

< 논문 >

고점성 액체 내부에서의 다중 노즐 버블링에 의한 유동특성에 대한 실험적 연구

김현동* · 류승규** · 김경천†

(2006년 11월 13일 접수, 2006년 11월 30일 심사완료)

An Experimental Study on the Flow Characteristics in Highly Viscous Liquid by Multi-Nozzle Bubbling

Hyundong Kim, Seung Gyu Ryu and Kyung Chun Kim

Key Words : Bubbling(버블링), Flow Characteristic(유동특성), Multi-Nozzle(다중노즐), Particle Image Velocimetry(입자영상 유속계), Highly Viscous Liquid(고점성 액체)

Abstract

A visualization study of flow characteristics in a mixer using multi-nozzle bubbling was performed. The mixer is filled with liquid glycerin (dynamic viscosity = 1000mPa · s at 25° C) and convective mixing is induced by air bubbles generated from 9 orifices installed on the bottom of the mixer. To visualize the flow field, PIV (Particle Image Velocimetry) system consisting of 532nm Nd:YAG laser, 2k x 2k CCD camera and synchronizer is adopted. The bubbles generated with uniform size and frequency form bubble stream, and bubble streams rise vertically without interaction between bubble streams. Mixing efficiency is affected by the height of bubbler and the effective height of bubbler is 20mm from the bottom of the mixer.

1. 서 론

혼합 공정에서의 버블링(bubbling)은 균일한 혼합을 촉진시키고 생산성을 향상시키기 위해 화학, 식품, 제약 등과 같은 실제 산업분야에서 많이 적용되고 있는 방법이다. 버블링은 교반기 내부의 재료들 사이에 물질 / 열전달을 원활하게 함으로써 화학반응을 진척시키고 제품의 균일성과 순도를 향상시킨다. 특히, 방사성 폐기물의 유리화 공정에 필수적인 유도 가열식 저온로(Cold Crucible Melter)에서는 일정하고 지속적인 버블링을 통한 고점성의 액화 유리와 연소된 방사성 폐기물의 균

일한 혼합이 그 안전성의 측면에서 매우 중요한 요소이다. 따라서, 버블링을 이용한 혼합의 효율을 증대시키기 위해서는 그 원리와 특성에 대한 이해와 실험적 검증이 필수적이다.

일반적으로 버블링을 이용한 혼합 과정에는 다양한 매개변수들이 관계하고 있으며, 교반기(mixer) 내부에서의 기포의 형성 및 거동 특성과 혼합특성은 매개 변수들의 상관 관계에 의해 결정되는 것으로 알려져 있다. 혼합 특성은 상승하는 기포와 주변 유체의 경계면에서의 상호 작용에 영향을 받으며, 그 경계면에서의 상호 작용은 기포의 크기와 형상, 상승 속도 등에 영향을 받는다. 그리고 기포의 형성 및 거동 특성은 주변 유체의 밀도와 점성계수, 기포를 발생시키기 위한 모세관의 직경, 모세관으로 유입되는 기체의 압력과 유량 등과 관계를 가지는 것으로 알려져 있으며, 이러한 관계를 규명하기 위한 다양한 연구들이 진행되어 왔다. Luewisutthichat⁽¹⁾는 이미지 처리기법을

† 책임저자, 회원, 부산대학교 기계공학부

E-mail : kckim@pusan.ac.kr

TEL : (051)510-3947 FAX : (051)515-7866

* 부산대학교 대학원 기계공학과

** LG 전자㈜

이용하여 증류수 속에서 질소 기포의 비선형적인 수동력학적 거동을 조사하였으며, Snabre⁽²⁾는 점성 유체 속에서 공기 기포의 크기와 상승 속도, 점성의 변화와 모세관의 직경의 변화에 의한 영향을 연구하였다. 또한, Tirto⁽³⁾는 물 속에서 증기의 유량과 온도의 변화가 증기 기포의 크기에 중대한 영향을 미치며 모세관의 직경이 기포의 크기를 결정하는 중요 변수임을 밝혔다. 한편, Choi⁽⁴⁾는 PIV 기법과 PTV(Particle Tracking Velocimetry) 기법을 응용하여 물속에서 상승하는 기포와 원형입자의 거동 특성과 이들이 주변 유동장에 미치는 영향을 비교하였으며, Mitsuhiro⁽⁵⁾는 실리콘 오일 속에서의 공기 기포의 3차원적 거동을 수치 해석적으로 재현하였다.

