

고압 적용용 초소형 감압기 설계를 위한 유동 해석 및 최적 설계

이원준* · 백종태** · 윤 린*†
* 한밭대학교 기계공학과, ** (주) 카이렌

Analysis of Flow Characteristic and Optimum Design for Subminiature Pressure Reducer Under High Pressure

WonJun Lee*, JongTae Baek** and Rin Yun*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Hanbat Nat'l Univ.

** CAIREN Co., Ltd.

(Received October 24, 2016 ; Revised May 20, 2017 ; Accepted May 23, 2017)

Key Words: CFD Simulation(유동 해석), Optimization(최적화), Oxygen Respirator(산소 호흡기), Pressure Reducer(감압기)

초록: 산소호흡기의 실질적인 개발, 제작 및 안정성 파악을 위해서는 산소유동의 이론적인 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 상용 해석 툴인 COMSOL 멀티피직스를 이용하여 산소호흡기의 사용시간 연장을 위한 고압용 감압기 설계를 진행하였다. 기존 감압기의 오리피스 내 핀 형태의 실린더 삽입 방법을 제안했으며, 새로 제시한 오리피스에 대해 3 mm, 6 mm 그리고 9 mm의 길이에서 유동 특성 분석 및 최적 길이를 도출하였다. 기존 감압기에서 토출되는 질량유량 0.028 kg/s을 기준으로, 최대 감압기 입구 압력인 300 bar 경우 약 33%, 감압기 입구 압력조건인 50 bar, 75 bar 그리고 100 bar에서는 평균 32.7% 내외로 기존 질량조건을 만족하였다. 가공 용이성을 고려할 때 기존의 감압기와 길이가 동일하여 별도의 가공이 필요 없는 3 mm가 가장 적합하다고 판단된다.

Abstract: A theoretical study on oxygen flow is fundamental to comprehend the practical production of an oxygen respirator and its stability. In this study, an orifice-type pressure-reducing component was designed for the newly developed oxygen respirator, using the commercial CFD tool, COMSOL Multiphysics, which increases its operational time compared to the existing component. The orifice was optimized by changing the length by 3, 6, and 9 mm within the entire computational domain of the oxygen respirator. Based on an oxygen flow rate of 0.028 kg/s, the oxygen respirator equipped with the newly developed orifice satisfied the flow rate within 33% for a respirator inlet pressure of 300 bar, and within 32.7% for 50, 75, and 100 bar. In terms of component manufacturing, the orifice length was selected as 3 mm, which removes additional changes to the existing component.

- 기호설명 -

C_p : 정압비열
 F : 힘(volume force vector)
 I : 난류 강도
 Ma : 마하수
 P : 압력

S^t : 난류모델에서의 수정 와도
 T : 온도
 d : 벽면과의 거리
 p : 압력
 q : 단위 면적당 열 전달량
 t : 시간
 u : 속도
 μ : 동 점성 계수

† Corresponding Author, yunrin@hanbat.ac.kr

- ρ : 밀도
 ν : 점성
 ν^f : 난류모델에서의 수송량
 γ : 비열비

상·하첨자

- T : 난류유동
 w : 벽면
 0 : 초기 값

1. 서 론

최근 우리나라에서 건축물의 초고층화, 지하심층화, 복합화 등으로 인해 화재가 일어날 수 있는 요인이 다양하게 증가하고 있다. 또한 산업현장에서 질식으로 인한 사망사고가 빈번하게 발생되고 있다. 화재 또는 유독가스 유출로 야기되는 질식문제를 해결하기 위해서는 기존의 방독면 및 공기호흡기가 사용되고 있다. 하지만 방독면은 밀폐공간에서 사용이 불가한 문제가 있으며, 기존의 공기호흡기는 고가이면서도 사용이 불편한 문제가 대두되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 핵심 기술인 웨어러블 가능 기술, 사용시간 연장 기술, 사용 간편성 기술 등으로 세계적으로 산소호흡기 기술에 대해 관심이 높으며, 기술획득을 위해 많은 개발 시도를 하고 있는 추세이다. 산소호흡기는 산소가 충전된 산소탱크와 탱크로부터 배출된 산소를 크게 감압하여 호흡이 가능한 상태로 만들어주는 감압기로 구성되어 있고, 감압기는 다수의 수동 및 능동형 오리피스로 구성되어 있다. 실질적인 제작 및 개발과 동시에 제작 중인 산소 호흡기의 안정성을 파악을 위해, 산소호흡기 부품인 오리피스를 포함한 감압기 유로의 산소유동에 대한 이론적인 연구가 반드시 필요하다.

