

공학석사 학위논문

PIV에 의한 교반기내의 산업용 임펠러
형태에 따른
비정상 유동특성에 관한연구

A Study on Unsteady Flow Characteristics in a Industrial
Mixer with Various Type of Impellers by PIV

지도교수 이 영 호

2004년 2월

한국해양대학교 대학원

기계공학과

남 구 만

本 論 文 을 南 具 滿 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

委 員 長 : 工 學 博 士 박 권 하 印

委 員 : 工 學 博 士 김 유 택 印

委 員 : 工 學 博 士 이 영 호 印

2003年 10月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

機 械 工 學 科

南 具 滿

목 차

목차	i
Abstract	iii
사용기호	v
제1장 서 론	1
1.1 연구배경	1
1.2 관련연구	2
1.3 연구의 목적	4
1.4 PIV의 의의	6
제2장 실험 및 실험방법	8
2.1 실험장치	8
2.2 실험방법	11

제3장 영상처리	15
3.1 전처리	15
3.2 동일 입자 추적	20
3.3 후처리	25
제4장 결과 및 고찰	26
4.1 순간 원시 영상에 대한 유동특성	26
4.2 속도벡터와 평균속도벡터에 의한 유동특성	30
4.3 와도에 의한 유동특성	58
4.4 최고속도와 유적선에 의한 유동특성	60
제5장 결론	81
참고문헌	82
감사의 글	

A Study on Unsteady Flow Characteristics in
a Industrial Mixer
with Various Types of Impellers by PIV

Koo Man, Nam

*Department of Mechanical Engineering
Graduate School, Korea Maritime University*

Abstract

Mixers are used in various industrial fields where they are 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 systematically investigated. The present study aims for clarify unsteady flow characteristics induced by various impellers in a tank. Impellers are hydrofoil turbine, neo-hydrofoil turbine and pitched blade turbine(PBT) 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 pitched blade turbine impeller is higher than the other type impellers. These three types of turbine show that typical flow characteristics of axial turbine and suitable for mixing high-viscosity materials.

Nomenclature

C	:	impeller off-bottom clearance
C_{fg}	:	cross-correlation coefficient
D	:	impeller diameter
D_i	:	impeller coefficient
G	:	velocity gradient
H	:	total liquid depth
h	:	distance above the vessel base
N	:	agitation speed (RPM)
P	:	power
R	:	vessel radius
Re	:	agitation Reynolds number
T	:	vessel diameter
t	:	times
u, v	:	velocity in the x, y -direction
V	:	volume
W	:	impeller blade width
w	:	blade height
x, y, z	:	cartesian coordinates

Greek Letters

ρ	:	density
μ	:	dynamic viscosity
ν	:	kinematic viscosity

Superscripts

-	:	time averaged
---	---	---------------

제1장 서론

1.1 연구배경

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. 특히 임펠러는 기계동력을 교반 energy로 바꾸어 직접액체를 저어 섞어주는 부분인 만큼, 형상에서의 꼬임, 회전 밸런스까지 하나하나가 교반 효율을 좌우하는 큰 요소이다. 특히 중속회전인 경우에는 임펠러가 교반 성능에 미치는 영향이 매우 크다고 알려져 있다.

교반기 내부 유동장은 임펠러로부터 발달되는 유체전단혼합(fluid shear)과 유체 흐름(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 필요하다. 3차원적 비정상 특성을 나타내는 복잡한 구조의 내부유동특성에 관한 정량적 해석은 현재까지도 상당히 어려운 문제로 남아있다.

1.2 관련연구

Chapple과 Kresta[1]는 가시화기법(tuft법)으로 3개의 블레이드를 가진 임펠러에 의한 교반장치에서 유동패턴의 안정성을 연구하였다. 이들은 또한 임펠러의 위치, 직경과 같은 기하학적 변수의 영향을 연구 발표하였다. Winardi와 Nagase[2]는 유동의 가시화 기법을 조합하

여 선박용 프로펠러의 유동특성을 연구하였다. 이들은 다양한 와류의 회전, 순환과 같은 유동현상을 규명하고, 일정한 주기성을 고찰하였다.

