

전자기력을 이용한 난류 유동 제어

전자기력을 이용하여 항력을 감소시키기 위한 난류 제어에 대하여 최근의 연구결과를 중심으로 기본원리 및 실현성에 대하여 소개한다. 이창훈

전자기력(Electro-magnetic force) 혹은 로렌츠 힘(Lorentz force)은 전기장과 자기장이 교차되는 지역에서 전기장과 자기장 방향에 공통으로 수직인 방향으로 오른손 법칙에 의해서 유도되는 체적력(body force)을 의미한다. 전자기력을 유동의 제어에 적용시키려는 노력은 이미 그 역사가 오래되었으나 최근의 전산유체기법 및 슈퍼컴퓨터의 발전 및 실험기법 등의 개발에 따라 재조명되고 있다. 최

근의 연구 동향 및 기본적인 원리에 대하여 알아본다.

초창기의 전자기력의 응용은 전도성을 띠는 바닷물 속에서 운행하는 잠수함이나 일부 잠겨 있는 선박의 추진력을 얻기 위한 연구에서 시작되었다. 직접적으로 유체에 전자기력을 가함으로써 추진력을 얻고자 또는 난류로의 전이를 지연함으로써 항력의 감소를 얻고자 시도되었다. 톰 클랜시의 소설을 영화화한 '붉은 10월'의 내용 속의 러시아 잠수함

이 전자기력을 이용한 추진기관을 장착하였으나, 바닷물과 같이 약전도성의 유체에서는 자기장에 의해 유도되는 전기장이 무시할 수 있을 정도로 약하기 때문에 외부에서 전기장을 가해주어야 하므로 실제 효율 측면에서 거의 실현 불가능하다. 비교적 실현 가능한 접근은 최소한의 입력일률만을 이용한 난류유동의 효과적인 제어를 통한 유동특성의 변화에 따른 항력감소라 할 수 있다. 이 글에서는 최근의 연구동향에 초점

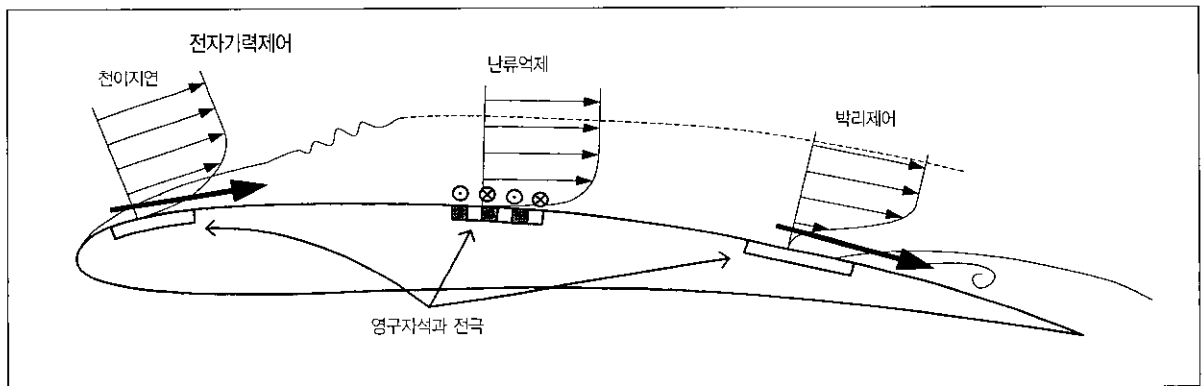


그림 1 익형 주위의 유동의 제어를 위한 전자기력의 응용 예를 보여준다. 바닥 면에 내장된 전극과 자석에 의해 형성된 전기장 및 자기장의 교차에 의해 전자기력이 형성되며, 그림과 같이 전자기력의 방향을 주유동방향천이지연과 박리제어)과 주유동방향에 수직인 횡방향으로 가함으로써 유동을 제어할 수 있다.

