

# 환경 및 산업에서의 난류유동 이해와 응용

김 경 천

## Understanding and Applications of Turbulent Flows in Environmental and Industrial Fluids Engineering

Kyung-Chun Kim



● 김경천 (부산대 생산기계공학과)  
● 1957년생  
● 난류박리유동의 실험 및 모델링을 전공하였으며, 실험유체역학, 대기 오염 확산 모델링, 물질가공 관련 열유체, 열유체 시스템의 설계 및 제어에 관심을 가지고 있다.

### 1. 난류유동의 소개

우리의 일상생활에서 난류유동에 관련된 직관적인 지식을 경험하는 기회는 얼마든지 있다. 담배연기가 올라가는 모습이나 장작이 타는 불꽃의 모습에서 불규칙하고 아름다운 난류유동을 관찰할 수 있으며, 비행기를 타고 여행할 때 기장이나 스튜어디스가 난류 때문에 기체가 흔들리니 좌석벨트를 메달라는 주문은 비전문가에게도 난류가 어렵듯이 무엇인가를 가르쳐주고 있다. 개천이나 강의 흐름을 다룰 때에도 난류현상은 침전물의 이동이나 강바닥 내부의 흐름과 관련하여 중요하게 취급된다.<sup>(1)</sup> 비행기의 날개나 임의 형상의 장애물에 비교적 빠른 유체가 지나가면 난류경계층이나 난류후류가 발생하며, 이는 항력을 증가시키고 소음을 유발하는 등 후속적 현상이 발생하므로 비행기나 자동차를 설계하는 사람들은 가능하면 난류의 과도한 발생을 억제하여 성능을 보다 향상시키려

고 노력한다.<sup>(2)</sup> 대기유동이나 해양의 조류도 난류유동의 범주에 속하므로 정확히 예측되지 못하고 있다. 지구뿐 아니라 목성과 토성의 대기에서도 난류의 흔적을 발견할 수 있으며 심지어 대규모의 은하단에서도 혼합류(mixing layer)의 대규모 와(eddy)와 같은 모습을 하고 있음이 관찰된다. 기계공학의 범주 이외에도 난류현상은 항공공학, 수리학, 핵공학, 화학공학, 해양학, 기상학, 천문학, 지구과학 등과 관련된 학문적 대상이 매우 빈번히 등장하고 있다.

그러면 난류의 정확한 정의는 무엇인가? 물론 난류란 시간과 공간에 대해 매우 불규칙적인 유동현상이라고 말할 수 있지만 엄밀히 따지면 명백한 수학적, 논리적 정의가 불가능하다.<sup>(3)</sup> 난류라고 불리는 유동들은 자세히 살펴보면 서로 확연히 다른 동적거동들을 함께 포함하고 있음을 알 수 있다. 즉, 완전히 3차원적인 유동현상과 준이차원적(quasi-two-dimensional)인 구조인 조직적 구조(organized structures)가 혼합되어 있음을

알 수 있다. 또한 난류유동의 두드러진 특징은 분자확산 과정에서의 혼합이 진행되는 속도보다 엄청나게 빠른 속도로 물리적 상태량의 확산이 진행된다는 것이다. 이러한 특징은 난류현상을 실제적인 공학에 적용하고자 하는 엔지니어들, 예컨대 열 및 물질전달을 효과적으로 진행시키고자 하는 사람들에게 매우 중요한 관심사이다. 다소 의미론적 정의이지만 다음과 같이 난류에 대한 잠정적인 정의를 내려볼 수 있다.

첫째, 난류유동은 예측이 불가능해야 한다. 즉, 주어진 초기시간에 알고 있는 유동 정보에 대해 매우 작은 불확실성이 개입하게 되면 이 교란이 증폭되어 다음 상황을 정확히 예측함이 불가능해야 한다.

둘째, 앞서 언급한 바와 같이 난류는 증가된 혼합성질을 보유해야만 한다. 난류의 에너지가 가장 큰 와의 특성길이를 ' $l$ '이라고 하고 특성난류속도(fluctuating velocity)를 ' $v$ '라고 두면 난류에 대한 혼합과정과 무작위변수 거동의 유사성으로 인하여 난류확산 계수가 ' $lv$ '에 비례한다고 정의할 수 있다. 여기서 보통 ' $l$ '은 혼합거리(mixing length)라고 불리어진다. 만약 ' $v$ '와 ' $k$ '를 각각 운동량과 열의 분자확산계수라고 한다면 난류로 인해 증가된 전달현상 때문에 무차원변수 ' $lw/v$ ' 및 ' $lw/k$ '는 반드시 1보다 훨씬 커진다. 이 무차원 수들을 각각 난류 레이놀즈(Reynolds)수와 난류 Peclet수라고 부른다.

난류유동은 필연적으로 불안정한 유동이다. 즉, 작은 교란은 운동방정식의 비선형성질에 의해 증폭되고 만다. 이와 반대되는 개념이 층류인데, 층류에서는 작은 교란이 감쇄되어 버린다. 유동속에 놓인 물체로써 교란을 줄 때 층류와 난류의 평가를 식 (1)과 같이 레이놀즈수를 기준으로 할 수 있고 층류가 유지되는  $Re$ 수는  $2.26 \times 10^{-2}$  정도이다.

$$Re = (\text{유체의 속도}) \times (\text{물체의 크기}) / \nu \quad (1)$$

이러한 유동에서는 점성력이 관성력에 비해 매우 크므로 어떠한 교란도 감쇄되어 난류가 발달할 수가 없다.<sup>(4)</sup>

난류는 유동속에서 실제 어떻게 발생하는가? 대부분의 유동속에는 고체벽면이나 장애물이 존재하고 있으며, 이들로 인해 최초에 비회전[와도(Vorticity)=0]이었던 유동속에서 와도(와도는 속도장의 curl이다.  $\omega = \nabla \times u$ )가 발생된다. 점성유동의 경계조건인 벽부착(no-slip)조건 때문에 벽면근처에서 발생된 와도는 점점 유동속으로 확산되어가고, 유동은 회전영역에서 점점 난류로 발전한다. 와도의 생성은 볼텍스 필라멘트의 확장 때문에 점점 더 증가된다. 난류는 와도와 관계되므로 난류비회전유동이란 상상할 수 없다. 예컨대, 그리드 난류(grid turbulence)는 실험실에서 가장 흔하게 발생시킬 수 있는 난류유동인데, 고정된 그리드에 유체를 통과시키면 그리드 막대 후류에서 형성된 회전유동인 '와열(vortex streets)'이 서로 상호작용하여 난류로 변화된 경우이다. 이처럼 유동장에서 발생하는 와도는 유동장 내부에서 발생하는 경우 이외에도 외부력이나 회전 초기조건(혼합류 같은 경우)으로 발생될 수도 있다.

