

용존공기부상(Dissolved Air Flotation)을 이용한 수처리 기술



김유창

(KIMM 환경설비연구부)

'90 - '95 연세대 학교 환경과학과(학사)
'95 - '97 광주과학기술원 환경공학과(석사)
'97 - 현재 한국기계연구원 연구원



김재형

(KIMM 환경설비연구부)

'89 - '93 한국과학기술원 기계공학과(학사)
'93 - '95 포항공과대학교 기계공학과(석사)
'95 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



신홍식

(수자원공사)

'84 - '01 수자원공사 과장
'01 - 현재 한국기계연구원 파견연구원

1. 서론

작은 공기 버블(air bubble)은 환경과 산업의 분리공정에 폭넓게 사용되고 있다. 이들 분리공정 중의 액상으로부터 매우 작은 부유 입자(fats, oils, grease)나 휘발성 오염물질을 분리하여 음용수와 폐수를 처리하는데 사용하기 위해 공기 버블(air bubble)을 발생시킨다. 이렇게 생성된 공기 버블(air bubble)을 이용하는 부상(flotation)은 점토(clay)나 조류(algae)와 같은 밀도가 작은 물질을 제거하기 위해서 침전(sedimentation)의 대안으로 사용되는 방법이다. 이 기술의 원리는 밀도가 물보다 작아 상승하려는 공기 버블을 생성하여 현탁액 속의 입자 또는 플럭(floc)에 부착시킨다면 겉보기 밀도가 부착전의 입자보다 작아져 상승하게 된다. 상승한 버블-플럭 덩어리들은 계속 아래쪽에서 상승하는 다른 덩어리들에 의해 농축되고 일정 속도로 움직이는 스키머(skimmer)에 의해 제거된다.

부상(Flotation)시키는 방법은 버블을 생성하는 기술에 따라 다음과 같이 분류된다. 과포화 상태로 있는 기체와 액체의 혼합액을 대기중에서 압력을 감소시켜서 버블을 발생하도록 하는 방법인 용존공기부상법(Dissolved Air Flotation), 대기압 하에서 프로펠러의 힘이나 다공판을 통해 공기를 불어넣어 버블을 생성하는 방법인 분산공기부상법(Dispersed Air or Cavitation Air Flotation), 대기압하에서 공기를 포화시켜서 감압된 밀폐조에 집어넣은 후 공기의 용해도를 감소시켜서 버

한국기계연구원 환경설비연구부 김유창, 김재형, 신홍식

블을 발생시키는 방법인 진공부상법(Vacuum Flotation), 물을 전기분해하여 생기는 미세한 수소나 산소 버블로 이루어진 버블을 이용하여 부상시키는 방법인 전해부상법(Electrolytic Flotation) 그리고 생물학적 질화/탈질화 시스템에 의하여 질소나 이산화탄소 같은 버블을 생성하거나, 혹은 조류(algae)가 왕성한 성장으로 광합성에 의한 과포화 상태의 산소를 배출하면 물로부터 용출되어 나오는 산소와 함께 부유물을 떠올리는 방법인 미생물학적 부상법(Microbiological Auto flotation)이 있다.

이중에서 용존공기부상(Dissolved Air Flotation)은 음용수처리 분야에서 가장 폭넓게 사용되는 부상 프로세스이다. 대기압보다 높은 압력(대략 483 kPa)으로 공기를 과포화시킨 가압수를 니들밸브나 노즐을 통해 대기압중에 방출시키면 압력이 낮아져 공기가 액상에서 나와 버블을 형성하여 표면으로 떠오른다. 여기서 얻어진 마이크로 버블은 일반적으로 지름이 10~120 μm 의 크기(평균 입경 40 μm)를 갖는다. 이 크기는 물에서 발견할 수 있는 많은 오염물을 분리하는데 아주 유용하다. 용존공기부상(DAF)은 또한 전통적인 농축 프로세스의 대안으로 폐수처리에도 이용된다. 이는 용존공기부상(DAF)으로 처리한 슬러지의 부피는 다른 시스템으로 처리한 것과 거의 같지만 슬러지에서 공기가 차지하는 비율이 커서 슬러지의 함수율은 훨씬 작다. 폐수처리 시스템에서 생성된 일반적인 버블의 크기는 33~143 μm 이며, 니들밸브를 사용하는 표준 운전의 경우에는 버블의 평균직경은 60 μm 정도이다. 일반적으로 포화압력이 커지고 유량이 커질수록 버블의 직경은 작아진다.

본고에서는 앞으로 국내 수처리에 적용할 가능성이 있는 용존공기부상(DAF)의 특성을 중심으로 검토하고, 외국의 신기술을 소개하고자 한다.

2. 수처리기술에 사용되는 전처리방법

거의 모든 수처리 시스템은 부유 고형물의 분

리가 필수적이다. 사실 전통적인 프로세스는 두 단계로 나눌 수 있다.

i) 물리, 화학, 생물학적인 방법에 의해 콜로이드나 용존 고형물(dissolved solids)로부터 부유 고형물(suspended solids)의 생성(이미 존재하는 부유 고형물에 추가로)

ii) 기계적인 방법에 의한 부유 고형물의 분리
기계적인 분리는 침전, 부상, 여과를 포함한다. Kiuru(1990)에 따르면 유입수의 농도와 입자의 크기에 관하여 다음과 같은 운전 범위(그림 1)와 표면 부하율(그림 2)을 갖는다. 그림 1, 2에 따르면 부상은 부유 고형물을 제거하는데 가장 넓은 운전범위와 표면 부하율을 갖는다.