본 연구에서는 단일 기포의 거동에 대한 위의 연구 결과들에 기초하여, 실제 버블링 교반기 내부에서의 다중 버블링에 의한 유동 현상을 PIV 기법을 이용하여 정량적으로 가시화 하였다. 또한 버블러의 높이가 혼합에 미치는 영향을 알아 보고 버블러의 최적 높이를 결정하기 위해 PIV기법을 응용하였다.

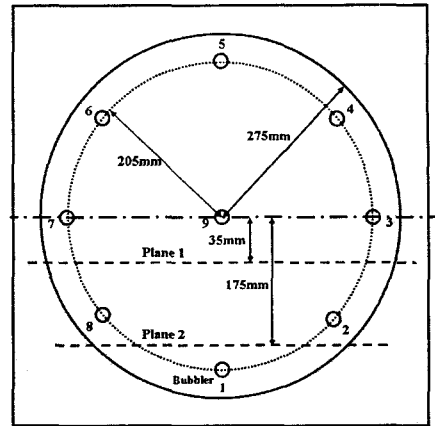
2. 실험장치 및 방법

2.1 다중 버블링 혼합 장치

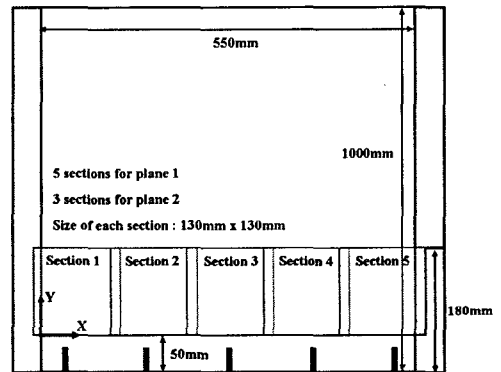
본 연구에 이용된 다중 버블링을 이용한 교반기는 방사성 폐기물의 유리화 공정에 사용되고 있는 유도 가열식 저온로의 아크릴 모사 장치로써, Fig. 1은 그 치수와 버블러의 위치를 나타내고 있다. 교반기는 지름 550mm, 높이 1000mm의 원통형으로 바닥에는 중심으로부터 205mm거리의 원주상에 동일한 간격으로 8개의 버블러와 중심에 1개의 버블러가 부착되어 있고, 버블러의 직경은 6mm, 높이는 20mm이다. 버블링에 이용된 기체는 공기로 공기 압축기로부터 공급되고 조정기(regulator)와 솔레노이드 밸브에 의해 압력과 유량이 제어된다. 교반기의 주변은 PIV측정 시 이미지의 왜곡을 최소화 하기 위해 아크릴 육면체로 둘러싸여 있고, 교반기 내부의 작동 유체와 동일한 유체로 채워져 있으며 유체의 높이는 교반기 내부 유체의 높이와 동일하게, 바닥으로부터 180mm이다.

2.2 PIV 기법을 이용한 속도장 측정

Fig. 2는 버블링을 이용한 교반기 내부의 혼합 현상을 가시적으로 측정하기 위한 PIV 시스템의



(a) Top view



(b) Side view

Fig. 1 Dimension of mixer using bubbling and position of measurement planes

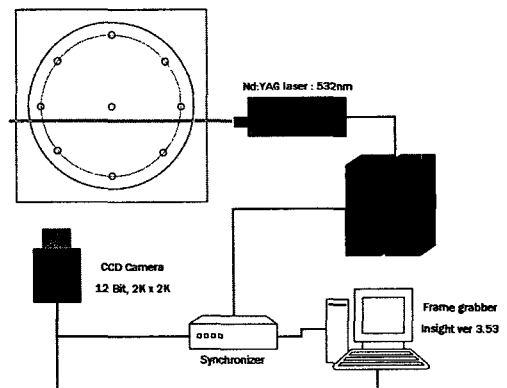


Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup for visualization using PIV technique

