



## 유해가스 흡수처리를 위한 저비용 고효율 스크러버의 최적 설계기준 및 현장적용 방안

정가영 · 임경민 · †마병철\*

전남대학교 화학공학과 석사, \*전남대학교 화학공학과 교수  
(2021년 5월 28일 접수, 2021년 6월 24일 수정, 2021년 6월 25일 채택)

### Optimal Design Standard and Application of Low Cost, High Performance Scrubber for Absorbing Hazardous Gas

Ga-Young Jung · Kyung-Min Lim · †Byung-Chol Ma

Dept. of Chemical engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea  
(Received May 28, 2021; Revised June 24, 2021; Accepted June 25, 2021)

#### 요약

사업장에서 유해가스를 처리하는 스크러버는 처리효율은 높으나 설계가 복잡하고 24시간 펌프를 가동시켜야 하므로 많은 비용이 소모될 수 있다. 따라서, 영세한 사업장에서는 스크러버를 설치하지 않거나 순환펌프의 작동을 중지한 상태로 스크러버를 운영하여 운영비를 최소화하고 있다. 이에, 본 연구에서는 소규모 사업장에서 경제적으로 활용할 수 있는 저비용 고효율 스크러버에 대한 적용방안을 연구하였다. 저비용 고효율 스크러버는 bubble column의 방식을 적용하여 유해화학물질 흡수처리 목적으로 장치를 활용하는 것으로, 이러한 스크러버의 개발을 위하여 실험을 통해 흡수성능을 검토하였으며 특정 조건에서 물리적 조건 변화에 따른 유해가스 흡수효율 변화 및 최적의 적용방안을 연구하였다. 그 결과, 저비용 고효율 스크러버로 유입되는 기체를 어느 정도 처리할 수는 있었으나 처리능력이 저하되는 문제가 발생하여 흡수액 공급을 통해 성능저하를 방지하고 순환량에 따라 일정 수준의 흡수율을 유지할 수 있는 것을 확인할 수 있었다. 이를 기반으로 최종적으로는 적정 순환시점 및 동결 방지방안을 포함한 저비용 고효율 스크러버의 현장 적용방안을 3가지 방식(type)으로 제시하였다.

**Abstract** - Scrubbers that treat hazardous materials at workplaces have high treatment efficiency; however, the design is complex, and pumps need to be operated 24 hours a day, which can be costly. Therefore, to minimize the operating costs, small businesses do not install scrubbers, or operate them while circulation pumps are suspended. Hence, this study investigated the application of low-cost, high-performance scrubbers that can be used economically in small businesses. Low-cost, high-efficiency scrubbers are applied to bubble columns to utilize devices for hazardous chemical absorption treatment purposes, and for the development of these scrubbers, absorption performance was reviewed and the optimal application method was studied under certain conditions. The changes in the absorption performance of hazardous gas were studied in certain environments by varying the physical conditions, and the optimal application methods were analyzed. The results showed that, while it was possible to treat some of the gas flowing into the low cost, high performance scrubber, the treatment capacity was reduced. Performance degradation was prevented by supplying an absorption liquid, and a certain level of absorption was maintained depending on the amount of circulation. Based on this, three types of site application methods of low cost, high performance scrubbers were presented. In addition, the appropriate timing of circulation and anti freezing measures were also discussed.

