

論 文

입자영상유속계에 의한 기포뿔의 Plume 거동특성에 관한 연구

조대환* · 오병주* · 이영호**

A Study on Plume Movement Characteristics of Bubble Boom by PIV

Dae-Hwan Cho · Beong-Ju Oh* · Young-Ho Lee***

〈목 차〉

Abstract

1. 머리말
2. 실험방법

3. 실험결과 및 고찰

4. 맺음말
- 참고문헌

Abstract

Bubble boom may be a good alternative for the prevention of oil spill pollution due to its easy deployment and clean post-process tasks. The present work is focused on the experimental investigation of air bubble movement for the bubble boom by visualization and quantitative PIV measurements. Bubble plume was generated by adjusting the pressure of pressure vessel ranging 6.7 kpa to 14.7 kpa. The results showed at lower inlet velocity and higher supply air flow rate that bubble boom maintained its containing capability reasonably well up to the maximum containing limit.

* 목포해양대학교 기관공학부

** 한국해양대학교 기계공학과

1. 머리말

해양오염은 해양생태계의 파괴로 인한 일시적인 피해뿐만 아니라 기름이 갖는 독성 때문에 회복기간이 매우 길어 관련산업에 미치는 영향이 매우 크다. 따라서 이러한 사고를 방지하기 위해서는 국제협약과 관련된 국내법규에 의해 선박의 건조에서부터 오염을 방지할 수 있는 구조로 조선되어야 하며 선박운용에 따른 각종 교육과 항만국 통제가 강화하는 등의 체계적인 대책¹⁾이 수립되어 수행되어야 한다. 또한 우발적인 기름 유출사고 발생 때에는 그 피해를 최소화하기 위해서 유출된 기름의 회수가 신속하게 이루어져야 한다. 기름은 바람, 파도, 조류 및 조수의 작용에 의해 유출장소로부터 매우 빠른 속도로 확산하기 때문에 회수가 어렵기 때문에 기름유출 또는 확산을 방지하기 방법으로는 오일펜스를 이용하는 것이 가장 효과적이다. 그러나 오일펜스를 이용할 경우에도 1노트 이상의 조류가 있는 해역, 또는 파도가 심한 곳에서는 기름을 차단하지 못하는 단점이 있다. 따라서 오일펜스에 의해 모아진 기름을 보트로 예인 할 경우, 또는 주변환경에 의해 봄에 대한 조류의 상대속도가 1노트 이상일 경우에는 기름이 봄의 상하부로 누출되어 오염방제효과가 급격하게 감소²⁾ 되게 된다.

오일 봄의 이러한 단점을 보완하기 위한 대책으로서 경사각도를 일정하게 유지시켜 하부로부터 기름의 유실되는 것을 막는 방법이 제안되고 있다. 이러한 방식은 고정된 봄이 유속에 의해 높은 항력을 받아 흐름방향으로 밀려나가거나 기름이 커튼 밑으로 빠져나갈 것에 대비하여 조류 속도에 따라 각의 경사각도를 줌으로서 실제 차폐 막이 수직방향과 유사하게 유지될 수 있도록 하는 방법³⁾이다. 또 다른 방법으로는 상승하는 기포 벽을 이용하는 기포봄(bubble boom)⁴⁾이 있다. 기포는 조류에 대한 저항흐름을 형성하고 0.7 노트까지의 조류속도에 대하여 유효하므로 주로 하천 유역에서 해수의 유입을 방지하기 위해 제안된 것으로 조류의 속도가 낮거나, 선박통행에 지장을 초래하므로 부유식의 봄의 설치가 곳에 어