개략도를 나타내고 있다. PIV 시스템은 레이저 시스템(Mini YAG, New Wave) 과 2048 X 2048 고해상도 CCD 카메라(POWERVIEW Plus, TSI), 동기화장치(610032, TSI), 50mm 표준렌즈 (F# = 1.4, Nikon) 및 구동용 컴퓨터로 구성되어 있다. 측정을 위한 추종입자로는 10 μm 크기의 hollow glass ball (Glass-beads hollow, TSI)을 이용하였으며, CCD 광원으로부터의 레이저는 구형렌즈와 원통형렌즈를 거치면서 평면빔으로 만들어져 시험부로 조사된다.

레이저 평면빔의 수평위치는 Fig. 1(a)에서 보는 것과 같이 교반기의 중앙으로부터 35mm와 175mm 떨어진 두 개의 단면으로, 측정 단면은 버블링에 의해 형성되는 교반기 내부의 전체적인 유동장을 가장 넓은 범위에서 측정할 수 있는 단면들을 고려하여 결정하였다. 첫 번째 단면의 경우 길이는 545mm이고 두 번째 단면의 길이는 420mm이다. 각각의 측정 단면은 다시 넓이 130mm x 130mm 크기의 하위 영역(section)들로 나누어 측정하였는데, 첫 번째 단면에 대해서는 5개, 두 번째 측정 영역에 대해서는 3개의 영역으로 나누어 각각의 경우에 대해 500개의 순간속도장을 평균하였으며, 후처리 과정에서 다시 결합하여 나타내었다. 측정 단면의 수직위치는 버블링 장치의 바닥으로부터 약 50mm 떨어진 지점으로 측정에 있어서의 좌표축은 좌측 벽면의 바닥으로부터 50mm 떨어진 지점을 원점으로 하여 수직 좌표계를 설정하였다. [Fig. 1(b)]

실험에 이용된 작동 유체는 글리세린 ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$, Sejin Chemical, LTD) 원액으로 25°C에서 1000mPa·s의 점성계수 값을 가지며, 밀도는 1260kg/m³이다. 버블러를 통해 분출되는 공기의 유량은 0.1MPa에서 8 l/min였다.

속도벡터의 계산과 후처리는 프로그램(PIV-ACE v.1.0)를 이용하여 2화상 상호상관계법으로 구하였다. 최대 상호상관계수를 구하기 위한 탐색영역(interrogation window)의 크기는 48 x 48pixels이고 50%의 겹침이 허용 되었으며, 이 때 속도 벡터의 격자수는 모두 6724개이고 벡터간의 공간해상도는 각 실험에서의 영상확대비에 의존하는데 각 경우에 대해 약 1.6mm 이다.

2.3 버블러 높이 변화에 따른 유동장 측정

직관적으로 볼 때, 버블러는 교반기의 바닥에 위치하는 것이 혼합에 가장 유리하다. 그러나 본 연구에 이용된 교반기의 경우, 배수(drain) 과정 동안 교반기내의 혼합액이 버블러로 유입되는 것을 막기 위해 버블러는 바닥으로부터 일정한 높이를

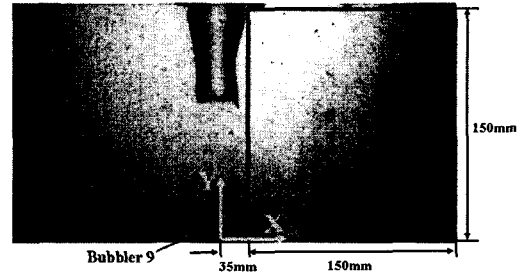


Fig. 3 Measurement section to estimate the convection flow rate

유지해야 하므로 버블러의 높이가 혼합에 미치는 영향을 조사해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 PIV기법을 이용하여 버블러 높이에 따른 기포류(bubble stream) 주변의 유동장을 측정하고 기포류에 의해 유도되어 순환하는 유체의 유량을 계산하여 혼합의 효과를 정량화 하였다.