**Key words** : scrubber, wet treatment, hazardous gas, low cost

†Corresponding author: anjeon@jnu.ac.kr

## I. 서론

화학물질은 그 활용가치가 높은 만큼 독성, 인화성, 반응성에 따른 유해·위험성이 크기 때문에 취급에 많은 주의가 필요하다. 특히, 석유화학 공장 등에서 공업적으로 화학물질을 취급하는 경우에는 저장, 이송, 운반, 반응 등이 대량으로 이루어지고 고온 또는 고압조건에서 취급되는 경우가 많기 때문에 안전밸브 등을 통하여 유해물질이 배출되는 경우 대형 사고로 이어질 수 있다. 따라서, 안전밸브 후단에 스크러버를 연결하여 안전하게 처리하여야 하나, 스크러버는 본체에 충전제를 넣고 순환펌프 등으로 흡수액을 24시간 순환시켜야하므로 초기설치 및 상시운영 등에 많은 비용이 들 수 있어 영세한 기업 등은 스크러버를 설치하지 않거나 설치하였다 하더라도 순환펌프의 작동을 중지시켜 운영비를 최소화하고 있다[1,2]. 이에, 소규모 사업장에서 경제적으로 사용할 수 있는 저비용 고효율 스크러버를 개발하고자 하였다.

저비용 고효율 스크러버 개발을 위해 bubble column 방식을 활용하여, 최적의 유해가스 흡수처리 효율을 도출하기 위한 실험장치 설계, 절차 등을 도출하였으며, 물리적 조건 변화에 따른 유해가스 흡수처리 효율 및 최적의 적용방안 및 현장 적용방안을 연구하였다.

## II. 실험방법 및 내용

본 연구에서는 bubble column과 유사한 형태로 저비용 고효율 스크러버를 설계하여 유해가스 처리장치로서의 성능을 검증하기 위한 흡수성능 평가실험 및 흡수액 공급 여부에 따른 순환실험을 수행하고 그 결과를 분석하여 장치의 실질적인 적용방안을 도출하였다.

### 2.1. 실험장치

실험장치는 Fig.1과 같이 column, gas cylinder, 계측 및 제어기기(EPC, MFC, PT, FT), sparger 등으로 구성되어 있으며, 공급 기체는 비교적 물에 대한 흡수율이 높고, 독성이 적은 물질인 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)를 사용하였다.

Column은 수두압 등에 따른 영향을 고려하여 stainless 재질(SUS 304)로 제작하였으며, bubble column scale-up 설계기준(criteria)<sup>1)</sup>[3,4]에 따라 230 × 230 × 1350 mm<sup>3</sup>

(원형 단면적 기준 직경( $D_c$ ) 260 mm, 높이 1,350 mm (liquid height)) 크기로 설계하였다. sparger orifice의 직경( $d_o$ )은 5 mm, orifice 간의 간격(pitch)은 20 mm로 하였다. 기체가 유입·배출되는 배관(pipe)은 1/4" SWL, 액체(물)가 유입·배출되는 배관(pipe)은 1/2" PT-F이며, 수증기의 유입에 따른 측정오차를 줄이기 위해 column 상부의 기체가 배출되는 경로에 수분 제거 필터(dehydrating filter)를 설치하였다.

또한, 유입기체의 압력 및 유량을 제어(control)하고, 배출되는 기체의 압력과 유량을 측정하기 위해 EPC, MFC를 column 전단에, PT, FT를 column 후단에 설치하고, 그 측정값을 시간별로 기록하였다.

### 2.2. 실험방법 및 절차

본 연구의 기체 흡수 실험에서 고정된 실험조건은 column diameter, liquid height, pipe diameter, sparger type, orifice diameter and pitch, number of holes, kind of gas and liquid, temperature이며, 흡수성능 평가실험은 유입되는 기체의 압력(bar)과 유량( $\ell/\text{min}$ )의 조작을 통한 차이점 및 시간에 따른 흡수율의 거동에 대한 분석을 목적으로 수행하였다[5,6,7]. 순환 실험은 흡수성능 평가실험의 한계점(포화에 따른 흡수효율 감소) 극복과 흡수액 순환 시스템의 작동 시점에 따른 영향 분석이 주된 목적이며, 나아가 초기의 흡수속도(흡수효율)를 유지하기 위한 운전 조건을 실험적으로 도출하고자 하였다[8,9,10].

