

전이영역에서의 2단 날개가 있는 접시형 바 닥 교반조의 유동 상태 변화

고승태*

동양대학교 산학협력단
36040 경북 영주시 풍기읍 동양대로 145
(2020년 11월 3일 접수, 2020년 12월 7일 수정본 접수, 2020년 12월 9일 채택)

Flow Pattern Change of Dished Bottom Vessel with Dual Impeller in Transition Region

Seung-Tae Koh*

Industry-Academy Cooperation Foundation of Dongyang University, 145 Dongyangdae-ro,
Punggi-eup, Yeongju-si, Kyungbuk, 36040, Korea
(Received 3 November 2020; Received in revised form 7 December 2020; Accepted 9 December 2020)

요 약

2단 Rushton turbine 날개를 장착한 접시바닥형 교반조 내의 유동 상태가 어떤 회전수에서 변화하는 현상을 찾아냈다. 층류 영역에서는 회전수를 변화시켜도 안정적인 도넛 링이 형성되어 혼합 패턴에 특이한 변동은 관찰되지 않았다. 전이영역에서의 평바닥형 교반조에서는 회전수에 변화를 주어도 두꺼운 2개의 미혼합 도넛 링에 변화가 없는 반면, 접시바닥형 교반조에서는 회전수가 450 rpm이 되면 두꺼운 2개의 미혼합 도넛 링이 아주 얇은 3개의 도넛 링으로 바뀌어 혼합이 개선되었다. 접시바닥형 교반조에서는 $Re=138\sim178$ 의 영역에서 링 모양의 미혼합 영역이 3곳에서 나타났고 그 크기도 컸지만, 평바닥형 교반조에서는 $Re=116\sim176$ 에서 링모양의 미혼합 영역은 2곳에서 나타났으며 그 크기도 작았다. 이러한 현상이 관찰되는 조건은 전이영역으로, 방해판을 부착하였을 때가 방해판이 없을 때와 비교하여 동력수가 커지기 시작하는 영역임을 알 수 있었다. 또한 교반 레이놀즈수가 300을 넘어 유동 상태에 약간의 난류가 섞이게 되면, 이 같은 흐름 양상의 단절이 해소되어 완전히 혼합되었다.

Abstract – It was found that mixing patterns suddenly changed at an impeller rotation speed in a dished bottom vessel with dual Rushton turbines. Two isolated mixing regions like doughnuts rings generated at a low rotational speed and three isolated mixing regions generated at a higher speed. This phenomenon was observed at the mixing condition in transition area, where the power number with baffle was the same as that without baffle. We found a phenomenon in which the flow state in a dish-bottom agitation tank equipped with a two-stage Rushton turbine blade changes at a certain rotational speed. In the laminar flow region, the isolated stable donut rings were formed even when the rotational speed was changed, and no specific variation in the mixing pattern was observed. In the transition region, the two isolated thick unmixed donut rings do not change even if the rotation speed is changed in the flat bottom vessel, whereas in the dished bottom vessel, when the rotation speed is 450 rpm, the two isolated thick unmixed donut rings are changed to three isolated thin donut rings and then improved mixing. In the dished bottom vessel, in the range of $Re=138\sim178$, the isolated ring-shaped unmixed region appeared in three places and the size was also large. But in the flat bottom vessel, the isolated thick ring-shaped unmixed region appeared in two places in $Re=116\sim176$ and the size was also small. It appeared in two places, and the size was also small. The condition in which this phenomenon is observed is a transition region, and it was found that when the baffle plate is attached, the power number starts to increase compared to when the baffle plate is not present. In addition, when the mixing Reynolds number exceeded 300 and a slight turbulence was mixed in the flow state, the disconnection of these flow pattern was resolved and the mixture was completely mixed.

Key words: Mixing, Agitation, Dual impeller, Flow pattern, Dished bottom

1. 서 론

교반장치는 넓은 산업 분야에서 혼합, 분산, 용해, 반응 등 여러 목적으로 사용되고 있다. 그중에서도 오래전부터 사용해온 Rushton turbine 날개는 대량 처리가 가능하여 적용 유체의 점도와

*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.

는 관계없이 사용하는 경우가 많은데, 고점도 유체에 터빈 날개를 사용하면 날개 위아래쪽에 도넛 링과 같은 미혼합영역이 발생하여 혼합 성능이 떨어지는 것으로 알려져 있다.