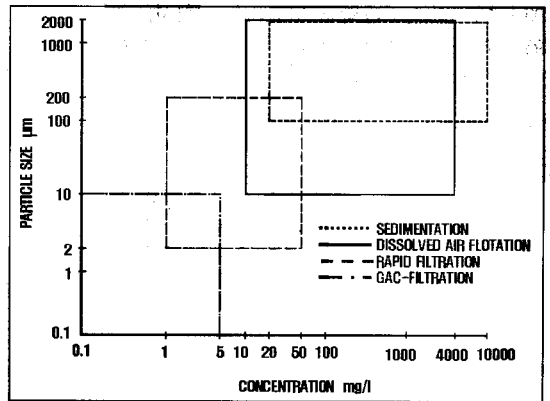


그림 1. 부유고형물 제거설비의 운전범위(Kiuru, 1990)

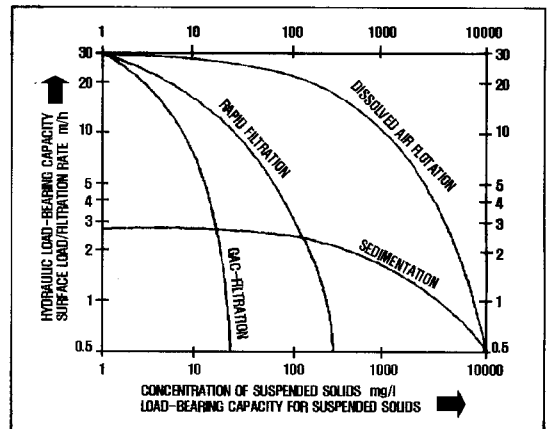


그림 2. 부유고형물 제거설비의 허용부하량

100 FTU이상의 탁도를 갖는 물은 용존공기부상(DAF)에서는 적합치 않다. 그리고 많은 연구 결과에 따르면 부유 고형물의 농도가 50mg/l인 지점이 용존공기부상(DAF)과 침전이 거의 같은 결과를 나타내는 지점이다. 이 농도 이상에서는 침전이 유리하다. 용존공기부상(DAF)은 조류가 있는 물을 처리할 때 적합하다.

온도, 압력의 범위(0~30℃, 200~800kPa)에 걸쳐 헨리의 법칙을 따른다. 헨리의 법칙은 물 위의 대기에서의 가스의 부분 압력과 물에 녹아 있는 가스의 양 사이에 직선관계를 보인다.

$$C_i = y_i \cdot 44.6 \cdot \frac{M_i}{H_i} \cdot \left(\frac{273.15}{T} \right) \cdot \left(\frac{P_{total}}{101.3} \right)$$

3. 용존공기부상(DAF)의 기본원리

용존공기부상(DAF)이란 가압상태에서 과포화된 물을 감압시킬 때 발생하는 미세기포가 상승하는 과정에서 수중의 콜로이드 물질과 충돌·부착되는 원리를 이용하여 수중의 부유물질을 제거하는 수처리 방법이다. 용존공기부상(DAF)의 원리는 다음과 같은 세가지 기본 원리에서 나왔다.

1m³의 가스는 0℃, 101.3kPa에서 44.6몰을 갖는다. 위의 식에서 C_i = 물에서의 가스 i의 질량 농도[g/m³]; y_i = 가스상에서의 가스 i의 몰 비; M_i = 가스 i의 분자량[g/mol]; H_i = 가스 i의 헨리상수; T = 절대온도[K]; P_{total} = 절대 적용 압력[kPa].

질소와 산소에 대한 헨리상수 값은 다음 표 1과 같다. 위의 식과 표 1에서 알 수 있듯이 온도가 낮을수록 물에 녹는 공기의 양은 더 많아진다.

3.1 헨리의 법칙(Henry's Law)

그리고 헨리의 법칙에 따라 공기의 용해도는 압력과 온도에 따라 결정되는 것뿐만 아니라 실제 공기 조성에도 영향을 받는다. 사용되는 포화 시스템에 따라 포화공기의 조성은 질소와 산소의 용해도가 다르기 때문에 대기중의 공기와는 다르다. 산소가 질소보다 두 배나 더 잘 녹기 때문에 평형에 도달할 때까지 산소는 더 빨리 없어진다. 그래서 포화공기의 가스의 질소 함량은 대기중의 공기보다 훨씬 높다.

액체에 의해 흡수될 수 있는 공기의 양은 공기의 압력에 정비례한다. 간단히 말해 일정 온도에서 압력이 높으면 높을수록 더 많은 공기가 물에 흡수될 수 있다. 이론적으로 대기압과 68°F일 때는, 1000갤런의 물에 0.2파운드의 공기가 녹는데, 40psi와 68°F에서는 같은 양의 물에 0.755파운드 가 녹을 수 있다. 65psi와 68°F에서는 용존공기의 양이 1.1파운드까지 올라간다.

여기서 중요한 점은 포화기를 처음 운전해서 평형 조성에 도달할 때까지는 수 시간이 걸린다는 것이다. 포화효율이 평형에 도달했는지를 측정하기 위하여는 운전시작후 적어도 12시간이 흐른 뒤에 측정이 되어야 한다.

대기의 대부분은 질소와 산소로 구성되어 있다. 질소의 부피비나 몰비는 0.791이고 산소는 0.209이다. 이들 두 가스는 용존공기부상에 사용되는

표 1. 질소와 산소에 대한 헨리상수. H_N=질소에 대한 헨리 상수; H_O=산소에 대한 헨리상수

	5℃	10℃	15℃	20℃	25℃	30℃
H _N	49.8	54.0	58.2	62.3	66.5	70.7
H _O	23.9	26.4	28.8	31.3	33.8	36.3

3.2 핵이론(Nucleus Theory)

용액 밖으로 나온 미세한 버블은 어느 작은 입자이나 부착될 것이고(폐수에서는 오염물질), 이것은 오염물질에 구멍조끼를 입힌 효과를 가져와 표면으로 부상될 것이다.

3.3 스토크스 법칙(Stokes Law)

입자 또는 플럭과 충분한 수의 공기 버블은 결합해 액체보다 작은 비중을 갖는 결합된 버블-플럭의 덩어리를 만든다. 그러므로 결국에는 가라앉거나 부유되 있을 입자 또는 플럭이 표면으로 부상해서 제거될 수 있다.

$$v_t = \frac{(\rho_w - \rho_{pb}) d_{pb}^2 g}{18\mu}$$

이 식에서 v_t 는 입자-버블 덩어리의 종말 부상 속도, ρ_w 는 물의 밀도, ρ_{pb} 는 입자- 버블 덩어리의 밀도, μ 는 물의 점도, g 는 중력가속도이다.