흡수성능 평가실험은 일정량의 물(liquid height, 1,350 mm)을 column 내에 정체(hold-up)시킨 후 유입 기체를 0.14 ~ 0.29 bar(gauge) 압력 범위에서 각 set마다 유량(3.00 ~ 6.00  $\ell/\text{min}$ )을 변화시켜 흡수율(absorption fraction)이 0에 근접하는, 즉 평형상태에 도달할 때까지 수행하였다. 순환 실험의 경우 EPC와 MFC의 설정치를 고정한 상태에서 흡수액(물)의 순환 시점을 0 min(continuous), 10 min, 20 min, 30 min, 50 min, 70 min으로 설정하여 각각 실험을 수행하였으며, 흡수액의 순환량을 조작하면서 실험을 진행하였는데, space time( $V_L/q_L$ )이 10 (min), 20(min), 30(min)이 되는 유량인 7.0  $\ell/\text{min}$ , 3.6  $\ell/\text{min}$ , 2.4  $\ell/\text{min}$ 의 액체 순환량으로 각각 실험을 수행하였다.

1) criterion 1 : The diameter of the bubble column is larger than 0.15 m.

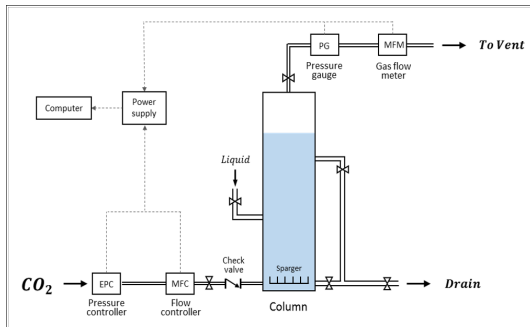
criterion 2 : The aspect ratio(the ratio between the

height,  $H$ , and the diameter of the column,  $D_c$ ) is larger than 5.

criterion 3 : The gas sparger openings diameter,  $d_o$ , is larger than 1 ~ 2 mm.

**Table 1.** Experimental types and conditions.

Experiment no.	Type of experiment	Input gas pressure (bar, gauge)	Input gas flow rate, $q_V$ ( $\ell/\text{min}$ )	Input liquid flow rate, $q_L$ ( $\ell/\text{min}$ )
Experiment 1	non-circulating	0.14 ~ 0.19	3.00	-
Experiment 2	non-circulating	0.23 ~ 0.29	6.00	-
Experiment 3	circulating	0.14 ~ 0.29	6.00	2.4
Experiment 4	circulating	0.14 ~ 0.29	6.00	3.6
Experiment 5	circulating	0.14 ~ 0.29	6.00	7.0
Experiment 6	circulating	0.14	1.50	7.0 ~ 7.2



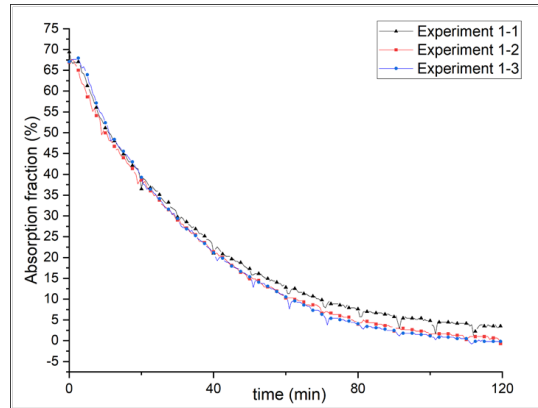
**Fig. 1.** Experimental set up and instrumentation.

