



# 슬릿노즐기반 응집·공기부상공정을 통한 유류폐수 전처리

## Pre-treatment of oily wastewater using a coagulation-DAF process with slit-nozzle

최상기·김영모\*  
Sangki Choi·Youngmo Kim\*

광주과학기술원, 지구환경공학부, 광주광역시 북구 첨단과기로 123, 61005  
School of Earth Sciences and Environmental Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology, Gwangju, Buk-gu, Cheomdangwagi-ro 123, 61005

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

### ABSTRACT

Large amounts of oily wastewater discharged from various industrial operations (petroleum refining, machinery industries and chemical industries) cause serious pollution in the aquatic environment. Although dissolved air flotation (DAF) separating oil pollutants using microbubbles represents current practice, bubble size cannot be selectively controlled, and lots of power is required to generate microbubbles. Therefore, to investigate performance of the DAF process, this study examined the distribution of different sizes of microbubbles resulting from changes in physical shear force via modifying shapes of a slit-nozzle without an additional power supply. Three types of slit-nozzles (different angle, shape and length of the slit-nozzle) were used to analyze the distribution of bubble size. At a slit angle of 60°, shear force was 4.29 times higher than a conventional slit, and particle size distribution (PSD) in the range between 2 and 20 μm more than doubled. Treatment efficiency of synthetic oily wastewater through the coagulation-DAF process achieved 90% removal of COD by injecting FeCl<sub>3</sub> and PACl of 250 mg/L and 100 mg/L, respectively, and the same performance resulted using FeCl<sub>3</sub> of 200 mg/L and PACl of 80 mg/L employing a slit-nozzle angle of 60°. This study shows that a coagulation-DAF process using a modified slit-nozzle can improve the pre-treatment of oily wastewater.

**Key words:** Oily wastewater, Dissolved air flotation, Coagulation, Slit-nozzle, Microbubble

**주제어:** 유류폐수, 용존공기부상법, 응집, 슬릿노즐, 미세기포

## 1. 서론

석유 정제, 기계 산업, 화학 산업 등 각종 산업분야에서 발생하는 유류폐수는 유화되지 않은 상태의 free oil 과 유화된 상태의 에멀전(oil-in-water emulsion)으로 구분되며, 산업폐수 내에서 유분은 대부분 에멀전 상태로 존재하고 있다 (Gryta et al., 2001). 특히 산업폐수 내 에

멀전은 폐수에서 유래된 소량의 계면활성제와 작용하여 액상에서 안정된 상태로 존재하며, 이는 유화된 오일의 효율적인 분리 및 처리에 문제를 야기하고 있다 (Luthy et al., 1978). 석유정제품 제조시설의 원폐수 시료 분석 결과를 살펴보면 유기물질 부하량은 일반 폐수와 유사하나 페놀, N핵산, PCB 등 복합적인 오염물질을 포함하여 추가적인 처리공정이 요구되고 있다 (MOE, 2010). 이러한 복합유류오염물질의 독성은 기존 하수처리시설 내 생물공정에 영향을 끼치며, 처리 효율 및 공

Received 17 September 2018, revised 5 October 2018, accepted 12 October 2018.

\*Corresponding author: Youngmo Kim (E-mail: [youngmo@gist.ac.kr](mailto:youngmo@gist.ac.kr))

정운영에 문제를 발생시켜 유류폐수의 적절한 전처리가 요구되는 실정이다 (Zhou et al., 2008).

산업유류폐수를 처리하기 위한 전통적인 방법으로 american petroleum institute(API)와 parallel plate interceptor(PPI)와 같은 중력 분리방식을 통한 유수분리 공법이 개발되었지만, 중력식 유수분리 장치의 경우 free oil과 같은 자유상에 유효하며, 직경 150  $\mu\text{m}$  이하의 에멀전 상태의 미립자는 제거될 수 없는 제한점을 가지고 있다 (Kim and Park, 1993; Suzuki and Maruyama, 2005). 반면 dissolved air flotation(DAF) 공정은 저밀도의 부유입자 제거를 통한 탁도 개선뿐만 아니라, 초미세기포와의 접촉을 통해 액상에 분산되어 있는 유분도 함께 제거할 수 있는 공법으로써 유류폐수 전처리 공정에 효과적인 것으로 알려져 있다 (Al-shamrani et al., 2002). 또한, DAF 공정은 수계 내 용존된 이온, 생체 분자, 조류, 염색물질 등 다양한 오염원의 처리효율성이 입증되어 다양한 폐수를 대상으로 많은 연구가 진행되고 있다 (Zabel, 1985; Zouboulis and Avranas, 2000; Al-shamrani et al., 2002; Suzuki and Maruyama, 2005).