그림 3은 버블의 크기에 따른 버블의 부상속도를 보여주고 있다. 용존공기부상(DAF)에서 100 μ m

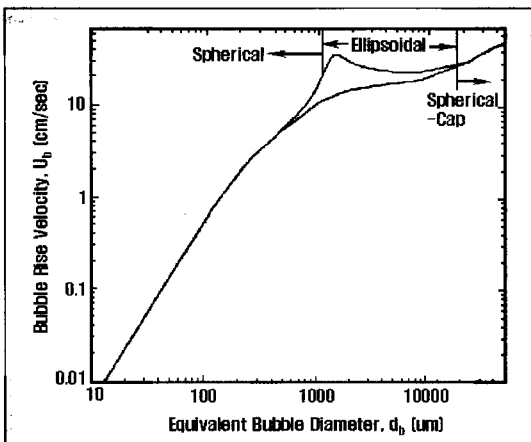


그림 3. 20°C 물에서 공기 버블의 상승속도

이하의 작은 버블은 층류하에서 구형으로 상승하고 스토크스의 법칙을 따른다. 더 큰 버블은 더 큰 부상 속도를 가지고 타원형(1~10mm)과 원형-모자형(>10mm)으로 존재한다.

4. 용존공기부상(DAF)의 특성

4.1 DAF 운전에 적합한 입자(particle)의 특성

일반적으로 오염물질(입자 또는 플럭)을 부상시키려면 이들 물질이 소수성(hydrophobic) 물질이고, 젖음(wetting) 현상이 없고, 크기가 40 μ m보다 커야 용존공기부상(DAF)을 통해 효과적으로 제거할 수 있다. 하지만 응집되거나 플럭화되어 제거되는 대상 입자들은 친수성을 띤다. 따라서 부상속도가 예상보다 작다면, 대부분의 폐수가 갖는 친수성(hydrophilic)을 응집제를 첨가해 소수성으로 바꾸고 응집 또는 플럭화하여 크기를 키워야 한다. 이 불안정화(destabilization)는 콜로이드 물질의 음전하(zeta-potential)의 상쇄를 의미한다. 공기 버블도 음전하를 갖는다. 따라서 양이나 영(zero) 전하를 갖는 플럭은 음으로 하전된 플럭보다 공기 버블을 더 잘 끌어당길 수 있다. 하지만 실제로는 전하가 완전히 중성화되는 것은 필요치 않다. 제타 포텐셜(zeta-potential)이 약간 음이어도 플럭화 과정은 잘 진행된다. 용존공기부상(DAF)은 제타 포텐셜(zeta-potential)이 약간 음(0~-10 mV)일 때 잘 작동한다. 응집제의 양을 증가시키면 플럭의 제타 포텐셜(zeta-potential)은 증가한다. 반면 pH를 증가시키면 제타 포텐셜(zeta-potential)은 감소한다.

그림 4에서 보여주고 있는 고체 입자와 여기에 부착된 버블사이의 접촉각을 통해 버블에 의한 입자의 부상을 설명할 수 있다. 여기서 접촉각은 물의 응집에너지 보다 고체 입자에 대한 물의 부착에너지가 작을 정도로 충분히 커야 한다. 큰 접촉각은 소수성과 좋은 부착력을 나타낸다. 하지만 접촉각의 크기는 버블과 입자의 크기정도에 의존한다.

이상을 정리하면 i) 입자의 물에 대한 친수성을 소수성으로 바꿔야하고, ii) 접촉각을 크게해 젖음현상을 없애야 한다.

4.2 DAF 운전에 적합한 버블(bubble)의 특성

용존공기부상(DAF)에 의해 생성된 공기 버블은 크기가 대략 10~120 μ m 정도이고, 버블 발생을 위해 공기를 용해시키는 가압탱크인 포화기(saturator)가 필요하다. 보통 포화기(saturator)의 압력은 음용수 처리시에 350~585kPa이며 공기로 포화되는 유체를 순환류(recycle flow)라 부른다. 부상조에서 니들밸브나 특별히 설계된 노즐을 통해

대기압으로 순환류를 배출시키면 순환류의 압력은 낮아져 물 밖으로 용존 공기가 나오게 된다. 이때 용존 공기는 미세 버블을 생성하는데 니들 밸브나 특별히 설계된 노즐을 지나 발생하는 큰 압력차에 의해 자유에너지의 변화를 최소화하고자 하는 열역학 법칙에 따라 미세 버블의 미세한 핵이 자발적으로 발생하게 된다. 공기를 이상기체로 가정하면 균일한 핵형성에 있어서 미세기포핵의 임계지름(d_{cb})은 Laplace 식에 따라 다음과 같다.(Atkins, 1994)

$$d_{cb} = \frac{4\sigma}{\Delta P}$$

여기서, σ : 표면장력, ΔP : 노즐에 걸쳐 발생하는 압력변화이다.

이 식에 따르면 미세 버블핵의 임계지름(d_{cb})은 압력변화에 반비례하므로 높은 압력변화에 의해 더 작은 미세 버블핵이 발생한다.(그림5 참조)

깨끗한 물이 아닌 이물질이 존재하는 비균질계에서는 입자의 표면이나 다른 표면의 틈에서 기포가 발생하는 것이 자유에너지의 변화가 더 작게 된다. 이렇게 발생된 핵은 성장하여 미세기포가 된다.

기포의 크기는 압력차와 노즐의 형상에 따라 변화한다. 주입류나 재순환류는 반드시 빠르게 감압을 해서 역류와 노즐근처의 관벽면에서 미세기포가 성장하는 것을 막아야 한다. 높은 압력이 더 작은 미세기포를 발생시키지만 압력이 일정크기 이상 증가하는 경우 미세기포의 크기감소는 둔화되어 500kPa 이상에서는 가압력의 증가가 미세기포의 지름에 거의 영향을 미치지 않는다. 일반적으로 미세한 기포를 만들기 위해서는 압력차(가압조의 계기압력)가 400~600kPa(대략 4~6atm)이면 적당하다. 기포간의 충돌이나 기포의 부상에 따른 수압의 감소로 인해 추가적인 미세기포의 성장이 발생할 수 있다. 그러나 이러한 요소는 용존공기부상에서 미세기포를 형성시키는데는 거의 영향을 미치지 않는다(Edzwald, 1995).

