

테마기획을 내면서

• 김 경 천 | 부산대학교 기계공학부, 교수
e-mail : kckim@pusan.ac.kr

바람과 물의 흐름, 피의 순환, 굴뚝에서의 연기 등 유체의 유동은 우리의 생활과 밀접하게 연관되어 있다. 하지만 유체의 유동은 눈으로 쉽게 관찰되지 않으므로 해석과 예측에 어려움이 따른다. 특히 인류의 생활수준이 향상됨에 따라 자동차의 항력과 유동 소음의 감소, 에너지 절약, 유체기계의 효율 향상, 대기오염의 저감 등에 대한 요구가 증대되면서 유동을 정확하게 예측하고 제어하기 위한 연구의 필요성이 증대되었다. 주어진 유동문제를 제대로 해석하기 위해서는 전체 유동의 속도장에 대한 정확한 정보가 있어야 한다.

현재 대부분의 유동장에 대한 해석적 연구는 컴퓨터를 이용한 수치해석에 의존하고 있으나, 난류와 같은 복잡한 유동장의 계산 결과는 비교할만한 실험결과가 없어서 정확도를 검증하는 데 어려움이 따르고 있다. 한편, 실험적 연구에 있어서도 현재 많이 사용되고 있는 레이저도플러유속계(LDV)나 열선유속계 들은 점 측정(point measurement)방법들로서 국소적인 위치에서의 속도정보를 제공하고 있다. 이러한 기존의 계측기법으로는 시간에 따라 변화하는 비정상 유동이나 난류유동의 공간변화를 해석하고 정확하게 예측하기가 거의 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전체 유동장에 대한 유동정보를 시간의 함수로 얻을 수 있어야 한다.

유동장 정보를 가장 손쉽게 얻을 수 있는 방

법은 유동가시화(flow visualization) 기술이다. 유동가시화는 전달현상(transport phenomena)과정을 가시화하는 것으로 속도, 압력, 밀도 및 온도 등과 같이 우리 눈에는 보이지 않는 유동정보의 공간분포를 시간과 공간의 어떤 범위 안에서 눈에 보이도록 하는 실험방법을 지칭한다. 유동가시화는 대부분 비접촉 방식으로 유동 자체를 교란시키지 않으면서 어떤 순간의 전체 유동장을 가시화함으로써 측정하고자 하는 유동에 대한 공간적인 유동정보를 제공한다.

유동가시화는 정성적 유동가시화 기술과 정량적 유동가시화 기술로 나눌 수 있다. Leonardo da Vinci 시대부터 시작된 모든 고전적 유동가시화 기법들은 정성적 유동가시화 기술에 속한다. 여기에는 염료주입법, 수술(tuft)법, 수소기포법, 연기선기법, 광학적(optical) 기법 등이 포함된다. 광학적 기법에는 유동장의 밀도변화, 즉 매질의 굴절률 변화를 이용하여 유동장 전체를 가시화하는 Shadowgraph법, Schlieren법, Mach-Zennder 간섭계 등이 있다. 이러한 고전적인 유동가시화 기법은 단지 유동의 정성적인 정보만을 제공하며, 정량적인 정보를 제공하지 못한다는 단점이 있다.

최근 컴퓨터 및 광학기술의 눈부신 발전으로 말미암아 유동가시화 분야도 많은 발전을 하였고 드디어 정량적 유동가시화 기술이 등장

하게 되었다. 보다 선명한 유동영상을 얻기 위하여 각종의 레이저가 조명장치로 사용되고 있다. 레이저광은 유동을 교란시키지 않으며, 짧은 파장, 우수한 지향성과 직진성, 그리고 높은 빛 강도를 가지며, 펄스형태로 광파를 발생시킬 수 있는 장점도 있다. 유동장 속으로 투입된 입자(**particle**)들은 디지털 카메라에 의해 획득되어 입자의 변위 정보를 컴퓨터에 저장하고, 저장된 유동화상(**flow image**)을 이용하여 속도장을 계산함으로써 정성적인 순간 유동정보뿐만 아니라 우수한 공간분해능을 갖는 정량적인 속도장(**velocity field**)정보를 제공하게 되었다.