### III. 실험결과

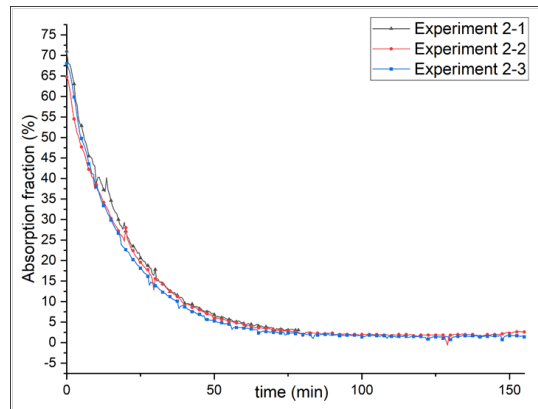
#### 3.1. 흡수성능 실험결과(흡수성능 평가실험)

실험을 통해 도출한 시간별 흡수율은 Fig.2 및 Fig.3 과 같다. 실험결과, 예상대로 초기에는 일정량의 기체가 흡수되었다가 흡수율이 점차 감소하는 것을 알 수 있으며, 장치 내 흡수액 대비 기체 공급량( $q_V/V_L$ )이 적을수록 포화되는 정도가 적은 것을 알 수 있다.

기체의 공급 유량이 3.00  $\ell/\text{min}$ 인 경우 유입 기체의 압력은 0.14 ~ 0.19 bar(gauge)이며, 초기 흡수율은 67 ~ 72 %였으나 Fig.2에서 알 수 있듯 흡수속도가 지속적으로 감소하여 실험 시작 25분 후에는 처음 흡수율의 절반 수준인 33 ~ 35 %, 60분 후에는 10 ~ 11 %, 90분 이후에는 0 ~ 5 %로 그 값이 크게 감소하였다.



**Fig. 2.** Absorption fraction over time under non-circulating condition (gas; 3.00  $\ell/\text{min}$ , 0.14 ~ 0.19 bar).



**Fig. 3.** Absorption fraction over time under non-circulating condition (gas; 6.00  $\ell/\text{min}$ , 0.23 ~ 0.29 bar).

기체 공급 유량을 2배로 늘린 6.00  $\ell/\text{min}$  실험에서는 유입 기체 압력이 0.23 ~ 0.29 bar(gauge)이었으며, 이전 실험에서와 같이 초기 흡수율은 65 ~ 71 % 수준이었으나 Fig.3에서와 같이 낮은 유량에 비해 흡수율이 빠른 속도로 감소하여 실험 시작 55분 이후에는 0~5 % 수준으로 현저히 낮아진 것을 알 수 있다.

이러한 결과로부터 흡수액의 포화 정도가 흡수율 저하에 미치는 영향이 크고, 유입되는 기체의 유량이 클수록 흡수되는 기체의 양이 많아 포화상태(평형상태)에 도달하는 속도가 빨라져 흡수효율이 비교적 단 시간에 감소하는 경향이 있음을 확인하였다.

시간 범위별 총 흡수율을 계산한 결과는 Fig.4,

Fig.5와 같다. 5분 간격으로 전체 흡수율을 누적 계산한 결과, 초기 5분 동안은 64~67 %로 비교적 높은 처리율을 보였으나 Fig.2, Fig.3에서 알 수 있듯 액체의 농도가 높아짐에 따라 흡수속도가 감소하였다. 가스 공급 유량이 3.00 l/min인 첫 번째 실험(experiment 1)에서는 실험 시작 시점부터 120분까지의 총 흡수율이 18~21 % 수준이었으며, 6.00 l/min인 두 번째 실험(experiment 2)에서는 그 절반 정도의 시간인 0~65분에서의 총 흡수율이 18~23 %, 0~85분 범위에서는 14~19.5 % 수준에 머물렀다.

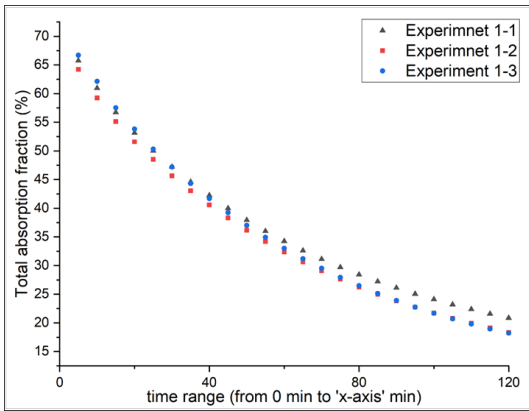


Fig. 4. Total absorption fraction by time range under non-circulating condition (gas; 3.00 l/min, 0.14 ~ 0.19 bar).

