



질량센서 구조체에 대한 실험 및 해석

조원우^a, 사종성^b, 강태원^{a*}

Experimental and Computational Analysis of Mass Sensor Structure

Won Woo Cho^a, Jongsung Sa^b, Taewon Kang^{a*}^a Division of Advanced Mechanical Engineering Mechanical & Biomedical Engineering, Kangwon National University, 1, Gangwondaehak-gil, Chuncheon, Gangwon-do, 24341, Korea^b Department of Automotive Engineering, Seoil College, 28, Yongmasan-ro 90-gil, Jungnang-gu, Seoul 02192, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received 6 November 2017
Revised 24 November 2017
Accepted 6 December 2017

Keywords:

Mass flow meter
CFD
Suction machine
Medical device

ABSTRACT

A mass sensor used in an automatic suction system plays an important role in measuring the breathing information of patients. However, the sensor is not originally designed for medical purpose, and it is too expensive for use in medical devices. Thus, it needs to be customized for economic applications. As a starting point of economic fabrication, mass sensor models were selected and investigated for replacement. The analysis was carried out by both CFD simulation and experiments. Nine models of structure were selected and compared. The results showed that an asymmetrically designed box type model provided the most realistic fluid flow situation. As a final step before suggesting an economical design of the mass sensor, we compared the prototype of the proposed design with the original structure. It shows that there is almost no difference in function between the current aluminum product and the prototype manufactured using a 3D printer.

1. 서론

환자의 호흡을 비롯한 심폐기능의 활성화를 위해서 사용되는 석션(suction)기기는 인체에 사용하는 의료기기인 만큼, 제품의 정확한 작동과 더불어 신뢰성이 무엇보다도 중요한 설계요소를 가지고 있다. 따라서 제품의 성능을 유지함과 동시에 각 부품들의 신뢰성과 낮은 가격의 특성까지 취하도록 설계하는 것이 많은 제조사들의 핵심 관심사항이라 사료된다. 석션기는 만성 호흡질환자 뿐만 아니라 교통사고를 비롯한 여러 가지의 질환으로 말미암아 환자가 호흡계의 가래나 침, 기타 배액 등을 스스로 제거시키지 못할 경우에 사용되는 의료기기로, 응급상황을 고려하여 휴대와 이동이 가능하도록

설계·제작된 석션기를 말한다. 이를 제 1 세대 수동식 석션기^[1]라 구분할 수 있으며, 장기질환자나 중환자에게 사용하는 제 2 세대 석션기^[2]는 간호사나 간병인 또는 보호자가 주기적으로 사용할 수 있는 기능성이 보완된 석션기로 발전되었다.

본 연구에서는 간호사나 간병인이 환자의 호흡상태를 판단하여 석션기를 사용하는 수동방식에서 벗어나 환자의 호흡상태에 따라 가래나 침 등을 자동방식으로 제거해주는 제 3세대 석션기의 핵심 부품인 호흡(질량)센서의 구성부품에 대한 해석결과를 도출하고 이를 실험적으로 검증하고자 한다. Fig. 1은 그러한 질량센서 세트의 모습을 보여주고 있다. Fig. 1에서 멤스(MEMS) 기술을 적용한 센서와 구조체는 분리가 가능하도록 설계되어 있으며, Fig. 2는 우

* Corresponding author. Tel.: +82-33-250-7939

Fax: +82-33-259-5548

E-mail address: jirehk@kangwon.ac.kr (Taewon Kang).

리가 개발하고자 하는 구조체를 전체 세트에서 분리한 모습이다.

현재 국내 제품에 장착되어 사용되는 질량센서와 구조체는 의료 기기용이 아닌 기계분야에 사용되는 정밀계측용으로 개발된 고가의 부품을 전량 수입하고 있으며, 의료기기의 용도에 맞는 별도의 어댑터를 사용하는 방식을 채택하고 있다. 또한 질량센서는 알루미늄으로 정밀하게 제작된 구조체 위에 센서를 포함하는 펌웨어부분을 결합한 형태를 가지는데, 환자의 호흡 상태를 측정하는 데이터는 펌웨어를 통해서 수치 변환되어 필요에 따른 자동 석션기능을 수행하게 된다.

본 연구에서는 Axetris사의 MFM2020 Model^[3]의 질량센서에 적용되는 구조체의 국산화를 위한 설계사항을 검토하고자 하며, 다음과 같은 두 가지의 관점에서 해석 및 실험적인 검증은 피하고자 한다. 첫째, 알루미늄 정밀 가공 제품인 구조체의 내부 유로 모델링을 단순화하고, 그 단순 형상의 사출제품으로 대체하는 경우 발생하는 구조체 변경의 영향을 최소화하는 것이다. 둘째, 전산유체역학을 이용한 해석의 결과를 적용하여 설계된 질량센서의 구조체를 3D 프린터로 제작하여 현재 사용되는 수입 제품과 비교 검증과정을 통해서 양산체계에서 사출물로 대체가 가능한지의 여부를 확인하는 것이다.