Bakker와 Akker[3]는 LDV를 이용하여 피치 블레이드 터빈에 의한 유동장의 축방향 속도분포의 고찰을 통하여 유동패턴의 비정상성과 불안정성을 제시하였다.

Haam 등[4]은 일정한 주기를 갖는 교반탱크 내부의 상호 열전달 계수의 크기를 알아내고 이것은 교반탱크의 축방향 와류의 주기적인 유동에 따른 열전달 계수의 변동일 것이라고 보고하고 있다.

Bakker 등[5]은 축방향 임펠러에 의해 교반되는 가스집진기 시스템의 유동현상의 주기성을 고찰하고 변동의 주기와 임펠러의 회전속도의 관계를 규명하였다. Haam 등의 열전달 연구에서와 같이 이 현상은 복잡한 와류의 비대칭적 구조에 기인한 큰 범위의 주기와 관련된 비정상성과 불안정성을 고찰하였으나 가스집진기의 성능에 직접적인 영향을 주는 요인을 파악하지는 못하였다.

Tsurusaki 와 Urata[6]는 디지털 이미지 프로세싱 기법에 의해 교반수조 중앙의 두 단면에서 $r-z$ 와 $r-\theta$ 좌표계에 의한 속도를 계측하여, 이미지 프로세싱 기법의 유효성과 유동의 비정상성을 고찰하였지만, 교반 성능에 미치는 영향을 분석하기에는 미흡하다.

Kobayashi 등[7]은 PIV계측을 통하여 임펠러의 종류(3 blades propeller와 4 blades pitched-paddle)에 따른 속도분포, 유선, 와도, 운동에너지를 구하여 비교하고 불확실성을 검토하였다.

Myers 등[8]은 DPIV기법을 LDV기법과 비교하고 두 가지의 임펠러 형상에 대한 교반기의 내부 유동장에 와류의 대칭적 구조를 파악하였으며, 와도, 주파수분석, PSD(power spectral density)을 적용하

여 유동패턴의 주기성을 특성곡선으로 나타내었다.

최근에 Kemoun 등[9]은 LDV기법으로 중앙의 여러 단면에서 순간 및 시간평균 속도분포, 주파수 분석을 통한 유동현상을 고찰하고, 유동의 불안정성과 레이놀즈수와의 관계를 규명하고 있지만 임펠러의 종류 및 위치에 따른 유동특성을 일관성 있게 파악하지는 못하였다.

1.3 연구의 목적

본 연구에서는 교반장치의 기능과 교반작용을 이해하고 교반성능에 영향을 미치는 다양한 내부유동특성을 알아보하고자 baffle이 설치된 교반수조 내의 수직 단면에서 세 가지의 서로 다른 임펠러와, 회전수 변환이 교반성능 향상에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 PIV 계측을 행하였다. 이를 바탕으로 교반 장치 내부의 속도, 와도, 유적선 등의 3차원적 비정상 유동 특성 및 전단 혼합 특성을 규명하여 각각의 임펠러 교반 특성을 비교 분석하였다.

유동의 가시화란 임의의 순간의 유동구조를 파악하는 의미에서 유체공학적으로 매우 중요한 위치를 차지하며, 최근에는 유체기계의 설계 및 성능향상을 위하여 PIV적용[10]을 통한 여러 유동장 해석에 많이 응용되고 있다. 원리적으로 PIV는 추종성이 우수한 입자로 유동장을 가시화하고 얻어진 영상을 처리하여 미소시간 간격동안 이동한 다수의 입자의 이동변위를 획득함으로써 속도벡터를 구하는 방법이다.

본 실험은 유동장의 속도를 2차원 PIV에 의해 동시다점으로 계측

하여 구하였으며 이를 위한 원시영상처리는 디지털 영상처리기법을 기준으로 행하였다. 계측영역은 교반수조의 수직면(r - z 좌표)의 2차원 단면으로 각 계측영역에 대하여 임펠러의 종류, 회전수를 각각 변화시켜 가면서 순간속도벡터와 평균속도벡터, 그리고 운동에너지 등을 구하여 이에 대한 유체역학적 고찰을 행하였다.