려운 항내에 영구적으로 설치될 수도 있다. 이러한 기포봄에 대하여 최근에 행해진 연구결과를 보면 다음과 같다. Hassan 등⁵⁾은 실험실내의 모형탱크에서 파도발생기에 의한 파도가 기포발생을 동반하는 오일펜스를 통과하면서 파도길이, 파도높이, 주파수 및 기포경 등이 변화하는 특성을 가시화실험을 통하여 밝히고 있다. 그 결과 기포 커튼의 영향으로 파고가 크게 감소함을 보고하였다. 다음으로 Murai 등⁶⁾은 유사한 실험 및 수치 해석을 행하여 기포에 의한 오일펜스통과 파도의 진정효과를 나타내고 있다. 이들은 공통적으로 기존의 오일펜스의 수직하부에서 기포를 발생시키고 이로부터 부력에 의해 상승한 기포가 오일펜스의 전현부(2차원 원통형 실린더를 가정)를 에워싸면서 좌우로 갈라질 때에 파도발생기로부터 접근하는 파도에 대한 영향을 조사하고 있다. Lee 등⁷⁾은 기포봄에 대하여 표면류의 영향에 대하여 가시화실험 및 PIV를 이용한 정량적인 속도계측을 행하였다. 발생기포유량은 일정하게 유지하였으며 표면류를 유속을 조절하기 위하여 프로펠러의 회전수를 각각 105, 125, 175 그리고 200rpm의 4단계로 실험하고 표면류와 기포벽(Plume)사이의 관계를 PIV계측결과로 제시하였다.

이 연구에서는 유입되는 기포 량과 조류의 영향에 따른 기포 벽의 거동을 고찰하고자 하였다. 즉, 조류 및 기포발생기의 노즐에 공급되는 공급 공기의 압력변화에 따라 방출된 기포가 상승하여 나타나는 거시적인 유동구조를 계측대상으로 하였다. 연구방법으로는 유동가시화⁸⁻¹²⁾ 및 PIV를 이용한 정량적인 속도계측기법을 이용하였으며 그 결과 상류에서 유입되는 속도가 일정할 경우 누유역지력을 유지하기 위한 최적의 공기의 유량이 설정 될 수 있으며, 조류에 따른 기포벽의 거동은 지수함수적으로 하류로 이동함을 알 수 있었다.

