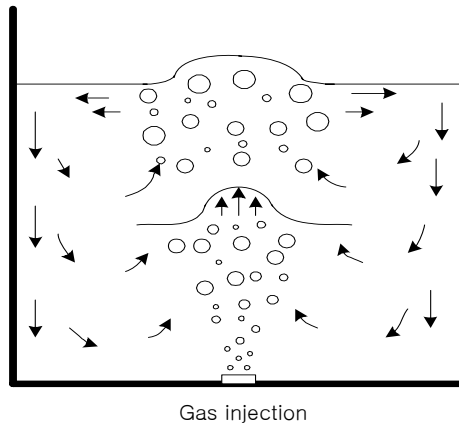


## [MBBR 여재의 유동성 조사결과]

### 1. 포기조에서 기포유동에 관한 질량보존 및 운동량방정식

용기 속에서의 기-액 기동은 전체 용기중의 일부분을 차지한다. 액상 내로 주입된 기체는 액상영역을 휘저어 섞어주는 역할을 하며 용기 내에서 혼합 효과는 그림에 나타난 것처럼 용기의 바닥으로부터 액상 내에서 나타나게 된다.



기포의 상향유동으로 액상은 기-액 기동을 따라 상승하고 상승한 액상은 자유표면에서 반경방향으로 이동하여 액상영역에서 순환유동이 발생한다. 이 순환유동은 액상 내에서 혼합의 역할을 수행한다. 순환유동의 유속을 계산하기 위해 기체에 의해 액상에 주어지는 에너지를 계산해야 한다. 순환유동은 기체에서 액체로의 운동에너지의 전달의 결과로 노즐에서 행하여지고 또 기체가 팽창하면서 기-액 기동에서도 일부 행하여진다.

기체운동에너지를 고려하여 용기에 주입된 기체의 질량유량  $\dot{m}_G$ 에 대한 단위시간당 운동에너지는 노즐 직경의 4승에 반비례한다.

$$E_{kin} = 8 \frac{\dot{m}_G^2}{\rho_G^2 \pi^2 d^4} \quad (1)$$

기체가 용기의 바닥에서 노즐로부터 액상 내로 들어온다면 기포의 직경은 노즐의 가장자리 길이 혹은 직경의 크기와 같은 치수를 가진다. 기체가 액상 내에서  $dh$ 를 상승할 때 에너지전달은 기체의 부력  $g(\rho_L - \rho_G)V$ 와 길이  $dh$ 의 곱이다. 따라서 단위시간당 에너지의 전달율은 다음과 같다.

$$d\varepsilon = Vg(\rho_L - \rho_G)dh \quad (2)$$

내적  $g(\rho_L - \rho_G)dh$ 는 압력감소량인  $dp$ 와 같고  $V$ 는 표준상태에서 단위시간당 주입된 기체의 부피다. 위의 식을 다시 정리하여 적분하면 다음과 같이 된다.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{V_G RT}{V_N} \ln \frac{p_1}{p_0} \quad (3)$$

여기서  $V_G$ 는 표준상태에서 단위시간당 기체의 유속을 의미하고  $V_N$ 은 표준상태에서 부피(22.4 l/mol)를 나타낸다. 또한  $p_1$ 은 노즐에서의 기체압력이고  $p_0$ 는 기-액 기둥의 상부에서의 압력으로 일반적으로 대기압에 해당된다. 난류에 의해 소모되는 열은 기-액 기둥이 액상과의 상호작용으로 인한 혼합 에너지의 형태로 전달된다. 주위로부터 기-액 기둥으로 환원되는 순환에너지는 아주 작은 양이라는 것을 실험적으로 확인하였다. 만약 주위의 액체가 움직이지 않는다면 기-액 기둥 속에서의 유동은 아주 높은 근사 값으로 계산 할 수 있으며 다음과 같은 가정을 함으로써 관계식들을 유도할 수 있다.

- (1) 기포기둥에서 속도  $u$ 와 기체 체적의 분포는 Gaussian 분포 함수를 따른다.
- (2) 기포기둥은 정적인 상태에서 상승한다.
- (3) 기체의 부력은 액체에서의 관성력과 평형을 이룬다.

