

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2014.38.10.865>

ISSN 1226-4881(Print)  
2288-5324(Online)

## 미세기포 생성을 위한 벤츄리 시스템 개발<sup>§</sup>

윤 정 의<sup>\*†</sup> · 김 주 호<sup>\*\*</sup>

\* 강원대학교 메카트로닉스공학과, \*\* 강원대학교 대학원 기계자동화공학과

### Development of Venturi System for Microbubble Generation

Jeong Eui Yun<sup>\*†</sup> and Joo Ho Kim<sup>\*\*</sup>

\* Dept. of Mechatronics Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

\*\* Dept. of Mechanical & Automation engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received July 1, 2014 ; Revised July 31, 2014 ; Accepted August 11, 2014)

**Key Words:** Cavitation(케비테이션), CFD(전산 유동해석), Micro Air Bubble(미세기포), Venturi Tube(벤츄리 관)

**초록:** 본 연구는 벤츄리 시스템을 미세기포 생성을 위한 공기공급 장치로 개발하는데 그 목표를 두고 수행하였다. 이를 위해 상용유동해석 프로그램인 ANSYS CFX-15를 사용한 전산 유동해석을 통해 기하학적 형상변화가 벤츄리 관 내 유동특성들에 미치는 영향을 규명하였다 그리고 공급공기를 공급하는 공기 공급관의 위치, 크기, 개수 등을 변수로 2-유체 유동 해석을 수행하여 이들 설계 값들이 공기 공급 특성에 미치는 효과를 규명하였다. 최종적으로 직경 비  $\beta=0.75$ 의 벤츄리 확대관이 시작되는 위치에 공기 공급 구멍을 설치할 경우 가장 많은 공기가 벤츄리 관으로 유입되는 것을 확인할 수 있었으며, 유입공기 공급구멍 개수 및 직경과 벤츄리 관 내 공급되는 공기량 사이에는 선형적인 관계가 성립됨을 확인하였다.

**Abstract:** This study was conducted with the aim of developing a venturi-type air supply system for a microbubble generator. In order to determine the influence of the varying geometry of the venturi tube on the flow characteristics, a computational fluid dynamics (CFD) simulation was performed using the commercial CFD software ANSYS CFX-15. Furthermore, in order to elucidate the effects of variation in major design dimensions such as the air supply hole size, position of holes, and number of holes on the air supply characteristics, two-phase multiflow CFD analysis was performed. The analysis results showed that the starting point of expansion on the venturi tube with 0.75 is the best hole position and that the air supply hole size and the number of holes are linearly proportional to the amount of air.

## 1. 서 론

최근 들어 환경문제가 산업의 핵심 키워드로 부각되면서 생활하수, 농축산 및 산업용 폐수 처리 시장이 급격하게 증대되고 있다. 폐수처리는 다양한 방식의 여러 공정을 필요로 하지만, 특히 불순물 분리 과정에서 미세 기포를 활용하는 방

식이 폭넓게 사용되어지고 있다.

예로서 폐수(influent)가 처리기의 반응조로 들어오면, 탱크 바닥에 설치된 미세 기포 발생기에서 발생하는 공기 방울이 폐수에 함유된 에멀전 오일(emulsified oil) 및 미세 슬러지(sludge) 등에 부착되어 물위로 떠올라 물과 분리되므로 폐수를 정화할 수 있게 해준다(일반적으로 굵은 크기의 에멀전 오일 등은 1000 $\mu$ m 크기의 굵은 기포에 부착되어 부상되며, 미세 슬러지 등은 50 $\mu$ m 크기의 작은 기포들에 둘러싸여 부상하는 메커니즘을 가짐). 이러한 폐수 처리기의 핵심적인 기술은 적

§ 이 논문은 2014년도 대한기계학회 강원지회 춘계 학술대회(2014. 5. 16., 강원대) 발표논문임.