측정에 이용된 PIV 시스템은 앞 절에 설명된 시스템과 동일하며, 동일한 작동 유체내부에서 9번 버블러만을 통해 공기를 주입하면서 버블러 주변의 유동장을 측정하였다. 이 때 공기유량은 8 l/min 과 16 l/min 이었으며, 버블러의 높이는 교반기의 바닥으로부터 0mm, 10mm, 20mm, 30mm, 40mm, 50mm, 70mm, 90mm로 변화시켜가면서 모두 16가지 경우에 대해 실험하였으며, 각각의 경우에 대해 200개의 순간속도장을 평균하였다. 측정 영역은 Fig. 3에서 보는 것처럼 9번 버블러의 높이가 0mm일 때, 즉 버블러가 바닥에 위치해 있을 때 9번 버블러의 중심을 원점으로 하여 X축상으로 35mm 떨어진 지점으로부터 150mm x 150mm 크기의 영역이다.

그리고 버블러의 높이에 따른 혼합 효과를 정량적으로 비교하기 위해 좌표축의 원점으로부터 X축 방향으로 50mm 떨어진 지점에서 Y방향으로 75개의 u성분을 추출하여 기포류에 의해 유입되는 유량을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기포거동 및 버블러의 최적 높이

고점성 유체 내부에서의 기포의 거동은 일반적인 경우와 달리 유체의 고점성으로 인해 일정 유량 범위 내에서 주기적인 특성을 보이지만, 다중 버블링의 경우 기포들간의 상호 작용은 내부 유동장에 지대한 영향을 미치므로 교반기 내에서의 기포 거동은 중요한 요소이다. Fig. 4는 고속카메라로

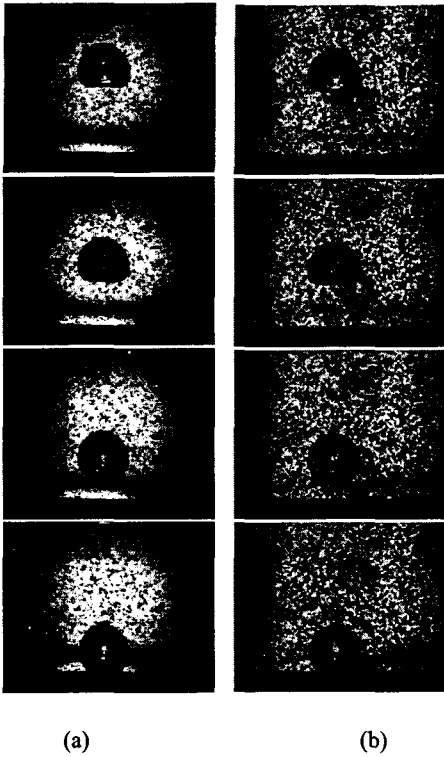


Fig. 4 Series of bubble rising in the glycerin. The flow rate of air gas was 8ℓ/min and time interval between images was 31.5ms (a) Images for single bubbler operation mode (b) Images for the 9 bubblers operation mode

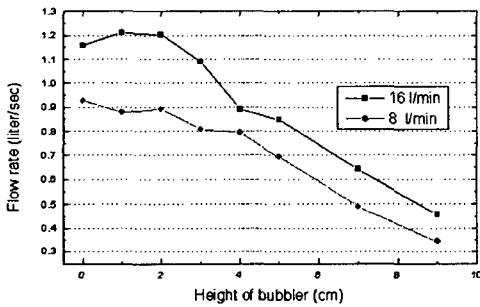


Fig. 5 Flow rate variation calculated based on the velocity profile according to bubbler height

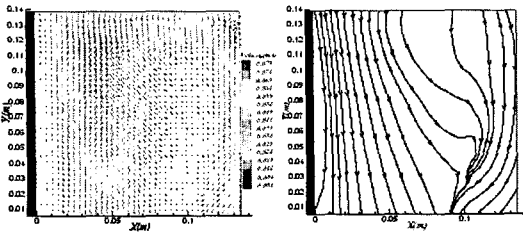
획득한 상승하는 기포의 이미지로 1번 버블러하나만을 작동시켰을 경우와 9개의 버블러를 동시에 작동시켰을 때의 1번 버블러에서 발생한 기포의 거동을 비교해 주고 있다. 결과에서 보는 것처럼 두 가지 경우에서 동일한 결과들을 나타내는 것을 볼 수 있는데 이는 작동 유체의 고점성으로 인해