이창훈/ 연세대학교 기계전자공학부, 교수/ e-mail : clee@yonsei.ac.kr

을 맞추어 전자기력의 난류유동에의 적용을 통한 항력감소에 대한 내용으로 국한하여 서술한다. 그리고 약전도성의 유체에 국한하여 유도되는 전기장 또는 이에 따른 유도되는 로렌즈힘은 무시되는 범위에 한하여 고찰하자.

항력감소를 위한 난류유동의 제어를 익형 주위의 유동제어의 경우에 대하여 고찰하면 세 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 경계층의 형성이 시작되는 영역에서 층류 경계층유동으로부터 난류 경계층유동으로의 전이의 지연을 통한 난류마찰저항의 감소, 둘째, 완전히 발달된 난류경계층유동에서 벽 근처에서의 난류마찰 유발 구조들의 직접적인 제어를 통한 난류마찰저항의 감소 그리고 역압력구배에 의한 박리의 제어에 의한 형상저항의 감소로 분류할 수 있다[그림 1 참조]. 각각의 경우에 대하여 자세히 살펴보자.

전이의 지연 제어

전이의 지연을 위한 전자기력의 응용은 초기의 연구자들에 의해서 시도되었으며, 기본적인 원리는 다음과 같다. 우선 막대모양의 전극과 영구자석을 +, N, -, S의 형태로 평행하게 교대로 배열시켜 바닥 면에 막대방향의 주유동방향과 평행하도록 설치한다. 그리고 전압을 가해주면 전기장이 형성되며, 이미 형성된 자기장과 교차에 의해 주유동방향으로의 전자기력이 생성된다. 이 전자기력은 바닥 면의 근처지역으로 국부화되어 있고 층류경계층

두께가 성장하는 것을 지연시킬 수 있다. 이로 인해 그 만큼 난류로의 전이가 지연되면 마찰저항의 감소를 얻을 수 있다. 층류경계층의 성장에 따른 불안정성을 주유동 방향의 전자기력을 통해서 억제함으로써 전이를 지연하고자 함이다. 원하는 유동제어를 얻기 위해서는 경계층 내부에 국한된 전자기력을 생성해야 하며, 이는 전극 또는 자석의 폭의 선택에 따라 결정된다. 아울러 생성된 전자기력은 주유동 방향으로 유체에 가해지므로 추가적인 추력을 얻게 된다.

난류경계층 제어

두 번째로 완전히 발달된 난류 경계층의 제어는 최근 10년 동안 상당히 활발히 연구되어왔으며, 전이의 제어와는 다른 접근 방식이 시도되고 있다. 우선 완전히 발달된 난류유동에서 마찰저항의 주요인에 대한 연구는 전산

유체기법 등을 통해서 이미 밝혀진 바 있다. 층류유동과는 달리 난류경계층에서는 벽 근처에서 생성되고 유지되는 일종의 2차유동이 마찰저항의 대부분에 대하여 책임이 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 벽 근처의 2차유동은 주로 응집된 난류구조의 형식을 지니고 있으며, 주유동 방향을 중심으로 회전하는 와류구조들이 가장 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고 있다. 이 와류구조에 동반된 벽에 수직방향의 상하운동이 주유동방향의 운동량의 교환에 절대적인 역할을 하고 있다. 비록 시간과 공간에 랜덤하게 구조들이 생성되고 있긴 하나 생성된 구조들은 주유동방향으로 길다란 구조를 유지하기 때문에 주유동방향의 운동량 교환에 핵심적인 역할을 한다. 따라서 난류마찰저항을 감소시키기 위해서는 이러한 구조들을 효과적으로 약화시키면 가능할 것으로 예측된다.

