

# 압력장의 정량적 가시화

• 성형진 | 한국과학기술원 기계공학과, 교수  
e-mail : hjsung@kaist.ac.kr

이 글에서는 압력장의 정량적 가시화 방법으로 정압분포를 측정하는 PSP(Pressure Sensitive Paint) 기술과 압력섭동을 측정하는 마이크로폰 배열의 응용에 대해 소개하고자 한다.

공기역학적 관점에서 볼 때, 항공기나 자동차와 같이 공기 중에서 이동하는 운송체 표면의 압력 분포는 그 운송체의 운항성능과 직결되므로 전 표면에 걸친 정확한 압력 측정이 필수적이다. 정확한 압력분포를 측정하면 이를 바탕으로 운송체의 설계개선이 가능하고, 이를 통해 Cd(항력계수)를 줄인다면 운항속도 개선 및 연료절감이라는 효과를 얻을 수 있다. 실제로 여객기의 연료소모를 10% 줄이게 되면 항공사의 이익은 40% 증가하게 된다. 또한 압력섭동량을 측정하여 해석하면 물체 표면과 유동과의 상호작용에 의해 발생되는 소음원을 규명하여 소음제어에 활용할 수 있는 중요한 데이터가 된다. 최근에는 이러한 압력장 측정방식이 몇몇의 측정점에 한정되지 않고 공간상으로 분포된 압력을 동시에 측정하여 가시화하고 이를 정량적으로 해석할 수 있는 기술이 개발되고 있다.

## PSP를 이용한 정압분포 가시화

지금까지 풍동실험에서 압력 측정에 사용되어온 가장 보편적인 방법은 모형 표면에 압력 탭을 뚫고 호스를 연결해 한 지점씩 압력을 측정하거나, 마이크 등과 같은 압력 측정 센서를 여러 지점에 설치하여 그를 통해 압력을 측정하는 것이다. 이러한 방법들은 각 지점에서 정확한 압력 측정이 가능하지만 그 정보가 공간상 불연속적이라는 단점이 있으며, 압력 탭이나 센서를 설치함에 있어서 모형 표면을 가공해야 하므로 모형의 구조적 특성이나 유체역학적 특성의 변화가 초래될 가능성이 있다. 또한 일반적으로 이러한 방법들은 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 실제로 미국의 항공기 제조과정에서 풍동실험에 드는 비용은 50만 내지 100만 달러 정도인데 이중 30%가 압력탭 설치비용으로 들어간다.

이와 같은 단점을 가진 기존의 압력 측정 방법들에 대한 대안으

로 비교적 최근에 개발되기 시작한 방법이 바로 PSP(pressure-sensitive paint)를 이용한 압력 측정 방법이다. PSP를 이용한 압력측정의 기본원리는 모형 표면에 얇게 코팅된 PSP로부터 방사되는 빛의 강도가 그 표면의 압력에 반비례한다는 Stern-Volmer relation으로부터 나온다. 모형에 PSP를 코팅한 뒤 적당한 강도와 파장의 빛을 쬐주면 PSP로부터 다른 파장의 빛이 나오는데 그 빛의 강도를 측정하면 압력을 측정할 수 있다.

이 방법의 가장 큰 장점은 압력 측정에 있어서 광학적인 접근을 하기 때문에 모형 표면에 별다른 기계적 가공을 하지 않고 전 표면에 대한 공간연속적인 압력 분포를 얻을 수 있다는 것이다. 따라서 모형 표면에 가공된 압력 탭에 의한 모형의 구조적 결함을 방지할 수 있으며, 공간연속적 압력 측정으로 인하여 수치해석 결과의 검증에 필요한 데이터를 공급할 수 있다. 또한 기존의 방법에



그림 1 압력을 측정하기 위한 압력탭 설치 모습 (미국, Ford 사)

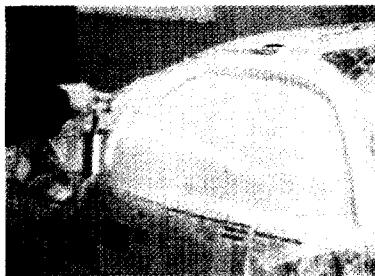


그림 2 실차 모형에 PSP 도포 과정(미국, Ford 사)

비해 압력 측정에 소요되는 시간과 비용을 크게 절감시킬 수 있다.

