고점성 유체 내부에서의 다상유동장 가시화 및 PIV 측정

김현동* · 류승규** · 김경천†

Flow Visualization and PIV Measurement of Multiphase Flow in Highly Viscous Liquid

Hyundong Kim, Seung Gyu Ryu and Kyung Chun Kim

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.

Key Words : Bubbling(버블링), Mixing Characteristic(혼합특성), Multi-Nozzle(다중노즐), Particle Image Velocimetry(입자영상 유속계), Highly Viscous Liquid(고점성액체)

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 / 열 전달을 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 균일한 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 매개 변수들이 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 처리 기법을 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

† 부산대학교 기계공학부
E-mail : kckim@pusan.ac.kr
* 부산대학교 일반대학원 기계공학과
** LG 전자 ㈜

Velocimetry) 기법을 응용하여 물속에서 상승하는 기포와 원형입자의 거동 특성과 이들이 주변 유동장에 미치는 영향을 비교하였으며, Mitsuhiro[5] 는 실리콘 오일 속에서의 공기 기포의 3 차원적 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 PIV 기법을 응용하였다.

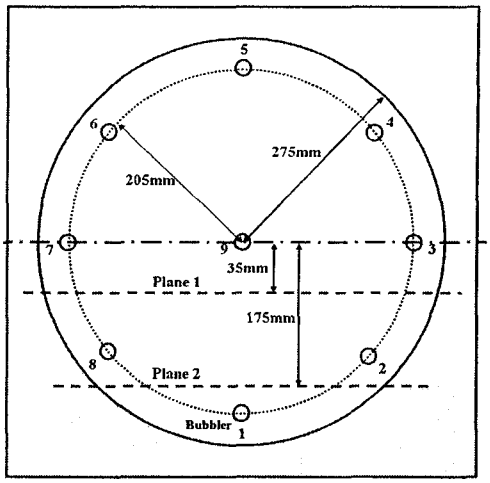
2. 실험 장치 및 방법

2.1 다중 버블링 혼합장치

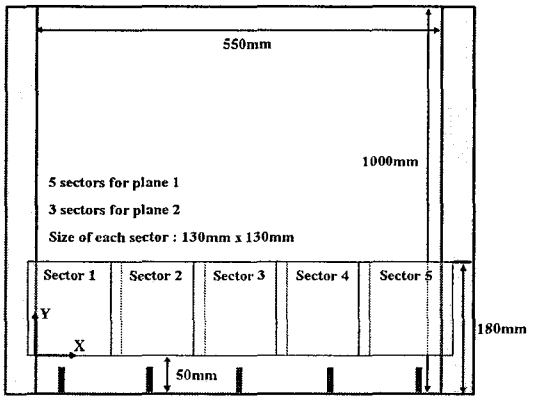
본 연구에 이용된 다중 버블링을 이용한 교반기는 방사성 폐기물의 유리화 공정에 사용되고 있는 유도 가열식 저온로의 아크릴 모사 장치로써, Fig. 1 은 그 치수와 버블러의 위치를 나타내고 있다. 교반기는 지름 550mm, 높이 1000mm 의 원통형으로 바닥에는 중심으로부터 205mm 거리의 원주상에 동일한 간격으로 8 개의 버블러와 중심에 1 개의 버블러가 부착되어 있고, 버블러의 직경은 6mm, 높이는 20mm 이다. 버블링에 이용된 기체는 공기로 공기 압축기로부터 공급되고 조정기 (regulator) 와 솔레노이드 밸브에 의해 압력과 유량이 제어된다. 교반기의 주변은 PIV 측정 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 180mm 이다.