2. 실험 및 전산해석

2.1 질량센서 연결부 모델링

본 연구가 사출제품으로 대체하는 구조체 제작 가능성을 확인하

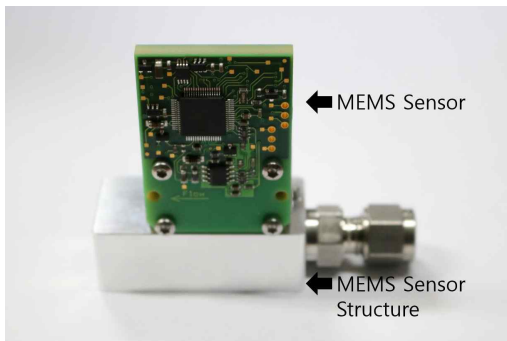


Fig. 1 Mass sensor set



Fig. 2 Mass sensor structure

는 것이기 때문에, 이를 검증하기 위해 대체품 성능 확인 시험과 전산유체해석의 결과를 같이 활용하였다. 해석을 진행할 때 센서를 지나는 유로부분은 본 연구에서 반복적인 실험과 해석을 통하여 수입제품과 유사한 특성을 보이는 데이터가 나오는 모델을 완성하였고, 그 모델을 기준으로 구조체의 형상설계에 대하여 모델 적합성에 대해 확인을 진행하였다.

우선, 전산유체해석을 통하여 구조체의 대체 가능성을 확인하기 위해서는 질량센서를 포함하는 전체 세트에 대한 시뮬레이션 해석이 필요하다. Fig. 3은 질량센서와 구조체의 연결부위로서, 질량센서 구조체로부터 입력된 호흡이 통과하는 유로이며 매우 복잡한 형태를 가진다. 이를 통과하는 호흡이 질량센서로 유입되면서 측정하는 것으로 파악되고 있다.

2.2 유로 모델의 적합성 확인

Fig. 3에서 질량 센서는 2nd Path 중심에 위치하여 있기 때문에 그 부분을 중점으로 보았고, 시작과 끝 부분에 많은 구멍들을 하나 하나 고려하는 것이 불가능하기 때문에 이를 단순화 하여 Fig. 4와 Fig. 5에서 보여주는 모델을 만들었다.

모델링을 할 때 Fig. 3의 수입제품의 유로를 참고하여 다음과 같은 가정을 두었다. 첫 번째, Fig. 3과 같이 유로의 단순화는 3개의 분기가 존재해야 한다. 두 번째, 3개의 분기를 만들 때, 최대한 질량센서의 성능을 유지하도록 전산유체역학을 이용한 해석을 실시하여 결과를 반영한다. 즉, 센서가 위치 해 있는 측정 분기에서 수입 질량센서의 유체 흐름과 같이 층류 흐름을 만들어 측정이 용이하도록 해야 한다. 그 결과 구조체를 통과한 유체가 지나가는 유로를 2가지 모델로 가정하였는데, 그 하나는 동일한 직경을 가지는 유로 3개를 모델하는 것이고, 다른 하나는 가운데 유로의 직경을 달리하는 것이다. Fig. 4는 3가지 유로 분기 모두 같은 직경으로 모델링한 것이고, Fig. 5는 3가지 유로 분기 중에서 위, 아래 분기의 직경은 0.6 mm, 가운데 분기의 직경은 0.3 mm로 설계하였다. 여기서 유로의 직경은 질량센서의 실측 결과를 최대한 반영하였다.

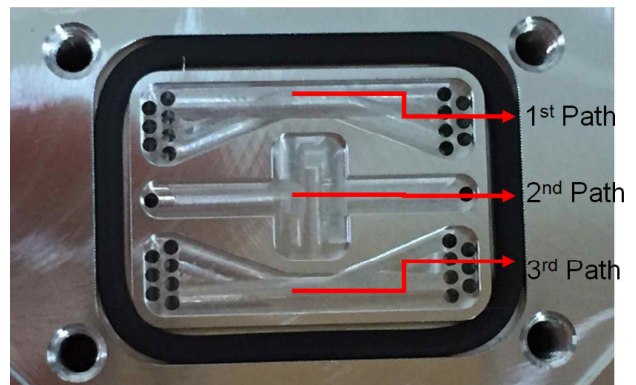


Fig. 3 Flow paths of mass Sensor

서두에 언급한 가정 중의 하나인, 수입 질량센서의 기능을 최대한 가깝게 하는 시뮬레이션 모델을 검증하는 방법으로 레이놀즈 수를 선택하였다. 이는 질량센서가 층류를 유도하는 구조에서 계측하는 것으로 소개되고 있기 때문에, 본 연구에서도 이를 따르는 모델을 선정하였다.

