

기-액 교반탱크에서 공동의 특성에 관한 연구

허윤준 · 최청송 · 이원홍

서강대학교 이공대학 화학공학과
(1992년 8월 3일 접수, 1992년 12월 30일 채택)

A Study of Cavities Formed behind the Impeller Blades in a Gas-Liquid Agitated Reactor

Yun-Jun Huh, Cheong-Song Choi and Won-Hong Lee

Department of Chemical Engineering, Sogang University, C.P.O. Box 1142, Seoul, Korea
(Received 3 August 1992; accepted 30 December 1992)

요 약

고성능의 압력 트랜스듀서를 이용하여 교반탱크 내에서 발생하는 압력요동을 운전조건의 변화에 따라 측정하였다. 이 방법을 사용하여 범람과 부하상태의 전이영역을 쉽게 구분할 수 있었으며 타 연구자들의 연구결과와 비교분석하여 신뢰도를 확인할 수 있었다. 물질전달계수와 교반기에 의한 에너지소비를 측정하여 공동의 구조 변화와 비교해 본 결과 교반기의 날개뒤에 형성되는 공동의 형태는 물질전달과 교반기의 에너지소비에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다. 압력요동의 스펙트럼분석으로부터 3-3구조를 갖는 공동의 발전정도가 운전조건에 따라 변화됨을 알 수 있었다. 이러한 결과들로부터 기-액 교반탱크에서 물질전달과 에너지소비면에 있어서 최적의 운전조건을 쉽게 얻을 수 있었다.

Abstract—The transition conditions between flooding and loading were easily found using a miniature hydrophone which detects the pressure differences in radial outflow between flooding and loading. The reliability of a proposed method was confirmed by comparing the data with an early published correlation equation. The mass transfer coefficients and the power consumptions of impeller depended on the cavity structures formed behind the impeller blades. From the spectrum analysis of pressure fluctuation, it was realised that the degree of progress of 3-3 structured cavity varied with the change of operating conditions in the 3-3 structured cavity region. In view of gas-liquid mass transfer and power consumptions, the optimal operating condition in an agitated reactor could be found by the spectrum analysis of the pressure fluctuations.

1. 서 론

기-액 교반탱크 내의 유체의 흐름은 회전하는 교반기에 의하여 발생하는 원심력과 주입되는 기체에 의하여 생성되는 부력의 합력에 의하여 좌우된다. 기체가 교반탱크 내에 주입되는 경우에 존재할 수 있는 유체의 흐름형태는 다음과 같이 구분할 수 있다[1]. 교반기의 회

전속도가 빠르고 주입되는 기체의 양이 적은 경우 유체의 순환형태는 교반기의 회전이 유체의 흐름을 주도하게 되어 기체가 주입되지 않은 상태의 순환상태와 비슷하게 된다. 주입하는 기체의 양을 증가하게 되면 기체에 의한 부력이 유체의 흐름을 주도하게 되며 교반기의 회전은 점점 그 영향력을 잃게 된다. 이보다 더 많은 양의 기체를 주입하게 되면 기체 방울들은 더이상 교반기에 의하여

분산되지 않고 교반기의 축을 따라 그대로 표면으로 올라가게 된다. 이렇듯 주입되는 기체가 주도하는 흐름 형태를 범람(flooding) 상태라 부른다[2, 3]. 반면에 범람이 되기 전의 순환상태를 부하(loading) 상태라고 한다. 범람과 부하의 전이지점은 많은 연구자들의 관심이 되어왔다[4-12]. 범람은 교반기에 의하여 유체가 거의 또는 전혀 분산되지 않는 바람직하지 않은 현상이다. 이 상황에서는 교반탱크 내의 유체의 순환속도가 감소되며 혼합이 거의 일어나지 않게 된다. 또한 범람상태에서는 주입되는 기체가 적절히 분산되지 않으며 기체의 체류량(hold-up)과 기-액간의 비표면적이 너무 작아 기-액 반응의 이용에 사용될 수 없게 된다. 그렇기 때문에 범람의 상태를 이해하고 범람이 일어나는 운전조건을 알아내는 것은 기-액 교반탱크의 대형화(scale-up)와 설계에 매우 중요하다.

70년대 중반 기-액 교반탱크에서 교반기의 날개뒤에 형성되는 기체의 집단(이하 공동이라 한다)을 인식[13, 14]한 이래로 지금까지 이에 관한 연구가 활발히 진행되어지고 있다[15-17]. 기-액 교반탱크에서 공기의 유량이 증가함에 따라 교반기의 날개뒤에는 소용돌이 모양을 가지는 공동(소용돌이 공동)에서 기체가 교반기의 날개뒤에 떨어져 다니는 공동(떨어져 다니는 공동) 그리고 범람이 되기 바로 직전까지 기체의 큰 집단이 날개의 뒤에 매달리는 공동(큰 공동)으로 공동의 크기와 모양이 변하게 된다고 알려지고 있다[9, 14]. 또한 떨어져 다니는 공동과 큰 공동 사이의 운전조건에서는 교반기의 날개뒤에 떨어져 다니는 공동과 큰 공동이 교반기의 날개뒤에 교대로 존재하게 되는 현상이 나타난다[14]. 6개의 날개를 가진 교반기의 경우 이러한 상태의 공동을 3-3구조의 공동이라 한다. 3-3구조의 공동이 형성되는 운전조건에서는 교반기에 의한 소비에너지가 운전조건의 변화에 대하여 크게 변화되지 않는 안정된 흐름 현상을 보인다고 보고되어 있다[8].

기-액 교반탱크에 있어서 주입되는 기체는 대부분 교반기의 날개를 거쳐 반응기에 분산이 되어지기 때문에 교반기의 날개뒤에 형성되는 공동의 형태는 기체의 분산에 큰 영향을 끼치게 된다. 그러나 공동에 관한 대부분의 연구는 측정장치의 제한에 의하여 단지 공동의 형성확인에만 그 연구가 머물러 있으며 이들의 동특성이 물질전달과 혼합에 미치는 영향에 대한 보고는 매우 드문 실정이다.

