주름구조를 적용한 저속 유속 센서

최대근¹ · 이상훈^{1,2,*}

Air Flow Sensor with Corrugation Structure for Low Air Velocity Detection

Dae Keun Choi¹ and Sang Hoon Lee^{1,2,*}

Abstract

In this paper, we designed and fabricated the novel air flow sensor using air drag force, which can be applied to the low air flow detection. To measure the low air flow, we should enlarge the air drag force and the output signal at the given air flow. The paddle structure is applied to the device, and the device is vertically located against the air flow to magnify the air drag force. We also adapt the corrugation structure to improve the output signals on the given air velocity. The device structure is made up of the silicon nitride layer and the output signal is measured with the piezoresistive layer. The output signals from the corrugated device show the better measurement sensitivity and the response time than that of flat one. The repeated measurement also shows the stabilized signals.

Keywords : Flow Sensor, Corrugation Structure, MEMS

1. 서 론

공기의 유속 측정 센서는 MEMS 기술이 적용되어 활발히 연구되고 있는 분야 중 하나로써, 자동차를 비롯한 다양한 산업뿐만 아니라, 바이오, 환경 등 다양한 분야에서 활용되고 있다[1-12]. 이러한 공기 유속 센서는 크게 열대류 방식[1-6]과 바람저항 방식으로 나누어질 수 있다[7-12]. 현재 가장 많이 사용되고 있는 열 대류 방식은 가운데 히터가 있고 히터 양쪽의 온도차이를 측정하는 방식으로 민감도가 좋은 장점이 있으나, 기본적으로 열을 발생시킬 뿐만 아니라, 이러한 열 발생을 위해 전력이 계속적으로 공급 되어야 하는 단점이 있다[7]. 또한, 온도 차이를 이용한 방식으로 인해 외부 온도의 영향을 많이 받게 되어 추가적인 온도 보정장치가 필요한 단점이 있다[5].

열 대류 방식의 이러한 단점들을 보완하기 위해 최근 바람 저항 방식의 유속 센서의 개발이 증가하고 있다[7-12]. 바람 저항 방식은 사용하는 소자를 휘게 하거나[7-10], 보조적인 구조물을 형성하여 바람 저항부를 만들고[11, 12], 이를 이용하여 바람의 저항이 커지도록 제작한 것이다. 이러한 바람저항형 센서는, 구조를 변화시키거나 보조 구조물을 생성하기 때문에 공정이 복잡해지는 단점이 있으며, 소자가 바람에 수직으로 되어있는 구조에 비해 바람을 받는 힘이 상대적으로

작아지게 된다. 이 때문에, 분해능과 민감도가 상대적으로 낮아, 빠른 유속을 측정하거나 밀도가 큰 액체 측정용으로 주로 사용되고 있다.

최근 인간 공학 및 환경 공학, 바이오 분야의 연구가 활발히 진행되면서, 간단하게 제작이 가능하면서도 저속의 공기 유속측정이 가능한 센서에 대한 개발이 요구되어지고 있다[6, 12, 13]. 앞에서 언급한 바와 같이, 열대류형 유속 센서는 기본적인 열을 발생시켜 바이오 분야와 같은 열에 민감한 분야에 대해서 적용에 한계가 있고[13], 바람저항형은 민감도가 낮아 정밀한 유속측정이 필요한 분야에 적용하기 힘든 단점이 있으므로, 이러한 단점들을 보완한 센서의 개발이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 바람저항형 소자를 기반으로, 구조가 간단하면서도 저속의 공기 유속 측정이 가능한 소자를 개발하고자 하였다. 주름 구조를 적용하여 같은 유속에 대해 민감도를 향상시키도록 하였고, 패들을 적용하여 바람 저항을 극대화하도록 하였다. 또한, 소자를 휘게 하거나 보조 구조물을 장착하지 않고 소자 자체를 유속에 수직으로 배치함으로써, 최대의 바람 저항을 형성하도록 하였다. 측정은 커패시터 방식에 비해 공정이 간단한 압저항 구조를 이용하였으며, 이렇게 제작된 소자를 실제 공기 유속에 적용하여 1 m/s 이하의 저속 유속을 측정하였다.

