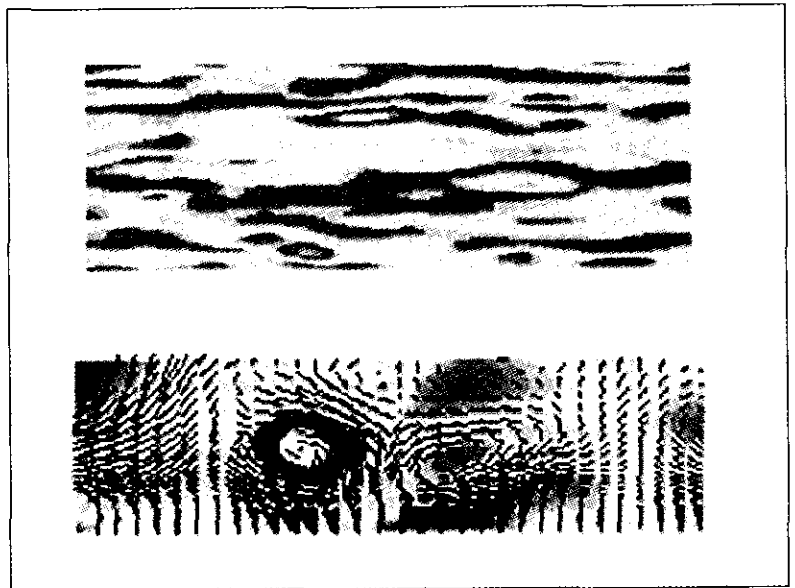


미소 난류 제어

이 글에서는 미소 난류제어의 필요성을 알아보고 이와 관련하여 개발된 각종 제어기법을 설명한다. 최해천·강상모

현대산업의 발달과 더불어 각종 장치 및 제품에 있어서 열·유동현상과 관련된 제어에 대한 관심이 급증하고 있다. 이는 기존의 자동차, 고속전철, 배, 비행기 등의 운송체에서의 공기저항 감소 및 불안정한 유동현상에 따른 소음 제어, 각종 팬 또는 제트에서의 소음 제어, 연소실 내의 유동활성화에 의한 연소 고 효율화 등에 대하여 유동제어 기법에 관한 연구가 필요하기 때문이다. 이와 같은 중요성에도 불구하고, 유동제어에 대한 연구가 성공적으로 이루어지지 않은 이유는 산업기계나 운송체에서 발생하는 대부분의 유동이 난류유동이기 때문이다. 1960년대 이전에는 난류유동은 완전히 불규칙적인 움직임으로 고려되었으나, 최근에 난류유동 내에도 조직적인 구조(coherent structure)가 존재한다는 사실이 알려지면서 난류제어에 대한 본격적인 연구가 이루어지고 있다. 또한 직접수치모사(direct numerical simulation)나 큰 에디모사(large



〈그림 1〉 (위) 벽 가까이 존재하는 줄무늬 구조
(아래) 벽 근처의 유선방향 보텍스

eddy simulation)와 같은 난류유동에 대한 해석기법이 개발되고 미소 센서와 미소액츄에이터 등과 같은 하드웨어의 빠른 발전도 난류제어 연구의 직접적인 계기가 되었다.

난류유동은 대상에 따라 난류유

동을 강화시켜야 할 경우도 있고 약화시켜야 할 경우도 있다. 뭉툭한 물체를 지나는 유동의 경우 항력을 감소시키기 위하여 항력의 대부분을 차지하는 형상항력(form drag)을 줄여야 하며 이를 위하여 난류강도를 증가시켜 유동박리(flow separation)를 지연시켜야 한다. 또한, 연소실 내의 경우에도 연소가

· 최해천, 서울대학교 기계항공공학부 교수, choi@socrates.snu.ac.kr
· 강상모, 대구대학교 자동차·신발 기계공학과 교수, kangsm@daegu.ac.kr

