

배플에 의한 개방챔버 내부 유동의 영향에 관한 연구

노병수¹ · 최주열² · 정하균³ · 최상범[†]

(Received January 26, 2015 ; Revised March 3, 2015 ; Accepted March 13, 2015)

A Study on Effects of the Fluid Flow Inner the Open Chamber by Baffle

Byeang-Su NO¹ · Joo-Yol Choi² · Ha-Gyoon Jung³ · Sang-Bom Choe[†]

요약: 플래시증발현상은 개방챔버 내의 온도, 압력, 수위 그리고 배플 등에 영향을 받는다. 이 연구에서 PIV 실험은 최적의 배플 위치와 높이에 대한 개방챔버 내의 유동특성을 확실하게 시행하였다. 배플은 개방챔버 내의 재순환 흐름, 수력도약 그리고 유동특성에 상당한 영향을 주었다. 그리고 레이놀즈수의 영향은 미미하였다. 최적의 배플높이는 $h/H=1.5$ 였고, 최적의 배플위치는 개방챔버 내부 입구로부터 $x/H=1.5$ 부근 이었다.

주제어: 플래시증발현상, 입자영상유속계, 수력도약, 배플높이, 개방챔버

Abstract: Flash evaporation phenomenon is affected by temperature, pressure and water level in the open chamber and Baffle etc. In this study, PIV experiments were conducted to ensured the flow Characteristics in the open chamber, and optimum baffle location and baffle height. Baffle had a considerable effect on the recirculation flow, hydraulic jump and the flow characteristics in the Open chamber, and influence of Reynolds number was insignificant. The optimum baffle height was about $h/H=1.5$. and optimum baffle location was $x/H=1.5$ from the inlet of open chamber.

Keywords: Flash evaporation phenomenon, Particle image velocimetry, Hydraulic jump, Baffle height, Open chamber

1. 서론

지구의 온난화 등으로 인하여 세계 각국에서는 기상이변 발생빈도가 꾸준히 상승하고 있다. 이상기후로 국지적인 호우가 발생하여 많은 지역에서 홍수가 발생하고 있는가하면 이에 반하여 강우량이 적어 담수가 부족한 지역이 더욱 확산되고 있는 실정이다. 또한 최근 공업의 발전과 인구의 증가로 인하여 지역적으로 공업용수, 농업용수, 상수도용수의 부족에 대비하기 위하여 하천수와 지하수 개발 및 댐 등을 건설하고 있으나 천연수에만 물의 공급을 기대하는 것은 그 한계가 있어 가까운 미래에 물의 부족이 예상되고 있다. 이러한 상황에 대처하는 방법으로 해수의 담수화 방법이 이용되고 있다[1][2].

해수의 담수화 방법에는 해수로부터 순수한 물을 분리하는 방법으로 증발법(Evaporation), 역삼투압법(Reverse osmosis) 등이 있고, 해수로부터 용존 염류를 분리, 제거하고 순수한 물을 얻는 방법으로 이온교환법, 전기투석법 등이 있으며, 현재 상용화된 해수담수화 설비로 가장 많이 채택되

고 있는 증발에 의한 방법 중에 플래시현상을 이용한 플래시 증발법[3][4]은 증발기 내의 압력을 공급되는 해수의 포화 증기압보다 낮게 유지하고 그 온도차를 이용하여 해수의 일부를 수증기로 발생시키는 방법으로서 전체 담수화 장치의 85%이상을 차지하고 있다[5][6].

