

PIV에 의한 교반기내의 산업용 임펠러형태에 따른 비정상 유동특성에 관한연구

남구만* · 김범석* · 김정환** · 강문후*** · 이영호****

A Study on Unsteady Flow Characteristics in Industrial Mixers with Various Types Impeller by PIV

Koo-Man Nam*, Beom-Seok Kim*, Jeong-Hwan Kim**, Mun-Hu Kang***,
Young-Ho Lee****

Key Words : PIV(Particle Image Velocimetry, 입자영상유속계), mixer (교반기), PBT impeller (Pitched Blade Turbine impeller, 피비티임펠러), hydrofoil impeller (하이드로포일 임펠러)

ABSTRACT

Mixers are used in various industrial fields where it is necessary to intimately mix two reactants in a short period of time. However, despite their widespread use, complex unsteady flow characteristics of industrial mixers are not systematic investigated. The present study aimed to clarify unsteady flow characteristics induced by various impellers in a tank. Impellers are pitched blade turbine and neo-hydrofoil turbine types. A high speed CCD camera and an Ar-Ion laser for illumination were adopted to clarify the time-dependent flow characteristics of the mixers. The rotating speed of impellers increased from 6Hz to 60Hz by 6Hz. The maximum velocity around PBT impeller is higher than the hydrofoil type impeller. These two types of turbine shows that typical flow characteristics of axial turbine and suitable for mixing high-viscosity materials.

1. 서론

우리 주변에는 많은 회전식 기계들이 사용되고 있으며, 이러한 기계들에서 발생하는 여러 가지 복잡한 유동현상들이 연구되고 있다. 그 중에서도 교반장치는 아직까지 규명되지 않은 복잡한 유동특성을 보이고 있다. 산업현장에서 흔히 적용되는 교반장치는 식품공업,

생화학공업, 금속공업, 수처리 및 환경 관련 공정 등 다양한 산업분야에 사용되고 있으며, 혼합되는 물질의 특성에 따라, 다양한 종류의 임펠러와 교반조가 설계된다. 교반기 내부 유동장은 임펠러로부터 발달되는 유체전단혼합(fluid shear)과 유체흐름(fluid flow)의 상호 작용에 의한 날개 끝 와류(tip vortex)의 주기적인 방출, 2차 와류의 순환 및 난류의 발생 등 상당히 복잡한 구조의 3차원적 비정상 유동메커니즘을 가진다. 우수한 성능의 산업용 교반기를 설계하기 위해선 반드시 교반성능에 영향을 미치는 다양한 내부 유동특성의 정량적 실험데이터의 확보가 필요하나, 3차원적 비정상 특성을 나타내는 복잡한 구조의 내부유동특성에 관

* 한국해양대학교 대학원 기계공학과

** (주) 아이아이티 연구원

*** (주) 우진 기술 연구소

**** 한국해양대학교 기계·정보 공학부

E-mail : nam8152@pivlab.net

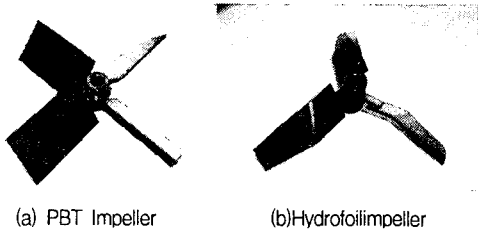


Fig. 1 Types of mixing impeller

한 정량적 해석은 현재까지도 상당히 어려운 문제이다.

Bakker와 Akker는 LDV(Laser Doppler Velocity)를 이용한 PBT (Pitched Blade Type)타입 임펠러에 대한 축방향 속도 분포의 고찰을 하였고, Kobayashi 등은 PIV(Particle Image Velocimetry) 계측을 통한 임펠러의 종류에 따른 내부 유동특성을 계측하였으며, 그에 따른 불확실성 해석을 수행하였다.^[1]

최근에는 전산해석 기술의 발달로 인한 수치해석적 연구가 활성화되고 있으며, 허남건 등^[2]이 수치해석에 의한 산업용 교반기 내부 유동특성을 파악하고, PIV 실험데이터와 수치해석결과를 비교하였다.

본 연구의 목적은 실제 교반기 제작업체에서 설계된 두가지 형태의 임펠러를 장착한 교반기 내부 유동장에 대해 고속도 카메라를 적용한 PIV 계측을 통해 속도, 와도, 난류운동에너지 분포 등에 대한 정량적 유동정보를 계측하고, 이를 바탕으로 교반기 내부의 3차원적 비정상 유동 특성 및 전단혼합 특성을 규명하여 각각의 임펠러 교반기특성을 비교 분석함에 있다.