2. 실험방법

2.1 센서의 설계

본 연구에서 제작하고자 하는 센서는 기본적으로 바람저항형 소

¹서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원(Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul National University of Science and Technology)

²서울과학기술대학교 자동차공학과(Department of automotive engineering, Seoul National University of Science and Technology)

*Corresponding author: hyla@seoultech.ac.kr

(Received: Sep. 1, 2011, Revised: Oct. 14, 2011, Accepted: Oct. 25, 2011)

자를 기반으로 하고 있으며, 1 m/s 이하의 작은 유속을 측정하기 때문에, 유속에 대한 민감도를 향상시킬 필요가 있다. 민감도를, 주어진 신호, 즉 바람의 속도에 대해 측정신호의 세기로 정의한다고 할 때, 같은 바람의 속도에 대해 항력이 크고 이에 대한 신호변화가 클수록 민감도가 커지게 된다.

따라서, 민감도를 크게 하는 방법은 이 두 가지, 즉, 같은 유속에 대해 큰 바람저항을 형성하고, 같은 바람저항에 대해 변화 신호를 크게 하는 것으로 생각할 수 있다. 기본적으로 휨형 소자는 소자 자체가 수직으로 형성된 것에 비해 저항력이 작을 수밖에 없으며, 정확한 휨각도를 조절해야 하므로 공정 과정이 정밀하게 제어되어야 한다[7]. 따라서, 본 연구에서는 평면형 소자를 유지하되, 이를 유속에 수직으로 배치하여 주어진 바람에 대해 최대의 항력을 받고자 하였다. 또한, 같은 항력에 대해 변화 신호를 크게 하기 위해 주름구조를 사용하여, 그 변화를 극대화 하고자 하였다. 주름 박막 구조는, 일반 평면 구조에 비해 작은 힘에도 큰 변형을 나타나기 때문에, 다이나 프레임 등에 많이 사용된 바 있다[14-16].

주름 구조의 조건은 “Flat and corrugated design handbook[17]”에 제시되어 있는 조건을 참조하여 디자인 하였다. 참고문헌 17에서는 주름의 깊이(H), 파장(λ), 개수(Corrugation Number ; C.N) 등에 대한 조건들이 제시되어 있으며, 이 조건들을 바탕으로 하되 MEMS공정상의 제한점 등을 고려하여 주름의 조건을 Fig. 1.과 같이 결정하였다.

Fig. 1. Schematics of flow sensor with corrugation structure.

Fig. 1에서 보는 바와 같이, 바람 저항 외팔보의 구조는 크게 주름을 포함한 외팔보 부분과 패들 부분으로 구성되어 있다. 각각의 구조에서, a 는 바람 저항부의 역할을 하게 되는 패들의 폭과 너비를 나타내며, L , t , w 는 각각 외팔보의 길이, 두께, 너비를 나타낸다.

일반적으로 주름의 깊이가 깊어질수록 같은 힘에 대해 더 많이 휨이 발생하는 것으로 나타나 있다[17, 18]. 공정에 사용되는 PR(AZ1512)이 코팅되는 두께가 1.2 μm 정도 이므로 주름의 깊이가 너무 깊게 되면 일반적인 PR공정을 적용하기가 어려워질 수 있다. 따라서, 주름의 깊이는 일반적인 평면 공정을 그대로 이용할 수 있도록 수 μm 를 넘지 않아야 한다. 이러한 이유로, 본 연구에서는 주름의 깊이를 2 μm 로 제한하였다. 또한, 주름의 파장은 주름 깊이의 4~8배가 적합하다고 제시되어 있으므로[17], 이 내용과 앞에서 언급한 주름 깊이를 바탕으로 파장을 계산하면 8 μm ~ 16 μm 가 된다. 그러나 Fig. 1에서 보는 바와 같이 파장이 위, 아래, 그리고 상승, 하강부의 네 개의 부분으로 이루어져 있으므로, 파장 길이가 8 μm 가 되면 최소 패턴이 2 μm 정도가 되어 다소 공정이 어려워지는 현상이 발생한다. 따