2.2 PIV 기법을 이용한 속도장 측정

Fig. 2 는 버블링을 이용한 교반기 내부의 혼합 현상을 가시적으로 측정하기 위한 PIV 시스템의 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 10μ m 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 중앙으로



(a) Top view



(b) Side view

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

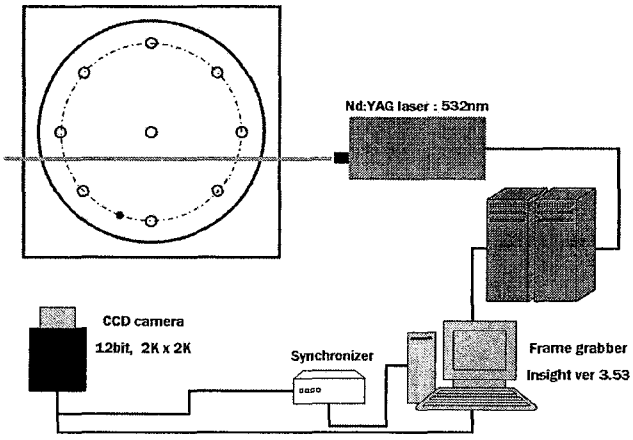


Fig. 2 Schematic of experimental setup for visualization using PIV technique

부터 35mm 와 175mm 떨어진 두 개의 단면으로, 측정 단면은 총 9 개의 버블러로부터 발생하는 기

포류 (bubble stream) 에 의해 레이저 평면빔의 진로가 방해 받지 않고 가장 넓은 영역에 걸쳐 측정할 수 있는 지점을 고려하여 결정 하였다. 첫 번째 단면의 경우 길이는 545mm 이고 두 번째 단면의 길이는 420mm 이다. 각각의 측정 단면은 다시 넓이 130mm x 130mm 크기의 하위 영역 (sector) 들로 나누어 측정하였는데, 첫 번째 단면에 대해서는 5 개, 두 번째 측정 영역에 대해서는 3 개의 하위 영역으로 나누어 측정한 뒤 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 ($C_3H_8O_3$, Sejin Chemical. LTD) 원액으로 25℃에서 1000mPa• s 의 점성계수 값을 가지며, 밀도는 1260kg/m^3 이다. 버블러를 통해 분출되는 공기의 유량은 0.1MPa 에서 8ℓ /min 였다.

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

2. 3 버블러 높이변화에 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 유지해야 하므로 버블러의 높이가 혼합에 미치는 영향을 조사해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 PIV 기법을 이용하여 버블러 높이에 따른 기포류 주변의 유동장을 측정하고 기포류에 의해 유도되어 순환하는 유체의 유량을 계산하여 혼합의 효과를 정량화 하였다.