DAF 공정의 처리효율 증대를 위한 가장 중요한 요소는 미세한 크기의 공기방울을 형성하는 것이다. 작은 입경의 미세기포는 상대적으로 낮은 부상속도로 체류하며 다른 물질과의 접촉 기회를 높일 수 있다 (Hanotu et al., 2013). 그러나 일반적인 DAF 공법은 초미세기포 발생을 위해 가압펌프 순환을 통한 과다한 동력이 투입되며, 기포의 균일도가 낮게 형성되어 처리효율이 감소하는 단점이 있다. 이외에도 초미세기포의 입경이 선택적으로 제어되지 못하여 대상폐수에 따른 적절한 처리가 불가능한 실정이다. 일본에서 진행된 한 연구에 따르면, 추가 동력 투입 없이 노즐 내 슬릿의 각도 변형을 통해 미세기포 발생 가능성을 제시하였지만, 슬릿에 작용하는 구체적인 전단 비 및 처리효율성에 관한 추가적인 연구는 현재까지 진행되지 않았다 (Hasegawa et al., 2008). 따라서 본 연구에서는 computational fluid dynamics(CFD)를 통해 노즐의 각도 및 형태 변형에 따른 전단 비를 제시하고, 이에 따른 미세기포의 입경별 발생 빈도의 영향성을 조사하였다. 합성유류폐수를 대상으로 최적응집제 주입량을 산정하여 응집-DAF공정의 전처리 효율을 분석하였고, 슬릿노즐을 통한 유류폐수 처리효율 개선에 관한 연구를 수행하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 합성유류폐수 제조

본 연구에서 대상으로 하는 산업유류폐수의 COD 농도(7,900~11,000 mg/L)에 맞춰 합성유류폐수는 COD 기준 10,000 mg/L의 성상으로 제조하였다 (Zerva et al., 2003; Pouloupoulos et al., 2005). 국내 일반주유소의 휘발유와 경유, 그리고 Shell Global Co.(Huston, USA)사의 엔진오일을 1 : 1 : 1 비율로 혼합하여 수돗물에 40 배 희석하였으며, 계면활성제로 Sigma-Aldrich Ltd.(Dorest, UK)사의 span 20을 0.01%(부피비)로 주입하고 24시간 동안 급속 교반하여 유화시킨 후 실험에 사용하였다.

### 2.2 분석 방법

합성유류폐수를 대상으로 전처리 효율의 분석을 위하여 chemical oxygen demand(COD)는 표준분석법 (APHA, 2005)에 따라 분석을 하였으며, total organic carbon(TOC)는 vario TOC analyzer(Elementar, Hanau, Germany)를 통해 측정하였다.

DAF 공장에서 적용될 슬릿노즐의 제작 및 평가를 위해 autodesk CFD를 이용하여 수리 시뮬레이션을 수행하였으며, 모델에 사용된 유량은 2.5 L/min으로 설정하였다. 미세기포의 입경을 측정하기 위해 입도분석 장치(PC3400, Chemtrac, USA)를 이용하여 2~125  $\mu\text{m}$  범위 내 7가지 범주(2~20  $\mu\text{m}$ , 20~40  $\mu\text{m}$ , 40~60  $\mu\text{m}$ , 60~80  $\mu\text{m}$ , 80~100  $\mu\text{m}$ , 100~125  $\mu\text{m}$ , 125  $\mu\text{m}$  이상)로 분류하여 기포발생량을 정량적으로 분석하였으며, 총 버블 발생량 대비 특정 크기의 미세기포 비율 분포도 함께 분석하였다 (Han et al., 2007).

### 2.3 실험조건

#### 2.3.1 응집 실험

최적의 응집제 주입량 및 교반조건은 대표적인 응집제 ferric chloride( $\text{FeCl}_3$ )와 poly aluminum chloride(PACl)를 사용하여 jar-tester(SF6 model, Misung, Korea)를 통해 산정하였다. 응집제 주입 농도는 5 L의 합성유류폐수를 기준으로 각각  $\text{FeCl}_3$  100~250 mg/L, PACl 40~100 mg/L 범위로 주입하였으며, 150 rpm에서 1분 동안 급속교반 후 20 rpm으로 15분 동안 완속교반을 진행하였다. 반응이 완료된 시료는 곧바로 DAF 공정으로 유입시



켜 12분 동안 부상공정을 거친 후 시료를 채취하여 COD와 TOC를 측정하였다.