라서, 공정상의 이점을 확보하기 위해 본 연구에서는 파장의 길이를 16 μm 이상으로 하였다. 외팔보 구조는 바람의 저항을 최대한 받기 위해 외팔보 자유단 부분에 바람 저항부분인 패들을 제작하였으며, 외팔보는 많이 휘어질 수 있도록 고정단 부분에 주름구조를 적용하였다.

패들의 경우 가로와 세로의 길이를 200 μm × 200 μm 로 고정하였으며, 외팔보의 경우, 길이를 100 μm , 300 μm , 500 μm 의 세 가지로 적용하여 총 길이 300 μm , 500 μm , 700 μm 로 하였다. 두께는 소자 제작시의 안정성 등을 고려하여 1 μm 로 결정하였으며, 외팔보 너비는 전선의 최소 너비 등을 고려하여 40 μm 로 고정하였다.

2.2 압저항체 설계

앞에서 설계한 소자를 바탕으로 유속의 특성을 측정하는 것은 압저항체로서 센서의 특징은 다음 식과 같이 $\Delta R/R$ 로 나타낸다. 이때, $\Delta R/R$ 은 식 (1)에서 보는 바와 같이 나타나게 되며, 저항체의 길이 변화에 비례하게 된다.

$$\frac{\Delta R}{R} = G \times \frac{\Delta L_r}{L_r} \quad (1)$$

$$G = \frac{\Delta R / R}{\Delta L_r / L_r} = \frac{\Delta R}{\varepsilon R} \quad (2)$$

(G : 변형상수, 압저항 물체의 게이지 계수)

현재 금속저항체로 사용되는 물질은 니켈크롬, 콘스탄탄, 백금 등이 있으며 평균적으로 0.8 ~ 3 사이의 게이지 계수를 갖는다. Table 1과 같이 게이지 계수가 가장 큰 물질은 백금이며, 많은 연구들에서도 압저항체를 이용하여 측정할 경우, 주로 백금을 사용하기 때문에 본 연구에서도 백금을 저항체로 사용하여 공정을 진행하였다.

Table 1. Gage factors for various grid materials[19]

Material	Gage Factor(GF)
Platinum	6.1
Constantan	2.1
Nichrome	2.1
Manganin	0.47

2.3 주름 구조와 평판 구조의 해석

소자의 특성은 저항의 변화에 의해 정의되며, 저항변화는 변위량에 의해 결정된다. 소자의 변위량을 계산하기 위해, 본 연구에서는 COMSOL Multiphysics 3.5를 사용하여 소자의 구조 해석을 진행하였다. 바람의 경우, $P=1/2 \rho v^2$ 의 식을 사용하여 각 속도에 유속을 압력으로 바꾸어 분포하중으로 압력을 주었으며 ρ 는 공기밀도

Fig. 2. Corrugation structure of flow sensor.

(1,204 kg/m³, 20 °C), v 는 공기의 속도를 나타낸다.

Fig. 2는 주름 박막 외팔보 구조의 주름 부분을 확대하여 나타낸 그림이다. 2.2절에서 본 바와 같이, 소자의 민감도는 $\Delta R/R$ 즉, $\Delta I_v/I_v$ 로 계산된다. 그러나, 소자에서 변형률을 측정하고자 하는 부분에 주름 구조가 형성되어 있어, 전체적인 변형률을 구하기가 상대적으로 어렵다. 따라서, Fig. 2에서 보는 바와 같이 각각의 파장을 4개의 부분으로 나누고 그 중심값을 구하여 계산하는 방법을 이용하였다. Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 평판 구조와 주름 구조의 해석 결과를 나타낸 것이다. 그래프의 세로축은 $\Delta R/R$ 이고, 가로축은 고정단에서부터 파장의 각 부분들을 거리순으로 나타낸 것이다. 즉, 가로축 번호 1~4번까지가 한 파장이 되는 것이고, 다음으로 5~8, 9~12, 13~16, 17~20으로 각각의 파장을 나타낸다.