## 2. 난류유동의 특성

앞절에서 설명했던 난류의 정의를 생각하면서 난류유동의 특성을 좀더 상세히 이해하기 위해선 유동의 가시화 사진을 직접 보는 것이 최선이다. 그림 1은 서로 다른 속도를 가진 평행류 사이에서 형성되는 혼합층을 보여주고 있다.<sup>(5)</sup> 경계면에서 발생하는 Kelvin-Helmholtz형의 불안정성(instability)때문에 대규모의 준-이차원 구조가 발전되어 있음을 볼 수 있다. 여기에 작은 규모의 3차원 난류 구조가 중첩되어 있음을 알 수 있다. 준-이차원적 구조는 매우 먼 하류에까지 지속되는 특성이 있어서 코히어런트(Coherent) 구조

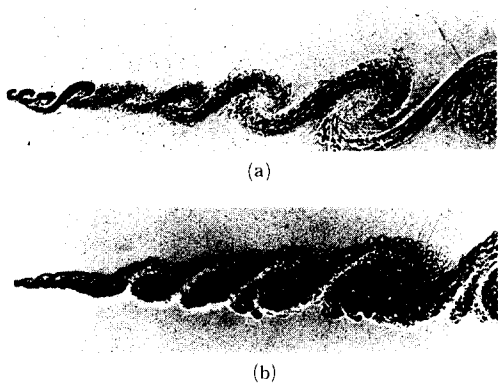


그림 1 혼합층의 난류구조<sup>(5)</sup>  
 그림 1(a)는 그림 1(b)보다 레이놀즈수가 2배인 경우임.

라고 부른다.<sup>(6)</sup> 하지만, 이러한 구조도 점점 비정형적으로 모양이 변하며 완벽히 예측되지도 않는다. 비록, 대규모의 2차원적 구조가 초기에는 규칙적으로 발생하여 성장하는 듯이 보여도 와가 분리되기도 하고 결합되기도 하여 하류에서의 대규모 구조는 난류의 특징인 불예견성을 만족한다. 혼합층에 섞여 있는 작은 구조의 3차원 난류는 보통 충분히 발전된 난류(fully developed turbulence)라고 부르는데, 그 이유는 이 구조가 난류가 생성되는 메카니즘을 완전히 잊어버린 상태가 되었기 때문이다. 즉, 충분히 발전된 난류란 주어진 구속조건과는 무관하게 발전된 난류라는 뜻이다. 구속조건들이란 고체벽면, 외부력, 점성 등이 해당된다. 따라서, 유동의 척도와 비슷한 크기의 난류구조는 아직 발전되지 않은 난류이며, 그 어떤 실제 난류 유동이라도 에너지가 큰 대규모의 구조에서 난류가 종결되지는 않는다. 따라서, 난류의 특성은 대규모 구조에서 점성력이 결정적인 영향을 미치지 않는 범위까지 점점 더 작은 구조로 발전되어 간다. 레이놀즈 수가 충분히 큰 운동장에서는 대규모와에서 소규모 와로 발전되는 비점성영역(intertial subrange)을 반드시 관찰할 수 있으며, 이러한 현상

은 난류의 가장 큰 특징적 현상 중의 하나이다.

난류의 특징 중 신기한 것은 레이놀즈 수가 종류, 난류를 결정하는 중요한 변수이지만 일단 난류영역에 들어가면 대규모 난류구조에 관해서는 레이놀즈 수의 영향이 별로 없는 것이 사실이다(그림 1 참조). 그러나 소규모 구조는 레이놀즈 수에 따라 차이가 있음을 알 수 있다. 즉, 레이놀즈 수가 커질수록 소규모 구조는 더 작아진다. 그 이유는 대규모 난류구조에서 유입되는 에너지만큼 소규모 구조에서 에너지를 소산시켜야 하기 때문이다. 소산율은  $\nu V^2/\lambda^2$ 으로 표시될 수 있으며, 여기서,  $\lambda$ 는 에너지를 소산시키는 난류의 길이척도이고,  $V$ 는 대표속도이다. 만약 레이놀즈 수가 커진다면 동일한 속도내에서  $\nu$ 가 작아지며, 이때  $\lambda$ 의 크기도 동시에 작아져야 하기 때문이다.

여기서, 우리는 난류를 이해함에 있어서 중요한 개념이 에너지의 전달 메카니즘임을 알 수 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 어떤 상황에 도달하여 대규모 와도(Vorticity)가 발생함으로써 난류가 발생한다. 대규모 운동 중 어느 정도의 에너지가 난류에너지로 바뀐다. 이때 난류의 가장 큰 구조의 크기는 기본 흐름의 크기보다 조금 작아진다. 큰 구조의 난류는 불안정하므로 작은 구조로 깨져 나가며 이때 에너지도 점점 작은 구조로 이동된다. 작은 규모의 난류는 난류 레이놀즈 수가 점점 작아져 점성력에 의해 에너지가 소산될 때까지 발전되어지며 이러한 에너지 전달을 에너지 폭포(energy cascade)현상이라고 부른다. 에너지 이외의 대규모 와에 대한 정보는 전달과정 중 모두 잊어버리게 되고 소규모 난류 구조는 국소적으로 등방성을 이룬다.