### 2.3.2 DAF 실험

DAF 실험에서는 슬릿노즐을 통한 미세기포 입경의 분포를 조사하였으며, 합성유류폐수를 대상으로 응집-DAF 공정을 적용하여 COD 및 TOC의 농도 변화를 평가하였다. 본 연구에서 사용된 실험실 규모의 DAF 반응조(Dongshin enTech, Korea)는 Fig. 1과 같이 공기 주입부, 가압조, 5.0 L의 부상조, 분사노즐로 구성되었다. 가압조의 압력은 3.0 atm으로 고정 후 슬릿노즐의 교체를 통하여 2~20  $\mu\text{m}$ 의 범위의 미세기포의 분포를 바탕으로 최적의 슬릿노즐을 선정하였다.

슬릿노즐은 각도, 길이, 형태의 변화에 따라 설계되었으며, 노즐 내 슬릿에 작용하는 전단 비결과를 바탕으로 3D 프린팅 기술을 활용하여 선택적으로

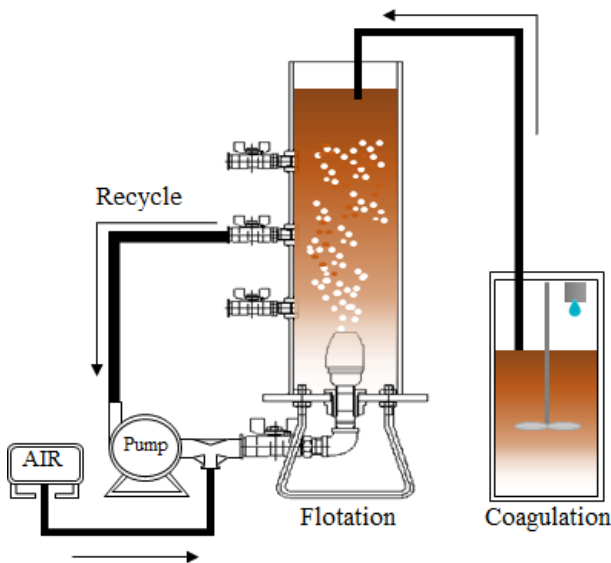


Fig. 1. Schematic diagram of the DAF unit.

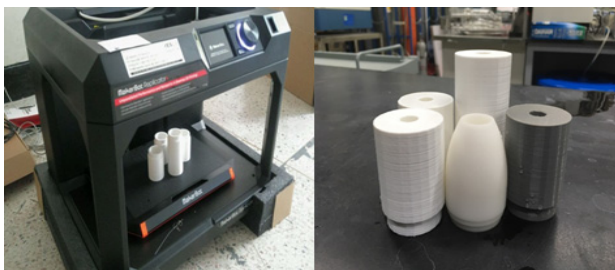


Fig. 2. FDM 3D printer and the slit-nozzles made by the printer.

제작되었다. 3D 프린터에 사용된 재료는 내수성이 좋은 acrylonitrile-butadiene-styrene(ABS)계열 플라스틱 소재를 활용하였으며, 프린팅 기술은 fused deposition modeling(FDM)방식이 채택되었다 (Fig. 2).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 최적 슬릿노즐 선정

DAF 공정을 폐수처리에 적용할 경우 요구되어지는 최소한의 미세기포 크기는 100  $\mu\text{m}$ 로 보고되고 있다 (Shammas et al., 2010). 그러나 유류폐수 내 유화된 미세유분의 경우 그 직경이 20  $\mu\text{m}$  이하로, 효과적인 유분의 제거를 위해서는 20  $\mu\text{m}$  이하의 미세기포가 요구된다. 본 연구에서는 미세기포가 발생하는 과정에서 노즐의 각도, 형태, 길이의 변화를 통해 슬릿 끝에 작용하는 전단력을 변화시킴으로써 2~20  $\mu\text{m}$  크기의 미세기포를 선택적으로 제어하고자 하였다.