Fig. 3. Simulation results of flat and corrugated cantilevers.

Fig. 3 (c)는 주름 개수를 1~5개로 변화시켜가면서 $\Delta R/R$ 의 값을 비교한 것이다. 주름 구조의 경우 처음 주름의 윗면과 아랫면의 $\Delta R/R$ 값이 평판 구조에 비해서 비교적으로 낮게 나타나지만 1번째 주름의 2번째 부분부터는 $\Delta R/R$ 값이 평판 구조에 비해 점차 큰 모습을 나타내고 있다. 이러한 점은 소자에 가해지는 공기의 유속이 주름 구조에 집중됨으로써, 고정단에 붙어있는 주름 구조에는 다소 작은 힘이 가해진

것으로 생각된다. 전체적으로 주름구조는 평면 구조에 비해 대략 5 % 정도 민감도가 큰 것으로 나타나고 있으며, 주름갯수가 4개 이상이 되면 다소 줄어들어 3 % 정도인 것으로 나타나고 있다. 하지만 전체적으로 주름이 있는 경우, 주름이 없는 평판 소자보다 $\Delta R/R$ 값이 더 커지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과로 평판 외팔보에 비해서 주름 박막 외팔보가 전체적으로 좋은 것을 확인할 수 있다. 위의 해석에서 본 바와 같이, $\Delta R/R$ 이 주름 2개에서 증가 하다 4개에서 감소하였으므로, 본 연구에서는 2개와 4개 사이인 주름 3개를 기준으로 주름 구조의 소자를 제작하였다. 민감도 향상 비교를 위해 평판 구조의 소자 또한 제작하여 전체적인 실험을 수행하였다.

3. 공정 및 제작

소자의 제작은 기본적인 반도체공정을 이용하였으며, 세부적인 공정은 Fig. 4에 나타나 있다. 실리콘 웨이퍼는 4인치 N-type (100)를 사용하였으며, 주름구조 제작시 식각 저항막으로 사용하기 위해 산화막을 형성하였다. 습식 산화를 이용하였으며, 안정성을 고려하여 5000 Å 두께로 형성하였다. RIE를 이용하여 주름구조를 패터닝하고, TMAH를 이용하여 식각작업을 수행하였다. DRIE 등의 공정을 사용하지 않고, TMAH용액을 이용하여 식각한 것은, 이후 백금을 이용하여 압저항을 형성할 때, 수직구조보다는 평면과 54.74°의 각도를 이루고 있는 {111}면을 통한 전선연결이 보다 용이하기 때문이다. 또한, 2.1절에서 언급한 바와 같이, 추후 일반적인 평면 공정 사용을 위해 2 μm 깊이로 제한하여 식각하였다. 공정은 70 °C에서 8분 30초간 진행하였다.

Fig. 4. Overview of fabrication process employed for proposed flow sensor.

이 후, 남아있는 산화막을 모두 제거한 후, 습식 산화를 이용하여 $1\ \mu\text{m}$ 의 산화막을 다시 형성하였다. 이 산화막은 추후 소자로 이용될 실리콘 질화막의 응력 배분 및 최종 릴리징 공정을 안정성을 고려하여 형성되었다. 저압 화학 기상 증착법으로(Low Pressure Chemical Vapor Deposition : LPCVD) 소자로 이용될 실리콘 질화막을 증착하였다. 본 소자는 휘어진 구조가 아닌 수평인 형태를 목표로 제작하는 것이므로 잔류응력이 최소화되도록 공정을 수행하였다. 실리콘 질화막 위에 E-beam evaporator로 티타늄 $0.02\ \mu\text{m}$ 와 압저항 물체인 백금을 $0.1\ \mu\text{m}$ 을 증착하고 Lift-off 공법을 사용하여 패터닝 하였다. 같은 방법으로 전극으로 사용할 금을 $0.3\ \mu\text{m}$ 로 증착한 후 패터닝 하였다. 소자의 구조를 형성하기 위해, 실리콘 질화막을 RIE로 식각하였으며, 웨이퍼 앞면을 보호하고 뒷면을 DIRE로 식각하여 최종적으로 소자를 제작하였다.

