

# 능동 및 수동 난류제어

이 글에서는 난류제어의 필요성과 방향, 기본 원리 그리고 구체적인 방법을 최근 연구동향과 함께 소개하고자 한다.

최해천·전우평

다 양한 공학적 문제에서 발생되는 난류유동을 제어함으로써 얻어질 수 있는 이익은 매우 크다. 예를 들면, 여객기의 연료 소모를 10% 줄이게 되면 그로 인하여 항공사의 이익이 40% 증가하게 된다. 또한, 고속의 유동장에서 발생하는 소음의 감소는 환경친화 기술의 요구와 함께 매우 중요한 문제가 되고 있다. 그리고 각종 엔진(또는 연소실) 내에서 연료와 공기의 적절한 혼합은 난류의 증대 또는 감소를 통하여 구현될 수 있으며, 난류의 증대로 인하여 발생하는 열전달 향상은 최근의 반도체 칩 기술의 발달과 아울러 매우 중요한 분야가 되고 있다. 따라서, 난류제어의 문제는 지금 당장 연구되어야 하는 중요한 문제다. 종래의 난류제어 연구는 난류구조를 완전히 파악한 후에 제어를 하고자 하였으나, 이제는 제어 이론의 발달과 더불어 다양한 종류의 시도를 할 수가 있다. 난류제어는 매우 어려운 분야이지만 매우 매력적인 분야임에는 틀림없다.

종래의 난류제어 연구는 난류구조를 완전히 파악한 후에 제어를 하고자 하였으나, 이제는 제어 이론의 발달과 더불어 다양한 종류의 시도를 할 수가 있다.

1990년 이전의 난류유동 제어는 주로 경험적 또는 실험적인 시도에 그치고 있었다. 그러나 난류에 존재하는 조직적인 구조(coherent structure)가 난류유동의 역학적 관계에서 매우 중요한 역할을 수행하고 있음이 알려짐에 따라, 난류유동을 제어하고자 하는 시도는 조직적인 구조를 제어하는데 초점이 맞추어져 왔다.

난류제어는 크게 수동제어와 능동제어로 나눌 수 있다. 벽이 존재하는 유동장에서의 난류제어는 주로 수동적 방법에 국한되어 왔다. 즉, 조직적인 난류구조들의 상호작용을 억제시키기 위한 시도로서 난류유동장 내에 수동제어 장치들을 두었다. 이 수동제어 장치는 동적인 에너지 입력이 없다는 의미에서 수동제어라고 불린다. 최근에

들어, 난류유동을 능동적으로 제어하고자 하는 시도가 활발해지고 있다. 능동적 제어는 시간에 따라 계속 또는 간헐적으로 에너지를 유동장에 입력한다는 점에서 수동제어와 구분된다. 능동제어는 액추에이터에서의 출력이 미리 정해진 경우와 센서로부터의 입력에 따라 순간적으로 변하는 두 가지 종류로 나눌 수 있다. 능동제어 중 전자는 에너지 입력이 시간에 따라 일정할 수도 있고 변할 수도 있다. 그러나 센서가 필요 없기 때문에 개방형 루프(open-loop) 제어를 형성하고 있다. 후자의 경우 제어입력이 센서에서 측정된 값에 따라 연속적으로 변하기 때문에, 개방형 피드포워드 루프(feedforward loop)와 폐쇄형 피드백 루프(feedback loop)를 형성할 수 있다.

능동적 제어방법은 1990년 이후에 활발하게 연구되고 있는 제어방법이다. 현재까지 연구의 대부분은 주로 물리적 관찰에 의거한 난류제어다. 이는 난류구조에 대한

최해천/ 서울대학교 기계항공공학부, 교수/ e-mail : choi@socrates.snu.ac.kr

전우평/ 서울대학교 정밀기계설계공동연구소 난류제어연구단, 연구원/ e-mail : wpjeon@plaza1.snu.ac.kr

시간과 공간에 대한 성질을 파악한 후 이를 제어에 이용하지는 아 이디어다. 이를 위하여 난류구조에 대한 연구가 선행되어야 한다. 한편, 유동현상이 매우 복잡하여 물리적 현상에 대한 구체적인 정보가 부족할 때는 새로운 방법에 의존할 수밖에 없다. 이런 경우에 대하여 체계적인 제어이론을 사용하는 가능성이 타진되고 있다. 난류 제어는 크게 몽푁한 물체 주위의 유동제어와 유선형 물체 주위의 유동제어로 나뉠 수 있다. 이 글에서는 유선형 물체주위의 대표적 유동장인 난류 경계층 유동에 대한 난류제어에 대하여 소개하고자 한다.