기존 장치에 부착된 노즐을 포함하여 총 7가지 (A: 기존 노즐(control), B: cone 형태, C: 노즐길이 1.5배 연장 및 슬릿각도 60°, D: 슬릿각도 30°, E: 슬릿각도 45°, F: 슬릿각도 60°, G: 슬릿각도 90°) 노즐을 대상으로 CFD 분석을 통해 슬릿노즐 내 유체의 유동을 살펴 보았다. 기존 노즐 A는 19 mm의 내경과 90° 각도의 슬릿 5 개로 구성되어 있었다. 노즐 B의 경우, 45° 각도의 슬릿 10 개로 구성되었으며 노즐의 내경이 유체 유입구부터 유출구까지 17 mm에서 12 mm로 감소하는 cone 구조의 노즐 형태를 디자인하여 유동변화를 살펴보았다. 노즐의 총 길이를 1.5배 증가시킨 C의 경우, 내경 12 mm와 60° 각도의 슬릿 17개로 구성되었다. 노즐 D, E, F, G의 경우 내경과 슬릿의 개수는 동일하게 12 mm, 10개로 각각 30°, 45°, 60°, 90°의 슬릿 각도의 변화를 통해 유동변화 결과를 살펴보았다 (Table 1). 기존 DAF 장치에 부착되어 있었던 노즐 A 디자인과 비교하여 나머지 6가지 (B~G) 노즐은 상대적으로 작은 내경과 증가된 슬릿 개수로 디자인하여 슬릿 면에 작용하는 전단력을 유도하였으며, 슬릿 각도를 추가적으로 변화시켜 이들 각 디자인별로 산출된 전단 비에 따라 노즐을 선정하여 제작하였다.

기존 노즐 A와 본 연구에서 디자인한 노즐 G를 비교해 본 결과, 동일한 슬릿의 각도(90°)임에도 노즐의 내경 축소 및 슬릿 개수 증가로 인하여 슬릿 끝 면에

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

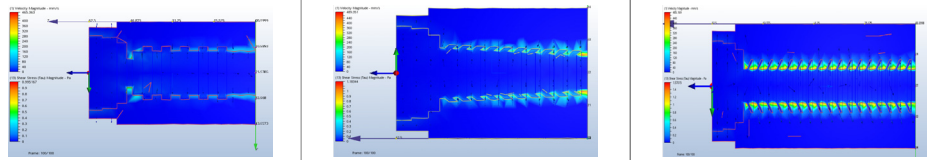
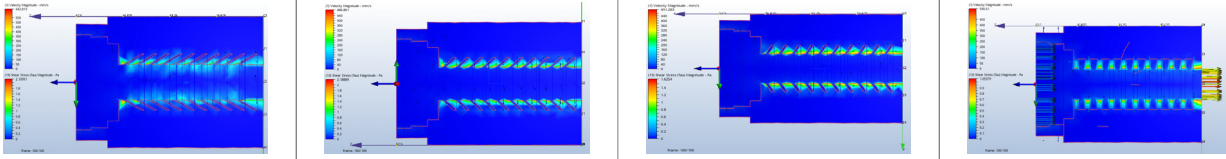
pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581

**Table 1.** Summary of the characteristics of each slit-nozzle

Nozzle type	A. control	B. Shape (cone)	C. Length & angle (1.5x & 60°)
Number of slit	5	10	17
Angle (°)	90	45	60
Inner diameter(mm)	19	17→12	12
Specific shear force(Ps)	1.00	1.61	3.93
			
Angle			
D. 30°	E. 45°	F. 60°	G. 90°
10	10	10	10
30	45	60	90
12	12	12	12
2.50	4.29	4.29	2.32
			

$$P_s = \frac{P_i}{P_o}$$

Ps = Specific shear force of modified slit-nozzle  
 Pi = Shear force of modified slit-nozzle  
 Po = Shear force of control slit-nozzle

작용하는 전단력이 기존대비 2.32배 증가되는 것을 확인하였다. 이는 분사노즐에 따라 발생하는 공동현상 중 노즐 내부구조의 변화로 마찰 전단력이 증가됨을 확인할 수 있었다 (Hasegawa et al., 2008). 슬릿노즐의 유입구와 유출구의 직경을 다르게 디자인한 노즐 B의 경우 직경이 축소함에 따라 슬릿 끝 면에 작용하는 전단력이 증가함을 확인하였으며, 슬릿의 각도(45°) 및 유출구의 직경(12 mm)이 동일한 노즐 E와 비교하면 2.66배 낮은 전단 비가 슬릿에 작용하였다 (Table 1). 노즐 길이 연장으로 증가된 슬릿의 개수와 슬릿 각도 60°로 변형되어 디자인된 노즐 C의 경우 동일한 형태에서 슬릿 개수가 7개가 적은 노즐 F대비 1.09배 낮은 전단 비를 보였다 (Table 1). 노즐 D, E, F, G를 이용한 결과를 살펴보면, 동일한 조건에서 단순히 슬릿의 각도를 변화시켜 주었을 때 노즐 E(45°)와 F(60°)에서 노즐 D(30°) 대비 1.72 배, 노즐 G(90°) 대비 1.85 배 높은 전단력이 발생하였다. CFD 모델링의 결과를