본 연구의 목적은 주입되는 기체와 회전하는 교반기에 의하여 생기는 교반탱크 내의 복잡한 현상을 이해하고 이를 바탕으로 물질전달과 교반기의 에너지 소비면에 있어서 최적의 상태가 되는 운전조건을 찾아내는데 있으며 이를 위하여 교반탱크 내의 압력요동 특성을 이

용하여 교반탱크 내의 기포의 거동을 분석하고 교반기의 날개뒤에 형성된 공동이 가장 안정적이고 가장 활동적인 상태의 운전조건을 찾아내었다. 본 연구의 결과로서 얻어지는 교반기 주변에서의 공동의 특성은 교반탱크내의 기포들의 거동과 기-액간의 물질전달 등 기-액계에 대한 전반적인 현상을 이해하는데 기본적인 자료가 될 것이며 또한 이를 물질전달과 혼합의 효과가 보다 향상되도록 교반기를 설계하는데 이용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험

2-1. 실험장치

교반탱크는 반지름이 0.75 m이고 높이가 1.102 m인 아크릴 탱크를 제작하여 사용하였다. 실험을 하는 동안 물의 높이는 항상 0.75 m를 유지하였으며 0.075 m 두께의 4개의 방해판을 탱크의 안쪽에 균형있게 부착하였다. 본 연구에서 사용한 교반탱크와 교반기의 기하학적인 크기는 표준화 되어 있는 크기를 사용하였다[18]. 교반기의 모터는 2마력의 직류모터를 사용하였으며 이 모터를 사용하여 교반속도를 0-5 rps로 변화하면서 실험을 행하였다. 교반속도는 타코미터를 사용하여 측정하였다. 교반기의 지름은 0.241 m, 날개의 길이는 0.06 m, 두께는 0.048 m이었다. 교반기는 탱크의 밑바닥에서 0.25 m 위에 설치하였다. 기체 분산기는 반지름이 0.006 m인 구멍이 하나 있는 것을 사용하였다. 이 분산기에 의해 주입되는 공기의 양은 0-350 slm이었다. 주입되는 공기는 10기압의 공기 콤프레서에서 나온 것을 3개의 공기 여과기와 압력 조절기를 거친 후 사용하였다. 분산되는 기체의 유량은 질량 유량계(Mathson Co.)와 로타미터(Blue White Ind.)를 사용하여 측정하였다. 본 연구에서는 공동의 형태 변화를 관찰하기 위하여 전기 전도도 측정장치[19]를 이용하였으며 교반기에 의한 에너지 소비는 역물계를 사용하여 계산하였다. 그리고 주입되는 공기에 의한 물질전달계수는 다음과 같은 식[20]을 사용하여 계산하였다.

$$\ln\left(1 - \frac{C}{C^*}\right) = K_L a t \quad (1)$$

여기에서 C^* 는 산소의 용해도, $k_L a$ 는 물질전달계수, t 는 시간이며, C 는 용존 산소농도이다. 용존 산소농도는 R.E. Marubishi 회사의 모델 DY26 용존 산소농도 측정기를 사용하여 측정하였다. Fig. 1에 실험장치의 개략도를 나타내었다.

2-2. 압력요동의 측정

기-액 교반탱크 내에는 (1) 교반기의 회전에 의한 방식

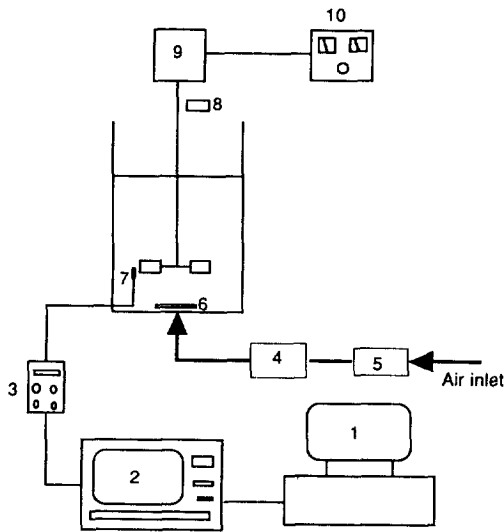


Fig. 1. Schematic diagram for the measurements of pressure fluctuation in an agitated reactor.

- 1. PC for signal processing
- 2. B&K 2032 dual channel spectrum analyzer
- 3. B&K 2635 charge pre-amp
- 4. Mass flow meter
- 5. Regulator & air filter
- 6. Gas sparger
- 7. Hydrophone
- 8. Tachometer
- 9. 2Hp DC motor
- 10. Power supply

방향의 힘, (2) 분산기에서 나오는 기체에 의한 소리와 부력에 의한 축 방향의 힘, (3) 교반기의 빠른 회전에 의해서 공기가 표면동반(surface entrainment)되면서 내는 소리, (4) 기포의 부피팽창에 의한 소리[21] 등의 압력요동(pressure fluctuation) 요소가 발생되며 이외에도 작은 규모의 와류(eddy)에 의한 압력요동과 두(head)에 의한 압력요동 등도 존재하게 된다. 이러한 압력요동의 요인들은 교반탱크 내의 기체와 액체의 계면특성에 영향을 주어 물질전달을 좌우하게 되며, 교반탱크 내 유체의 전체 흐름 및 형성되는 기포의 특성에도 영향을 주게 된다.

기-액 교반탱크 내의 압력요동을 측정하기 위하여 수중 청음기(B&K Model 8103)를 사용하였다. 이 수중 청음기는 기존의 제품들 중에서 가장 소형화되어 있는 장비로서 실험실용으로 제작된 것이다. 이 수중 청음기는 압전원리를 이용하여 압력요동을 측정하며 이 수중 청음기에 사용된 압전 세라믹 트랜스듀서는 감지능력이 매우 우수하여 1Hz에서 수백 KHz까지의 광범위한 주파수 영역을 감지할 수 있는 능력을 갖고 있다. 이 수중 청음기의 감지 민감도는 -211 dB re 1 V/Pa이며 0.1 Hz에서 200 KHz의 주파수 영역을 갖고 있다.