또한, 같은 교반조를 사용하여 처리량을 늘리려고 할 때는 가능하면 액면을 높여, 교반조 지름보다 액 높이가 큰 상태로 운전하기도 한다. 이때, 1단의 터빈 날개를 그대로 사용하면 교반조 내에 유동이 일어나지 않는 영역이 존재할 우려가 있으므로 날개를 추가하여 2단으로 운전하는 경우가 많다. 이 2단 날개에 관한 연구는 매우 오래전부터 이루어져 왔는데, 그 선구적 연구는 Takeda 등[1]이 수행한 다단 날개의 난류 교반을 다룬 연구이며, 그 후 Mochizuki[2]가 과거의 연구 성과를 체계적으로 정리하였다.

그중에서 가장 중요한 연구는 Nishikawa 등[3]이 수행한 날개 간격과 동력수(N_p)와의 관계로 들 수 있다. 같은 날개를 2단으로 사용한 경우, 날개 간 거리가 날개 지름의 1.5배 이상에서는 각 날개가 독립적으로 작용하기 때문에 동력수도 2배가 되지만, 그 미만의 날개 간격에서는 동력수가 2배가 되지 않고 마치 1단의 날개처럼 작용하는 것이다. 이것은 Komori와 Murakami[4]가 혼합시간까지 측정하여 지정한 내용이다. 그 위에 Mochizuki 등[5]은 상단 날개와 하단 날개의 동력을 분리하여 측정해서 각종 날개의 조합에 대한 동력과 유동 상태의 관계를 고찰하였다. 터빈을 사용한 2단 날개는 주로 기액 접촉장치로 사용하는 일이 많으므로 기액계에 관한 연구가 많고, 의외로 균일계에 관한 연구는 많지 않다. 또한 어느 쪽이나 저점도 유체를 대상으로 하는 난류 상태에서 사용하는 장치이므로 액 깊이가 큰 장치를 종류에서 운전하는 경우는 거의 없다. 단, 배양조 등은 비교적 중간 점도 영역에서 사용하기도 하므로 전이 영역에서의 2단 날개 교반조에서 일어나는 유동 상태에 관한 연구는 필요하다.

Kato 등[6]은 실험 장치가 아닌 현장의 실제 장치를 대상으로 한 연구에서 접시바닥형 교반조와 평바닥형 교반조의 교반 소요 동력을 측정하여, 방사류 날개가 설치된 접시바닥형 교반조를 사용한 경우, 특정 날개를 부착한 위치에서 난류 영역에서는 동력이 20% 저하하는 것을 밝힌 바 있는데, 접시형 바닥 교반조와 평바닥형 교반조와 사이에는 동력뿐만 아니라, 유동 상태에서도 차이가 있을 것으로 판단하고 본 연구를 수행하였다. 비교적 점도가 높은 층류 영역에서 전이 영역의 접시바닥형 교반조와 평바닥형 교반조의 2단 날개 교반조에 대하여 혼합 불량 영역과 유동 상태를 관찰한 결과, 매우 좁은 조건이지만 접시바닥형 교반조에서 특이한 현상이 나타났으므로, 이를 보고하고자 한다.

2. 실험방법

Fig. 1에 실험에 사용한 교반조의 개요를 나타내었다. 교반조는 아크릴 투명 원통조 ($D=185$ mm, $H=185$ mm)로, 바닥 형상은 10% 접시바닥형과 평바닥형을 사용하였다. 사용한 교반 날개는 지름 60 mm, 폭 12 mm인 Rushton 터빈 2단 날개이며, 하단 날개는 교반조 바닥에서 28 mm, 상단 날개는 교반조 바닥에서 93 mm 위치에 부착하였다.

혼합 과정은 요오드와 싸이오황산나트륨의 반응에 의한 탈색법으로 관찰하였다. 교반액 1,000 ml 당 0.5 mol/l-I₂를 3 ml 투입함으로써 요오드로 교반액을 갈색으로 착색하였으며, 거기에 1 mol/l로 조제한 $Na_2S_2O_3$ 수용액을 4.2 ml 투입하여 탈색하였는데, $Na_2S_2O_3$

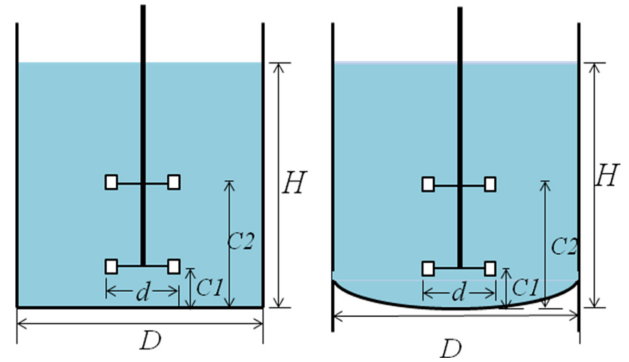


Fig. 1. Dimension of experimental vessels.

