

◎ 특집 : 연구실소개

한국과학기술원 기계공학과 유동제어 연구실 소개

성 형 진*1

1. 서 론

유동의 정밀한 측정과 해석 기술의 개발은 각종 유체기기의 고효율화 및 안정성을 확보하여 운송체 등 주요 기계장치의 성능을 향상시킬 수 있으며, 효율적 에너지 이용에 의해 에너지 절약을 유도할 수 있다. 또한 공력특성과 소음장 예측을 통하여 각종 소음원의 발생원인을 이해하고 각종 기계장치의 기계소음의 전파 경로 및 전달 특성을 파악하여 주변 환경의 소음을 줄일 수 있는 핵심기술이다. 고정밀 유동측정 및 해석기술은 유체기기의 설계에 있어서 그 응용분야는 항력, 양력 증가, 유동소음감소, 열·물질 전달 증대 그리고 연소효율 증대 등 매우 광범위하다. 이러한 연구를 통하여 자동차, 비행기 등과 같은 운송체 관련 산업과 터보기계/팬 등과 같은 유체기계 관련 산업 분야의 설계기술력 향상을 위해 관련 유동현상의 측정, 해석 기술을 개발하는 것은 매우 중요하다. 특히 유동제어 연구는 궁극적으로 생활수준 향상 및 소음, 환경 문제에 능동적으로 대처할 수 있는 신기술의 초석을 마련하고 있는 것으로 생각할 수 있다. 이에, 1999년도 국가지정연구실 (NRL)로 선정된 KAIST 기계공학과 유동제어 연구실 (<http://flow.kaist.ac.kr>)에서는 정밀 유동/압력 측정기술 및 가시화 기법을 토대로 한 실험적 접근과 고정밀 수치기법을 통한 해석적 접근방법에 의해 난류 유동구조를 분석하여 난류 유동제어의 기반기술 및 응용기술을 모색하고 있다. 본 소개문에서는 KAIST 기계공학과 유동제어 연구실의 연구 내용에 대해 소개하고자 한다.

2. 난류 유동 측정 방법

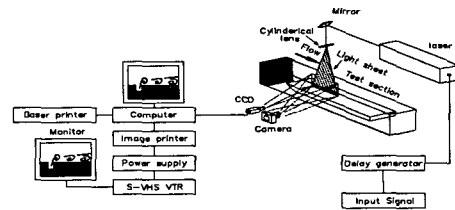


Fig. 1 PIV 시스템 개략도

2.1 열선풍속계(hot-wire anemometry) 및 레이저 도플러 풍속계(LDV:laser doppler velocimetry)를 이용한 속도장 측정 기법

본 연구실에서는 난류유동 측정에 필요한 다수의 풍동(wind tunnel), 수동(water tunnel) 및 열선풍속계(hot-wire anemometry)와 2차원/3차원 LDV를 구비하고 있다. 또한 지난 수년간의 연구활동을 통하여 경계층/자유전단/박리제부착 유동 등 많은 난류유동장에서의 데이터베이스 및 측정방법을 확보하고 있다. 평균유동장 계산 및 주파수 특성 조사 이외에도 위상평균/조건부 추출법(phase averaging/ conditional sample method)을 이용, 난류유동의 조직적 구조(coherent structure)를 규명하는 작업을 수행하고 있다.

2.2 유동가시화를 통한 유동구조 해석(PIV/PSP system)

유동구조의 정량적 가시화를 위해 PIV/PSP를 사용한다. PIV (Particle Image Velocimetry)를 이용하여 유동속도장의 정량적인 정보를 제시하고, 형광을 발산하는 도료인 PSP (Pressure Sensitive Paint)를 이용하여 압력장의 분포를 정량적 가시화를 통한 연구를 수행 중이다. PIV (and μ PIV)는 현재 유동가시화 및 유동측정 장비로 각광 받고 있으며 국내 연구팀의 활동도 적극적이다. PSP는 NASA 등의 선진연구기관에서 널리 사용되고 있는 기술로서 표면압력의 연속적인 분포를 비접촉식으로 측정할 수 있는 획기적인 실험방법이다 (그림 2).