Shrouf⁽¹⁾은 오리피스 직경 0.010"과 0.020"의 작은 오리피스 내에서 질소의 유동 특성 대한 실험 연구를 수행하였다. 그 결과 질소의 압력에 따른 유량 특성을 파악하였고, RFO(Restrictive flow orifice)의 새로운 디자인을 제시하였다. Min and Kim⁽²⁾은 CFD 모델을 통하여 2단 오리피스에서의 난류유동을 정상 상태와 비정상상태의 맥동유동에 대하여 고찰하였으며, 그 결과 오리피스의 높이가 관의 반경에 가까울 경우 2단 오리피스에도 압력강하가 많이 발생하고, 높이가 낮을 경우 순

간적으로 압력강하가 발생하지만 유동이 진행할수록 회복됨을 제시하였다. Shah 등⁽³⁾은 오리피스 유동을 OpenFOAM을 이용하여 예측하였으며, 기존 문헌들의 실험 결과 값과의 비교를 통하여 검증하였다. Roul and Dash⁽⁴⁾는 수치적 모델링을 통하여 오리피스를 지나는 물의 단상 유동과 공기-물의 혼합물 유동에서의 압력강하를 연구하였으며, 면적 비 증가에 따라 압력강하는 감소하며 수축계수는 레이놀즈 수가 5×10^4 이상에서는 레이놀즈수와 무관하다는 것을 밝혔다. Siba 등⁽⁵⁾은 레이놀즈수 5000, 10000, 그리고 15000에서 오리피스 내 유동을 파악하였으며, 차압은 급하게 증가함을 상용 프로그램 ANSYS를 이용한 수치적 해석을 통하여 밝혔다.

본 연구에서는 휴대형 산소호흡기의 사용시간 연장을 위하여 기존보다 고압의 산소탱크를 연결하여 활용할 수 있는 고압 적용용 초소형 감압기의 설계하고자 한다. COMSOL 멀티피직스를 사용하여 현재 200 bar 내에서의 감압기 내 고압 산소 및 오리피스와 같은 노즐 내부에서의 유동특성을 파악하였다. 그리고 이를 바탕으로 300 bar 이상의 고압 적용용 감압기에 적용할 수 있는 감압기 내 오리피스의 크기를 이론적인 모델을 이용하여 최적화하고 유동과 압력 특성을 분석하였다.

2. 연구 방법

2.1 지배방정식

감압기 내 음속이상의 높은 속도를 갖는 산소의 유동해석을 위해 COMSOL 멀티피직스 내 high mach number 모델을 기반으로 난류 모델 그리고 열전달모델의 연성을 통해 해석을 수행하였다. 이때, high mach number 모델은 초크유동(choked flow) 및 충격파(shock wave) 등 음속이상의 압축성 유동에서 발생할 수 있는 다양한 현상을 해석하기 위해 개발 되었다. 난류 모델로는 Spalart - Allmaras 모델, 그리고 열전달 모델은 Kays - Crawford 모델을 사용하였다. 식 (1), 식 (2) 그리고 식 (3)은 각각 운동량 방정식, 에너지 방정식 그리고 난류 모델 방정식이다.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pI + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F - \frac{2}{3}(\mu + \mu_T)(\nabla \cdot u)I \quad (1)$$

$$d_z \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + d_z \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = d_z Q + q_0 + d_z Q_p + d_z Q_{cd} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v^t}{\partial t} + (u \cdot \nabla) v^t = 0.1355 S^t v^t - 3.2391 f_w \left(\frac{v^t}{l_w} \right)^2 + \frac{3}{2} \nabla \cdot ((v + v^t) \nabla v^t) + 0.933 \nabla v^t \cdot v^t \quad (3)$$