수중 청음기에 의해 측정된 압력요동의 신호는 전치 증폭장치(pre-amplifier, B&K Model 2635)를 거쳐 스펙트럼 분석기(B&K Model 2032)에 의해 분석하였다. 또한 난류에 의한 전체 에너지값을 계산하기 위하여 분석기에 의하여 분석된 결과를 운전조건에 따라 전산기에 저장하였다. 스펙트럼 분석은 샘플링 시간을 997 μs, 전체 샘플링하는 시간을 1초, 주파수 범위는 400 Hz로 하였고 256개의 평균값을 취하여 행하였다. 그리고 전치 증폭기의 gain은 1 mV/unit out으로 하였다.

수중 청음기는 공동의 특성에 따른 압력요동의 상태를 관측하기 위하여 교반기의 날개에서 25 mm의 거리를 두고 설치하였으며 본 연구에서 사용한 수중 청음기는 1 KHz 내에서는 방향성이 거의 없는 것으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 범람(Flooding)과 부하>Loading)의 전이지점

압력요동의 특성을 이용하여 기-액 교반탱크 내의 거동을 분석하기 위하여 한 가지 가정을 하였다. 그것은 닫힌 계 내에 있는 유체의 질량(mass)은 유체가 움직이는 시간 동안 일정하다는 것이다. 이 가정에 의하여 교반기 내의 난류의 상태는 유체의 속도구배에 의해서만 만들어진다고 여길 수 있을 것이다. 그 이유는 운동에너지($mv^2/2$)에 있어서 질량이 일정하기 때문에 운동에너지의 변화는 오로지 속도의 변화에 기인한다고 볼 수 있기 때문이다. 압력요동신호의 파워스펙트럼이라는 기본적으로 에너지 스펙트라이기 때문에 파워스펙트럼은 교반기 내의 와류(eddy)의 운동에너지에 비례하며 주파수는 와류의 크기에 반비례 하게 된다. 여기에서 유체 흐름의 전체에너지 E_t 를 다음과 같이 정의하였다.

$$E_t = \int_{f_{min}}^{f_{max}} e(f) df \tag{2}$$

위의 식에 의하여 얻은 난류에 의하여 발생된 E_t 는 운전조건에 따른 교반탱크 내 유체의 흐름 특성과 그 운전조건에 있어서의 난류에 의한 와류의 특성을 가지고 있게 된다.

교반탱크 내 기체의 전체흐름의 상태가 범람에 가까운 상태인 경우에 교반기의 회전속도가 충분히 크지 않으므로 기체분산기에서 나온 기체는 교반기의 디스크에 부딪힌 다음 부력에 의하여 방사방향으로 분산되지 못하고 그대로 교반기의 축을 따라 올라가게 된다. 이러한 현상이 유지되는 상태에서 교반속도가 증가하게 되면 교반속도의 증가에 따르는 방사방향의 힘의 증가는 크지가 않을 것이다. 반면 교반탱크 내 기체의 전체흐름의 상태가 부하상태인 경우는 교반속도의 증가에 따른 원

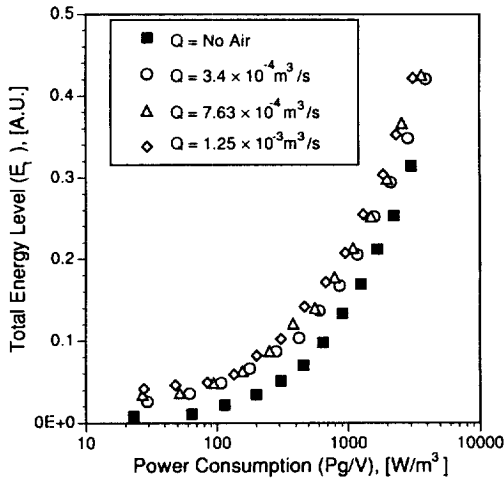


Fig. 2. The effects of power consumptions on the total energy level.

심력의 증가가 그대로 방사방향의 힘의 증가로 나타날 것이다.

공기의 유량이 적은 경우 공기에 의하여 발생하는 부력에 비하여 교반기의 회전에 의한 원심력이 항상 크기 때문에 교반기의 회전이 빨라짐에 따른 교반기주위의 압력변동은 공기가 주입되지 않는 상태의 그것과 차이가 없을 것이다. 즉 공기의 유량이 적은 경우 교반탱크 내의 기포의 거동에는 범람과 부하의 개념이 존재하지 않는다. 그 결과 압력센서에 의하여 측정된 교반기 주변의 E_t 의 변화는 공기의 주입에 의하여 발생하는 소리의 증가에 따른 E_t 의 증가외에는 공기가 주입되지 않는 상태에서 측정된 E_t 와 큰 차이가 없을 것이다(Fig. 2).

적당한 양의 공기가 주입되는 상태에서 교반기의 에너지소비의 증가에 따른 E_t 의 변화를 보여주는 Fig. 3에서는 교반기의 에너지소비가 증가함에 따라 E_t 가 급격히 변하는 지점이 나타나 있다. 그 중에서 교반기의 에너지소비가 낮은 영역에 생긴 지점은 주입되는 공기에 의한 부력이 교반기의 회전에 의한 원심력보다 큰 상태(범람상태)에서 교반속도가 증가함에 따라 원심력의 증가가 부력을 능가하면서(부하상태) 그 때의 급격한 압력변동이 수중 청음기에 의하여 측정되기 때문에 생긴 것으로 생각된다. 기포가 부하된 상태에서는 교반기의 날개뒤에 생긴 공동은 교반속도에 따라 큰 공동형태나 또는 3-3 구조의 공동이 존재할 것으로 생각되나 3-3구조의 공동이 좀더 우세하게 존재할 것이라 생각된다. 이러한 상태에서 교반속도를 더 증가하게 되면 교반기의 회전에 의한 원심력이 공기의 부력보다 커지기 때문에 교반기의 날개뒤에 형성된 공동은 더 이상 날개뒤에 매달려 있지 못하고 떨어져나가거나 또는 소용돌이 공동상태로 존