잘 되게 하기 위하여 연료와 공기가 잘 섞여야 하며 이를 위하여 난류강도를 증가시켜 혼합(mixing)능력을 제고하여야 한다. 반면에, 유선형 물체를 지나는 유동의 경우, 전체 항력의 대부분을 차지하는 표면마찰항력(skin-friction drag)을 줄여야 하며 이를 위하여 난류강도를 줄여 유선방향 보텍스를 약화시켜야 한다. 또한 난류유동을 억제하게 되면 유동소음도 동시에 감소하게 된다. 연구결과에 따르면, 항력감소의 제어목적은 뭉툭한 물체의 경우 작거나 큰 액추에이터(micro/macro-scale actuator)에 의해 달성될 수 있으나, 유선형 물체의 경우 주로 미소 액추에이터에 의해 달성될 수 있다고 알려져 있다.

난류경계층유동에 존재하는 대표적인 난류구조로는 벽 가까이 관찰되는 줄무늬 구조(streaky structure)이다(그림 1). 줄무늬 구조란 낮은 속도와 높은 속도의 유체가

〈표 1〉 난류경계층 내 벽 근처의 유선방향 보텍스에 대한 특성 길이 및 속도

	자유유동 속도 (m/s)	유선방향 보텍스의 3차원 크기 (직경 : 중심위치 ; 길이, μm)	유선방향 보텍스의 이동속도 (m/s)
수동(실험실)	0.5	1200 : 800 : 4000	0.3
풍동(실험실)	10	900 : 600 : 3000	6
여객기	250	36 : 24 : 120	150
고속전철	100	90 : 60 : 300	60
유조선	20	30 : 20 : 100	12

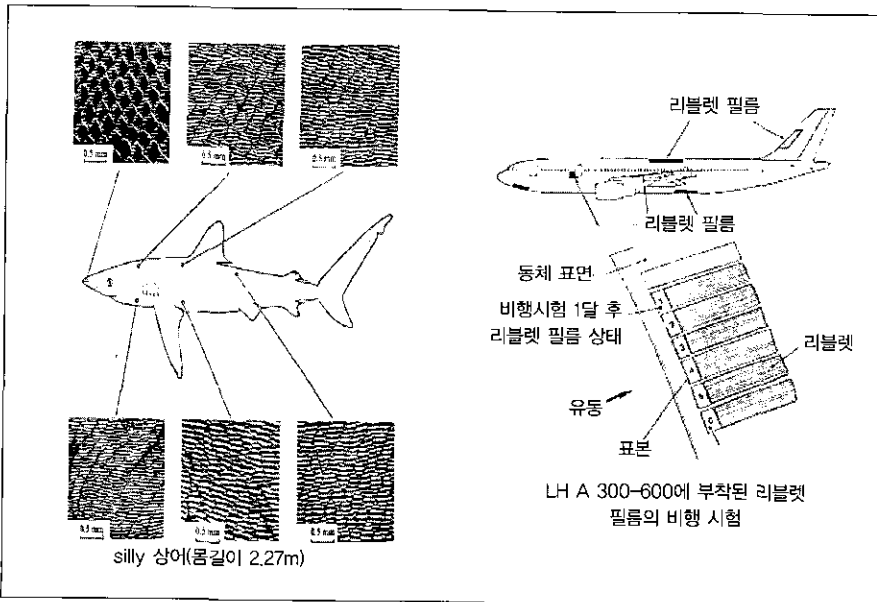
유동의 횡 방향으로 번갈아 가며 나타나는 현상으로 벽 가까이 존재하는 유선방향의 보텍스(streamwise vortex)와 밀접한 관련이 있다. 이 보텍스는 난류생성과 밀접한 관련이 있는 돌진(sweep)과 분출(ejection)현상을 발생시키는데, 최근 연구결과에 의하면 돌진현상이 일어날 때 그 부근의 벽면 전단력이 급속히 증가하게 된다(그림 1). 따라서 난류유동을 제어하기 위해서는 난류에 존재하는 유선방향 보텍스를 제어해야 한다. 그러나 이 보텍스의 크기는 수십 내지 수백 μm 의 크기를 가질 정도로 매우 작을 뿐만

아니라, 공간적으로나 시간적으로 매우 불규칙하게 발생하기 때문에 이를 감지(detecting)하고 제어(actuating)하는 것은 매우 어렵다(표 1). 따라서 미소 난류제어에 대한 연구 필요성은 더욱 중요하게 된다.