인접한 버블러에서 발생하는 기포류들 상호간에 영향을 주지 않고 독립적으로 수직상승하고 있음을 말해주고 있다. 또한 주어진 유량 조건에서 버블러에서의 기포발생빈도가 매우 높아서 이것의 제어가 불가능하므로 단일 기포의 개별적인 영향에 대한 고려는 어려울 것으로 생각된다. 그리고 작동 유체의 고점성으로 인해 9개의 버블러가 동시에 작동되지 않을 경우 버블링에 의한 운동량이 전달되지 못하는 부분이 발생하여 혼합에 부정적인 영향을 줄 것으로 판단된다. 기포가 표면과 만나는 부분에서 기포의 주변으로 유속차이에 기인한 재순환 영역이 존재할 가능성이 있으며, 대칭적인 유동 구조가 형성될 수 있다.

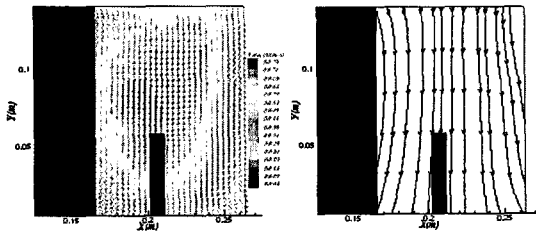
Fig. 5는 버블러의 높이를 변화시켜가면서 측정된 속도장을 바탕으로 각 경우에 대해 추출된 u성분을 적분하여 기포류 쪽으로 유입되는 유체의 유량을 계산한 결과를 나타낸 것으로 가스 분출유량이 16 ℓ/min인 경우가 8 ℓ/min인 경우보다 유입유량이 평균적으로 20% 정도 많으며, 버블러의 높이가 20mm 이상이 되면서부터 유입유량이 감소하는 것을 볼 수 있다. 버블링에 의해 기포류 쪽으로 유입되는 유량이 많을수록 더 활발한 혼합효과를 기대할 수 있으므로, 버블러는 바닥면에서부터 20mm 이내의 높이에 위치시키는 것이 적당하다고 판단된다.

3.2 첫 번째 단면 측정 결과

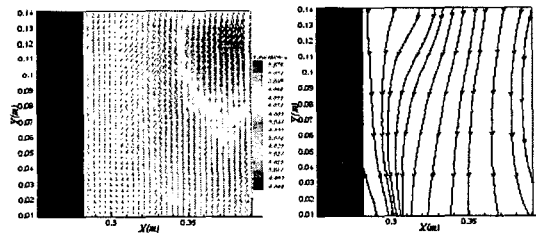
545mm 길이의 첫 번째 측정 단면은 Fig. 1(a)와 같이 5 개의 영역으로 나뉘어 측정 되었으며, 그 결과가 Fig. 6 에 나타나 있다. 영역 1의 측정 결과에서 왼쪽의 검은 부분은 교반기의 벽면을 나타내고 있으며, 전체적인 유동은 아래쪽으로 향하고 있는 것을 볼 수 있다. 그러나 X 좌표가 0.02~0.07m 의 범위에서는 비교적 빠른 속도로 아래쪽으로 내려가고 있는 반면 0.07~0.12m 인 범위에서는 속도가 느린 것을 볼 수 있는데 이는 측정 단면의 뒤쪽에 위치한 7 번 버블러에 의한 영향이라고 볼 수 있다. 다시 말해 첫 번째 단면상에서 X 좌표 0.08m 근처에 위치하고 있는 7 번 버블러에서 상승하는 기포에 의해 0.07~0.12m 인 범위에서는 유체가 기포 안쪽으로 흘러 들어가면서 상승하므로 Fig. 6(a)와 같은 유동장을 형성하였으며, 아래쪽으로 향하는 유속이 빠른 부분은 상승하는 기포의 영향을 벗어난 부분으로 기포를 따라 상승했던 유체가 압력구배의 영향으로 교반기의 아래쪽으로 내려가고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 높은