### 난류경계층에서의 조직적인 구조

경계층 유동내의 벽 가까이에 가장 널리 관찰된 조직적인 구조는 줄무늬 구조(streaky structure)라 할 수 있다. 여기서 줄무늬 구조란 낮은 속도와 높은 속도의 유체가 유동의 횡 방향으로 번갈아 가며 나타나는 현상이다. 1967년 미국 스탠포드 대학의 Kline 등은 유동 가시화를 통하여 경계층내의 난류 생성은 줄무늬구조의 상승(lift-up), 진동(oscillation), 파열(breakup)과 밀접한 관련이 있음을 보여 주었다. 줄무늬 구조는 벽 가까이 존재하는 유선방향의 보텍스(streamwise vortex)와 밀접한 관련을 가지고 있고, 유선방향의 보텍스는 난류생성과 밀접한 관련을 가지고 있는 벽면방향으로의 강한 유동(sweep)과 벽면에서 멀

어지는 강한 유동(ejection)을 발생시킨다. 최근 저자 등이 수행한 연구에 의하면 벽면의 높은 전단력은 벽면 가까이 유선방향 보텍스와 밀접한 관련이 있고, 유선방향 보텍스로 인하여 벽면방향으로의 강한 유동이 발생할 때 그 부근의 벽면 전단력이 급속히 증가됨이 확인되었다. 또한, 벽면에서의 분사/흡입이 유선방향 보텍스의 강도를 감소시킬 때, 20~30%의 항력이 감소될 수 있음을 보였다. 이러한 유선방향 보텍스와 항력의 관계를 이용하여 리블렛에서의 항력감소를 설명할 수 있었다. 따라서, 물리적 관찰에 의거한 난류제어 방법은 벽면 가까이 유선방향 보텍스를 어떻게 효과적으로 제어할 수 있는가에 대해 초점이 맞추어져 있다.

### 수동 난류제어

수동 난류제어는 위에서 언급하였듯이 난류제어장치를 한 번 설

치한 후 더 이상의 에너지 입력이 없는 제어 방법을 의미한다.

### 리블렛

리블렛(riblet)은 수동제어 방법 중에서 가장 성공적인 제어 방법이라 할 수 있다. 리블렛이란 유선방향으로 미세한 홈이 형성되어 있는 표면이다. 1982년 미국 NASA의 Walsh의 실험결과 리블렛은 최대 8%까지 항력을 줄일 수 있다고 알려져 있다. 리블렛은 상어표면에 있으며, 요트, 항공기, 수영복 등에도 사용되고 있다. 최근 저자 등은 리블렛의 간격과 유선방향 보텍스의 지름의 상대적인 크기에 의해 리블렛의 항력 감소 성능이 결정된다는 것을 직접수치모사(DNS : direct numerical simulation)를 통해 보여 주었다. 즉, 난류경계층에서 유선방향 보텍스의 지름은 벽 단위(wall unit)로 약 30이므로, 리블렛의 간격이 벽 단위로 30 이하일 때 항력이 감소되고 30보다 크게 되면 항력이 오