난류구조 중 가장 작은 구조는 에너지 소산이 일어나는 경우이며, 이때의 길이척도를 콜모고로프(Kolmogorov) 척도라고 부른다. 에너지 소산율  $\epsilon$ ( $m^2sec^{-3}$ )과 동점성계수

$\nu$ ( $m^2sec^{-1}$ )를 고려하면 콜모고로프의 길이, 시간, 속도 척도는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \eta &\equiv (\nu^3/\epsilon)^{1/4}, \\ \tau &\equiv (\nu/\epsilon)^{1/2}, \\ \nu &\equiv (\nu\epsilon)^{1/4}, \end{aligned} \quad (2)$$

콜모고로프 척도로 구해진 레이놀즈 수는  $\eta\nu/\nu=1$ 이며, 따라서 점성소산이 콜모고로프 길이척도를 조절함으로써 난류의 에너지 유입량을 결정하게 된다. 앞서 본 바와 같이 유동의 레이놀즈 수가 커져서 에너지 소산이 커지면 콜모고로프 척도는 감소하게 된다.

난류의 두번째 정의에서 보았듯이 난류에 의한 혼합 증대현상은 매우 중요한 난류의 특징이다. 그림 2는 전형적인 난류경계층의 모습을 보여주고 있다. 비록 유체의 주유동 방향은 하류로 흘러가지만 난류로 인하여 흐름의 직각방향 운동이 활발히 발생함을 볼 수 있다. 이러한 흐름을 가로지르는 유체들은 그 유체속에 내재된 물리량을 함께 운반한다. 이처럼 난류에 의해 유체상태량을 운반할 수 있는 능력을 난류전달(turbulent transport)라고 부른다. 난류유동과 함께 열이나 물질이 혼합되는 과정을 난류 스칼라 전달(turbulent scalar transport)이라고 말한다. 임의의 스칼라량의 밀도를  $C$ 라고 했을 때 대류 스칼라 전달식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{V}C = K\nabla^2 C \quad (3)$$

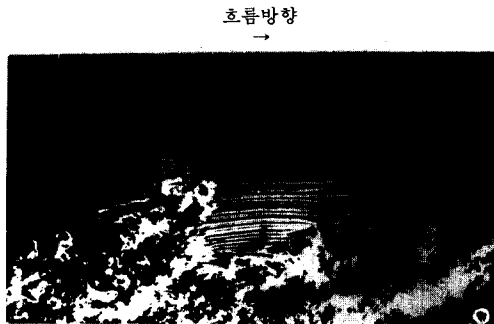


그림 2 전형적인 난류 경계층에 측면도

여기서,  $K$ 는  $C$ 의 확산계수이다.

속도벡터  $\vec{V}$ 를 시간평균  $V$ 와 난류성분  $v$ 로 분리하면 다음 식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle C \rangle}{\partial t} + \nabla \cdot V \langle C \rangle + \nabla \cdot \langle vC \rangle \\ = K \nabla^2 \langle C \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

이때 벡터  $\langle vC \rangle$ 를 상태량  $C$ 의 난류전달항이라고 부른다. 난류전달항은 나비에-스톡스(Navier-Stokes)방정식의 대류(advection)항과 관련이 되므로 근본적으로 비선형이며 해석적으로 취급하기에 매우 어렵다.

난류유동에 영향을 주는 무차원인자로서 레이놀즈 수 이외에도 회전, 밀도 성층, 전자기장 등의 영향을 생각할 수 있다. 이들 중 난류발생과 관련된 부력의 효과는 가장 이해하기가 쉽다. 만약 중력장 속에 있는 유체의 아랫부분이 윗부분보다 가볍다면 부력의 영향에 의해 자연적으로 대류현상이 발생하고 그 자체만으로도 난류가 생성된다. 그 이유는 부력의 효과가 중력의 반대로 작용하면서 난류로부터의 운동에너지를 빼내 위치에너지로 전환시키기 때문이다.

일반적으로 난류의 특성은 '무작위(random)'라는 용어로 취급된다. 하지만 실제 난류에 있어서는 변동성분이 가우시적 분포가 아닌 '간헐적(intermittent)' 경향을 보이는 특성이 존재한다.<sup>(7)</sup> 벽면 경계층에서 난류가 생성되는 메카니즘도 연속적인 무작위 형태가 아니라 간헐적인 'Bursting' 현상으로 발생하는 특징을 갖는다. 그 밖에도 제트나 후류 등의 난류 전단류의 가장자리에서 형성되는 Entrainment 현상도 매우 간헐적인 과정이다.<sup>(8)</sup> 난류의 구조 중 특히 소규모의 구조가 중요한 역할을 담당하는 물리적 거동에 간헐도가 크게 나타나며 레이놀즈 수가 증가할수록 그 영향이 크다. 이상에서 언급한 이러한 난류의 특이한 거동들은 난류를 연구하는데 어려운 장애물을 만들고 있으나 난류의 연구자들에게는 오히려 이러한 점이 매력의

대상이 된다.

### 3. 환경관련 난류유동

20세기 후반에 인류가 이룩한 급속한 물질 문명은 과도한 에너지를 일시적으로 소비함으로써 인해 생태계의 위기를 불러일으키는 환경문제를 전지구적 문제로 부각시켰다. 환경과 관련된 유체역학의 문제는 대기의 표면층, 지면, 강, 호수 및 바다 등에서 발생하는 유동현상이 인간의 활동과 관련된 제반 환경문제와 결부된 경우를 지칭한다. 환경관련 유체문제는 순수 유체역학 연구자뿐 아니라 정부의 관료, 산업체 종사자, 지역 단체 등에서도 관심이 고조되고 있다. 그 이유는 여러가지 정책을 결정하기 전에 관련된 환경영향평가의 예측이 매우 중요하며 환경유체 연구의 결과에 따라 공해문제, 소음문제, 기후에 대한 영향, 수질오염, 나아가서는 생태계 전체에 미치는 제반 결과가 정치적, 경제적 및 생존적 차원에서 대단히 심각하다는 것을 경험했기 때문이다.

환경과 관련된 난류유동에는 매우 많은 종류가 있으며, 난류유동과 관련된 물리적, 화학적 및 생물학적 과정 사이의 상호작용에도 많은 종류가 있다. 환경관련 유동과 관계된 문제 중 가장 주목을 받고 있는 연구의 주제들은 다음과 같다.

