

저점도 액 통기 교반용 글라스라이닝 홈베이스 임펠러의 최적 형상

고승태[†]

동양대학교 산학협력단
36040 경북 영주시 풍기읍 동양대로 145
(2021년 5월 28일 접수, 2021년 6월 21일 수정본 접수, 2021년 7월 1일 채택)

Optimum Geometry of Glass Lined HOMEBASE Impeller for Gas-Liquid System of Low Viscosity Liquid

Seung-Tae Koh[†]

Industry-Academy Cooperation Foundation of Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro, Punggi-eup, Yeongju-si, Kyungbuk, 36040, Korea

(Received 28 May 2021; Received in revised from 21 June 2021; Accepted 1 July 2021)

요 약

글라스 라이닝 임펠러는 강산을 포함한 대부분의 화학물질들에 대해 내부식성이 있고, 또한 평활하고 늘어붙지 않는 표면을 가지며 세정이 용이하고 프로세스에 불순물들을 유입하지 않는 강점을 갖고 있다. 글라스 라이닝 HOMEBASE 임펠러는 저점도 유체에서 고점도 유체까지 폭넓은 점도 범위의 액체를 교반할 수 있도록 개발된 다목적형 대형 교반 임펠러이나, 그중에서도 세포 배양이나 효모의 배양, 맥주 발효 솥 등은 저점도 액의 통기 교반에 많이 사용하며, 특히 공기-수계의 통기성 교반에 많이 적용한다. 구조가 간단하면서도 성능 면에서 경쟁력을 갖는 HOMEBASE 임펠러에 대한 글라스 라이닝은 제작상 임펠러와 샤프트의 접합 면적을 가능한 한 작게 할 수 있도록 상하 분할이 필수적이다. 임펠러의 상하 분할은 혼합 성능에는 거의 영향을 미치지 않지만, 통기 성능을 저하하였다. 본 연구에서는 Glass Lined HOMEBASE 임펠러 형상의 최적화를 위해, 상·하부로 분할된 임펠러 사이의 장착각도차와 임펠러 사이의 간격 및 방해판의 개수가 통기 동력에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하였다. 상·하부로 분할된 임펠러 사이의 장착각도차와 간격이 통기를 할 때의 동력 P_g 와 통기가 없을 때의 동력 P_0 의 비인 P_g/P_0 를 저하시킨다는 연구 결과를 통해 Glass Lined HOMEBASE 임펠러 최적 형상과 방해판 조건을 도출하였다.

Abstract – Glass lined impellers are corrosion resistant to most chemicals, including strong acids, and also have a smooth, non-stick surface, easy to clean and free from impurities in the process. Glass lined home base impeller is a multi-purpose impeller designed to stir a wide viscosity range of liquids from low viscosity fluids to high viscosity fluids, among others, cell culture, yeast culture, and beer fermentation pots, especially used for air-water system breathable stirring. The glass lining for HB impellers, which are simple in structure and competitive in performance, is essential to have upper and lower division in order to make the joint area between the impeller and shaft as small as possible. The upper and lower division of the impeller hardly affects the mixing performance, but the aeration performance. In this study, in order to optimize the shape of the Glass Lining HB impeller, a study was conducted on the effect of the angle between the upper and lower impellers, the clearance between the impellers, and the number of baffles on the aeration power. The optimal shape and baffle plate conditions for the Glass lined HB impeller were derived through the study results that the angle and the clearance between the upper and lower impellers decreased the ration of the power consumption with aeration P_g and that without aeration P_0 , P_g/P_0 .

Key words: Mixing, Gas absorption, Aeration, Gas-liquid system, Glass lined impeller

1. 서 론

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kohnet@dyu.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Kato 등[1], [2]은 유맥(streak line)의 가시화를 바탕으로 출시되고 있는 대형 임펠러보다 기하학적 형상이 단순하고 신속한 혼합 성능을 가지며, 유맥을 안정적으로 교반조 내에 확산시키는 성능을 갖는 새로운 형태의 HOMEBASE 임펠러를 개발하였고, Matsuno

등[3]은 넓어지는 니즈에 응하기 위해 기존의 성능을 유지하는 글라스 라이닝 HOMEBASE 임펠러(GLHB Impeller)를 개발을 시도 하였으나, Fig. 3에 나타난 바와 같이 기계계에서 통기할 때의 동력 P_g 가 급격히 감소하여 통기 교반 성능이 크게 떨어지는 문제점을 갖고 있다. 글라스 라이닝 임펠러의 사용이 요구되는 이유는 글라스 라이닝이 강한 산성을 포함한 대부분의 화학물질들에 대해 내부 식성을 가지고 있으며, 그 위에 글라스 라이닝은 평활하고 늘어붙지 않는 표면을 가지며 세정이 용이하고 공정에서 원료에 불순물들을 유입하지 않기 때문이다.