† Corresponding Author, jeyun@kangwon.ac.kr

© 2014 The Korean Society of Mechanical Engineers

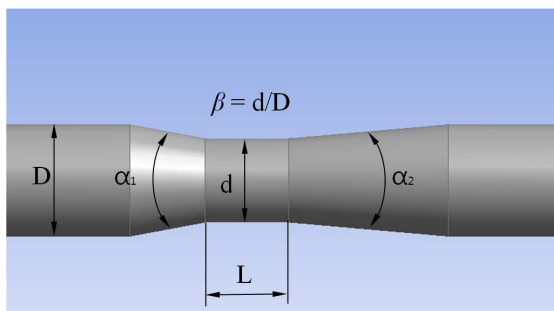


Fig. 1 Major parameter in venturi tube design

은 비용으로 많은 양의 미세 기포를 안정적으로 만들 수 있는 장치에 달려있으므로 관련 기술개발이 국내, 외에서 활발히 진행되고 있다.

먼저 국내의 미세기포 발생장치와 관련된 대표적인 연구들 중 최근의 몇 가지를 살펴보면, 김경천 등은 선박의 폐수 처리와 관련된 미세 기포 생산을 위한 이젝터(ejector) 개발 관련 실험 및 해석연구를 하였으며,<sup>(1)</sup> 양희천 등은 양식장에 공급하는 효과적인 이젝트 개발과 관련된 등을 수행하였다.<sup>(2,3)</sup> 이처럼 대부분의 연구가 상대적으로 발생기포의 사이즈가  $100\mu\text{m}$  이상이 되는 대용량형 이젝트에 국한 되어져 있으며,  $70\mu\text{m}$  수준의 기포를 생산할 수 있는 것으로 알려진 벤츄리 타입 미세 기포 발생기에 대한 연구를 찾아보기는 어려운 실정이다.

국외의 경우 일본을 중심으로 노즐 위주의 미세 기포 발생장치 관련 연구를 살펴보면, 국내에서처럼 이젝터 형태의 노즐을 사용한 연구가 주류를 이룬다.<sup>(4)</sup> 또한, Sadatomi, M. 등에 의한 오리피스 타입의 양산 가능한 미세기포 발생 노즐 연구<sup>(5)</sup>를 확인할 수 있지만 벤츄리 형태의 연구 결과는 찾아보기 어렵다. 이러한 이유는 벤츄리의 경우 공급 공기량 측면에서는 이젝터에 비해 불리하며(이젝터 경우 체적분율 기준 20% 이상), 발생기포의 사이즈 측면에서도 오리피스 타입(발생기포 크기 약  $50\mu\text{m}$ )에 비해 평균 직경이 크기 때문인 것(벤츄리 발생기포 크기 약  $70\mu\text{m}$ )으로 여겨진다.<sup>(5,6)</sup> 그 외 벤츄리 형태와 관련된 최근 국외 연구 사례를 살펴보면 중국의 Yanqi, S.는 벤츄리의 기하학적 형상 변화에 따른 압력변화에 대한 연구 결과를 제시하였다.<sup>(7)</sup> Baylar, A. 등은 미세 기포 발생장치로서 벤츄리 관 형태의 노즐을 사용할 경우 공기를 공급하는 구멍의 크기가 공급유량에 영향을 준다는 것을 그의 연구

결과에서 제시하였다.<sup>(8)</sup>

본 연구에서는 미세기포 생성을 위한 공기 공급 시스템으로써 공급 공기량에서는 이젝터에 비해 불리하며, 발생기포의 크기에서는 오리피스 타입에 비해 불리한 조건을 가지고 있지만 구조의 단순화로 상용화에서는 큰 이점을 가지고 있는 벤츄리 시스템에 대해 기하학적 형상(직경비) 변화가 관내 압력형성에 미치는 영향을 전산 유동 해석을 통해 규명하였다. 그리고 벤츄리 관에 공기를 공급하는 공급관의 위치, 크기, 개수 등을 변수로 2 유체 유동 해석을 수행하여 이들 설계 변수 값들이 공기공급 특성에 미치는 효과를 살펴보았다.