(1) 일반적인 인간의 삶에 유익함을 주는 방향으로 환경에 의한 유체유동을 개선시키거나 변경시키는 문제(예를 들면, 풍차에 의한 풍력에너지 창출, 강한 파도로부터 해안을 보호하는 문제, 배출된 오염물질을 확산시키는 기술)

(2) 인간의 생활에 위협을 주는 유동현상(태풍 등)

(3) 인간의 활동에 의해 영향을 받는 환경적 과정에 포함된 유동현상

환경관련 난류유동에서 가장 관심있는 분야는 역시 열이나 물질전달 관련 문제이다.<sup>(9)</sup>

오염물질에는 연속적인 물질인 또 다른 유체가 있는가 하면 불연속적으로 분포된 물질인 액적형태 또는 고체입자형태의 미소한 먼지, 또는 선박이나 풍선과 같이 큰 물체에까지 다양하게 존재한다. 환경 관련 유동에서 중요한 관점은 전달과정을 제어할 수 있는가의 여부이다. 바람을 타고 여행하는 기구뿐 아니라 유동속에 분출된 오염물질의 경우에도 난류의 특성을 이용하여 어떻게 이 물질들을 제어할 수 있는가 하는 것이 중요한 관건이다. 이러한 경우 유동문제에서 우리가 해결해야 하는 바는 우선 유동을 잘 예측해야 하는 기술이며, 둘째, 유동속의 전달 또는 확산과정을 제어하는 방법의 확립이다. 특히, 대기중의 오염물질 확산에는 열성층 효과를 고려한 난류확산 모형을 확립하여 임의의 소스에서 분출되는 오염물질이 시간적 및 공간적으로 어떻게 분포되어 나아가는가에 대한 예측이 가장 중요한 문제이다.<sup>(10)</sup>

유동의 특성과 오염물질의 난류확산 과정은 일반적으로 그 성질이 서로 다르다. 바람의 속도가 매우 작을 때 오염원은 그 오염물질을 확산시키는 환경적 능력에 관계없이 계속 분출되므로 오염물질의 농도는 점점 진하게 농축되며 심각한 공해 문제가 유발된다. 이러한 상황에서 확산 거동은 유동의 속도나 속도 구배( $dV/dz$ )보다는 수직방향의 '포텐셜' 온도구배  $d\theta/dz$ 에 지배적인 영향을 받게 된다. 이와 같은 부력과 관성력의 비는 Richardson 수  $Ri = g \cdot d\theta/dz / [T(dV/dz)^2]$  또는 이의 역수인 Froude수  $Fr = V/L[g \cdot d\theta/dz / T]^{1/2}$ 에 의해 표현된다. 예컨대,  $Ri$ 가 매우 크고 음의 값을 가지면 난류는 자연대류에 의해 발생하여 오염물질을 아래 위로 빠르게 혼합시키므로 오염물질이 나오는 굴뚝부분에서도 최대 밀도 영역을 형성시킨다.<sup>(11)</sup> 반면에 바람이 약하고 대기층이 매우 안정되면( $Fr \ll 1$ ) 오염물질은 잘 퍼지지 않은 채로 유선을 따라 멀리까지 이동한다. 만약 언덕을 만나 하향풍이 형성되면 유선이

지면에 충돌하고 그 근방의 표면에는 분출농도와 비슷한 매우 높은 밀도의 오염원이 분포하게 된다.<sup>(12)</sup>

대기나 해양으로의 오염물질 분출에 대해 각국에서는 적절한 시간 및 거리 척도에 의해 환경 기준치를 정하여 두고 기준 이하에서는 분출을 허가해주고 있다. 그러나 최근 연속적으로 누출된 각종 오염물질은 계속적으로 새로운 화학적 및 생물학적 과정을 진행시킴으로써 위험가능한 농도기준이 점점 더 낮아지고 있는 실정이다. 동시에 분출된 오염물질의 총량은 연속적으로 증가하는데 문제가 있다.

대표적으로 1 m<sup>2</sup> 정도의 면적에서 연속적인 오염원이 위치해 있다면 거기서부터 10 km 떨어진 지점의 농도는 대기에 의해 1시간 정도 걸려 10<sup>6</sup>배 정도 감소한다. 만약 10<sup>7</sup>배 정도 떨어질려면 시간은 자그마치 1년 정도 소요된다. 환경기준치의 적정기준을 판단함에 있어서 어려운 한 가지 예는 자동차 배기가스의 질소산화물 농도기준에서 찾아볼 수 있다. 자동차의 NO<sub>x</sub>는 배기량 기준으로 10<sup>-3</sup> 정도 분출되는데, 1 km 정도의 거리척도로 희석되면 체적기준으로 10<sup>-10</sup> 정도이다. 이 농도는 환경기준치를 만족하지만 햇빛이 쨍쨍한 날에는 화학적 작용으로 10<sup>-7</sup> 정도까지 증가되며 이는 NO<sub>x</sub>의 환경기준치를 상회하게 되므로 부적격 상황이 되는 것이다.

이러한 환경적 과정들은 매우 광범위한 유동과정들에 의존된다. 크게는 대규모의 기상 변화에서 작게는 지표근처의 먼지 퇴적에 이르기까지 유동의 과정이 광범위하다. 몇 가지의 경우는 유체역학 해석기법의 발전으로 환경적으로 유리한 결과를 의도적으로 만들기도 한다. 가장 대표적인 예를 들면 강물의 흐름에 대한 수리학적 해석을 난류유동장까지 계산함으로써 강물의 흐름해석을 거의 완벽히 제어할 수 있게 되었다. 그러나 퇴적물의 이동이라든지 공기의 유입현상 등 이상유동현상의 몇 가지 문제점은 아직 완벽히 해

결되지 않고 있다.<sup>(13)</sup>

대기의 흐름은 강물의 흐름보다 더 어렵다. 물론 그 동안 직관적으로 곡물의 수확량을 늘리거나 토양의 침식을 줄이거나 집안의 열이 덜 손실되도록 바람을 막는 방법이 동원되어 왔고 지금은 이에 대한 이유와 새로운 설계방법이 유체역학적 해석기법을 통해 개발되고 있다.<sup>(14)</sup> 이러한 인공적 환경유동 제어 방법은 최근 소음문제와 같은 새로운 문제를 일으키고 있는데, 풍력발전소의 풍차 배열에서 야기되는 소음문제가 대표적인 예이다. 실제로 이러한 문제는 들출부의 작은 변화에 의해 야기되는 난류유동의 감응도와 관계가 있는데, 종종 작은 지역적 변화가 매우 큰 후류 구조의 변화를 야기시키는 물리적 현상이 존재하기 때문에 당연히 발생될 수 있다.<sup>(15)</sup>