식 (1)에서 ρ 는 산소의 밀도이며, μ 는 동점성 계수를 나타낸다. 식 (2)는 에너지방정식을 나타낸다. Q_{cd} 와 Q_p 는 식 (4)와 식 (5)와 같이 정의되며, α_p 는 온도와 밀도의 함수로 정의된다. 식 (3)에 나타낸 length scale l_w 는 식 (6)과 같이 정의되며 G 는 벽면거리의 역수를 나타낸다. 그리고 식 (7) f_w 은 경계층의 외측영역에 대한 함수이며, 여기에서 g 와 r 은 f_w 을 조정하기 위한 함수이다. 식 (8)은 압축성유동에서 입구 압력 P_{in} 과 출구 압력 P_{out} 의 관계식을 나타낸다. γ 은 비열비 그리고 Ma 는 마하수를 나타내며, $Ma = 1$ 일 때, Choked flow 조건을 형성한다.

$$Q_{cd} = \mu \left((\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) I \right) : \nabla u \quad (4)$$

$$Q_p = \alpha_p T \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u \cdot \nabla p \right), \alpha_p = - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (5)$$

$$l_w = \frac{1}{G} - \frac{l_{ref}}{2} \quad (6)$$

$$f_w = g \left(\frac{65}{g^6 + 64} \right)^{1/6}, \quad (7)$$

$$g = r + 0.3(r^6 - r), \quad r = \frac{v^t}{0.1681 S^t d^2}$$

$$\frac{P_{out}}{P_{in}} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} Ma \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (8)$$

2.2 경계조건 및 수치방법

Fig. 1은 기존 감압기의 유로를 나타낸다. 산소 탱크로부터 유입된 산소는 복잡한 다수의 오리피스 형 유로를 지나면서 대기압 상태까지 감압된다. 본 연구에서는 해석의 용이성을 위해 Fig. 1에 나타낸 3차원 형상의 산소 유동 공간을 Fig. 2(a)와 같이 2차원으로 모델링하여 해석을 진행하였다. 오리피스 출구 부분을 기준으로 각 위치별로 자료 분석 및 검토를 수행하였으며, 각 위치를 1번에서 6번까지로 나타냈다. 감압기의 유로는 Fig. 2(a)에 화살표로 나타낸 바와 같이 1번 감압기 입구에서 부터 2번을 지나 중간 산소버퍼 공간으로 유입되며, 그 후 3번 위치를 통하여 챔퍼 부분으로 유입된다. 산소통과 연결된 본 감압

Table 1 Specifications for simulation

Simulation program	COMSOL Multiphysics
Fluid flow model	High mach number flow, Spalart - Allmaras
Heat transfer model	Kays - Crawford
Boundary conditions	Inlet mach number : 0.25 Inlet pressure : 50 - 300 bar Inlet total temperature : 500 R Outlet normal stress : 1 atm
Oxygen property	Ratio of specific heats : 1.395 Specific gas constant : 260 J(kg·K)