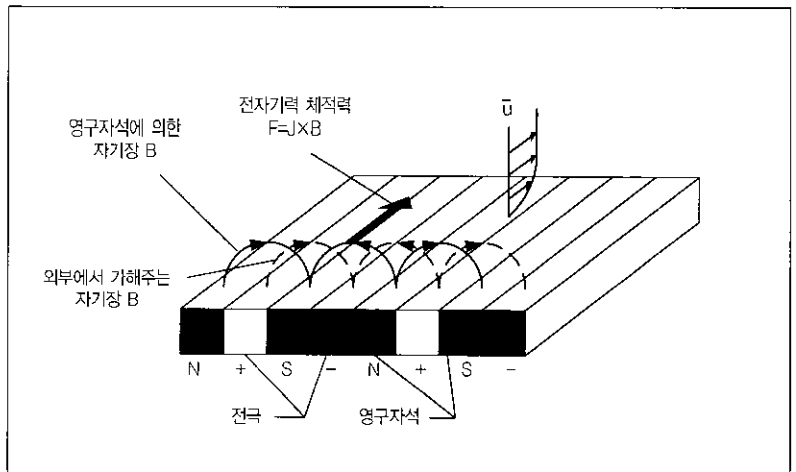


그림 2 전이의 지연과 박리의 제어를 위한 전극과 자석의 배열. 미해군연구소에서 박리의 지연을 위해 실험적으로 시도된 적이 있다.

개방식 제어(Open-loop control)와 피드백 제어(Feedback control) 두 가지 제어방식을 생각해보자. 개방식 제어는 피드백이 없이 일방적으로 제어입력을 가하는 방식이며, 피드백 제어는 센서에 의한 제어의 성능변화를 제어입력의 결정에 이용하는 방식이다. 우선 개방식 제어로 가장 쉽게 실현할 수 있는 방법은 천이의 제어에서 제시된 전극과 자석의 평행배열을 이용하는 방법이라 할 수 있다. 이번에는 교대로 배열된 전극 및 자석을 길이 방향이 주 유동방향에 수직되는 횡방향으로 배치하는 방법이다(그림 참조). 따라서 생성된 전자기력은 횡방향을 향하며, 벽 근처에 국한되며, 벽에서 최대값을 갖는다. 그러나 유발되는 횡방향의 유동은 벽에서의 점착조건 및 점성의 영향에 의해 벽에서 약간 떨어진 지점에서 최대값을 갖는 일종의 제트유동의 구조를 갖는다. 이러한 제트유동은 전단유동을 동반하게 되며, 전단력의 위치를 난류 2차구조인 주 유동방향을 중심으로 회전하는 와류구조의 평균 위치와 일치시킴으로써 전단에 의해 와류구조를 약화시킬 수 있다. 유발된 제트와 전단은 벽에 수직방향으로는 국부적이거나 벽에 평행한 면에서는 균질하므로 일종의 스토크스 층과 같은 역할을 한다. 그러나 한 방향으로 지속적으로 전단을 가해 주면 전단유동 자체의 불안정성, 예를 들면 켈빈-헬름홀츠 불안정성 등에 의해서 지속적으로 안정된 제어가 불가능해질 수 있다.

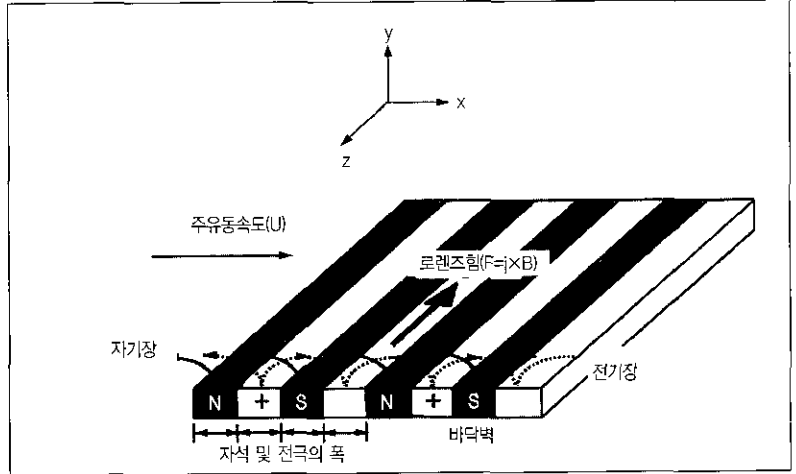


그림 3 완전히 발달된 난류경계층의 제어를 위한 전극과 자석의 배열.

