

MEMS를 이용한 난류제어

이 글에서는 MEMS기술을 적용한 미소 센서와 구동기에 대하여 알아보고, 이들 센서와 구동기를 복합하여 난류 유동을 제어하는 기술에 대해 설명하고자 한다. **성형진**

최 근 들어 21세기를 이끌어갈 새로운 산업으로 각광을 받고 있는 분야 중 하나가 MEMS(Micro Electro Mechanical System)이다. MEMS는 반도체 제조 기술을 기반으로 다목적의 미세 구조물을 제작하여 기존의 IC가 수행하던 연산기능에 감지(sensing)와 구동(actuation)기능을 부가시킴으로써 하나의 독립된 시스템을 구현하는 기술이다. 이러한 MEMS 기술을 토대로, 최근 DNS(Direct Numerical Simulation)에 의해 밝혀지게 된 벽면 난류 유동내의 응집구조를 제어하여 항력을 감소시키기 위한 연구가 활발히 시도되고 있다.

벽면을 따라 흐르는 난류 유동 내에는 유선 방향(streamwise direction)의 미세한 와류 구조(vortex structure)가 존재하며, 이 와류에 의해 모멘텀이 큰 유체들이 벽면으로 끌려들어와 벽면 전단 응력을 증가시키게 된다. 예를 들면, 비행기의 속도에 해당하

는 레이놀즈 수 $Re=105$ 정도의 유동에서는 이러한 와류 구조의 크기는 수 밀리미터 이내이며, 이들의 수명은 수 밀리초(millisecond)에 지나지 않는다. 이러한 구조를 약화시키거나 변형시키면 표면 마찰력을 감소시킬 수가 있으므로 많은 연구가 시도되고 있으나, 현재의 일반적인 센서(sensor)와 구동기(actuator)는 이러한 구조를 능동적으로 파악하고 하나하나 제어하기는 거의 불가능하다. 이와 관련하여 많은 연구자들이 MEMS에 관심을 갖는 것은 MEMS 기술을 이용하게 되면 일반

적인 직경 100 mm 크기의 웨이퍼 상에 수천 개의 구동기와 수만 개의 센서를 설치하는 것이 가능하므로 이를 통해 미세한 난류 구조 또한 능동적으로 제어할 수 있기 때문이다. 이 글에서는 저자와 공동연구를 수행한 미국 UCLA의 Ho교수팀의 연구를 중심으로,

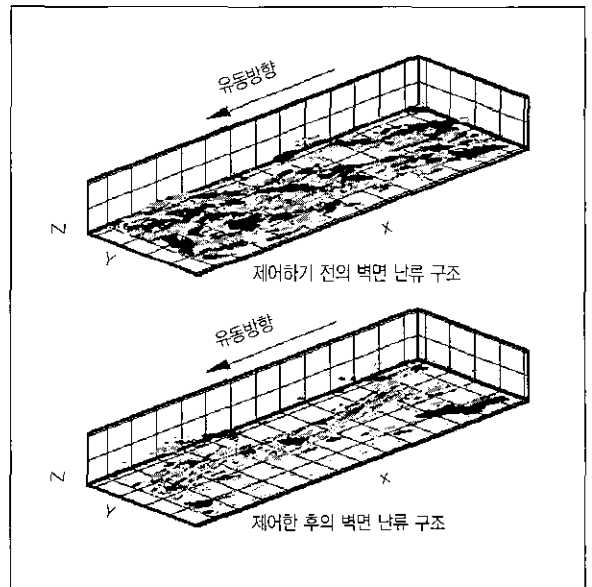


그림 1 벽면 와류 구조를 제어한 DNS의 예

성형진/ 한국과학기술원 기계공학과, 교수/ e-mail : hjsung@kaist.ac.kr

MEMS기술을 적용한 미소 센서와 구동기에 대하여 알아보고, 이들 센서와 구동기를 복합하여 난류 유동을 제어하는 기술에 대해 설명하고자 한다.

미소 열선 유속계

유속계의 공간 분해능은 물리적인 크기에 따라 결정되므로 열선의 크기가 작을수록 공간 분해능은 향상된다. 그와 더불어 미소 열선 유속계(micro hot-wire anemometry)는 전력 소비가 줄어들므로 유동에 가해지는 열교란도 줄어들게 된다. 초기의 미소 열선 유속계는 표면 미소가공(surface micromachining) 혹은 벌크 미소가공(bulk micromachining)에 의해 칩 표면에 센서가 부착되므로 유속측정이 벽면에 제한되고 다른 구조물이 없이는 자유 흐름 내의 속도를 측정하기가 곤란하였다. 그러나 최근에는 기존의 열선 유속계와 같은 구조로 크기만 대폭 줄인 미소 열선 유속계가 등장하였다. 이 미소 유속계의 장점은 작은 크기에 의한 공간 분해능의 향상뿐만 아니라 시간 분해능에서도 기존의 유속계의 주파수 응답 속도에 비해 수십배 이상 향상되었다는 것이다(Jiang et al., 1994). 이러한 미소 열선 유속계는 폴리실리콘(polysilicon)으로 만들어지며, 일반적인 크기는 두께 0.5 μm , 폭 1 μm , 길이 10~160 μm 정도이다. 정온 모드로 작동하였을 때, 시정수(time