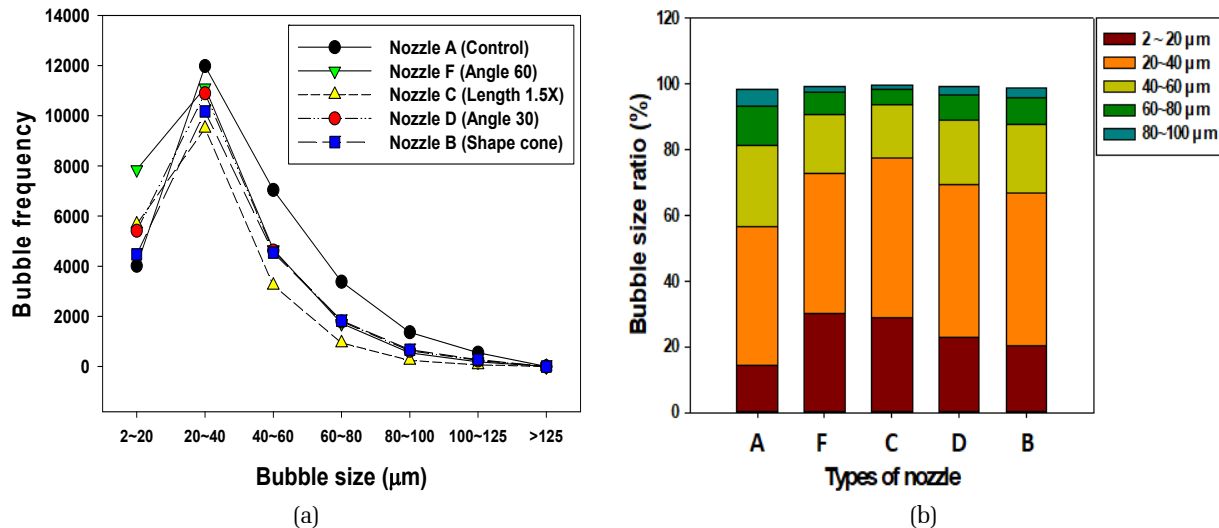
바탕으로, 전단 비(Ps)에 따른 미세기포의 발생 분포를 분석하기 위하여 일정 간격의 전단 비의 차이를 가지는 4가지 슬릿노즐(B, C, D, F)을 선정하여 FDM 방식의 3D 프린터로 슬릿노즐을 제작하였다.

3D 프린터로 제작된 4가지(B, C, D, F) 종류의 슬릿노즐로부터 발생하는 미세기포 분포를 평가하기 위하여 기존 제작된 DAF 공정의 압력을 3 atm으로 고정하여 슬릿 노즐을 교체하면서 운전 결과를 비교하였다. 부상조에서 발생된 미세기포는 on-line 입도분석 기기에 바로 유입되어 분당 1회 평균값으로 크기가 측정되었으며, 총 30분 동안 운전한 데이터를 바탕으로 평균 입경을 도출하였다 (n=30). 입도분석은 기포 크기 2 ~ 125 μm 범위 내에서 7가지 범주(2~20 μm, 20~40 μm, 40~60 μm, 60~80 μm, 80~100 μm, 100~125 μm, 125 μm이상)로 분류되어 산출되었다. Fig. 3(a)에 제시된 것과 같이, 노즐 F의 경우 기존 노즐 A 대비 2~20 μm 범위의 미세기포의 수가 196% 증가되었다. 노즐 C와 D에서도 같은



**Table 2.** Correlation between specific shear force ( $P_s$ ) and quantity of microbubbles in a range of 2~20  $\mu\text{m}$  ( $p$ -value < 0.01,  $n = 50$ )

Nozzle type	Variables	A. control	B. Shape (cone)	D. Angle (30°)	C. Length & angle	F. Angle (60°)
Specific shear force ( $P_s$ )	Independent (X)	1.00	1.61	2.50	3.93	4.29
Quantity of microbubble (2~20 $\mu\text{m}$ )	Dependent (Y)	4011 $\pm$ 682	4474 $\pm$ 671	5414 $\pm$ 727	5678 $\pm$ 616	7853 $\pm$ 1354