2. PIV 계측

2.1. 실험장치

Fig.1에 본 연구에 적용된 두 가지 형태의 임펠러의 실제 모델 사진을 나타내었다. PBT형 임펠러는 Radial Flow보다는 효율적인 흐름을 가지며, Hydrofoil Impeller 보다는 유체전단율(G값)이 높다. 높은 펌핑(pumping)력으로 교반기내 복잡한 난류를 발생시키며 동시에 임펠러에 의해 유체에 강한 속도와 전단을 발생시킨다. 일정한 수준의 유체흐름속도와 유체전단이 동시에 요구될 때, 그리고 높은 Np(Power Number)의 Hydrofoil Impeller 사용 시 임펠러 직경이 지나치게 크게 설계될 때 효과적이다. hydrofoil 형 임펠러는 임펠러 영역 내에서 크고, 국부적인 전단율을 최소화시켜 교반기 전체에 토출되는 유체전단율(또는 G값)을 일정하게 만드는 흐름을 발생시키며, 소요동력이 낮으며 펌핑력이

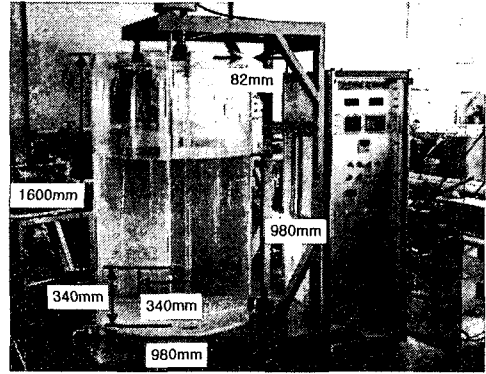


Fig. 2 Experimental apparatus

높아 교반기내의 넓은 부분에 교반기흐름이 미치며 교반기강도가 작아서 저속교반기에 적합한 형태이다.^[3] 임펠러의 직경은 각각의 임펠러 모두 340mm이다. Fig. 2에 본 연구에 사용된 실제 산업용 교반기의 모델을 나타내었다. 교반기는 직경 980mm, 높이 1600mm의 크기이며, 임펠러는 중심이 교반기 바닥으로부터 340mm 간격을 두고 설치되었으며, 교반기 외벽에 방사형으로 설치된 배플(baffle)의 폭은 각각 82mm이다. 가시화를 위하여 원통형 수조를 투명 아크릴로 제작하여 지면으로부터 높이 980mm까지 상온수를 채웠다.

2.2. 실험방법

Fig. 3에 PIV 실험장치 개략도를 나타내었다. 본 연구에 사용된 PIV 시스템은 조명으로 연속광 레이저(5W, Ar-Ion)를 이용하였으며, 2mm 미만의 얇은 두께의 레이저 평면광을 계측단면에 적절히 조사하기 위하여 원통형 실린드릭 렌즈(cylindrical lens)를 사용하였다. 영상 입력 장치로써, 계측영역 내 유동장의 시간 변화에 따른 3차원 비정상 해석을 하기 위해 시공간 분해능이 우수한 고속도카메라(1280[H]×1024[V])를 이용하였다. 임펠러가 교반기 내부 유동장을 완전 발달시킨 후부터, 설치된 임펠러의 형태와 회전속도 변화에 따라 125~500frame/sec.의 영상을 연속적으로 획득하였다. 작동유체로써 상온의 수도수를 이용하였으며, 교반기 내부유동장의 가시화를 위해 추종성과 산란성이 우수한 평균직경 100 μ m인 구형 PVC(Poly Vinyl Chloride) 입자를 사용하였다. 실험은 임펠러 회전속도 변화에 대한 교반기 내부 유동특성 변화를 파악하고자 PBT형 임펠러와 hydrofoil형 임펠러의 회전속도를 6~60Hz의 범위에서 6Hz 씩 증가시키며 각각의 임펠러