2. 실험방법

그림 1은 전체적인 실험장치의 개요를 보여주고 있다. 유동가시화는 그림1(c)에 보이는 회류수조

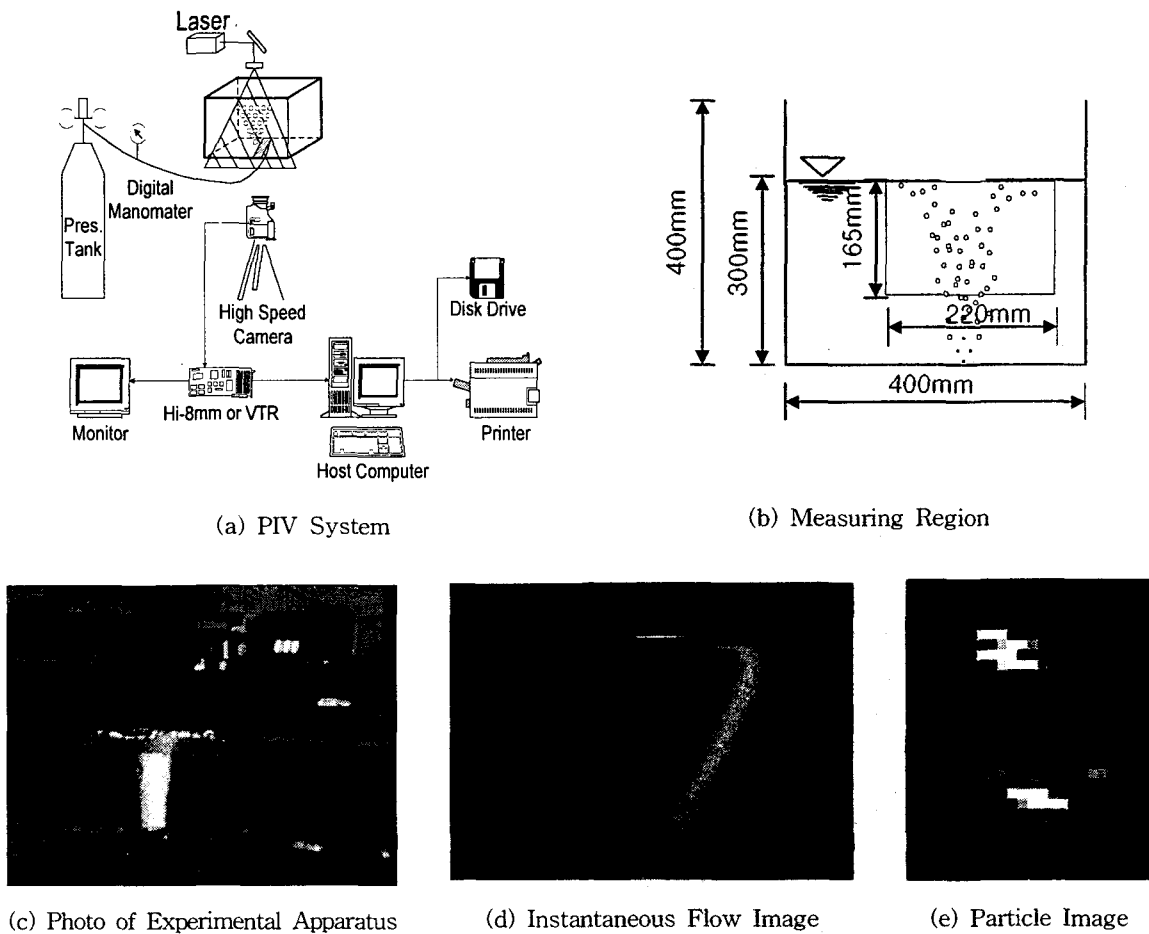


Fig. 1 Schematic Arrangement of Experiments and Flow Image

를 이용하였다. 수조의 높이는 400 mm이고, 기포 발생기로부터 수면까지의 높이는 300 mm이다. 계측영역은 그림(b)에서와 같이 165×220mm이다. 최대출력 300mW의 공냉식 아르곤이온 연속 광 레이저를 유동장의 조명용으로 사용하였다. 그림(d)는 일정한 흐름이 있는 경우에 기포 벽의 거동을 가시화한 순간의 영상이며, 그림(e)는 가시화 입자를 50배 확대한 것으로 기포가 차지하는 픽셀수는 10~20개 전후였다. 차후에 이와 같은 방법으로 기포경을 정량적으로 계측할 수 있는 기법의 확립에 관한 연구가 필요하다.

공급공기의 압력을 균일하게 공급하기 위하여 100Kg/Cm²의 용량을 갖는 공기압력탱크에 압력 조절기를 설치하여 균일한 압력의 공기가 연속적으로 공급되도록 하였다. 공기의 압력은 디지털 마노미터에 의해 측정하였으며 공기압력은 6.7 kpa, 10.7 kpa 및 110 kpa이다.

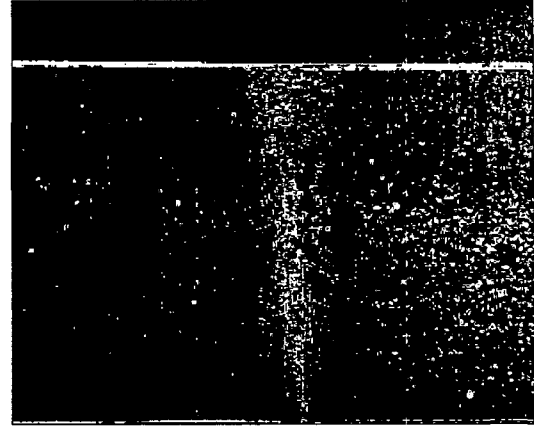
또한 조류 등의 영향을 고찰하기 위해 536×368mm의 영역을 대상으로 기포 벽의 거동에 따른 역방향 속도를 계측하였다. 계측부의 평균유입 유속은 0.1m/sec, 0.125m/sec, 그리고 0.15m/sec이다. 가시화실험의 추적입자는 비중 1.02전후인

PVC 입자(평균직경 $110\mu\text{m}$)를 사용하였으며, 기포 발생기는 직경 30mm, 길이 50mm의 소형기포발생기를 병렬로 2개를 연결한 것이며 압력탱크로부터 일정압력의 공기를 공급하여 기포를 발생되도록 하였다. PIV를 위한 계측단면은 가로 220mm, 세로 165mm의 장방형 단면이며, 전면에 카메라를 설치하여 가시화 영상을 기록하고 레이저 조명위치는 수조의 상부이다.