*1 정희원, KAIST 기계공학과 교수

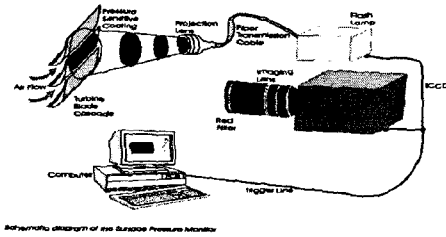


Fig. 2. PSP 시스템 개략도

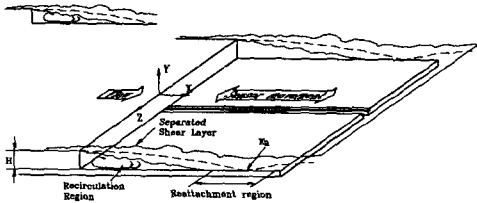


Fig. 3. PVDF 설치 개략도

2.3 PVDF센서열/마이크로폰(μ -phone)을 이용한 벽압력 변동 측정 기법

유동유기소음의 소음원은 난류유동에 의한 벽압력 변동 (wall pressure fluctuations)이 그 원인인므로, 이의 시공간적인 특성 파악이 소음원 추정 및 문제 해결에 선행되어야 한다. 이를 위하여 본 연구실에서는 압력 측정을 위해 PVDF 센서열을 개발하였고, 개발된 PVDF 센서열 다수를 유동에 면한 고체면에서 설치하여 벽압력 변동의 분포를 측정하였다(그림3). 본 연구실의 PVDF 센서열은 벽면부착 전단응력 센서를 이용한 미소기전시스템(MEMS)으로 40개의 원형 전극이 독립된 센서로 기능하여 공간분해능이 높은 동시측정이 가능한 장점을 가지고 있다(그림4). 이외에도 측정에는 통상적인 마이크로폰으로 구성된 32채널 측정시스템도 함께 이용되었다. 이러한 측정 장치를 이용하여 벽압력 변동의 교차스펙트럼 및 파수 스펙트럼의 통계량을 측정하여 전반적인 유동장 특성과 유동유기 소음원을 파악하기 위한 연구를 수행 중에 있다.

3. 비정상 난류 유동의 정밀 예측을 위한 수치 모사 방법

본 연구실에서는 COMPAQ DS10 10기로 구성된 UNIX 병렬 시스템과 SMP 기계인 DS20 3기 그리고 LINUX cluster (10기의 Intel Xeon 2.4GHz Dual CPU)를 보유하고 있으며 이를 이용하여 전산해석 연구도 활발히 수행하고 있다.

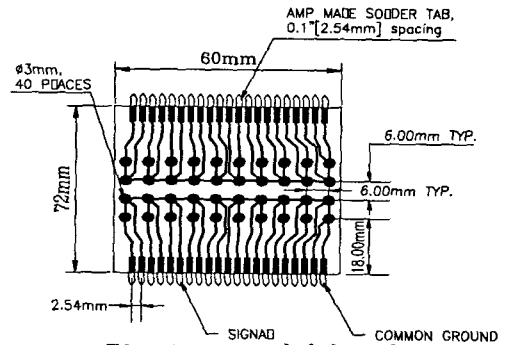


Fig. 4 PVDF 어레이 센서

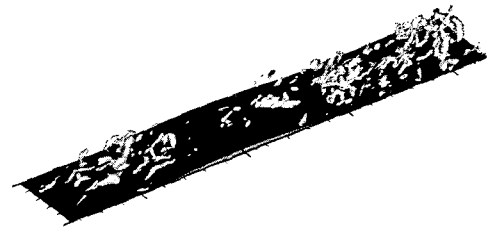


Fig. 5 Bump 위의 난류경계층 DNS 결과

3.1 RANS/LES/DNS

보편적으로 사용되는 난류유동 해석기술로는 난류모델을 이용하는 방법 (RANS ; Reynolds Averaged Navier-Stokes)과 LES (Large Eddy Simulation), DNS (Direct Numerical Simulation) 기법을 들 수 있다.

