

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.10.667>

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

다공성 재질의 목을 가진 벤츄리 관 공기방울 발생장치의 설계를 위한 유동해석[§]

윤 정 의*†

* 강원대학교 기계설계공학과

CFD Analysis for the Design of a Venturi Tube-type Air Bubble Generator with Porous Material Throat

Jeong-Eui Yun *†

* Dept. of Mechanical Design Engineering, Kangwon Nat'l Univ.

(Received June 9, 2016 ; Revised July 5, 2016 ; Accepted July 21, 2016)

Key Words: Cavitation(공동현상), CFD(전산 유동해석), Air Bubble(기포), Venturi Tube(벤츄리 관)

초록: 본 연구는 다공성 재질의 목을 가진 벤츄리관 공기방울 발생장치의 설계를 위해 수행되었다. 주어진 공급 유량 조건 하에서 다공성 재질을 통해 공급되는 공기방울의 공급 성능 최대화를 위한 벤츄리관의 길이와 직경을 결정하기 위해 2상 전산유동해석에 기초한 최적화 설계를 수행하였다. 이러한 일련의 연구 수행 결과를 통해 다공성 재질을 통해 공급되는 공기방울의 공급 성능 최대화를 위한 공급 유량과 이들 설계변수들 관계를 규명하였다.

Abstract: The goal of this study was to develop a venturi-type air bubble generator with a porous material throat. Using the two-phase multi-flow CFD analysis for the venturi tube, researchers determined the optimal design of major dimensions, such as the venturi throat length and diameter, in order to control the performance of the air bubble supply through the porous material throat in a venturi tube. Researchers then determined the relationship between the flow rate of supply water and the major design dimensions of the venturi-type air generator for maximizing the performance of the air bubble supply through the porous material throat in a venturi tube.

1. 서 론

물속에 미세한 공기방울을 공급하는 장치는 오래전부터 여러 산업 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 이를 위해 물이 흐르는 관속으로 미세한 공기를 발생 시켜 공급하는 여러 가지 아이디어가 제안되었으며,^(1~4) 그 일환으로 본 연구를 수행하였다. 가장 유사하게는 일본의 Sadatomi 등⁽³⁾에 의해 수행된 오리피스를 활용한 공기방울 발생장치가 있으며, 이는 물이 흐르는 관 내 오리피스(orifice) 판을 사용하여 유체의 속도를 증속시킨

후 증속된 위치에 발생하는 낮은 압력을 활용하여 외부공기를 미세 공기방울 형태로 관 내로 유입시키는 장치이다. 그러나 이러한 장치는 오리피스를 활용하므로 인해 유동저항에 의한 작동에 너지 손실이 상당히 커진다는 근본적인 문제점을 갖고 있다. 본 연구는 이러한 문제점을 완화 시켜줄 수 있는 시스템으로 오리피스 대신 다공성 재질의 목을 가진 벤츄리 관을 사용하는 공기방울 발생장치를 개발하고자 수행하였다.

Fig. 1은 본 연구에서 개발하고자 하였던 다공성 재질의 목을 가진 벤츄리관을 사용하는 공기방울 발생장치를 보여주는 그림이다. 그림을 살펴보면 벤츄리관으로 공급되는 유체가 벤츄리관의 목을 지나면서 유속이 빨라짐에 따라 목 부위에서 유체의 압력이 대기압 이하로 떨어짐에 따

§ 이 논문은 2016년도 대한기계학회 강원지회 춘계학술대회(2016. 5. 20., 한라대학교)발표논문임.

† Corresponding Author, jeyun@kangwon.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

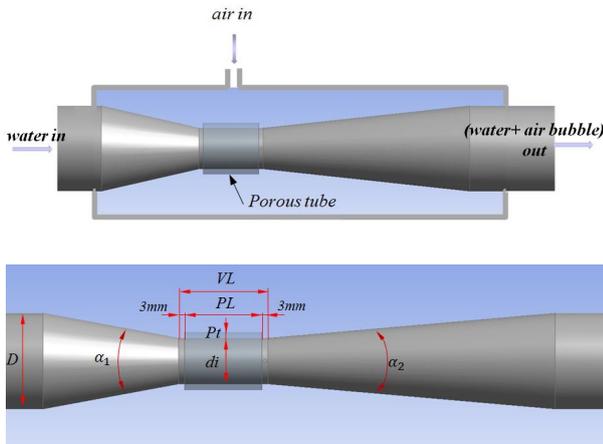


Fig. 1 Venturi type air bubble generator with porous material throat and main parameters for optimal design

라 다공성 재질로 만들어진 목 부위를 통해 외부의 공기가 방울형태로 벤츄리관 내로 유입되어 물과 섞이는 현상이 일어난다.