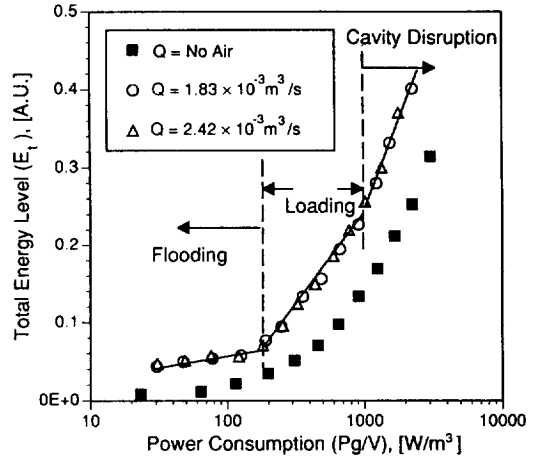


Fig. 3. The effects of power consumptions on the total energy level.

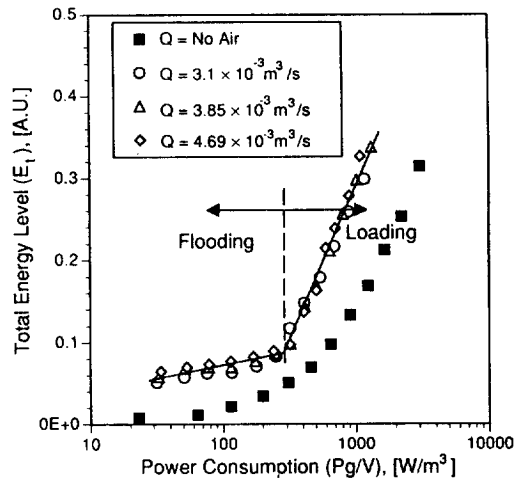


Fig. 4. The effects of power consumptions on the total energy level.

재하게 된다. 이 상태에서는 교반속도의 증가에 따라 교반기의 날개로부터 나오는 유체의 방출속도가 부하상태보다 더 급격히 증가될 것이며 Fig. 3에 나타난 에너지소비가 큰 영역에서 생긴 E_t 가 급격히 변화하는 지점은 이러한 이유에 의하여 생긴 것이라 생각된다. 그러므로 Fig. 3에서 에너지소비가 작은 영역에서 생긴 E_t 가 급격히 변화하는 지점의 운전조건은 교반탱크 내의 전체흐름이 범람상태에서 부하상태로 전환되는 지점이며 두 번째 E_t 가 급격히 변화하는 지점이 생긴 운전조건은 교반기의 날개뒤에 형성된 공동이 소용돌이 공동의 상태로 변환되는 지점임을 알 수 있었다. 그러므로 이 속도 이상에서는 큰 공동을 관찰할 수 없게 된다.

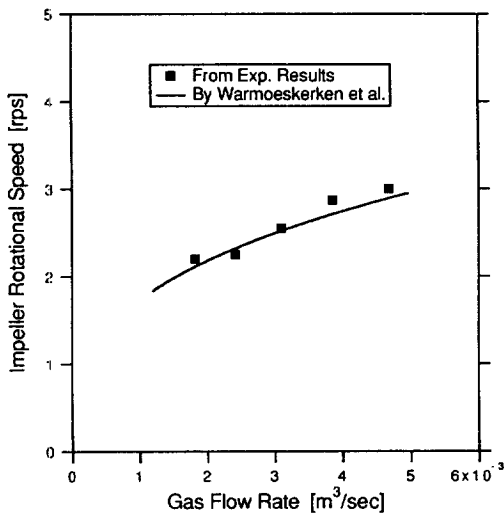


Fig. 5. Comparison of flooding/loading transition conditions with a correlation equation of Warmoeskerken et al. [11,12].

Fig. 4는 공기의 유량을 크게 했을 때의 E_L 의 변화를 보여준다. 여기에서 Fig. 3에서와 같이 두 개의 기울기가 변화되는 지점을 볼 수 없었고 단지 한 개의 기울기가 변화되는 지점이 나타났다. 이것은 공기의 유량이 큰 경우 본 연구에서 설정한 운전조건이 공동이 깨어지는 조건까지는 도달하지 못함을 나타낸다.

E_L 의 변화에 의하여 얻은 범람과 부하의 전이지점을 확인하기 위하여 실험결과를 Warmoeskerken 등[11,12]이 제안한 상관관계식 (3)과 비교하여 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 교반속도의 증가에 따른 범람과 부하의 전이지점은 상관관계식에 의한 곡선과 유사함을 알 수 있다.

$$Fl = 30 \times Fr \times (T/D)^{-3.5} \quad (3)$$

여기에서 Fl은 Flow수, Fr은 Froude수, T는 반응기의 직경, 그리고 D는 날개의 직경을 나타낸다.

결론적으로 본 연구에서는 교반기의 날개옆에 부착한 압력센서를 이용하여 범람과 부하영역의 경계를 알 수 있었으며, 문헌에 있는 상관관계식과 비교하여 신뢰할 만한 결과를 얻었다. 또한 공동이 깨어지는 조건으로 생각되는 지점을 찾을 수 있었으며 이것은 교반탱크의 운전조건을 설정할 때 한계요소로 적용할 수 있을 것이다.