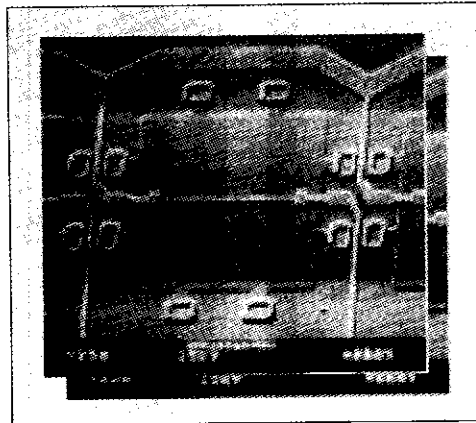


그림 2 미소 표면 전단응력 센서

constant)는 0.5 μs 정도이며, 이때의 절단 주파수(cut-off frequency)는 1.4 MHz 정도로 기존의 열선 유속계가 수~수십 kHz임을 고려하면 상당히 증가되었음을 알 수 있다.

미소 표면 전단응력 센서

지난 수십 년간 표면 전단응력을 측정하기 위해서는 열필름(hot-film)을 이용한 전단 응력 센서가 대표적으로 사용되어왔다. 이러한 전단응력센서는 표면과 센서 사이의 간격이 작기 때문에 표면으로의 열전달이 단점으로 지적되고 있다. 특히 공기에서의 측정은 공기의 열용량이 작기 때문에 센서의 감응도(sensitivity)가 상당히 낮아진다. 이러한 단점을 극복하기 위해 개발된 미소 표면 전단응력 센서(Micro surface shear stress sensor)에는 표면 미소가공 기술(surface micromachining technology)을 이용하여 센서의 가열부 바로 아래 진공 챔버가 설치되었다. 이로 인해 표면으로의 열손실은 줄임은 물론 전단응력에 대한 감응도 또한 향상시킬 수

가 있다. 진공 챔버가 설치된 미소 표면 전단응력 센서의 감응도는 보통 15mV/Pa로 챔버가 없는 센서에 비해 10배 이상 향상되었으며, 이때의 절단주파수는 약 10 kHz 정도이다. 이외에도 표면에 부착된 미소 부양물(floating element)에 작용하는 힘을 감지하여 직접적으로 전단응력을 측정하는 방법도 시도되고 있다.

미소 압력 센서

미소 압력 센서(Micro pressure sensor)는 앞서 소개한 미소 전단응력 센서와 비슷한 방법으로 설계와 제작이 가능하며, 일반적으로 공동(cavity) 위에 설치된 얇은 폴리실리콘 막에 변형률(strain) 측정을 위한 압저항소자(piezoresistor)를 성형하여 만든다. 실제로 Liu 등(1993)에 의해 제작된 미소 압력센서는 두께 1.5 μm , 크기 250 250 μm^2 의 실리콘 다이어프램 내에 두께 500 nm의 압저항소자 여덟 개를 휘트스톤 브리지 형태로 설치하여 이 브리지의 출력전압이 압력에 비례하도록 설계하였다. 이 때 센서의 감응도는 245 $\mu\text{V/V psi}$ 이다.

미소 온도 센서

여러 종류의 온도 측정 센서도 미소 제작이 되어 왔다. 예를 들면, 실리콘 다이어프램 방식의 압력센서에서 온도보정을 위해 사용되는 실리콘 저항과 P-N 접합