Fig. 6은 앞에서 만든 Fig. 4와 Fig. 5의 모델들을 전산유체 해석 후 유체역학 문헌^[4]을 참고하여 레이놀즈 수를 비교 한 것이다. Fig. 6을 보면 가운데 분기 직경 0.3 mm 모델은 전 구간에서 층류 흐름을 띄지만, 가운데 분기 직경 0.6 mm 모델은 그렇지 않고 시간의 흐름에 따라 층류를 넘어서는 거동을 보인다. 따라서 두 가지 모델 모두 층류 흐름에 가깝지만, 그 중에서 특히 가운데 분기 직경 0.3 mm 모델이 모든 영역에서 가운데 분기 직경 0.6 mm 모델보다 층류 흐름을 더 안정적으로 보여주기 때문에, 본 연구에서는 질량센서에서 측정되는 유량 흐름을 모사하는 모델로 Fig. 5에서 제시된 설계를 선택하였다.

2.3 질량 센서 구조체 모델링

본 연구의 모델링을 위하여 4가지 측면의 질량센서 구조체 설계 변수를 고려하였다. 첫 번째는 구조체 내부에 유량을 유도하는 유로 직경, 질량센서와 연결되는 높이, 외부 유량을 유입하여 질량센서로 연결하는 부위 그리고 전체적인 대칭성으로 구분하였다.

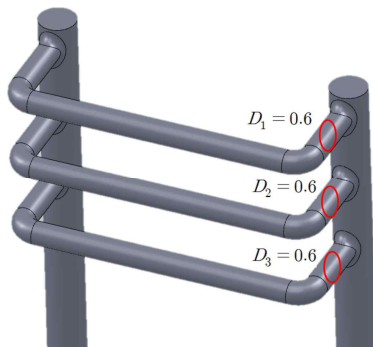


Fig. 4 Same diameter sizes in all 3 branches

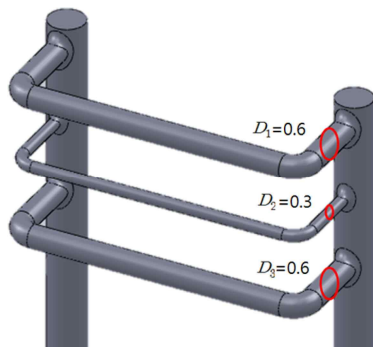


Fig. 5 Different diameter size of branch of point 2

Fig. 7은 전체적인 구조에서 분기 직경과 구조체의 직경을 비교한 것이다.

Fig. 8의 그래프는 구조체의 높이에 따른 영향성을 평가한 것이다. 그래프를 보면 알 수 있듯이 높이 8.8-9.2 mm까지 모두 같은 조건에서 높이만 달리하여 해석을 실시한 결과 구조체의 설계 변수 중에서 높이의 영향은 미미한 것으로 파악된다.

Table 1의 경우 구조체 설계변수를 설정한 조건을 정리한 것이다. 구조체를 통과하는 관 연결 모양이 L 형태인 경우는 가장 기본적인 형상이고 box형과 곡선 형(curved)은 유체의 난류 발생을 낮출 수 있는 대안으로 제시된 형상이다.

한편, 유로 지름의 변화를 고려하는 경우, 이는 알루미늄 제품을 대체하려는 사출물의 정밀도와 가장 큰 연관성이 있을 것으로 추정된다. 유로 지름 치수가 클수록 치수 정밀도가 좋아지기 때문에