RANS는 주로 정상유동 (steady flows)에 국한되어 사용되어 왔다. 본 연구실에서는 난류 박리-재부착 유동의 RANS 계산을 위해서 비선형 난류 박리-재부착 난류 모형과 열전달 모형을 개발하여 국소 교란에 실제 후향 계단 유동에 적용하였다. 또한 평판에서의 천이 경계층의 유동장을 모사하기 난류 모형을 제안하였다.

한편, 1980년 중반이후에 개발된 LES (Large Eddy Simulation)/DNS (Direct Numerical Simulation)와 같은 고정밀 수치기법은 난류구조의 응집구조 (coherent structure) 및 동적 구조 (dynamic structure)를 파악하는 데 적합한 방법이다. DNS 기법은, 난류 모델을 사용하지 않고 Navier-Stokes 방정식을 직접 해석하여 시간과 공간에 따른 유동의 변화를 난류 유동의 가장 작은 스케일까지 모사하는 매우 정밀한 방법이다 (그림 5). 그러나, 이 방법을 이용한 난류 유동의 해석에서는 레이놀즈 수 (Re)의 9/4승에 비례하는 많은 수의 격자가 필요하게 되고, 유체 유동의 지배 방정식인 Navier-Stokes 방정식을 비정

상 (unsteady), 삼차원으로 해석해야 하기 때문에 종래의 수치모사와는 비교가 되지 않을 정도의 큰 CPU와 메모리를 요구하게 된다. 따라서 효율적인 수치해석 방법이 절실히 요구된다. LES 기법은 난류유동의 큰 스케일에 대해서는 DNS와 같은 방법으로 해석하고, 등방성이 성립되는 작은 스케일 (SGS, subgrid scale)에 대해서는 모델을 사용하는 방법이다.

본 연구실에서는 위의 기법들을 이용하여 경계층/원봉후류/후향 계단/정체점 유동/동심 환형 관내 유동 등 여러 유동 형상에 대한 수치 모사를 수행하여 연구를 진행 중이다.

3.2 비정상 나비에-스톡스(Navier-Stokes) 방정식의 수치 해석 기법

비정상 유동의 정밀 예측을 위해서는 LES/DNS 기법이 적용되어야 한다. 이에 대해서는 앞서 전술한 바와 같이 계산시간 및 계산격자의 제한성에 의해 그 수치해석적 방법론이 중요한 문제로 부각된다. 현재 LES/DNS에서는 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하기 위해 Fractional step 기법이 적용되고 있다. 이는 Navier-Stokes 방정식을 시간과 공간에 대해 동시에 차분을 수행하여 얻어지는 행렬식을 근사적인 LU 분해하여 속도와 압력을 분리하는 방법이다. 이 방법은 압력과 중간단계에서의 속도 (intermediate velocity)의 특별한 경계조건이 요구되지 않는다는 장점이 있다.

$$\begin{pmatrix} A & G \\ D & O \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v^{n+1} \\ p^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R \\ O \end{pmatrix} + B.C.'s$$

여기서 A, G, D 는 공간과 시간의 차분을 포함하는 행렬이고, v, p 는 각방향 속도 성분 및 압력이며, R 은 이전 시간단계에서의 알려진 값을 나타낸다.

Fractional step 기법은 위의 행렬식에 대한 근사적인 LU 분해 방법에 따라 계산의 효율성 및 정확도가 결정된다. 본 연구실에서는 대류항의 내재적 처리에 따른 수치단계기법을 표현하고, LU 분해 방법을 통해 속도 성분들까지 분리해서 계산하는 효율적인 알고리즘을 고안하여 적용하고 있다.