수용액은 점도를 조정한 물엿 수용액 100 ml에 15.8 g 녹여서 사용하였다. 소정의 조건에서 운전을 개시하여, 요오드 용액을 넣고 10 분 경과하여 액이 균일하게 혼합된 후, 교반 샤프트에서 1 cm 떨어진 곳에 탈색제인 $Na_2S_2O_3$ 수용액을 투입하였다. 각 조건에서의 혼합 패턴(도넛 링 모양의 혼합 불량 영역의 형상)은 시간의 경과와 함께 변화하였지만, 시행착오의 결과 경험상 가장 그 형상을 관찰하기 쉬운 무차원 교반 시간(탈색제를 투입한 순간부터 사진 촬영한 시간[s]과 날개 회전수의 곱[s·l])이 750[-]일 때의 패턴을 비교 대상으로 하였다.

교반 소요 동력은 가장 일반적인 샤프트 토크 측정법으로 측정하였다. 토크 미터를 통한 샤프트 토크는 정상 운전 시에도 일정 값으로는 출력되지 않으므로 파형 데이터로서 그 평균값을 구하였다. 층류에서는 비교적 규칙적인 파형을 띠기 때문에 평균치를 구하기 쉽지만, 난류에서는 장주기의 변동까지 포함하여 파형이 불규칙하며 크게 변동하기 때문이다. 교반 소요 동력은 그 평균 토크를 이용하여 $P = 2\pi nT$ 로 구한 후, 이를 동력수를 구하는데 사용하였다.

유동 상태의 가시화에는 종래부터 흐름의 가시화에 이용되어온 일반적인 트레이서법을 사용하였다. 트레이서로는 구형의 나일론 입자(지름 200 μ m, 비중 1.02)를 사용하였으며, 광원으로는 두께 약 3 mm의 레이저 시트 광(Reliant 100 mm, LASER PHYSICS)을 이용하여 암실 내에 설치한 교반조 안에서 빛나는 트레이서의 궤적을 디지털 비디오카메라로 촬영하였다. 교반조가 원통형이므로 측면에서 흐름을 관찰할 때는 빛의 굴절을 방지하기 위하여 교반액을 채운 사각조 안에 교반조를 넣었다.

3. 결과와 고찰

3-1. 층류 영역

교반 레이놀즈수(Re)가 10 이하인 동력수가 교반 레이놀즈수에 반비례하는 층류 영역에서의 접시바닥형 교반조의 혼합 패턴 관찰 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 층류 영역에서는 회전수를 변화시켜

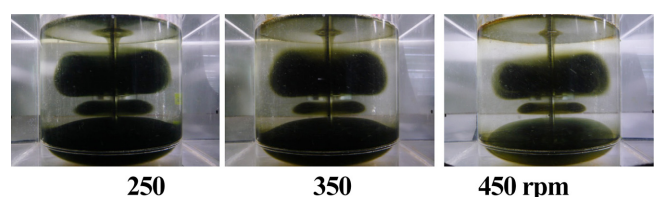


Fig. 2. Mixing Pattern in laminar flow area for dished bottom vessel.

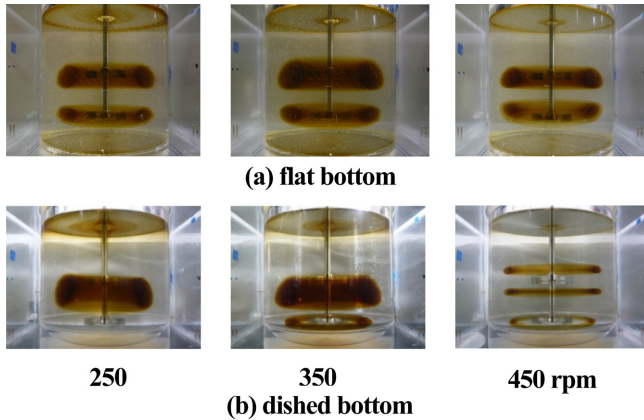


Fig. 3. Comparison of mixing pattern between dish and flat bottom vessels (Dimensionless agitation time = 750, Viscosity = $0.4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, Density = 1337 kg/m^3).