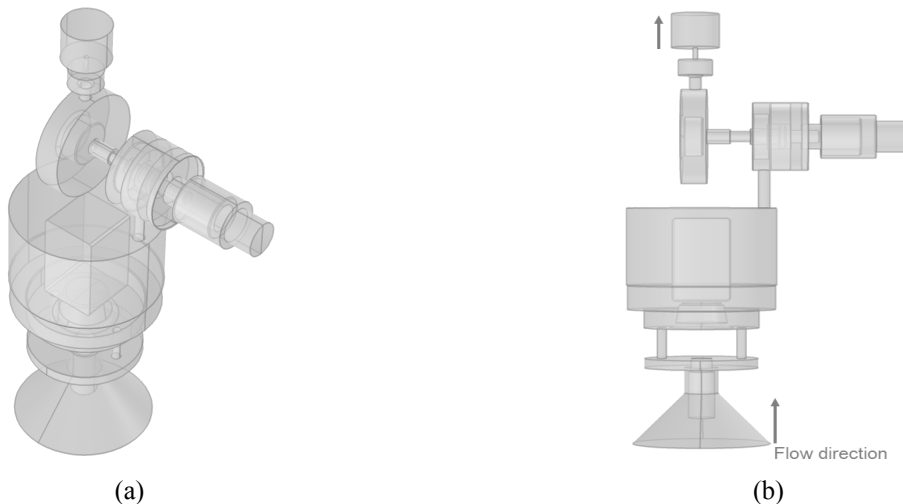


Fig. 1 Geometry for high pressure oxygen flow in subminiature pressure reducer

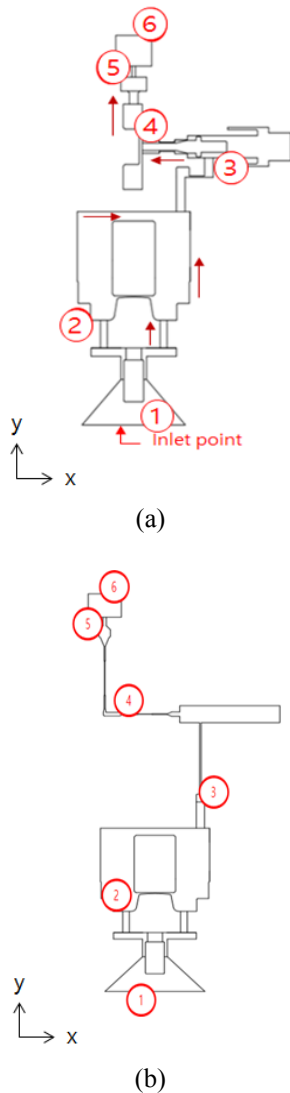


Fig. 2 (a) Geometry of the subminiature pressure reducer (b) Geometry for the present simulation

기는 시간에 따라 입구 압력이 감소하며, 댐퍼 부의 스프링에 의한 능동적인 유로 면적 조절작동을 통하여 토출 유량을 일정하게 유지한다. 유량 조절부인 댐퍼 부 내에 있는 4번을 지나 5번 위치 그리고 최종 토출 단계인 6번으로 흐른다.

3차원 현상을 2차원으로 해석하는 과정에서 3번 위치에서 환형 입구조건으로 들어가는 부분과 댐퍼 부의 수치적 묘사를 위해 4번 부분을 다수의 오리피스로 구성한 후 해석을 진행하였다. Fig. 2(b)는 댐퍼 부의 해석 용이성을 위해 다수의 오리피스로 변형하여 적용한 모델을 나타낸다.

현 감압기에서 측정된 유량과 시뮬레이션 결과를 비교하기 위해 입구 압력이 200bar일 때 측정된 감압기 출구 부 체적유량 4 LPM을 기준 유량

Table 2 Detail specifications for validation of the present model

Simulation program	COMSOL Multiphysics
Fluid flow model	High mach number flow, Spalart-Allmaras model
Heat transfer model	Kays - Crawford model
Orifice size	Inlet diameter : 1/4" Orifice diameter : 0.010" RFO wall thickness : 0.050"
boundary conditions	Inlet total pressure : 97 - 1828 psig Inlet total temperature : 500 R Outlet Normal stress : 1 atm
Nitrogen property	Rato of specific heats : 1.4 Specific gas constant : 297 J/(kg·K)

으로 설정하였다. 다만 본 해석의 경우 실제 3차원현상을 2차원 현상으로 모델링하는 과정에서 깊이 방향으로는 단위 길이로 설정되었기 때문에, 2차원의 해석 결과와 측정된 출구 부의 체적 유량의 비교를 위해서 현 감압기에서의 토출 속도 및 밀도를 기준으로 산정한 질량유량 0.028 kg/s를 기준 값으로 설정하였다.