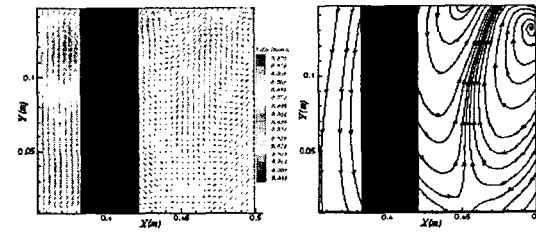
(a) Section 1



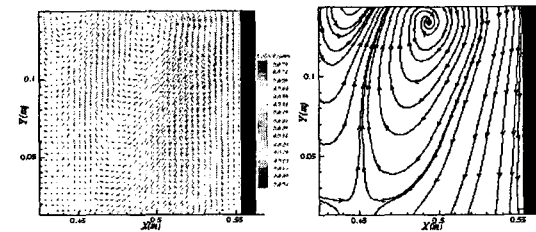
(b) Section 2



(c) Section 3



(d) Section 4



(e) Section 5

Fig. 6 Flow fields in the measurement plane 1

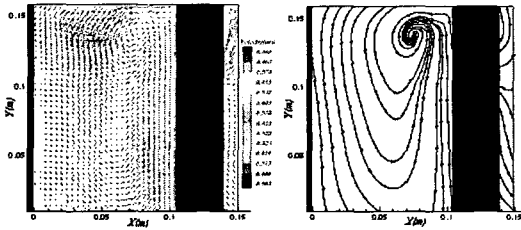
유체의 점성으로 인해 벽면에서는 버블링에 의한 운동량이 충분히 전달되지 못해 유속이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

두 번째 영역의 측정 결과에서 두 개의 검게 칠한 부분은 8번 버블러에서 올라오는 기포에 의해 가려지는 부분이고 X좌표 0.2-0.21m 범위에 위치한 부분은 8번 버블러와 1번 버블러 사이에 있는 thermocouple 때문에 가려지는 부분이다. 전체적인 유동장은 영역 1과 마찬가지로 아래쪽으로 향하고 있지만 유속이 최대 0.07m/s까지 증가한 것을 볼 수 있는데, 이는 8번과 9번 버블러에서 올라오는 기포를 따라 상승한 유체가 반경방향으로 퍼져 나감과 동시에 하강하면서 이 지점에서 만나 수직 아래 방향으로 속도가 증가하여 내려가는 것으로 판단된다. 영역4의 측정 결과에서는 X좌표 0.41m의 상단의 좌·우측으로 두 개의 와류구조가 발생하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 3번 버블러에 의한 영향으로 기포를 따라 상승하는 유동과 표면으로부터 하강하는 유동의 유속과 방향의 차이에 의해 발생하는 것으로 보이며, 기포의 주위를 따라 원형으로 분포하고 있을 것으로 생각된다. 이와 같은 부분은 재순환 영역으로 교반기 내부 유체의 균일한 혼합에 부정적인 영향을 줄 것으로 판단되며 각 버블러에서 상승하는 기포주위에 동일하게 분포한다. 영역 5의 측정 결과에서도 3번 버블러에 의한 영향이 잘 나타나며, X좌표 0.45m 부근에서 상승하는 기포류 쪽으로 유체가 유입되는 것을 확인 할 수 있다.

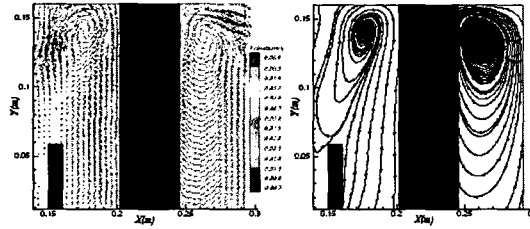
3.3 두 번째 단면 측정 결과

두 번째 단면의 측정은 앞선 첫 번째 단면의 측정과 동일한 방법을 통해 이루어졌으며, 측정 단면은 중심선으로부터 175mm 떨어진 지점으로 전체 측정 단면의 길이는 420mm이다. 측정 단면의 길이가 첫 번째 단면보다 짧으므로 모두 3개의 영역으로 나누어 측정한 뒤 다시 합치는 과정을 거쳤으며, 그 결과가 Fig. 7에 나타나있다.