능동 및 수동 미소 난류제어

난류제어는 보통 수동(passive)제어와 능동(active)제어로 나누어진다. 수동제어는 동적인 에너지 입력(dynamic energy input)이 필요 없는데 반하여 능동제어는 시간에 따라

유동장에 계속 또는 간헐적인 에너지 입력이 필요하다. 과거에는 조직적인 난류구조들의 상호작용을 억제시키기 위하여 주로 수동제어에 의존하였으나, 최근에는 능동적으로 제어하고자 하는 시도가 활발해지고 있다. 능동제어는 액추에이터에서의 출력이 미리 정해진 경우(predetermined)와 센서로부터의 입력에 따라 출력이 변하는 경우(reactive)로 다시 나누어진다.



〈그림 2〉 리블렛의 적용예

수동 난류제어

〈표 2〉 난류마찰력 감소용 센서와 액츄에이터의 특성

	센서의 측정부위/액츄에이터의 동작부위 크기 (mm)	액츄에이터 작동에 의해 유발되어야 하는 속도의 최대크기 (m/s)	벽면 마찰력 센서의 측정량 (Pascal : Hz)	입력 센서의 측정량 (Pascal : Hz)
수동(실험실)	400	0.075	0~2 : 0~500	0~6 : 0~400
풍동(실험실)	300	1.5	0~1 : 0~8,000	0~3 : 0~7,000
여객기	12	37.5	0~200 : 0~20,000	0~800 : 0~10,000
고속전철	30	15	0~40 : 0~40,000	0~200 : 0~20,000
유조선	10	3	0~1,000 : 0~2,000	0~4,000 : 0~1,000

수동 미소 제어로는 리블렛 (riblet), 미소기포(microbubble) 첨가, 입자(particle) 첨가 등이 있다. 리블렛은 물체 표면에 주 유동방향으로 수십 μm 정도의 미세한 홈을 만든 것을 말한다. 리블렛은 수동 제어 중에서 가장 성공적인 경우로 실험 결과 최대 8 %까지 항력감소를 얻는다고 알려져 있다. 항력감소의 성능은 리블렛 간격과 유선방향 보텍스의 지름(벽단위로 약 30)과의 상대적 크기에 의해 결정되는데, 리블렛의 간격이 보텍스의 지름보다 작으면 항력이 감소되고, 크면 항력이 오히려 증가하게 된다. 리블렛은 상어 표면에서 관찰될 수 있으며, 요트, 항공기 등에도 사용되고 있다 (그림 2). 항력을 감소시키기 위한 또 다른 기법으로는 약 50 μm 정도의 미소기포를 다공성 벽이나 난류 경계층에 분사하거나, 또는 기체에 수십 μm 에 해당하는 고체입자를 투입하는 방법 등이 있다. 양 방법 모두 많은 항력감소를 얻을 수 있다고 보고되었으나, 그에 따른 정확한 메커니즘은 아직 알려지지 않았다.

능동 난류제어

능동 난류제어는 물리적 관찰에 의거한 방법과 체계적인 제어이론을 이용한 방법으로 나누어진다. 전자의 경우는 상쇄(opposition)제어

가 있으며, 후자의 경우는 최적 및 준최적(optimal and suboptimal)제어, 신경망(neural network)제어 등이 있다. 상쇄제어는 유선방향의 보텍스를 제어하기 위하여 벽면에서 약간 떨어진 곳($y^+=10$)에서의 벽면 수직 속도성분과 정반대가 되는 속도로 벽에서 분사/흡입을 행하는 방법이다. 적용 결과, 약 25 %의 항력 감소를 얻었으며 동시에 난류생성과 관련이 있는 돌진과 분출현상이 모두 억제되었다. 이는 난류경계층 유동의 능동적 제어를 최초로 수행한 결과이며 동시에 유선방향 보텍스의 제어에 의한 항력감소의 가능성은 최초로 제시한 것이다.

