모사폐수를 조제하기 위해 B시의 공업단지에서 배출되는 알칼리폐수를 샘플링 한 후 pH, COD, BOD, SS, T-N, T-P, NH<sub>3</sub>-N을 수질오염공정시험방법에 의거하여 분석하여, 그 결과를 Table 1에 나타냈다. 분석된 결과로부터 실제 알칼리폐수와 유사한 성상의 모사폐수를 만들기 위해 Tab water에 NaOH와 NH<sub>4</sub>Cl를 적정량 주입하여 모사폐수를 조제하였다. 이 조제된 모사폐수에 CO<sub>2</sub>를 함유한 모사가스를 진공펌프(DoA-P704-AA, GAST Manufacturing Inc. U.S.A)를 이용하여 0.5 L/min의 유량으로 모사폐수가 들어있는 1 L

비커에 모사가스를 주입하여 pH가 7까지 중화되는데 소요되는 시간,  $t_{pH=7}$ 을 pH meter(Orion 4Star, Thermo Scientific, Singapore)로 측정하였다.

### 2.2.2. Jet Loop Reactor에서 조업변수에 따른 모사폐수의 pH 변화

조업변수에 따른 모사폐수의 pH 변화를 알아보기 위해 모사폐수의 초기pH를 10.1, CO<sub>2</sub> 농도를 15%로 하고 모사폐수의 순환유량, 모사가스 유입유량, 온도를 조업변수로 하여 모사폐수의 pH 변화를 측정하였다. 모사폐수의 순환유량의 영향은 모사가스의 유입유량이 1 L/min조건에서 모사폐수 순환유량을 4-32 L/min로 변화시킬 경우에 각 유량에 따른 모사폐수의 pH 변화를 측정하였다. 또한 액체 온도의 영향은 순환유량이 20 L/min이고 모사가스의 유입유량이 1, 2 L/min인 조건에서 온도가 20, 25℃일 때의  $t_{pH=7}$ 을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 모사폐수의 중화특성

Table 1에서 분석된 결과를 바탕으로 실제 알칼리폐수와 유사한 중화특성을 나타내는 모사폐수를 조제하기 위해 Tab water에 NaOH와 NH<sub>4</sub>Cl 주입량을 조절하여 모사폐수를 조제한 후 CO<sub>2</sub>를 이용한 중화 실험 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2를 보면 Tab water에 NaOH만을 주입하여 pH 10.1로 조제된 폐수

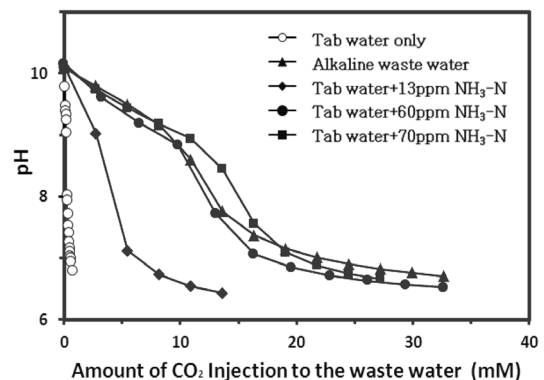


Fig. 2. Comparison of neutralization curves between wastewater and synthetic wastewater by sparging CO<sub>2</sub>-laden gas at initial liquid pH 10.1, gas flow rate 0.5 L/min, CO<sub>2</sub> concentration 15%, liquid temperature 20℃.

Table 1. Characteristics of the alkaline wastewater from B city's industrial complex

Contents	pH	COD (mg/L)	BOD (mg/L)	SS (mg/L)	T-N (mg/L)	T-P (mg/L)	NH <sub>3</sub> -N (mg/L)
Value	10.1	283.32	108.32	67.43	16.32	1.89	13.02

의 경우, 소량의 CO<sub>2</sub> 주입만으로도 pH는 7까지 급격히 떨어지지만, 일정한 NaOH주입량(pH = 10.1)에서 NH<sub>3</sub>-N의 농도가 증가할수록 pH가 7까지 저감되는 시간,  $t_{pH=7}$ 이 증가하였으며, 실험을 통해 NH<sub>3</sub>-N 농도가 60 ppm일 때 실제 알칼리폐수와 가장 유사한 중화특성을 나타내었다. 이와 같이 CO<sub>2</sub>를 이용한 중화 실험에서 NH<sub>3</sub>-N의 농도가 증가할수록  $t_{pH=7}$ 이 증가하는 원인은 모사폐수 중에 함유된 NH<sub>3</sub>-N이 완충물질로 작용했기 때문이라고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 초기 pH가 10.1이고 NH<sub>3</sub>-N농도 60 ppm인 용액을 조제하여 모사폐수로 사용하였다.