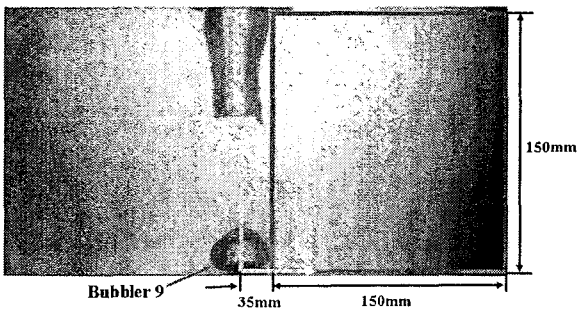


Fig. 3 Measurement section to estimate the convection flow rate

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

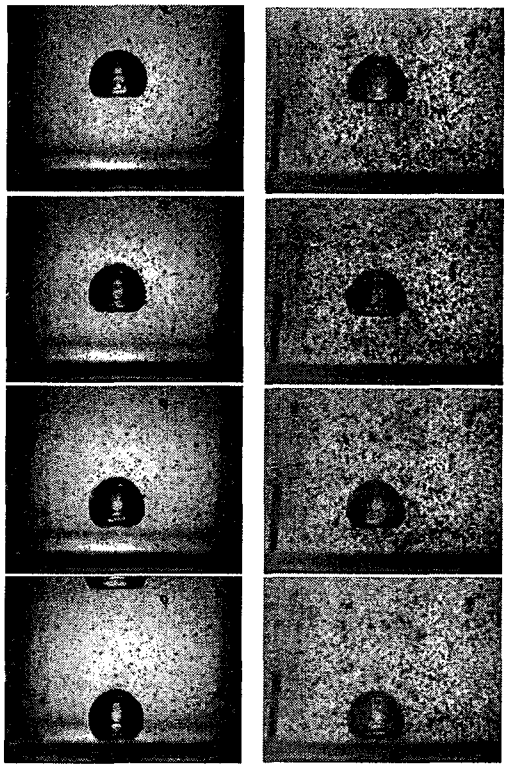
그리고 버블러의 높이에 따른 혼합 효과를 정량적으로 비교하기 위해 좌표축의 원점으로부터 X 축 방향으로 50mm 떨어진 지점에서 Y 방향으로 75 개의 u 성분을 추출하여 기포류에 의해 유입되는 유량을 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 기포거동 및 버블러의 최적높이

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. 4 는 고속카메라로 획득한 상승하는 기포의 이미지로 1 번 버블러 하나 만을 작동 시켰을 경우와 9 개의 버블러를 동시에 작동 시켰을 때의 1 번 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 기포류 상호간에 영향을 주지 않고 독립적으로 일정한 형태를 유지하면서 상승하고 있음을 말해주고 있다. 또한 버블러의 출구에서 단일 버블로 분리되는 빈도가 일정하므로 이러한 경우 기포의 주변으로 유속차이에 기인한 비활성 영역 (inactive region) 이 존재할 가능성이 있으며, 대칭적인 유동 구조가 형성될 수 있다. Fig. 5 는 버블러의 높이를 변화시켜가면서 측정한 속도장을 바탕으로 각 경우에 대해 추출된 u 성분을 적분하여

기포류 쪽으로 유입되는 유체의 유량을 계산한 결과를 나타낸 것으로 가스 분출유량이 16ℓ /min 인 경우가 8ℓ /min 인 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.



(a) (b)

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

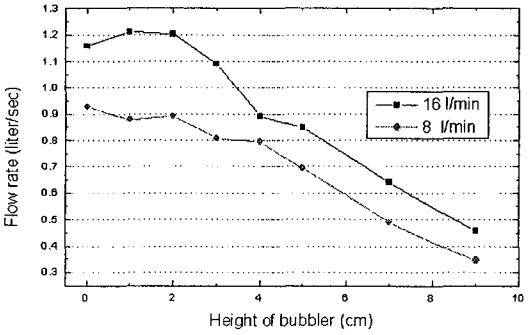
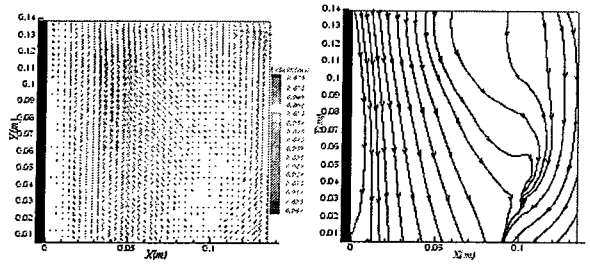


Fig. 5 Flow rate variation calculated based on the velocity profile along bubbler height.

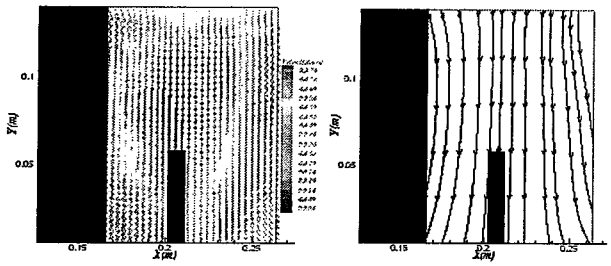
3.2 첫 번째 단면 측정 결과

545mm 길이의 첫 번째 측정 단면은 Fig. 1(a)와 같이 5 개의 섹터로 나뉘어 측정 되었으며, 그 결과가 Fig. 6 에 나타나 있다. 섹터 1 의 측정 결과에서 왼쪽의 검은 부분은 교반기의 벽면을 나타내고 있으며, 전체 적인 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 유체의 점성으로 인해 벽면에서는 버블링에 의한 운동량이 충분히 전달되지 못해 유속이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