Figure 1은 다단플래시(Multi-stage flash : MSF) 증발 시스템에 대한 개략도를 나타내었다. 이 시스템은 열소비율이 적고 열원으로 저압의 증기를 사용하기 때문에 장치의 구조가 단순하며 설비 및 유지비가 저렴하여 현재 가장 많이 채용되고 있으며 이에 대한 개발 연구도 계속되어지고 있다[7]. 단단플래시 증발기는 1950년대 스코틀랜드의 Silver에 의해 기본원리가 설정된 이후로 1970년대 초에 중동지방의 공업화와 더불어 관련 기반 기술이 개발되었다. Lior et al.[8]는 실험조건(증발기 내의 압력, 유량, 수문의 높이 등)을 변화시켜가며 자신이 개발, 제작한 서미스터 콤(Thermistor comb)을 이용하여 온도분포 등의 기본적인 실험 결과를 얻고, 대부분의 플래시 현상은 수력도약(Hydraulic jump) 영역에서 일어나고 채널유동 영역에서는

† Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8246-4092>): Training Ship, Mokpo National Maritime University, Haeyangdaehak-ro 91, Mokpo, Jeonnam, E-mail: king@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7431

1 Training Ship, Mokpo National Maritime University, E-mail: ce_robots@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7413

2 Division of Marine Mechatronics, Mokpo National Maritime University, E-mail: jychoi@mmu.ac.kr, Tel: 061-240-7206

3 Division of Marine Engineering System, Mokpo National Maritime University, E-mail: jhk3455@hanmail.net, Tel: 061-240-7237

단지 표면증발에 의한 증기발생만 되는 것을 보고하였다. 또한, 증발촉진 장치인 배플(Baffle)을 설치하여 액체가 증발기 내에 체류하는 시간과의 관계를 실험적으로 설명하였다[8][9].