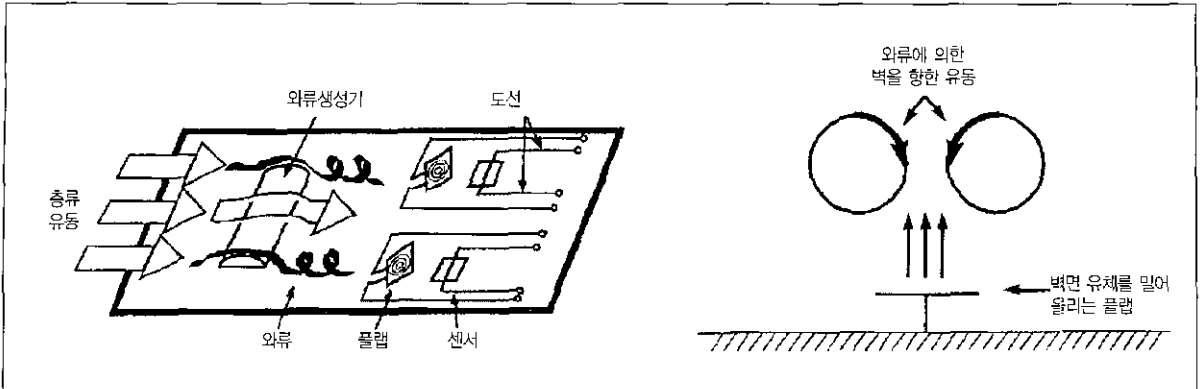


그림 3 플랩형 미소 구동기의 개념도

온도 센서가 있다. 또 다른 예는 얇은 다이어프램을 사용하여 적외선을 흡수하는 방식의 적외선 검출기이다. 빛에너지를 열로 바꾸어 적외선을 검출하는 이 센서에는 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ 의 다이어프램 내에 60 개의 얇은 필름형 열전대가 설치되었으며, 10 ms 이하의 반응시간으로 30 V/W의 감응도를 보여주고 있다.

미소 구동기

미소 구동기(micro actuator)에는 정전형(electrostatic type), 전자기형(electromagnetic type), 그리고 열압력형(thermopneumatic type) 등이 있다. 이 중에서 정전형은 제작이 용이하기 때문에 가장 많이 사용되고 있다. 그러나 정전형은 가진의 진폭($\sim \mu\text{m}$)이나 가진력($\sim \mu\text{N}$)에 있어서 한계가 있기 때문에 진폭이 작아도 되는 유동의 안정문제(flow instability) 등에 적용되고 있다. 그에 비해서 전자기형 구동기는 mN 단위의 가진력과 mm 단위의 진폭으로 가진이 가능하

기 때문에 난류 박리제어나 표면 마찰감소를 위한 제어 등에 적용되고 있다. 예로는 퍼말로이(permalloy)층에 구리 코일을 감은 미소 전자기 플랩(flap)이 있다.

열압력형은 액체로 채워진 공동을 가열함으로써 팽창하는 압력을 이용하여 다이어프램을 가진하는 방식으로 전자기형 구동기보다도 더 큰 힘과 가진 진폭을 얻을 수 있는 방식이다. 최근의 실리콘 고무 다이어프램을 사용한 열압력형 구동기는 10 psi의 압력으로 수 mm 진폭으로 가진이 가능하여 앞으로 여러 분야의 제어에 적용될 것으로 보인다.

난류 표면 마찰력의 제어

앞서 언급하였듯이 벽면 전단 유동의 표면에 분포하는 미소한 와류 구조들에 의해 표면 마찰력은 증가하게 된다. 이러한 구조를 하나하나 제어해주면 표면 마찰력을 감소시킬 수 있으나 실제 제어가 어려운 이유를 정리하면 다음과 같다.

1. 와류 구조의 길이 스케일은 수백 μm 정도로 미세하다.
2. 와류 구조의 수명은 ms 혹은 그 이하이다.
3. 이러한 구조들은 벽면의 전 영역에 걸쳐 무질서하게 존재한다.

따라서 이들을 직접적으로 제어하기 위해서는 그 구조와 상응하는 크기와 빠른 응답특성을 가진 센서와 구동기가 전 표면에 걸쳐 필요하게 된다. 이러한 문제점은 기존의 일반적인 센서와 구동기로는 해결하기 어려우나 MEMS 기술을 적용한 미소 센서와 구동기는 해결의 가능성을 제시해준다. 그러나 앞서 나열한 미소 센서와 구동기를 제작한다 하여도 실제 우리가 원하는 제어 결과를 얻기 위해서는 해결되어야 할 과제가 있다. 그것들을 정리하면 다음과 같다.