4. 실험 및 결과

4.1 센서의 제작 결과

앞에서 언급한 공정을 바탕으로 주름 구조를 적용한 바람 저항 유속센서를 제작하였다. Fig. 5는 제작 공정 각각에서의 소자의 사진을 나타낸 그림이다.

Fig. 5. Photos of fabrication flow sensor with corrugated structure.

Fig. 5 (a)는 주름 영역을 식각한 후의 사진이다. 그림에서 보는 바와 같이, 주름 부분이 명확하게 식각된 모습을 확인 할 수 있다. 그림 (b)는 압저항체인 백금과 전극 역할인 금이 패터닝된 모습을 나타낸다. 그림 (c)는 소자를 1차적으로 릴리징 한 후의 모습을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 날개모양처럼 주름 구조 부분의 실리콘 질화막이 완전히 식각 되지 않고 잔여물이 남아있는 것을

확인 할 수 있다. 이는 주름 구조가 이방성 식각에서 나타나는 경사면인 {111}면을 사용하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 산화막 형성시 {111}면의 산화막이 다소 두껍게 형성될 뿐만 아니라, Fig. 6에서 보는 바와 같이, 식각시에도 평면에 비해 {111}면의 산화막과 질화막이 더 두꺼운 상황이 발생하기 때문이다. 실제로 식각시 RIE의 수직성을 고려해 본다면, 질화막의 증착 두께는 평면에서 $1\ \mu\text{m}$ 인데 비해, 경사면에서는 $0.2\ \mu\text{m}$ 이상 두께가 커지게 된다. 따라서, 2차 공정에서는 소자의 앞면 식각시에 보다 오랜 식각 과정을 통해 이러한 경사면 식각을 완전하게 식각하였다. Fig. 5 (d)는 이렇게 식각된 소자의 최종 릴리징 모습을 나타내고 있다. 제작된 소자는 길이가 $300\ \mu\text{m}$, $500\ \mu\text{m}$, $700\ \mu\text{m}$ 의 세 가지 길이를 가지고 있다.

Fig. 6. Thickness difference between top and side layers.

Fig. 7. SEM image of cantilever.

Fig. 7은 제작된 소자의 SEM 사진으로 그림 (a)는 소자의 전체적인 모습을 나타내고 있다. 그림 (b)는 소자의 외팔보 부분에 적용된 주름 구조를 확대한 모습으로 외팔보 위에 압저항체인 백금이 증착 되어 있다. 주름 구조의 특성상 굴곡이 생기는데 이 부분에도 백금이 끊어 지지 않고 제대로 증착 되어 있는 것을 확인하였고, 전체적으로 균일한 두께로 증착 되었음을 확인 할 수 있었다.

4.2 실험 및 토의

실험은 온도 $25\ ^\circ\text{C}$, 유속 $0\ \text{m/s} \sim 1\ \text{m/s}$ 의 풍동에서 진행 되었고, 풍동 내의 유속 측정을 위해 Testo사의 405-v1모델의 열선 풍속계를 같은 위치에 놓고 측정을 하였다. 측정 장비로는 오실로스코프를 사용 하였다. 각 유속에 대해 주름 구조와 평판 구조의 비교 실험, 외팔보의

Fig. 8. Signal of flowmeter under 1m/s air velocity.

길이에 따른 실험과 같은 유속에 대한 반복 실험 세 가지로 진행 하였다.