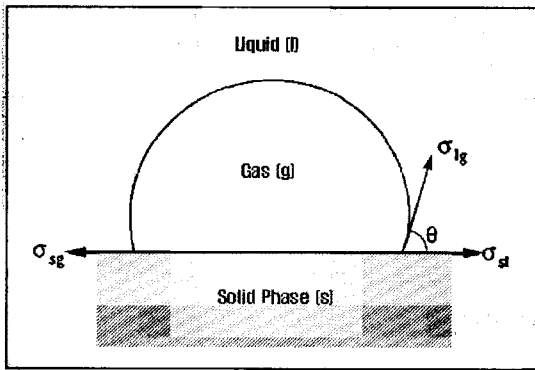


그림 4. 고체 표면에 부착된 버블에 대한 접촉각의 예시

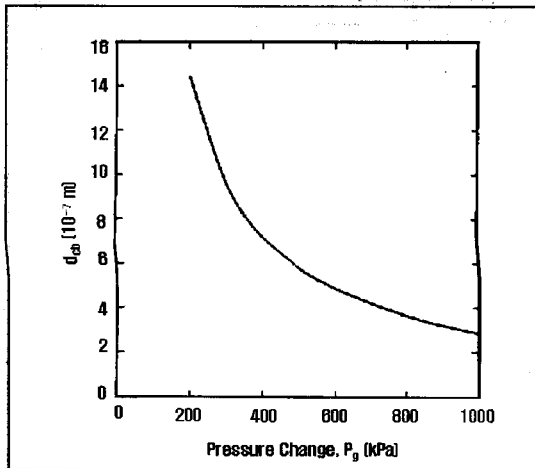


그림 5. 압력변화에 따른 20°C 물에서 공기의 균일한 핵형성에 대한 버블핵의 임계지름

표 2. 반응에 영향을 미치는 입자와 버블의 개념적 요약

인자(parameter)	의존(dependence)	비고(comments)
전처리 인자		
a_{pb} (입자-버블 부착 효율)	1. 입자-버블 전하의 상호작용 2. 입자의 친수적 성질	1. 부상에 영향을 미침: 입자 전하의 감소와 소수성 입자가 필요 2. a_{pb} 를 1까지 높임: 최적 응집제와 pH조건을 통해.
N_p (입자수 농도)	1. 원수 수질 2. 응집제의 종류와 조건 3. 플럭화 시간	1. 입자의 농도와 크기; NOM의 농도 2. 응집제는 입자수를 늘림 3. 플럭화는 N_p 를 낮추고 d_b 를 높임.
반응영역- 부상조		
η_T (총 단일 포집자 효율)	1. 확산과 차단에 의한 입자와 버블의 충돌 2. d_b 가 $1\mu m$ 일 때 η_T 최소	1. η_T 를 높임: 수십 μm 의 플럭 크기를 만들어서. 2. 짧은 플럭화 시간
d_b (버블의 직경)	노즐에서의 압력차와 주입류에 의해 조절	1. 바람직한 마이크로 버블: 10~100 μm (평균 40 μm) 2. $\eta_T \propto d_b^{-2}$, 입자의 포집율 $\propto d_b^{-1}$ 3. 더 작은 버블일수록 더 좋은 성능
Φ_b (버블의 부피 농도)	1. 포화기 압력 2. 순환비	1. Φ_b 를 높이면 N_b 가 증가: 입자 포집을 위해 더 많은 버블 2. Φ_b 를 높임: 플럭 밀도를 낮추기 위해 더 큰 버블 부피

공기 버블의 크기가 크면 부상 속도가 빨라지고 충류조건을 초과하게돼 플럭이 깨지고 성능이 나빠지게 된다. 따라서 버블의 크기는 중요하다. 또한 큰 버블은 단위 부피당 표면적이 작아 버블의 갯수와 버블과 플럭의 충돌 기회를 작게 한다. 따라서 공기 분산 시스템의 적절한 디자인이 용존공기부상(DAF)에서 중요한 요소이다.

4.3 버블에 영향을 미치는 분사 노즐 (injection nozzle)의 특징

마이크로 버블의 크기는 분사 노즐의 기하학적 디자인과 운전조건에도 영향을 받는다. 실제적인 분사 노즐을 디자인하는 사람들은 노즐의 효율을 높이기 위하여 많은 기술을 사용한다. 노즐 유로의 방향을 급격히 바꾸거나, 노즐의 하향류에 곧바로 충돌판을 두거나, 움직이는 물과 정지해 있는 물과의 속도차이를 줄이기 위해 발산하는 콘

(diverging cone)을 사용하거나, 이들을 조합하기도 한다.

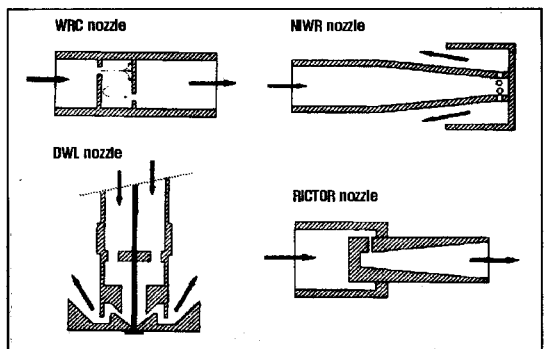


그림 6. DAF에 사용되는 주입 노즐의 개략도

- ① 유로에 따라 충돌판을 둔 것 (NIWR, WRC 노즐)
- ② 유로에 따라 방향변화를 준 것 (DWL, RICTOR, NIWR 노즐)
- ③ 유로의 끝에 가늘어진 부분 (tapered section)을 둔 것(RICTOR, DWL 노즐)

4.4 버블-플럭간의 충돌과 부착 이론

최근에 Malley와 Edzwald(1991)는 용존공기부상(DAF)에 대한 개념적인 모델식을 제시했다. 이 식은 충류 조건에서 단일-포집자 충돌(single-collector collision)이론으로부터 유도되었다(SCC model). 그리고 Tambo와 Fukushi는 운동(kinetic) 모델을 제시했다. 이 모델은 난류조건에서 버블과 플럭의 집단 균형(population balance) 모델에 기초한다(PBT model).