## 2. 수치해석

Fig. 1은 결정하고자하는 벤츄리의 외형과 관련된 주요 설계 변수  $D$ ,  $d$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $L$ 을 나타낸 그림이다. ISO 5167-4 벤츄리 설계 추천 자료에 의하면 유동의 최소 손실을 위해  $\alpha_1 = 21^\circ$ ,  $\alpha_2 = 7^\circ \sim 15^\circ$ ,  $L=d$ 의 값을 추천하고 있다. 이를 참조로 본 연구에서도 펌프에서 노즐로 공급되는 관 직경( $D$ )을 실용화 측면에서 50 mm로,  $\alpha_1 = 21^\circ$ ,  $\alpha_2 = 10^\circ$ 로 결정하였다. 이 경우 우리가 결정해야할 나머지 변수는 직경비  $\beta$ 의  $d$  값이다. 이를 위해  $25^\circ\text{C}$  물을 기준으로 하여 캐비테이션이 일어나지 않는 최소 직경비  $\beta$ 를 3-D 유동해석을 통해 결정하였다.

수치해석은 상용 유동 해석 프로그램인 ANSYS CFX-15를 사용하여 수행하였다. 해석 영역에 대한 지배 방정식은 에너지 방정식을 제외한 연속방정식 및 운동량 방정식을 사용하였으며, 난류 모델은 SST(Shear Stress Transport) 모델을 채택하여 해석을 수행하였다. 또한 벤츄리 목 부위의 저압 부위에 설치되는 공기 공급관을 통해 벤츄리 관내로 공급되는 공기량에 대한 특성을 해석하고자 2-유체 다상 유동 해석을 수행하였다. 2-유체 다상 유동 해석의 경우 밀도차에 의한 효과를 포함하고자 Density Difference Buoyancy Model을 사용하였으며, 물속 공기방울의 항력효과를 위해서는 Grace Model을 사용하였다. 그리고 난류 모델로는 Continuous Phase에 상응하는 물에 대해서는 SST를 Discontinuous Phase인 공기방울의 경우에는 Sato Enhanced Eddy

Viscosity 모델을 사용하였다. 해석 시 수렴성 및 정확성을 확보하고자 Fig. 5, Fig. 8 등에서 표시한 공기 공급 구멍 주변을 중심으로 약 200만개의 격자를 조밀하게 배치하였으며, 벽면에는 계산의 정확성을 위해 6층의 프리즘 격자 층을 배치하여 CFX 프로그램에서 추천하는  $y^+$  값이 300 이하의 값을 유지하도록 구성하였다. 해석 시 경계 조건으로는 입구 경계면에서는 유량  $50 \text{ m}^3/\text{hr}$ 을, 출구 경계면에서는 대기압조건으로 해석을 수행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 2는  $\beta$  변화 값에 따른 벤츄리 관 내 압력 변화를 나타낸 그림이다. 그림을 살펴보면  $\beta$  값이 줄어들수록 벤츄리 관의 목이 가늘어져 목 주변에서 형성되는 압력이 급격하게 감소하는 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 3은  $\beta$  값의 변화에 따른 벤츄리 관 중심부의 압력 변화를 정량적으로 계산한 결과 값으로,  $\beta$  값이 줄어들수록 벤츄리의 목이 가늘어져 유동 저항이 증가하므로 인해 동일 유량  $50 \text{ (m}^3/\text{hr)}$ 를 공급하기 위한 입구측 공급 압력 값이 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 그리고 벤츄리 관 흡입측 축소부에서는 목의 직경이 점차적으로 축소함에 따라 관내의 압력 또한 유속 증가에 의해 지속적으로 감소하는 현상을 나타낸다. 압력감소 현상은 목 중앙부위에서 최소값을 갖게 되며 확대관을 지나면 다시 압력이 회복되지만 관 마찰 손실로 인해 공급 압력까지는 회복이 되지 못하고 출구 측 압력값으로 수렴하는 모습을 보여주고 있다.