입구 압력 300 bar에서 기존 감압기의 출구조건을 만족하는 감압기 설계를 위해 복잡한 댐퍼 부분형을 최소화하고 비교적 수정이 용이한 2번 위치에서 형상을 변경하여 단계별로 최적화를 진행하였다. Table 1은 해석대상으로 유입되는 산소의 물성 값 및 해석조건을 나타낸다. 감압기 내 산소 유로를 해석하기 위한 격자는 복잡한 형상에 적합하고 생성하기가 쉬운 triangular 격자로 구성하였으며, 음속 조건에서 산소 유동을 해석하기 위해 10만 여 개의 격자로 구성하였다. 해석은 비정상 상태로 진행하였고, 일정 계산 시간 후 속도 및 압력 분포에 더 이상 변화가 없는 시점에서 계산을 종료하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 수치 해석 결과의 검증

본 감압기의 해석에 앞서 해석에 대한 검증은 위해 Shrouf⁽¹⁾의 오리피스 내 질소를 이용한 유동 실험 연구결과와 비교하였다. Table 2는 기존 문헌과의 비교를 위한 본 연구에서의 해석 조건이다. Fig. 3(a)는 Shrouf의 문헌⁽¹⁾에서 사용한 오리

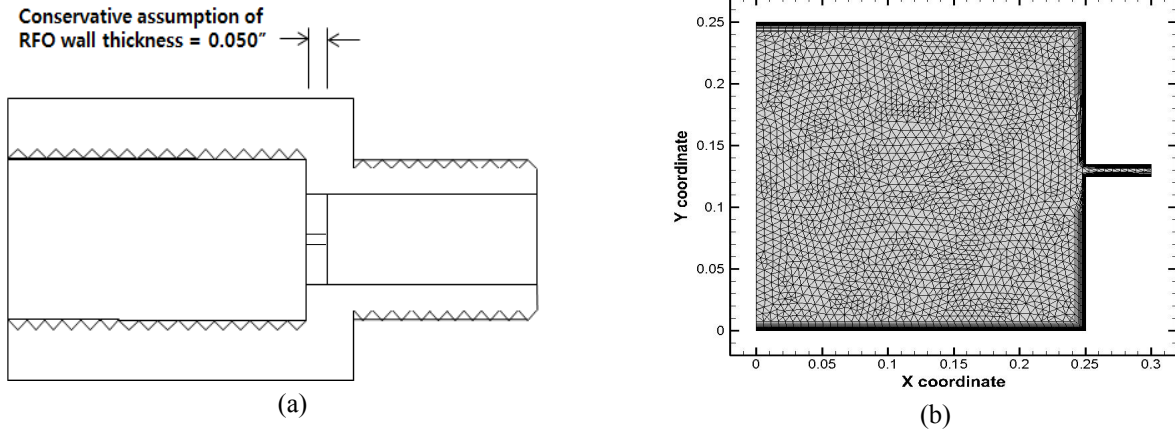


Fig. 3 Geometry for validation of the present model (a) Shrouf⁽¹⁾ (b) Present model