본 연구는 주어진 벤츄리관의 목 부분을 구성하는 부분에 사용하는 다공성 재질이 정의될 경우(다공성 재료의 평균 다공 직경, 공기 유동에 대한 저항계수) 공급입구 유량에 대해 다공성 목을 통해 벤츄리관 내로 흡입되는 공기를 가장 효율적(가장 적은 동력으로 가장 많은 양을 흡입함)으로 만들어주는 벤츄리 목의 길이 VL 과 목의 직경 d_i 를 다상유동 해석을 이용한 최적화 설계를 통해 구하는 것을 목적으로 수행하였다.

2. 수치해석

Fig. 1은 다공성 재질의 목을 가진 벤츄리관을 설계하기 위해 결정해야 할 주요 설계 변수 D , d_i , α_1 , α_2 , Pt , PL , VL 을 나타내고 있다. 이들 변수중 벤츄리관 흡입 및 출구 각 α_1 , α_2 는 ISO 5167-4 벤츄리 설계 추천 자료에 근거하여 $\alpha_1 = 21^\circ$, $\alpha_2 = 10^\circ$ 로 결정하였으며, 벤츄리관의 직경 D 는 실용화 측면에서 50 mm로 고정하여 설계를 수행하였다. 그리고 다공성 재질관의 두께 Pt 는 재질의 강성 측면을 고려하여 3 mm로 결정하였다. 이 경우 실제적으로 벤츄리관 구성을 위해 결정해야 할 주요 설계 변수는 벤츄리관의 목 길이 VL 과 목 직경 d_i 이 된다. 이들 설계변수 값들은 유량 $30 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 일정하게 공급되는 조건하에서 다공성 목을 통해 벤츄리관 내로 흡입되는

공기를 가장 적은 동력으로 가장 많은 양을 흡입할 수 있는 값을 가질 수 있도록 표면반응 최적화에 기반을 둔 ANSYS사의 Design Exploration을 사용하여 최적화 설계를 통해 결정하였다. 전산 유동해석 시 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. 그리고 해의 수렴성 및 정확성을 확보하고자 공기 공급이 되는 목 주변을 중심으로 약 300만개의 격자를 조밀하게 배치하였으며, 벽면에는 계산의 정확성을 위해 5층의 프리즘 격자 층을 배치하여 CFX 프로그램에서 추천하는 y^+ 값이 300 이하의 값을 유지하도록 구성하였다. 해석 시 경계 조건으로 벤츄리관 입구에서는 25°C 물이 $30 \text{ m}^3/\text{hr}$ 로 공급되는 조건을, 출구는 대기압 조건인 것으로 해석을 수행하였다.

다공성 재질로 만들어져 공기가 흡입되는 벤츄리관 목의 경우 공기 유동 시 저항이 발생하게 되며 이러한 공기 유동 저항에 대한 적절한 모델이 요구된다. 본 연구에서 사용한 CFX 유동해석 프로그램의 경우 다공성 물질의 유동 저항을 다양한 형태의 수식으로 momentum source항으로 처리하는 방식을 취하고 있으며, 본 연구에서는 아래식 (1)~(3)과 같은 등방성 다공 물질에 사용하는 각 방향의 momentum source항 $S_{m,x}$, $S_{m,y}$, $S_{m,z}$ 식을 채택하였다. 이 식들은 사용 유체의 점도 μ , 밀도 ρ , 그리고 속도($\vec{U} = U_x \hat{i} + U_y \hat{j} + U_z \hat{k}$)의 향으로 표현되며, 여기서 k_{perm} 은 점성 손실(viscous loss)의 크기를 나타내는 계수이며, k_{loss} 는 관성 손실(inertia loss)을 나타내는 계수이다.

