

## 유동제어 연구실 소개

성형진

한국과학기술원 기계공학과 교수

### 1. 서 론

유동의 정밀한 측정과 해석 기술의 개발은 각종 유체기기의 고 효율화 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 발생 원인을 이해하고 각종 기계장치의 기계소음의 전파 경로 및 전달특성을 파악하여 주변 환경의 소음을 줄일 수 있는 핵심기술이다. 고 정밀 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 고 정밀 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

#### 2.1. 유동가시화기법 개발

본 연구실에서는 유동장, 압력장을 정량적으로 가시화할 수 있는 첨단기법들을 개발하고, 이를 복잡한 난류유동에 적용하여 유동구조를 해석하고 있다. 본

실험실에서 자체개발 및 적용해 온 기법들은 PIV (Particle Image Velocimetry), PSP (Pressure-Sensitive-Paint), PVDF 센서, 마이크로폰 등이며 세부적으로는 다음과 같다.

- Single and stereoscopic PIV
- Multigrid PIV algorithm with deformation
- Micro PIV
- PSP (Correlation based image registration)
- PVDF (polyvinylidene fluoride)

물체의 표면저항을 감소시키기 위해 국소가진(local forcing), 초음파가진 등을 난류경계층에 가하고 PIV

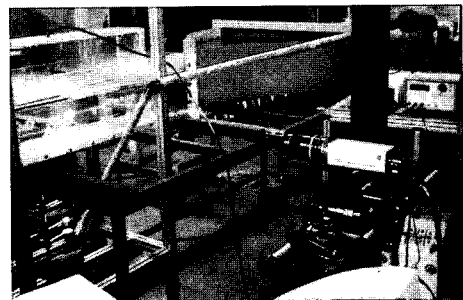


Fig. 1. 수동에서의 PIV 실험 장치.

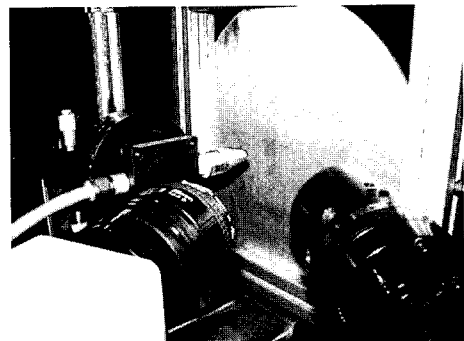


Fig. 2. PSP를 이용한 총돌렛의 압력 측정 시험.

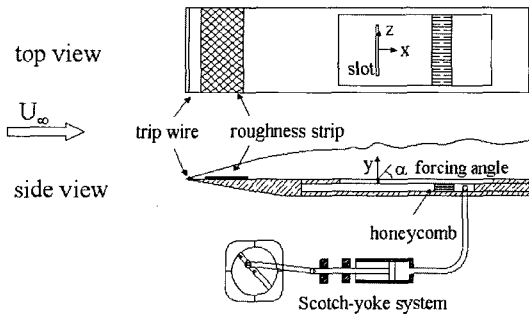


Fig. 3. 국소가진이 있는 경계층 유동의 실험부.

기법을 이용하여 경계층 내 유동 정보를 얻고 저항감소를 확인할 수 있었다.

2차원 필드에서 압력장을 측정할 수 있는 PSP 기법을 개발하고, 이를 현대 자동차 신개발 제품 모델에 적용하여 자동차 주변의 압력장 분포 및 유동에 의한 소음원인을 파악하였다. 또한 보다 정확한 검정과 정인 CBIR 기법을 개발, 적용하였다.

또한 굽어진 표면에 부착할 수 있는 PVDF 센서 최초로 개발하였다. PVDF와 더불어 마이크로폰 배열을 이용하여 후향 계단, 캐비티(cavity) 내 벽면의 압력분포 측정하고 난류유동에 의한 소음원인 규명 및 소음감소에 대한 연구도 진행하고 있다.

2.2. 난류 유동장 연구

본 연구실에서는 유체 내에서 운동하는 물체가 받는 벽면마찰저항을 효과적으로 감소시키기 위한 연구를 PIV 기법을 사용하여 난류 유동장에서 수행하고 있다. 주기적인 가진을 이용하여 횡 방향 와류를 경계층 내에 생성하여 벽면마찰을 감소시켰다. 경계층에 주기적인 가진을 주기위해 벽면에 횡 방향 슬롯을

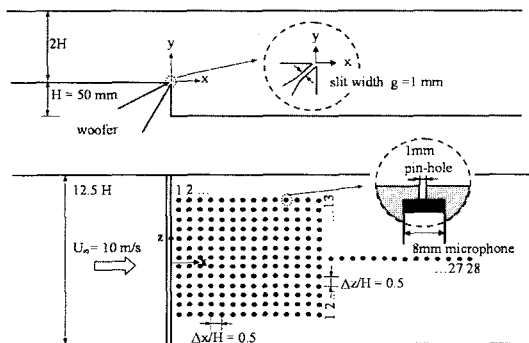


Fig. 4. 국소가진이 있는 후향계단 유동의 실험부.