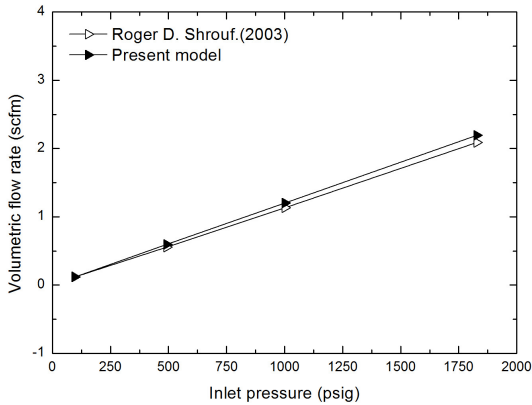


Fig. 4 Variation of volumetric flow rate with model

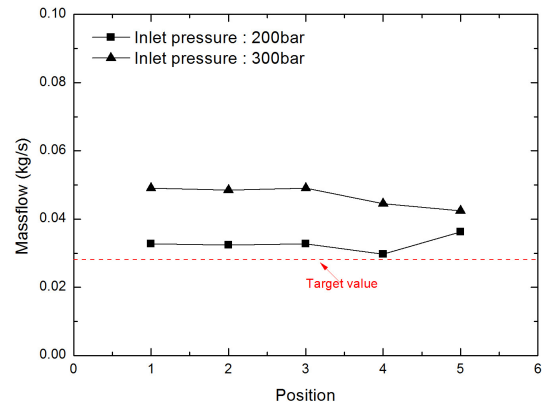


Fig. 5 Variation of Mass flow with inlet pressure

피스를 나타내며, 입구 직경은 1/4", 오리피스의 직경 및 길이는 각각 0.010"와 0.050"이다. Fig. 3(b)는 COMSOL 멀티피직스 내 격자 생성 기능을 이용한 Shrouf⁽¹⁾의 오리피스 형상을 나타낸다.

Fig. 4는 기존 문헌과 본 모델링에서 오리피스 입구 압력에 따른 출구 유량의 결과를 비교한 그림이다. 기존 문헌의 실험 결과와 본 연구의 모델링 결과 값의 오차율은 평균 7.00% 내에서 만족하고 있다. 해석 검증 결과를 통해서 본 연구의 모델링은 압력변화에 대해서 실험 결과를 유사하게 예측함을 볼 수 있다. 다만 본 모델링의 결과가 문헌의 유량 결과보다 다소 높게 측정되는 경향을 나타내기 때문에 실제 감압기의 해석 검토 시 고려하여야 할 사항으로 판단된다.

3.2 현 감압기 내에서의 산소 유동 특성

Fig. 5는 현 감압기에서 목표 기준 값에 대한 200 bar와 300 bar에서의 질량유량을 나타낸다. 본 시뮬레이션과 목표 값과의 비교 결과 200 bar의

경우 1번 위치부터 5번 위치에서 평균 약 12% 이내의 오차범위에서 예측하고 있으며, 300 bar에서의 질량유량은 목표 값에 비하여 평균 0.018 kg/s 가량 높은 해석결과를 나타냈다.

3.3 입구압력 300 bar 내에서의 오리피스 크기 변경에 따른 유동 특성

현 감압기 내 간단한 구조 변경을 통하여 입구 압력 300 bar 내에서도 적용할 수 있는 감압기의 설계를 위해서는 비교적 단순한 형상을 가지고 있는 감압기 초입 부분에서 큰 감압이 필요하며, 효과적인 유동 면적 감소 방법이 요구되어진다. 이에 따라 본 연구에서는 기존 감압기의 구조를 크게 바꾸지 않으면서 비교적 가공이 용이한 감압기 초입 부분 즉, Fig. 6(a)에서 빗금으로 표시된 직경 0.8 mm의 원형 통로에 직경 0.78 mm의 실린더 형태의 핀을 Fig. 6(b)와 같이 삽입하여, 0.02 mm의 틈을 가진 환상공간을 만듦으로써 유동면적을 기존 대비 95.06%이상 감소시켰다. 핀