대기중의 오염확산, 바람에 의한 구조물의 풍력, 태풍에 의한 산림훼손, 풍차에 의한 발전 등에 관련해서 보다 정확한 유체역학적 해석을 하기 위해서는 특정한 지역, 예컨대 도시와 산지 등의 국소지형에 대한 바람이나 온도의 구조에 관련된 통계적인 데이터를 알고 있어야 한다. 그러나 이러한 데이터를 완벽히 구하는 것은 불가능하다. 따라서 통상적인 방법은 대기 상부층의 데이터나 특정지점의 기상대에서 측정된 기준치로부터 적절한 방법으로 계산을 수행해야 한다. 그림 3에서 보는 바와 같이 복잡한 지형의 대기흐름의 계산방법에는 현재 몇 가지의 기법이 적용되고 있다. 우선 (a)처럼 지역형상을 단순화시키는 방법이 있고, (b)에서와 같이 푸리에 시리즈로 복잡한 굴곡을 모사시키기도 하며, 평면도의 각점을 (c)와 같이 그리드 공간으로 취급하기도 한다. 이러한 경계조건에 대기의 성층화 상태, 난류분포 및 근사적으로 표현된 속도 분포형상을 통과시켜 유동장을 예측하고 있다.<sup>(16)</sup> 그밖에 환경용 풍동을 이용한 물리적 모사 방법이 풍공학(wind engineering)과 관련된 실제문제에 많이 활

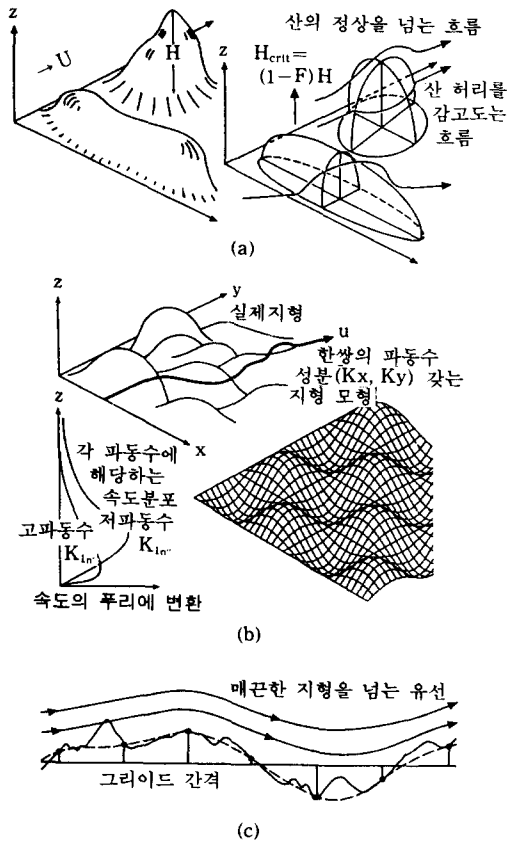


그림 3 복잡한 지형을 지나는 대기유동의 수치 모사 방법

용되고 있으며, 물리적 모사가 어려운 실험은 측정장비를 현장에 가져와서 직접 필요한 데이터를 측정하기도 한다.

#### 4. 산업관련 난류유동

산업관련 유동은 일반적으로 제품의 설계, 생산 및 공정에 관련된 유체역학문제를 지칭한다. 산업관련 난류유동문제는 제품과 관련된 유체역학적 난류연구 또는 적용 및 유동과 관련된 기술적 문제도 포함된다.<sup>(17)</sup>

현대의 기술사회가 발전하면서 생산현장 근처에 자연히 많은 사람이 살게 되어 큰 도시를 형성하게 되었고 사람이 많아지면서 수

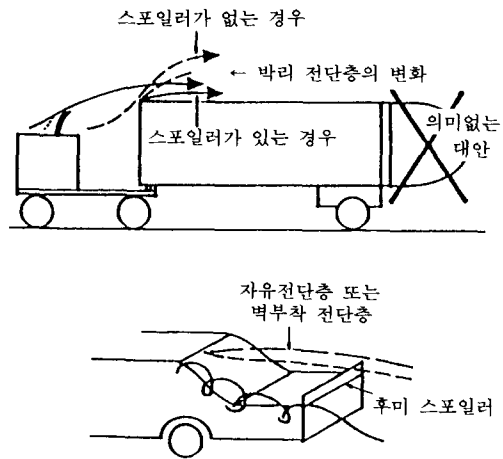


그림 4 도로차량의 항력저감을 위한 스포일러 부착효과

송능력이나 에너지의 수요가 급격히 증가되었다. 유체의 유동과 관련된 산업적 문제의 대표적인 예는 흐름에 영향을 미치는 구조물을 설계하는 문제이다. 그림 4에는 트럭이나 자동차에 부착하는 스포일러를 보여주고 있는데, 이 장치에 의해 항력은 매우 값싸게 줄일 수 있고 결국 연료소비도 줄어든다. 자동차의 후미 스포일러의 경우에는 자동차 뒷면 유리쪽에 정체점이나 재순환영역을 없애주어서 먼지나 빗물이 부착되는 것을 막아주는 효과도 첨가된다.<sup>(2)</sup>

이러한 장치들의 유체역학적 목적은 박리 유동의 형태를 바꾸는 것이 주목적이며 일반적으로 박리 유동장을 줄이는 기법이다. 유체역학적 관점에서는 대안적 해가 많이 존재할 수 있지만 그림 4의 트럭 뒷면의 유선형 물체부착의 경우처럼 실질적으로 무의미한 해가 많이 있을 수 있다. 따라서 설계는 유체역학적 관점 이외의 경제적 측면, 심미적 측면 등을 모두 고려해야 하며, 여러가지의 경우를 고려하는 기법으로는 컴퓨터에 의해 수치모사를 시도하는 것이 가장 경제적이다.