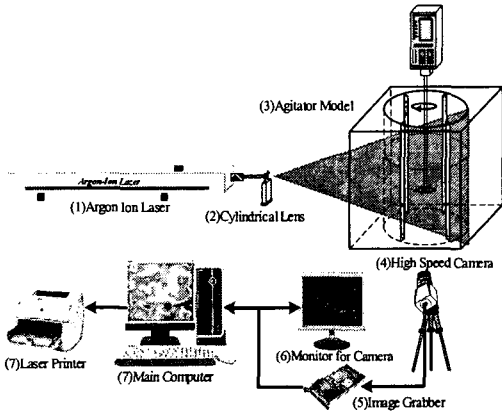


Fig.3 Schematic arrangement of PIV system

에 대해 모두 10회의 계측을 수행하였으며, 이때 임펠러의 회전수는 독립적으로 설치된 'G' 콘트롤러에 의해 제어된다. 회전 축 중심을 기준으로 유동장은 좌우 대칭 조건을 만족하므로 단일 단면에 대한 계측을 수행하였으며, 계측영역은 교반조 바닥으로부터 각각 418mm×483mm(PBT), 450mm×472mm(hydrofoil)의 영역을 가진다. Table 1에 실험조건을 나타내었으며, Table 2에 계측조건을 나타내었다.

3 결과 및 고찰

3.1. 임펠러 형상에 따른 속도장의 변화

유동장이 충분히 발달한 후 하나의 PBT형 임펠러 날개가 계측단면에 진입하는 시점부터 통과 후 까지 0.04초 동안 속도장의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 전체적인 유동패턴이 전형적인 축류형 임펠러의 특성을 잘 나타내고 있으며 임펠러의 높은 펌핑력이 교반조 내부에 빠른 속도 구배를 형성시키는 것을 알 수 있다. $t=0.01s$ 는 임펠러 날개가 계측단면으로 진입하는 시점을 나타낸다. 임펠러가 교반조의 계측단면에 진입하면서 임펠러 상단부에 가장 큰 속도분포를 보이고 있고, 임펠러가 점점 계측단면을 완전히 빠져나가면서 임펠러 펌핑력에 의한 임펠러 상·하단부 속도의 증가가 뚜렷하게 나타나는 것을 볼 수 있다.

Fig. 5에 hydrofoil 형 임펠러가 장착된 교반조 내부 속도장의 결과를 나타내었다. $t=0.01s$ 는 임펠러 날개가 계측단면으로 진입하는 시점을 나타낸다. 좌측 하단에 비교적 큰 와류가 발생하고 있으며, 임펠러 하단부에 작은 와류가 발달하고 있음을 알 수 있다. 완전

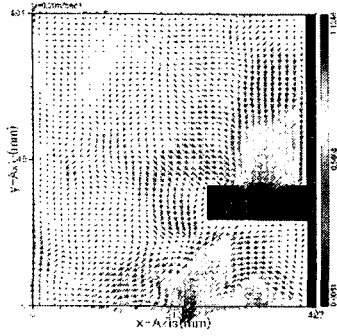
Table 1 Experimental conditions

Item	Specification
Light source	5W Ar-Ion laser
Sheet light	Cylindrical lens
Working fluids	Tap water(15°C)
Trace particles	PVC(100 μ m)
Image recording	High speed CCD camera (1280×1024)
Time resolution	125 ~ 500fps
Identification	Gray-level cross correlation
Image process	Cactus 3.1
Host computer	Pentium 4 1.4GHz
Error rate	Less 1%/frame

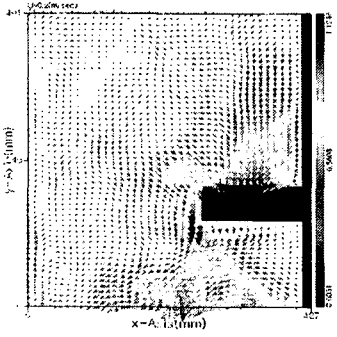
Table 2 Measurement condition

Model	Experimental condition	
PBT type impeller	Diameter(ϕ)	340
	Rotational speed(Hz)	6,12,18,24,30,36,42,48,54,60
	Measurement region(mm)	418(H)×483(V)
hydrofoil type impeller	Diameter(ϕ)	340
	Rotational speed(Hz)	6,12,18,24,30,36,42,48,54,60
	Measurement region(mm)	450(H)×472(V)