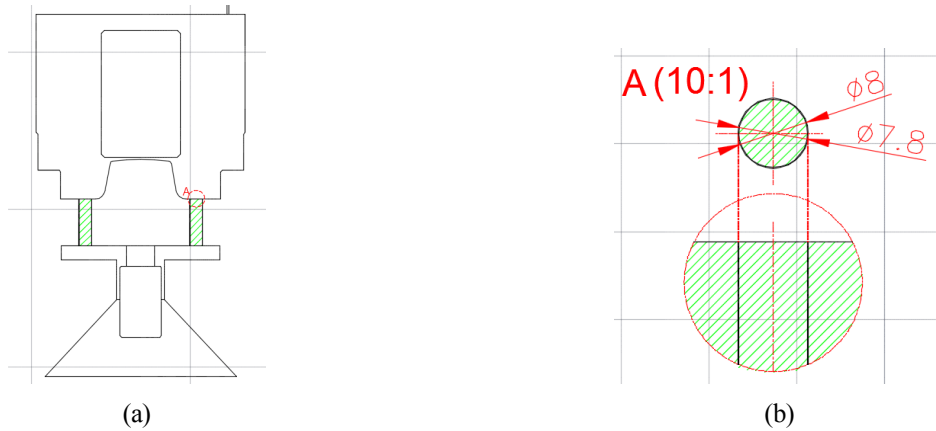


Fig. 6 Geometry of an annular type orifice

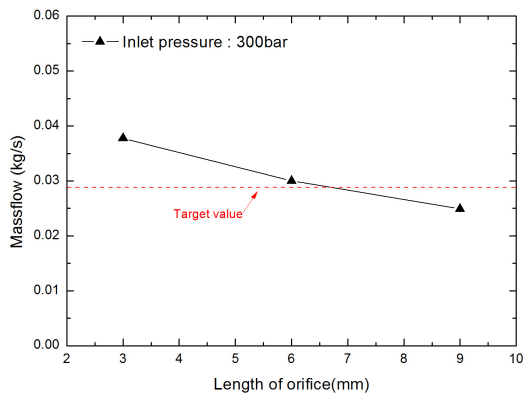


Fig. 7 Variation of mass flow

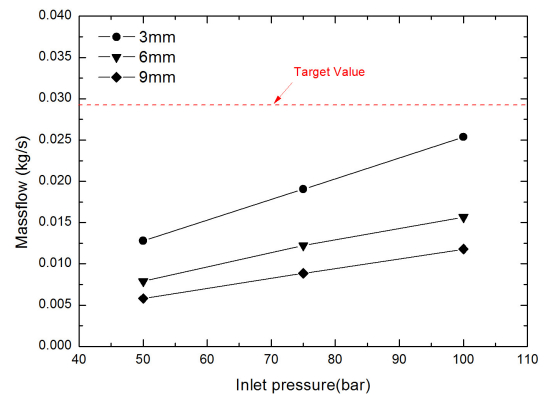


Fig. 8 Variation of mass flow with orifice length

을 삽입한 환상 형태의 오리피스의 길이에 따른 전체 질량 유량의 특성을 파악하고자 오리피스의 길이 3 mm, 6 mm 그리고 9 mm에서 해석을 진행하였으며, 입구 압력은 300 bar로 동일하게 유지하였다. Fig. 7은 300 bar 내에서 핀을 삽입한 오리피스의 길이에 따른 질량유량 결과를 보여준다. 3 mm에서 9 mm까지 3 mm 간격으로 오리피스의 길이가 증가할수록 평균 23.1%의 감소율을 보였다. 이는 오리피스 길이의 증가에 따른 압력강하의 증가가 유동 속도 감소에 영향을 미치기 때문이다. 목표 값에 대한 각 구간에서의 차이는 평균 약 17.08%으로 나타났으며, 목표 값에 제일 근접하는 최적의 오리피스의 길이는 선형 보간법을 이용하여 계산하였을 때, 6.98 mm가 제일 합당하다고 판단된다.

3.4 핀 삽입 환형 오리피스의 최적 설계

기존 산소호흡기에서 사용하는 산소 탱크내부의 압력은 시간에 따라 감소하며, 현 감압기에서

는 산소탱크의 압력 감소와 동시에 감압기 내부 댐퍼부에서의 유로 면적의 증가 및 감소를 통하여 일정한 토출 유량을 유지하게 된다. 하지만 유로면적의 증·감 범위는 한계가 있으며, 현재 댐퍼 부가 수용 가능한 사용 최대 입구압력은 200 bar이며, 최소 입구압력은 20 bar이다.

본 연구에서는 앞서 댐퍼 부의 유로 면적이 최소일 때를 기준으로 입구압력 300 bar일 때, 2번 위치 내 핀 형 실린더를 삽입함으로써 목표 조건을 만족하였다. 하지만 최적 설계를 위해서는 사용 최대 입구압력 뿐만 아니라 댐퍼 부 작용용에 대한 고찰이 필요하다. 이를 위해 현 감압기에서 댐퍼 부 작용으로 유로면적이 최대일 때인 최소 입구 압력에 대해 Fig. 2(b)의 형상 내 4번 오리피스의 길이를 기준 유량조건으로 우선 결정하였다. 그 후 2번 위치에 핀을 삽입한 모델에서 오리피스 길이가 3 mm, 6 mm, 그리고 9 mm일 때, 입구 압력 50 bar, 75 bar, 그리고 100 bar에서 산소의 질량유량에 대해 분석하였다. Fig. 8은 1번 오