산업관련 유동문제는 제품이나 공정이 부적절하거나 불만족일 경우 새로운 가능성을

모색하면서 거론되기 시작한다. 문제제기는 또한 그밖의 외적요소인 경제적, 법적 또는 환경적 요구조건에 의해서도 발생된다. 경제적 요구조건은 특히 유체기계 및 장치산업의 발전에 진보를 유발시켰다. 예를 들면 유체의 수송에 있어서 유지비를 줄이거나 재료의 절약을 가져왔고 항력이 작은 자동차와 혼합 특성과 연소능력이 우수한 엔진을 개발하게 되었다. 경제외적으로 스포츠나 문화(악기류)적인 측면 그리고 의학적인 기술의 진보에도 유체역학은 많은 기여를 하였다. 산업공정에 관련된 대중의 요구에 의해 배출가스의 정화기 설계나 전기 집진기, 화학반응 장치의 효율적 교반기 설계 등에 난류유동의 이해와 적용이 많은 기술적 진보를 성취시켰다. 일례로 파이프 내부의 기체-액체 이상유동의 난류현상에 대한 연구는 지난 25년 동안 주로 가압경수형 원자력 발전소의 보다 적절한 압력강하 및 열전달 모델을 얻기 위해 수행되어져 왔으며, 이는 원자력 발전소의 안전 문제와 대단히 밀접한 관계가 있는 것이다.<sup>(18)</sup>

첨단기술의 발전과 더불어 발생한 유동문제도 많이 있다. 전자공학의 발달과 더불어 대규모의 집적 회로를 만드는 공정에서 단결정 실리콘의 제작과 관련된 유체유동 문제와 반도체 제조공장의 클린룸 설계기술의 핵심은 유동현상의 해석기술이라고 말할 수 있다. 또한 컴퓨터와 같이 조립된 전자제품의 성능향상을 위해 필수적인 칩의 냉각문제는 전형적인 난류 대류열전달 기술의 응용이 요구되는 부분이다.<sup>(19)</sup> 그 밖에 압연공정에서 용탕을 직접 응고시키면서 압연시키는 연속주조공정은 유체역학, 열전달, 응고문제 등이 복합된 전형적인 열유체 문제이며 각종 플라스틱 롤링 과정에서 몰드 유동이나 열전달과정은 유체역학적 해석기법이 적용되어야 엄밀한 설계와 공정 제어가 가능한 문제들이다.<sup>(20)</sup>

일반적으로 산업체에서는 주된 관심사가

제품이므로 일차적인 기술적 초점을 유체역학문제에 두는 경우가 드물다. 그러나 실제로는 유체역학적 해석이 경제적 측면이나 사회적 측면에서 평가할 때 가장 큰 효과를 좌우하는 경우가 종종 있다. 예컨대 제철공장의 전기로 설계의 경우 금속공학자들의 재료역학적 관점보다 전기로 내부의 유체역학적 거동이 실제공정에서 지배적인 역할을 할 때가 많이 있다. 결론적으로 이야기하면 산업관련 유체문제는 엄청나게 다양하고 많은 반면, 그 문제를 다루는 전문가가 너무 적어서 아직도 지극히 초보적인 유체해석이 실제기술에 통용되는 경우가 허다하다.

산업관련 유동문제를 해결함에 있어서 엄밀한 해석에 필적하는 중요한 관점은 개념의 확립이다. 제품의 발명은 가능성과 창조성이 결합되어 있으므로 유동과 관련된 일반지식과 직관에 의한 개념확립은 기술적 진보의 측면에서 대단히 중요하다. 유체역학의 독특한 분야인 유동의 가시화를 통한 이미지 전달력은 백마디 말보다 더 효과적이다. 유동가시화기법은 산업관련 유체문제를 전문가와 비전문가들에게 끌고루 이해시킬 수 있는 설득력 있는 방법으로 이론적 해석이나 실험적 연구자 모두에게 필수적인 테크닉이다.

산업관련 난류유동의 해결에 있어서 가장 중요한 도구는 최근의 전산유체해석법을 적용하는 기법이다. 그림 5에는 서로 다른 전

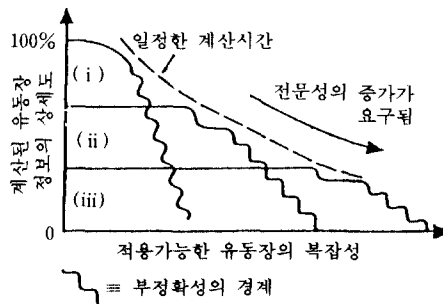


그림 5 산업 및 환경관련 난류유동해석을 위한 전산유체기법의 개념도



산유체방법들의 개념도가 나와 있다. 종축은 정확도이고 횡축은 적용할 수 있는 대상의 복잡성으로 유체의 종류, 경제조건, 레이놀즈수의 크기 등에 좌우된다. 어느 정도의 레이놀즈수 이하에서 유동의 지배방정식을 그대로 적용하는 직접수치모사(direct numerical simulation)는 거의 100%의 정확도를 가지고 있다. 이때 적용가능한 기하학적 구조는 매우 단순한 경우이지만 실험에서 얻을 수 없는 자세한 난류구조나 불안정도의 성장들을 관찰할 수 있다.<sup>(21)</sup> 직접모사법보다는 덜 정확하지만 적용도가 높은 방법으로는 난류모델링을 이용하여 유동의 지배방정식을 수치해석법으로 푸는 방법이며, 최근 상용화되고 있는 전산유체 소프트웨어들은 거의가 이 범주에 속한다. 난류모델의 보편성 확보에 관한 연구가 진행되고 있으나 다양한 산업관련 유동장의 모사를 비교적 정확히 수행하고 있으며, 열 및 물질전달에 관련된 예측 역시 비교적 정확히 예측하고 있다.<sup>(22)</sup>

마지막으로 상세한 유동장을 알려주는 편미분방정식 대신 대수방정식이나 상미분방정식 등 산업적 수요에 적합한 특수한 정보를 실험적 및 경험적 공식과 더불어 계산하는 방법이 있다. 이방법은 그 분야의 전문가에 의해 매우 제한된 산업관련 유동문제에 적합한 공식의 유도가 선행되어야 하므로 일종의 전문가 시스템이라고 간주할 수 있다.