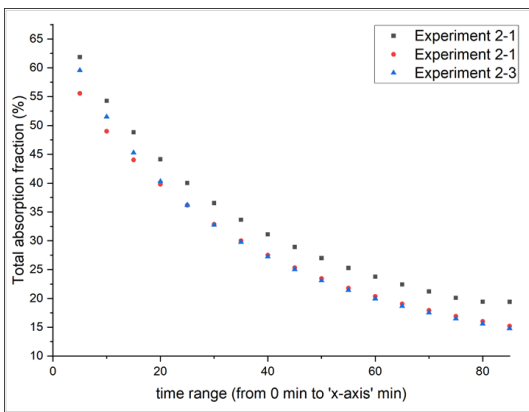


Fig. 5. Total absorption fraction by time range under non-circulating condition (gas; 6.00 l/min, 0.23 ~ 0.29 bar).

### 3.2. 최적 설계기준 도출(순환실험)

앞서 수행한 성능 실험(흡수성능 평가실험)결과에서 알 수 있듯 column 내 체류하고 있는 액체가 포화됨에 따라 기-액 흡수의 구동력(driving force)이 감소하여 흡수효율이 현저히 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 흡수성능 저하라는 한계점을 극복하기 위해 흡수액(물)을 공급·배출하는 순환실험을 수행하였다.

실험결과를 Table 2, Fig.6, Fig.7, Fig.8과 같다. 공통적으로 앞선 실험과 같이 흡수액을 순환시키지 않은 상태에서는 흡수율이 지속적으로 감소하였고, 순환을 시작함과 동시에 흡수율이 급격히 상승하며 흡수성능 저하가 더 이상 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

충분한 시간이 지나 정상상태에 도달한 경우 순환 시작 시점에 관계없이 일정한 흡수율을 유지하는 것을 확인할 수 있었으며, 정상상태에서의 흡수율은 액 체 순환량에 비례하는 결과를 도출하였다(Table 2).

Table 2. Absorption fraction at steady state by experiments.

Experiment no.	$q_L$ (l/min)	$V_L/q_V$ (min)	Absorption fraction at steady state (mol %)
Experiment 3	2.4	11.9	27 ~ 30
Experiment 4	3.6		34 ~ 37
Experiment 5	7.0		40 ~ 45
Experiment 6	7.0 ~ 7.2	47.6	60 ~ 68

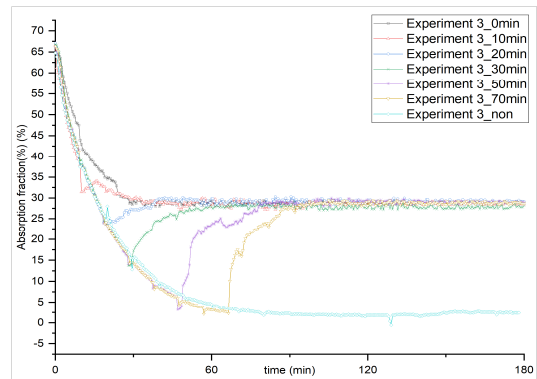
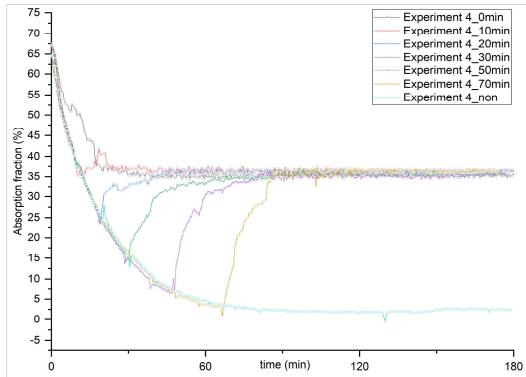
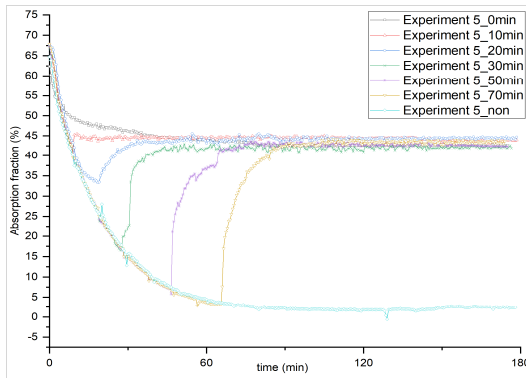