유동의 순간적인 속도분포를 짧은 시간 내에 구할 수 있는 이와 같은 정량적 유동가시화 측정기법은 열유체 분야의 실험적 연구에 혁명적인 변화를 가져오고 있다. 즉, 기존의 접촉 측정 방식으로는 측정이 불가능하였던 국부적인 난류 유동의 공간변화를 정확하게 측정하는 것이 이제는 가능하게 되었다. 입자영상유속계 (**PIV : particle image velocimetry**)로 불리는 속도장 측정기술은 현재 전 세계적으로 가장 활발하게 연구되고 있는 첨단 유동계측기술로 그 발전 속도가 매우 빠르다. 최근에는 시간적으로 연속적인 속도장을 측정할 수 있는 **Cinematic PIV** 기법으로 유동의 비정상 현장의 규명이 가능하며, 3차원 속도장 측정 방법인 **Stereoscopic PIV**와 **Holographic PIV** 등이 개발되어 유동해석 연구에 활용되고 있다.

컴퓨터와 화상처리 기술의 발달은 **PIV** 속도장 측정기법은 하루가 다르게 발전하게 하고 있다. 이 중에서 가장 급속히 발전하고 있는 분야는 컴퓨터와 **CCD**카메라 분야이다. 최근 **Kodak**사에서 개발한 **MegaPlus 16.8i** 디지털 카메라는 **4K×4K**의 분해능을 가지고 있어서 일반 필름 카메라의 분해능과 비슷한 수준이다. 고성능 카메라로부터 획득된 영상데이터의 저장을 위해서는 엄청난 기억공간이 요구된다. 앞으로 **PC-Cluster**를 이용한 슈퍼컴퓨터가 일반화 되면 수백 기가바이트 정도의 데이터도

대용량 데이터 저장장치에 손쉽게 저장할 수 있고, 데이터 처리 비용도 크게 내려갈 것이다.

레이저 분야도 그 동안 많이 발전하여 같은 출력을 내면서도 크기를 반으로 줄이고 신뢰성을 크게 향상시킨 제품이 개발되었다. 특히 최근에는 기존의 잡다한 문제점들을 크게 해소시킨 **PIV**전용의 **2-head Nd:Yag laser**가 개발되어 **PIV**속도장 측정 연구에 많이 활용되고 있다. 3차원 유동장을 측정할 수 있는 **Holographic PIV**용으로 그 동안 주로 사용되어 오던 **Ruby laser** 대신에 최근에는 저렴하고 제어가 용이하며, 성능이 우수한 **Nd:Yag laser** 제품이 사용되고 있는 추세이고 이 분야의 연구도 빠르게 발전할 전망이다.

유동장의 측정과 함께 농도나 온도 등의 스칼라 량의 정량적 가시화 기술도 함께 발전하고 있다. 온도에 따라 색깔이 바뀌는 감온성 액정(**thermochromic liquid crystal**)을 이용한 **TLC themometry**나 농도 및 온도에 따라 형광의 강도가 변하는 성질을 이용하는 평면레이저형광여기법(**PLIF : planer laser induced fluorescence**)으로 농도장과 온도장의 공간정보를 측정함으로써 열유체 분야의 실험적 연구는 획기적인 전환점을 맞고 있다.

항공기나 자동차와 같이 공기 중에서 이동하는 운송체 표면의 압력장은 운송체의 운항성능과 직결되는 항력 및 양력정보를 제공하므로 반드시 측정해야 하는 매우 중요한 데이터이다. 종래에는 실험모델의 벽면에 매우 작은 구멍을 내고 튜브로 연결하여 압력변환계로 한 점의 압력을 읽어들이는 방식의 실험을 수행해 왔다. 이러한 방식은 모델 제작에 많은 시간과 노력이 소요되며, 압력공 설치의 공간적 제한으로 인하여 복잡한 압력장의 변화를 관찰하기는 불가능하였다. 이러한 단점을 일시에 해결하는 방법으로 압력장의 정량적 가시화 기법인 압력감응페인트(**PSP : pressure sensitive paint**)를 이용한 압력장 측정기술이 개발되어 최근 공기역학 연구에 적용되고 있다.