### 3.2. 조업변수에 따른 모사폐수의 중화특성

#### 3.2.1. 액체 순환유량의 영향

모사폐수의 초기 pH를 10.1, 온도를 20℃로 일정하게 유지시킨 후 CO<sub>2</sub> 농도가 15%인 모사가스의 유입유량(Q<sub>G</sub>)이 1 L/min인 조건에서, 모사폐수 순환유량(Q<sub>R</sub>)을 4-32 L/min로 변화시키면서 시간에 따른 pH변화를 각각 측정하여, 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3을 보면 모사폐수의 순환유량 변화에 따른 중화곡선에 일정한 경향성을 찾기 곤란하여, 이 결과를 Fig. 4에 각 순환유량에 따른  $t_{pH=7}$ 으로 나타내었다. Fig. 4를 보면 모사폐수의 순환유량이 4-16 L/min 영역에서는 순환유량이 증가할수록  $t_{pH=7}$ 은 감소하는 경향을 보인다. 그리고 모사폐수의 순환유량이 16-24 L/min 영역에서 최소치를 나타내며, 그 이상에서는 다시 증가하는 경향을 보였다. 이와 같은 결과가 나타나는 이유는 순환유량이 늘어날수록 draft tube와 annular space에서 이유체(기체와 액체)흐름의 난류강도가 증가되어 기-액간 물질전달율이 증진되고 이로 인하여 중화속도는 빨라지지만, 순환유량이 24 L/min을 초과하면 난류강도는 증가되어도 기-액상의 체류시간이 감소하기 때문에 오히려 중화속도는

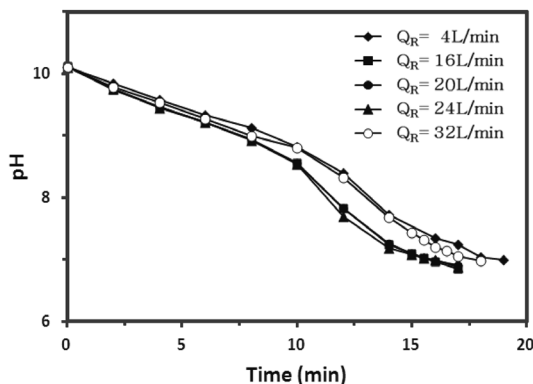


Fig. 3. pH change with respect to liquid circulation flowrate at initial pH 10.1, gas flow rate 1 L/min, CO<sub>2</sub> concentration 15%, liquid temperature 20℃.

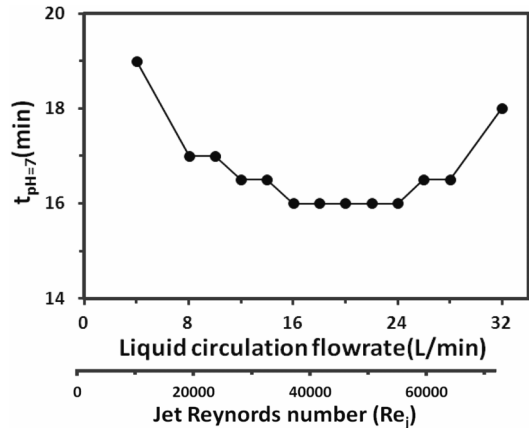


Fig. 4. Time required for approaching pH = 7 ( $t_{pH=7}$ ) with respect to liquid circulation flowrate at initial liquid pH 10.1, gas flowrate 1 L/min, CO<sub>2</sub> concentration 15%, liquid temperature 20℃.

느려지는 것으로 판단된다. 따라서  $t_{pH=7}$ 이 최소치를 나타내는 순환유량 16-24 L/min 범위를 반응기 Scale-up시 필요한 자료로 나타내기 위해 Prasad와 Ramanujam[12]가 제안한 노즐 팁부분에서의 jet Reynolds number( $Re_j$ )로 환산한 결과 이유체노즐의 최적 jet Reynolds number는 Fig. 4와 같이 33811-50716으로 나타났다.