Fig. 8 은 길이가 500 μm , 파장이 16 μm , 주름 개수 3개인 소자로 실험 했을 때의 신호를 나타내고 있다. Fig. 8은 1 m/s의 유속을 측정할 것으로, 모든 실험은 그림과 같이 소자가 안정화 되기 90 %지점에서의 반응 속도와 $\Delta R/R$ 을 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이, 1 m/s에서의 반응속도는 대략 3.2초로 나타나고 있다. 풍속을 다시 0 m/s로 변경한 후에는 2.28초만에 신호의 10 %미만으로 감소하게 되며, 최종 적으로 영점에 도달하기 까지는 20~30초 정도의 시간이 소요되게 된다. Fig. 9은 주름 구조와 평판 구조의 비교 실험 결과이다. 소자는 주름 3개, 파장 16 μm , 길이 500 μm 의 주름 구조 소자와 길이 500 μm 의 평판 소자로 실험 하였다. Fig. 9 (a)는 $\Delta R/R$ 을 나타내는 것으로서, 각 소자의 평균 $\Delta R/R$ 은 평판 구조의 경우 4.3 E-3/ms⁻¹, 주름 구조의 경우 9.7 E-3/ms⁻¹로 주름 구조의 민감도가 약 2배 정도 높은 것을 확인할 수 있으며, 최소 2배 이상의 민감도 향상 효과를 나타내고 있다. Fig. 9 (b)는 각 소자의 반응 속도를 측정한 그래프이다. 0.2 m/s에서의 반응 속도는 평판 구조의 경우 9.68초, 주름 구조의 경우 8.12초로 주름 구조가 약 1.5초 이상, 1 m/s에서도 약 1초 빠른 것을 확인할 수 있었다. 이 결과로 주름 구조가 평판 구조에 비해 같은 유속에서 민감도가 좋을 뿐만 아니라, 반응속도 또한 더 좋은 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 9. Experimental result comparisons of corrugation and flat.

Fig. 10는 주름 구조의 길이에 따른 실험 결과를 나타낸 것이다. 소자는 주름 3개, 파장 16 μm 로 일정하고 총 길이는 300 μm , 500 μm , 700 μm 의 세 종류로 실험하였다. Fig. 10 (a)는 길이에 따른 $\Delta R/R$ 값을 나타낸 것으로, 길이에 따른 $\Delta R/R$ 은 300 μm , 500 μm , 700 μm 순으로 8.6 E-3/ms⁻¹, 9.7 E-3/ms⁻¹, 1.1 E-2/ms⁻¹로 나타났으며 점점 커지는 것을 확인할 수 있다. 이것은 소자가 길이가 길수록 같은 바람에 대해 민감도가 커지는 것을 뜻한다. Fig. 10 (b)는 길이에 따른 반응 속도를 나타낸 것이다. 유속 1 m/s에서 700 μm , 500 μm , 300 μm 순으로 3.44초, 3.2초, 3.08초로 나타났으며, 길이가 짧을수록 반응속도가 점차 빨라지는 경향을 나타내었다. 따라서, 길이가 짧아 질수록 반응 속도는 빨라 지고, 길이가 길어 질수록 평균 $\Delta R/R$ 이 커지기 때문에, 사용하고자 하는 목적에 따라 소자를 다르게 디자인하여 사용할 수 있다. 실제적인 디자인 상황에서는 이러한 요소뿐만 아니라, 공정시의 손상 가능성, 수율 등을 고려하여 적절한 길이 조절이 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 10. Experimental result of flow rate for length.

전체적으로, 해석에서 나타난 $\Delta R/R$ 값보다 실험식에서의 값이 크게 나타나고 있다. 이것은, 소자 제작시의 오차, 해석시 공기 유속을 분포하중으로 변환하여 적용함으로써 실제 유체 분포와의 오차, 그리고, 응력 집중으로 인한 저항값 오차 등으로 인해 정밀한 해석이 되지 않은 것으로 판단된다. 이에 대해서는 앞으로 CFD 해석 등을 통해 보완이 필요한 부분이나, 전체적인 결과로 볼 때, 주름구조가 평면 구조보다 크게 나타나고 있어, 경향성은 맞게 나타나고 있다고 판단된다.