글라스 라이닝 HOMEBASE 임펠러는 저점도 유체에서 저점도 유체에서 고점도 유체까지 폭넓은 점도 범위의 액체를 교반할 수 있도록 개발된 다목적형 대형 교반 임펠러이나, 그 중에서도 세포 배양이나 효모의 배양, 맥주 발효기 등은 저점도 액의 통기 교반에 많이 사용하며, 특히 공기-수계의 통기성 교반에 적용하는 경우가 많다.

글라스 라이닝 HOMEBASE 임펠러는 샤프트와 임펠러의 접합부에 소성에 따른 응력이 발생하며, 용접 부위가 확대되면 응력도 더욱 커져서 라이닝된 글라스가 파손되기 쉬워지는 제조상의 문제로 일체화가 곤란한 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 Fig. 1에 나타난 바와 같은 30여년 이전부터 개발되어 사용해오고 있는 글라스 라이닝 대형 임펠러인 MAXBLEND(MB), FULLZONE(FZ), BENDLEAF(BL)) 등은 모두 상·하부로 분할된 구조를 지니고 있는 것이다. 이런 대형 임펠러는 모두 상부 임펠러와 하부 임펠러 사이의 교차 각도인 장착각도차를 가지고 있는데, MAXBLEND, BENDLEAF, GLHB 임펠러의 장착각도차는 90°이고, FULLZONE만은 균일계 혼합 과정에 대한 수치 시뮬레이션의 결과를 반영하여 90°보다 작은 장착각도차를 가지고 있다.

한편, 기체 흡수를 목적으로 하는 교반조는 통기 상태에서 사용되는 경우가 대부분이다[4-7]. 이때는 습관적으로 Fig. 2에 나타난 것과 같은 Rushton 터빈 임펠러가 많이 사용되어왔는데, 통기를 할 때의 동력 P_g 와 통기가 없을 때의 동력 P_0 의 비인 P_g/P_0 가 0.5 정도까지 저하하는 결점을 가지고 있었다. 즉, 교반조의 기본 성능인 토출 유량, 혼합시간, 전열계수, 물질이동계수 등은 어느 것이나 난류역에서는 동력의 관수로 되는데, 이 결점은 난류역에서는 동력이 저하하면 교반조의 기본 성능이 저하하는 조작상의 결점을 초래하

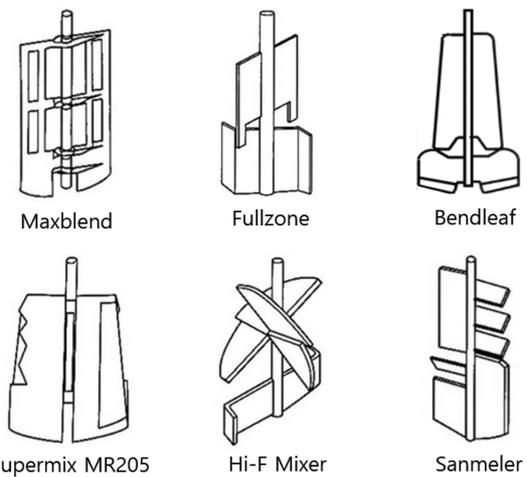


Fig. 1. Separate type large impeller.

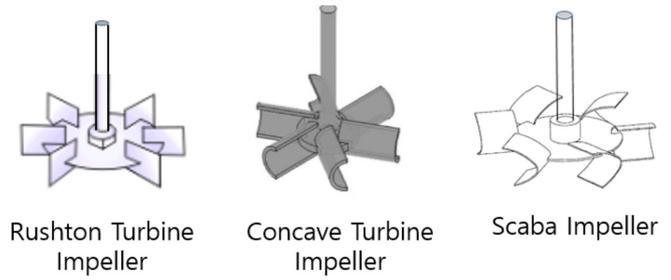


Fig. 2. Turbine Impeller of various type.