$$S_{m,x} = -\frac{\mu}{k_{perm}}U_x - k_{loss}\frac{\rho}{2}|\vec{U}|U_x \quad (1)$$

$$S_{m,y} = -\frac{\mu}{k_{perm}}U_y - k_{loss}\frac{\rho}{2}|\vec{U}|U_y \quad (2)$$

$$S_{m,z} = -\frac{\mu}{k_{perm}}U_z - k_{loss}\frac{\rho}{2}|\vec{U}|U_z \quad (3)$$

실험값들을 사용하여 다공성 물질의 유동 저항을 나타내는 이들 계수들 값과의 관계식을 구

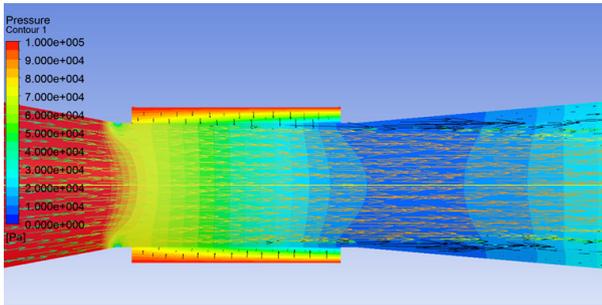


Fig. 2 Velocity vectors and pressure distribution of water and air bubble in venturi tube

하고자 할 때 위의 식으로부터 momentum source 항을 작동유체가 다공물질의 두께(L)을 통과할 때 나타나는 압력 차(Δp)로 정의한 후 아래의 식 (4) 형태로 변형하여 C1(linear resistance coefficient), C2(quadratic resistance coefficient)값을 결정하는 방법을 취한다.⁽⁵⁾

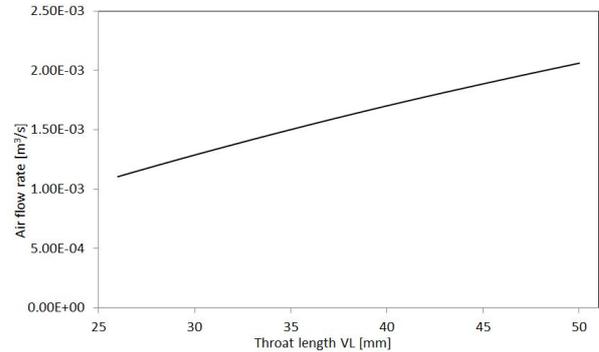
$$\frac{\Delta p}{L} = -C_1 U - C_2 U^2 \quad (4)$$

본 연구에서 사용한 다공성 재질의 경우는 평균 다공 직경(mean pore diameter) $10 \mu m$ 의 것으로 업체에서 제공하는 실험 데이터에 의존하여 $C1=16,645,455 [kg/(m^3 s)], C2=9,875,000 [kg/m^4]$ 을 사용하여 모델링하였다. 그리고 해석 시 경계 조건으로는 다공성 재질로 만들어져 공기가 흡입되는 벤츄리관 목의 바깥 표면이 $25^\circ C$ 공기가 대기압으로 일정하게 유지되는 것으로 주었다.

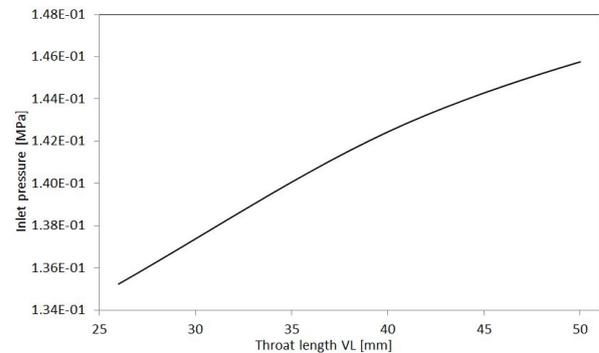
3. 해석결과 및 고찰

Fig. 2는 벤츄리관을 통해 빠른 속도로 물이 흐를 때 다공성 재질로 만들어진 벤츄리 목을 통해 흡입되는 공기의 속도 및 압력분포를 다상 유동해석을 통해 계산한 결과이다. 그림을 살펴보면 다공성 목으로 인해 벤츄리관 내의 최소 압력 지점은 목을 지나 관이 확장되는 지점에서 형성되며, 이로 인해 다공성 관을 통해 공급되는 공기는 주로 출구 측에 집중되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 이렇게 벤츄리관 내로 흡입된 공기는 뒤쪽으로 떠내려가면서 물과 점차 혼합되는 현상을 보여준다.