도 안정적인 도넛 링이 형성되어 혼합 패턴에 특이한 변동은 관찰되지 않았다. 층류 영역에서는 동력수가 방해판 장착 여부의 영향을 받지 않는 것까지 고려하면, 층류 조작에서는 교반조 내의 혼합 패턴에 특이한 현상이 일어날 가능성이 전혀 없음을 알 수 있다.

3-2. 전이 영역

교반 레이놀즈수가 다소 커지면, Fig. 3에 나타낸 것과 같이 접시바닥형 교반조에서는 회전수를 변화시켰을 때, 교반조 내에 발생하는 도넛 링의 위치와 그 수가 달라지는 현상이 관찰되었다. 즉, 평바닥형 교반조에서는 회전수에 변화가 생겨도 두꺼운 2개의 미혼합 도넛 링에 큰 변화가 없는 반면, 접시바닥형 교반조에서는 회전수가 450 rpm이 되면 두꺼운 2개의 미혼합 도넛 링이 아주 얇은 3개의 도넛 링으로 바뀌어 혼합이 개선되었다. 다만, 이 현상은 조작

회전수의 변화 방법을 바꾸면 관찰되지 않을 때도 있었다. 즉 2개의 도넛 링이 생성되어 있는 상태에서 천천히 회전수를 증가시켜가면, 3개의 도넛 링이 발생하는 회전수를 넘더라도 2개를 유지하는 일이 있다는 점이다. 이것은 안정된 Flow Pattern이 형성되어 있는 경우는 그 이력이 유동 상태에 남아 변화가 일어나기 어렵다는 것이다. 이것은 통기 동력의 Flooding-Loading 변화나 고체 입자를 완전 부유시키는 경우 등에서 회전수를 증가시키든가 감소시키는 것으로 현상이 변화는 회전수가 바뀌는데, 자주 관찰되는 현상이다. 따라서, 이 현상을 관찰하기 위해서는 잠시 교반 날개의 회전을 멈추고, 모터의 설정회전수를 바꾸고 나서 재회전시키는 것이 필요하다. 이러한 현상이 일어나는 것에 따른 최대 문제점은 현장 측에서 액의 혼합을 개선할 의도로, 날개 회전수를 증가시키는 조작을 했을 경우, 반대의 결과를 가져오게 된다는 것이다.

평바닥형 교반조에 대해 같은 조작을 하고, 교반조 내의 상태를 관찰한 결과를 비교하기 위해서 접시바닥형 교반조의 경우를 Fig. 4에, 평바닥형 교반조의 경우를 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에 보이는 것처럼 접시바닥형 교반조의 경우, 교반 레이놀즈수가 20 이하일 때에는 상단 날개 위쪽에 큰 링, 아래쪽에 작은 링이 관찰되었고, 하단 날개 아래쪽은 탈색제가 미치지 않아 완전한 혼합 불량부가 되었다. 레이놀즈수가 30을 넘으면, 상단 날개 위쪽에 큰 링이, 하단 날개 위쪽과 아래쪽에 작은 링이 형성되었다. 그 후, 레이놀즈수가 45를 넘으면 상단 날개 위쪽에 형성되었던 큰 링의 위치가 아래쪽으로 이동하였으며, 60이 되면 상단 날개 아래쪽에 생기고 마치 아래 방향 토출의 Pitched Paddle 경우에서 생기는 것 같은 링 위치가 되었다. 그 후, 레이놀즈수가 80~100의 영역에서는 동일한 형상의 가늘고 긴 링이 3개 형성되는 상태가 되었다. 레이놀즈수가 더욱 상승하여 백수 십이 되면 상단 날개의 방사류가 발달하여 교반조 바닥 부근에는 탈색제가 도달하지 못하여 접시바닥형 교반조의 바닥 근방이 완전한 미혼합 영역으로 되었다. 그리고 레이놀즈수가