1. 벽면의 전 영역에 분산된 센서를 통한 유동장의 정확한 파악
난류 표면 마찰력을 감소시키기 위해 측정하는 물리량은 속도,

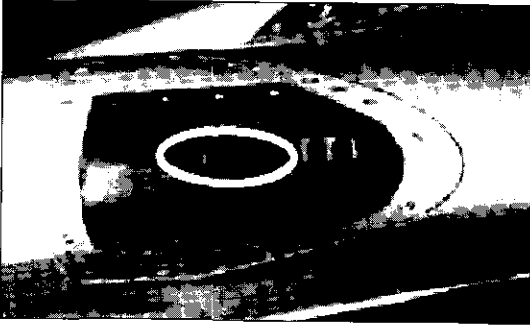


그림 4 F15 전투기에 부착된 미소 표면 전단응력 센서

압력, 전단응력 등이 있을 수 있는데 이 중에서 가장 직접적으로 마찰력 감소와 연관된 물리량은 표면 전단응력이다. 전 표면에 걸친 표면 전단응력을 측정하기 위해서는 앞서 언급한 표면 전단응력센서가 무수히 배열된 칩을 제작하여야 하며 이때 센서의 크기와 간격은 벽면 와류 구조의 크기를 고려하여 이들을 충분히 표시할 수 있는 분해능을 갖도록 설계가 되어야 한다. 1997년 Ho 등은 앞서 설명한 열필름 방식의 미소 전단응력센서 85 개로 구성된 표면 전단응력 센서 칩을 제작하여 시공간 상으로 전단응력의 분포를 측정하였다.

2. 미소 구동기의 교란과 벽면 유동 구조의 상호작용의 이해
 센서에 의해 유동장을 시공간 상으로 파악하게 되더라도 구동기와 유동 구조와의 상호작용을 이해하지 못하면 제대로 유동을 제어할 수가 없다. 실제로 표면에 무질서하게 분포된 와류 구조와 임의의 진폭과 주파수를 가지는 구동기의 교란과의 상호작용을 파악하기 위해서는 전 공간상에 분포된 센서와 구동기가 필요

하며, 또한 뒤에 설명하게 될 데이터 처리에 관련한 시간상의 문제도 발생하게 된다. 따라서 아직까지 많은 연구자들은 임의로 주어진 연속적인 와류 구조와 하나의 구동기와의 상호작용을 조사하는 수준에 머물러 있다. 1995년 Jacobson과 Reynolds는 압전 공진 빔 구동기와 와류 발생기 후류의 와류와의 상호작용을 조사하였으며, 1996년 Ho 등은 실리콘 플랩 구동기와 와류 발생기의 후류와의 상호작용을 조사하여 표면 마찰 감소량은 가진 주파수와 진폭의 곱에 비례함을 밝혔다.

3. 감지와 구동 그리고 제어로직 연산 기능을 동시에 수행하는 집적시스템의 구현

벽면 와류 구조들은 수명이 상당히 짧기 때문에 순식간에 감지-판단-제어의 과정을 거쳐야 한다. 게다가 수많은 센서에서 나오는 정보의 양이 엄청나기 때문에 기존의 컴퓨터를 이용한 데이

터 수집 및 처리 과정을 거치는 것은 불가능하다. 또한 난류와 같이 다양한 길이 척도를 가진 물리 현상을 제어하기 위해서는 미소 센서 하나에서 나오는 각 지점의 국소적인 정보뿐만 아니라 센서들을 집적하여 이들을 종합한 포괄적인 정보 또한 고려해야 한다. 구동기는 이러한 국소적인 정보와 이들을 종합한 전체적인 정보를 동시에 고려하여 적합한 제어 기법으로 구동되어야 한다. 이러한 문제점들은 해결하기 위해서는 MEMS 집적 시스템 내에 연산을 담당하는 회로를 내장시켜 시스템 자체 내에서 감지-판단-제어의 모든 과정을 수행하도록 하는 기술이 도입되어야 한다. 이러한 시도의 예는 UCLA의 Ho 교수 팀의 M³칩을 들 수 있는데 M³란 미소 센서, 미소 구동기, 미소 제어회로가 내장됨을 뜻한다. 이 시스템의 성능은 아직 연구 중이며 그외에도 여러 연구자들에 의해 이러한 집적시스템의 개발이 시도되고 있다.

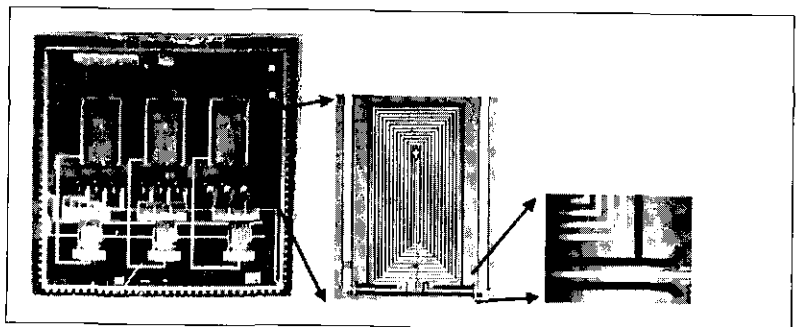


그림 5 미소 센서, 구동기, 제어회로가 내장된 M³ 칩