최적 및 준최적제어는 수학적 이론을 도입함으로써 물리적 직관에 의존하는 임의성을 제거하고, 유동현상의 지배방정식인 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 제어장치를 구축하는 방법이다. 대부분의 난류유동은 유동장의 형태가 복잡하거나 유동 메커니즘의 파악이 어렵기 때문에 이 기법의 적용은 매우 적절하다. 벽면에서 압력 또는 전단력을 측정하고 이 기법을 이용하여 목적함수를 적절히 설정하고 분사/흡입을 행할 경우 약 20 %의 항력 감소를 얻을 수 있다고 알려져 있다. 최근에 신경망 제어이론을 난류 유동에 도입하기도 하였는데, 이를 이용하여 항력을 최소화하는 분사/

흡입의 형태를 구하고 그 정보를 적용한 결과 약 20 %의 항력을 얻은 예가 있다.

센서와 액츄에이터의 크기

유선방향 보텍스의 작은 스케일을 제어하기 위해서는, 보텍스의 크기보다 작은 센서와 액츄에이터가 필요하게 된다. 이 때, 센서의 측정부위 또는 액츄에이터의 동작부위의 크기는 유선보텍스의 직경의 약 1/3 정도이어야 하고, 액츄에이터의 작동에 의해 유발되어야 하는

속도의 최대크기는 유체속도의 약 3/20배가 되어야 한다. 벽면 전단력/압력 센서가 측정하는 양은 전단력/압력의 섭동량이다. 이를 표로 정리하면 〈표 2〉와 같다.

MEMS를 이용한 난류제어

MEMS는 미소기계요소와 이들의 작동에 필요한 전자회로를 동시에 제작하여 일체형으로 집적(integration)시킨 것으로 기계-전자 복합시스템의 집적화 혹은 극소화를 이룩한 것이다. 따라서 MEMS는 외형적으로 미소기계요소와 미소전자요소로 구성되어 있으며, MEMS 기술의 근간은 미소 전자요소의 제작기술인 집적회로 제작(microelectronics fabrication)

기술을 기반으로 하여 미소기계요소 제작을 위한 마이크로머시닝(micromachining) 기술의 개발에 있다. MEMS를 이용한 유동제어는 미국 AFOSR(Air Force Office of Scientific Research)에 의해 지원을 받는 UCLA & Caltech과 Stanford 대학에 의해 행해지고 있다(그림 3).