미래기술의 총아로 떠오르는 MEMS 가공기술의 발전으로 Micro-sensor, Micro-actuator, Micro-channel 등과 같은 Micro-fluidics들에 대한 연구가 최근 들어 급속도로 늘어나고 있다. 그러나 기존의 측정기법으로는 이와 같은 미소 크기의 Micro-fluidics 주위의 복잡한 유동을 제대로 측정할 수 없기 때문에 유일한 측정기술이 정량적 가시화기법이라고 말할 수 있다. 미소유로의 내부유동 속도장을 측정하기 위해서는 Micro-PIV 시스템 개발이 필요하다. 이 경우 측정구간(field of view)의 크기가 매우 작기 때문에 CCD 카메라 앞에 높은 배율의 현미경을 부착하여야 한다. 또한 측정구간이 미소하므로 광량이 부족하게 되므로 깨끗한 입자영상을 얻기 위해서는 레이저의 광량을 증가시키거나 저밀도의 광량에도 반응하는 cooled CCD 카메라를 사용하여야 한다. 또한 Micro-fluidics의 크기가 μm 단위이기 때문에 유동의 추적입자들은 나노단위이어야 한다. 나노입자는 벽면에서의 점착력과 응집력이 크고 실제 크기가 CCD 카메라의 센서에 비해 상대적으로 매우 작기 때문에 입자영상의 취득에 특별히 주의하여야 한다. Micro-PIV 시스템은 미래기술과 더불어 지속적인 개발이 요구되는 분야이다.

금번 테마기획은 가장 보편화된 정량적 유동 가시화 기술인 입자영상유속계(PIV) 및 입자추적유속계(PTV)의 현황과 발전을 살펴봄으로써 유동장 측정기술의 적용범위와 가능성을 먼저 살펴본다. PIV 기술의 현황과 전망은 포항공과대학교 기계공학과에 근무 중인 이상준 교수가 집필하였다. 이상준 교수는 현재 국가지정연구실인 '첨단유동가시화연구실'을 운영하고 있으며, 여러 차례에 걸쳐 PIV기술 산학단기강좌를 개설하여 이 기술의 저변확대에 기여하고 있다. PTV 기술의 현황과 전망은 한국해양대학교 기계정보공학부의 도덕희 교수가 집필하였다. 도덕희 교수는 PTV 기술과 관련된 측정 알고리즘을 다수 개발하였으며, 개

발된 프로그램이 상용화되는 등 PTV 분야의 탁월한 실력을 가진 학자이다. 온도장과 농도장을 측정하는 레이저여기형광법(LIF)은 필자가 2001년 10월호 기계저널 특집호에서 이미 다루었으므로 금번의 테마기획에서는 생략하였다. 압력장의 정량적 가시화 기법에 대해서는 현재 한국과학기술원 연구처장인 성형진 교수께서 원고를 내어 주었다. 성형진 교수는 난류제어 관련 국가지정연구실을 운영하고 계시며, 난류 및 열전달 분야에서 국제적으로 주목을 받는 논문을 많이 낸 세계적인 학자이다. PSP 기법과 함께 소개된 마이크로폰 배열 기술의 핵심소자인 박관마이크로폰은 이미 상용화 되어 판매되고 있다. 정량적 유동가시화 기술이 매우 중요하게 적용될 수 있는 분야는 생체 유체역학 및 마이크로 열유체 분야이다. 이 분야는 소위 BT와 IT 및 NT가 접목된 분야로 기계공학자들이 담당해야 할 분야이다. 생체 유동의 정량적 가시화는 건국대학교 기계공학과와 김성균 교수가 집필하였다. 김성균 교수는 PIV 분야의 전문가이며, 최근 한국인의 비강 모델을 대상으로 PIV를 세계 최초로 적용시켜 국제적인 주목을 받고 있다. 마이크로 유동의 정량적 가시화 원고는 LG전자 디지털 어플라이언스 연구소에 계시는 이인섭 박사가 준비하였다. 이인섭 박사는 Micro-PIV 기술과 LIF기술로 여러 가지 미소유체소자의 유동장과 온도장을 측정하고 있고, 이 분야를 개척하고 있는 소수의 촉망받는 연구자중 한 사람이다.

이토록 쟁쟁한 필진들에게 원고를 얻을 수 있었던 사실은 테마기획을 담당할 필자에게는 큰 행운이었고, 독자들에게는 정량적 유동가시화의 현황과 발전방향을 조망하여 볼 수 있는 좋은 기회라 사료된다. 다시 한 번 바쁜 시간을 쪼개어 귀중한 원고를 준비해주신 필진들에게 가슴 깊이 감사를 드리는 바이다.