Fig. 6. Absorption fraction over time under circulating condition (gas; 6.00 l/min, 0.23 ~ 0.29 bar, liquid; 2.4 l/min).



**Fig. 7.** Absorption fraction over time under circulating condition  
(gas ; 6.00 ℓ/min, 0.23 ~ 0.29 bar, liquid ; 3.6 ℓ/min).



**Fig. 8.** Absorption fraction over time under circulating condition  
(gas ; 6.00 ℓ/min, 0.23 ~ 0.29 bar, liquid ; 7.0 ℓ/min).

이러한 결과로부터 초기에 흡수율이 저감되는 포인트를 확인한 후 곧바로 수돗물을 공급할 경우 전체적인 처리효율이 크게 줄어들지 않는 것을 알 수 있었다.

### 3.3. 최적 순환시점

본 연구의 실험결과를 기반으로 체류하는 액체의 양 ( $V_L$ ) 및 유입되는 가스의 유량( $q_V$ )에 따른 적정 순환시작 시점과 액체 순환량을 제시하고자 한다. 적정 순환시점을 초기 가스 처리속도(흡수율)의 50%가 되는 시점( $t^*$ )으로 정하면, 실험으로부터 도출된 결과는 Table 3과 같다. 또한, CO<sub>2</sub> - Tap water 기준 기-액 비 ( $V_L/q_V$ )에 따른 적정 순환시점( $t^*$ )을 다음 식을 통해

**Table 3.** Time to start of liquid circulating based on the results of experiments by conditions.

Initial absorption fraction of gas (mol%)	Input gas flow rate, $q_V$ (ℓ/min)	Volume of liquid in column, $V_L$ (ℓ)	$V_L/q_V$ (min)	$t^*$ (min)
70	1.5	71.4	47.6	49
67	3.0		23.8	24
67	6.0		11.9	10

예측할 수 있다[11,12,13].

$$t^* = -0.00353\left(\frac{V_L}{q_V}\right)^2 + 1.302\left(\frac{V_L}{q_V}\right) - 4.994 \quad (1)$$

액체 공급량의 경우 experiment 6의 결과(Fig.8)를 통해 볼 때 초기수준의 흡수율을 유지하기 위해서는 액체 유입량( $q_L$ )이 기체 유입량( $q_V$ )의 5배 이상( $q_L/q_V \geq 5$ ) 되어야 할 것으로 보이며, 순환 시스템의 흡수액 공급시기를 식 (1)을 활용하여 계산할 수 있다[14,15,16, 17].

### 3.4. 현장적용 방안

저비용 고효율 스크러버를 현장에 적용할 수 있는 방법은 Table 3과 같이 총 3가지 방식(type)이다.