3-2. 교반기에 의한 에너지소비와 물질전달계수

Fig. 6은 교반속도가 일정한 경우 공기유량의 변화에

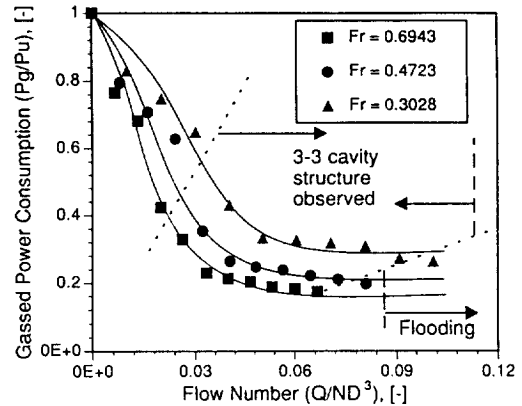


Fig. 6. The effect of gas flow rates on the power consumptions with the observed cavity structures.

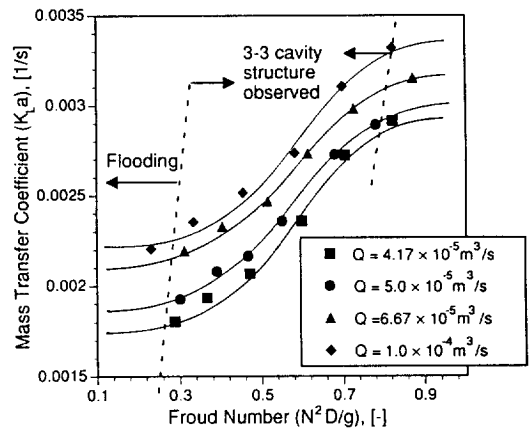


Fig. 7. The influence of impeller rotational speeds on the mass transfer coefficients with the observed cavity structures, for T=0.2.

다른 교반기의 에너지소비의 변화를 보여주는 것이다. Lee 등[19]이 제안한 전기전도도 측정장치를 사용하여 공동의 형태변화를 관측하여 에너지소비의 변화와 비교해 본 결과 공기 유량의 증가에 따른 에너지소비의 감소율은 공동의 형태가 달려 다니는 공동에서 3-3구조의 공동으로 변화될 때 가장 급격히 일어나는 것을 알 수 있었다. 이것은 공동의 형태가 3-3구조의 공동으로 되면서 교반기 주변의 밀도가 낮아지기 때문이라고 생각할 수 있다. 또한 3-3구조의 공동형태가 유지되는 영역에서는 3-3구조의 공동이 안정된 상태이므로 공기유량의 증가에도 불구하고 에너지소비의 변화가 거의 없는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 교반속도의 변화에 따르는 물질전달계수의

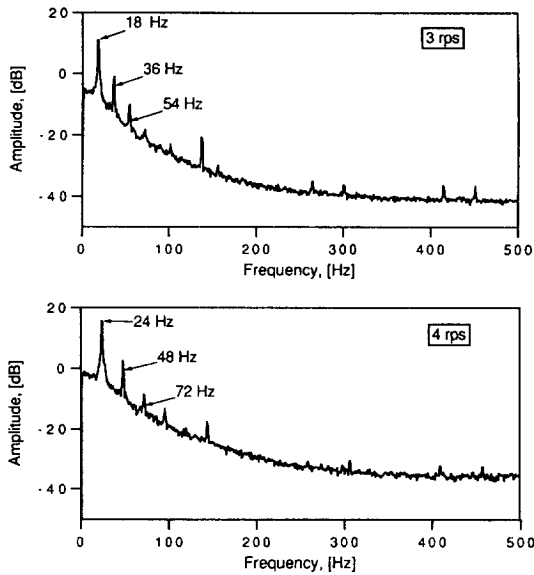


Fig. 8. The effect of impeller rotational speeds on the power spectrum without air.

변화를 보여준다. 물질전달을 공동의 형태변화와 함께 분석해 보면 3-3구조의 공동이 관찰된 영역에서 물질전달계수가 크게 증가되는 것을 알 수 있었다. 이것은 범람영역에서는 공기가 교반기에 의하여 충분히 분산되지 않다가 3-3구조의 공동이 형성되면서 기체의 체류량이 증가되기 때문인 것으로 생각한다. 또한 3-3구조의 공동영역 이상으로 교반속도를 증가하게 되면 공동이 깨지면서 기체의 체류량은 급격히 증가하겠지만 기체의 재순환(recirculation)에 의하여 산소가 고갈된 기체가 교반기 내에 존재하게 되어 교반속도가 증가하는 것 만큼 물질전달계수가 증가되지 않는다. 따라서 에너지소비와 물질전달면에 있어서 기-액 교반탱크를 효과적으로 운전하기 위해서는 교반날개뒤에 형성되는 공동의 형태를 3-3구조의 상태로 유지하는 것이 매우 효과적이라는 결론을 얻을 수 있었다.

3-3. Power스펙트럼

다음 Fig. 8은 공기가 주입되지 않을 때 교반속도의 변화에 따른 스펙트럼의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 교반속도의 증가에 따라 스펙트럼의 주 진동수는 교반기의 날개가 지나가는 주파수와 같게 변화된다. 예를 들어 Fig. 8과 같이 교반속도가 180 rpm인 경우 주 진동수는 $180(\text{rpm}) \times 6(\text{날개수}) / 60(\text{s/min}) = 18 \text{ Hz}$ 가 된다. 그리고 이에 따르는 조화(harmonic) 피크들이 18 Hz의 배수가 되는 주파수에서 생기게 된다. 이 피크들은 그림의 피크 A, B, C에 해당된다. 이렇듯

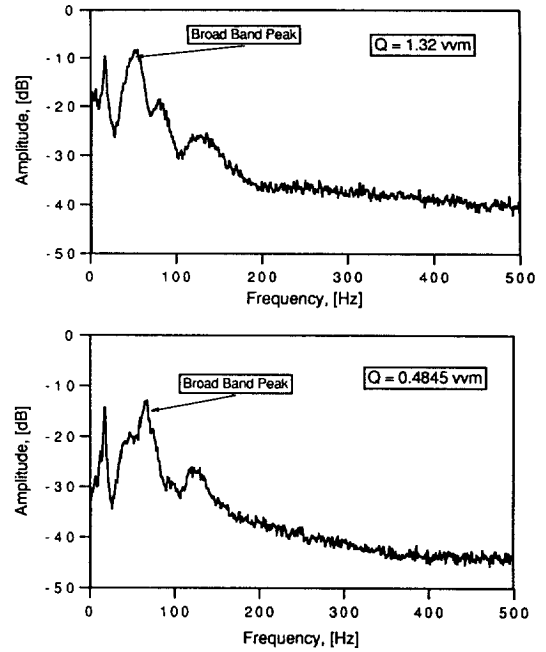


Fig. 9. The effect of air flow rates on the power spectrum without impeller rotation.