그림 7은 SCC모델과 PBT모델의 개략적인 개념을 보여주고 있다. 버블-플럭간의 충돌과 부착은 그림 7에서 보듯이 중요한 차이점이 있다. SCC 모델의 흐름 영역은 충류이어서 이 영역에서는 충돌이 브라운 확산, 차단, 중력 침강에 의해 일어난다. 하지만 브라운 확산은 보통의 플럭과 부상을 위한 버블 크기범위에서는 지배적일 수 없다. 물론 중력 침강도 마찬가지이다. 단지 차단만이 SCC 모델에서 지배적인 미커니즘이다. 그러나 PBT모델에서는 차단이 실제 용존공기부상(DAF) 설비에서 지배적일 수 없다고 본다. 버블-플럭의 혼합 영역이 분명히 난류에서 존재하고 어떤 에너지 소비가 일어난다. 즉 차단은 부상조나 혼합의 마지막 단계에서 작은 역할만 할 뿐이다. 차단이 일어나기 전에 많은 버블들은 매우 짧은 시간안에 혼합영역안에서 난류 이동에 의해 플럭에 붙을 수 있다. 그렇기 때문에 부상조에서 버블의 농도는 매우 낮다. 이와같은 이유 때문에, SCC 모델은 용존공기부상(DAF) 설비를 묘사하는데 덜 효과적이다. 이 모델은 분산 공기 부상이나 거품 분리등에 제한되 적용돼야 한다. 하지만 두 모델이 용존공기부상(DAF)을 설명하는데 일반적으로 많이 언급되기 때문에 두 모델을 비교하였다.

버블의 크기는 두 모델이 거의 같다. 그러나 SCC 모델에서는 버블의 제타 포텐셜이 알려지지 않았다. Tambo와 Fukushi는 공기버블이 pH 7에서 -150mV의 제타 포텐셜을 갖는 것을 측정했다.

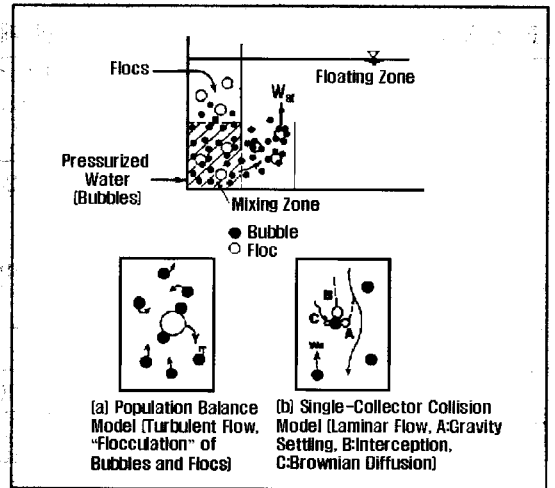


그림 7. 버블-플럭간의 충돌과 부착의 개념 및 매커니즘

생성된 플럭에 관하여는 많은 차이점이 있다. 플럭의 크기 범위도 SCC모델에서는 $10^0-10^2 \mu\text{m}$ 이고, PBT모델에서는 $10^0-10^3 \mu\text{m}$ 이다. 하지만 플럭화가 너무 길지 않아야 하고 일반적인 수처리에서 플럭의 크기는 $10^1-10^3 \mu\text{m}$ 이다. 용존공기부상(DAF)에서 운동(kinetic) 모델은 실제 프로세스에서 큰 플럭에만 적합하며, 더 큰 플럭일수록 더 큰 충돌 효율을 갖게 된다.

4.5 용존공기부상(DAF) 설비의 특징

용존공기부상(DAF) 설비는 다음과 같은 4단계로 구성된다: (1) 입자의 응집과 플럭화, (2) 공기 버블의 생성, (3) 혼합영역에서 버블과 플럭의 충돌과 부착, (4) 부상조에서의 버블과 플럭 덩어리의 상승. 그림 8은 이와 같은 4단계가 일어나는 용존공기부상(DAF) 설비의 개략적인 모습을 보여 주고 있다.

공기가 대기압보다 높은 압력에서 물에 녹은후, 이 가압수의 유로가 축소(압축)되거나 유로에 방해물을 두면 압력강하가 유도된다. 이렇게 해서 생긴 수압의 감소는 가압수의 평형조건의 변화를 가져온다. 즉, 액상에 과포화된 용존 공기는 탈기

표 3. SCC model과 PBT model의 비교: 특정한 패러미터 값과 개념

	PBT model(1985) Tambo와 Fukushi	SCC model(1990) Malley와 Edzwald
발생된 공기 버블		
크기 범위 $d_a[\mu\text{m}]$	10-120(평균 60)	10-100(평균 40)
부상속도 $w_a[\text{cm}/\text{sec}]$	$w_a = g d_a^2 / 12\nu$	$w_a = g d_a^2 / 18\nu$
제타 포텐셜 [mV]	-150(pH 7 에서)	측정안됨.
압력 P [kPa]	392	345-585
순환비 r [-]	0.1	0.08
농도 $n_a[\text{cm}^{-3}]$	10^4-10^5	10^4-10^5
생성된 플록		
크기 범위 $d_f[\mu\text{m}]$	10^0-10^3	$10^0-10^2(10-30\mu\text{m가 최적})$
밀도 $\rho_f [\text{g}/\text{cm}^3]$	플록 밀도 함수	1.01(추정)
적합한 모빌리티(mobility) [$\mu\text{m}/\text{secVcm}$]	0 - +1(점토 플록의 경우) -1 - +1(색도 플록의 경우)	0.5 또는 그이하
버블-플록의 충돌과 부착 (덩어리)		
충돌 모델	Population balance model	Single-collector collision model
흐름 영역	난류	층류
메커니즘	지역적으로 균등한 난류 점성의 작은 범위의 확산	브라운 확산, 차단, 중력 침강
부착 메커니즘	전기적 전하의 상호작용 (플록의 표면에 침전된 응집체의 포위)	전기적 전하의 상호작용, 플록 표면에서 물 층
덩어리의 부상속도 $w_{af}[\text{cm}/\text{sec}]$	0.1-2.6(관측)	w_a 와 거의 같음, 약 0.3