PIV 계측결과 순간의 속도벡터가 영역별로 독특하게 존재하였고 축방향 및 반경방향의 거리에 따라 속도분포도 다르게 형성되었다. 특히 유동장의 다양한 유동특성을 일관성 있게 파악하기 위하여 제반 시간평균 결과를 비교한 결과 두 유동장에서 임펠러 축을 중심으로 좌우대칭인 속도분포와 주기적인 와류의 방출, 이에 따른 2차 와류의 순환 및 유입(entrainment)등의 주기적인 변동이 활발하게 나타났다.

이와 같이 임펠러 형상에 따른 교반장치 내부의 다양한 유체역학적 현상을 PIV계측기법으로 임의의 순간에 동시다점 계측하여 제반 순간 및 평균 유동특성을 시계열 분석을 통하여 교반기 내부의 유동특성을 고찰하였다.

1.4 PIV 의의

유체의 유동특성을 파악하는 것은 유체공학 관련의 제반문제를 해결하기 위하여 필요 불가결한 요소이다. 지금까지의 유동가시화 기법은 직관적으로 이해하기 쉬운 영상을 제공할 수 있음으로서 어떤 복잡한 유동장도 쉽게 이해 될 수 있다는 장점을 가지고 있지만 정량적인 데이터의 부족으로 역학적인 해석이 어렵게 되어 공학적인 측면

에서 유체계측이 보다 중요한 위치를 차지하고 있다. 지금까지 유체 계측에 있어서 속도를 얻기 위하여 열선유속계 또는 LDV를 사용하여 왔다. 이러한 점계측 속도측정기법은 신뢰성과 정도면에서 우수한 성능이 입증되었으나 계측기법 고유의 문제점 때문에 유동현상의 기본특성인 비정상의 동시다점계측이 원리적으로 불가능하다.

이러한 배경에서 종래의 정성적인 가시화기법과 디지털 영상처리 기술을 새로이 접목한 PIV가 속도계측의 새로운 실험기법으로서 1980년대 초반부터 본격적으로 소개가 되었으며 최근에는 전산유체 역학에 필적할 수 있는 유동장의 대표적인 계측기법으로서 크게 각광을 받고 있다.

PIV의 기본원리[11][12][13]로서 유동장의 국소속도는 어느 한 점을 통과하는 추적입자가 미소 시간간격동안 이동한 미소 직선거리 및 방향을 알면 쉽게 구해진다. 즉 입자의 입자운동에 요하는 시간간격 및 벡터변위의 관계로부터 구할 수 있다. 유동장에 유체와 동일한 비중을 갖는 추적입자(tracer particle)를 분포시키고 이들 입자의 순간적인 위치를 시간차를 가진 두 영상 상에서 공간대응 시키는 방법에 의하여 속도벡터를 동시다점으로 구한다. 특히 추적입자로서 감온액정입자(thermo-sensitive crystal particle)[14]와 같이 온도에 감응하는 추적 입자를 사용할 경우에는 공간의 온도분포까지 동시에 구할 수 있다. PIV 실험기법은 선진국에서도 활발하게 연구하고 있는 첨단 핵심기술로 매우 빠른 속도로 발전하고 있다. 최근에는 Stereoscopic PIV, Holograph PIV등의 3차원 속도장 측정방법이 개발되어 유동해석 연구에 활용되고 있다.

따라서 PIV기법은 LDV 등이 갖는 점계측의 한계를 근본적으로 해결할 수 있음으로써 컴퓨터 관련기술 및 고성능의 영상처리장치의

개발에 힘입어 빠른 기술적 진보를 보이고 있으며 현재에는 다양한 조명장치와 정교한 전자장비에 의한 애니메이션 기법의 도입과 적용으로 유동관련 연구자들을 흥미로운 가시화의 세계로 초대하고 있다.

세계적인 PIV전문가들의 견해에 의하면 PIV의 계측원리에 대한 연구는 거의 완성단계에 진입하였으며, PIV기법을 대중화시키려는 일련의 움직임으로서 PIV 계측시스템에 대한 효과 및 계측결과의 정도를 평가할 수 있는 표준기법[15]이 일본의 전문가들에 의하여 인터넷상으로 소개되고 있다.