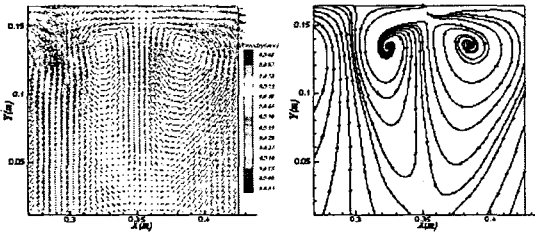
두 번째 측정 단면은 8번과 2번, 1번 버블러들로부터의 수직거리가 25mm이므로 각각의 영역에서 기포류에 의한 유동의 대류 구조와 그 상호 작용을 더욱 명확하게 나타내고 있다. 영역 1에서 검게 표현된 부분은 레이저 평면광의 기포에서의 과도한 광산란으로 인한 CCD 카메라의 손상을 막기 위해 인위적으로 가린 부분으로 이 영역에서의 유동장은 왼쪽에 나타난 와류 구조와 대칭을 이루고 있을 것으로 생각된다. 영역 2와 3에서도 마찬가지로 1번과 2번 버블러를 중심으로 대칭적 와류



(a) Section 1

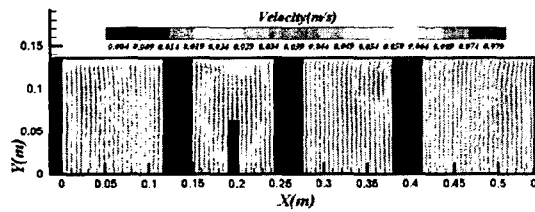


(b) Section 2

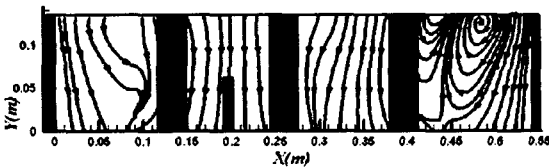


(c) Section 3

Fig. 7 Flow fields for measurement plane 2

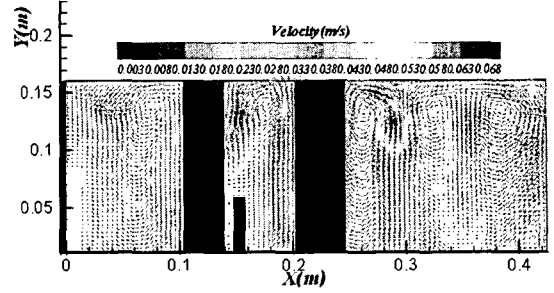


(a) Velocity vector field

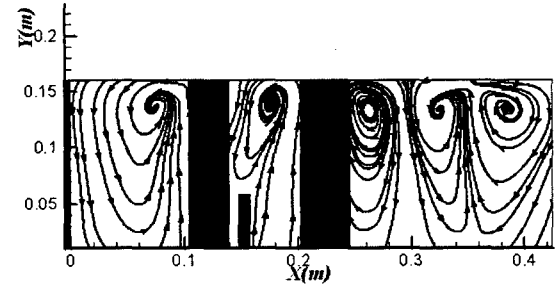


(b) Streamline pattern

Fig. 8 Combined flow field for the measurement plane 1



(a) Velocity vector field



(b) Streamline pattern

Fig. 9 Combined flow field for the measurement plane 2

구조를 뚜렷하게 확인 할 수 있다. Fig. 7(b)에서, 유속이 다른 영역들 보다 상대적으로 빠르게 나타나는 이유는 공기 유량 조절의 오차와 함께 측정 단면의 위치가 1번 버블러에 좀 더 가깝게 정렬되었기 때문인 것으로 생각된다. 다시 말해서, 기포류에 의해 형성되는 유동장은 기포류를 중심으로 방사형으로 퍼져 나가는데 측정 단면의 위치가 기포류에 가까울수록 2차원 속도 성분이 더 크게 나타나게 되는 것이다.