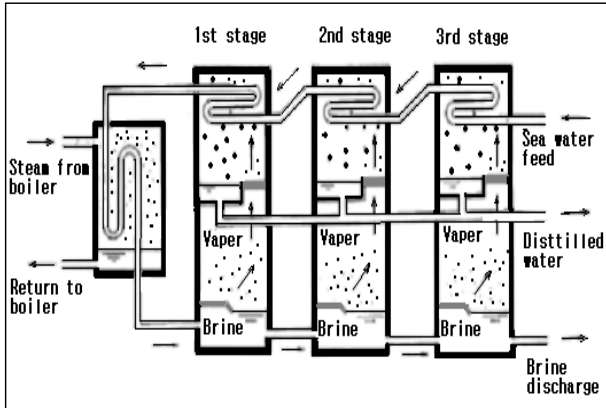


Figure 1: A diagram of multi-stage flash process

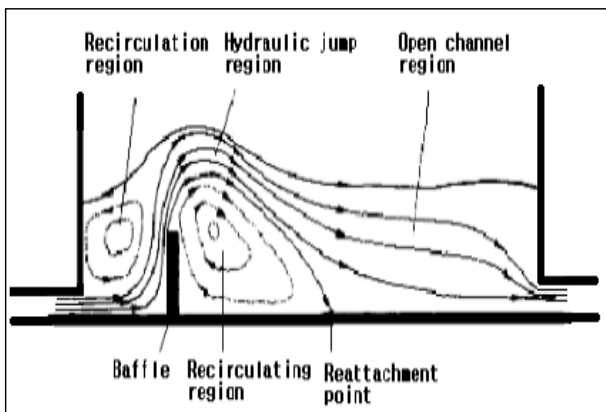


Figure 2: Flow patterns inside the flash stage in MSF evaporator

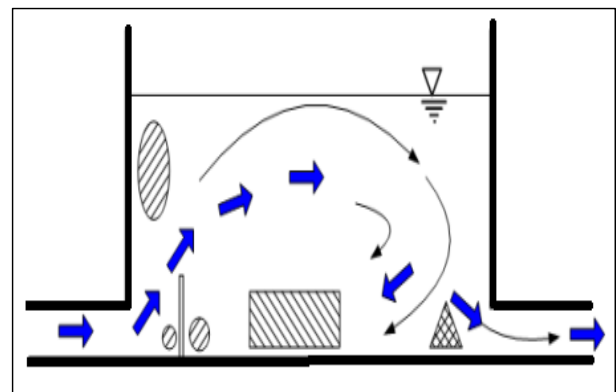
Figure 2는 다단플래시 증발기의 증발부 내부에 유동패턴을 나타낸 것이다. 배플과 평행하게 분출하는 벽면제트유동(Wall jet)은 전단층과 경계층이 함께 존재하는 난류장을 형성하는 전형적인 유동모델이다[5]. 해수의 담수화 설비는 현재 물이 부족한 중동지역과 공장에 많이 설치되어 가동 중이며, 대륙 간에 대량화물을 운송하기 위해 장기간 항해하는 선박에서는 담수의 적재 공간이 한정되어 있어 대부분의 선박에서는 운항 시에 발생하는 엔진의 폐열을 이용해 해수를 증발·응축시켜 담수를 생산하는 증발식담수화 설비를 채택하고 있다. 따라서 선박에서 이용 중인 단단플래시(Single-stage flash) 증발식 담수화 설비의 성능을 향상시키는 요인은 증발기내의 압력, 유량, 온도, 수문의 높이 및 플래시현상 등이 관계되며 증발촉진 장치인 배플이 있는 플래시증발기의 경우 플래시현상은 수력도약이 발생하는 영역에서 일어나므로 배플에 충돌하여 2단 스테이지로 유입되는 유동특성이 매우 중요하다[5][10].

그러나 온도 및 압력의 변화로 플래시현상을 수반하는 경우에는 그 현상이 더욱 복잡하므로 이 연구에서는 기하학적 경계조건 내에서 열전달 현상을 수반하지 않는 유동 패턴의 규명에 일차적인 목적을 두었으며, 배플에 의해 개방챔버 내부의 전유동장은 큰 영향을 미치므로 벽면제트유입구의 높이($H=25\text{mm}$)를 대표 길이로 정하여 수위는 $7H$ 로 고정하고 배플의 위치 및 높이와 유속의 조건 변화에 대한 내부의 유동특성을 입자영상유속계(Particle image velocimetry)기법[10][11]을 이용하여 측정한 후 분석하였다. 배플이 개방챔버 내부의 전유동장에 미치는 영향에 대한 정량적 자료를 확보하여 플래시증발기 등 관련된 분야에 기초 자료로 제공을 연구의 목적으로 하였다.

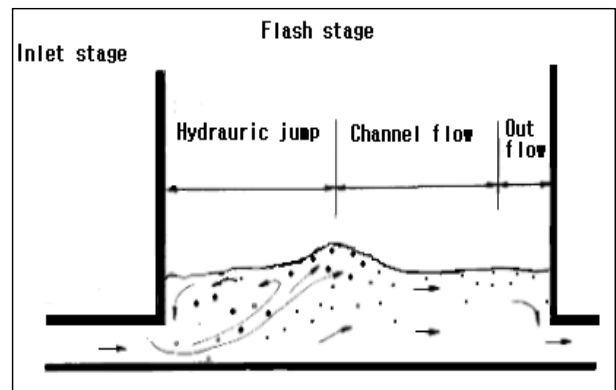
2. 실험장치 및 실험방법

2.1 실험장치

Figure 3은 실험의 개략도를 나타낸 것이다. Figure 3 (a)에 단단형 증발챔버 내에 내장된 배플에 의한 유동패턴을 나타내었고 Figure 3 (b)는 배플이 없는 경우의 개략적인 유동패턴을 도시하였다.