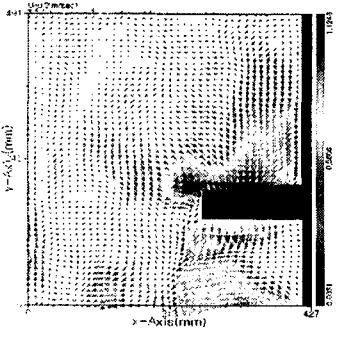
발달한 교반기 내부 유동장은 임펠러의 회전으로 인하여 임펠러 하단으로 강한 기류를 발생시키며, 이는 바닥면과 충돌한 후 좌·우측으로 각각 진행하며, 교반조 좌·우측 하단에 큰 와류를 발생시킨다. 순환하는 기류는 다시 임펠러 상단부로 유입되는데 이때 회전 축 방향으로 유입되는 흐름과 임펠러 상단부로 유입되는 두 가지로 구분되어 짐을 알 수 있다. 또한, 좌측 하단부에서 크게 발생하는 와류의 영향으로 인하여 약 45°의 각도를 가지고 임펠러 하단부로 비스듬히 유입되는 흐름이 동시에 발생하는 것을 알 수 있다. 최대 속도가 발생하는 지점은 임펠러 하단부이며 약 0.7m/s의 속도값을 가진다. $t=0.02s$ 부터 임펠러 날개가 계측단면을 통과하며, 임펠러 하단 부의 속도분포가 전체적으로 0.01초의 경우보다 높게 나타나고 있다. 또한, 회전하는 날개 끝단이 계측단면에 진입하면서 날



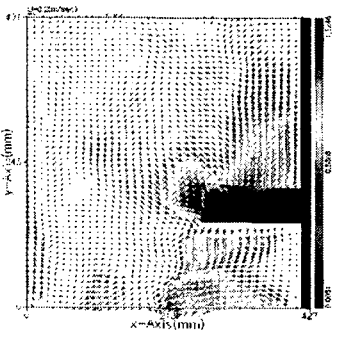
(a) t=0.01s



(b) t=0.02s

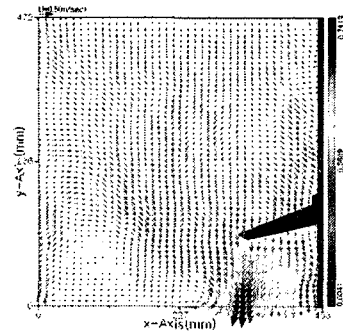


(c) t=0.03s

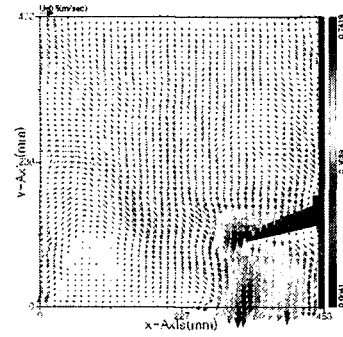


(d) t=0.04s

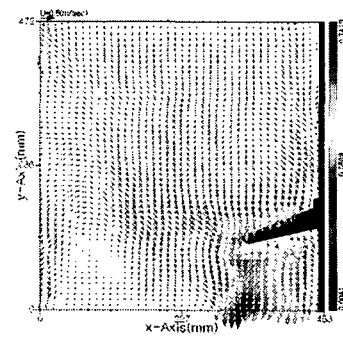
Fig. 4 Velocity fields (PBT impeller, 60Hz)



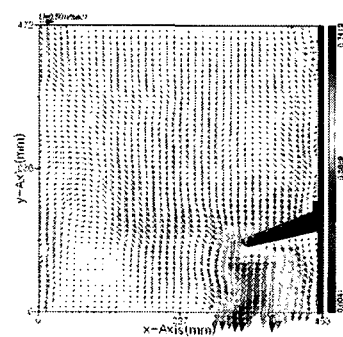
(a) t=0.01s



(b) t=0.02s



(c) t=0.03s



(d) t=0.04s

Fig. 5 Velocity fields (hydrofoil impeller, 60Hz)