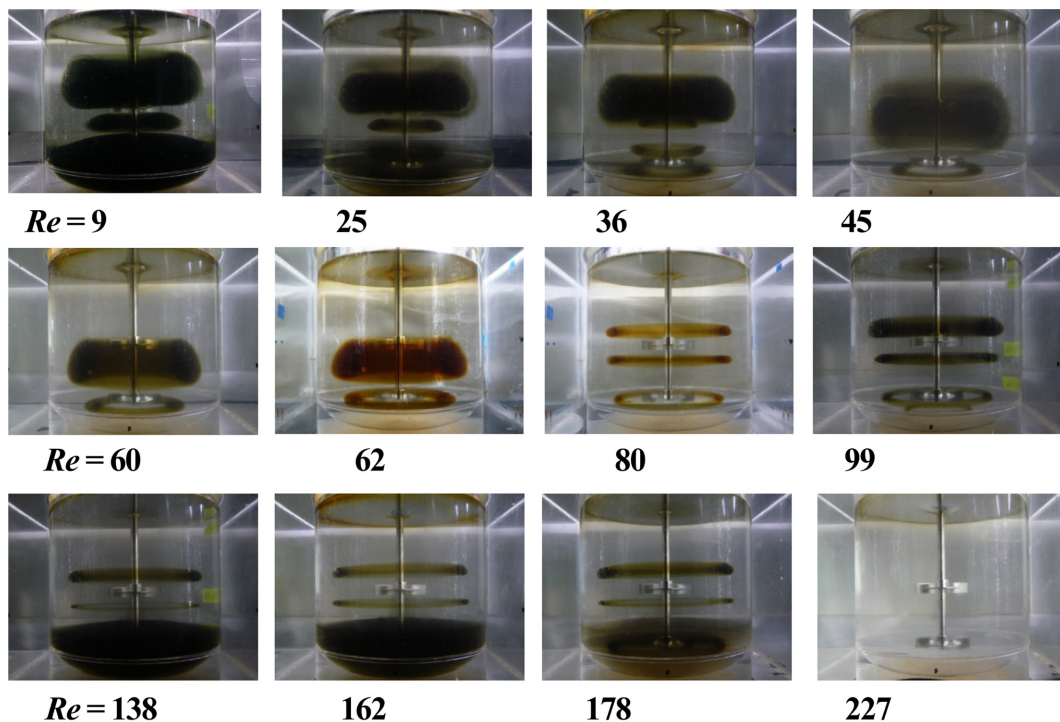


Fig. 4. Transition of mixing pattern for dish bottom at dimensionless agitation time = 750.

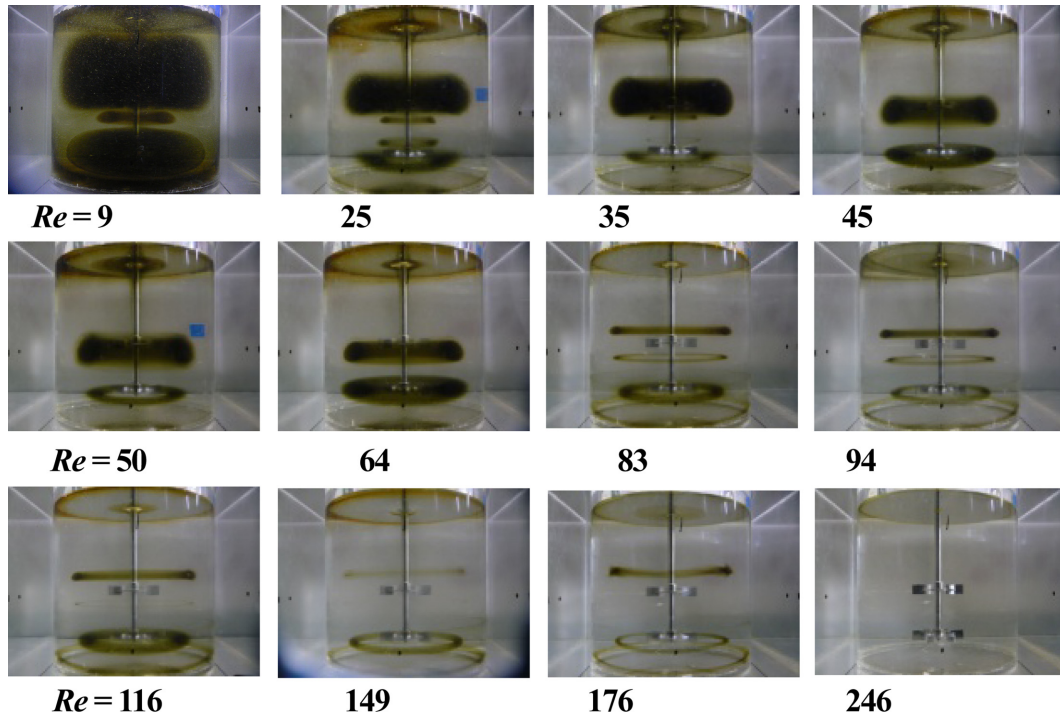


Fig. 5. Transition of mixing pattern for flat bottom at dimensionless agitation time = 750.