#### 3.2.2. 유입가스 유량의 영향

앞에서와 동일한 조건(모사폐수의 초기 pH = 10.1, 액체순환유량 = 20 L/min, 폐수온도 = 20℃, CO<sub>2</sub> 가스농도 = 15%)에서 모사가스의 유입유량을 1, 1.5, 2 L/min으로 변화시켰을 때 가스의 유입유량별 pH변화를 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 기포탑에서는 가스의 유입유량이 증가할수록 기-액접촉면적은 증가되어 pH의 저감속도(즉, pH 7까지 떨어지는데 걸

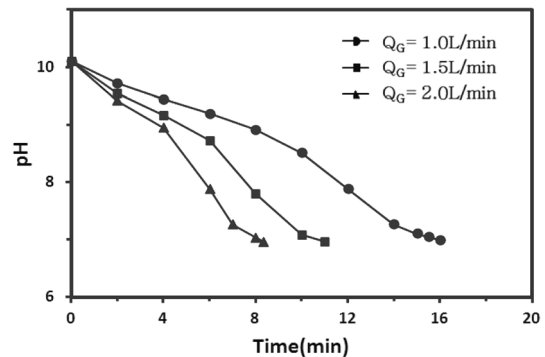
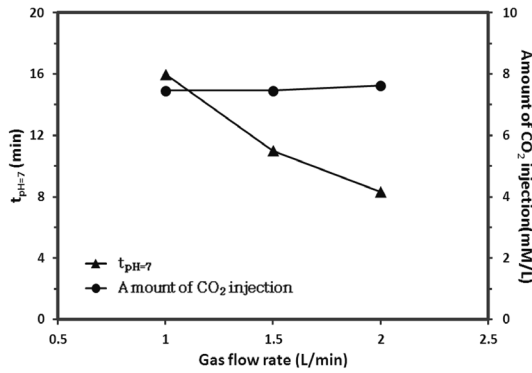


Fig. 5. pH change of the wastewater with respect to CO<sub>2</sub> gas flowrate at initial pH 10.1, liquid circulation flowrate 20 L/min, CO<sub>2</sub> concentration 15%, liquid temperature 20℃.

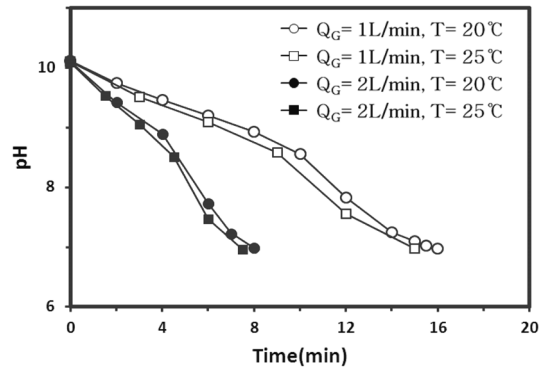
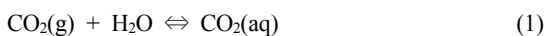


**Fig. 6.** Time required ( $t_{pH=7}$ ) and amount of  $\text{CO}_2$  injection to neutralize the wastewater from  $\text{pH} = 10.1$  to  $\text{pH} = 7.0$  with respect to gas flowrate ( $Q_G$ ) at liquid circulation flowrate 20 L/min,  $\text{CO}_2$  concentration 15%, liquid temperature 20 °C.

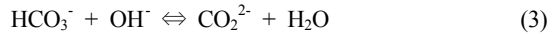
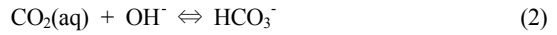
리는 시간)는 빨라지게 되나, 가스 유입유량이 증가하게 되면 기포의 크기가 커져 기포의 체류시간이 감소되므로  $\text{CO}_2$  가스의 이용율은 현저히 감소함을 보였다[13]. 그러나 본 연구에서는 Fig. 6과 같이 가스 유입량을 1, 1.5, 2 L/min으로 각각 변화시켰을 때, 용액의 pH를 10.1에서 7까지 중화하는데 소요된 시간 ( $t_{pH=7}$ )은 현저하게 감소함을 볼 수 있으나, 1 L의 용액을 중화하는데 필요한  $\text{CO}_2$  공급량에는 큰 변화를 보이지 않았다. 이와 같은 결과는 기포탐과는 달리 본 연구에서 사용한 jet loop reactor에서 이윅체 노즐에 의해 미세한 기포를 형성하기 때문인 것으로 사료된다. 그러나 모사가스의 유입유량에 대한 최적 조업 조건 범위를 찾기 위해서는 Semi-batch 시스템보다는 연속흐름 jet loop reactor를 이용하여 정량적인 실험이 이루어져야 되리라 본다.