### PSP의 원리 및 구성

PSP의 구성은 프라이머라 불리는 테스트의 표면에 페인트를 고정시켜주는 기본 코팅 막과 산소에 민감한 발광분자들이 들어 있는 층으로 나뉜다. 발광분자는 바인더라는 합성고분자 내부에 균일하게 퍼져 있다. 일반적으로 많이 쓰이는 발광분자인 PtOEP는 366nm와 543nm의 빛에 의해 가장 많이 여기(excitation)되며, 그에 따라 발광분자가 방사(emission)하는 빛의 최고강도는 650nm에서 일어나기 때문에 필터링(filtering)을 통해서 방사하는 빛만의 강도를 측정할 수 있

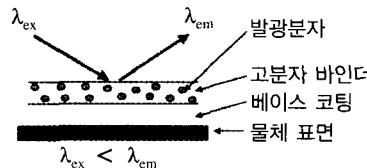


그림 3 PSP의 구성

다. 이 빛의 강도는 압력에 반비례하는데 이 빛의 강도와 압력의 관계를 정리한 것이 스텐-볼머(Stern-Volmer) 관계식이다.

$$\frac{I_0}{I} = A(T) + B(T) \frac{P}{P_0}$$

여기서,  $P_0$ ,  $I_0$ 는 기준압력과 그 때의 빛의 강도를 나타내며,  $A$ ,  $B$ 는 검정(calibration)에 의해서 구해지는 상수이다. 따라서 변화된 빛의 강도의 비를 이용하여 압력의 비를 구할 수 있는 것이다.

발광분자는 주로 분말의 형태이기 때문에 이를 액체 바인더에 용해시켜 모형 표면에 분사하여 코팅한다. 그전에 모형 표면에는 고른 반사와 접착성을 높이기 위해 백색의 도료로 베이스 코팅을 입힌다. 형광물질을 모형 표면에 입힐 때, 두께가 중요한 요인으로 작용하는데 너무 얇거나 두꺼울 경우에는 빛의 방사가 잘 이루어 지지 않으며, 균일하지 못할 경우는 방사되는 빛도 일정치 않을 수 있으므로 일정두께로 고루 분사하여 코팅하는 것이 중요하다.

### PSP의 측정장비

#### 조명

PSP의 측정장비에 있어서 조명의 비중은 상당히 크다. PSP 내부의 발광분자들을 여기시켜주

는 역할을 한다. 조명의 중요한 점은, 모델 표면 전체를 흡수파장에 맞게 균일하게 조명해주는 출력을 가져야 한다는 점과 바람이 있을 때와 없을 때에 조명이 시간에 대해 안정적이어야 한다는 점이다. 이로 인해, 비행기같이 복잡한 구조물에 대해서는 여러 개의 조명을 사용해야 한다. 조명이 국소적으로 불균일하면, 이로 인해 오차를 야기할 수 있으며, 이는 얻게 되는 결과에 대해 신뢰도를 떨어뜨리게 된다. 조명의 종류는 레이저를 이용한 스캐닝 시스템, 연속적인 플래시 아크램프, 특수 백열등, 제논램프, LED 등이 있다. 종류별로 장단점이 있으므로, 비용, 성능, 강성, 안전성, 이동성 등을 고려해서 선택해야 한다.

#### 영상정보 검출장치

빛의 정보를 감지하여 이용하는 장치들 중 PSP에 이용이 되는 것으로는 한 점의 정보만을 입수하는 광전자증배관(photo-multiplier tubes), 광다이오드(photodiode)가 있고, 영역의 정보를 입수해 주는 특수광학필름, 전자 영상 카메라(electronic imaging camera)가 있다. 전자 영상 카메라의 경우 고체 상태의 CCD 카메라를 사용하는데 높은 해상도와 적은 노이즈, 뛰어난 응답성, 좋은 신호잡음비(signal to noise ratio)를 가지는 것이 좋다. 특히 PSP 영상에서는 미세한 빛의 강도의 차이도 구별해내야만 정량적인 해석을 할 수 있으므로



그림 4 충돌 제트의 압력장 측정을 위한 PSP실험장치 (KAIST)

14bit 이상의 해상도를 가지는 카메라가 선호된다.