위와 같이 가정하여 속도와 기체 체적은 다음과 같이 기포기둥의 반경의 함수로 쓸 수 있다.

$$\frac{u}{u_m} = \exp\left(-\frac{r^2}{b_u^2}\right) \quad (4)$$

$$\frac{x}{x_m} = \exp\left(-\frac{r^2}{b_x^2}\right)$$

여기서,  $u_m$ 과  $x_m$ 은 기포기둥의 중심에서 속도와 기체 체적의 최대 값

$b_u$ 는 기포기둥의 반경

$b_x$ 는 기체체적분포에 대한 반경

(이 두 반경은  $r = b$  일 때 변수  $u/u_m$ 과  $x/x_m = 1/e$ 값이 됨

$b_x/b_u$ 의 비는  $\lambda$ 로 표시 ( $\lambda = 0.7$ )

액상의 관성력은 기체의 부력과 평형하다는 가정에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I = \frac{1}{2} \pi \rho_L u_m^2 b_u^2 \left( 1 - \frac{2\lambda^2}{1+2\lambda^2} x_m \right) \quad (5)$$

$$F = \frac{p_0 T_L}{T_0 f u_m} V_G \ln \left( 1 - \frac{z}{z^*} \right) \quad (6)$$

위의 두 식은 조건 (3)에 의하여  $u_m$ 에 대해 풀어 보면 다음과 같다.

$$u_m = \left[ -\frac{2}{\pi} \frac{p_0 T_L}{T_0 f \rho_L b_u^2} \frac{\ln \left( 1 - \frac{z}{z^*} \right)}{1 - \frac{2\lambda^2}{1+2\lambda^2} x_m} V_G \right]^{1/3} \quad (7)$$

이 식은 주입된 기체의 유속  $V_G$ 와 중심유속  $u_m$ 과 기체체적  $x_m$ 사이의 관계를 나타낸다. 액체가 가장자리로부터 기포기동 속으로 이동해가고 폭은 자유표면 쪽으로 갈수록 증가하여 기포기동이 원뿔모양의 형상을 가진다는 것이다. 기포들은 노즐에서 수직방향으로 상승하기 보다는 원뿔모양으로 기포기동이 반경방향으로 팽창한다.

액체용기 내에 기포를 주입하는 시스템은 기포로 인한 난류순환유동을 해석하는데 자주 이용된다. 이 시스템에 존재하는 운동관계는 운동량, 열, 질량의 변환에 영향을 미치게 된다.

유동변수들은 난류와 선회운동 그리고 경계면에서의 변형 때문에 순간적으로 변하게 되고 변수들이 국부적 또는 순간적으로 변하는 것은 난류와 계면에서 빠르게 변화하기 때문이다. 이런 복잡하고 빠른 변화로 인하여 유동장내에서 구성방정식을 해석하기 위해서는 적절한 표준화 작업이 필요하게 된다. 표준화된 방정식은 상의 거시적인 운동을 묘사하며, 이것은 유동 역학적으로 해석할 때 유익한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

여재는 액상과 기상과 같이 유동을 하고 있으나 여재는 물과 비중이 거의 같고 유동에 크게 영향을 미치지 않는다고 가정하며, 모두 같은 위치에 존재하고 있으며 도메인은 기상과 액상으로 나누어지므로 유동장에서 방정식들은 상의 체적률을 고려해야 하고, 같은 공간에서의 연속상과 분산상에서의 압력은 같다고 가정하였다

기체 주입되는 반응조에서 질량보존 방정식은 상  $i$ 에서 체적률  $G_i$ 를 이용하여 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(G_i \rho_i) + \text{div}(G_i \rho_i v_i) - \text{div}(\rho_i D_{t,i} \text{grad } G_i) = 0 \quad (8)$$

여기서,  $\rho_i$ ,  $v_i$ ,  $D_{t,i}$ 는 각각 상밀도, 상속도, 난류확산계수(turbulent diffusibility)를 의미한다. 식의 마지막 항은 난류로 인한 상이 분산되는 것을 의미하고 상 분산은 상의 평균체적률의 항에서 구배의 형태로 나타나고 있다. 난류확산계수  $D_{t,i}$ 는 Prandtl 수  $\sigma_d$ 를 이용하여 액상의 난류점성계수로부터 계산되고 난류 분산 Prandtl 수는 다음과 같다.

$$\sigma_d = \frac{D_t}{\nu_t} \quad (9)$$

여기서,  $\nu_t$ 는 액상의 난류동점성계수이다.