(degassing)현상을 일으켜 분자 형태의 미세한 버블로 물 밖으로 나온다. 이같은 반응은 탄산음료에서도 일어난다. 병이 열려 대기압에 노출됨으로써 압력이 감소되면 가스는 액체로부터 나와 버블형태로 표면까지 떠오른다. 버블의 평균 직경은 과포화수가 배출된 이후 계속 증가하며, 이론적으로는 물의 과포화 압력이 증가할 때 버블의 크기 또한 작아진다. 가압수 유량이 증가하면 버블의 평균 직경은 작아지지만, 아주 큰 유량에서는 버블의 크기가 일정해진다. 노즐의 축소(constriction)가 길면 버블도 더 커진다. 이 버블 크기의 분포는 노즐을 통해 유체가 흐를 때 생기는 난류의

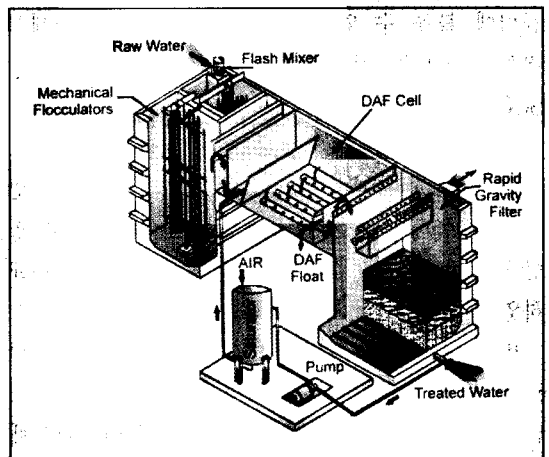


그림 8. 용존공기부상(DAF) 설비

정도와 관련된다. 다시 말하면 난류의 정도가 크면 클수록 액상에서 기상으로의 물질전달이 더 빨라지고, 버블의 크기는 더 작아지고, 수는 더 많아진다.

부상조에서는 충돌과 부착을 포함하는 버블과 입자의 상호 작용이 일어난다. 음용수 처리에 사용되는 전통적인 부상조는 보통 직사각형 모양이고 비스듬한 배플을 두어 조를 두 개의 영역으로 나눈다: 접촉영역(또는 반응영역)과 분리영역(또는 청정영역). 접촉영역은 용존공기부상(DAF) 프로세스의 전체적인 성능에 있어 아주 중요하다. 이 영역에서 포화수와 플러화된 물은 혼합되어 버블과 플러 사이에 충돌기회를 주게된다. 이렇게 하여 형성된 플러와 버블의 덩어리는 위로 뜨게 되고 곧이어 분리영역에서 스키머(skimmer)를 통해 제거된다.

그림 9는 용존공기부상(DAF) 설비중 실제 사용되는 시스템을 간략히 보여주고 있다. 그림의 왼쪽부터 공기를 가압(compressor)시키는 공기 주입라인이 있고, 공기 탱크라고 쓰여진 포화기(saturator), 가압수 주입 노즐, 슬러지 제거용 스키머(skimmer), 처리수 순환용 펌프 등이 있다. 용존공기부상(DAF)에서는 물에 공기를 녹이기 위해 가압하에서 운전하는 공기 포화기(air saturator)가 사용된다. 용존공기부상(DAF)에서 운전 비용의 대부분(약 50%정도)이 공기를 물에 녹이는 가압기와 순환펌프에 사용된다. 포화 효율은 공기와 물의 접촉정도에 비례한다. 즉, 포화기가 불충분하면 할수록 더 많은 물이 순환되어야 한다.

하지만 그림 10의 Pan America의 용존공기부상(DAF) 설비는 공기 포화기가 필요치 않은 설비로 특별히 설계 제작된 DAF 펌프를 사용한다. 시스템의 안정화와 복잡한 시동 절차가 없어 시동즉시 즉각적인 공기의 포화가 이루어져 워밍업 시간이 필요없으며, 설비가 간단해 지기 때문에 초기 투자비가 적게 들고, 운전 비용을 줄일 수 있다. 또한 생성된 버블의 크기도 기존의 공기 포화기를 사용한 설비보다 작게 발생시킬 수 있다.

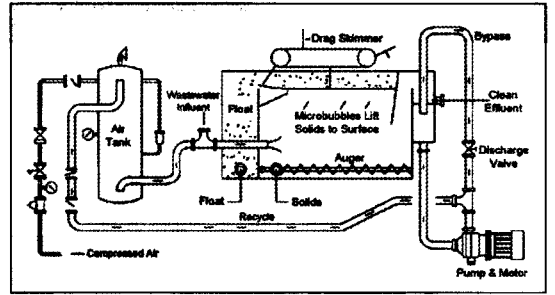


그림 9. 일반적인 용존공기부상(DAF)설비

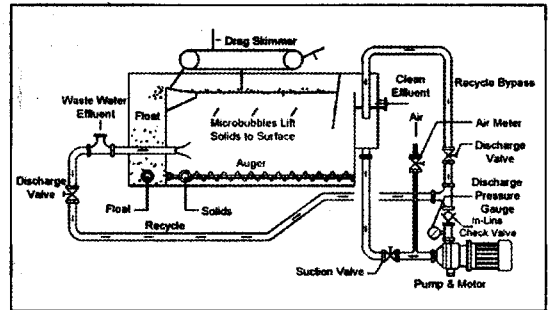


그림 10. Pan America의 용존공기부상(DAF) 설비

5. 용존공기부상(DAF)의 신기술

앞에서 언급한 DAF 펌프의 외형은 일반펌프와 크게 다르지 않지만 많은 펌프 제조 회사 및 엔지니어링 회사 등에서 펌프내부를 공기가 물에 용존될 수 있도록 특별히 디자인해 개발하고 있다. 미국의 CORNELL이라는 회사는 Cycloseal 디자인이라는 특허를 낸 DAF 펌프를 개발했다(그림 11). 이 펌프는 혁신적인 임펠러(impeller) 디자인을 통해 실 챔버(seal chamber)에 대기중보다 낮은 압력을 만들어 낸다. 공기는 이 실 챔버(seal chamber)로 빨려들어 물과 혼합되 마이크로 버블로 압축된다. 또한 MONOSEP이라는 회사는 2면이 있는 임펠러(dual sided impeller)를 통해 버블을 만들어 낸다. 한 면은 일반 원심펌프와 같이 물을 움직이게 하고 다른 한 면은 물로 가스를 움직이게 한다. 또한 특별한 실(seal)이 펌프의 수명을 연장하도록 고안됐다. 이것을 통해 DAF 펌프는 실 챔버(seal chamber)안에 대기중