설치하고 피스톤을 사용하여 주기적으로 벽면에서 유체를 흡입/분사하여 횡 방향 와류를 생성하였다. 또한 공동현상 (cavitation)을 이용하여 유동장 내에 많은 미소 공기방울을 생성하여 벽면마찰을 감소시켰다. 공동현상을 일으키기 위해서 초음파 가진 장치가 사용되었다.

후향계단 유동(Backward-facing flow)은 대표적인 난류박리 및 재부착 유동으로서 난류 경계층, 박리 전단 유동, 재순환 유동, 재 발달 등의 복잡한 현상들로 이루어져 있다. 이로 인해 비정상성, 강한 벽면 압력 변동으로 인한 소음, 구조 진동 등을 발생시키므로 많은 수치해석과 실험적인 연구가 시도되어오고 있다. 본 연구실에서는 국소교란, 비정상 후류(unsteady wake)를 가해주었을 때, 난류박리 및 재 부착 유동의 변화된 특성을 조사하고 있다. 정온열선 유속계와 스피릿 필름을 이용하여 난류 박리 및 재 부착 유동의 재 부착 길이, 시간 평균 난류 유동장, 위상 평균 유동장 등을 측정하고 있다. 또한 다중 배열 마이크로폰을 바닥 면에 설치하여 벽 압력 섭동을 동시 측정하였고, 각 위치의 근 평균 제곱과 스펙트럼 뿐 아니라 교차 스펙트럼, 파수 스펙트럼과 같은 주파수 통계량을 구함으로써 변화된 압력장의 포괄적인 시공간적인 구조를 조사하고 있다.

2.3. 유동소음

난류 압력 변동은 급격하게 변화하는 난류의 와 구조와 유동장에 접하는 고체 표면과의 상호작용으로부터 생성되는 유동현상으로 난류 유동에 의하여 유기되는 소음 혹은 진동의 주요한 원인으로 작용한다. 일반적으로 난류 유동은 넓은 대역의 주파수 및 파수 특성으로 대별되는 만큼, 난류 압력 변동의 특성을 파

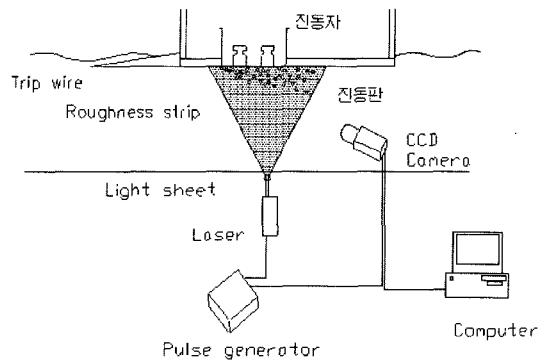


Fig. 5. 초음파 가진을 이용한 저항감소 실험.

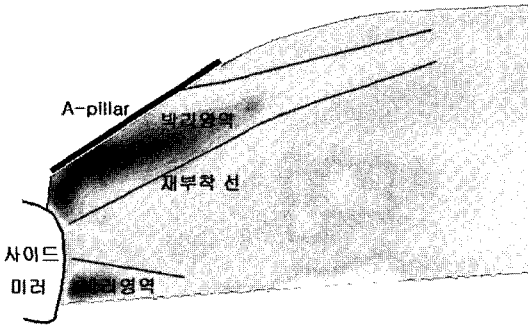


Fig. 6. PSP 기법을 통한 자동차 옆 유리의 압력장 측정 결과.

악하기 위해서 높은 공간 분해능을 갖는 다중 배열 마이크로 폰(multiarrayed microphones)을 이용하여 시공간적인 압력 분포를 측정한다.

자동차의 성능과 디자인에 있어서 공기저항의 관점뿐만 아니라 유동 소음의 관점에서 압력 분포의 측정은 필요하다. 풍절음은 난류유동이 차체를 가진하여 생기는 소음으로, 사이드 미러에 의해 박리된 유동이 유리창에 재부착하면서 생기는 소음이 하나의 예이다. 또한 흡출음은 틈새를 통해 유동이 새어나가면서 생기는 소음으로 고속주행 시 차체의 압력분포에 의해 변형되면서 생기는 틈새에 기인한다. 이러한 유동소음들도 압력측정을 통하여 예측하고 디자인 개선을 통해 사전에 예방할 수 있다. 본 연구실에서는 PSP (pressure-sensitive paint) 기술을 자동차의 표면 압력장 측정에 적용하였다. PSP 기술은 페인트형태의 특정 발광물질의 산소에 대한 민감도를 영상 처리 과정을 거쳐서 공기역학적인 표면 위의 압력장으로 나타내주는 방법이다. 또한, PVDF 센서를 이용하여 벽면 섭동 성분들을 측정하여 풍절음과 흡출음 등의 유동소음을 해석하고 공력적으로도 의미 있는 앞 유리 부분을 측정한 결과를 보면 압력장으로부터 유동소음과 관련한 여러 가지 유동현상의 정보를 한눈에 얻어낼 수 있다.