또한, 한 방향에서 상  $i$ 의 속도를  $u_i$ 라 놓았을 때 각 상의 운동량 방정식은 다음 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(G_i \rho_i u_{i1}) + \text{div}(G_i \rho_i v_i u_{i1}) \\ = -R_i l \text{grad } P + B_{i1} + \text{div}(G_i \mu_{eff,i} \text{grad } u_{i1}) + I_{i,1} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $B_{i1}$  : 단위 체적당 1-방향 체적력(body force)이고 우측의 세 번째항은 마찰력을 의미한다. 그리고  $\mu_{eff,i}$ 는 상  $i$ 번째 상의 유효속도를 의미하고  $I_{i,1}$ 은  $i$ 번째 상에서 운동량 전달을 나타낸다.

## 2. MBBR의 유동해석 및 기대효과

여재가 50% 충전되어 있는 반응조의 규격은 1400(W) × 2500(L) × 3400(H)이며 유효높이는 2800mm이다. 따라서 유효용량은 19.6m<sup>3</sup>이다.

MBBR은 표면적이 500m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>로 설계되어 있어 블로어에 의해 공급된 공기와 접촉 단면적이 크고, 기포가 가진 운동에너지가 MBBR에 잘 전달되어 여재의 유동속도가 증가되고 반응조 전체에서 순환운동이 형성되는 것이다.

MBBR과 MBBR이 유동하면서 부딪치게 되는데 상호 인력을 줄이기 위해 여재 외부는 돌기로 구성되어있다.

블로어를 통하여 기포를 주입하였을 때 MBBR은 부력과 기포의 운동에 의한 액상의 와류와 관성에너지에 의해 반응조 내에는 순환유동이 발생하게 된다. 그리고 MBBR의 비중은 물과 거의 같은 0.92~0.96로 유동 손실이 최소화 되도록 하였다. 블로어를 통해서 반응조에 공급하는 기포의 유량은 2.28m<sup>3</sup>/min이다. 일반적으로 MBBR은 물보다 약간 가벼운 소재로 구성되어 기 때문에, 물에서 뜨려고 하는 성질인 양성부력(positive buoyancy)을 지닌다.

유체 중에 있는 MBBR은 그 부력에 의해서 표면으로 상승하게 되고, 반응조에 공기를 불어 넣게 되면 공기가 MBBR의 표면을 위로 밀어서 유동시키게 된다. 이것은 반응조 내에 주입된 기포가 가진 운동에너지가 액상에 전달되고 액상은 표면으로 상승하게 된다. 또한, 기포의 일부는 MBBR과 직접 접촉하고, MBBR의 속도에 직접적으로 영향을 미치게 되어 MBBR의 상승속도가 빨라지게 된다. 따라서 MBBR은 액상이 상승하는 유동과 기포의 운동에너지 및 MBBR 자체 부력에 영향을 받아 상승속도가 빨라지게 된다. MBBR이 액체의 표면에 도달하게 되면 그 유동은 유동에너지가 적은 쪽으로 이동되고, 외벽쪽에서 빠른 속도가 형성되는데 이것은 MBBR이 가진 속도와 외벽쪽에서 발생하는 원심력 때문일 것이라고 판단된다. 따라서 외벽쪽에서 발생하는 빠른 속도성분이 결국 반응조 내에서 유체의 순환운동의 원인이 되며, 이 순환운동은 반응조 전체에 걸쳐서 발생하게 된다. 블로어에서 주입된 공기의 유량이 많아지면 이 순환운동의 속도는 증가하게 되고 반응조 내에는 국부적인 와류가 형성된다. 이때 형성되는 국부적인 와류는 반응조 전체의 순환운동에 영향을 미치게 되고 반응조의 유동은 난류의 특성을 가지므로 위에서 설명된 난류에 관한 이론식의 지배를 받게 된다.

따라서 생물반응조에 충전된 여재는 그 유동이 활발하게 되고 쓸림현상이 없이 반응조 전체에 걸쳐서 순환유동이 형성되므로 오염된 유체를 정화를 시키는 데 아주 효율적이라 판단된다.

서울시립대학교 하·폐수처리 연구실 (인)