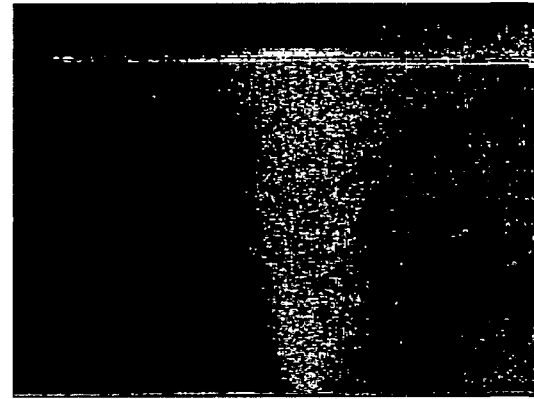
유동장의 영상입력은 고속카메라에 의해 촬영하였고 NTSC의 캠코더에 의해 분당 30장의 비율로 재생하여 기록하였으며 노출은 1/1000초로 수동 설정하였다. 실험조건별 녹화시간은 5분 전후이었으며 이때의 압력변동은 $\pm 0.13 \text{ kpa}$ 이다. 압력 조절 후 완전히 발달한 새로운 유동장을 얻기 위하여 약 10분전후의 경과시간을 두고 영상을 기록하였다. PIV의 계측을 위하여 입력된 영상을 PC용 이미지그래버(Data translation사, DT3155)에 입력하였으며 소프트웨어(CACTUS'97)를 이용하여 속도벡터의 처리를 행하였다. 입력영상의 갯수는 각 회전수당 100 프레임이며 입력시간간격은 1/120초이다. 시간평균의 속도벡터는 5분간의 영상에서 무작위로 추출한 영상을 대상으로 데이터를 얻었다. 동일 입자추적기법은 계조치 상호상관법이며 Pentium-II 200 MHz기종에서 하나의 영상에 대하여 1분전후의 처리시간을 요하였다. 그림 2는 100장의 영상을 산술 평균한 결과를 각 조건별로 보이고 있다.

3. 실험결과 및 고찰

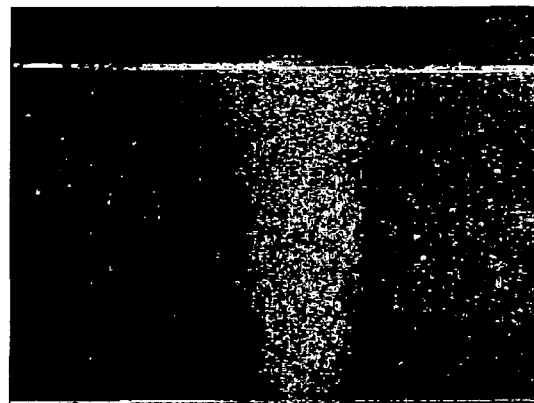
그림 3은 순시속도벡터의 분포를 보이고 있다. 가시화 실험결과를 녹화 한 영상을 재생하여 반복 관찰한 결과 상부에 붉이 없을 경우 공기발생기로부터의 기포 벽은 좌우로 진동하면서 상승하고 공급공기의 압력이 증가할수록 이러한 현상이 증가하고 같은 공기압력일 경우 붉이 있을 경우에 그 영향이 많이 감소됨을 알 수가 있었다. 이것은 표면류와의 전단혼합작용에 의해 발생하는 거시적인 와류의 영향으로 인한 것으로 추정되며 기포벽의 설계에 중요한 요인으로 성능에 큰 영