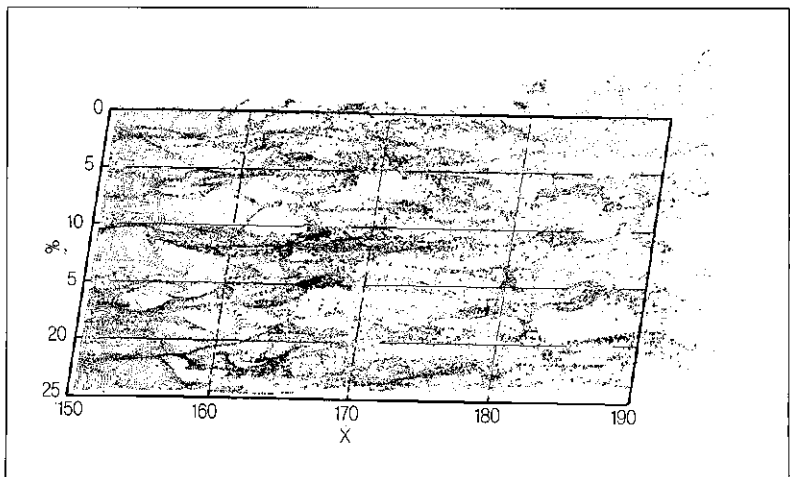


그림 1 난류 경계층 유동에서 벽 가까이 형성되는 줄무늬 구조

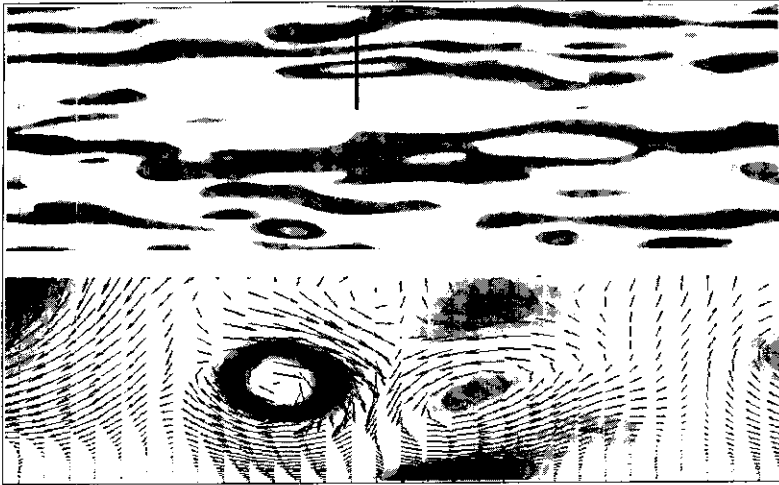


그림 2 (위) 난류 경계층 유동에서 순간 벽면 마찰력의 공간적 분포 (아래) 위 그림에서 높은 마찰력이 발생하는 지점(검은 실선으로 표시된 지점)에서 벽면에 수직인 평면에서 형성되어 있는 속도장 과 유선방향의 보텍스

히려 증가된다.

#### 큰 에디 분쇄 장치

큰 에디 분쇄(LEBU : large Eddy Break-Up) 장치는 경계층 유동의 외층에 존재하는 큰 구조를 파괴함으로써 항력을 감소시키자는 아이디어에서 출발되었다. LEBU에 의한 항력 감소는 그 성능에 대해 논란이 많았으나, LEBU는 평판에서의 항력은 줄이지만 LEBU 장치 자체에 걸리는 항력으로 인하여 전체적으로는 항력이 증가된다는 결론으로 수렴되고 있다. 현재, LEBU에 의한 난류 구조 변화 관점에서 연구는 지속되고 있지만, 항력 감소의 측면에서는 연구가 거의 종결된 상태이다.

#### 유연 벽면

유연 벽면(compliant wall)은 국소 벽면 압력성분에 의하여 벽면이 미소 양만큼 움직이는 탄성 벽면이다. 이 장치는 난류로의 전

이를 지연시킨다고 보고되고 있으나, 유연 벽면이 난류경계층 유동의 항력을 감소시키느냐에 대해서는 논란이 많다. 벽면의 탄성을 이용하여 난류항력 감소를 이루고자 하는 연구는 앞으로 계속 진행될 것으로 보인다.

#### 능동 난류제어

능동 난류제어는 물리적 관찰에 의거한 방법과 체계적인 제어이론을 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 이 글에서는 이들 방법을 이용한 연구결과를 중심으로 능동 난류제어 연구를 알아본다.