수백을 넘으면 난류가 만들어져서, 미혼합 영역이 형성되지 않게 된다. Fig. 5로부터 평바닥형 교반조의 경우에는 접시바닥형 교반조와는 경향이 크게 다른 단순한 변화를 보인다는 것과 기본적으로 레이놀즈수가 클수록 미혼합 영역은 작다는 것을 알 수 있다. 레이놀즈수가 30~80인 영역에서는 링의 생성 양상이 접시바닥형 교반조와 거의 같았다. 단, 레이놀즈수가 80일 때인 Fig. 3에서는 접시바닥형 교반조의 미혼합 영역 수가 3개였는데 비해, 평바닥형 교반조에서는 2개였다. 그러나, Fig. 5에 나타난 바와 같이 레이놀즈수가 83이 되면 미혼합 영역 수가 3개로 증가하였다. 이로부터 이 미혼합 영역 수가 변화하는 점은 아주 미묘한 차이로 생긴다는 것을 알 수 있다. 그러나, 레이놀즈수가 백 수십이 되었을 때, 접시바닥형 교반조는 바닥부의 미혼합 영역의 확대가 관찰되었으나, 평바닥형 교반조 쪽의 미혼합 영역은 작았다. 그리고 레이놀즈수가 수백을 넘으면 난류가 형성되어 접시바닥형 교반조처럼 미혼합 영역이 형성되지 않게 되었다. Fig. 4와 Fig. 5를 전체적으로 비교해 보면, Fig. 4에 나타난 것처럼 접시바닥형 교반조에서는 $Re=138\sim178$ 의 영역에서는 링 모양의 미혼합 영역이 3곳에서 나타나고 그 크기

크지만, Fig. 5의 평바닥형 교반조에서는 같은 레이놀즈수 영역인 $Re=116\sim176$ 에서는 링 모양의 미혼합 영역이 2곳에서 나타나며 그 크기도 작았다. 즉, 해당 레이놀즈수 영역에서는 접시바닥형보다는 평바닥형 쪽이 미혼합 영역이 작아, 평바닥 교반조가 혼합에 안정적임을 보여주었다.

Fig. 6에 특이한 현상이 관찰된 때의 교반조 내의 유동 상태를 가시화한 결과를 나타내었다. 확실하게 교반조 내에 발생하는 루프 수는 링 수와 대응하는 것을 알 수 있다.

평바닥형 교반조의 경우, 접시바닥형 교반조에서 관찰된 회전수의 변화에 의한 유동 상태의 변화는 약간 관찰되었지만, 접시바닥형 교반조와 비교하면 그리 현저하지는 않았다. 이로부터, 같은 기하형상의 교반 날개, 같은 물성의 액체, 같은 지름, 같은 액 높이의 교반조를 사용할지라도, 교반조 바닥 형상이 다른 것만으로 교반조의 거동이 완전히 달라진다는 것을 알 수 있다.

3-3. 동력수와 유동 상태의 관계

Fig. 7은 Fig. 4와 Fig. 5에 나타난 교반조 내에서 발생하는 도넛

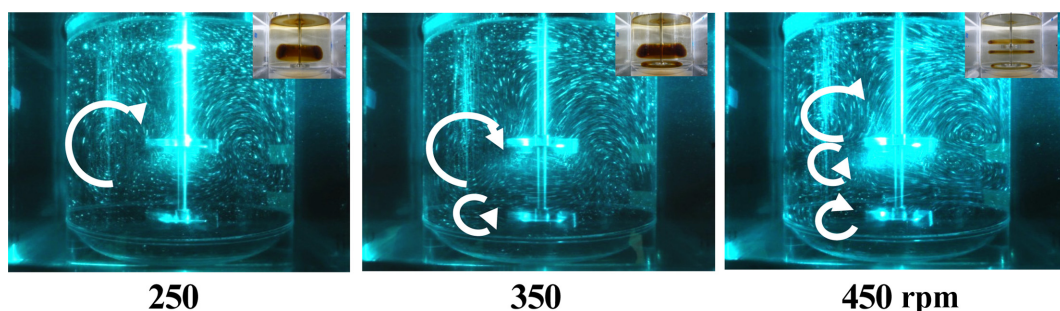


Fig. 6. Visualization of flow pattern (Dimensionless agitation time = 750, Viscosity = 0.4 Pa·s, Density = 1337 kg/m³).