(a) $P_{\text{inlet}} = 6.7 \text{ kpa}$

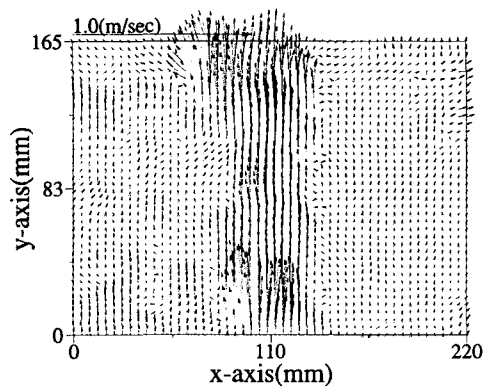


(b) $P_{\text{inlet}} = 10.7 \text{ kpa}$

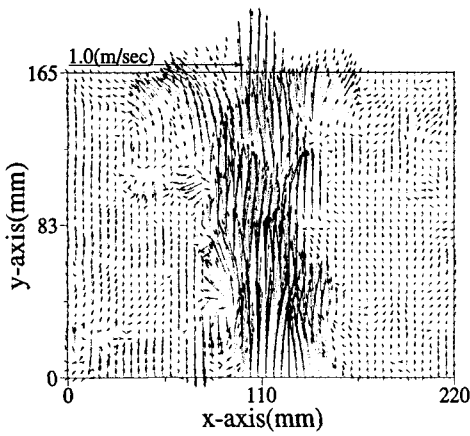


(c) $P_{\text{inlet}} = 14.7 \text{ kpa}$

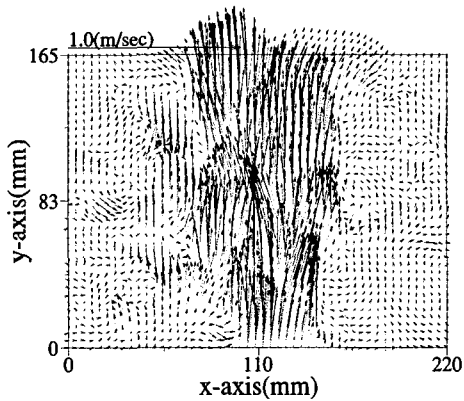
Fig. 2 Overlapped Original Flow Image



(a) $P_{inlet} = 6.7$ kpa



(b) $P_{inlet} = 10.7$ kpa

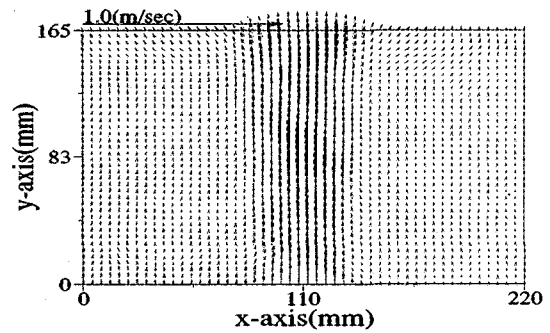


(c) $P_{inlet} = 14.7$ kpa

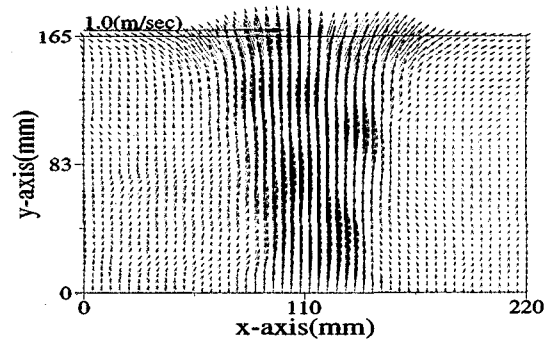
Fig. 3 Instantaneous Velocity Vectors

향을 미칠 것으로 판단된다. 그림(a)은 노즐 입구 압력이 6.7 kpa 일 때의 결과이다. 상승기포 벽의 주위에 상승흐름으로부터 전달력을 전달받아 미약한 와류가 타원형으로 보이고 있으며 기포벽의 진동현상도 약하게 나타나고 있다. 그림(b)은 $P_{inlet} = 10.7$ kpa 의 경우로서 그림(a)보다 4.0 kpa 만큼 높은 결과이다. 공기압력이 증가한 만큼 상승하는 기포 벽 주위에 나타나는 와류의 크기가 커지고 회전속도도 크게 증가하고 있다. 그림(c)은 $P_{inlet} = 14.7$ kpa 일 때의 결과이다. 기포 벽이 차지하는 면적의 크기가 크게 증가해있다. 이것은 공기가 공기발생기로부터 분출될 때 제트류의 형태로 분출되어 상승한 결과로 보여진다.

그림 4는 순시의 속도벡터를 100회분 중첩하여 얻어진 시간평균 속도벡터이다. 순시속도벡터사이