#### 반대(opposition) 제어

1994년 저자 등은 유선방향 보텍스를 제어하기 위해, 벽면에서 약간 떨어진 곳(벽 단위로 10)에서의 벽면수직 속도성분과 정반대가 되는 속도로 벽에서의 분사/흡입을 행하였다. 그 결과 약 25%의

항력감소를 획득하였고, 난류 섭동량은 모두 감소하였다. 제어 초기에는 벽면의 분사로 인하여 높은 전단응력을 가지는 국소 지역이 벽 위로 이동하여 항력감소 효과가 나타나고, 분사/흡입이 계속하여 진행될 경우 유선방향 보텍스의 강도를 감소시켜 항력감소를 얻게 됨을 보였다. 이는 난류경계층 유동의 능동적 제어를 최초로 수행한 제어결과이며, 유선방향 보텍스의 제어에 의하여 항력이 감소될 수 있다는 가능성을 최초로 제시한 연구결과이다.

#### 플리머 첨가

1946년 Toms가 처음으로 플리머 첨가에 의해 항력이 급격히 감소한다는 것을 발표한 이후, 수많은 연구가 진행되어 왔다. 그러나 현재까지도 항력 감소에 대한 정확한 메커니즘은 밝혀지지 않고 있다. 이 분야에 대하여 최근 직접 수치모사 또는 큰 에디 수치모사(LES : large eddy simulation)를 통하여 항력 감소 메커니즘을 파악하는 연구가 진행되고 있다.

#### 미소기포 첨가

미소기포(microbubble)를 이용하여 물에서의 항력을 줄이고자 하는 연구는 상대적으로 적다. 미소기포 기포는 대략 50 마이크로미터 정도의 기포를 다공성 벽이나 난류경계층에 분사하여 항력감소를 꾀하는 방법이다. 이때 항력은 기포가 첨가된 주위에서 약 80%까지 감소된다고 하고, 벽면 압력과 벽면 전단응력의 높은 주파수 성분이 감소된다고 보고되어 있다.

그러나 하류에서의 기포거동, 벽면 전단응력분포 및 난류성분들은 거의 알려지지 않고 있다. 또한 미소 기포가 왜 항력을 감소시키는가에 대한 메커니즘은 전혀 알려지지 않고 있다. 이 때, 미소기포로 인한 밀도의 감소로는 80%의 항력감소를 설명할 수 없다.

### 입자 첨가에 의한 항력감소

기체에 수십 마이크론에 해당하는 고체입자를 투입함에 의해 10~70% 항력 감소를 획득하였다는 연구결과들이 보고되었다. 이는 경험상으로 볼 때, 고체입자가 유동장내에 존재할 때 더 높은 항력을 일으킬 것이라는 통념과 반대되는 결과라 할 수 있다. 이 방법에 의한 연구결과는 거의 항력의 변화만을 측정하였을 뿐, 구체적인

난류량의 변화는 잘 보고되어 있지 않다. 따라서, 난류유동과 입자가 어떻게 서로 상호작용을 하는가에 대한 연구가 최근에 진행 중에 있다.

### 전자기장에 의한 항력감소

일정한 양의 자기유속에 의해 발생하는 항력 감소는 매우 오래 전부터 실험적으로 고찰되어 왔다. 전기가 통하는 유체로 이루어진 난류유동장에 벽면에 수직한 방향으로 자기장을 걸었을 때, 난류항력은 감소한다. 이때 주 유동방향의 속도성분은 증가하고, 벽면에 수직한 방향의 속도성분은 감소한다. 그러나, 자기장의 강도를 더 세게 할 때 항력은 급격히 증가하게 되어 자기장을 걸지 않았을 때에 비해 항력이 오히려 증가하게 된

다. 이와 같은 연구는 실험적으로 행해져 왔으나, 항력감소와 난류성분 변화의 메커니즘은 밝혀지지 않았다. 최근 들어, 본 연구진은 직접수치모사를 이용하여 자기장에 의한 난류항력 감소에 대한 메커니즘을 제시하였다. 이를 보면, 자기장에 의한 로렌츠 힘은 국소 속도장의 방향과 반대되는 방향으로 작용하고 있음을 알 수 있다. 자기장에 의한 난류유동제어는 최근에 컴퓨터의 발달과 아울러 연구가 다시 시작되고 있다.