Type 1은 흡수처리를 위한 최소한의 요건만 갖춘 것으로 column에 흡수액을 채워놓은 형태이며 구조가 간단하여 유입되는 기체의 양이 적거나 단시간에 처리가 가능한 경우에 활용하는 것이 적절하다. Type 2와 Type 3은 흡수액 공급 시스템을 추가한 것으로 Type 2의 경우 작업자가 수동으로 흡수액 공급 밸브를 개방하는 방식이며, Type 3의 경우 Fig.9와 같이 유입 기체의 유량을 측정하여 흡수액 공급, 액위(liquid level) 및 퍼지가스 공급 등을 자동으로 제어하는 시스템이다. 이는 평시에는 펌프 동력비 등의 에너지 비용 절감을 위해 펌프를 가동하지 않고 사고 발생 시 액체가 순환되도록 함으로써 경제적인 측면에서 강점이 있다.

다만, 겨울철 낮은 기온으로 column 내 체류하고 있는 액체가 동결되어 흡수 기능을 상실하게 될 수 있어 별도의 동결방지 조치를 취할 필요가 있다. 이는 다음과 같은 방법으로 해결할 수 있다.

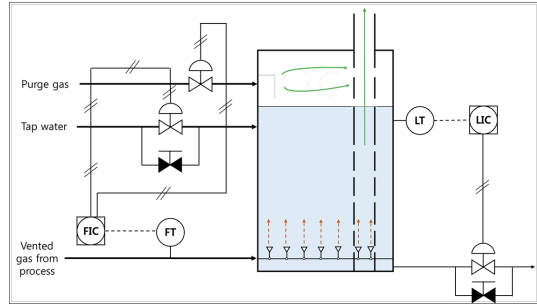
**Table 4.** Site Application of Low-cost, High-performance Scrubbers

	Type 1	Type 2	Type 3
Equipment Application Cases	When the volume is small or can be treated in a short time such as those connected to small volume reactors.	When the discharge gas volume is large or treatment takes a long time	
Absorption Liquid Supply	none	supply (manual)	supply (automatic control system)
Anti-freeze Prevention Application	apply	apply	apply
Remark	The absorption fraction may decrease depending on the total volume of input gas, but the structure is simple.	The reduction in absorption fraction is offset by manually supplying the absorption liquid at the optimal circulation time as instructed.	The absorption liquid can automatically be supplied depending on the input gas status, and its volume can be controlled depending on the gas volume; however, the structure is complex and may increase costs.

1. Electric coil heating : 코일(coil)을 이용하여 유체를 가열하여 온도를 상승시키는 방법이다.
2. CaCl<sub>2</sub> brine : 겨울철 물 대신 어는점이 낮은 CaCl<sub>2</sub> 용액을 사용하여 동결을 방지하는 방법이다[18]. 다만, 흡수성능이 떨어지는 문제가 발생할 수 있다.
3. 간헐적 순환 : column 내 일부 액체를 순환시키는 방법이다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 스크리버에 비해 설계가 간단하고 유지·보수가 쉬우며 에너지비용이 절감되는 소규모



**Fig. 9.** Wet treatment process using bubble column(design plan).

사업장 맞춤형 저비용 고효율 스크리버에 대해 연구하였다. 그 결과는 다음과 같다.

1. 실질적인 흡수성능 파악을 위해 실험장치를 설계하여 실험한 결과, 저비용 고효율 스크리버는 유입되는 기체를 어느 정도 처리할 수는 있으나 액상 농도가 상승하여 처리능력이 저하되는 문제가 있었다.
2. 따라서 흡수액을 공급하는 실험을 수행하여 흡수액을 공급함으로써 액체농도의 상승을 억제시키고 일정 수준의 흡수율을 유지하는 것을 확인할 수 있었으며, 액체 순환량이 많아질수록 정상상태 흡수율이 상승하는 것을 알 수 있었다.
3. 결과적으로, 소규모 사업장에서의 활용성을 고려하여 처리해야 하는 물질의 양, 설치비용 등을 고려하여 총 3가지 형태의 적용방안을 제시하였다(Table 4).