며, 또한 통기 교반의 경우 통기를 중지한 경우를 기준으로 와트 수를 결정하므로 통상 운전의 2배 가격의 모터를 선택할 수 밖에 없는 설계상의 결점을 초래하게 된다. 이러한 결점을 보완하기 위해 Rushton 터빈 임펠러의 형상을 구부린 Scaba 임펠러나 Concave 터빈 임펠러가 사용되기도 하는데[8-11], Scaba 임펠러의 P_g/P_0 는 거의 저하하지 않고 1.0 근방을 유지하는 반면, Concave Turbine의 P_g/P_0 는 0.7~0.8 정도로 저하한다[8]. 대형 임펠러의 경우에도 FULLZONE, SUPERMIX MR205, HOMEBASE 임펠러의 P_g/P_0 는 거의 저하하지 않고 1.0 근방을 유지하며, MAXBLEND, SANMELER (SM), HiF Mixer의 P_g/P_0 는 0.8 정도로 저하한다고 Furukawa 등 [12]이 보고하였다.

단, 90°의 장착각도차를 갖는 BENDLEAF, GLHB의 P_g/P_0 은 0.6~0.7까지 저하하였다. 다른 대형 임펠러와의 차이가 어떤 기하학적 형상의 차이에 의한 것인가를 검토하였을 때, 상·하부 임펠러 사이의 장착각도차밖에 생각할 수 없었으므로, 이 연구에서는 상·하부 임펠러의 장착각도차가 통기 동력에 어떠한 영향을 미치는지를 실험적으로 검토하였다. 그 결과, 상·하부 임펠러의 장착각도차가 통기 동력에 큰 영향을 미치는 것을 밝혔으며, 통기 교반 때의 최적 GLHB 임펠러의 형상을 도출하였기에 여기에 보고하고자 한다.

2. 선행 연구의 고찰

Furukawa 등[13]에 의해 밝혀진 각종 대형 임펠러(방해판 2장, 임펠러 회전수 250 rpm)에서의 통기 때의 동력 P_g 와 무통기 때의 동력 P_0 의 비인 P_g/P_0 와 통기 유량수 N_A 의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. P_g/P_0 는 통기를 할 때의 교반 동력과 통기를 하지 않을 때의 교반 동력의 비로써, 통기를 하였을 때의 동력이 통기를 하지 않았을 때에 비해 얼마나 동력이 감소하는 가를 나타내는 값으로 P_g 가 P_0 보다 클 수 없으며, 값이 낮을 수록 통기 때의 동력이 작아진다는 것을 의미한다. 통기 할때의 동력이 작아지면 그 이상으로 통기 교반 성능이 떨어져 큰 출력의 모터를 사용해야 하는데, 통기 교반기의 설계에 있어 P_g/P_0 는 통기 유량과 함께 주요한 인자가 된다. 통기 유량수는 $N_A = Q/(nd^3)$ 로 정의되며, Q는 통기 유량이고, n은 임펠러 회전수이며, d은 임펠러 직경이다.

Fig. 3를 통하여 비교적 임펠러의 면적이 큰 FULLZONE, MR205, HOMEBASE 임펠러(상하 일체형) 등은 통기 유량수의 증가 즉, 통기 유량의 증가에도 동력비인 통기 동력은 거의 변하지 않았고, MAXBLEND, SANMELER, HiF Mixer 등에서는 통기 유량이 증가함에 따라 통기 동력은 저하하였으나, 저하율은 20% 이내였다. 그러나 상·하부 사이에 90°의 장착각도차를 갖는 BENDLEAF만

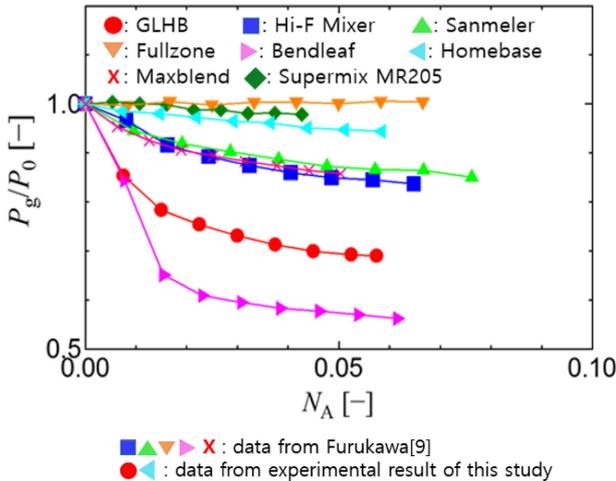


Fig. 3. Effect of aeration on power consumption in air-water system with several kinds of large impellers ($n_B=2$).