**Fig. 3.** Effect of different slit-nozzles on microbubble generation. : (a) size distribution of microbubbles, (b) bubble size ratio

범위의 미세기포가 기존 노즐 A 대비 각각 142%, 135% 추가 생성되었다. 이는 앞선 슬릿 노즐 별 CFD 결과 (Table 1)로부터 산정된 전단력 차이에서 확인할 수 있듯이, 기존 노즐 A와 비교하여 증가된 전단 비에 비례하여 2~20  $\mu\text{m}$  크기의 미세기포수가 해당 슬릿 노즐을 통하여 증가되었다. 슬릿노즐별 미세기포 비율 결과를 살펴보면(Fig. 3(b)), 노즐 C와 F로부터 유사한 미세기포 크기 비율 분포가 생성되었으며, 2~40  $\mu\text{m}$ 의 미세기포는 오히려 노즐 C가 더 높은 비율로 분포되었다. 그러나 미세기포 총 발생량을 고려하였을 때 노즐 F가 노즐 C에 비해 6,433개의 미세기포를 더 많이 발생시켰으며, 이는 노즐 내부의 와류로 인한 기포의 터짐 현상으로 동일한 슬릿의 각도 조건에서 단순히 노즐의 길이를 연장하는 것으로 슬릿 면에 작용하는 전단력과 미세기포의 발생량을 증가시킬 수 없었다.

미세기포의 총 발생량을 살펴보면, 노즐 A와 F순으로 28,331, 26,087개로 가장 많이 발생되었으며, 노즐 C에서 19,654 개로 가장 적게 발생되었다. 반면 2~20  $\mu\text{m}$  범위의 미세기포의 수는 노즐 A에서 4,011개로 가

장 적게 발생되었으며, 60~125  $\mu\text{m}$  범위의 상대적으로 큰 미세기포 수는 11,786 개로 다른 6 가지의 노즐 대비 높은 수치를 나타내었다. 비록 기존 노즐 A를 통해 많은 수의 기포를 발생되었지만, 20  $\mu\text{m}$  이하의 초미세기포 분포가 적어 저밀도 부유입자 분류가 요구되는 유류폐수 처리에 미흡할 것으로 판단되었다. 노즐 F를 활용한 DAF 반응기는 기존 노즐 A와 유사한 양의 미세기포를 발생시켰지만 유화된 오일 크기와 유사한 범위의 초미세기포를 가장 많이 발생시켜 유류폐수 전처리를 위한 DAF 공정 내 적합한 노즐로 드러났다.

Table 2에 제시된 상관분석 결과, 각각의 슬릿노즐 별 전단 비(X)에 대한 2~20  $\mu\text{m}$  크기의 미세기포 발생량(Y)간의 상관관계는 1% 이내의 수준에서 통계적 유의성이 있는 것으로 나타났다. 위의 CFD 및 미세기포 총 발생량/크기별 분포 결과들을 종합적으로 판단하여 슬릿의 각도를 60°로 변형한 노즐 F가 유류폐수처리를 위한 DAF 공정의 최적 분사노즐로 선정되었다.

**Table 3.** Characteristics of treated water using the DAF system (slit-nozzle A & F) with different coagulants

Nozzle type	Coagulant	Dosage (mg/L)	COD (mg/L)	Removal of COD (%)	TOC (mg/L)	Removal of TOC (%)
-	Influent	-	9,555 ± 70	-	9,119 ± 2,715	-
Nozzle A	Control	0	1,942 ± 17	79.7	1,231 ± 194	86.5
	FeCl <sub>3</sub>	100	1,605 ± 0	83.2	62.9 ± 1.23	99.3
		150	1,317 ± 17	86.2	66.2 ± 3.85	99.3
		200	1,067 ± 53	88.8	35.4 ± 0.44	99.6
		250	855 ± 35	91.1	75.3 ± 2.29	99.2
	PACl	40	1,580 ± 0	83.5	43.7 ± 3.75	99.5
		60	1,730 ± 35	81.9	54.6 ± 0.74	99.4
		80	1,392 ± 88	85.4	53.3 ± 1.70	99.4
		100	817 ± 17	91.4	52.3 ± 0.18	99.4
	Nozzle F	FeCl <sub>3</sub>	200	692 ± 53	92.7	17.6 ± 0.87
250			667 ± 18	93.0	25.4 ± 6.19	99.7
PACl		80	767 ± 18	92.0	35.0 ± 0.77	99.6
		100	667 ± 18	93.0	37.9 ± 0.13	99.6