(a) Flow pattern in open chamber by baffle



(b) Flow pattern in open chamber

Figure 3: A schematic diagram of experiments

Figure 4는 전체적인 실험장치의 구성을 나타낸 것이다. 실험장치는 유동장 형성장치, 영상관련장치 및 PIV 계측장치로 이루어져 있다. 유동장 형성장치인 2차원 회류수조는 투명한 강화유리로 제작되었으며 균일한 유입속도를 얻기 위하여 전방에 정류판과 다공판을 설치하였다. 회류수조의 시험부 규격은 길이, 폭, 높이가 1500mm × 400mm × 600mm이며 유속분포는 ±2.0%이다. PIV의 영상처리시스템은 크게 레이저(5W), 레이저시트, 영상기록용 고속카메라(FASTCAM-X, 1280 × 1024), 영상처리프로그램(CACTUS 3.1), 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 구성된다. 레이저로부터 원통형렌즈를 통해 2차원의 단면광을 생성하여 계측 유동장을 가시화하고, 가시화된 영상을 고속카메라로 촬영하였다. 촬영된 영상은 이미지를 0에서255단계의 Gray레벨로 전송하는 DT3155보드를 통해 컴퓨터에 저장된다. 그리고 영상처리프로그램인 CACTUS 3.1을 이용하여 해석하였다. PIV계측에서 유동장을 가시화하고 해석하는데 있어 가장 중요한 부분을 차지하는 것이 입자의 선정이다. PIV는 유동장에 분포된 입자의 미소시간 간격영상을 컴퓨터로 분석하여 속도벡터에 대한 데이터를 얻는 방법이므로 입자의 추종특성은 결과의 신뢰성에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 실험에서 사용한 고체 트레이서 입자는 거름망을 이용하여 평균직경이 110 μm 정도의 추종성과 산란성이 우수한 백색의 PVC(Poly Vinyl Chloride) 구형입자를 사용하였다.

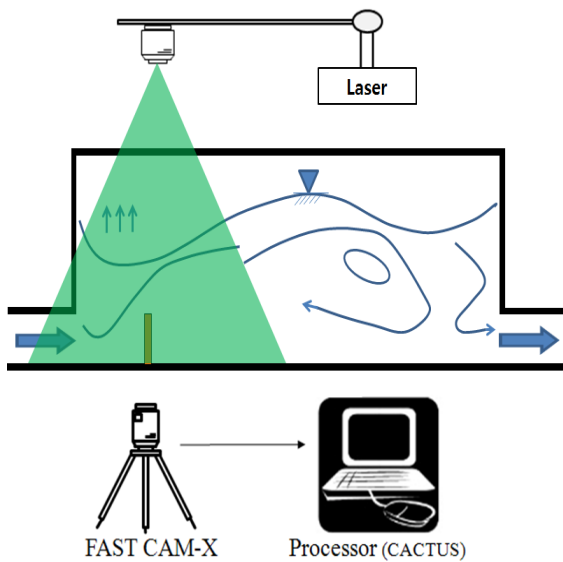


Figure 4: Experiment setups

Figure 5는 실험모델을 나타내었다. 유동장은 벽면제트의 유입조건이 가능하도록 길이, 폭, 높이가 290mm × 270mm × 25mm인 실험모델을 레이저의 투과성이 좋고 투명성이 최대한 보장되는 두께 5mm의 아크릴판으로 제작하여 수조 내에 고정하여 설치하였으며, 실험모델 내부에 배플은 두께는 5mm로 구조물 내 벽면의 홈을 정밀 가공하여 교체가 가능하도록 하였다.

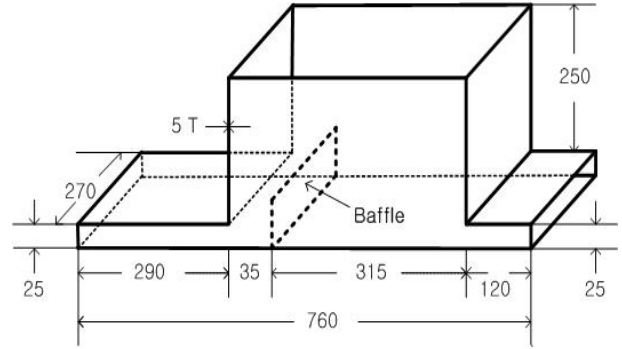


Figure 5: Dimensions of an experiment model

2.2 실험방법

실험방법은 실험결과를 무차원화 함에 있어서 벽면제트(Wall jet) 유입구의 높이(H=25mm)를 대표 길이로 정하고 수위는 7H로 고정하였다. 실험유체는 20℃의 청수를 사용하였으며 연속적인 실험에 따른 온도상승은 0.5℃미만으로 계속되었다. 배플은 네 가지의 높이(h) 1.2H, 1.5H, 1.8H 및 2.0H로 제작하였으며 배플의 위치 및 높이와 유속의 조건을 변화하여 개방챔버 내부의 전유동장에 유동패턴을 계측 실험하였다.