또한 주 유동방향의 와류구조는 두 방향의 회전방향을 통계적으로 모두 갖게 되는데 와류의 회전방향과 가해진 전단의 회전방향이 서로 반대일 경우 효과적으로 와류가 약화되며, 같은 방향의 경우 상대적인 변수 값에 따라 평형을 이루어 와류구조가 유지될 수 있으므로 전단의 방향을 시간에 따라 바꿔줄 필요가 있다. 실제적으로는 전극의 극성을 바꿈으로써 쉽게 전자기력의 방향을 바꿀 수 있다. 따라서 시간에 대해서 주기적인 전단유동을 생성시킴으로써 모든 와류구조를 효과적으로 약화시킬 수 있다. 이러한 제어방식은 이미 직접수치모사(난류의 모델 사용 없이 직접 유동의 시간적, 공간적 변화를 해석하는 수치기법)를 이용한 난류의 제어에 대한 연구에서 시도되어 긍정적인 결과들이 보고되었다. 연구결과에 의하면 전단의 벽으로부터의 위치는 전극이나 자석의 크기에 의해서 결정되며, 필요한 전압

의 최적값이 존재한다. 그리고 전극의 극성을 변화시키는 주기 또한 중요한 변수이며 최적의 값이 존재하는 것으로 보고되고 있다. 전단에 의해서 주유동방향의 와류구조를 약화시킴으로써 얻을 수 있는 항력감소는 40%에 이르는 것으로 보고되었다.

유사한 전단유동의 효과는 공간상으로 전단력의 방향을 변화시킴으로써 얻을 수 있다. 즉, 난류구조들이 주 유동방향의 평균 유동에 의해 하류방향으로 운반되므로 주 유동방향으로 진행됨에 따라 횡방향의 전자기력 및 이에 따른 전단유동의 부호가 변화하도록 전극, 자석의 배열을 조정할 수 있다. 이 경우 시간에 대한 주기적인 변화는 필요 없게 된다. 대신 주 유동방향으로의 공간상의 주기가 유사한 역할을 하며 최적의 값이 존재한다. 유사한 항력감소 및 난류구조의 변화가 보고되었다.

이제 이러한 제어방식의 실현

성에 대하여 생각해보자. 우선 실제로 앞에서 제시한 전극과 자석의 배열이 가능할까? 평행하게 배열하여 벽에 붙이는 것 자체는 제조상의 문제가 없으나 필요한 전극과 자석의 크기를 추정해 볼 필요가 있다.

충분히 큰 레이놀즈수의 난류 경계층유동에서 벽 근처의 난류구조들의 크기는 벽 수직 방향으로 100 마이크로톤 내외이므로 100 마이크로톤 크기의 전극과 자석이 필요함을 알 수 있다. 최근의 MEMS 기술 수준으로 볼 때 불가능하지 않

음을 알 수 있다. 시간에 따른 주기적인 변화 및 공간상의 주기성의 구현은 쉽게 이를 수 있다.

실현성의 검토에서 다음으로 중요한 요인은 바로 효율이다. 약전도성의 유체에서 전자기력을 생성시키기 위해서는 추가적인 전력입력이 필요하다. 따라서 항력의 감소에 따라 획득한 일률이 이를 얻기 위해서 필요한 입력일률에 비해서 상대적으로 클 경우 전체적으로 순 이득이 있다. 앞에서 소개한 제어방식을 실제로 구현하기 위해 필요한 입력일률을 추정한 결과 항력감소에 따른 얻은 일률에 비해 상당히 큰 것으로 보고되었다. 심지어는 1,000배

정도의 입력일률이 필요한 것으로 추정되었다. 이는 유체의 약전도성에 의한 필연적인 결과이긴 하나 자세히 분석해보면 여러가지 추가적인 낭비요소가 내재해 있음을 알 수 있다. 우선 난류마