#### 광학 필터

PSP의 코팅에서 방사되는 빛을 감지하기 위해서는 광학 필터가 필요하다. 전체적인 압력장 측정에 있어서 가장 큰 오차는 방사된 빛을 입력받을 때 야기되므로, 페인트의 방사 파장에 맞는 광학 필터를 사용하는 것이 중요하다. 여기파장과 방사파장이 겹치지 않도록 방사파장만 통과시키는 필터를 선택해야 하고, 검출장치로 들어가는 다른 외부의 노이즈 형태의 파장을 차단시키는 필터를 선택해야 한다. 조명에서 나오는 빛도 페인트의 여기파장에 맞추어 필터링해주어야 하며, 실험을 하는 곳을 암막처리하여 여기, 방사되는 빛 외에는 빛의 유입이 없어야만 한다.

#### 데이터 획득 및 처리장치

PSP 데이터의 획득 및 처리는 보통 전산처리한다. 카메라와 컴퓨터 시스템이 바람이 있을 때와 없을 때의 디지털 영상을 저장하고 수많은

보정과 처리작업을 통해서 결과를 얻게 된다. 일반적으로 영상 처리 소프트웨어나 작업 종류에 맞추어 제작한 소프트웨어를 이용한다.

보통 사용하는 광학용 CCD카메라의 경우 1024 x 1024 픽셀의 해상도와 16비트의 정밀도가 나오는데 이 때 영상화일의 크기는 2Mbyte 이상이다. 이러한

영상 수 천장을 비교하고 보정하고 처리해 주어야 하므로 PSP실험을 할 경우 빠른 계산속도의 컴퓨터와 충분한 저장 용량이 필요하게 된다.

#### PSP의 검정방법

PSP의 검정방법들을 간단하게 들로 정리하면 *a priori*방법과 *in situ*방법으로 정리할 수 있다. *a priori*방법은 측정에 앞서 미리 정압조건에서 PSP 코팅을 검정하는 방법이다. 주로 압력과 온도가 조절되는 챔버(chamber) 내부에서 이루어지게 되는데, 챔버 내부에는 실제로 사용하게 될 PSP가 입혀진 시편이 들어 있다. 실험 모델 표면에 압력 텁을 낼 필요가 없고, 검정이 끝나면 바로

모델 표면의 PSP 코팅에도 적용 가능한 장점이 있다.

*in situ*방법은 바람이 불고 있는 시험조건에서, 압력 텁과 PSP 사이의 데이터를 이용해서 검정하는 방법이다. 정밀한 실험을 하기 위해서는 압력 텁의 개수가 많을수록 좋지만, 지나치게 많게 되면 비용의 상승을 불러일으키므로 적당한 개수로 실험해야 한다. 이 방법은 바람이 불어오는 상태에서 하기 때문에 따로 온도보상을 해주지 않아도 된다. 그리고 표면은 모두 등온이라는 가정 하에 실험을 하게 된다.

온도에 의한 의존도를 계산하기 위해서 검정을 할 때 TSP(temperature sensitive paint)를 사용하기도 한다. PSP와 원리는 같지만, 이 페인트는 압력 대신 온도를 나타내준다. 실험모델의 형태가 대칭일 경우, PSP와 TSP를 각각 반씩 사용해서 한 쪽은 압력을 얻고, 다른 한 쪽은 온도를 얻어내어 각 위치에서의 온도보정도 하고 있다. 또, 온도에 민감한 발광분자와 압력에 민감한 발광분자를 한 페인트에 섞어서 사용하는 경우도 있다.

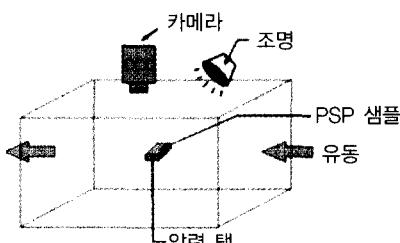


그림 5 *In-situ* 검정장치

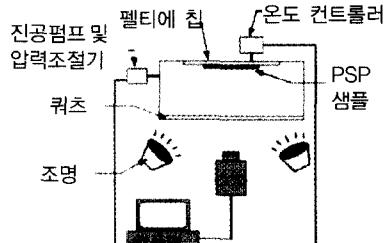


그림 6 *a priori* 검정장치

PSP는 한 분야의 기술만이 아닌 열유체역학, 기능성 화학, 광전자공학과 화상정보 해석 기술이 유기적으로 협력을 하여 발전하고 있으며, 선진국에서는 국가적인 차원에서 PSP기술 개발에 힘쓰고 있다.