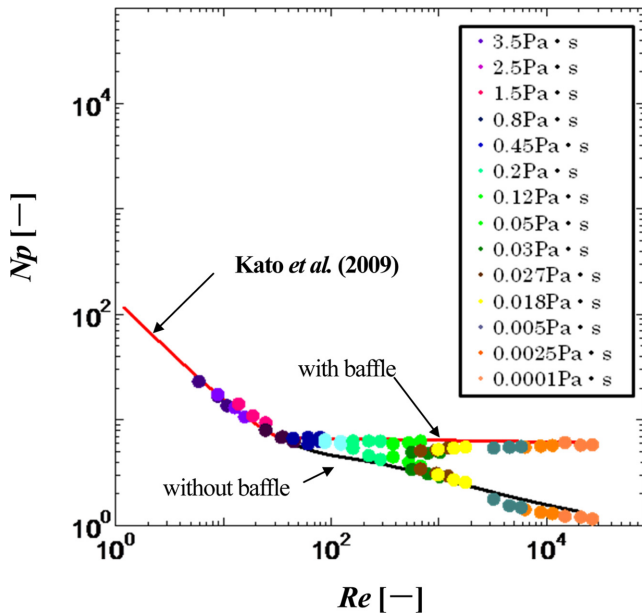


Fig. 7. Power correlation of dual impeller for dished bottom vessel.

링 수가 불규칙하게 나타나는 특이 현상이 관찰되었을 때의 동력수와 교반 레이놀즈수의 관계를 나타낸 것으로, 이 현상은 방해판의 부착 여부에 따라 그 동력수가 달라지기 시작하는 점에서 관찰된 것을 알 수 있다. 또한 교반 레이놀즈수가 80~100에서 130~200으로 증가하였을 때, 교반조 바닥부의 미혼합 영역이 매우 커진 것을 알 수 있으며, 이 또한 처리량 증가를 위해 날개 회전수를 증가하였을 때, 위험한 상태가 된다는 것을 나타내고 있다. 이는 상단 날개의 방사류가 가장 많이 발달했을 때로, 하단 날개와의 흐름 양상이 완전히 단절되어 있어서 생기는 현상으로 생각할 수 있다. 교반 레이놀즈수가 300을 넘어 유동 상태에 약간의 난류가 섞이게 되면, 이 같은 Flow Pattern의 단절이 해소되어 완전 혼합이 가능하게 된다. 따라서 2단 날개를 사용하는 경우, 교반 레이놀즈수가 수십에서 수백 사이의 전이영역에서 운전하는 것은 피하는 것이 무난할 것으로 생각할 수 있다.

그럼 중 2개의 동력 상관식은 Kato 등[7]이 제안한 Propeller 및 Pfaudler 날개에 대한 상관식을 방해판 미부착 조건과 표준 방해판 부착 조건에 적용한 것이다. 접시바닥형 교반조에 대해 2 Blade Paddle 날개에 대한 Nagata의 식[8], Paddle 날개에 대한 Kamei 등의 식[9], [10] 및 Pitched Paddle 날개에 대한 Hiraoka 등의 식[11] 등을 적용해 보았는데, 층류 상태에서는 상관식과 실측치가 일치하였지만, 전이 영역과 난류 영역에서는 어느 식에서도 상당히 큰 값을 보이며 실측치와 상관치는 일치하지 않았다. 접시바닥형 교반조에 대해 Propeller 및 Pfaudler 날개에 대한 상관식을 적용한 결과, 우연히도 실측치와 상관치가 거의 일치한 것은 대단히 흥미 깊은 결과이다. 현 단계로서는 Kato 등[6]이 제시한 바와 같이, 접시바닥형 교반조는 패들 날개를 사용하였다 하더라도 교반조 내의 흐름이 축류화되기 쉽다는 점에서, 낮은 수치를 나타내는 축류 날개의 상관식이 실측치와 일치한 것으로 생각된다. 이 점에 대해서는 1단 날개나 그 밖의 기하 형상까지 포함한 접시바닥형 교반조의 동력 상관식을 확립하기 위해서는 별도의 연구가 진행되어 할 것이다.