3.3 난류장 획득을 위한 입구 유동 생성

LES/DNS를 이용한 공간발달 형태의 유동조

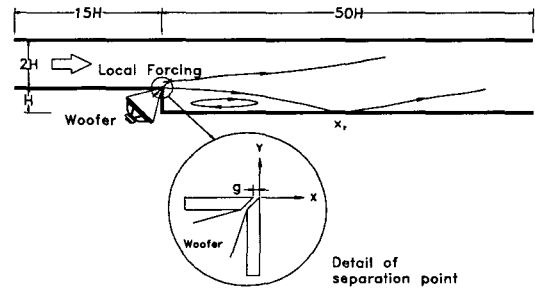


Fig. 6 후향 계단 유동의 제어

건을 해석하는 경우, 난류경계층 유동의 실시간 입구유동 (inflow) 조건의 모사가 중요하다. 대부분의 경계층 형태의 입구조건은 평행유동 (parallel flow) 해석에 의한 순간적 방법, 난수발생법에 의한 방법들이 있다. 이러한 방법의 경우 완전 난류경계층 유동으로 발달하기 위해서는 발달영역이 상당히 요구된다. 그러나 최근에 제시된 난류량들의 상사성을 고려하여 입구조건을 얻는 방법은 비교적 적용이 용이하며, 기존의 다른 입구조건들의 경우 난류경계층으로 발달하는 영역보다 작은 영역을 부가적으로 계산하여 정확한 입구유동을 생성하는 방법이다. 본 연구실에서는 이러한 입구유동 생성기법을 도입하여 공간발달하는 난류경계층/후향계단 유동에 적용하고 있다.

4. 유동 제어의 실험 및 수치적 적용

4.1 국소교란(local forcing)에 의한 유동제어

후향계단 유동에서 유동 제어의 목표는 혼란의 증대를 통한 항력의 감소이다. 후향계단의 박리점 근처에 그림 6과 같은 2차원적인 슬릿을 설치하고 여기에서 스피커에 의한 교란을 유동장에 가하는 방식이다. 주기적인 교란이 박리점으로부터 성장하는 박리전단층 (separated shear layer)의 조직적인 구조와 상호 작용을 일으켜 특정한 주파수에서 전단층의 성장이 촉진되고 이로 인하여 재부착 길이와 항력계수가 감소하는 연구를 수행하였다. 현재 본 연구실에서는 이러한 연구 결과를 바탕으로, 앞서 언급된 다양한 가시화방법을 동원하여 교란이 가해질 때의 유동구조의 변화를 탐색하고, 벽압력변동의 측정을 통하여 유동소음의 감소 여부를 조사 중이다. 또한 박리점 근처에 배치된 미소 액튜에이터 배열에 의한 제어 실험의 기초 자료를 공급하기 위해, 박리점

근처에 횡방향으로 주기적인 3차원 슬릿을 설치하여 유동장에 특정 주파수 성분과 함께 횡방향 파수 성분을 가했을 때 전단층의 3차원 모드의 성장형태의 연구도 계획 중이다.

한편, 경계층 유동에서의 유동제어의 목표는 저항의 감소에 있다. 본 연구실에서는 스피커를 풍동 시험부에 유동 방향 혹은 횡방향의 슬릿을 설치하고 주기적인 분사와 흡입을 유동장에 가하는 방식을 채택하고 있다. 이를 통해 주기적인 흡입과 분사가 행해지면서 횡방향의 와류가 유동장에 가해지는데 이 와류와 경계층에서 유동 저항의 주된 원인인 유선와류 (streamwise vortices)와의 상호작용에 의한 저항의 감소 및 유동구조의 변화를 관찰하는 것이 주된 연구내용이다. Hot-wire 및 PIV를 이용한 실험적 측정과 더불어 DNS/LES를 통한 연구도 수행 중이다. 더 나아가 단일한 슬릿 이외에도 복수 개의 슬릿이나 3차원적인 슬릿을 설치했을 때의 제어 실험을 통하여 슬릿의 간격, 가진 주파수 등의 인자와 저항감소량 사이의 관계를 조사할 계획에 있다.