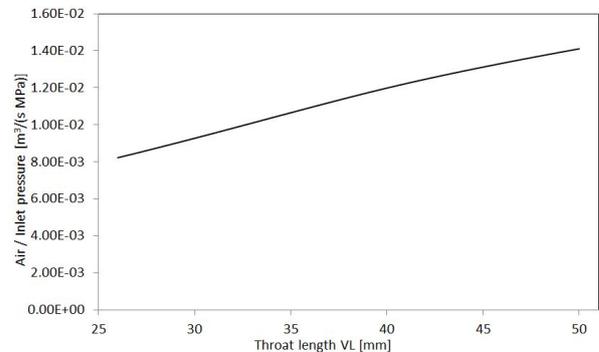
Fig. 3은 벤츄리관 입구에서의 유체(물 $25^\circ C$)를 $30m^3/hr$ 로 일정하게 공급되는 조건하에서 벤츄리관의 다공성 목 길이 VL를 변화 시켰을 때 목



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 Variation of air flow rate, inlet pressure and air per inlet pressure as function of venturi throat length. Volume flow rate = $30m^3/hr$, venturi throat diameter = 30mm

을 통해 흡입되는 공기량과 벤츄리관 입구에서의 유량을 $30 m^3/hr$ 로 일정하게 공급하기 위한 펌프 공급압력(inlet pressure)의 변화에 대한 유동해석 결과를 그려 놓은 그림이다. Fig. 3(a) 그림을 살펴보면 목 길이가 증가하면 공기 흡입 면적이 함께 증가하므로 흡입 공기유량 또한 함께 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 목 길이가 증가 할 경우 유동저항이 선형적으로 증가하므로 벤츄리관 입구의 유량을 $30m^3/hr$ 로 일정하

게 공급하기 위한 펌프 공급압력(inlet pressure)의 또한 Fig. 3(b)에서처럼 목 길이와 함께 증가하는 경향을 가지게 된다. 그리고 벤츄리관을 통한 흡입공기량의 생산 효율은 흡입공기량을 이를 생산하기 위해 공급한 펌프출력으로 나누어주면 파악할 수 있으며, 해석과 같이 벤츄리관 입구에서의 유량을 일정하게 유지할 경우 펌프의 출력은 공급압력에 비례하므로 (펌프 출력=유량×공급압력) 그림에서 흡입공기량을 입구 펌프 압력 값으로 나누어준 값을 통해 벤츄리관을 통한 흡