Table 1은 가시화 실험의 조건을 나타내고 있다. 유동장에 유입되는 유입부의 높이(H)를 기준으로 한 레이놀즈는 $Re = 3 \times 10^3$, $Re = 5 \times 10^3$ 및 $Re = 7 \times 10^3$ 이다. 가시화 실험의 배플의 높이(h)는 1.5H로 하였으며 배플의 위치 변경은 입구 측으로부터 유입부의 높이를 대표 길이로 하여 $x/H=1.0$, $x/H=1.5$, $x/H=2.0$ 그리고 $x/H=2.5$ 의 4가지 경우에 대해 실험을 하였다.

Table 1: Cases of the visualization

Item	Condition
Baffle position (x/H)	$x/H=1.0$, $x/H=1.5$, $x/H=2.0$, $x/H=2.5$
Baffle height (h)	$h=1.5H$
Reynolds Number	$Re=3 \times 10^3$, $Re=5 \times 10^3$, $Re=7 \times 10^3$

Table 2: Cases of the PIV measurement

Item	Condition
Baffle position (x/H)	$x/H=1.5$
Baffle height (h)	$h=1.2H$, $h=1.5H$, $h=1.8H$
Reynolds Number	$Re=5 \times 10^3$

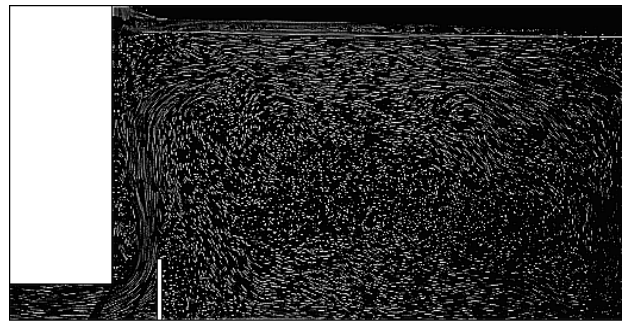
Table 2는 PIV 계측의 조건을 나타내고 있다. 계측에 적용된 레이놀즈수는 $Re = 5 \times 10^3$ 이며 가시화 실험과 같이 유입부의 높이(H)를 기준으로 하였다. 배플의 높이는 가시화 실험에서 $x/H = 1.5$ 전후가 가장 적합한 것으로 확인되

어 $x/H=1.5$ 로 고정하였다. 그리고 배플의 높이는 $h=1.2H$, $h=1.5H$, $h=1.8H$ 의 3가지 조건으로 하였으며, 2차원 단면광은 2mm 내외로 유동장을 조명하여 가시화시켜 결과를 분석하였다. 또한 PIV 기법을 적용하여 내부 유동장의 속도를 계측하였다.