있을 것으로 기대된다. 두 번째로 제어가 완전히 이루어진 후, 즉 난류구조들이 상당히 약화된 이후에는 초기와 같은 크기의 전자기력이 필요 없을 수 있음을 추측할 수 있다. 실제적으로도 항력이

감소된 유동을 유지하기 위해서는 훨씬 작은 크기의 입력일률로도 충분한 것으로 밝혀진 바가 있다. 따라서 이러한 두 요인을 감안하여 전자기력의 크기를 시간에 대해서 적절히 조절함에 따라 효율의 향상을 기대할 수 있다. 그러나

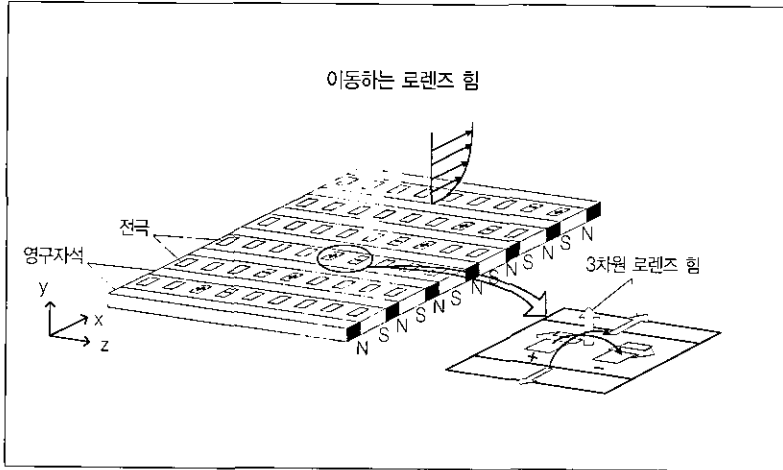


그림 4 전극과 자석을 교차하도록 배치함으로써 3차원 전자기력을 생성시킬 수 있으며, 하류로 갈수록 시간지연을 이용하면 횡방향과 후류방향으로 움직인 전자기력을 생성시킬 수 있다. 실험적으로 Princeton 그룹과 Brown 그룹에 의해서 시도되었고 현재도 시도 중에 있다.

찰저항의 주 요인인 주유동방향의 와류구조는 시간상으로 랜덤하게 발생되며, 공간적으로도 상당히 국부적으로 발견된다. 이 구조를 약화시키기 위해 시간에 대해서는 향상, 그리고 공간에 대해서도 균질하게 전자기력을 생성하여 가해주고 있음을 쉽게 알 수 있다. 즉, 필요 없는 지역에도 전자기력이 가해지고 있다는 점이다. 개방식 제어로서 한계점이긴 하지만 개선의 여지가 있음을 알 수 있다. 공간상으로는 센서를 이용하지 않는 한 와류구조의 위치를 추적하는 것은 불가능하나 시간적으로는 간헐적인 전자기력의 응용을 통해 입력일률을 줄일 수

1,000이라는 숫자가 쉽게 극복될 것으로 기대하기 어려울 것으로 보이나 실제로는 그렇지 않다. 왜냐하면 입력일률은 전자기력의 크기에 제곱에 비례하므로(일률은 전류와 전압의 곱 또는 전압의 제곱에 비례함) 전자기력의 크기를 1/10 또는 1/100로 줄일 수 있으면 실제 입력일률은 1/100 또는 1/10,000로 감소함을 의미한다. 따라서 승산 있는 게임인 것이다.

개방식 제어로서 앞에서 언급한 방식 외에도 몇 가지 방식이 제시되고 있다. 예를 들면, 전극과 자석을 평행하게 배치하지 않고 서로 수직이 되도록 배치하여

벽 근처에서 3차원 전자기력을 형성하여 유동을 제어하고자 하는 시도가 이루어진 바가 있다. 두 쌍의 전극, 자석으로 구성된 세트를 바닥 면에 일정한 규칙 하에 배열하여 생성된 전자기력이 시간 그리고 공간상의 이동하는 파(travelling wave)의 형식을 취해서 유동을 제어하는 방식을 들 수 있다. 일부분 긍정적인 효과들이 보고된 바가 있으나 엄밀한 검증이 이루어지지 않았다. 그리고 일부 방식은 앞에서 언급한 스토크스 층에 의한 효과와 유사한 메커니즘에 의해 항력이 감소하고 있음을 쉽게 추측할 수 있다.