Fig. 4는  $\beta$  값의 변화에 따른 벤츄리 관 내 최소 및 최대 압력 값의 변화를 계산한 결과이다. 그래프에서 최대 압력값은 벤츄리 관 입구에 공급되는 압력을 의미하며  $\beta$  값이 작아지면 관로 손실이 증가하여 공급압력이 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 최소 압력값은 Fig. 2 (c)에서 확인할 수 있듯이 벤츄리 관의 목이 시작되는 표면 부위에서 형성되는 압력 값을 알 수 있다. 특히 최소 압력값이 포화증기압( $25^\circ\text{C}$ 물의 절대 포화증기압  $3125 \text{ Pa}$ ) 보다 작은 값을 가질 경우 캐비테이션이 발생하므로 최소 압력값이 포화증기압 보다 큰 값을 갖도록  $\beta \geq 0.75$ 의 값을 갖도록 하는 것이

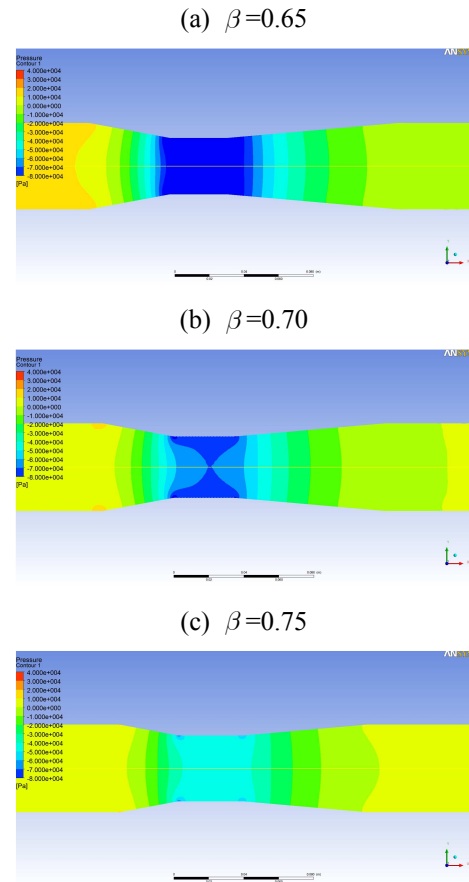


Fig. 2 Variation of pressure contour in venturi due to change of  $\beta$ . In these figures, water flow rate  $\dot{Q} = 50 \text{ m}^3/\text{hr}$

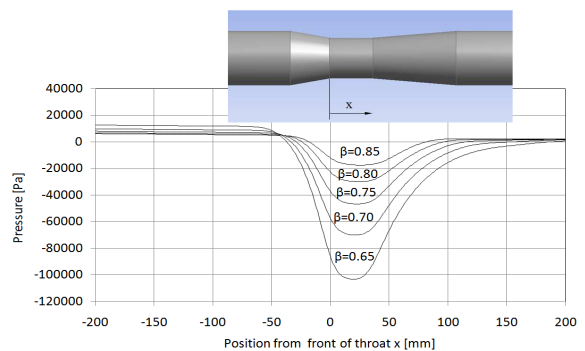


Fig. 3 Effect of  $\beta$  on the pressure profile on the centerline of the venturi. In these figures, water flow rate  $\dot{Q} = 50 \text{ m}^3/\text{hr}$

필요하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 미세 기포를 생성하기 위해 벤츄리에 공급하는 공기 공급 구멍의 위치를 어느 곳에 설치하는 것이 가장 효과적인가를 결정하기 위해 수행한 전산해석 시 구멍의 위치(x)와 명칭(p)을

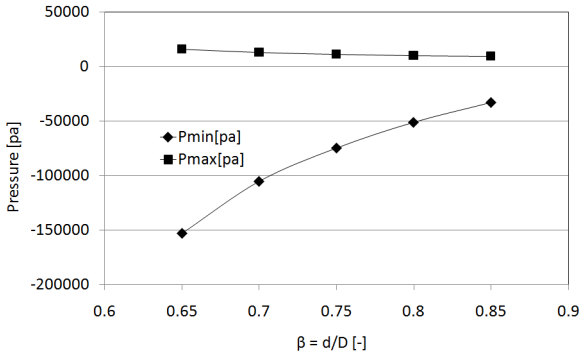
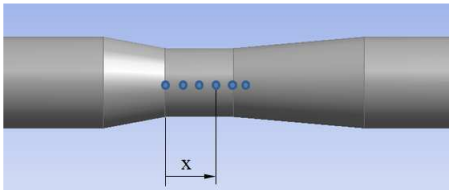