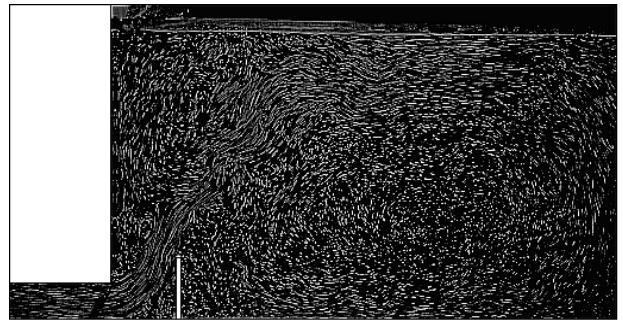
3. 실험결과 및 고찰

Figure 6은 배플의 위치와 레이놀즈수의 변화에 따른 유동가시화 실험 중에서 대표적으로 $Re = 5 \times 10^3$, $h = 1.5H$ 의 경우를 나타낸 것으로 (a)는 $x/H = 1.0$, (b)는 $x/H = 1.5$, (c)는 $x/H = 2.0$, (d)는 $x/H = 2.5$ 의 유동가시화 결과이다. 개방챔버 내부의 유동패턴은 벽면제트가 배플에 충돌하여 상승하면서 입구 측 상부에 형성되는 2차 와류의 발생과 배플의 상부를 지나면서 나타나는 수력도약 현상, 그리고 하류로 진행되는 주 흐름이 출구로 진행되는 주 흐름과 충돌하여 혼합되는 현상이 나타난다. 이와 같은 현상은 챔버 내의 유동패턴에 큰 영향을 미치며 증발기 내에서 플래시 효과를 증진시킬 수 있는 유동패턴의 조건은 기존의 연구결과들을 검토해 보았을 때 2차 와류는 강제와류 형태를 갖지 않아야 하며, 수력도약은 적절한 곡률을 갖게 하고, 재순환류는 주 흐름의 진행을 크게 방해하지 않아야 한다. 따라서 배플의 위치가 $x/H=1.0$ 의 경우에는 유입흐름이 지나치게 수직으로 수면 측을 향하고 있으며, $x/H=2.0$ 이상에서는 우측 출구벽면에 충돌하여 내부 순환류에 영향을 주는 경향이 배플의 위치가 커질수록 증가하는 경향을 나타내었다. 이러한 기준에서 가시화 결과를 평가할 때 $x/H=1.5$ 전후가 가장 적절할 것으로 평가된다.

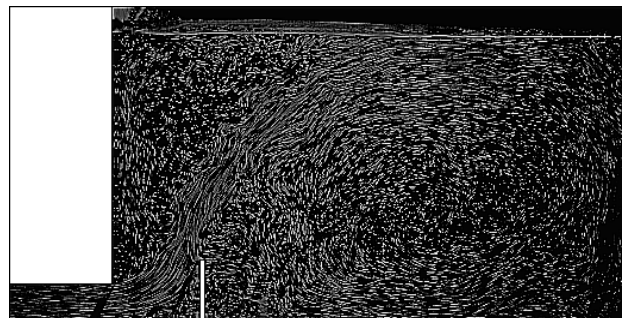
Figure 7은 PIV 계측에 의한 속도벡터분포를 나타낸 것이며, $Re=5 \times 10^3$ 에서 (a)는 $h=1.2H$, (b)는 $h=1.5H$, (c)는 $h=1.8H$ 의 상태에서 유체의 시간평균 유동특성을 알아보기 위하여 채택된 레이놀즈수에 대해 기록한 영상을 연속적으로 재생하여 샘플링한 500회의 영상에 대해서 동일입자 추적을 행하여 얻은 순간 속도벡터를 산술 평균한 결과이다. 계측결과는 대표속도에 의해 무차원화하여 도시한 결과이며 배플을 중심으로 전방의 유입부와 후방의 재순환영역을 모두 촬영한 영상을 이용하였다. PIV 계측으로 얻은 속도분포에서 개방챔버 내의 유동형태는 배플 상부를 지나 유출구로 진행되는 주 흐름과 주 흐름에 영향을 받아 발생하는 2차 와류로 구분하여 설명할 수 있다. 실제 플래시 증발은 대부분 수력도약(Hydraulic jump) 영역에서 기포가 생성되어 2상유동의 형태로 증발이 이루어지며 채널유동 영역에서는 단상유동으로 단지 표면증발이 이루어진다. 실험에서 재순환 흐름은 유입유속과 수위 및 배플의 영향을 동시에 받았으며 해석하기가 매우 복잡한 유동특성을 보였다.