### 최적 및 준최적 제어

1990년에 Abergel과 Temam은 유체유동의 여러 가지 문제에 대하여 최적제어(optimal controls)이론을 사용한 제어 방법을 제시하였고, 최근 Bewley 등은 최적제어이론을 난류채널 유동장에 적용하여 낮은 레이놀즈 수에서 난류를 층류로 만들 수 있음을 수치해석을 통하여 제시하였다. 그러나 이 방법은 속도장 전체의 시간 및 공간에 대한 정보를 모두 알아야 적용할 수 있는 방법으로서 현실적으로 적용하기에 무리가 있다.

1993년 저자 등은 현실적으로 적용 가능한 준최적 제어(sub-optimal controls) 방법을 최초로 개발하였다. 그 후, Lee 등은 최소화시키고자 하는 목적함수를 적절히 설정할 경우 난류채널유동에서 약 20%의 항력감소를 얻을 수 있음을 보였다. 이때 제어를 하기 위해 사용된 센서는 벽면에서의 압력 또는 전단력을 측정하고, 측정된 값은 액추에이터에서의 분사/흡입 값을 결정하는 데에 사용되었다.

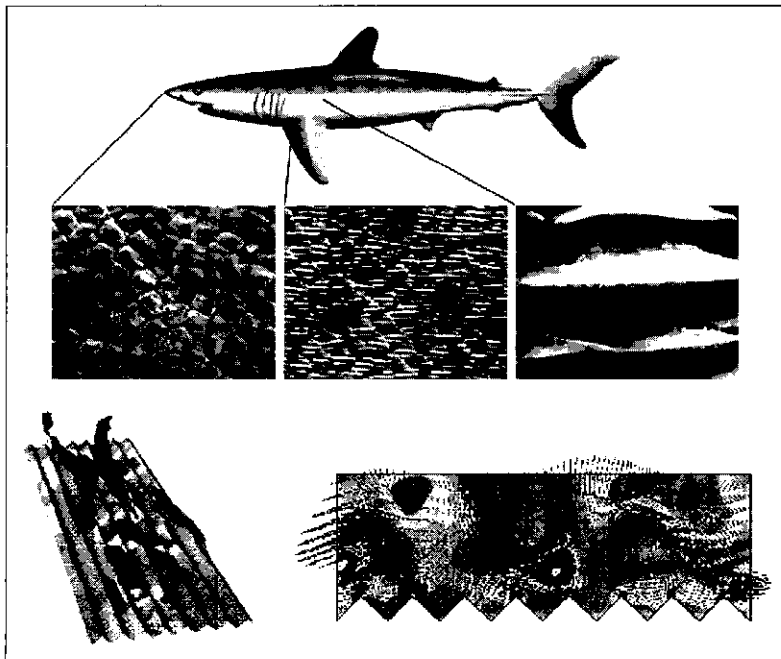


그림 3 (위) 상어표면에 분포되어 있는 리블렛형상 (아래) 리블렛의 직접수치모사 결과 (리블렛 위의 3차원 난류유동을, 오른쪽 그림은 주 유동방향 보텍스와 리블렛과의 상호작용을 각각 보여준다)

최근, 본 연구팀은 실린더 주위 유동의 제어와 후향계단 주위 유동의 제어에 준최적 제어 방법을 사용하여 좋은 결과를 제시하였다.

최적제어이론을 이용한 최적형상설계 가능성은 1973년 프랑스 수학자인 Pironneau에 의해 개발되었다. 그의 연구는 주로 낮은 레이놀즈 수에 국한되어 있으나, 난류유동에의 적용도 곧 가능해지리라 예상된다. 본 연구진에서는 낮은 레이놀즈 수에서 디퓨저 및 곡면 덕트의 최적형상 설계를 수행하여 각각의 최적형상을 제시한바 있다. 난류 경계층 유동에서 어떠한 형상의 표면이 최소의 항력을 보여줄 것인가, 리블렛이 최적의 형상인가 등과 같은 질문은 학문적인 면뿐만 아니라 실제적으로도 중요한 문제임이 틀림없다.

### 신경망 제어

벽면에서의 항력을 감소시키는 분사/흡입의 형태는 난류유동의 비선형성으로 인하여 쉽게 구할 수 없다. 최근 Lee 등은 이중 피드포워드 망(two-layer feed-forward network)을 사용하여 항력을 최소화하는 분사/흡입의 형태를 구하고 이를 적용한 결과 약 20%의 항력감소를 획득하였다. 이때 센서는 벽에서 전단력을 측정한다. 최근, 난류유동제어뿐만 아니라 일반적인 유체유동문제에서도 신경망 이론의 적용이 활발해지고 있다.