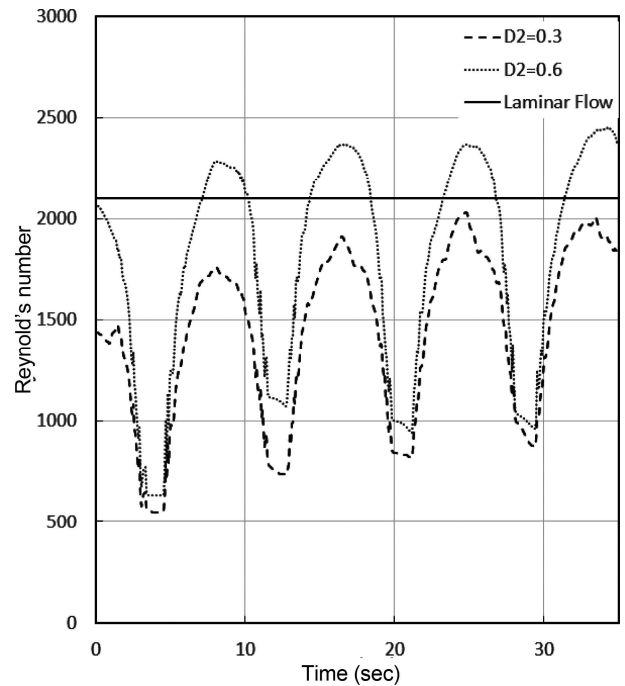


Fig. 6 Comparison of two models

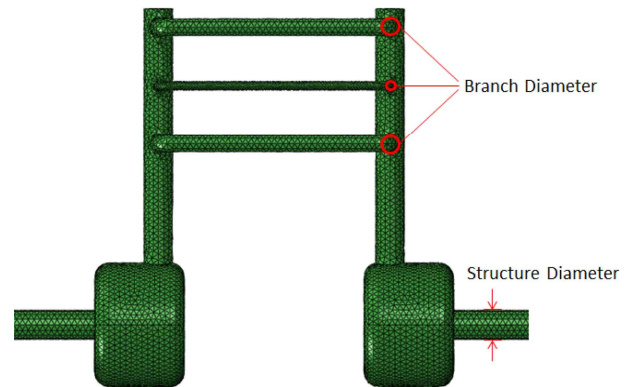


Fig. 7 Comparison of branch and structure diameter

작아지는 경우는 제외하고 지름이 5% 커지는 경우를 고려하였다. 실제의 구조체는 비대칭 형태를 취하고 있지만, 대칭 모델을 다루는 것이 양산하기 편하기 때문에 대칭성의 영향 또한 고려하였다. 이상의 설계 변수가 적용되는 부분을 표시하여 Fig. 10에 도시하였다.

Table 2는 Fig. 9의 설계 변수 범위를 case별로 정리한 것이다. 앞서 언급한 바와 같이 유로 직경의 변화, 좌 우 대칭의 변화 그리고 마지막으로 구조체 내부의 유로 형상을 L, box, curved shape으로 총 3종류로 구분하였다. 이러한 설계 변수 3가지를 모두 조합하면, $3 \times 2 \times 2 = 12$ 로서 모두 12가지의 경우가 생긴다. 다만, curved shape의 경우 1 가지만을 해석하였다. 그 이유는 앞의 관 형태에서 L 형태를 가지는 경우와 큰 차이를 보여주지 않은 결과를 보여주었기 때문이다. 즉, L 형상에서 보여주는 급작스런 유로 변경의 영향을 제거하기 위하여 형상 변경을 고려하였으나, 결과는 큰 차이를 보여주지 않았기 때문이다. 이러한 이유로 총 9가지의 case를 해석하였다.

2.4 질량센서 구조체 전산유체해석

본 연구에서는 질량센서로 유입되는 공기의 흐름을 유한요소 해석 소프트웨어 ABAQUS^[5]를 사용하여 전산유체역학을 이용한 해석을 진행하였다. 유한요소모델링은 Hypermesh^[6]를 이용하였다.

다만, 본 연구에서는 구조체의 설계 변수가 질량센서에서 유량계 측을 하는데 어떤 영향을 미치는지 파악하는 것이 중요하다. 그래

서 유로내의 유체 속도와 질량센서가 측정하는 위치에서의 속도 비교를 통하여 이를 판단하였다.

이를 도시한 것이 Fig. 10이며, point 2는 질량센서에서 측정하는 위치를 의미하며, point 3은 구조체 모델에서 유체가 통과하는 지점이다.

본 연구에서는 다양한 질량센서 구조체 모델의 차이를 비교하기 위하여 point 2에서의 속도와 point 3의 속도가 비교적 비슷한 설계 조합을 찾는데 주안점을 두었다. 그 이유는 실제로 질량센서에서 유체의 속도를 측정하여 수요자가 원하는 정보를 제공하기

Table 2 Model Cases

Case 1	L Shape, Structure Diameter = 2.0 mm, Asymmetric	Case 6	Box Shape, Structure Diameter = 2.1 mm, Asymmetric
Case 2	L Shape, Structure Diameter = 2.1 mm, Asymmetric	Case 7	Box Shape, Structure Diameter = 2.0 mm, symmetric
Case 3	L Shape, Structure Diameter = 2.0 mm, symmetric	Case 8	Box Shape, Structure Diameter = 2.1 mm, symmetric
Case 4	L Shape, Structure Diameter = 2.1 mm, symmetric	Case 9	Curved Shape, Structure Diameter = 2.0 mm, Asymmetric
Case 5	Box Shape, Structure Diameter = 2.0 mm, Asymmetric		