은 통기 유량의 증가함에 따라 통기 동력은 통기 유량수 0.015까지는 급격히 저하한 후에는 서서히 저하하여 40% 정도까지 크게 저하하는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 다음과 같은 고찰을 통하여 설명할 수 있다. 통기 유량이 증가함에 따라 통기 동력이 감소하는 것은 통기 유량에 의해 임펠러 뒷면에 공동이 생성되어 임펠러의 형상 저항이 감소하기 때문으로, 통기량이 작을 때는 소용돌이 공동이 생성되며, 그것이 임펠러의 상하 모서리 부분에 생성한다는 점에서 비교적 면적이 큰 FULLZONE, MR205, HOMEBASE 임펠러(상하 일체형)에서는 임펠러 면적에 비해 공동의 크기가 작아서 통기 유량수가 증가하여도 통기 동력비는 거의 변하지 않았다고 설명할 수 있다. 그중, HOMEBASE 임펠러에서 통기 동력이 5% 정도 저하하는 것은 상·하부의 임펠러 형상이 달라서 임펠러 사이에 서로 간섭이 일어나지 않아 각각의 임펠러 뒷면에 공동이 일부 생성되어 통기 동력이 저하하는 것으로 설명할 수 있다.

또한 장착각도차가 90°인 BENDLEAF처럼 장착각도차가 크면 상부와 하부의 임펠러가 서로 간섭하지 않으므로 독립적으로 공동이 생성될 수 있어서 통기 동력비가 크게 저하할 수 있다는 것과 상·하부 임펠러 간의 간격 역시 두 임펠러가 서로 간섭하지 않고 독립적으로 공동이 생성될 수 있어서 통기 동력비가 저하할 수 있다는 등의 가설을 세울 수 있다.

3. 실험 장치 및 실험 방법

Fig. 4에 실험에 사용한 HOMEBASE 교반 임펠러를 나타내었다. 기본 구조의 개념은 다음과 같다. (1) HOMEBASE 형상을 상부의 삼각 부분과 하부의 직사각형 부분으로 분할하였다. (2) 하부 임펠러는 샤프트에 용접하여 고정하고, 상부 임펠러는 장착 각도를 변경할 수 있도록 육각 볼트로 고정하였다. (3) 글라스 라이닝이 떨어지는 등의 원인이 되는 샤프트와 임펠러의 접합부를 가능한 한 짧게 하고자 상부 임펠러와 하부 임펠러 모두 밑부분의 일부를 잘라낸 구조로 하였다. (4) 교반조의 바닥 형상은 10% 접시형으로 하였으며, 하부 임펠러의 하단은 교반조 바닥 형상에 가까운 경사를 갖도록 하였다.

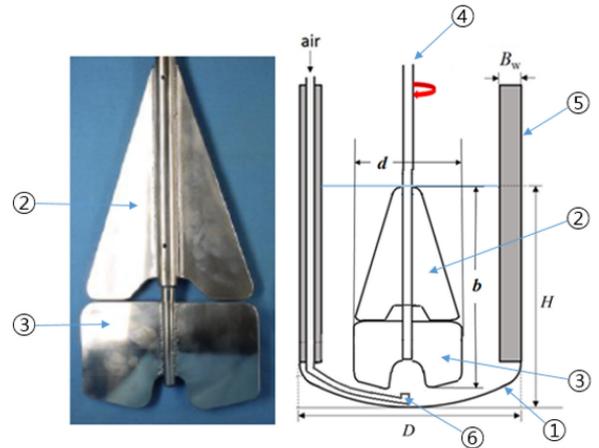


Fig. 4. Separate type GLHB impeller.

- | | |
|-----------------------------|--------------------|
| 1. Aeration mixing vessel | 5. Baffle |
| 2. Upper impeller | 6. Air diffuser |
| 3. Lower impeller | Bw. Baffle width |
| b. Height of impeller blade | D. Vessel diameter |
| d. Impeller diameter | H. Liquid height |

사용한 교반조는 안쪽 지름(D)을 185 mm, 액 높이(H)를 210 mm로 하였다(액량은 약 5 l로 하였다). 하부 임펠러의 최대 직경인 임펠러 지름(d)은 118 mm, 상부 임펠러에서 하부 날개를 포함한 임펠러 상단에서 하단까지의 임펠러 길이(b)는 207 mm(상부 임펠러 142 mm, 하부 임펠러 65 mm)로 하였다. 임펠러는 글라스 라이닝을 한 형상의 스테인리스 스틸 재질의 표면을 연마한 것을 사용하였다. 방해판의 폭은 교반조 지름의 1/10로 하여, 1~4장 설치하였다. 교반 대상이 되는 액체로는 수돗물을 사용하였다. 교반 소요 동력은 토크 미터로 측정하고, 그 평균값을 사용하여 $P = 2\pi nT$ 식으로 구하였다.