(a) $P_{inlet} = 6.7$ kpa



(b) $P_{inlet} = 14.7$ kpa

Fig. 4 Time-mean Velocity Vectors

의 시간간격은 1/120초이다. 공급공기의 압력이 낮을 때(그림a)에는 상승기포 벽의 두께가 작고 좌우로 퍼져가는 흐름도 미약하게 나타나고 있다. 그리고 공급압력이 증가하면(그림b) 기포 벽 주위의 운동에너지가 증가하고 기포 벽 좌우에 거대 규모의 단일 와류가 형성됨을 알 수 있다.

그림 5는 시간평균의 단면속도분포를 나타내고 있다. 그림에서는 계측영역에 대하여 기하학적으로 6등분하여 수직방향의 속도분포를 도시하고 있다. 상부의 기준속도는 1.0 m/s이며 가로축과 세로축은 실 단위이다. 그림(a)은 공급공기의 압력이 6.7 kpa의 경우로서 기포 벽으로부터 표면류 발생이 미약하게 나타나고 있다. 이러한 기포 벽에 의해 생성되는 표면류는 기포벽측으로 접근하는 기름 슬립 등의 유출된 유류를 전방에서 차단

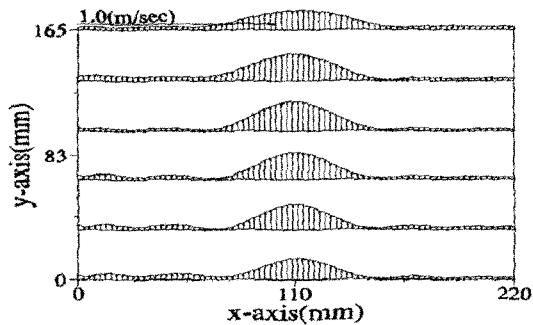
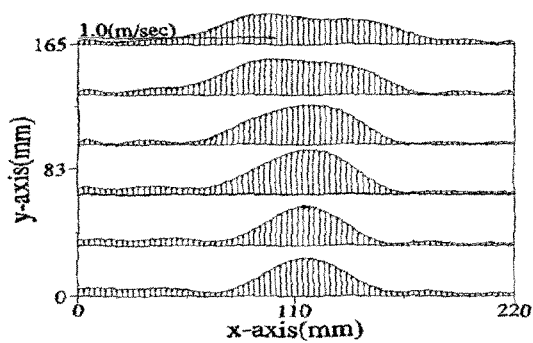
(a) $P_{inlet} = 6.7$ kpa(b) $P_{inlet} = 14.7$ kpa

Fig. 5 Time-mean axial Velocity Profiles

할 수 있음을 보여주고 있다. 이때에 기포발생기로부터의 상승유동은 포물선의 형태를 유지하고 있다. 그림(b)는 $P_{inlet} = 14.7$ kpa의 경우로서 그림(a)보다 표면류의 발생이 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 그림(a)와 비교하여 상승속도도 차이가 나고 있다. 이것은 공급공기의 압력이 증가하여 노즐의 출구에서 제트류의 형태로 분출되어 기포 경이 커졌기 때문이다.