Fig. 4 Effect of  $\beta$  on maximum and minimum pressure in the venturi. In these figures, water flow rate  $\dot{Q} = 50 \text{ m}^3/\text{hr}$



Position Name	x[mm]
p=0	0.00
p=1	9.38
p=2	18.75
p=3	28.13
p=4	37.50
p=5	47.50

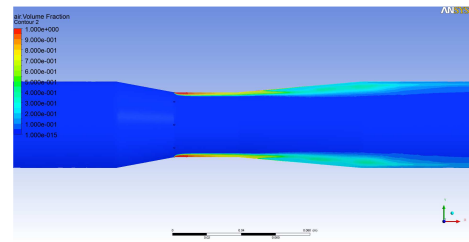
Fig. 5 Definition of hole position and its name. In this sample,  $\beta=0.75$ , hole diameter( $\varphi$ ) = 1 [mm], total number of holes=8 on circumference of venturi tube per  $45^\circ$  interval

표시한 그림이다. 해석 조건으로  $25^\circ\text{C}$  물이 벤츄리 흡입부에서  $50 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 일정하게 공급되며, 출구측 압력이 대기압인 조건에서 Fig. 5에서 설정한 공기 공급구멍에 원주방향으로  $45^\circ$  간격으로 설치된 8개의 직경 1mm 구멍으로  $25^\circ\text{C}$  대기압의 공기를 공급하는 경우에 대해 2-유체 유동 해석(water-air 2-phase flow analysis)을 수행하였다.

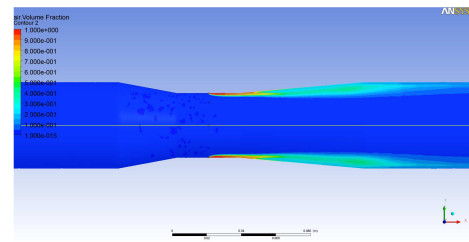
Fig. 6은 해석 결과 중 일부로 공급 구멍의 위치변화에 따른 공급공기의 체적분율(air volume / Water volume \*100 [%]) 그림을 나타낸다. 그림을 살펴보면 목 부위에서 형성되는 저압의 물로 인해 대기압 상태의 공기가 뚫어 놓은 구멍으로 빨려 들어가 물과 혼합되는 과정을 보여준다.

Fig. 7은 공기공급 구멍 위치(x)의 변화에 따른 공급공기량의 체적분율을 계산한 그래프이다. 그림을 살펴보면 공급구멍의 위치가 벤츄리의 목을

(a) Hole position name p=0 (x=0.00[mm])



(b) Hole position name p=2 (x=18.75[mm])



(c) Hole position name p=4 (x=37.50[mm])

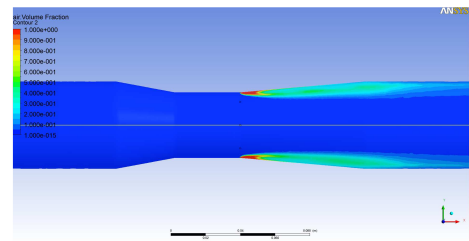


Fig. 6 Effect of hole position on air volume fraction. In this sample,  $\beta=0.75$ , hole diameter = 1 [mm], total number of holes=8 on circumference of venturi tube per  $45^\circ$  interval

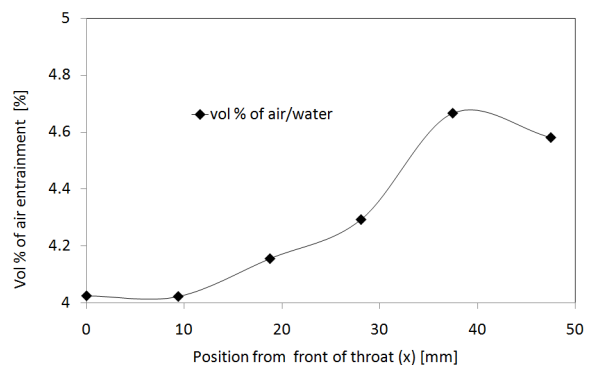
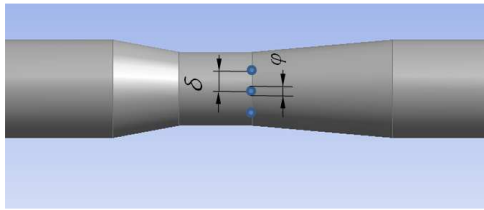