교반조 바닥 중앙에서 구멍 지름 5 mm의 Single Sparger로 공기를 통기시켰으며, 통기량은 0~2.74 vvm으로 하여 float meter 유량계로 측정하였다. 교반조 내의 공동은 디지털카메라 고속 비디오 모드로 촬영하여 관찰하였다.

또한 선행 연구에 대한 고찰을 통해 세운 가설을 검증하기 위해 구조가 간단한 같은 크기의 2장의 패들 임펠러($d/D=0.38$, $b/D=0.11$)를 상·하부 2단으로 하여, 임펠러를 교반조 중앙에 세운 샤프트에 고정한 후 장착각도와 임펠러 사이의 간격을 변화시키며, 임펠러 회전수 400 rpm으로 통기 동력을 측정하였다. 아울러 방해판 조건이 장착각도차에 미치는 영향을 확인하기 위하여 방해판 수를 1, 2, 4로 변화시키며 통기 동력을 측정하였다. 방해판은 1장일 때는 임의의 벽면에, 2장일 때는 180도 간격으로, 4장일 때는 90도 간격으로 교반조 벽면에 직각으로 설치하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4-1. 2단 패들 임펠러의 장착각도차 및 임펠러 간격과 P_g/P_0 의 관계
 방해판 부착 개수가 통기 동력비와 통기 유량수에 미치는 영향을 확인하기 위해 방해판을 1, 2, 4개로 변화시킨 결과를 Fig. 5~7에 나타내었다. P_g/P_0 는 상·하부 임펠러의 장착각도차와 밀접한 관계가 있었으며, 글라스 라이닝 교반조에서 일반적인 방해판 개수인 1

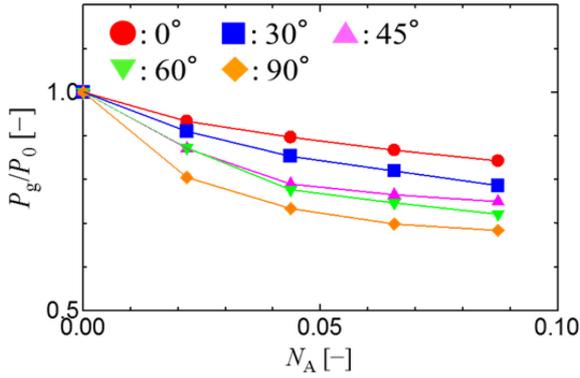


Fig. 5. Effect of angle between upper and lower impeller on power consumption under aeration in air-water system with dual flat paddle ($n_B=1$, clearance of impeller=0 mm, $n=6.7 \text{ s}^{-1}$).

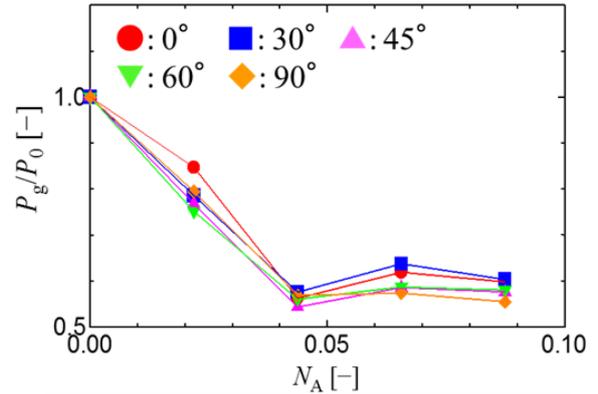


Fig. 8. Effect of angle between upper and lower impeller on power consumption under aeration in air-water system with dual flat paddle ($n_B=2$, clearance of impeller=20 mm, $n=6.7 \text{ s}^{-1}$).

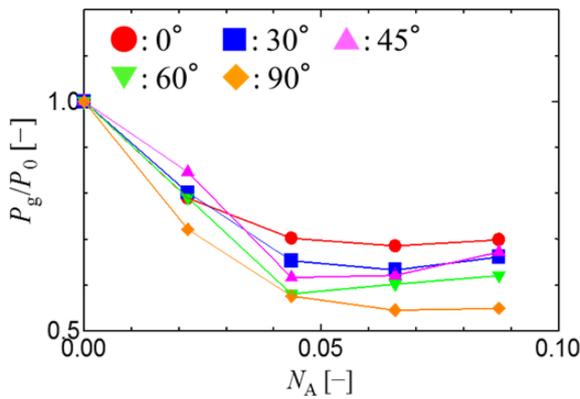


Fig. 6. Effect of angle between upper and lower impeller on power consumption under aeration in air-water system with dual flat paddle ($n_B=2$, clearance of impeller=0 mm, $n=6.7 \text{ s}^{-1}$).