### 3.2 슬릿노즐 기반 응집-DAF공정의 전처리 효율

일반적으로 DAF 공정과 함께 에멀전 입자의 전기적 이중층에서 작용되는 척력의 중화를 목적으로 혼화 및 응집공정이 선행되어 통합 운전되어왔다 (Temesgen et al., 2017). 혼화-응집공정이 결합된 DAF 공정의 효율성 증대와 관련한 많은 연구가 진행되었지만, 대상 폐수의 성상 및 공정변수에 따른 차이로 최적 운전조건 및 최적 응집제 주입량은 매번 해당 실험에서 산정되고 있다 (Zouboulis and Avranas, 2000; Al-shamrani et al., 2002; Suzuki and Maruyama, 2005). 본 연구에서는 제조된 합성유류폐수를 대상으로 응집제 투여 후 급속교반 150 rpm 1분, 완속교반 20 rpm 15분으로 운전 후 바로 DAF 공정에 주입하여 기존 노즐 A를 통해 12분간 부상 운전을 하여 이들 처리수 내 COD와 TOC 저감을 기준으로 FeCl<sub>3</sub>와 PACl의 최적 주입량을 산정하였다 (Table 3). 합성유류폐수에 응집제를 투입하지 않고 DAF 공정으로만 처리한 결과를 대조 군(control)으로 하여 각 응집제별로 4가지 농도 범위로 주입한 응집-DAF 공정 실험 결과를 비교하였다. 합성유류폐수의 COD 및 TOC 수치는 약 9,000 mg/L였으며, 앞선 연구사례를 바탕으로 응집-DAF 공정으로 처리된 유출수의 COD 90% 저감율을 기준으로 하여 최적 응집제 주입량을 선정하였다 (Zouboulis and Avranas, 2000; Al-shamrani et al., 2002; Younker

and Walsh, 2014). FeCl<sub>3</sub> 과 PACl이 각각 250 mg/L와 100 mg/L 주입 되었을 때 COD 농도 기준으로 91.1%, 91.4%의 저감율을 보여 각 해당 응집제 농도를 노즐 F가 장착된 DAF 공정 성능과 비교하기 위한 주입 기준 농도로 선정하였다 (Table 3).

최적 응집제 주입량을 바탕으로 DAF 내 기존 노즐과 본 연구에서 디자인된 슬릿 노즐의 설치에 따른 합성유류폐수의 처리효율을 비교하였다. 앞서 2~20 μm 크기의 미세기포가 가장 많이 발생되었던 노즐 F를 탑재한 DAF 반응기에 FeCl<sub>3</sub> 200과 250 mg/L와 PACl 80과 100 mg/L를 각각 주입하였을 때 유출수 내 COD와 TOC 농도를 분석한 결과, 원수자체 성상이 고농도 (9,000 mg/L)라 처리효율 면에서 큰 차이점을 보이지는 않았다 (Table 3). 그러나 주입량의 차이를 살펴보면, 기존 슬릿노즐 A를 통한 응집-DAF 공정에서는 FeCl<sub>3</sub>와 PACl의 주입 농도가 각각 250 mg/L, 100 mg/L에서 COD 저감 90%를 달성할 수 있었지만, 슬릿의 각도를 60°로 변형한 노즐 F가 활용된 응집-DAF 공정에서는 FeCl<sub>3</sub>와 PACl의 주입 농도가 200 mg/L, 80 mg/L로 각각 보다 적은 농도에서 동일한 처리효율을 보였다. 본 결과는 추가적인 동력 투입 없이 단순히 분사노즐 내 슬릿의 변형을 통해서 유화된 유분의 미립자 크기와 유사한 2~20 μm 크기의 미세기포 수 증가로 인해 보다 적은 양의 응집제 주입으로도 90%





이상의 유기물 처리효율을 달성할 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구는 다양한 형태로 디자인된 슬릿노즐에서 발생된 미세기포 크기 분포 및 전단력 수치 비교를 통해 저밀도의 부유 미세입자 처리에 적합한 슬릿 노즐을 선정하여 응집-DAF 공정의 유류폐수 처리효율 변화를 살펴보았다.

1) CFD 모델링을 통해 슬릿 노즐별로 전단력 변화를 확인한 결과, 슬릿의 각도를 60°로 변형한 노즐 F에서 가장 높은 전단 비( $P_s=4.29$ )를 보였으며, 본 노즐(F)을 설치한 응집-DAF 공정 내에서 2~20  $\mu\text{m}$  크기의 미세기포가 기존 슬릿노즐 A 대비 196% 더 발생되었다. 다만, 노즐의 길이 연장만으로 슬릿 면에 작용하는 전단력과 미세기포의 발생 총량을 증가시키지 못하였다.