피드백 제어방식은 효율의 향상 측면에서 바람직하긴 하나 실현가능성 면에서는 아직 요원한 방식이라 할 수 있다. 그러나 기본적인 제어방식에 대해서는 수치적으로 검증이 가능하기 때문에 일부 시도되고 있다. 선행된 연구에 의하면 이론적으로 벽에서 측정되는 횡방향의 전단응력의 국부적인 분포의 함수로 벽에서 흡입 및 분출을 가할 경우 최소한의 입력일률로 상당량의 항력감소를 얻을 수 있다. 벽에서의 흡입 및 분출은 현재의 액추에이터 개발수준에서는 실현 불가능한 제어입력이다. 따라서 비교적 실현가능한 전자기력을 이용하여 흡입 및 분출의 효과를 기대할 수 있다. 수치적으로 이에 대한 검증은 수행되었으며 개방식 제어방식에 의한 항력감소량에 상당한 항력감소를 훨씬 적은 입력일률로 얻을 수 있음이 보고되었다.

실현성을 고려할 때 구체적으로 수반되는 여러 문제점이 제시되고 있다. 예를 들면, 센서와 전극, 자석의 실제적 배치에 따른 문제점 또는 실제 발생하는 전자기력의 3차원 성질 등을 들 수 있다. 필요한 성분의 전자기력 외에 동반되는 추가 전자기력은 보통 유동제어 측면에서 호의적이지 않기 때문이다.

박리의 제어

마지막으로 전자기력을 이용한 박리의 제어에 관해서 살펴보자. 박리현상은 익형의 후반부 등에서 역압력구배에 의해서 발생하는 특이현상이다. 박리에 의해서 압력이 완전히 회복되지 못하면 전반부와 후반부의 압력차이에 의해 형상저항을 느끼게 된다. 이러한 형상에 의한 항력을 감소시키기 위해서는 박리의 발생을 억제할 수 있는 제어가 필요하다. 이는 박리가 발생하기 직전에 주 유동방향으로 전자기력을 가해주면 가능하다. 난류로의 천이를 지연시키기 위해서 전극과 자석을 교대로 주 유동방향에 평행하게 배치하여 주 유동방향의 전자기력을 생성시킬 때와 똑같은 배치를 사용할 수 있다. 기본적인 전략은 천이의 제어와 같이 순압력 구배를 생성시킴으로써 천이의 경우는 경계층의 발달을, 박리의 경우는 박리의 생성을 억제하는 방법이라 할 수 있다. 박리의 제어에 대해서는 실험적인 연구는 미국 해군연구소(US Naval Underwater Warfare Center)에

수행된 적이 있으며, 주 유동방향의 전자기력에 의해서 박리가 완전히 억제되었음이 보고된 바 있다.

전자기력을 이용한 난류유동의 제어에 대하여 주로 항력의 감소를 위한 연구 위주로 간단히 살펴 보았다. 주로 기본적인 원리 및 이의 수치적인 검증내용을 살펴 보았으나, 일부는 실험적으로도 검증되고 있다. 언급한 몇 가지 제어방식은 지금까지 수행되어온 수많은 방식 중 일부이며 주로 저자에 의해서 또는 저자 주위의 연구그룹 등에 의해 최근에 수행되어온 연구의 결과에 국한됨을 밝힌다. 아직 효율 측면에서는 바람직한 결과를 얻지 못하고 있으나 미국, 주로 해군연구소 그리고 유럽 등지에서 지속적으로 연구를 수행하고 있어서 긍정적인 결과를 점차적으로 얻을 것으로 기대된다.