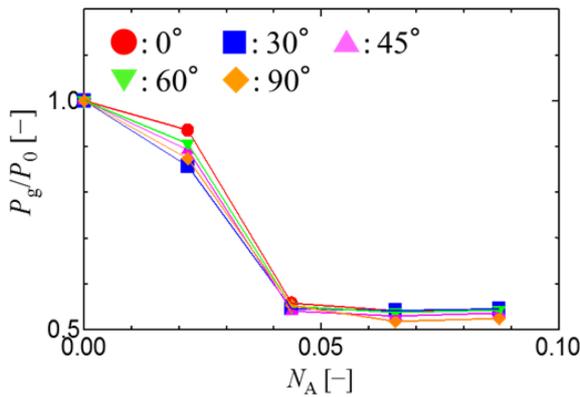


Fig. 7. Effect of angle between upper and lower impeller on power consumption under aeration in air-water system with dual flat paddle ($n_B=4$, clearance of impeller=0 mm, $n=6.7 \text{ s}^{-1}$).

개 및 2개의 경우, 상·하부 임펠러 간의 장착각도차가 커짐에 따라 통기 동력은 저하하였으며, 방해판이 4개인 경우에는 장착각도차에 따른 통기 동력의 저하 폭에는 차이가 없었다. 이는 Kato 등[14]의 선행 연구에 따르면, 방해판이 없을 때의 무통기 동력 P_0 는 장착각도차와 관계없이 일정하므로, 방해판 개수가 적을 수록 통기 동력이 높고 장착각도차가 없는 경우의 P_g/P_0 는 커진다. 한편, 방해판

개수가 많아지면 장착각도차가 없는 경우의 P_0 가 커진다. 따라서 방해판 개수가 4장으로 늘어나 P_g 가 커지더라도 분모인 P_0 도 커지므로, 결과적으로 장착각도차의 영향을 받기 어려웠을 것으로 생각된다.

다음으로 임펠러 사이의 간격 20 mm, 방해판 2장, 임펠러 회전수 400 rpm의 조건에서 측정된 통기 동력을 Fig. 8에 나타내었다. 임펠러 사이에 거리를 둬으로써 이미 독립적인 2단 임펠러로 기능하므로 장착각도차와는 관계없이 통기 동력의 저하 정도는 90°일 때와 거의 같아, 상·하부 임펠러 사이의 간격은 없는 것이 효과적임이 밝혀졌다.

또한 장착각도차가 0°와 90°인 경우, 공동이 어떻게 생성되어 있는가를 관찰하기 위해 고속비디오카메라로 촬영한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a)의 경우는 장착각도차가 없기 때문에 1단 임펠러로서 기능하여, 거의 같은 크기의 공동은 1쌍만 생성되지만, Fig. 9(b)에 보이는 것 같이 장착각도차가 큰 경우는 앞에서 세운 가설처럼 상·하부 임펠러 각각의 뒷면에 공동이 1쌍씩 생성되어서 통기 동력의 저하가 커졌다고 생각된다. 공동이 동력 저하의 원인으로 작용한다는 것은 잘 알려진 것으로, 공동의 갯수로 동력 저하의 정도를 판단하기도 한다[15].

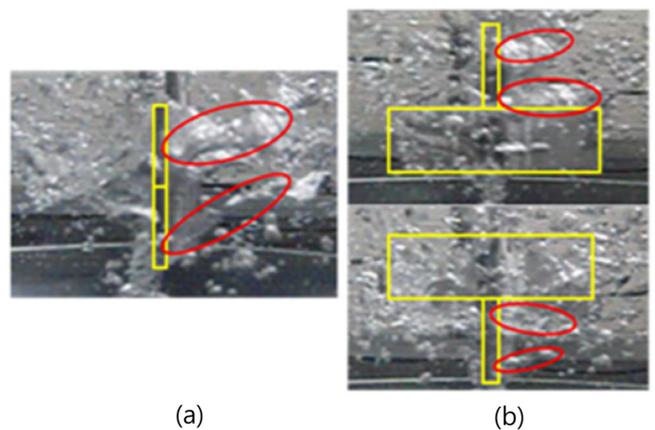


Fig. 9. Photograph of cavity behind impeller blade (a) angle between upper and lower impeller=0° (b) 90°.