### 3.2.3. 액체 온도의 영향

앞에서와 동일한 조건(모사폐수의 초기  $\text{pH} = 10.1$ , 액체순환유량 = 20 L/min,  $\text{CO}_2$  가스농도 = 15%)에서 모사가스의 유입유량(1 L/min과 2 L/min)과 모사폐수의 초기온도 20 °C와 25 °C에 대한 운전시간에 따른 pH 변화를 측정하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 온도의 영향을 설명하는데 필요한 실험치가 다소 부족하기는 하나, 동일한 유량에서 모사폐수의 온도가 20 °C일 때보다 25 °C일 때  $t_{pH=7}$ 이 낮게 나타났다. 이러한 결과는 알칼리 용액에서  $\text{CO}_2$ 의 흡수반응 속도식에 의해 설명이 가능하다. 알칼리 용액에서  $\text{CO}_2$ 의 흡수반응은 다음과 같은 반응 메커니즘으로 요약할 수 있다.



**Fig. 7.** pH change with respect to initial temperature of synthetic wastewater at initial pH 10.1, circulation flowrate 20 L/min,  $\text{CO}_2$  concentration 15%.



먼저  $\text{CO}_2$  (g)가 물에 흡수되어  $\text{CO}_2$  (aq)가 생성되고, 이때 흡수된  $\text{CO}_2$  (aq)는 pH가 높은 알칼리 용액에서  $\text{OH}^-$ 와 반응하여 반응식 (2)와 반응식 (3)이 진행된다. 그러나 반응식 (3)은 반응식 (2)에 비해 반응속도가 상대적으로 빠르기 때문에 알칼리 용액에서  $\text{CO}_2$ 의 흡수반응은 반응식 (2)가 전체 반응속도를 지배하게 된다고 보고된 바 있다[3]. 그리고 Pohorecki와 Moniuk[14]의 연구결과에 따르면, 반응식 (2)는 2차 비가역반응으로 간주될 수 있고, 용액의 온도가 18-41 °C인 영역에서는 반응식 (2)의 속도상수를 식 (4)와 같이 온도와 이온세기의 함수로 나타낼 수 있다고 보고하였다.

$$\log k_2 = 11.895 - \frac{2382}{T} + 0.221I_{i,s} + 0.016I_{i,s}^2 \quad (4)$$

여기서,  $k_2$ 는 반응속도상수이고, T는 온도,  $I_{i,s}$ 는 용액의 이온강도를 나타낸다.

따라서, pH가 높은 알칼리 용액에서 액의 온도가 상승하면 반응식 (4)에 따라 속도상수가 증가하여  $\text{CO}_2$ 의 흡수반응이 촉진되고, 이로 인해 Fig. 7과 같이 pH의 저감속도는 온도가 증가함에 따라 빨라지게 된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 연소 배가스와 알칼리 폐수가 동시에 발생하는 대규모 공단에서 연소 배가스 중에 함유된  $\text{CO}_2$ 를 이용하여 알칼리 폐수의 중화에 적용하기 위한 기초자료를 얻기 위해 jet loop reactor의 semi-batch식 운전에서  $\text{CO}_2$ 를 이용하여 알칼리폐수의 중화

실험을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) Tab water에 NaOH와 NH<sub>4</sub>Cl를 일정량 주입하여 모사폐수를 조제한 결과 실제 알칼리폐수와 유사한 중화특성을 나타내는 모사폐수를 조제할 수 있었다.