### 5. 난류제어기술

환경 및 산업에서의 난류유동을 이해하고 이를 적용할 수 있는 중요한 분야는 난류제어기술이라고 말할 수 있다. 거의 모든 유체 공학적 문제들은 고체벽면 위나 주위를 지나가는 유동장을 포함하고 있다. 고체벽면들은 주로 흐르는 유체를 가두어 두는 역할을 하지만 어떤 경우에는 유체기계나 장치에서 벽면이 아주 중요한 기능적 역할을 담당하기도 한다. 고체벽면은 강제일 수도 있고 유연한



$y^* = 2.7$

그림 6 난류경계층의 벽면근처에서 관찰되는 흐름방향의 길쭉한 난류구조

탄성체일 수도 있으며, 고정되거나 움직일 수도 있고 형태 또한 여러가지이다.

벽면 흐름에 대한 난류제어기법은 그림 6에서 보이는 바와 같은 흐름방향의 와구조(streaky structure)의 특성을 적절히 조정함으로써 다음과 같은 기술적 응용이 가능하다.

- (1) 항력감소
- (2) 열 및 물질전달의 극대화 및 극소화
- (3) 연소기의 최적화
- (4) 압력요동의 제어
- (5) 추진효율의 증대
- (6) 유동박리의 제어

최근 슈퍼컴퓨터에 의한 직접 수치모사법이나 대규모와 모사법(large eddy simulation method)이 벽면 근처의 난류구조를 상세히 밝혀주고 있으며 전자기술의 발달로 인한 미소센서 및 액츄에이터의 개발추세로 볼 때 벽면난류제어기술은 실용화 단계로 다가서고 있다.

벽면 난류제어기법으로는 수동적 방법과

능동적 방법이 있다. 수동적 방법으로는 현재 다음의 6가지 방법이 시도되고 있다.

- (1) 대규모와 파괴장치 (large-eddy-break-up devices)
- (2) 길이방향의 홈 (longitudinal riblets)
- (3) 유연성 벽면 (compliant walls)
- (4) 고분자 물질 투입 (polymer addition)
- (5) 기포투입 (bubble addition)
- (6) 자성유체역학 (Magneto-hydrodynamics)

수동적 방법들의 주목적은 난류경계층의 벽면근처에서 전단응력을 줄이는 기법으로 LEBU는 벽면근처에 작은 장애물을 설치하여 대규모와를 깨뜨리는 방법이며 길이방향의 홈은 길이방향의 난류구조를 인위적으로 변경시켜 난류전단응력 발생을 최소화시키는 기법이다. 유체역학적 기능을 최적화시키는 설계의 산물은 종종 식물이나 동물의 자연적 구조와 유사성이 많다는 것을 발견하곤 한다. 상어와 같은 큰 물고기들은 물속에서 헤엄칠 경우 난류경계층의 발생으로 항력이 커진다. 그러나 상어의 피부에는 이미 그림 7에서 보는 바와 같이 흐름방향의 미세한 홈이 형성되어 있으며, 그 홈의 크기는 최근 밝혀진 저항력을 극소화하는 최적높이와 동

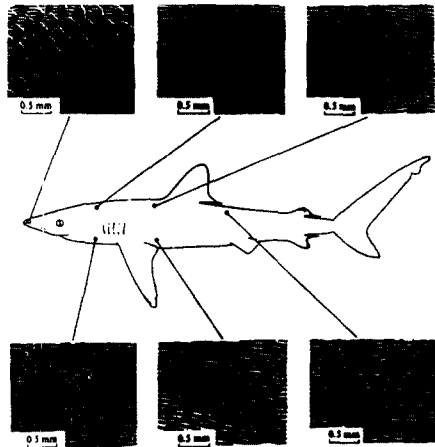


그림 7 상어의 피부에 형성되어 있는 흐름방향의 미세홈

일함을 발견한 바 있다.<sup>(23)</sup>

유연성벽면은 국소적인 압력변동에 따라 벽면의 모양이 변화되어 마찰항력이 최소화될 수 있음에 착안한 것이며 돌고래의 피부가 이에 유사하다. 고분자물질의 투입, 기포의 투입은 점성저층이나 중간층의 속도분포에 변화를 주어 마찰전단력을 줄이는 기법이며 자성유체역학의 이용은 자장에 의한 로렌츠힘을 이용하여 항력을 줄이는 방법이다.

벽면난류를 능동적으로 제어하는 방법은 수동적 방법에 비해 아직 초보적인 연구단계이다. 이 방법은 센서와 액추에이터를 이용한 피드백 제어의 개념을 적용해야 하므로 센서와 액추에이터 자체의 응답성과 크기 역시 제한을 받게 된다. 최근 기능적인 분출/흡입 (smart blowing/suction) 기법, 압전소재료를 이용한 유연벽, 그리고 벽면에 액추에이터로서 볼텍스 발생기를 부착하는 아이디어들이 이론적 및 실험적으로 기초적인 연구가 수행되고 있다.

유선형물체에서는 앞서 언급한 마찰항력 감소가 주목적이지만 둔탁한 물체에 대해서는 볼텍스 형성이나 박리의 제어기법이 산업적, 환경적 유체제어에 매우 중요하다. 원주와 같은 둔탁한 물체 후류의 와류제어 기법에도 역시 수동적 방법과 능동적 방법이 사용되고 있다. 강철로 만든 굴뚝이나 해저 유전에 사용되는 송유관 등이 와류에 의해 진동하는 것을 방지하기 위해 그림 8과 같이

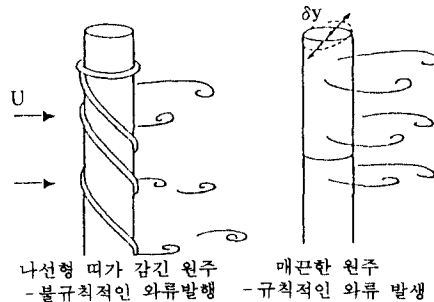


그림 8 나선형 돌출부에 의한 와류 제어

표면에 나선형으로 작은 띠를 감아서 사용한다. 이 나선띠는 규칙적으로 발생하는 보텍스 세링의 불규칙성을 증가시킴으로써 횡방향의 가진력을 감소시키는 효과가 있다.<sup>(24)</sup>

한편, 어떤 경우에는 와류를 증폭시키거나 변화시켜야 할 경우도 발생한다. 예컨대 볼텍스 유량계에서는 매우 일정한 주파수를 가진 와류가 발생할 수 있도록 와류 발생기의 형태를 잘 설계해주어야 한다. 또한 열 및 물질전달을 촉진시키기 위해 와류가 전혀 발생되지 않는 유동조건에서 나선형태를 삼입한다든지 돌출부 등을 형성시켜 와류구조를 형성시켜주는 응용기술이 많이 개발되고 있다.