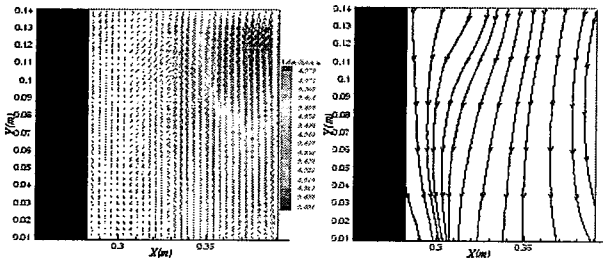
두 번째 섹터의 측정 결과를 보면 두 개의 검게 칠한 부분은 8 번 버블러에서 올라오는 기포에 의해 가려지는 부분이고 X 좌표 0.2~0.21m 범위에 위치한 부분은 8 번 버블러와 1 번 버블러 사이에 있는 thermocouple 때문에 가려지는 부분이다. 전 체적인 유동장은 섹터 1 과 마찬가지로 아래쪽으로 향하고 있지만 유속이 최대 0.07m/s 까지 증가 한 것을 볼 수 있는데, 이는 8 번과 9 번 버블러에서 올라오는 기포를 따라 상승한 유체가 반경방향으로 퍼져 나감과 동시에 하강하면서 이 지점에서 만나 수직 아래 방향으로 속도가 증가하여 내려가는 것으로 판단된다. 섹터 4 의 측정 결과에서는 X 좌표 0.41m 의 상단의 좌• 우측으로 두 개의 와류구조가 발생하고 있는 것을 볼 수 있는데 이는 3 번 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 영역은 교반기 내부 유체의 균일한 혼합에 부정적인 영향을 주는 비활성영역으로 작용하며 각 버블러에서 상승하는 기포주위에 동일하게 분포한다. 섹터 5 의 측정 결과에서도 3 번 버블러에 의한 영향이 잘 나타나며, X 좌표 0.45m 부근에서 상승하는 기포류 쪽으로



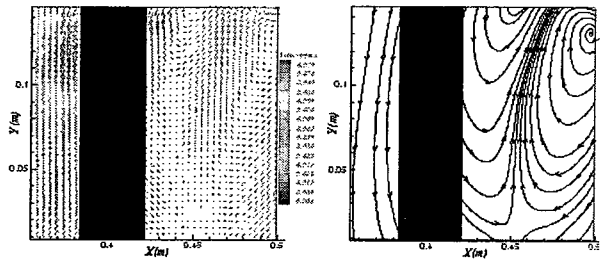
(a) sector 1



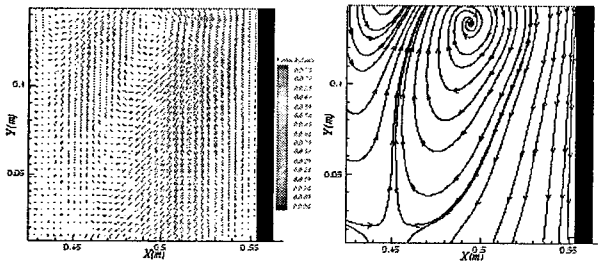
(b) sector 2



(c) sector 3



(d) sector 4



(e) sector 5

Fig. 6 Flow fields for measurement plane 1

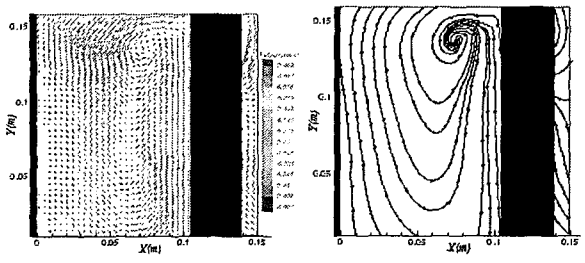
유체가 유입되는 것을 확인 할 수 있다.