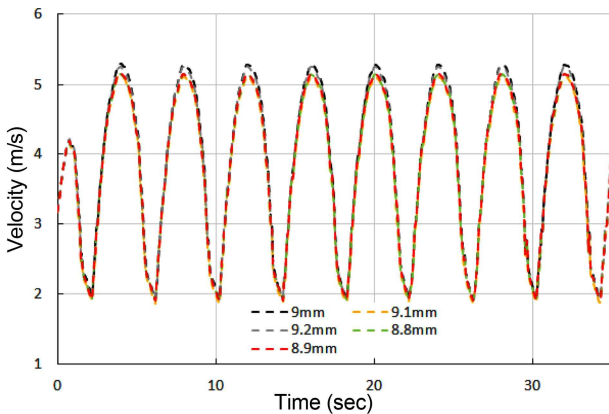


Fig. 8 Height influence comparison

Table 1 Variables and levels of CFD Analysis conditions

Variables	Levels		
	L	Box	Curved
Pipe shape	L	Box	Curved
Structure Diameter (mm)	2.0		2.1
Symmetry	Yes		No

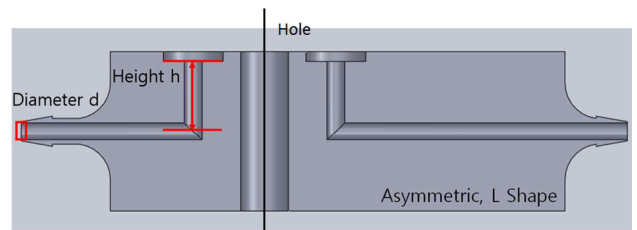


Fig. 9 Structure design variables

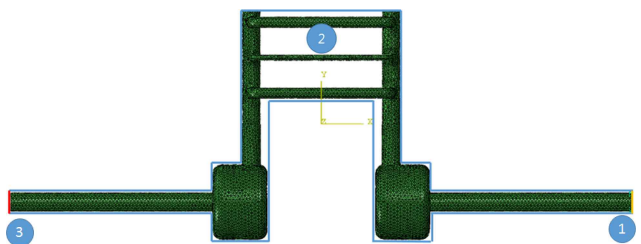


Fig. 10 Measuring points

때문이다.