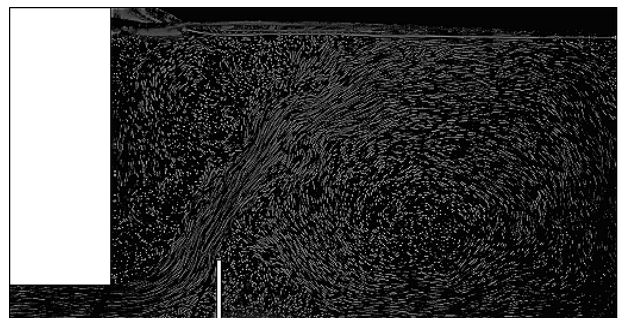
(a) $x/H=1.0$, $h=1.5H$



(b) $x/H=1.5$, $h=1.5H$

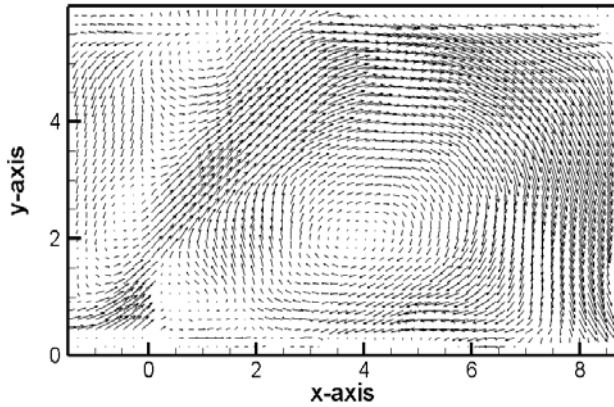


(c) $x/H=2.0$, $h=1.5H$

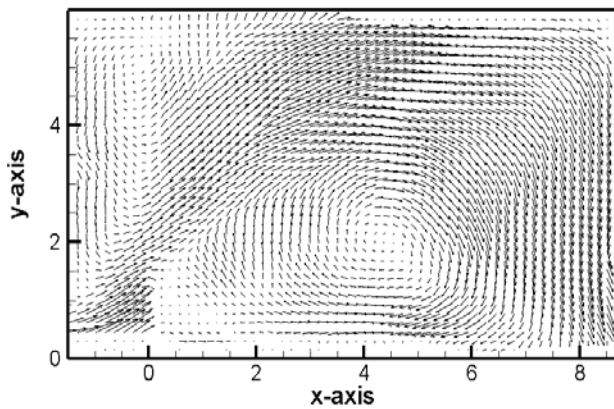


(d) $x/H=2.5$, $h=1.5H$

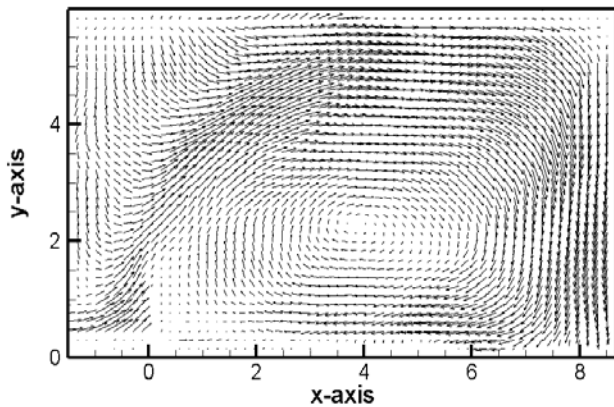
Figure 6: Flow visualization at $Re=5 \times 10^3$