교반기의 회전에 따라 주 진동수가 변하는 것은 수증 침음기가 기본적으로 압력요동에 의한 매질의 파동 변화를 측정하는 것이기 때문에 날개가 압력센서를 지나가면서 발생하는 유체의 방출에 의하여 압력의 변화가 측정되기 때문이다.

지난 몇년 동안 음향학분야에서는 물속에서의 기포들의 집단에 의하여 발생하는 소리의 특성에 관한 연구가 활발히 진행되어지고 있다[22]. 지금까지 발표된 연구 결과에 따르면 기포들의 집단에 의하여 발생하는 소리는 기포의 부피팽창에 의하여 발생하는 소리의 주파수와는 다른 주파수를 갖는다고 한다. Fig. 9는 교반기가 회전하지 않는 경우 주입되는 공기의 양의 변화에 따르는 스펙트럼의 변화를 보여준다. 이 그림에 따르면 주입되는 공기의 양에 따라 그 주파수가 변화되는 넓은 주파수 대역을 갖는 피크를 볼 수 있다. 이 피크는 주입되는 공기의 양이 많을수록 주파수가 작은 쪽으로 이동되는 것을 볼 수 있었으며 이들의 피크가 나타나는 주파수는 수백 Hz범위이었다. 이렇듯 넓은 주파수대역을 갖는 피크의 주파수가 주입되는 공기의 유량에 따라 이동하는 원인을 설명할 수 있는 것으로 첫째 주입되는 공기가 기체분산기에서 나오면서 갑작스러운 압력의 변화에 따라 소리를 발생시키며 공기의 유량에 따라 압력변화에 차이가 나게 되므로 주파수가 이동할 수 있다는 것과

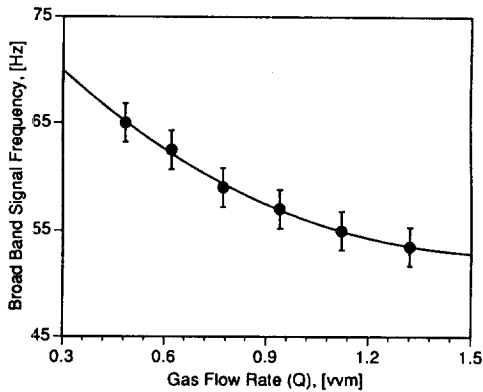


Fig. 10. The relation of gas flow rates with the frequency of broad band signal. Error bars indicate the averaged values.

둘째 주입되는 공기가 교반기의 디스크에 부딪히면서 소리를 발생시키고 주입되는 공기의 양에 따라 부딪히는 정도의 차이에 의해 소리의 주파수가 변화될 수 있다는 것을 들 수 있다. 이를 확인하기 위하여 디스크(disc)가 있는 경우와 디스크가 없는 경우에 대하여 실험을 행하였다. 실험결과에 의하면 디스크의 유, 무에 관계없이 넓은 주파수대역을 갖는 피크는 공기유량의 증가에 따라 그 주파수가 작아짐을 알 수 있었다. 그러므로 넓은 주

파수대역을 갖는 피크의 주파수가 공기의 유량증가에 따라 작아지는 것은 기체분산기에서 공기가 나오면서 내는 소리가 공기유량의 변화에 따라 변하기 때문이라 생각된다. 다음의 Fig. 10은 주입되는 공기유량의 변화에 따르는 이들 주파수들의 평균값을 나타내었다. 이 그림으로부터 공기의 유량과 넓은 주파수대역을 갖는 피크의 주파수 사이에는 서로 연관성이 있음을 알 수 있다.

Fig. 11은 주입되는 공기의 양이 1.32 vvm인 경우 교반속도에 따라 날개회전수의 반이 되는 주파수에서 부-조화(sub)-조화(harmonic) 피크가 나타났다. 이 피크는 그림의 피크 D에 해당된다. 이 피크가 나타나는 것은 6개의 날개 중에서 3개의 날개와 나머지 3개의 날개로부터 발생하는 압력요동의 정도가 다르기 때문이며, 이렇듯 3개의 날개에서 발생하는 압력요동의 크기가 다른 것은 교반기의 날개뒤에 생긴 공동의 형태가 서로 다르다는 것을 의미한다. 그러므로 파워 스펙트럼의 결과에서 부-조화 피크의 발생은 교반기의 날개 뒤에 3-3구조의 공동이 형성되었음을 표시하는 것이 된다. 교반속도에 따른 날개의 회전주파수에서의 피크의 크기와 그 반주파수에서의 피크의 크기의 비는 교반기의 날개뒤에 생긴 공동의 형태 차이가 뚜렷할수록 점점 더 커질 것으로 생각되며 뚜렷한 3-3구조의 공동형태가 이루어졌을 때 그 크기의 비가 최대가 된다.