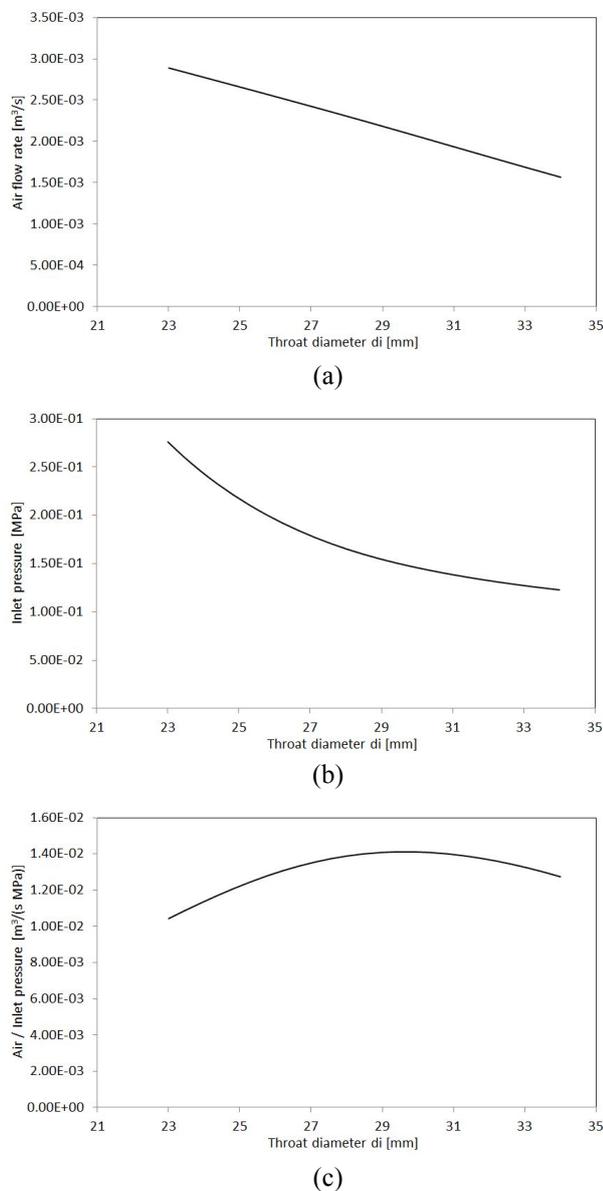


Fig. 4 Variation of air flow rate, inlet pressure and air per inlet pressure as function of venturi throat diameter. Volume flow rate= $30\text{m}^3/\text{hr}$, venturi throat length= 50mm

입공기 생산 효율을 판단할 수 있다. Fig. 3(c)는 벤츄리 목 길이의 증가에 따른 흡입공기 생산 효율을 확인하기 위해 흡입공기량을 입구 압력 값으로 나눈 결과를 보여주고 있다. 그림을 살펴보면 흡입공기 생산율은 관 길이와 함께 증가한다는 것을 확인할 수 있으며, 이로부터 설치공간상의 제약문제가 없다면 목의 길이를 증가하면 흡입공기량의 생산율을 높일 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 벤츄리관 입구에서의 유체(물 25°C)를 $30\text{m}^3/\text{hr}$ 로 일정하게 공급하는 조건하에서 벤츄리관의 다공성 목 직경 d_i 를 변화 시켰을 때 목을 통해 흡입되는 공기량과 벤츄리관 입구에서의 유량을 $30\text{m}^3/\text{hr}$ 로 일정하게 공급하기 위한 펌프 공급압력(inlet pressure)의 변화에 대한 유동 해석 결과를 그려 놓은 그림이다. Fig. 4(a)를 살펴보면 목 직경이 줄어들 경우 공기 흡입 단면적이 감소함에도 불구하고 흡입공기량이 증가하는데 이러한 이유는 Fig. 2에서 보여주듯이 벤츄리관 목 단면적이 감소함에 따라 목에서 유속이 급격하게 증가하므로 이로 인해 다공성 목의 외부와 관 내부의 압력차가 급격하게 증가하기 때문이다. Fig. 4(b)는 벤츄리관의 직경 d_i 를 변화 시켰을 때 벤츄리관 입구의 유량을 $30\text{m}^3/\text{hr}$ 로 일정하게 공급하기 위한 펌프 공급압력의 변화를 계산한 결과로 목 직경 감소에 따른 펌프 공급압력은 흡입공기량이 증가하는 것보다 더 급격하게 증가하는 경향을 가지고 있다(공급압력은 층류의 경우 직경의 4승에 반비례). Fig. 4(c)는 벤츄리 목 길이의 증가에 따른 흡입공기 생산 효율을 확인하기 위해 흡입공기량을 입구 압력 값으로 나눈 결과로 Fig. 3(c) 목의 길이 계산결과와는 달리 최고가 되는 특정 값이 존재한다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 앞에서 언급하였듯이 목의 직경 감소에 따른 흡입공기량 증가 보다는 펌프 공급압력이 가파르게 증가하기 때문이다.