(a) $Re = 5 \times 10^3$, $h = 1.2H$



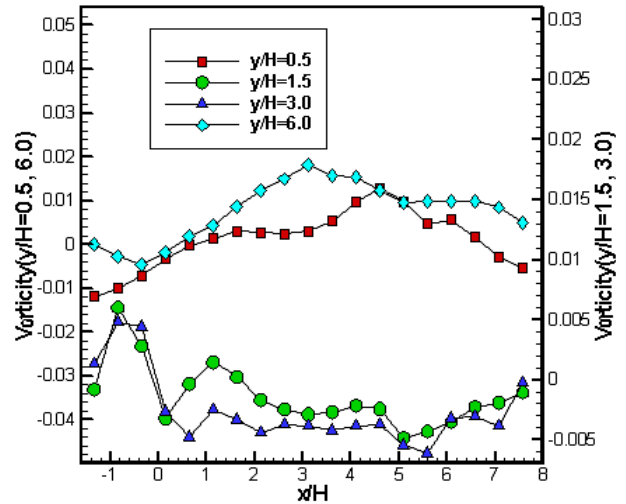
(b) $Re = 5 \times 10^3$, $h = 1.5H$



(c) $Re = 5 \times 10^3$, $h = 1.8H$

Figure 7: Velocity vector distribution by PIV

Figure 8은 $h = 1.5H$, $Re = 5 \times 10^3$ 인 경우에 배플의 하류 방향에 대하여 유입벽면제트 끝단에서 y 축 방향으로 0.5H, 1.5H, 3.0H, 6.0H 및 유입 제트류의 중심 선상에서 와도를 도시한 것이다. 중앙부보다 유입부와 상부의 와도가 크게 나타났으며 $x/H = -0.8$ 의 상부(유입영역의 상부)에 작은 규모의 재순환 영역이 있음을 보여주고 있다.



$h/H=1.5$, $Re=5 \times 10^3$

Figure 8: Comparison vorticity measured in open chamber

4. 결론

이 연구에서는 배플이 내장된 단단형 플래시증발기를 기초로 벽면제트의 유입경계 조건을 갖는 개방챔버를 모델링하여 열전달 현상을 수반하지 않는 상태에서 배플의 위치와 높이 그리고 유속의 변화에 의한 개방챔버 내부의 유동 현상을 PIV 기법을 적용하여 실험 고찰한 결과 다음의 결론을 얻었다.

배플은 개방챔버(Open chamber) 내에서 재순환 흐름과 유동특성 그리고 수력도약에 큰 영향을 미친다. 배플의 최적 높이는 $h=1.5H$ 정도가 가장 적절하였으며, 배플의 최적 위치는 유동가시화 결과 개방챔버 내부 입구로부터 $x/H=1.5$ 부근으로 확인되었으며 레이놀즈수의 영향은 크지 않았다.

References

- [1] G. S. Park, J. S. Kim, B. G. Koo, and H. S. Nam, Sea Water Desalination Unit, Korea Intellectual Property Office, Patent registration number 10-0745963, 2007.
- [2] KONETIC, Technical Guidance Regarding Seawater Desalination, A Market Tendency Analysis, 2008.
- [3] E. L. Dessouky, H. Ettouney, F. AL-Juwayhel, and H. A. L. Fulajj, "Analysis of multistage flash desalination flashing chambers," Institution of Chemical Engineers Trans IChemE, 82(A8), pp. 967-978. 2004.
- [4] K. W. Seul, "Thermo-hydrodynamic behavior inside a multi-stage-flash evaporator," Doctor's Thesis, Korea Advance Institute of Science and Technology (KAIST), Korea, 1990 (in Korean).
- [5] B. R. Bang, K. W. Seul, and S. Y. Lee, "An ex-

- perimental study on the open channel flow with plane well jet inlet boundary condition and effects of a baffle,” Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers, vol. 12, no. 6, pp. 1399-1406, 1988 (in Korean).
- [6] S. S. Hong and B. H. Lee, “Computer design of the seawater desalination plant with multi-stage flash evaporator,” Journal of Industry Science and Technology Institute, vol. 3, no. 1, p. 33, 1989 (in Korean).
- [7] J. Y. Choi, “An experimental study on flash evaporation,” Master's Thesis, Chosun University, Korea, 1982 (in Korean).
- [8] N. Lior and R. Greif, “Some basic observations on heat transfer and evaporation in the horizontal flash evaporator,” Desalination, vol. 33, pp. 269-286, 1980.
- [9] N. Lior, “Equations used to calculate non-equilibrium in open channel flash evaporators,” ASME Paper, no. 84-WA/Sol-34, 1984.
- [10] Y. H. Lee, C. S. Kim, and J. W. Choi, “A study on the improvement of PIV Performance,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 18, no. 3, pp. 284~292, 1994 (in Korean).
- [11] D.-H. Cho, “A Study on flow characteristic of three dimensional channel cavity by PIV measurement,” Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 22, no. 5, pp. 721, 1998 (in Korean).