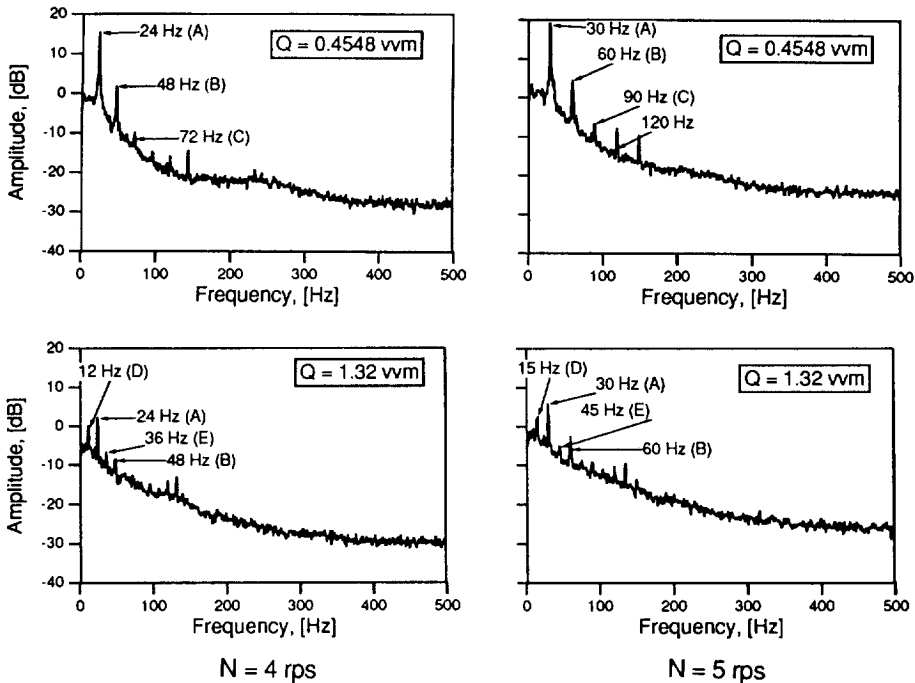


Fig. 11. The effect of operating conditions on the power spectrum.

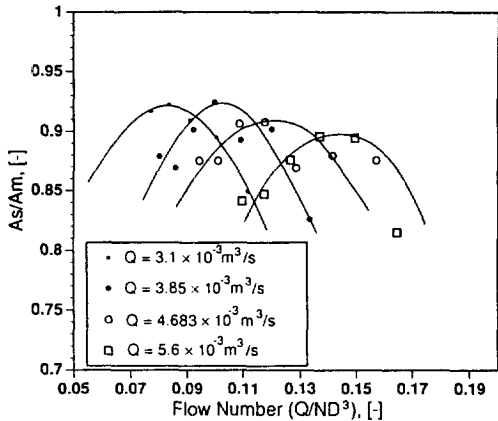


Fig. 12. The effect of impeller rotational speeds on the ratio of amplitude at the frequency of first main peaks and that at the frequency of first sub-harmonic peak.

3-4. 3-3구조 공동의 변화특성

6개의 날개를 가진 교반기를 공동이 형성되지 않은 상태로 회전을 시켜서 날개의 회전에 의하여 발생하는 압력변동을 측정할 때에는 앞에서 언급한 바와 같이 날개의 회전주파수에서만 피크가 나타나게 된다. 그러나 6개의 날개 중에서 하나 건너씩 3개의 날개 형태를 변화시키게 되면 변형된 날개로부터 발생하는 원심력은 변형되지 않은 날개에 의하여 발생하는 원심력과는 차이가 있을 것이며 이러한 차이는 압력센서에 의한 스펙트럼에서 날개회전수의 반 주파수에 나타나는 피크의 크기(amplitude)차이로 나타날 것이다. 또한 원심력의 차이가 크면 클수록 반 주파수에서의 피크의 크기값은 점점 더 커질 것이다.

3-3구조의 공동 상태에서 날개뒤에 형성된 공동이 떨려 다니는 공동인 경우와 큰 공동인 경우에 따라 날개의 회전에 의하여 발생하는 원심력은 그 크기에 차이가 생기며 이러한 원심력의 차이는 날개회전수의 반 주파수에서 생기는 피크의 크기값으로 나타날 것이다. 또한 반 주파수에서의 크기값은 날개뒤에 형성되는 큰 공동과 떨려 다니는 공동의 형태차이가 뚜렷할수록 증가하게 된다. 결국 3-3구조의 공동상태에서 날개뒤에 형성된 공동의 형성정도에 따라 날개의 회전수에 해당하는 주파수와 그 주파수의 반 주파수의 크기 비율의 값이 차이가 생기게 되며 그 비율이 클수록 더 발전된 3-3 공동이라고 볼 수 있을 것이다.

Fig. 12는 주입되는 공기의 양이 일정할 때 교반속도의 변화에 따르는 날개의 회전수에 해당하는 주파수에서의 크기, A_m , 와 그 주파수의 반이 되는 주파수에서의 크기,

A_s , 사이의 비의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에 따르면 A_s/A_m 은 교반속도가 증가함에 따라 그 크기가 증가하다가 다시 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이것은 교반속도가 증가함에 따라 교반기의 날개뒤에 형성된 3-3 구조의 공동이 운전조건에 따라 형성정도가 다르다는 것을 의미한다. 3-3구조 공동의 형성정도에 따라 교반기 주변의 밀도와 교반기의 회전에 의하여 발생하는 주기적인 요동현상의 크기가 다르게 나타나게 되므로 3-3구조 공동의 형성정도의 차이는 물질전달과 에너지소비면에 큰 영향을 끼치게 된다. A_s/A_m 값이 최대가 되는 운전조건에서는 큰 공동이 형성된 교반기의 날개와 떨려 다니는 공동이 형성된 교반기의 날개에서 발생하는 방출속도의 차이에 의하여 교반탱크 내의 유체의 전체 흐름은 다른 운전조건에서 보다 더 심하게 요동되는 현상을 보일 것이다. 그러므로 A_s/A_m 이 최대가 되는 운전조건에서는 기체와 액체 사이의 계면에서 일어나는 물질전달현상이 크게 향상되고 3-3구조 공동의 안정성에 의하여 교반기 주변의 밀도변화가 크지 않으므로 교반기에 의한 에너지소비는 낮은 상태로 안정하게 유지될 것이다. 그렇기 때문에 A_s/A_m 값이 최대가 되는 운전조건은 기-액 교반탱크에서 물질전달과 교반기에 의한 에너지소비면에 있어서 가장 최적의 운전조건이라 생각한다. 본 연구에서는 공기의 유량이 0.77 vvm이고 교반속도가 약 4 rps인 운전조건에서 A_s/A_m 값이 최대값을 가짐을 알 수 있었다.