보다 낮은 압력을 만들어낸다. 임펠러가 가스를 끌어들이기에 따라, 가스는 펌핑되고 있는 물과 혼합되고 마이크로 버블로 압축된다. 임펠러의 뒷날개(backvane)와 펌프의 뒷판(backplate)사이의 밀접한 공차(tolerance) 때문에 이 버블은 전단(sheared)되고 더 작은 버블로 압축된다. 이렇게 압축된 후 물에 용존되게 된다.

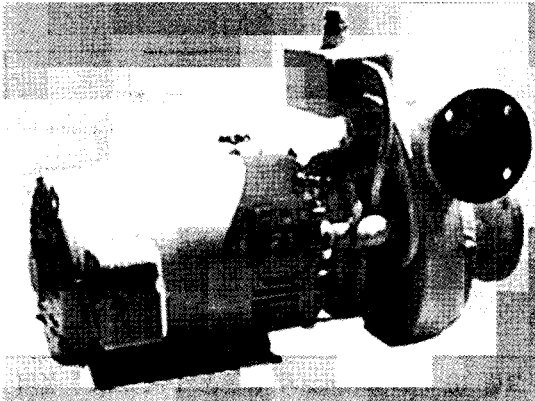


그림 11. DAF Pump의 외형(CORNELL사)

Nikuni사의 경우도 양날개의 임펠러를 갖는 펌프를 통해 작은 크기의 펌프지만 고압을 내고 공기를 흡입해 물에 용존시키는 것을 볼 수 있다(그림 12). 하지만 이 시스템에서는 상기의 CORNELL과 MONOSEP사의 제품과는 달리 펌프 후단에 공기 분리조(air separator tank)가 있어 용존되지 않은 공기를 분리하여 주도록 되어있다.

상기와 같이 DAF용 펌프를 개발하여 용존공기 부상(DAF) 시스템의 성능을 향상시키는 경우외에 HYLAND사는 Redux DAF Clarifier라는 시스템을 통해 부상조의 형태를 콘형으로 만들어 슬러지의 농축이 더 잘 되도록 하였다(그림 13). 이 시스템은 배출밸브의 on/off 조절을 통해 배출밸브를 열면 처리수가 나오고 배출밸브를 닫으면 농축 슬러지가 배출되도록 하였다. 그리고 그림 14와 같이 부상과 여과가 한 조(tank)내에서 일어나도록 결합한 COCO-DAFF(counter-current dissolved air flotation/filtration) 시스템도 선을 보이고 있다.

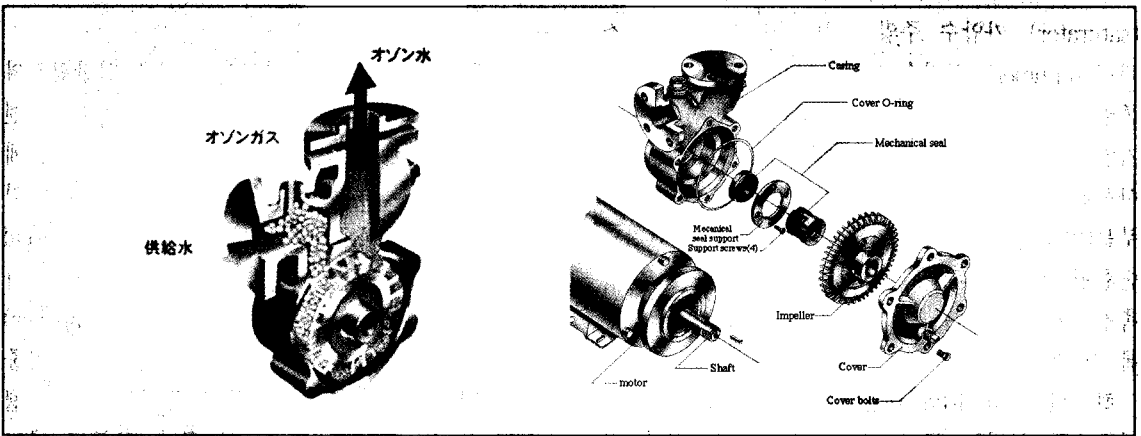


그림 12. DAF용 Small Centrifugal Pump(Nikuni사)