저비용 고효율 스크리버는 24시간 흡수액이 순환되지 않는 소규모 사업장에 적용 시 사업장의 특성과 여건에 따라 적절한 방식(type)을 적용할 수 있다는 장점이 있으며, 지속적인 연구를 통해 흡수성능 향상, 비용저감 등 현장 적용성을 높일 계획이다.

#### 감사의 글

이 논문은 전남대학교 학술연구비(과제번호: 2017-2920) 지원에 의하여 연구되었음

This study was financially supported by Chonnam National University(Grant number: 2017-2920)

#### 사용기호

- $t^*$  : Time to start of liquid circulating (min)
- $V_L$  : Volumn of liquid in column( $\ell$ )
- $q_V$  : Input gas flow rate ( $\ell/\text{min}$ )

## REFERENCES

- [1] Coker, A.K., *Ludwig's Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants Fourth Edition Volume 2*, Gulf Professional Publishing (2010)
- [2] L.A. Prado Barragán, C. Hennigs, *Biotransformation of Agricultural Waste and By-Products*, The Food, Feed, Fibre, Fuel (4F) Economy, (2016)
- [3] Besagni, G., Gallazzini, L., Inzoli, F., "On the scale-up criteria for bubble columns", *Petroleum*, 5(2), 114-112, (2019)
- [4] Wilkinson, P.M., Spek, A.P., "Design parameters estimation for scale-up of high-pressure bubble columns", *AIChE J.*, 38(4), 544-554, (1992)
- [5] D.Legendre, Ron Zevenhoven, "A numerical Euler - Lagrange method for bubble tower CO<sub>2</sub> dissolution modeling", *Che. Eng. Res. Des.*, 111, 49-62, (2016)
- [6] D.Legendre, Ron Zevenhoven, "Detailed experimental study on the dissolution of CO<sub>2</sub> and air bubbles rising in water", *Che. Eng. Sci.*, 158, 552-560, (2017)
- [7] Xiaokang Yan, Yan Jia, "Drag coefficient fluctuation prediction of a single bubble rising in water", *Chem. Eng. Journal.*, 316, 553-562, (2017)
- [8] Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott, *Unit operations of chemical engineering*, Mc Graw-Hill, 7th edition, 441-512, (2015)
- [9] James R. Welty, Gregory L. Rorrer, David G. Foster, *Fundamentals of momentum heat and mass transfer*, Wiley, 6th edition, 556-591, (2015)
- [10] P.H.Calderbank and M. Moo-Young, "The continuous phase heat and mass-transfer properties of dispersions", *Chem. Eng. Sci.*, 16(1-2), 39-54, (1961)
- [11] Liu Liu, Hongjie Yan, "Experimental studies on the terminal velocity of air bubbles in water and glycerol aqueous solution", *Experimental Thermal and Fluid Science.*, 78, 254-265, (2016)
- [12] D. Colomber, D. Legendre, "Experimental study of mass transfer in a dense bubble swarm", *Chem. Eng. Sci.*, 66(14), 3432-3440, (2011)
- [13] R. Krishna, M.I. Urseanu, "Rise velocity of a swarm of large gas bubbles in liquids", *Chem. Eng. Sci.*, 54(2), 171-183, (1999)
- [14] R. Clift, J.R. Grace, M.E. Weber, *Bubbles, Drops, and Particles*, Academic Press, New York, (1978).
- [15] H.D. Mendelson, "The prediction of bubble terminal velocities from wave theory", *AIChE J.* 13, 250-253, (1967)
- [16] M. Jamialahmadi, C. Branch, *Terminal bubble rise velocity in liquids*, Chem. Eng. Res. Des. 72, 119-122, (1994)
- [17] Don W. Green, Robert H. Perry, *Perry's chemical engineers' handbook*, Mc Graw-Hill, 8th edition, (2008)
- [18] S.J.T.Hangx, *Rate of CO<sub>2</sub> mineralisation and geomechanical effects on host and seal formations*, CATO Workpackage WP 4.1, (2005)