Fig. 11은 모델 변수에 따른 비교 시뮬레이션을 보여주는 것이다. 우선 L 형태의 경우인 직경과 대칭성에 차이를 둔 case 1, 2,

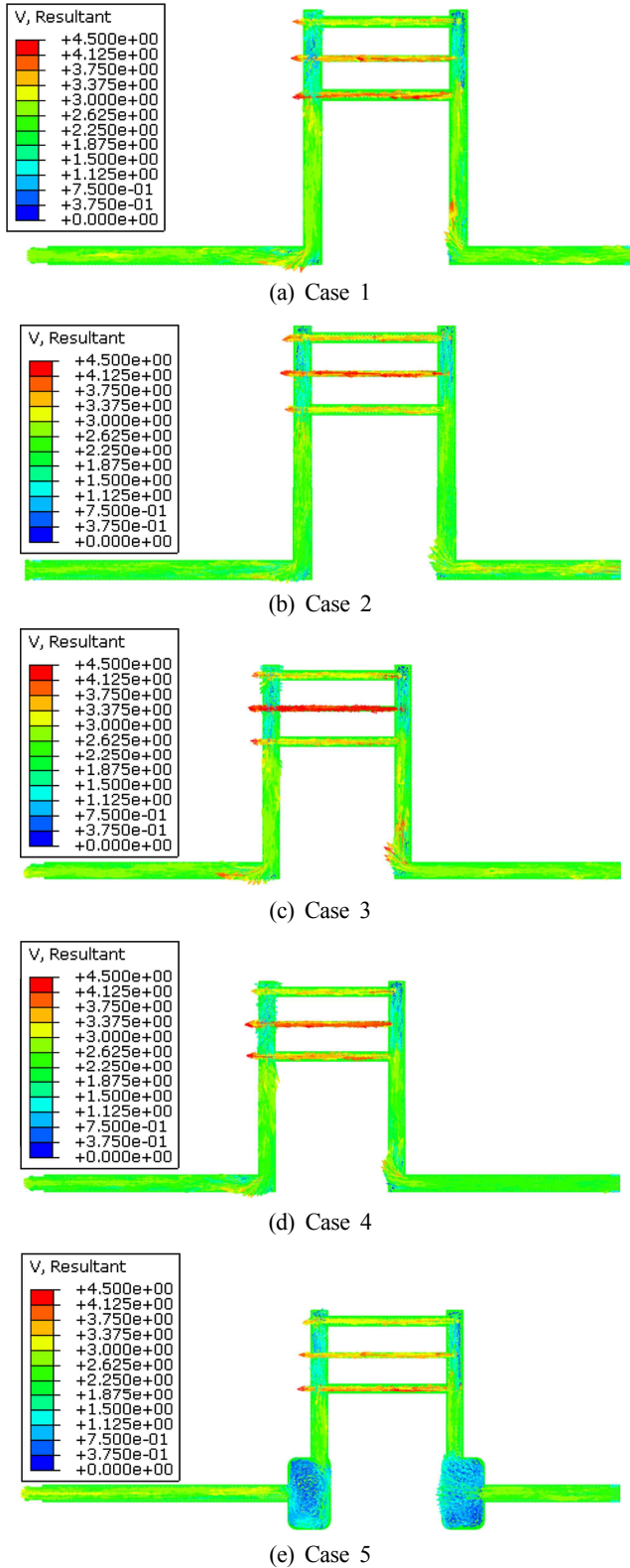


Fig. 11 Comparison of models

3, 4를 보면 point 2의 위치와 point 3의 위치에서의 속도 차이가 현저하게 나타나는 것을 알 수 있다.

반면, 난류의 유동을 줄이기 위하여 제안한 box형 모델을 적용한 시뮬레이션의 경우에는 직경과 대칭성에 따른 조합에 차이가 존재하는 것을 볼 수 있다. 즉, case 6, 7, 8 모두 L 형태와 같이, point 2와 point 3에서 유속의 차이가 존재하는 결과를 보여주지만, 비대칭이며, 직경이 가장 작은 경우인 case 5의 경우에는 point 2의 위치와 point 3의 위치의 속도 차이가 가장 적게 나타났다. 즉, 질량 구조체의 모델로서 가장 적합하다고 할 수 있다.

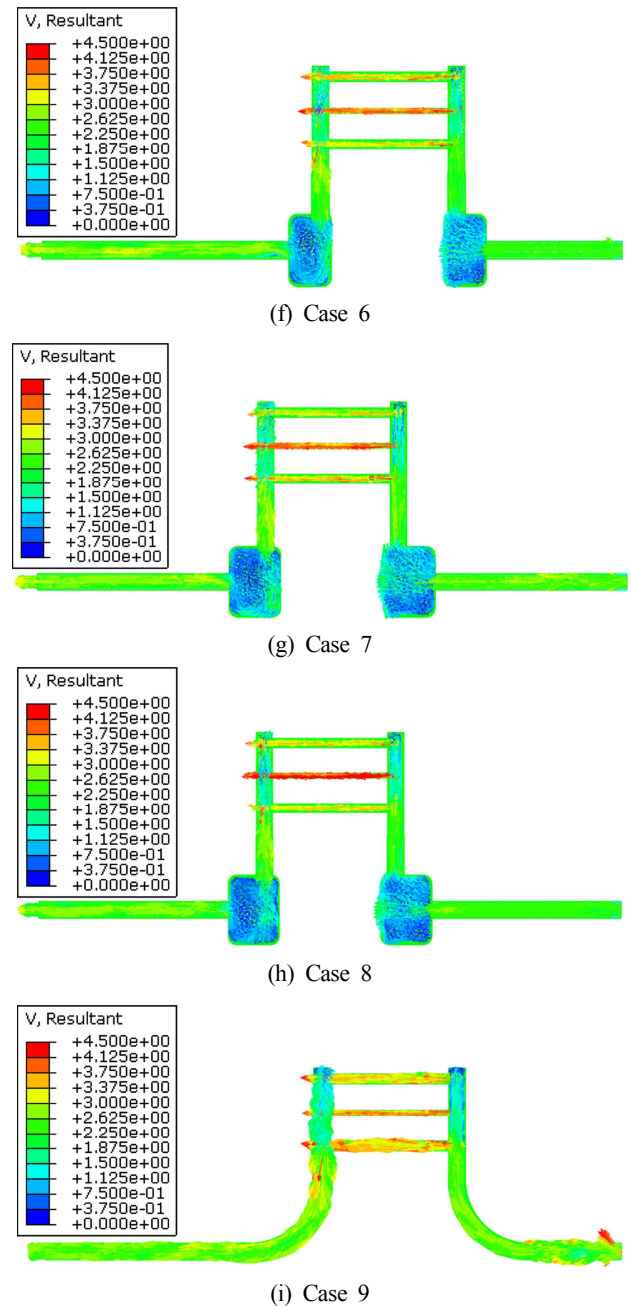


Fig. 11 Comparison of models (continued)