2) 본 연구에서 디자인한 노즐(F)을 응집-DAF 공정에 적용하여 합성유류폐수를 처리한 결과 기존 설치된 노즐(A) 대비 적은 양의 응집제 주입으로도 2~20  $\mu\text{m}$  크기의 미세기포 수 증가로 인해 90% 이상의 유기물 처리효율을 달성할 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 환경부 “글로벌 환경기술개발사업”으로 지원받은 과제입니다(과제번호:2016002190008).

## Reference

Al-Shamrani, A.A., James, A., and Xiao, H. (2002). Destabilisation of oil-water emulsions and separation by dissolved air flotation, *Water Res.*, 36(6), 1503-1512.

WEF and APHA. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater, American Public Health Association, Washington, DC, USA. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater, Am. J. Public Health, Washington, DC, USA.

Gryta, M., Karakulski, K., and Morawski, A.W. (2001). Purification of oily wastewater by hybrid UF/MD, *Water Res.*, 35(15), 3665-3669.

Han, M., Kim, T.I., and Kim, J. (2007). Effects of floc and

bubble size on the efficiency of the dissolved air flotation (DAF) process, *Water Sci. Technol.*, 56(10), 109-115.

Hanotu, J., Bandulasena, H.H., Chiu, T.Y., and Zimmerman, W.B. (2013). Oil emulsion separation with fluidic oscillator generated microbubbles, *Int. J. Multiph. Flow*, 56, 119-125.

Hasegawa, H., Nagasaka, Y., and Kataoka, H. (2008). Electrical potential of microbubble generated by shear flow in pipe with slits, *Fluid Dyn. Res.*, 40(7-8), 554.

Kim, I.S. and Park S.C. (1993). Emulsified oily wastewater treatment by MHD water treatment device, *J. Korean Soc. Marine Eng.*, 17(4), 246-253.

Luthy, R.G., Selleck, R.E., and Galloway, T.R. (1978). Removal of emulsified oil with organic coagulants and dissolved air flotation, *J. Water Pollut. Control. Fed.*, 331-346.

Ministry of Environment. (2010). A study on exploration and reduction of ecotoxic causes in industrial wastewater(III), 266-277.

Poulopoulos, S.G., Voutsas, E.C., Grigoropoulou, H.P., and Philippopoulos, C.J. (2005). Stripping as a pretreatment process of industrial oily wastewater, *J. Hazard. Mater.*, 117(2-3), 135-139.

Shammas, N.K., Wang, L.K., and Hahn, H.H. (2010). *Fundamentals of wastewater flotation*. In Flotation Technology, Humana Press, Totowa, NJ, 121-164.

Suzuki, Y., and Maruyama, T. (2005). Removal of emulsified oil from water by coagulation and foam separation, *Sep. Sci. Technol.*, 40(16), 3407-3418.

Temesgen, T., Bui, T.T., Han, M., Kim, T.I., and Park, H. (2017). Micro and nanobubble technologies as a new horizon for water-treatment techniques: A review, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 246, 40-51.

Yunker, J.M., and Walsh, M.E. (2014). Bench-scale investigation of an integrated adsorption-coagulation-dissolved air flotation process for produced water treatment, *J. Environ. Chem. Eng.*, 2(1), 692-697.

Zabel, T. (1985). The advantages of dissolved-air flotation for water treatment, *J. Am. Water Work Assoc.*, 77(5), 42-46.

Zerva, C., Peschos, Z., Poulopoulos, S.G., and Philippopoulos, C.J. (2003). Treatment of industrial oily wastewaters by wet oxidation, *J. Hazard. Mater.*, 97(1-3), 257-265.

Zhou, Y.B., Tang, X.Y., Hu, X.M., Fritschi, S., and Lu, J. (2008). Emulsified oily wastewater treatment using a hybrid-modified resin and activated carbon system, *Sep. Purif. Technol.*, 63(2), 400-406.

Zouboulis, A.I., and Avranas, A. (2000). Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation, *Colloid. Surf. A.*, 172(1-3), 153-161.

pp. 479-485

pp. 487-497

pp. 499-505

pp. 507-515

pp. 517-526

pp. 527-533

pp. 535-550

pp. 551-557

pp. 559-572

pp. 573-581