Fig. 7 Effect of hole position on air entrainment into the venturi. In this sample,  $\beta=0.75$ , hole diameter ( $\varphi$ )= 1 [mm], total number of holes=8 on circumference of venturi tube per  $45^\circ$  interval

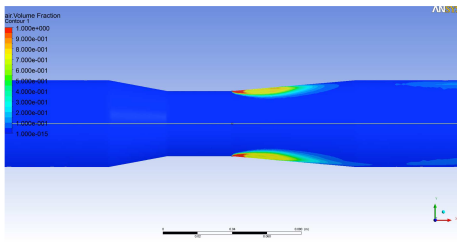
지나 확대관이 시작되는 위치에 설치되어져 있을 경우(p=4, x=37.5 [mm]) 가장 많은 공기가 물로 유입된다는 것을 알 수 있다. 이러한 이유는 Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 경사부위가 없는 목의 중



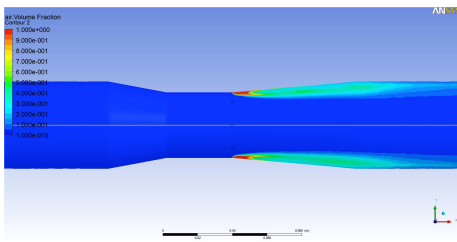
Number of holes	angle $\delta$ [deg]
n=2	180
n=4	90
n=6	60
n=8	45
n=12	30

**Fig. 8** Definition of hole number. In this sample,  $\beta=0.75$ , hole diameter ( $\varphi$ ) = 1 [mm], hole position  $x=37.5$  [mm]

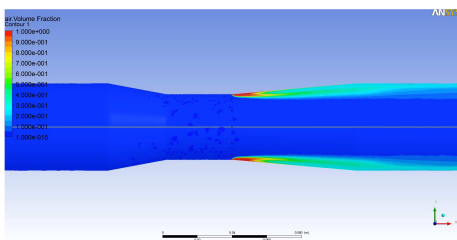
(a) Number of holes  $n=4$ ,  $\varphi=1$ [mm]



(b) Number of holes  $n=6$ ,  $\varphi=1$ [mm]

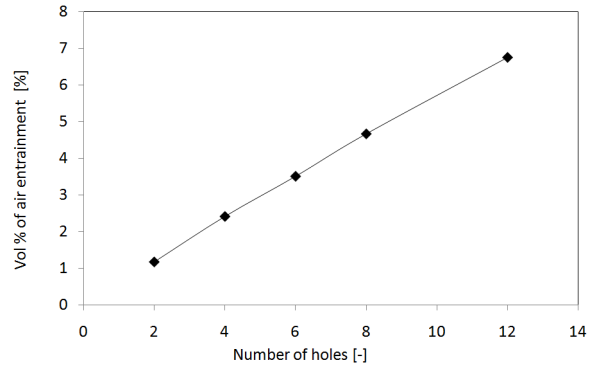


(c) Number of holes  $n=8$ ,  $\varphi=1$ [mm]



**Fig. 9** Effect of number of holes on air entrainment into the venturi. In this sample,  $\beta=0.75$ , hole diameter = 1 [mm], hole position  $x=37.5$  [mm]