리피스 길이가 3 mm, 6 mm 그리고 9 mm일 때 입구 압력에 따른 질량 유량 그래프이다. 1번 오리피스 길이가 6 mm와 9 mm일 경우 목표 값과 비교하여 평균 63.44%의 차이로 다소 큰 차를 보였다. 3 mm일 경우 입구 압력이 50 bar일 경우는 54.89 %로 큰 차이를 보였지만, 입구 압력 75 bar일 때는 32.76 %, 그리고 100 bar일 때는 10.48 %의 차이로 비교적 목표 값에 대해서 안정적인 값을 나타내었다.

사용가능한 최대 입구 압력인 300 bar만을 고려하였을 때 제일 적합한 2번 위치에서의 오리피스 길이는 6.98 mm로 산정되었으나, 이때의 최소 사용 입구 압력에서의 질량 유량 값이 목표 값에 대하여 50% 이상의 차이를 보였으며, 이는 실제 사용에는 부적합하다 판단된다. 이에 따라 실제 적용 가능할 것으로 판단되어지는 최적의 조건은 사용 최대 입구 압력에서는 약 33%, 최소 사용 입구 압력으로 고려되어지는 입구 압력 50 bar, 75 bar 그리고 100 bar에서 평균 32.71% 내외로 만족하며, 가공 용이성을 고려할 때, 기존의 감압기와 길이가 동일하여 별도의 가공이 필요 없는 3 mm가 합당하다고 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 COMSOL 멀티피직스를 이용하여 현재 감압기 내 산소의 유동 특성을 파악하고 300 bar 이상의 고압적용용 감압기를 최적 설계하기 위하여 구조 변경에 따른 산소 유동 특성을 파악하였다.

입구 압력 300 bar일 때, 오리피스의 길이가 3 mm에서 9 mm까지 3 mm 간격으로 오리피스의 길이가 증가할수록 평균 23.1%의 감소율을 보였으며, 해석 결과 기존 감압기에서 토출되는 질량유량 0.028 kg/s의 목표 값을 기준으로 각 구간에서의 평균 차이는 약 17.08%으로 나타났다. 고압의 산소통을 적용할 수 있는 감압기의 설계를 위해

2번 오리피스 내 실린더 형 편 삽입 방법을 채택하였다. 실제 적용 가능할 것으로 판단되어지는 최적의 길이는 사용 최대 입구 압력에서는 목표 유량대비 약 33%, 최소 사용 입구 압력에서 평균 32.71% 내외로 만족하는 3 mm가 적합하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 중소기업청 창업성장기술개발사업의 연구비지원(S2325304)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

- (1) Shrouf, R. D., 2003, "Pressure and Flow Characteristics of Restrictive Flow Orifice Devices," *SANDIA REPORT*, Version. 10, pp. 1~21.
- (2) Min, Y. U. and Kim, Y. G., 1999, "A Numerical Analysis of the Pipe Flow Past the Orifice," *Journal of autumn conference on KSME*, pp. 530~535.
- (3) Shah, M. S., Joshi, J. B., Kalsi, A. S., Prasad, C. S. R. and Shykla, D. S., 2012, "Analysis of Flow through an Orifice Meter: CFD Simulation," *Chemical Engineering Science*, Vol. 71, pp. 300~309.
- (4) Roul, M. K. and Dash, S. K., 2012, "Numerical Modeling of Pressure Drop due to Single-phase Flow of Water and Two-phase Flow of Air-water Mixtures through Thick Orifice," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, Vol 3, pp. 533~551.
- (5) Siba, M. A., Mahmood, WMF. Wan., Nuawi, M. Z., Rasani, R. and Nassir, M. H., 2015, "Modeling and Applications of 3D Flow in Orifice Plate at Low Turbulent Reynolds Numbers," *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, Vol. 5, No. 5, pp. 19~25.
- (6) The COMSOL Multiphysics User's Guide (2016) Ver. 5.2.