3.3 두 번째 단면 측정 결과

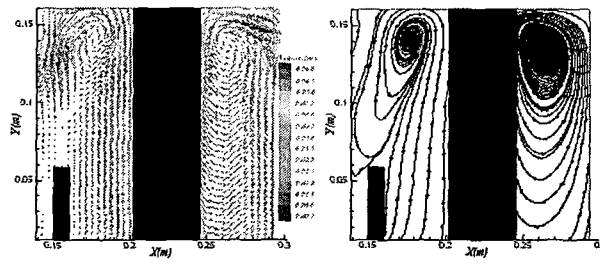
두 번째 단면의 측정은 앞선 첫 번째 단면의 측정과 동일한 방법을 통해 이루어졌으며, 측정 단면은 중심선으로부터 175mm 떨어진 지점으로 전체 측정 단면의 길이는 420mm 이다. 측정 단면의 길이가 첫 번째 단면보다 짧으므로 모두 3 개의 섹터로 나누어 측정한 뒤 다시 합치는 과정을 거쳤으며, 그 결과가 Fig. 7 에 나타나 있다.

두 번째 측정 단면은 8 번과 2 번, 1 번 버블러들로부터의 수직거리가 25mm 이므로 각각의 섹터에서 기포류에 의한 유동의 대류 구조와 그 상호 작용을 더욱 명확하게 나타내고 있다. 섹터 1 에서 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. 섹터 2 와 3 에서도 마찬가지로 1 번과 2 번 버블러를 중심으로 대칭적 와류 구조를 뚜렷하게 확인 할 수 있다. Fig. 7(b) 에서, 유속이 다른 섹터들 보다 상대적으로 빠르게 나타나는 이유는 공기 유량 조절의 오차와 함께 측정 단면의 위치가 1 번 버블러에 좀 더 가깝게 정렬되었기 때문인 것으로 생각된다. 다시 말해서, 기포류에 의해 형성되는 유동장은 기포류를 중심으로 방사형으로 퍼져 나가는데 측정 단면의 위치가 기포류에 가까울수록 2 차원 속도 성분이 더 크게 나타나게 되는 것이다.

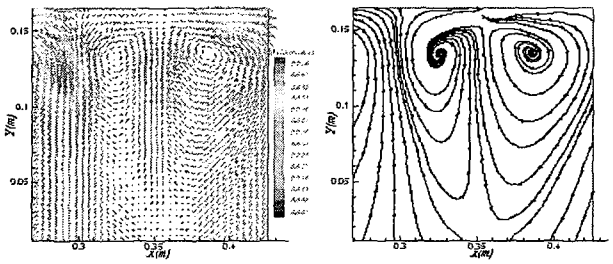
Fig. 8 과 Fig. 9 는 두 측정 단면의 전체적인 유동 형태를 살펴보기 위해 위의 결과들을 결합하여 나타낸 그림이다. 첫 번째 단면의 경우, 3 번과 7 번 9 번 버블러와 8 번과 2 번 버블러로부터 발생한 기포류를 따라 표면으로 상승했던 유체들이 다시 하강하는 부분이므로 전체적인 유동의 방향이 아래쪽을 향하고 있다. 0.27m 지점의 좌우에서 8 번과 9 번, 2 번과 9 번 버블러에 의해 발생하는 유체 유동이 상호 영향을 받아 비교적 빠른 유속을 나타내는 부분은 형성되는 것을 볼 수 있다. 두 번째 단면은 기포류에 의한 2 번과 8 번 버블러에서의 미세한 유량차이로 인해 정량적인 유속에는 약간의 차이가 있으나, X 좌표 0.21m 를 중심으로 좌우 대칭적인 유동 구조를 이루고 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 교반기 내부의 대칭적이고 정형적인 유동 형태는 내부 유체의 높은 점성으로 인해 내부에 유동을 발생시키는 기포가 동일한 크기와 형태로 발생하여 상승하기 때문이다.