심부에 비해 확대관이 시작되는  $p=4$ 의 위치에서는 벤츄리 관의 경사부분이 있어 상대적으로 공기가



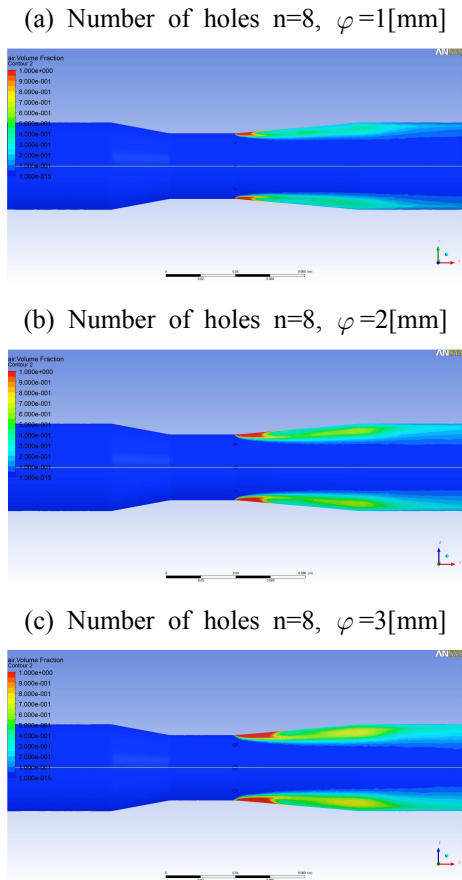
**Fig. 10** Effect of number of holes on air entrainment into the venturi. In this sample,  $\beta=0.75$ , hole diameter = 1 [mm], hole position  $x=37.5$  [mm]

물속으로 넓은 각도로 원활하게 빨려 들어오기 때문이라 판단된다.  $p=5$ 의 경우 다시 공급공기 유량이 감소하는 이유는 그곳에 형성 되는 물의 압력이  $p=4$ 의 위치보다 높기 때문이다.(Fig. 3참조)

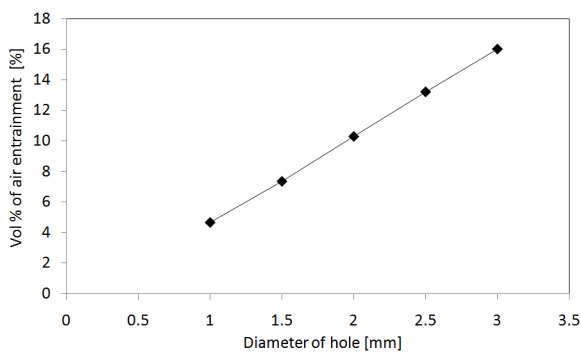
Fig. 8은 벤츄리 관의  $x=37.5$  (mm)에 설치된 공기 공급관의 설치간격( $\delta$ ) 및 관의 직경( $\varphi$ )을 나타낸 그림이다. 먼저 설치간격의 경우 관의 직경을 1(mm)로 고정한 채 설치구멍의 개수에 따라  $30^\circ$ (구멍의 개수  $n=12$ )부터  $180^\circ$ (구멍의 개수  $n=2$ )까지 변화해 가면서 해석을 수행하였다.

Fig. 9는 공기 공급구멍의 개수 변화에 따른 벤츄리 관 내 공기 체적분율을 나타낸 것이며, Fig. 10은 정량적인 값을 계산해 놓은 그래프이다. Fig. 10을 살펴보면  $n=12$ 개 까지는 공기 공급구멍의 개수와 공급되는 공기량사이에는 선형적인 관계가 성립한다는 것을 보여주고 있다. 즉, 벤츄리관 내 공기 체적분율이  $n=2$ 의 경우 1.2%에서  $n=12$ 의 경우 6.8%로 선형적으로 증가한다는 것을 보여준다. 이러한 이유는 Fig. 9에서 확인할 수 있듯이  $n=12$ 개 까지는 공기구멍을 통해 나오는 공기들 사이에 간섭이 없기 때문이다.