풍력은 대기오염이 없는 고가치의 재생성 에너지 자원이지만 규모가 큰 프로펠러의 경우에는 소음 심하여 문제가 되고 있다. 이 소음을 찾기 위해 마이크로 폰 및 mp3 저장장치를 이용하여 블레이드 표면의 압력섭동을 측정하고 있다. 회전중인 블레이드로부터의 시그널을 취득하는 과정에서 기존에는 슬립링을 이용하였지만 노이즈, 고비용 채널수의 한계의 문제가 있었다. 본 연구실에서는 기존의 방법과는 달리

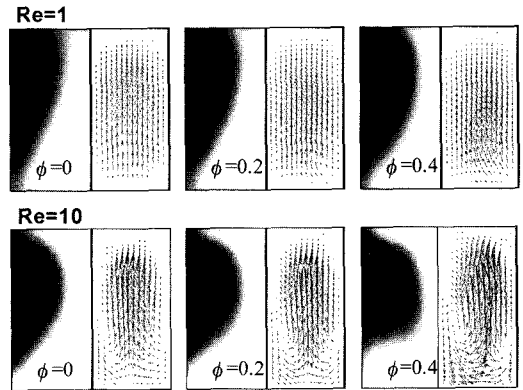
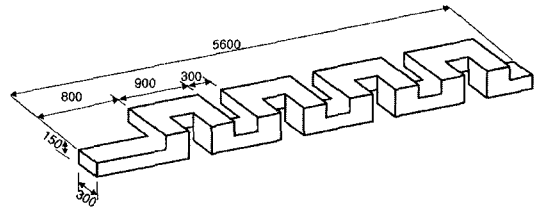


Fig. 7. 뺨 모양 채널 내에서 두 유체의 혼합 시 농도 및 속도 분포.

소형 디지털 저장장치를 블레이드에 부착시켜 압력섭동 시그널을 측정한 후 데이터를 저장하고 이 시그널을 처리하는 방법을 적용하고 있다.

#### 2.4. 미세유체유동

최근 들어 NT/BT 기술 발전과 함께 미세유체유동에 대한 관심이 증대되고 있다. 미세유체현상을 정량적으로 가시화하는 기법으로 본 실험실에서는 micro PIV 기법을 개발하고, 이를 성질이 다른 두 유체가 혼합하는 유동에 적용하였고 그 유동특성 및 고려할 점들을 파악, 조사하였다. 마이크로채널은 MEMS 공정과 PDMS 물질을 이용하여 제작하였다. 최근에는 3차원 속도장 측정이 가능한 micro holographic PIV를

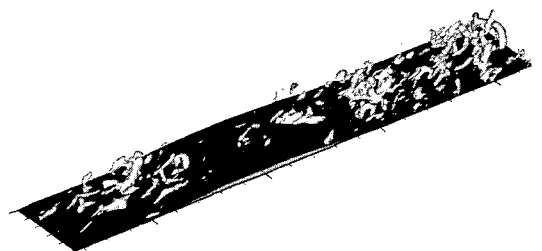


Fig. 8. Bump 형상의 난류계층 DNS 결과를 이용한 벽면 난류 구조의 유동가시화

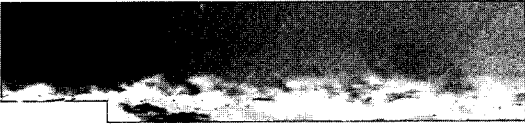


Fig. 9. LES를 이용한 후향 계단 유동장의 가시화

계획하고 있으며, 이를 통하여 lab-on-a-chip 과 같은 미세유체기계 설계에 응용하고자 한다.

### 3. 난류 유동의 정밀 예측을 위한 수치 모사 방법

본 연구실에서는 COMPAQ DS10 10기로 구축된 UNIX 병렬 시스템과 SMP 기계인 DS20 3기, ES45 1기 그리고 LINUX cluster (10기의 Intel Xeon 2.4 GHz Dual CPU)를 보유하고 있으며 이를 이용하여 수치해석 연구도 활발히 수행하고 있다.

보편적으로 사용되는 난류유동 해석기술로는 난류 모델을 이용하는 방법 (RANS ; Reynolds Averaged Navier-Stokes)과 LES (Large Eddy Simulation), DNS (Direct Numerical Simulation) 기법을 들 수 있다. 1980년 중반이후에 개발된 LES/DNS와 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 방법이며, LES 기법은 난류유동의 큰 스케일에 대해서는 DNS 와 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 환형관내 유동 등 여러 유동 형상에 대한 수치 모사를 수행하여 연구를 진행 중이다. 이러한 수치적인 방법을 통해 얻어진 3차원 데이터를 이용한 유동가시화는 실험에서 수행된 결과를 보다 체계적이며 다각도로 살펴 볼 수 있다는 측면에서 유용하게 활용되고 있다.

### 4. 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 수치 기법을 통한 해석적 접근방법에 의해 조직적인 난류 유동구조를 분석하고, 난류유동의 혼돈성과 비선형성에 적합한 유동제어이론을 도입 및 개발하여 난류유동 제어의 기반기술 및 응용기술로 발전시키고자 노력하고 있다.