Fig. 5는 벤츄리 관 설계에 중요한 두 개의 변수인 목 길이 VL 및 직경 d_i 변화에 대한 반응표면을 계산한 결과이다. 먼저 Fig. 5(a)에서 공기 체적 분율(air volume fraction)은 다공성 재질로 만들어진 목을 통해 흡입되는 공기량을 벤츄리관 입구에서 공급하는 유량으로 나누어 무차원화시킨 값이다. 공기 체적 분율과 관련된 결과를 살펴보면 목의 길이에 비례하며 목 직경에 반비례

하여 변화한다는 것을 확인할 수 있다. 그리고 흡입공기량은 주어진 설계 범위내에서 공급유량의 약 30%까지 도달한다는 것을 확인할 수 있다. Fig. 5(b)는 설계변수들의 변화에 따른 펌프공급

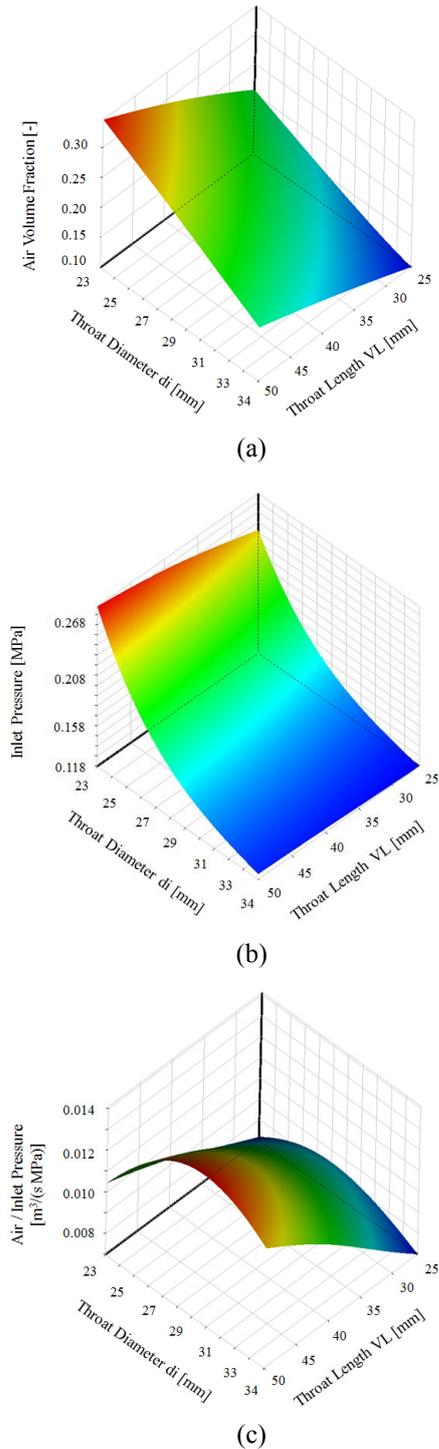


Fig. 5 Response surfaces for air volume fraction, inlet pressure and air per inlet pressure as function of venturi throat length and diameter. Volume flow rate=30m³/hr

압력의 반응표면을 계산한 결과로 공급압력은 목 길이에 비례하여 목 단면적에는 반비례하여 증가하는 경향을 확인할 수 있으며, 길이 보다는 단면적에 민감하게 반응함을 확인할 수 있다. Fig. 5(c)는 벤츄리 목을 통해 흡입되는 공기의 생산 효율을 확인하기 위해 흡입공기량을 입구 압력 값으로 나눈 결과를 사용하여 구한 반응표면으로 ANSYS사의 Design Exploration에서 제공