Table 3 Velocity ratio of point 2 vs. point 3

Case 1	109%	Case 6	112%
Case 2	112%	Case 7	115%
Case 3	118%	Case 8	117%
Case 4	115%	Case 9	116%
Case 5	102%		

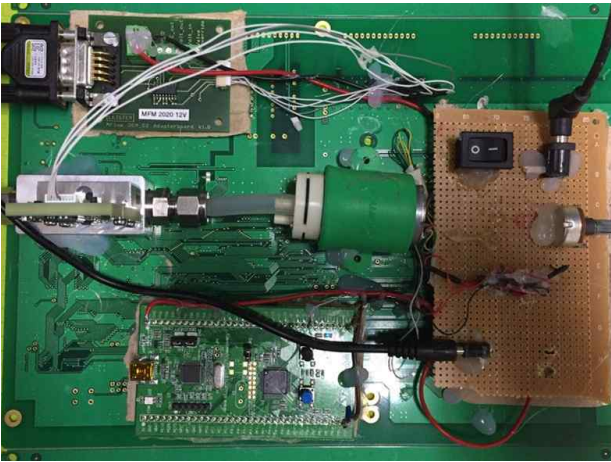


Fig. 12 Experimental setup

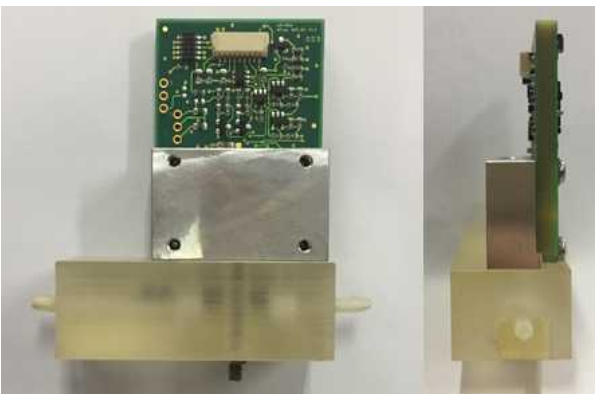


Fig. 13 Connecting the prototype structure to commercial mass sensor

그리고 마지막으로, 앞서 언급 했듯이 case 9의 경우는 L 형상을 가지는 직경 및 대칭성 조합 시뮬레이션과 약간의 차이가 있을 뿐, 비슷한 거동을 보여주고 있다.

Table 3에서는 point 3에서의 속도와 point 2에서 측정되는 속도의 비를 나타내었다. 모두 약 10% 또는 그 이상의 속도차를 보여주지만, case 5의 조합의 경우에서만 point 2와 point 3과의 속도 차이가 2% 정도를 보여주어 유사속도로 간주 할 수 있어서 최종 설계 변수 조합으로 결정하였다.

다만, 직경의 차이가 가지는 의미, 대칭성이 직경의 차이에 따른 차별화 등의 설계 변수의 조합에 따른 영향의 정도는 파악하지 못하였다.

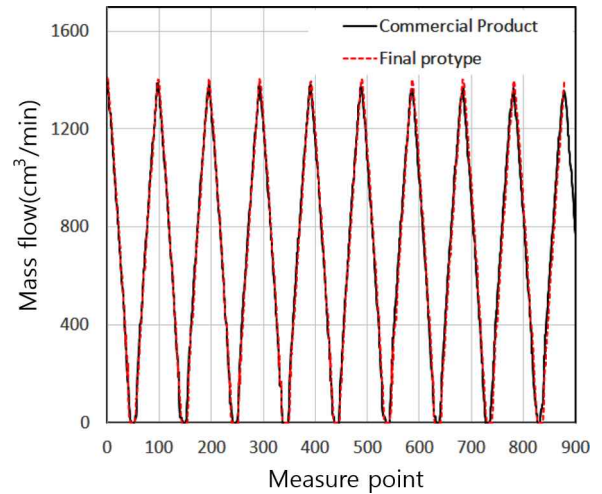


Fig. 14 Comparison of commercial product and final prototype

2.5 질량센서 구조체 시험장치

본 연구에서는 수입제품과 3D 프린터로 제작한 시작품을 비교 실험을 실시하여, CFD 해석을 통하여 선정된 질량센서 구조체의 대체 유효성을 확인하였다.

Fig. 12는 비교 실험을 위한 장치로서, 외부에서 발생하는 유량을 제어하여 데이터를 얻을 수 있도록 구성하였다. 해당 장치는 전원 부, 사람의 호흡을 대신 할 모터, 모터와 연결되어 있는 질량센서, 질량 센서에서 나온 데이터를 송·수신을 위한 케이블, 모터의 RPM을 조절할 수 있는 아날로그 조절기 등으로 이루어져 있다. Fig. 13은 앞서 언급한 3D 프린터를 통하여 출력한 질량센서 구조체 시제품과 센서가 결합한 모습이다. 비교시험은 동일한 유체를 발생시키면서 수입제품과 시제품을 교체하면서 질량센서가 측정하는 데이터 값을 직접비교하는 방법을 사용하였다.