4. 결 론

고성능의 압력 트랜스듀서를 이용하여 교반탱크 내에서 유체의 흐름에 관한 범람과 부하영역을 구분할 수 있었다. 측정된 범람과 부하상태의 경계지점을 앞선 연구자들의 결과와 비교해 본 결과 본 연구에서 얻은 경계지점의 판단은 신뢰할 만하였다. 교반탱크 내 압력요동 특성으로부터 주입되는 공기의 유량은 넓은 주파수대역을 갖는 피크의 평균 주파수와 서로 상관관계가 있음을 알았으며 물질전달과 교반기의 에너지소비면에 있어서 최적의 운전조건은 3-3구조의 공동상태에서 3-3구조의 공동이 가장 안정적으로 그리고 가장 활동적으로 유지되는 지점임을 알 수 있었다. 운전조건에 따른 A_s/A_m 의 변화로부터 3-3구조 공동상태에서의 큰 공동의 발전정도를 알 수 있었으며 이들로부터 3-3구조의 공동이 가장 활발하게 형성되는 운전조건을 찾을 수 있었다.

감 사

본 연구에 경비를 지원해 주신 한국학술진흥재단에

감사를 드립니다.

사용기호

A_m : amplitude at the frequency of main harmonic peak [dB]
 A_s : amplitude at the frequency of sub-harmonic peak [dB]
 C : dissolved oxygen concentration [mg/L]
 C^* : oxygen solubility in water [mg/L]
 D : stirrer diameter [m]
 E_t : total energy level [Arbitrary Unit]
 $e(f)$: density distribution of the liquid flow energy e in the frequency range used
 f : spectral frequency [Hz]
 f_{min} : minimal limit frequency of the spectrum [Hz]
 f_{max} : maximal limit frequency of the spectrum [Hz]
 g : gravitational acceleration [m/s^2]
 K_{La} : volumetric mass transfer coefficient for liquid phase, based on concentration difference [s^{-1}]
 N : stirrer speed [s^{-1}]
 P_g : gassed power consumption [W]
 P_u : ungassed power consumption [W]
 Q : volumetric flow rate [m^3/s]
 T : tank diameter [m]
 t : time [s]
 V : liquid volume in the reactor [m^3]

그리스 문자

ρ : liquid density [Kg/m^3]

무차원 변수

Fl : Flow number [Q/ND^3]
 Fr : Froude number [N^2D/g]
 A_s/A_m : ratio of amplitude at the frequency of sub-harmonic peak to amplitude at the frequency of main harmonic peak

참고문헌

- Nienow, A. W., Wisdom, D. J. and Middleton, J. C.: 2nd Euro. Conf. on Mixing, pp. F1-1-F1-16(1977).
- Biesecker, B. O.: *VDI Forschungsheft*, 554(1972).
- Feijen, J., Heijnen, J. J. and van't Riet, K.: Proc. Symp. on Mixing and Dispersion Processes, Inst. of Chem. Engrs. and KIVI/NIRIA Delft Tech. Univ., 7 May(1987).
- Chapman, C. M., Gibilaro, L. G. and Nienow, A. W.: *Chem. Eng. Sci.*, **37**, 891(1982).
- Hsi, R., Tay, M., Bukur, D. and Tatterson, G.: *Chem. Eng. J.*, **31**, 153(1985).
- Hudcova, V., Nienow, A. W., Haozhung, W. and Houxing, L.: *Chem. Eng. Sci.*, **42**(2), 375(1987).
- Hudcova, V., Machon, V. and Nienow, A. W.: *Biotechnol. Bioeng.*, **34**, 617(1989).
- Ismail, A. F., Nagase, Y. and Imon, J.: *AIChE J.*, **30**(3), 487(1984).
- Lu, W. M. and Ju, S. J.: *Chem. Eng. Sci.*, **44**(2), 333(1989).
- Tatterson, G. B. and Morrison, G. L.: *AIChE J.*, **33**(10), 1751(1987).
- Warmoeskerken, M. M. C. G. and Smith, J. M.: *Chem. Eng. Sci.*, **40**(11), 2063(1985).
- Warmoeskerken, M. M. C. G. and Smith, J. M.: World Congress III of Chemical Engineering, Tokyo, Vol. III, pp. 350-353(1986).
- Bruijij, W., van't Riet, K. and Smith, J. M.: *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **52**, 88(1974).
- van't Riet, K. and Smith, J. M.: *Chem. Eng. Sci.*, **30**, 1093(1975).
- Chapman, C. M., Nienow, A. W., Cooke, M. and Middleton, J. C.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **61**, 82(1983).
- Warmoeskerken, M. M. C. G. and v. Houwelingen, M. C.: *Chem. Eng. Res. Des.*, **62**, 197(1984).
- Smith, J. M., Warmoeskerken, M. M. C. G. and Zeef, E.: *Biotechnology Process-Scale-up and Mixing*, C. S. Ho, J. Y. Oldshue, eds., American Institute of Chemical Engineers, New York, 107-115(1987).
- Nagata, S.: *Mixing-Principles and Applications*, Kadansha Ltd., Tokyo(1975).
- Lee, H. Y., Huh, Y. J., Choi, C. S. and Lee, W. H.: *KJChE.*, **9**(3), 164(1992).
- Atkinson, B. and Maituna, F.: *Biochemical Engineering and Biotechnology Handbook*, The Nature Press, United Kingdom(1983).
- Strasberg, M.: *J. Acoust. Soc. Amer.*, **28**, 20(1956).
- Yoon, S. W., Crum, L. A., Prosperetti, A. and Lu, N. Q.: *J. Acoust. Soc. Amer.*, **89**(2), 700(1991).