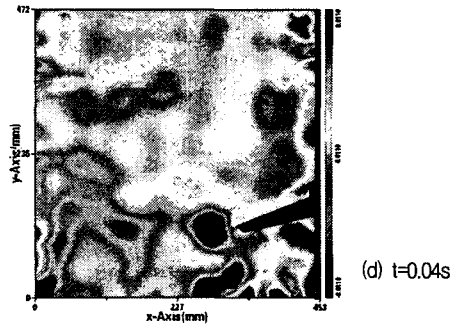
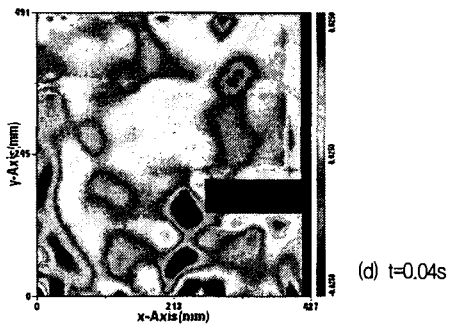
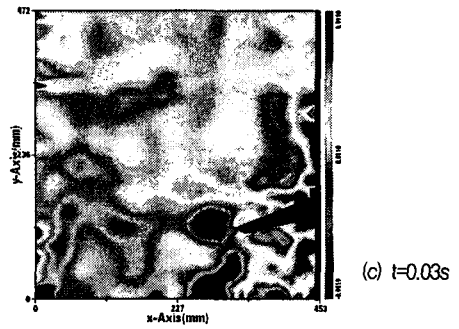
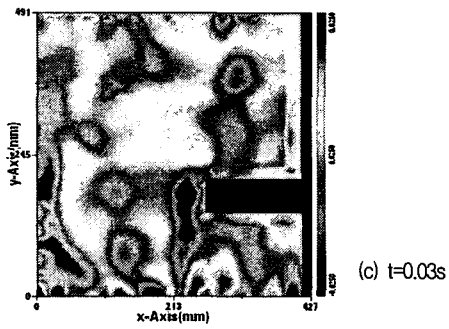
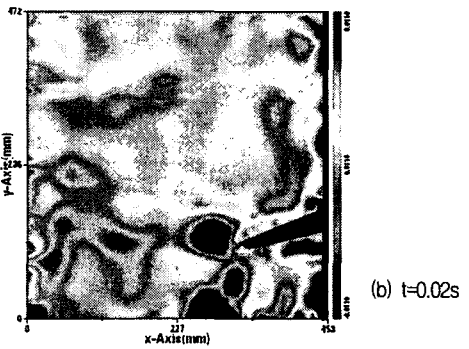
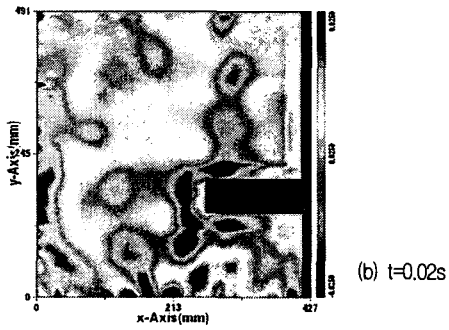
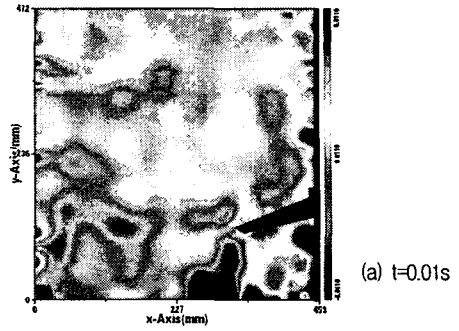
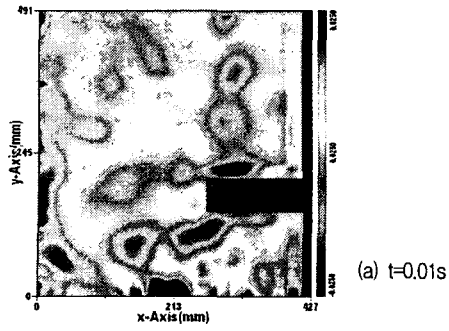


Fig. 6 Vorticity (PBT impeller, 60Hz)

Fig. 7 Vorticity (hydrofoil impeller, 60Hz)

개 끝단에서의 속도 값이 가장 높게 나타나고 있다. 0.03초 와 0.04초의 속도장은 임펠러 날개가 계측단면에 완전히 걸친 후부터 빠져나가는 순간까지를 나타낸다. 0.02초의 순간 속도장에서 발달한 날개 끝 부분에서의 속도분포는 계속 높게 유지되고 있으며, 전체적인 유동장의 흐름특성은 완전 발달한 후의 결과이므로, 임펠러 주위의 순간속도 변화를 제외하고는 주목할만한 변화가 없다.