Fig. 11. The stabilized signals of repeated measurement.

Fig. 11은 0 m/s와 0.5 m/s를 반복적으로 실험한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 신호가 정확히 반복적으로 나타남을 확인할 수 있다. 반응속도의 경우, 0.5 m/s의 유속이 유입되면 약 3초 이내로 빠르게 반응하였으나, 신호가 안정된 후 유속의 유입을 정지하면, 앞의 Fig. 8에서 본 바와 같이 2초 이내에 급격히 신호가 줄어든 후, 영점 지점까지 약 20~30초의 상당히 긴 시간 동안 점진적으로 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 이러한 부분은 추후 상용화 등을 고려할 때, 보완이 필요한 부분이다. 또한, 실험 중 셋팅 조건에 따라 신호가 영점 지점에서 위쪽으로 shift 되는 경향을 보이기도 하였으며, 이는 추후 보정 작업 등을 통해 확실한 셋팅 조건의 확립이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 MEMS기술을 이용하여 저속 유속의 측정을 위해, 주름 구조와 패들을 적용한 바람 저항 유속센서를 설계, 제작하고 검증하였다. 바람의 저항을 크게 하기 위해 외팔보 자유단에 패들을 제작하였으며, 저항을 극대화하기 위해 바람에 수직으로 배치하여 측정하였다. 또한, 같은 바람의 항력에 대해 최대의 효과를 얻기 위해 주름 구조를 적용하여 소자를 제작하였다. 공정을 간단하게 하기 위해 2 μm 이하로 주름 깊이를 제한하였으며, 측정을 용이하게 하기 위해 백금을 이용한 압저항 측정 방식을 사용하였다. 이러한 공정을 이용하여 소자를 제작하였고, 실험을 통해 0.2 m/s, 0.5 m/s 등 1 m/s 이하의 미세한 유속을 명확히 측정함을 확인할 수 있었다. 또한, 평판 구조와 비교하여 주름 구조의 $\Delta R/R$ 이 약 2배 이상 높은 것을 확인할 수 있었다. 소자 길이의 경우, 길이가 길어짐에 따라 $\Delta R/R$ 의 값은 증가하였지만, 반응 속도는 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 이용하여, 본 연구에서 제작한 소자는 저속 유속 측정이 필요한 인간 공학 및 환경 공학, 바이오 분야 등에 응용 가능할 것으로 기대 된다.