4. 결 론

교반조 바닥 형상에 의해 교반조에서의 교반 거동이 완전히 달라진다는 것을 알 수 있었다. 접시바닥형 교반조와 평바닥형 교반조 내에서 일어나는 유동 및 혼합 현상 차이의 한 예로 전이 영역에서 2단 날개를 사용한 경우, 접시바닥형 교반조에서는 특정 날개 간격에서 도넛 링 모양의 미혼합 영역이 저 회전수일 때는 2개가 생겼으나, 450 rpm 이상으로 운전하면 교반조 내 유동 상태의 변화에 따라 3개로 증가하였다.

방해판 미부착 때와 방해판 부착 때에 있어 동력수가 변화하기 시작하는 영역에서 2단 Rushton turbine 날개를 어떤 날개 간격에서 접시바닥형 교반조에 대해 사용하면, 교반조 내에 발생하는 도넛 링 모양의 미혼합 영역 수가 변화하는 것을 나타냈으며, 그것이 관찰되는 조건은 전이 영역으로 방해판을 부착했을 때가 방해판 부착하지 않았을 때와 비교하여 동력수가 상승하는 영역이라는 것을 알 수 있었다.

Nomenclature

b	: height of impeller blade [m]
C_1	: position of lower impeller [m]
C_2	: position of upper impeller [m]
D	: vessel diameter [m]
d	: impeller diameter [m]
H	: liquid depth [m]
N	: impeller rotational speed [s^{-1}]
N_p	: power number ($= P/(\rho N^3 d^5)$) [-]
P	: power consumption [W]
Re	: Impeller Reynolds number ($= Nd^2 \rho / \mu$) [-]
μ	: liquid viscosity [Pa·s]
ρ	: liquid density [kg/m^3]

References

1. Takeda, K., Hoshino, T., Taguchi, H. and Fujii, T., "Characteristics of the Multiple Impeller in Turbulent Mixing Operation," *Kagaku Kogaku*, **32**, 376-381(1968).
2. Mochizuki, M., "Multi Impellers and Problem (in Japanese)," *Mixing (Saikin no Kagaku Kogaku 44)*, Kagakugogyosya, Tokyo (1992).
3. Nishikawa, M., Ashiwake, K., Hashimoto, N. and Nagata, S., "Effect of Impeller Clearance on Power Consumption by Multi-Stage Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **2**, 426-427(1976).
4. Komori, S. and Murakami, Y., "Turbulent Mixing in Baffled Stirred Tanks with Vertical-Blade Impellers," *AIChE J.*, **34**, 932-937(1988).
5. Mochizuki, M., Takei, N., Satoh, T., Satoh, K. and Akehata, T., "Power Required for Upper and Lower Impellers in Turbulent Mixing Vessels with Dual Impellers," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 628-632(1995).
6. Kato, Y., Tada, Y., Urano, K., Nakaoka, A. and Nagatsu, Y., "Differences of Mixing Power Consumption between Dished Bottom Vessel and Flat Bottom Vessel," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **36**, 25-29(2010).

7. Kato, Y., Tada, Y., Takeda, T. and Hirai, Y. and Nagatsu, Y., "Correlation of Power Consumption for Propeller and Pfaudler Type Impeller," *J. Chem. Eng. Japan*, **42**, 6-9(2009).
8. Nagata, S., Yokoyama, T. and Maeda, H., "Studies on the Power Requirement of Paddle Agitators in Cylindrical Vessels," *Kagaku Kogaku*, **20**, 582-592(1956).
9. Kamei, N., Hiraoka, S., Kato, Y., Tada, Y., Shida, H., Lee, Y. S., Yamaguchi, T. and Koh, S. T., "Power Correlation for Paddle Impellers in Spherical and Syllindrical Agitated Vessels," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **21**, 41-48(1995).
10. Kamei, N., S. Hiraoka, Y. Kato, Y. Tada, K. Iwata, K. Murai, Y. S. Lee, T. Yamaguchi and S. T. Koh, "Effects of Impeller and Baffle Dimensions on Power Consumption under Turbulent Flow in an Agitated Vessel with Paddle Impeller," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **22**, 249-256(1996).
11. Hiraoka, S., Kamei, N., Kato, Y., Tada, Y., Cheon, H. G. and Yamaguchi, T., "Power Correlation for Pitched Blade Paddle Impeller in Agitated vessels with and without Baffles," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **23**, 969-975(1997).