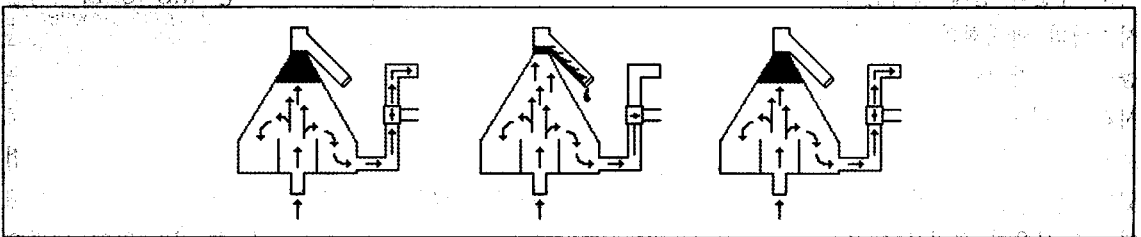


그림 13. Redux DAF Clarifier(HYLAND사)의 흐름도

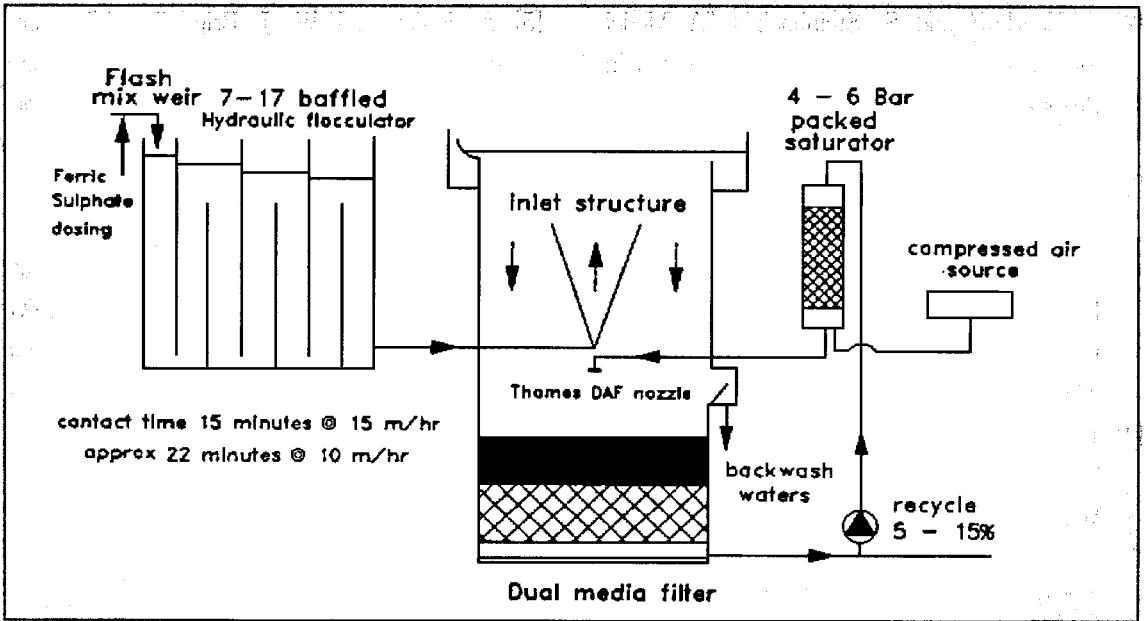


그림 14. COCO-DAFF(counter-current dissolved air flotation/filtration)의 개념도

이 시스템에서 오염물은 용존공기를 통해 위로 부상되고 청정화된 물은 다시 아래쪽의 안트라사이트/모래(anthracite/sand)층을 통해 여과가 되도록 했다. 여과가 부상과 함께 한 조에서 이루어짐에 따라 설치면적과 부속 설비를 많이 줄일 수 있다.

6. 결 론

지금까지 조류 등과 같이 부상하려고 하는 경향이 있는 밀도가 작은 입자를 처리하는 용존공기부상(DAF) 기술에 대하여 소개하였으며 외국의 기술개발현황을 살펴보았다. 용존공기부상(DAF) 기술은 국외에서는 침전법을 대체하여 많이 시도되고 있는 공법인데도, 국내에서는 아직 적극적으로 적용되지 못하고 있다. 용존공기부상(DAF)은 버블의 상승에 의한 처리시간이 짧기 때문에 소요면적이 작고 부상된 슬러지는 두껍고 부유고형물의 함유량이 3~5%이다. 따라서 추가적인 농축이 필요하지 않다. 하지만 짧은 체류시간과 그에 따른 작은 부피의 탱크가 몇가지 결점이 될 수도 있다. 빠른 pH의 변화는 배출수질을

악화시킬 수 있다. 왜냐하면 완충 용량이 작기 때문이다. 또한 저장 용량도 작다. 그리고 부상된 슬러지의 펌핑도 문제가 될 수 있다. 왜냐하면 슬러지는 많은 양의 공기를 포함하기 때문이다. 이상과 같은 장단점들을 잘 파악하여 장점은 살리고 단점은 줄여서 알맞은 곳에 적용한다면 기존의 시설보다 훨씬 좋은 처리효율을 기대할 수 있을 것이다.

마지막으로 이 기술을 적용할 수 있는 분야는 음용수 처리나 폐수처리에만 있는 것은 아니다. 식품 가공처리, 유지 제조시설, 동물사료 제조시설, 빵/곡분/과자 제조시설, 맥아 및 맥주 제조시설, 담배 제조시설, 펄프·종이 제조시설, 석유 저장시설, 비누 제조시설, 제철시설, 금속광업시설 등에도 다양하게 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] J.K.Edzwald : "Principles and Applications of Dissolved Air Flotation", Wat. Sci. Tech. Vol. 31, No. 3-4, pp. 1-23, 1995

- [2] J. Haarhoff and S. Steinbach : "A Model for the Prediction of the Air Composition in Pressure Saturators", *Wat. Res.* Vol. 30, No. 12, pp. 3074-3082, 1996
- [3] M. Viitasaari, P. Jokela and J. Heinanen : "Dissolved Air Flotation in the Treatment of Industrial Wastewaters with a Special Emphasis on Forest and Foodstuff Industries", *Wat. Sci. Tech.* Vol. 31, No. 3-4, pp. 299-313, 1995
- [4] J. Heinanen, P. Jokela and T. Ala-Peijari : "Use of Dissolved Air Flotation in Potable Water Treatment in Finland", *Wat. Sci. Tech.* Vol. 31, No. 3-4, pp. 225-238, 1995
- [5] A. Eades and W. J. Brignall : "Counter-current Dissolved Air Flotation/ Filtration", *Wat. Sci. Tech.* Vol. 31, No. 3-4, pp. 173-178, 1995
- [6] K. Fukushi, N. Tambo and Y. Matsui : "A Kinetic Model for Dissolved Air Flotation in Water and Wastewater Treatment" *Wat. Sci. Tech.* Vol. 31, No. 3-4, pp. 37-47, 1995
- [7] E. M. Rykaart and J. Haarhoff : "Behaviour of Air Injection Nozzles in Dissolved Air Flotation", *Wat. Sci. Tech.* Vol. 31, No. 3-4, pp. 25-35, 1995