### PSP기술의 동향 및 전망

PSP기술은 1980년대 후반 최초로 압력측정에 적용된 이래 발전을 거듭하여 이제는 응용 영역을 넓혀가는 제2의 변환기를 맞이하고 있다. 지금까지의 항공산업 위주의 연구에서 벗어나 저속 인 자동차 산업 또는 위성발사체와 같은 우주산업에 적용이 되기 시작한 것이다. 기술적으로는 고정밀화, 복합기능화 되고 있으며, 한 분야의 기술만이 아닌 열유체역학, 기능성 화학, 광전자공학과 화상정보 해석 기술이 유기적으로 협력을 하여 발전하고 있다. 선진국에서는 국가적인 차원에서 PSP기술 개발에 힘쓰고 있다. 예를 들면, 미국에서는 미연방 SBIR정책에 의해 NASA를 비롯해, 대학(Univ. Washinton, Univ. Florida 등)과 기업체(Photosense, ISSI 등)가 연계하여 연구 협력 중이며, 유럽에서는 EU의 조직으로 독일(DLR), 프랑스, 영국, 이태리(Inteco) 등이 전문위원회를 구성, 연계 연구 수행 중이다. 가까운 일본에서는 항공우주연구소의 주도하에 대학(동경대, 동북대, 나고야대)과 연

### 수치해석

### 풍동실험

그림 7 스페이스 셔틀에 적용된 PSP와 수치해석 결과의 비교 (미국, NASA)

구소, 기업체 (Hamamatsu photonics, 東洋Ink 등)가 연계한 MOSAIC project를 수행 중이다. 그러나 국내에서는 아직 시도된 바가 없으며, 본 연구실에서 처음으로 연구가 진행되는 상태이다. 이 기술은 국내 자동차 산업이나 항공우주 관련 연구에 꼭 필요한 기술로서 많은 투자와 연구가 필요할 것으로 보인다.

### 마이크로폰 배열을 이용한 압력섭동의 정량적 가시화

최근 수년간 물체 주위에서 발생하는 압력섭동을 측정, 해석하는 연구가 활발히 이루어져 왔다. 이미 여러 연구들로부터 밝혀진 것처럼, 물체 주위 유동으로부터 발생하는 대형 와구조가 압력섭동을 일으키는 주된 원인이다. 물체 주위의 압력섭동은 프와송 방정식으로 설명될 수 있고, 압력섭동을 일으키는 원인은 속도 구배와 같은 유동 구조에 기인한다. 그러므로 많은 연구 방법들은 물체 주위 유동을 해석한 후, 프와

송 방정식으로부터 압력섭동을 계산하여 왔다. 실험적인 측면에서 압력섭동을 측정하는 것은 속도장이나 온도장을 측정하고 보충적으로 측정하는 것으로 생각되어 왔다. 그러나 대형 와구조와 같은 유동 구조에 관한 연구들이 진전되면서, 압력섭동과 유동 구조의 상관관계가 명확해졌고, 압력섭동만으로 유동구조를 이해하려는 시도가 제기되기도 하였다.

압력섭동 량은 넓은 영역에서 유동 특성을 적분하여 얻어지므로, 대략적인 유동 특성을 잡아내는 데 유리하다. 일례로, 물체 주위의 유동장에 특징적인 주파수 성분을 찾는다고 가정하자. PIV나 PTV와 같은 방법들은 유동장의 구조를 쉽게 파악할 수 있지만 한 프레임 당 처리하는 속도가 느리기 때문에, 수백에서 수 kHz에 이르는 동적 거동을 예측하기는 어렵다. 열선 풍속계를 이용하면, 응답속도가 빠르기 때문에 특성 주파수를 찾을 수 있다. 그러나 만약 물체 돌출부에 의해 경계층 유동이나 박리 유동과 같은 공간

발달 유동이 물체 주위에 형성한다고 하면, 열선 풍속계를 이용하는 방법은 매우 어려운 측정 방법이다. 물체 주위에 존재하는 대형 와구조의 위치에 열선 풍속계를 위치시켜야만 특징적인 주파수 성분을 찾을 수 있고, 유동장을 가시화하기 전에는 대형 와구조의 위치를 알 수 없기 때문이다. 반면, 마이크로폰과 같은 압력센서를 물체 벽면에 부착하고 압력 섭동 량을 측정하면 특성 주파수를 신속하게 구할 수 있다. 이는 압력섭동 량이 물체 주위 유동 정보를 적분하여 받아들이기 때문이다. 압력센서를 물체 주위 여러

지점에 설치하고, 동시에 압력섭동 량을 측정하면, 유동구조가 공간발달하는 과정을 보다 직관적으로 예측할 수 있게 된다.