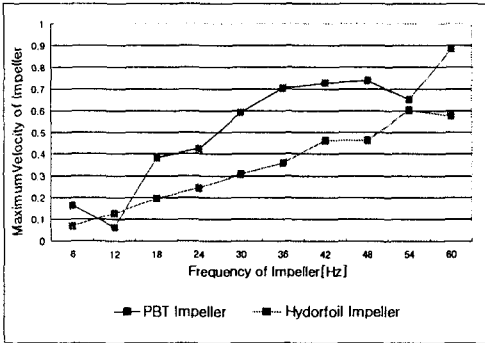


Fig. 9 Maximum velocity distribution

3.2. 임펠러 형상에 따른 와도의 변화

Fig.6, Fig.7에 PBT, hydrofoil형 임펠러의 영향으로 발생하는 와도를 나타내었다. 와도의 붉은 색은 시계 방향으로 회전하는 성분을 나타내며, 푸른색은 반 시계 방향으로 회전하는 성분을 나타낸다. PBT형 임펠러의 경우, 날개가 계측단면으로 진입하는 순간에 날개 끝 단면에서 시계방향으로 회전하는 와류가 발생하는 것을 볼 수 있으며, 0.02초의 경우 반시계방향으로 회전하는 성분이 전체적인 날개 면에서 서서히 발달해나가는 것을 볼 수 있다. 0.03초의 경우 시계방향으로 회전하는 와류는 점점 임펠러 아래방향에서 강하게 발달되며, 교반조 바닥과 벽면을 따라 크고 작은 반시계방향 와류들이 발달하는 특성을 보이고 있다. hydrofoil형 임펠러에서 0.01초의 경우 임펠러 날개가 계측단면으로 진입하는 순간 시계방향으로 회전하는 와류가 날개 끝 상단부에 약하게 나타나고 있으며, 0.02초의 경우 시계방향으로 회전하는 성분의 와류 좌측에 반시계방향으로 회전하는 와류가 발달하기 시작함을 알 수 있다. 0.03초의 경우 시계방향으로 회전하는 와류의 세기가 점차 약해지고 있는 반면, 반 시계방향으로 회전하는 와류의 세기는 점점 강해지고 있으며, 0.04초의 경

우도 동일한 특성을 보인다. 시간이 지남에 따라, 시계 방향 와류의 성분은 점점 약해지면서 이 한 쌍의 와류는 전체적으로 반시계방향으로 회전하는 특성을 나타내고 있다.

회전속도 변화에 따라 교반조내 계측영역의 최대속도 값을 Fig.9에 나타내었다. PBT형 임펠러의 최대속도는 hydrofoil형 임펠러의 최대속도 값보다 전 영역에 걸쳐 대체로 높게 나타나고 있으며, 이는 임펠러의 기하학적인 형상에 따른 높은 유체 전달율에 기인한 것으로 분석된다. hydrofoil형 임펠러는 날개 끝 부분에서 이탈되는 유체의 속도가 상대적으로 낮으므로 유동장이 낮은 크기의 속도로 교란되고 있다고 판단된다. 유동특성 평가를 통해 알아본 PBT형 임펠러는 교반조 전체에 큰 혼합영역과 높은 속도로 복잡한 난류를 형성하며, 임펠러에 의해 액체에 강력한 동격과 전달을 주는 것을 확인할 수 있었으며, hydrofoil형 임펠러는 임펠러 하부에 국부적인 혼합영역을 강하게 발생시키며 비교적 교반조 전체에 유체전달율을 일정하게 만드는 흐름을 형성하는 것을 알 수 있었다.

4. 결론

1. PIV 실험결과 두 가지 임펠러 모두 전형적인 축류형 임펠러의 유동특성을 잘 나타냄을 알 수 있다.
2. hydrofoil형 임펠러의 경우 전체 순환영역이 PBT형 임펠러에 비해 더 작게 발달하고, 일정한 유체전달력을 형성하는 것을 미루어봤을 때 저속·저점도 교반에 적합하다고 판단된다.
3. PBT형 임펠러의 최대속도가 hydrofoil형 임펠러의 최대속도에 비해 높고 교반조 내부에 큰 순환영역을 발생시키는 것으로 미루어봤을 때 PBT형 임펠러가 고점성의 강력 교반에 적합하다고 판단된다.

참고문헌

1. 양창조, 1999, "Impeller 形状에 따른 攪拌機의 流動特性에 관한 PIV 計測", 한국해양대학교 공학석사 학위논문, pp. 3~4.
2. 장재원, 허남건, 2001, "산업용 교반기 내부 정상/비정상 유동특성해석", 유체기계연구개발발표회 논문집, pp. 460~465.
3. www.philadelphiamixers.com