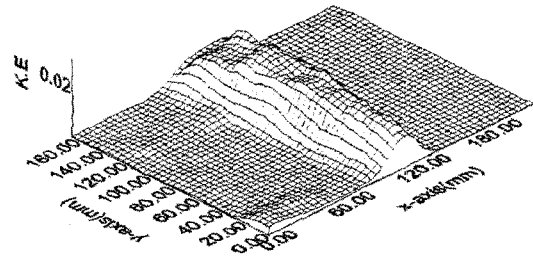
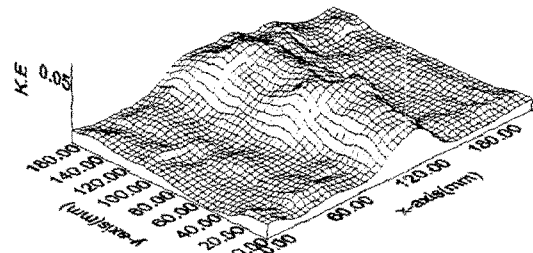
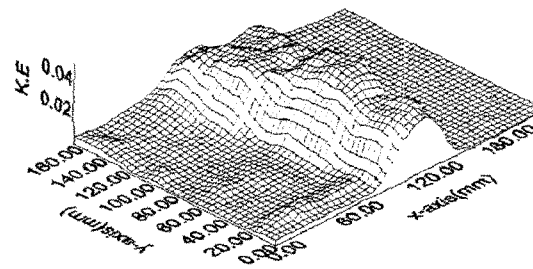
(a) $P_{inlet} = 6.7$ kpa(b) $P_{inlet} = 10.7$ kpa(c) $P_{inlet} = 14.7$ kpa

Fig. 6 Time-mean Kinetic Energy Distribution

그림 6은 시간평균 2차원 운동에너지의 공간분포를 보여주고 있다. 이 그림은 기포뿔과 접근표면류와의 상호작용에 의한 전체적인 흐름의 구동 에너지의 크기를 잘 나타내고 있다. (a)는 공급공기의 압력 6.7 kpa 의 결과로서 기포가 상승함에 따른 운동에너지를 잘 보여주고 있다.

그림 6(b)와 그림 6(c)는 공급공기의 압력이 6.7 kpa 및 14.7 kpa 만큼 증가한 결과이다. 공급되는 공기의 압력이 증가할수록 표면류의 발생을 촉진시킴을 알 수 있다. 이런 표면류의 흐름을 잘 유도할 수 있다면 기포뿔의 차단효과가 증가시킬 수 있다. 그림(a)나 그림(b)에서 보면 기포뿔의 운동에너지의 분포가 수직 방향으로 대칭을 이루는 특징적인 형상을 유지하고 있음을 알 수가 있다.

그림 7은 기포뿔에 의한 저항흐름과 기포 벽이 조류에 의해 하류로 이동하는 것을 나타낸 그림이다. 상부로부터 유입되는 흐름속도의 증가에 따라 기포 벽이 하류 측으로 밀리는 경향이 크게 증가하고 있다. 그림8에서는 일정한 누유 역지력을 얻기 위한 최적의 공기유량이 존재하며 기포발생량의 증가에도 누유역지력이 비례하여 증가하지 않음을 나타내고 있다.

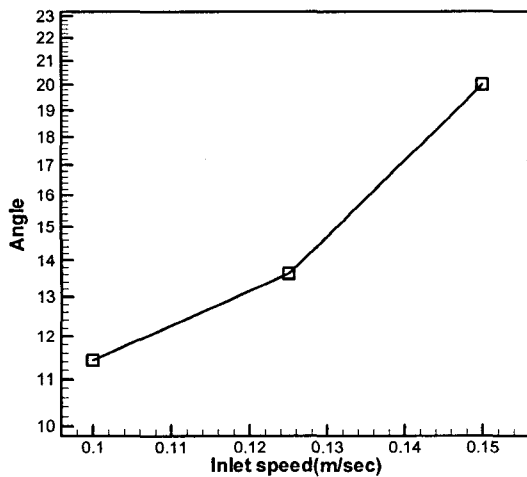


Fig. 7 Angle of Inclination of Bubble Plume with Boom (Air Flow rate= $0.5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$)