## 6. 맺음말

이 글에서는 난류유동의 개략적인 특성을 살펴보고, 환경 및 산업에서 등장하는 난류유동 문제의 종류들과 그 해결방법들을 살펴보고 있다. 기술의 역사를 반추해보면 과학적 진보로부터 얻은 연구결과가 응용됨으로써 많은 분야의 사람들에게 넓고 보편적인 개념으로 확장 적용될 때 기술적 진보가 이루어졌음을 우리는 알고 있다. 난류는 더 이상 복잡하고 어려운 학문이나 과학으로 인식되어서는 안되며 누구나에게 보편적인 상식으로 파악되어야 한다. 현재까지 개발된 난류유동의 지식으로서도 충분히 해결가능한 문제들이 도처에 산재되어 있으며, 시급한 해결을 요구하고 있는 중요한 문제들이 대부분이기 때문이다. 특히, 전지구적인 문제로 부각된 환경문제를 해결하고 산업기술의 획기적인 진보를 달성하여 지속가능한 기술적 미래를 창조하는 엔지니어들은 더욱 큰 책임의식을 가지고 난류를 공부해야 할 것이다.

## 참고문헌

- (1) Smith, F. B., 1982, "Where to Put a Steady Discharge in a River," *J. Fluid Mech.*, Vol. 115, pp. 1~11.
- (2) Hucho, W. H., 1987, "Aerodynamics of Road Vehicles," London : Butterworth.
- (3) Tennekes, H. and Lumley, J. L., 1972, *A First Course in Turbulence*, The MIT Press.
- (4) Lesieur, M., 1987, *Turbulence in Fluids*, Martinus Nijhoff Publishers.
- (5) Brown, G. L. and Roshko, A., 1974, "On Density Effects and Large Structure in Turbulent Mixing Layers," *J. Fluid Mech.*, Vol. 64, pp. 775~816.
- (6) Hussain, A.K.M.F., 1986, "Coherent Structures and Turbulence," *J. Fluid Mech.*, Vol. 173, pp. 303~356.
- (7) Townsend, A. A., 1976, *The Structure of Turbulent Shear Flow*, Cambridge Univ. Press.
- (8) Kim, S. K., Cho, J. R. and Chung, M. K., 1990, "An Experimental Study about the Intermittent Flow Field in the Transition Region of a Turbulent Round Jet," *Trans. KSME*, Vol. 14, pp. 230~240.
- (9) Britter, R. E., 1989, "Atmospheric Dispersion of Dense Gases," *Annu. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 21, pp. 317~344.
- (10) Kim, K. C., Chung, Y. B. and Kim, S. K., 1992, "Physical Simulation of Wind with Thermal Stratification," *Annual Report of AFERC*, AFR-91-B01.
- (11) Weil, J. C., 1985, "Updating Applied Diffusion Models," *J. Climate Appl. Meteorol.*, Vol. 24, No. 11, pp. 1111~1130.
- (12) Egan, B. A., 1984, "Transport and Diffusion in Complex Terrain," *Boundary-Layer Meteorolo.*, Vol. 30, pp. 3~28.
- (13) Dyer, K. R. and Soulsby, R. L., 1988, "Sand Transport on the Continental

- Shelf," *Annu. Rev. Fluid Mech.* Vol. 20, pp. 295~324.
- (14) Bradley, E. F., Mulhearn, P. J., 1984, "Development of Velocity and Shear Stress Distributions in the Wake of Porous Shelter Fence," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, Vol. 15, pp. 145~156.
- (15) Britter, R. E., Hunt, J. C. R. and Richards, K. J., 1981, "Air Flow Over a Two-Dimensional Hill ; Studies of Velocity Speed-Up, Roughness Effects and Turbulence," *Q. J. R. Meteorol. Soc.* Vol. 107, pp. 91~110.
- (16) Kyong, N. H. and Kim, H. G., 1994, "Numerical Analysis of the Flow Over a Hill," *Annual Report of AFERC*, AFR-93-G02.
- (17) Hunt, J. C. R., 1981, "Some Connections Between Fluid Mechanics and the Solving of Industrial and Environmental Fluid-Flow Problems ; *J. Fluid Mech.*, Vol. 106, pp. 103~130.
- (18) Micaelli, J. C., 1988, *In Transient Phenomena in Multiphase Flow*, ed. N. H. Afgan, New York, Hemisphere, pp. 787~798.
- (19) Kim, S. Y., Sung, H. J. and Hyun, J. M., 1992, "Mixed Convection form Multiple-Layered Boards with Thermally Periodic Boundary Conditions," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 35, No. 11, pp. 2941~2952.
- (20) Ha, M. Y., Kim, K., Kim, K. C. and Lee, S. W., 1994, "Transient Analysis of Thermo-Fluid Phenomena in Twin-Roll Continuous Casting," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 37, No. 14, pp.2059~2068.
- (21) Lee, M. J., 1985, "Numerical Experiments on the Structure of Homogeneous Turbulence," Ph. D. Thesis, Stanford Univ., Stanford, California.
- (22) Chung, M. K., Park, H. C. and Kyong, N. H., 1992, "Comparative Study of Various Computational Models for Triple Moments of Velocity and Scalar in Second-Order Closure," *Int. J. Heat & Mass Transfer*, Vol. 35, No. 10, pp. 2563~2570.
- (23) Bechert, D. W. and Bartenwerfer, M., 1989, "The Viscous Flow on Surfaces with Longitudinal Ribs," *J. Fluid Mech.*, Vol. 206, pp. 105~129.
- (24) Lee, S. J. and Kwon, K. J., 1994, "Turbulence Control Around a Circular Cylinder by Helical Surface Protrusion," *Advances in Turbulence Research*, Proc. of the TRA-AFERC Turbulence Conference, pp. 231~249. ■