(a) sector 1

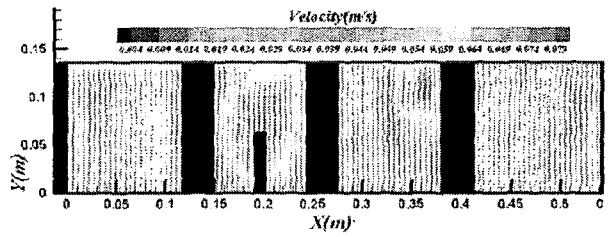


(b) sector 2

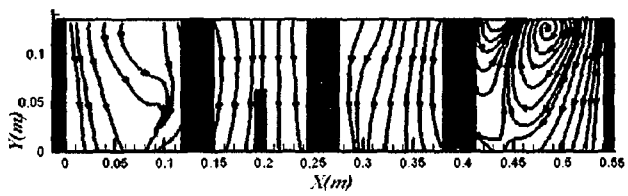


(c) sector 3

Fig. 7 Flow fields for measurement plane 2

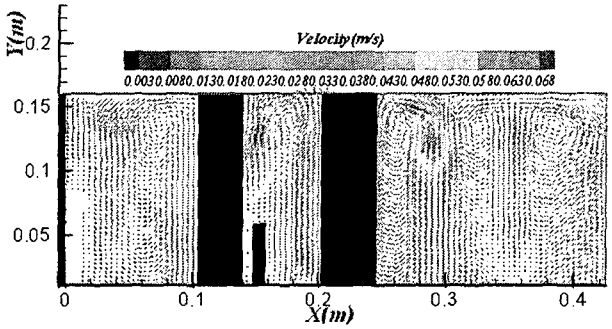


(a) velocity vector field

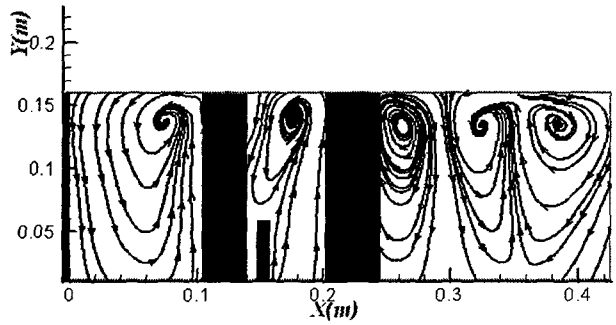


(b) streamline pattern

Fig. 8 Combined flow field for measurement plane 1



(a) velocity vector field



(b) streamline pattern

Fig. 9 Combined flow field for measurement plane 2

4. 결 론

다중 노즐로부터 발생하는 기포류를 이용하여 높은 점성 계수값을 가지는 유체를 혼합하는 교반기 내부의 유동장을 PIV 기법을 이용하여 정량적으로 가시화 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

작동 유체의 높은 점성으로 인해 버블러를 통해 발생하는 기포는 동일한 형태와 빈도를 가지며 각각의 버블러에서 발생하는 기포류들은 상호 작용 없이 독립적으로 상승한다. 기포류에 의해 대류하는 유체의 유량을 계산한 결과 버블러를 통해 분출되는 공기 유량이 증가 할수록 그리고 버블러의 높이가 낮을수록 대류의 효과가 컸으며, 버블러의 유효높이는 주어진 조건에서 바닥으로부터 20mm 이내이다.

또한 교반기 내부 유동장 측정결과 각각의 기포류에 의해 대류구조가 나타나며, 기포들이 표면과 만나는 지점 근처에서 기포 주위로 와류 구조들이 존재한다. 그리고 교반기의 벽면과 바닥이 만나는 부분은 버블링에 의한 대류의 효과가 미치지 못하는 비활성 영역인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

(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.