하지만 PIV 고유의 정도문제로 인한 비정상적 순간의 변동량, 고속의 난류 유동장을 해석하기 위해서는 여러 가지의 개선점이 필요하며, 고속 유동장에 대응할 수 있는 PIV시스템의 구축에는 고가의 기본장비가 요구되고 있다.

따라서, 공학적인 측면에서 보다 유용하게 사용하기 위해서는 PIV 알고리즘의 고정도화 기술이 필요하며, 효율적인 고속 유동장을 위한 경제적인 PIV시스템에 대한 새로운 접근과 편의성을 갖춘 경제적인 하드웨어의 최적화기술 그리고 이들 기법을 이용한 응용개발 연구 및 PIV 데이터를 이용한 유동장기법의 새로운 접근이 중요한 과제로 대두되고 있다.

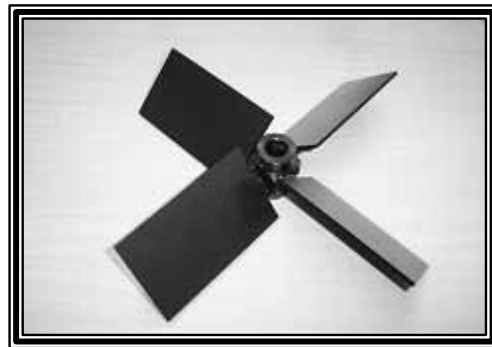
제 2장 실험 및 실험방법

2.1 실험장치

Fig. 2.1에 본 연구에 적용된 세 가지 형태의 산업용 임펠러의 실제 모델 사진을 나타내었다. PBT(Pitched Blade Turbine)형 임펠러는

radial flow보다는 효율적인 흐름을 가지며, hydrofoil impeller보다는 유체전단율(G값)이 높다. 일정한 수준의 유체흐름속도와 유체전단이 동시에 요구될 때와 높은 N_p (power number)의 hydrofoil impeller 사용 시에 임펠러 직경이 지나치게 크게 설계될 때 효과적이다. Hydrofoil형 임펠러는 임펠러 영역 내에서 크고, 국부적인 전단율을 최소화시켜 교반조 전체에 토출되는 유체전단율(또는 G값)을 일정하게 만드는 흐름을 발생시키며, 소요동력이 낮으며 펌핑(pumping)압이 높아 교반조내의 넓은 부분에 교반흐름이 미치며 교반강도가 작아서 저속교반용에 적합한 형태이다.^[3] Neo-hydrofoil형 임펠러는 날개 끝 와류의 발생을 최소화 하고, 유체의 고른 에너지전달을 극대화 하도록 교반기 설계업체에서 설계된 새로운 형태의 hydrofoil 형 임펠러이다.

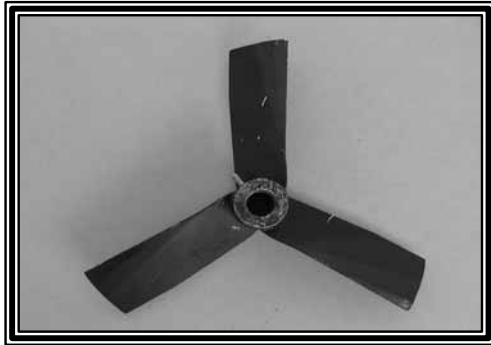
임펠러의 직경은 각각의 임펠러 모두 340mm이다. Fig. 2.2에 본 연구에 사용된 실제 산업용 교반기의 모델을 나타내었다. 교반조는 직경 980mm, 높이 1600mm의 크기이며, 임펠러는 중심이 교반조 바닥으로부터 340mm 간격을 두고 설치되었으며, 교반조 외벽에 방사형으로 설치된 배플(baffle)의 폭은 각각 82mm이다. 가시화를 위하여 원통형 수조를 투명 아크릴로 제작하여 지면으로부터 높이 980mm까지 상온수를 채웠다.



(a) Pitched blade turbine impeller



(b) Hydrofoil turbine impeller



(c) Neo-hydrofoil turbine impeller

Fi