### 비선형 동적 시스템 제어

비선형 동적 시스템 제어의 기본적인 아이디어는 미소 교란이 결

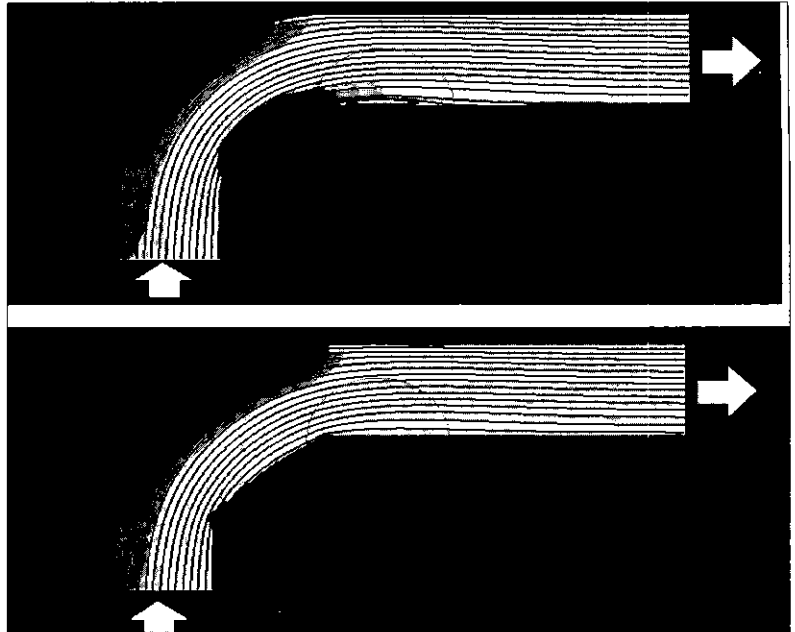


그림 4 곡면덕트의 최적형상설계 : 위 그림은 덕트의 이음부를 원형으로 연결하였을 때, 아래 그림은 덕트의 이음부를 최적형상설계하여 연결하였을 때를 보여 준다. 아래 그림에서 유동박리가 완전히 사라짐을 볼 수 있다.

정론적(deterministic) 시스템에서 나타나서 매우 불규칙적인 거동을 나타내는 것과 마찬가지로, 작은 입력으로 불규칙적인 시스템을 제어할 수 있지 않을까 하는 것이다. 난류 경계층 유동은 비선형 편미분 방정식인 나비에-스톡스 방정식에 의해 나타나고 무한개의 자유도를 지니고 있다. 따라서, 무한개의 자유도로는 동적 시스템 근사로 나타내기 매우 힘들다. 최근, 적절한 직교 분할(proper orthogonal decomposition) 방법을 사용하여 난류 경계층 유동을 비교적 적은 개수의 자유도로 표현할 수 있다는 것이 제시되었다. 현재, 비선형 동적 시스템 개념을 이용한 연구가 진행중이지만, 이를 이용한 난류 경계층 유동의 제어 결과는 현재까지 제시되지 않았다.

### 카오스 제어

비선형 동적 시스템에서 능동제어에 의해 무질서 거동을 안정화시킬 수 있지 않을까 하는 의문이 존재해 왔다. 1990년 Ott 등은 상대적으로 작은 양의 제어입력으로 불안정한 궤도(orbit)를 안정화시킬 수 있음을 보고하였다(OGY 제어). 이 연구는 현재 카오스 제어에 대한 획기적인 연구로 인정되고 있다. 최근 Keefe는 OGY 제어 방법을 이용하여 난류채널유동에서 항력이 80%까지 감소될 수 있음을 보였다. 그러나 사용된 방법에 임의적인 것이 포함되어 있어서, 현실적으로 적용하기에는 무리가 있다. 난류유동이 카오스 이론으로 표현될 수 있다면, OGY 제어 방법에 의한 난류유동 제어는 많은 가능성을 내포하고 있다.