REFERENCES

- [1] L. Qiu, S. Hein, E. Obermeier, and A. Schubert, "Micro gas-flow sensor with integrated heat sink and flow guide", *Sens. Actuators A.*, vol. 54, no. 1, pp. 547-551, 1996.
- [2] T. Neda, K. Nakamura, and T. Takumi, "A polysilicon flow sensor for gas flow meters", *Solid-State Sensors and Actuators and Eurosensors IX.*, pp. 548-551, Stockholm, Sweden, 1996.
- [3] S. H. Kim, T. J. Nam, and S. K. Park, "Measurement of flow direction and velocity using a micromachined flow sensor", *Sens. Actuators A.*, vol. 114, no. 2-3, pp. 312-318, 2004.
- [4] S. C. Roh, Y. M. Choi, and S. Y. Kim, "Sensitivity enhancement of a silicon micro-machined thermal flow sensor", *Sens. Actuators A.*, vol. 128, no. 1, pp. 1-6, 2006.
- [5] C. Sosna, R. Buchner, and W. Lang, "A temperature compensation circuit for thermal flow sensor operated in constant-temperature-difference mode", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 6, pp. 1715-1721, 2010.
- [6] P. Bruschi, M. Piotta, and G. Barillaro, "Effects of gas type on the sensitivity and transition pressure of integrated thermal flow sensors", *Sens. Actuators A.*, vol. 132, no. 1, pp. 182-187, 2006.
- [7] Y. H. Wang, C. Y. Lee, and C. M. Chiang, "A MEMS-based air flow sensor with a free-standing micro-cantilever structure", *Proc. of IEEE Conf. on Sensors.*, pp. 2389-2401, San Diego, USA, 2007.
- [8] Y. Su, A. G. R. Evans, A. Brunnenschweiler, and G. Ensell, "Characterization of a highly sensitive ultra-thin piezoresistive silicon cantilever probe and its application in gas flow velocity sensing", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 12, no. 6, pp. 780-785, 2002.
- [9] C. Y. Lee, C. Y. Wen, H. H. Hou, R. J. Yang, C. H. Tsai, and L. M. Fu, "Design and characterization of MEMS-based flow-rate and flow-direction microsensor", *Microfluid Nanofluid.*, vol. 6, no. 3, pp. 363-371, 2009.
- [10] Q. Zhang, W. Ruan, H. Wang, Y. Zhou, Z. Wang, and L. Liu, "A self-bended piezoresistive microcantilever flow sensor for low flow rate measurement", *Sens. Actuators A.*, vol. 158, no. 2, pp. 273-279, 2010.
- [11] J. Chen, J. Engel, and C. Liu, "Development of polymer-based artificial haircell using surface micromachining and 3d assembly", *Solid-State Sensors and Actuators and Microsystems.*, pp. 1035-1038, Warsaw, Poland, 2003.
- [12] M. Dijkstra, J. J. van Baar, R. J. Wiegerink, T. S. J. Lammerink, J. H. de Boer, and G. J. M. Krijnen, "Artificial sensory hairs based on the flow sensitive receptor hairs of crickets", *J. Micromech. Microeng.*, vol. 15, no. 7, pp. 132-138, 2005.
- [13] D. P. Martin, J. J. Grant, and J. V. Ringwood, "Evaluation of a prototype thermal anemometer for use in low Air-speed drying measure calculations",

- Flow Meas. Instrum.*, vol. 12, no. 5-6, pp. 285-396, 2002.
- [14] O. C. Jeong and S. S. Yang, "Fabrication of a thermopneumatic microactuator with a corrugated p+ silicon diaphragm", *Sens. Actuators A.*, vol. 80, no. 1, pp. 62-67, 2000.
- [15] J. H. Han, J. Y. Kim, T. S. Kim, and J. S. Kim, "Performance of Fabry-Perot microcavity structures with corrugated diaphragms", *Sens. Actuators A.*, vol. 79, no. 2, pp. 162-172, 2000.
- [16] F. Ke, J. Miao, and Z. Wang, "A wafer-scale encapsulated RF MEMS switch with a stress-reduced corrugated diaphragm", *Sens. Actuators A.*, vol. 151, no. 2, pp. 237-243, 2009.
- [17] M. D. Giovanni, *Flat and corrugated diaphragm design handbook*, MARCEL DEKKER INC, New York, pp.249-258, 1982.
- [18] P. R. Scheeper, W. Olthuis and P. Bergveld, "The design, fabrication, and testing of corrugated silicon nitride diaphragms", *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 3, no.1, pp. 36-42, 1994.
- [19] http://www.efunda.com/designstandards/sensors/strain_gages/strain_gage_sensitivity.cfm

최 대 근(Dae Keun Choi)

- 2010년 중부대학교 자동차관리학과 정보통신학과 (공학사)
- 2010년 큐슈정보대학 정보네트워크학과 (학사)
- 2010년~현재 서울과학기술대학교 NID 융합기술대학원 석·박사 통합과정
- 주관심분야 : MEMS/NEMS, 마이크로 센서/유속센서, 반도체공정

이 상 훈(Sang Hoon Lee)

- 1998년 포항공과대학교 기계공학과(공학사)
- 2000년 포항공과대학교 기계공학과(공학석사)
- 2006년 포항공과대학교 기계공학과(공학박사)
- 2008년~현재 서울과학기술대학교 자동차공학과 조교수
- 주관심분야: MEMS/NEMS, 마이크로 센서/엑츄에이터, 반도체 공정