4.2 주기적인 후류(wake) 가진에 의한 제어

유동장 전체에 후류교란성분을 인위적으로 발생시켜 유동장에 미치는 교란의 영향을 이해하는 것은 팬 (fan)과 같은 유체기계요소에서 발생하는 소음을 이해하는 데 도움을 준다. 이를 위하여, 본 연구에서는 주기적인 후류를 발생시키는 장치를 설계 제작하고 (그림 7), 주기적인 후류에 의한 가진을 박리재부착 유동에 주어 주기적 후류교란이 유동장에 미치는 영향을 알아보고자 한다. 주기적인 후류교란이 박리재부착 유동장에 미치는 영향을 관찰하기 위하여는 스포크형 후류생성기 (spoke-type wake generator)에 의한 후류 유동장의 평균속도 분포 및 난류량 분포를 측정하여 박리유동장 내에 교란의 영향에 의한 재부착길이의 변화 및 난류량, 스펙트럼 등을 조사하여 팬 내부 방사소음원을 규명하기 위해 노력 중이다.

5. 유동 제어 이론 평가 및 개발

유동제어 기법에 관련된 선행 연구를 살펴보면, 주로 난류 경계층 유동에서의 벽면 항력을 제어하기 위해 적용되었다. 이에 대해 신경망 이론과 준최적 제어 이론이 적용된 바 있다. 이는

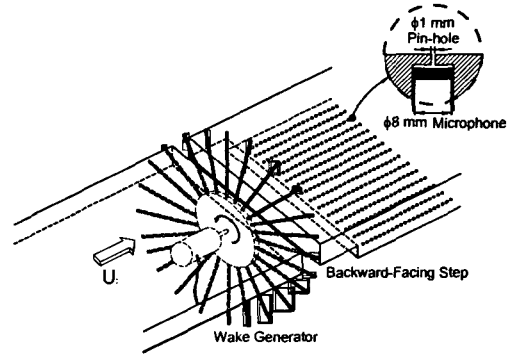


그림 7. 주기적 후류 가진에 의한 제어

난류채널의 전 벽면에서 압력 혹은 벽면 전단응력을 감지하여 (sensing), 흡입/분사 (suction/blowing)에 의한 가진을 하는 방법으로 난류 유동제어의 가능성을 제시하고 있다. 준최적제어 기법은 목적함수 (cost function)을 최소화하는 제어인자를 결정하기 위해 단순구배법 (simple gradient method)을 사용하여 결정하는 기법이며, 신경망이론은 자기학습 (self-learning)을 통한 배가함수 (weighting function)를 결정하여 센서와 액츄에이터 간의 상관관계를 파악하는 방식이다. 본 연구실에서는 유동 제어 이론 평가 및 개발의 첫 단계로 난류채널유동장에 대해 준최적(suboptimal) 제어 기법을 적용하였다. 이러한 기존의 선형 제어 기법에 대한 평가와 함께 비선형 모델에 대한 제어를 개발하였다. 또한 센서/가진자의 형태 및 크기에 따른 제어의 효율성 평가에 대한 연구도 수행한 바 있다.

6. 맺음말

유동제어 기술은 열·유체 관련 시스템의 효율성 향상에 관련된 기반 기술로서 운송체의 항력저감, 소음저감, 연소효율 증대 등과 같은 차세대 고효율 시스템 개발에 대한 기본 기술로서 매우 중요한 분야이며, 본 연구실에서는 정밀 유동/압력 측정기술 및 가시화 기법을 토대로 한 실험적 접근과 고정밀 수치기법을 통한 해석적 접근방법에 의해 조직적인 난류 유동구조를 분석하고, 난류유동의 혼돈성과 비선형성에 적합한 유동제어이론을 도입 및 개발하여 난류유동 제어의 기반기술 및 응용기술로 발전시키고자 노력하고 있다. 이를 위해, 본 연구실에서 수행하고 있는 연구 내용을 간략하게나마 소개하였다.