Fig. 11, Fig. 12는 공기 공급구멍의 개수  $n=8$ 로 고정한 채 공기 공급구멍의 크기를 1부터 3(mm)까지 변화하면서 계산한 벤츄리 관 내 공기 체적분율 변화를 나타낸다. 벤츄리 관 내로 공급되는 공기량은 Fig. 9, Fig. 10의 공급 공기구멍 개수에서처럼 구멍의 직경에 선형적으로 비례하는 것을 보여주며, 직경 1(mm)의 공기 공급구멍이 8개 설치된 경우 벤츄리 관 내 공기 체적분율이 약 4.7%에서 직경이 3(mm)일 경우 16%까지 증가



**Fig. 11** Effect of hole diameter on air entrainment into the venturi. In this sample,  $\beta=0.75$ , number of holes  $n=8$ , hole position  $x=37.5$  [mm]



**Fig. 12** Effect of diameter of holes on air entrainment into the venturi. In this sample,  $\beta=0.75$ , number of holes  $n=8$ , hole position  $x=37.5$  [mm]

하는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

최적의 공기 공급 시스템으로 설계되기 위해

벤츄리 관의 기본적인 기하학적 형상 및 공급공기관의 위치, 크기, 개수 등을 변수로 2 유체 유동 해석을 수행하였으며, 해석 결과분석을 통해 아래의 몇 가지 중요한 결론을 얻었다.

(1) 벤츄리 관 내 최소 압력값이 포화증기압 보다 큰 값을 갖도록 하기 위해서는  $\beta \geq 0.75$ 의 값을 갖도록 하는 것이 필요하다.

(2) 벤츄리의 목을 지나 확대관이 시작되는 위치에 공기 공급 구멍을 설치할 경우 가장 많은 공기가 벤츄리 관으로 유입된다.

(3) 공기 공급구멍 개수와 벤츄리 관 내 공급되는 공기량 사이에는 공기 체적분율이  $n=2$ 의 경우 1.2%에서  $n=12$ 의 경우 6.8%로 선형적으로 증가한다.

(4) 공기 공급구멍 직경과 벤츄리 관 내 공급되는 공기량 사이에도 선형적인 관계가 성립하며, 1 mm의 공기 공급구멍이 8개 설치된 경우 벤츄리 관 내 공기 체적분율이 약 4.7%의 값을 가지며, 직경을 3mm까지 증가시킬 경우 공기체적분율 또한 16%까지 늘어난다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Kim, H. D., Lee, D. Y., Kim, Y. K., Jeong, W. T., Ahn, J. H. and Kim, K. C., 2011, "Numerical Simulation and Experimental Study on an Ejector System for VOC Recovery," *Journal of Korean Society of Visualization*, Vol. 9, No. 2, pp.54~60.
- (2) Yang, H. C. and Park, S. K., 2011, "Effect of Salinity on Dissolved Oxygen Characteristics in an Ejector-Aerator," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 35, No. 5, pp.640~646.
- (3) Park, S. K. and Yang, H. C., 2013, "Mixed Flow Characteristics of Aeration Process for Recirculation Aquaculture System Using Ejector," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 37, No. 9, pp. 847~854.
- (4) Terasaka, K., Hirabayashi, A., Nishino, T., Fujioka, S. and Kobayashi, D., 2011, "Development of Microbubble Aerator for Waste Water Treatment Using Aerobic Activated Sludge," *Chemical Engineering Science*, Vol. 66, pp.3172~3179.
- (5) Sadatomi, M., Kawahara, A., Matsuura, H. and Shikatani, S., 2012, "Micro-bubble Generation Rate and Bubble Dissolution Rate into Water by a Simple



- Multi-fluid Mixer with Orifice and Porous Tube," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 41, pp.23~30.
- (6) Akimi, S., Tomohiko, I., Toshihiko, Y. and Zensaku, K., 2003, "Laminarization of Micro-Bubble Containing Milky Bubbly Flow in a Pipe," 3rd European-Japanese Flow Group Meeting.
- (7) Yanqi, S. and Wenquan, N., "Simulating the Effects of Structural Parameters on the Hydraulic Performances of Venturi Tube," *Modeling and Simulation in Engineering*, Vol. 2012, Article ID458368, 2012, 7 pages.
- (8) Baylar, A., Ozkan, F. and Unsal, M., 2010, "Effects of Air Inlet Hole Diameter of Venturi Tube on Air Injection Rate," *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp.489~492.