3. 평가

Fig. 14에서는 전산유체해석에서 추천한 설계조합인 case 5로 제작한 시제품과 수입제품의 측정결과를 비교한 것을 보여주는 것이다. case 5의 조합으로 설계한 시제품의 경우, 900 개의 데이터를 비교한 결과 수입제품과의 유량 차이가 평균 1.8 cm³/min로 나타났다. 이는 현재 사용하고 있는 질량센서 기준으로 약 0.13 % 정도의 차이뿐이며, 이는 거의 무시할 수 있다. 따라서 case 5의 설계 조합은 정확한 유량 측정을 지원하는 질량센서 구조체 대체가 가능하다고 볼 수 있다.

4. 결론

자동 석션 시스템에 사용되는 질량센서는 고가의 수입제품이다.

또한 의료기기용으로 설계된 제품이 아니기 때문에 이를 적절하게 커스터마이징 하여야 한다. 본 연구에서는 질량 센서의 국산화에 앞서, 질량센서의 구조체를 우선적으로 국산화하는 가능성을 살펴 보았다. 구조체의 설계변수로서, 관 직경, 관의 진입 높이, 비대칭성 그리고 관의 연결 형상 등을 선정하여 평가하였다. 관 직경 $d=2.0, 2.1$ mm 2가지와 비대칭 형상과 대칭 형상 2가지, 그리고 본 연구에서 난류를 최소화하기 위하여 제안하는 box형 형상과 L자형 형상을 포함하여 8가지 형상을 모델링 하였고, 추가적으로 곡선형상까지 총 9가지의 형상을 모델링 하였다. 9가지의 형상은 3D 모델링 프로그램 Solidworks를 이용하여 모델링하고, 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 이용하였다. 전산유체해석을 진행한 결과, 9가지 모델 중에서 유체의 흐름을 가장 현실적으로 제공하는 구조체의 설계 안을 찾았다. 이를 근거로 3D 프린터를 활용하여 시제품과 수입 제품을 비교한 결과, 시제품을 사용하는 경우와 수입 제품을 사용하는 경우의 차이는 0.13 %로서, 실험에서 사용한 모터에서 나오는 유량에 비하여 무시 할 만큼 작은 값이라고 볼 수 있다. 구조체의 재료를 알루미늄에서 플라스틱 사출로 디자인 하면 원제품을 역설계가 필요하다. 그러나 알루미늄 구조체의 내부를 비파괴 방식으로 알 수 없기 때문에 설계 변수 3개를 중심으로 시뮬레이션하여 최적의 case를 찾았다. 결론적으로, 설계 변수 3개를 중심으로 전산 해석을 활용하여 제안된 구조체 모델은, 제 3세대 석션기에서 요구하는 데이터를 제공할 수 있는 질량센서 구조체 형상을 가지고 있다고 판단된다. 특히 현재 고가의 알루미늄 소재에서 플라스틱 등을 포함하는 경제적인 소재로의 변경이 가능하다. 따라서 최종적으로 본 연구를 통해 나온 설계안을 바탕으로 양산체제에서 플라스틱 사출물 대체를 제안하며^[7], 제안된 플라스틱

사출물에 대한 강도, 내구성, 유량 측정 시 응답속도 등은 추후 연계되는 과제에서 연구를 진행 할 예정이다.

Acknowledgement

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2017년도 산학협력 기술개발사업 (기업부설연구소 신규설치)(No. C0342505)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- [1] Res-Q-Vac, Viewed 15 August 2017, <<http://www.rmsmedicalproducts.com/products/medical-suction/res-q-vac/>>.
- [2] Jinsolmedial JS-007, Viewed 15 November 2017, <www.jinsolmedical.co.kr>.
- [3] Axetris, Viewed 15 August 2017, <<https://www.axetris.com/en-kr/mfd/products/mass-flow-meter>>.
- [4] Crowe, C. T., Elger, D. F., Roberson, J. A., 2005, Engineering Fluid Mechanics, Willey, USA.
- [5] Abaqus, Viewed 3 August 2017, <<http://130.149.89.49:2080/v6.11>>.
- [6] Hypermesh, March 29, 2013, Viewed 18 August 2017, <<http://blog.altair.co.kr/10151>>.
- [7] Kang, T. W., 2017, Structure Development for Mass Flow Sensor, Report of a Study on the Academic-Industrial Cooperative Establishments Funded Korea, Small and Medium Business Administration.