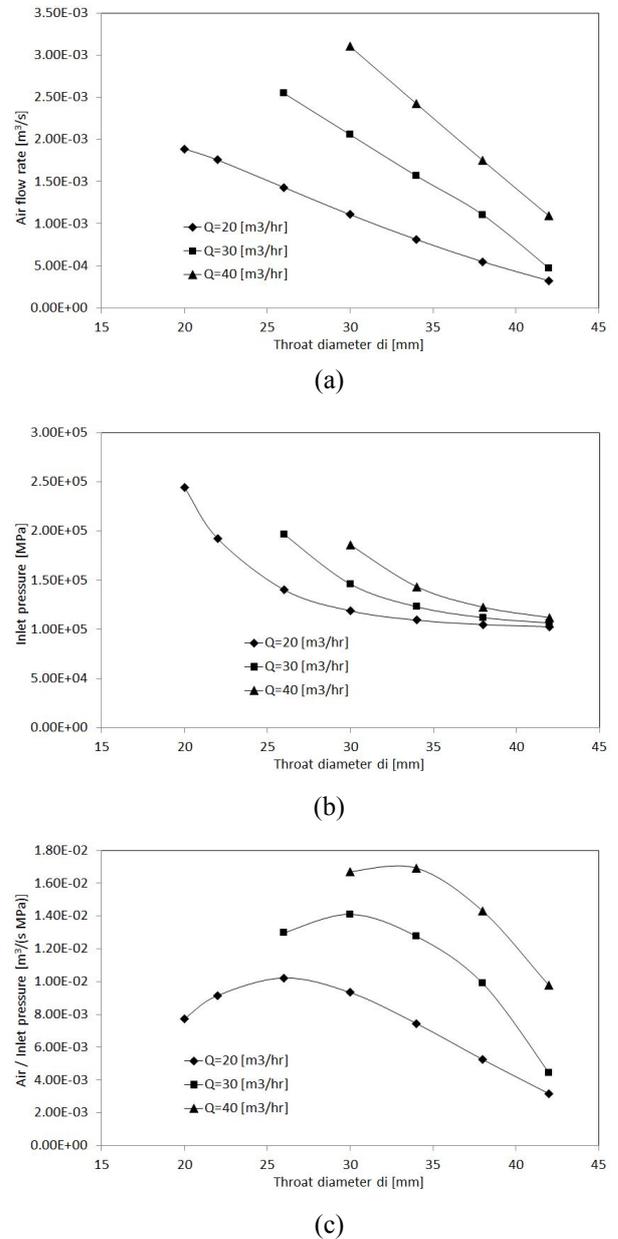


Fig. 6 Variation of air flow rate, inlet pressure and air per inlet pressure for inlet water flow rate as function of venturi throat diameter. Venturi throat length VL=50mm, venturi inlet diameter D=50mm

하는 Screening 최적화 탐사방법을 통해 벤츄리관에서 캐비테이션이 발생하지 않는 구속조건(목에서 최소압력이 25°C 물의 포화수증기압 이하로 내려가지 않음) 하에서 효율이 최고가 되는 설계값은 VL=50mm, di=30mm임을 확인하였다.

Fig. 6은 유량변화에 따른 흡입공기량의 변화를 살펴보고자 흡입공기량에 민감한 변수인 목 직경을 바꾸어 가면서 유동해석을 통해 계산한 결과이다. 그림을 살펴보면 유량을 증가시키면 공급압력도 증가하지만 흡입공기량 또한 늘어나 전체적인 흡입공기량 생산 효율 또한 증가한다는 것을 확인할 수 있으며, 각각의 유량에 대해 최고 효율점이 존재한다는 것을 알 수 있다. 그리고 벤츄리관의 입구 측 공급 유량이 증가하면 흡입공기량의 생산효율이 최대가 되는 목 직경 또한 증가한다는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

다공성 재질의 목을 가진 벤츄리관의 효율적인 설계를 위해 수행한 일련의 연구를 통해 아래의 결론을 얻었다.

(1) 벤츄리관의 다공성 재질로 만들어진 목 길이가 증가하면 공기 흡입 면적이 함께 증가하므로 흡입 공기유량 또한 선형적으로 증가한다.

(2) 벤츄리관의 목 직경은 흡입공기량에 민감하게 반응하는 설계변수로서, 목 직경이 감소하면 흡입공기량이 증가하지만 펌프 공급압력 또한 증

가하여, 흡입공기량의 생산효율이 최대가 되는 특정 직경이 존재한다.

(3) 벤츄리관의 입구 측 공급유량이 증가하면 흡입공기량의 생산효율이 최대가 되는 목 직경 또한 증가한다.

참고문헌 (References)

- (1) 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.
- (2) 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.(1)
- (3) 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.
- (4) Yun, J. E. and Kim, J. H., 2014, "Development of Venturi System for Microbubble Generation," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 38, No. 10, pp. 865~871.
- (5) ANSYS, "CFX Ver15 User's Manual," 2015.