Fig. 8과 Fig. 9는 두 측정 단면의 전체적인 유동 형태를 살펴보기 위해 위의 결과들을 결합하여 나타낸 그림이다. 첫 번째 단면의 경우, 3번과 7번 9번 버블러와 8번과 2번 버블러로부터 발생한 기포류를 따라 표면으로 상승했던 유체들이 다시 하강하는 부분이므로 전체적인 유동의 방향이 아래쪽을 향하고 있다. 0.27m 지점의 좌우에서 8번과 9번, 2번과 9번 버블러에 의해 발생하는 유체 유동이 상호 영향을 받아 비교적 빠른 유속을 나타내는 부분은 형성되는 것을 볼 수 있다. 두 번째 단면은 기포류에 의한 2번과 8번 버블러에서의 미세한 유량차이로 인해 정량적인 유속에는 약간의 차이가 있으나, X좌표 0.21m를 중심으로 좌우 대칭적인 유동 구조를 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 이

러한 교반기 내부의 대칭적이고 정형적인 유동 형태는 내부 유체의 높은 점성으로 인해 내부에 유동을 발생시키는 기포가 동일한 크기와 형태로 발생하여 상승하기 때문인 것으로 생각된다.

4. 결론

다중 노즐로부터 발생하는 기포류를 이용하여 높은 점성계수 값을 가지는 유체를 혼합하는 교반기 내부의 유동장을 PIV 기법을 이용하여 정량적으로 가시화하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 작동 유체의 높은 점성으로 인해 버블러를 통해 발생하는 기포는 동일한 형태와 빈도를 가지며 각각의 버블러에서 발생하는 기포류들은 상호 작용 없이 독립적으로 상승한다.

(2) 기포류에 의해 대류하는 유체의 유량을 계산한 결과 버블러를 통해 분출되는 공기 유량이 증가할수록 그리고 버블러의 높이가 낮을수록 대류의 효과가 컸으며, 버블러의 유효높이는 주어진 조건에서 바닥으로부터 20mm 이내이다.

(3) 교반기 내부 유동장을 측정된 결과, 각각의 기포류에 의해 대류구조가 나타나며, 기포들이 표면과 만나는 지점 근처에서 기포 주위로 와류 구조들이 존재한다.

(4) 교반기의 벽면과 바닥이 만나는 부분은 버블링에 의한 대류의 효과가 미치지 못하는 비활성 영역인 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 부산대학 자유과제 학술 연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- (1) Luewisutthichat, W., Tsutsumi, A. and Yoshida, K., 1997, "Chaotic Hydrodynamics of Continuous Single-Bubble Flow Systems," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 52, pp. 3685~3691.
- (2) Snabre, P. and Magnifotcham, F., 1998, "Formation and Rise of a Bubble Stream in a Viscous Liquid," *Eur. Phys. J. B*, Vol. 4, pp. 369~377.
- (3) Tirto, P., Koichi, T. and Hideki, T., 2001, "Effect of Operating Conditions on Two-Phase Bubble Formation Behavior at Single Nozzle Submerged in Water," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 34, No. 2, pp. 114~120.
- (4) Choi, H. M., Kurihara, T., Monji, H. and Matsui, G., 2002, "Measurement of Particle/Bubble Motion and Turbulence around It by Hybrid PIV," *Flow Meas. Inst.*, Vol. 12, pp. 421~428.
- (5) Mitsuhiro, O., Satoshi, H., Yutaka, Y. and Mark, S., 2004, "Three-Dimensional Numerical Simulations of the Motion of a Gas Bubble Rising in Viscous Liquids," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 37, No. 8, pp. 968~975.
- (6) Vries, J. D., Luther, S. and Lohse, D., 2002, "Induced Bubble Shape Oscillations and Their Impact on the Rise Velocity," *Eur. Phys. J. B*, Vol. 29, pp. 503~509.
- (7) Koichi, T., Yousuke, I., Mizue, K. and Mizuho, N., 2004, "Simultaneous Measurement of 3-Dimensional Shape and Behavior of Single Bubble in Liquid Using Laser Sensors," *J. Chem. Eng. Japan*, Vol. 37, No. 8, pp. 921~926.
- (8) Hassan, Y. A., Blanchat, T. K., Seeley Jr, C. H. and Canaan, R. E., 1992, "Simultaneous Velocity Measurements of Both Components of a Two-Phase Flow Using Particle Image Velocimetry," *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 18, No. 3, pp. 371~395.