2) 모사폐수의 중화속도는 액체 순환유량(Q<sub>R</sub> = 4-32 L/min) 변화에 따라 큰 영향을 받았다. 본 연구에서 순환유량에 따른 중화시간을 모사폐수가 pH = 10.1에서 pH = 7까지 중화되는데 소요된 시간(t<sub>pH=7</sub>)으로 나타냈을 때, t<sub>pH=7</sub>은 액체 순환유량에 따라 감소하다 증가하는 경향을 보였으며, 순환유량 16-24 L/min 영역에서 t<sub>pH=7</sub>이 최소치를 보였다. 이 결과를 반응기 scale-up시 필요한 자료로 나타내기 위해 노즐 팁부분에서의 Reynolds number(Re<sub>j</sub>)로 환산한 결과 이류체노즐의 최적 Reynolds number는 33,811-50,716으로 나타났다.

3) 액체 순환유량이 20 L/min로 일정하고 모사가스의 유량이 1-2 L/min 범위에서 가스의 유입유량이 증가할수록 용액의 pH를 10.1에서 7까지 중화하는데 소요된 시간(t<sub>pH=7</sub>)은 현저하게 감소되었으나, 단위용량의 용액을 중화하는데 필요한 CO<sub>2</sub> 공급량은 큰 변화를 보이지 않았다.

4) 일정한 CO<sub>2</sub> 주입량 조건에서 액체 온도가 20℃에서 25℃로 상승하였을 때 중화에 소요된 시간은 짧아짐을 보였다.

## 후 기

본 연구는 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2011T100200204).

## 참고문헌

[1] Go, K. S., "A study on utilization of CO<sub>2</sub>-rich exhaust gas for pH control of alkaline wastewater", D. Dissertation, Sunchun University, 2010.

[2] Lin, C. C. and Chen B. C., "Carbon dioxide absorption into NaOH solution in a cross-flow rotating packed bed", J. Ind. Eng. Chem., 13(7), 2007, pp. 1083-1090.

[3] Fleischer, C., Becker, S. and Eigenberger, G., "Detailed modeling of the chemisorption of CO<sub>2</sub> into NaOH in a bubble column", Chemical Engineering Science, 51(10), 1996, pp. 1715-1724.

[4] Park, S. W., Ryu, J. H., Lee, S. S., Hwang, K. S. and Kumazawa, H., "Gas absorption of CO<sub>2</sub> into emulsion with alkaline aqueous solutions", J. of the Korean institute of chemical engineers, 35(4), 1997, pp. 476-484.

[5] Gaddis, E. S., "Mass transfer in gas-liquid contactors", Chemical Engineering and Processing, 38, 1990, pp. 503-510.

[6] Christel, L. and Fadavi, A., "New concept of jet loop bioreactor", Nova Biotechnologica, 4(1), 2006, pp. 89-100.

[7] Maurizio, P., Ana, E. and Federico, F., "Aerobic treatment of winery wastewater using a jet loop activated sludge reactor", Process Biochemistry, 37(8), 2002, pp. 821-829.

[8] Kang, S. H., "The effects of influent loading rate in piggery wastewater treatment by Jet Loop Reactor", Environmental re, 21(5-B), 2001, pp. 567-573.

[9] Park, J. T., Lee, G. H., Lyu, W. R. and Jo, M. H., "Biological treatment of dyeing wastewater using Jet Loop Reactor with activated carbon supports", KSBB Journal, 17(3), 2002, pp. 241-246.

[10] Yildiz, E., Keskinler, B., Pekdemir, T., Akay, G. and Nuhoglu, A., "High strength wastewater treatment in a jet loop membrane bioreactor: kinetics and performance evaluation", Chemical Engineering Science, 60, 2005, pp. 1106-1116.

[11] Velan, M., Ramanujam, T. K., "Mixing time in a down-flow jet loop bioreactor", Bioprocess Engineering, 12, 1995, pp. 81-86.

[12] Prasad, K. Y., Ramanujam, T. K., "Overall volumetric mass transfer coefficient in a modified reversed flow jet loop bioreactor with low density particles", Bioprocess Engineering, 12, 1995, pp. 209-214.

[13] Peng, Y., Zhao, B., Li, L., "Advance in post-combustion CO<sub>2</sub> capture with alkaline solution: a brief review", Energy Procedia, 14, 2012, pp. 1515-1522.

[14] Pohorecki, R. and Moniuk, W., "Kinetics of reaction between carbon dioxide and hydroxyl ions in aqueous electrolyte solutions", Chemical Engineering Science, 43(7), 1998, pp. 1677-1684.