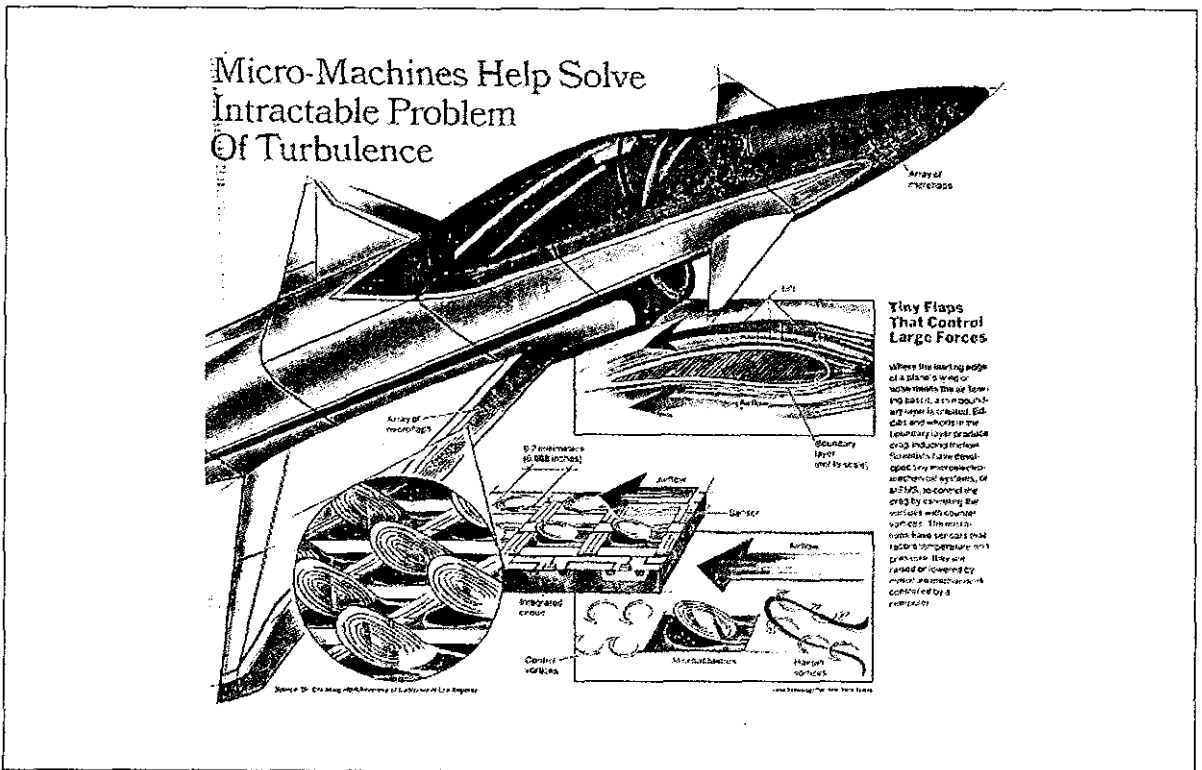
UCLA와 Caltech 그룹은 능동적 유동제어를 수행하기 위한 유동 센서와 액츄에이터를 MEMS를 이용하여 제작하였다. 센서의 경우 표면 미세가공된 열적 전단응력센서, 미소 열선유속계, 미소 압력센서 등을 제작하여 기존의 측정장치보다 정밀하고 빠른 시간특성을 갖는 장치를 개발하였으며, 반면에 액츄에이

터의 경우 자기장에 의해 구동되는 미소 자기장 액츄에이터를 개발하였다. 이러한 전자소자의 크기는 대략 수십 μm 정도이다. 그들은 새로운 개념의 비행기의 익형을 만들기 위해 날개 벽면의 미소센서들에 의해서 측정된 유동정보를 신경망회로 기법을 이용하여 날개 주위의 유동을 예측하여, 미소자기장 액츄에이터에 의해 제어하는 방식을 사용하였다. 이때, 항력감소는 벽면에서 생성되는 유선방향 보텍스와 반대방향의 보텍스를 미소 액츄에이터에 의해 발생시킴으로써 달성되었다.

향후 전망

지금까지 대부분의 연구는 난류

제어의 가능성만을 제시하는 개념적 수준에 머물러 있다. 난류유동에 존재하는 조직적인 구조는 작게는 몇 μm 에서 몇 백 μm 의 크기를 가지고 있으며, 자유유동속도의 60~80%의 속도로 움직이며 공간이나 시간적으로 매우 불규칙하게 나타난다. 따라서, 이러한 조직적인 구조를 효과적으로 능동제어하기 위해서는 미세한 크기의 센서와 액츄에이터가 필수 불가결하다. 이러한 관점에서 보면, MEMS 기술은 실용성 있는 난류제어를 위한 도구가 될 수 있다. 앞으로는 정밀 유동해석을 이용한 난류제어기법의 개발과 아울러 이를 현실화할 수 있는 실험적 연구도 함께 추진되어야겠다.



〈그림 3〉 New York Times의 기사