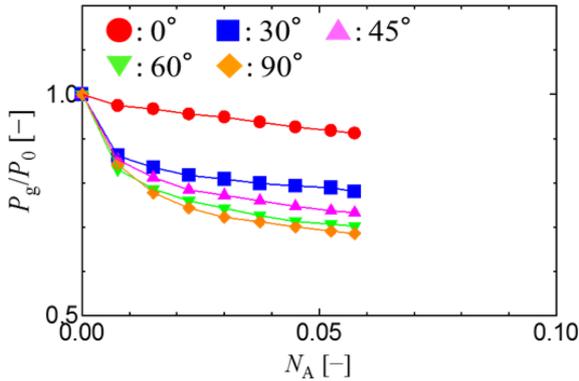


Fig. 10. Effect of phase difference on power consumption of GLHB impeller under aeration in air-water system ($n_B=2$).

4-2. Glass Lined HOMEBASE(GLHB) 임펠러의 장착각도차와 P_g/P_0 의 관계

Fig. 10에 방해판 2장, 임펠러 회전수 250 rpm에서 장착각도차의 변화에 따른 GLHB 임펠러의 P_g/P_0 와 통기 유량수의 관계를 나타내었다. GLHB 임펠러에서도 장착각도차가 커질수록 통기 동력은 저하하였으며, 90° 장착각도차로 조정된 GLHB는 BENDLEAF와 비슷한 경향으로 저하하여 Flat Paddle 임펠러보다는 적었으나 30% 정도까지 저하하는 것을 알 수 있었으며, 이를 통해 장착각도차에 의한 통기 동력 저하에 대한 가설이 GLHB에서도 동일하게 적용되는 것을 확인할 수 있었다.

이를 통해 균상계로 혼합했을 때 HOMEBASE 임펠러의 장착각도차는 성능에 무관하지만[3], 통기 교반조에서 GLHB 임펠러를 사용하려면 장착각도차를 가능한 한 작게 하는 것이 유효하다는 것을 확인할 수 있었다. 단, 글라스 라이닝이라는 특별한 가공 공정이 존재하기 때문에 “제조상 가능한 한”이라는 조건은 붙여야 할 것 같다.

5. 결 론

교반 임펠러가 상·하부 2단으로 분할되어 있을 때, 상·하부 임펠러 사이에 장착각도차가 클수록 상·하부 임펠러가 서로 간섭하지 않으므로 각각의 임펠러 뒷면에 공동이 독립적으로 생성되기 쉬워져 P_g/P_0 가 저하할 수 있다는 가설과 상·하부 임펠러 사이의 간격 역시 상·하부 임펠러가 서로 간섭하지 않게 하여 각 임펠러 뒷면에 독립적으로 공동이 생성될 수 있어 통기동력비가 크게 저하할 수 있다는 가설을 검증하였다. 아울러 방해판 조건이 장착각도차에 미치는 영향에 대해 방해판 조건이 약할수록 통기 동력이 높고 장착각도차가 없는 경우의 P_g/P_0 는 커지나, 방해판 개수가 늘어나 방해판 조건이 커지면 P_g 가 커지더라도 장착각도차가 없는 경우의 P_0 도 커지므로 장착각도차의 영향을 받기 어렵다는 것을 밝혀, 통기 교반 시 글라스 라이닝 HOMEBASE형(GLHB) 임펠러의 최적 형상을 도출하였으며, 방해판 조건의 영향을 밝혔다.

즉, HOMEBASE 임펠러에 글라스 라이닝을 하기 위해서는 제조상 HOMEBASE 임펠러를 상·하 2단으로의 분할이 필수적인데, 본 연구를 통하여 그 형상을 최적화 할 수 있었다. 교반 임펠러가 상·하부 2단으로 분할되어 있을 때, 상·하부 임펠러 사이에 장착각도차가 존재하면 각각의 임펠러 뒷면에 공동이 독립적으로 생성되기

쉬워져서 P_g/P_0 가 저하하므로 통기 교반 시에는 장착각도차를 두지 않는 것이 효과적이며, 상·하부 임펠러 사이의 간격 역시 P_g/P_0 를 저하시키므로 간격은 없애는 것이 효과적이다.