마이크로폰을 이용한 압력섭동량 가시화 기법은 여러 지점에서 동시에 압력섭동 량을 정량적으로 측정하여 시공간적으로 배열하는 것을 의미한다. 효과적인 압력장 가시화가 이루어지기 위해서는 마이크로폰 배열과 같은 압력센서를 사용하여야 하며, 압력장의 특성에 맞게 사용 센서의 종류나, 측정 영역, 측정 간격, 측정 속도를 미리 지정하여야 한다. 압력섭동 량을 측정하기 위해 흔히 사용되는 센서는 사용범위에

**마이크로폰 배열을 이용한 압력섭동량 가시화 기법은 여러 지점에서 동시에 압력섭동량을 정량적으로 측정하여 시공간적으로 배열하는 것을 의미한다.**

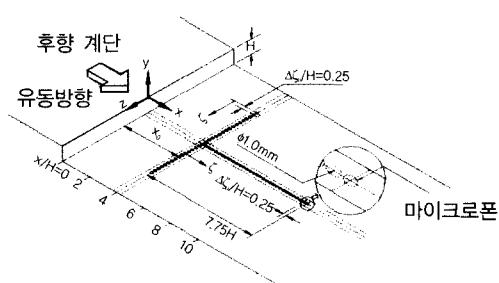


그림 8 압력섭동 가시화를 위한 마이크로폰 배열

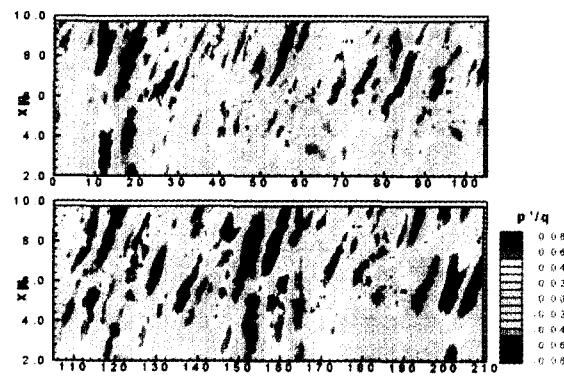


그림 9 마이크로폰 배열을 이용한 후향계단에서의 압력섭동장 가시화 (NASA)

따라 콘덴서형과 압전형으로 나뉜다. 마이크로폰 배열과 같은 콘덴서형은 주로 저속에서 많이 활용되며, 민감도나 주파수 특성이 좋고 대부분의 동적 영역을 포함한다. 그러나 항상 유동장에 수직으로 위치시켜야 하는 단점이 있고, 부서지기 쉽다. PVDF 필름으로 대표되는 압전형은

민감도나 주파수특성이 콘덴서형에 비해 떨어지지만, 내구성이 좋기 때문에 고속에서 많이 활용된다. 측정 영역을 정하기 위해서는 측정영역 주위의 유동구조를 대략적으로 알 필요가 있다. 예를 들어, 어떤 물체에 돌출부가 있다고 하면, 그 주위로 박리 유동이 발생하므로, 돌출부의 높이를 특성 파라미터로 정하고, 그에 맞추어 측정 영역이나 측정 간격을 지정하여야 한다. 만약, 돌출부가 없는데도 물체 주위의 압력 구배에 의해 유동 박리가 일어난다고 하면, 미리 가시화를 하여 측정 영역을 정의할 필요도 있다. 측정 속도는 유동장에 특징적인 주파수 범위를 생각하여 충분한 영역을 설정하여야 한다. 저속 영역 같으면, 수백 Hz 대역에서 특성 주파수가 나타나지만, 고속 영역의 경우 수kHz에서도 특성 주파수가 나타나므로, 이 때에는 간단히 몇 군데에서 측정하여 특성 주파수 범위를 정의한 후, 가시화하는 것이 좋다. 압력장을 측정하면 스펙트럼, 상관계수, 시공간 스펙트럼(wavenumber-frequency spectrum) 등이 해석할 수 있으며, 압력측정이 단순한 가시화의 차원에서 벗어나 정량적 해석 방법으로 응용된다.