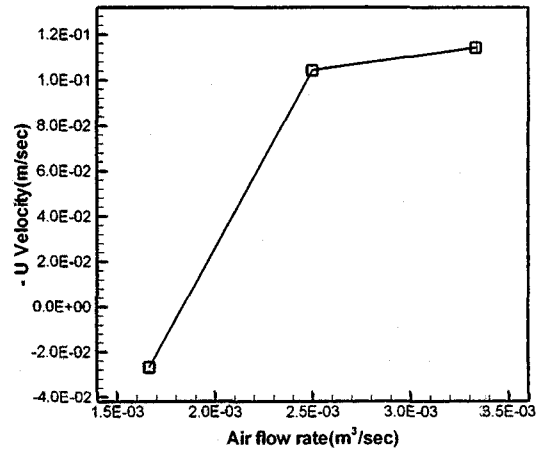


Fig. 8 Containing Capability with Respect to Air Flow rate (Inlet Velocity= 0.125m/sec)

4. 맺음말

이 연구에서는 기포뿔에 대하여 기포뿔의 상승속도와 조류에 따른 기포 벽의 거동을 입자영상 유속계를 이용하여 고찰하였다. 그 결과 조류가 없을 경우 기포뿔에서 상승하는 기포가 자유표면에서의 중앙을 기준하여 거의 좌우 대칭적인 흐름을 발생시켜 상류에서 접근하는 표면류를 기포뿔의 전방에서 차단할 수 있음을 알 수 있었으며, 공급공기의 압력이 커질수록 상승기포흐름에 의해 발생하는 거시구조의 와류의 형태가 크게 변하는 유동특성을 나타내었다. 상류에서 유입되는 속도가 일정할 경우 누유역지력을 유지하기 위한 최적의 공기의 유량이 설정될 수 있으며, 조류에 따라 기포 벽의 거동은 하류로 이동하여 나타났다. 차후에 조류의 영향을 극소화 할 수 있는 방안에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] 이영호, "기름유출 방제장비의 특성 및 운

- 용”, 월간 석유 12월호, 한국석유개발공사, pp.11-28, 1993
- [2] 유정석, 이문진, 김진환 and 강창구, “오일뿔의 실효역 성능평가에 관한 연구”, 한국해양환경공학회, 춘계학술대회논문집, pp.223-245, 1998
- [3] 박한일, “공기팽창식과 기포식이 결합한 혼합형 오일뿔의 개념설계 및 물리실험”, 한국해양환경공학회, 추계학술대회논문집, pp.251-257, 1998
- [4] Response to Marine Oil Spills, The Int. Tanker Pollution Federation Ltd. 1987
- [5] A. M. Hassan, F. Yamamoto, Y. Murai, Y. Kobayashi, “Research and Development for a New Bubble Curtain Type of Oil Fence”, J. of Visualization Japan Vol.17 Suppl. No.1, pp.239-242, 1997
- [6] Y. Murai, Y. Matsumoto, “Wonder of the Surface Flow”, J. of JSME Vol. 9, pp.22-23, 1997
- [7] 이영호, “PIV에 의한 기포뿔의 기본성능특성에 관한 연구”, 한국해양환경공학회 추계학술대회논문집, pp.47-53, 1997
- [8] Asanuma T. ed., 1986, “Handbook of flow visualization”, Visualization Society of Japan, Asakura Pub. Co.(in Japanese)
- [9] Dyke M. V. ed., “An album of fluid motion”, Parabolic Press., 1982
- [10] Merzkirch W., “Flow visualization(2nd)”, Academic Press Inc., 1987
- [11] Yang W. J., ed., “Handbook of flow visualization”, Hemisphere Pub. Corp., 1989
- [12] Kobayashi T., Tsuda N., “Karman vortex street behind a circular cylinder” in Fantasy of Flow(VSJ ed.), Ohmsha & IOS Press, 1993