Nomenclature

| | |
|--------|---|
| b | : height of impeller blade [m] |
| B_W | : baffle width [m] |
| D | : vessel diameter [m] |
| d | : impeller diameter [m] |
| H | : liquid depth [m] |
| N_A | : aeration number ($=Q/nd^3$) [-] |
| N_P | : power number ($=P/\rho n^3 d^5$) [-] |
| n | : impeller rotational speed [s^{-1}] |
| n_B | : number of baffle [-] |
| P | : power consumption [W] |
| P_0 | : power consumption under no aeration [W] |
| P_g | : power consumption under aeration [W] |
| Q | : gas flow rate [$m^3 \cdot s^{-1}$] |
| v | : liquid volume [m^3] |
| T | : impeller period [-] |
| ρ | : liquid density [$kg \cdot m^{-3}$] |
| vvm | : vessel volume per minute [s^{-1}] |

감 사

이 논문은 2020년도 동양대학교 학술연구비의 지원으로 수행되었음.

References

- Kato, Y., Hiramatsu, M., Ohtani, S., Yoshida, M. and Shiobara, K., “Development of New Large Paddle (HB Type) Impeller Based on Streak Line Observation,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 16-20(2015a).
- Kato, Y., Ohtani, S. and Furukawa, H., “Characteristics of Power Consumption and Mixing Time of New Large Paddle (HB Type) Impeller,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**, 276-280(2015b).
- Matsuno, M., Suzuki, K., Sato, A., Furukawa, H. and Kato, Y., “Development of Glass lining type HB Impeller,” *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **45**, 6-9(2019).
- Yang, S. N., Beak, S. W. and Kim, N. K., “Effect of Aeration and Agitation Rates on Pullulan Production,” *Journal of Korean Institute of Chemical Engineers*, **38**(4), 556-559(2000).
- Lee, H.-S., Jung, J.-H. and Lee, S.-Y., “Effects and Batch Kinetics of Agitation and Aeration on Submerged Cultivation of *Ganoderma lucidum*,” *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **16**(3), 307-313(2001).
- Cho, K. H. and Lee, C. W., “Submerged Culture of *Phellinus linteus* in a Stirred Tank Fermenter and an Airlift Fermenter,” *Journal of Korean Institute of Chemical Engineers*, **38**(2), 310-315(2000).
- Lee, H.-S., Lee, K.-Y., Choi, S.-Y. and Lee, S.-Y., “Effect of Agitation, Aeration and Scale-up on Mycelial Morphology During Liquid Culture of *Ganoderma lucidum*,” *Korean Society for Biotech-*

- nology and Bioengineering Journal*, **26**, 357-364(2011).
8. Furukawa H., Oda, E., He, C., Kamei, N., Kato, Y. and Tada, Y., "Power Consumption and Mass Transfer in Gas-Liquid Mixing Vessel with Concave Turbine and Large Ring Sparger," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **38**(4), 209-211(2012).
 9. Furukawa H., Kamei, N., Kato, Y., He, C., Suzuki, T. and Tada, Y., "Power Consumption in Gas-Liquid Mixing Vessel with Dual Impellers including Concave Turbine and Large Ring Sparger," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **39**(4), 287-289(2013)
 10. Furukawa H., Kato, Y., Nagumo, R. and Tada, Y., "Correlation of Power Consumption for Concave Turbine Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **41**(2), 91-94(2015).
 11. Zhiyong, Z., Dongdong, S., Jing, L., Xiaobei, Z. and Minjie, G., "Improving Oxygen Transfer Efficiency by Developing a Novel Energy-saving Impeller," *Chemical Engineering Research and Design*, **130**, 199-207(2018).
 12. Kamei, N., Kato, Y., Tada, Y., Ando, J. and Nagatsu, Y., "Effects of Sparger Geometry on Power Consumption and Mass Transfer in Gas-Liquid Agitated Vessels with Disk Turbine," *J. Chem. Eng. Japan*, **42**, 664-668(2009).
 13. Furukawa, H., Matsumoto, K., Kato, Y., Kamiya, M., Haitzuka, M. and Kamei, N., "Mass Transfer of Oxygen and Power Consumption with Highly Viscous Liquid in Gas-Liquid Agitated Vessel," *J. Chem. Eng. Res. Updates*, **4**, 1-6(2017).
 14. Kato, Y., Tada, Y., Urano, K., Hattori, M., Nagatsu, Y., Koh, S. T. and Lee, Y. S., "Differences of Power Consumption of Paddle Impellers with Same Blade Area in Turbulent Mixing Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **36**, 30-33(2010).
 15. Saito, F., Nienow, A. W., Chatwin, S. and Moore, L. T., "Power, Gas Dispersion and Homogenisation Characteristics of SCABA SRGT Rushton Impellers," *J. Chem. Eng. Japan*, **25**, 281-287(1992).