

# PSP 압력측정을 위한 상관법에 의한 이미지 등록

박상현<sup>†</sup>, 성형진<sup>\*</sup>

## Correlation-Based Image Registration for Pressure Measurements Using Pressure-Sensitive Paint

Sang-Hyun Park, Hyung Jin Sung

**Key Words:** Pressure Sensitive Paint(압력 감응 페인트), Image Registration(이미지 등록), Transform Function(변환 함수), Multigrid Method(다중격자 법), Control Point(기준 점)

### Abstract

A new algorithm, CBIR (Correlation-Based Image Registration) was proposed to improve the resolution of image registration for PSP (Pressure-Sensitive Paint). The local displacement vectors were obtained by finding the displacement which maximizes the cross-correlation between two interrogation windows of 'wind-off' and 'wind-on' images. A recursive multigrid processing was employed to increase the non-linear spatial resolutions. The variations of image were precisely measured without identifying the control points.

### 1. 서 론

압력 감응 페인트(Pressure Sensitive Paint ; PSP)를 이용한 압력장 측정 기술은 현재 사용되고 있는 압력탭 혹은 마이크로폰을 이용하는 압력 측정기술에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 모형 전체표면의 압력장을 동시에 매우 높은 해상도로 얻어낼 수 있으며, 구성하기도 쉽고, 비용이 저렴하다.

PSP를 사용하여 압력을 측정하는 방법으로는 몇 가지가 있는데 그 중 가장 많이 사용되는 방

법은 '유동이 없는(wind-off) 상태의 PSP의 밝기와 '유동이 있는(wind-on) 상태의 PSP의 밝기의 비를 통해 압력장을 구하는 방법이다. 이 방법을 사용하면 물체 표면의 조명의 세기가 일정치 않거나 PSP 코팅 두께가 일정치 않아도 두 이미지의 같은 위치에서의 밝기비 값을 사용하기 때문에 정확한 압력 값을 계산할 수 있는 장점이 있다. 하지만 유동이 있는 상태의 이미지와 유동이 없는 상태의 이미지 사이에 단 한 화소(pixel)라도 움직임이 있으면 정확한 압력 값을 얻어낼 수가 없게 된다. 대개 유동이 있는 상태의 이미지의 경우 공력에 의해 물체가 변형을 일으키거나 변위를 가지게 된다. 저속유동의 실차에 적용할 경우 차량의 현가장치로부터 변위가 발생한다. 또한 고속유동의 항공기 등에 적용할 경우 공력에 의해 모형의 변형과 변위가 함께 발생하게 되므로 정확한 압력 값을 얻어내기 위해서는 유동이 있는 이미지의 움직임을 보정해 주는 작업인 이미지 등록이 필수적이다.

<sup>†</sup> 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : parksanghyun@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-5009 FAX : (042)869-5027

<sup>\*</sup> 한국과학기술원 기계공학과

E-mail : hjsung@kaist.ac.kr

## 2. 배경이론

### 2.1 압력 감응 페인트(Pressure-Sensitive Paint)

PSP는 모형 표면에 페인트를 고정시켜주는 기본 코팅 막인 고착제와 산소에 민감한 발광분자(probe molecule)들이 들어있는 층으로 구성된다(Fig. 1). 발광분자는 바인더(binder)라는 합성고분자내부에 균일하게 분포되어있다. PSP에 분포되어 있는 발광분자는 짧은 파장의 푸른빛을 조사시켜주었을 때 공기 중에 포함되어있는 산소의 양과 PSP가 방사하는 긴 파장의 붉은빛의 세기가 반비례하는 성질을 갖는다. 공기에 포함되어있는 산소의 분율은 일정하므로 공기가 많아지면, 즉 압력이 증가하면 산소의 양이 많아져서 그 부분에서 PSP가 방사하는 붉은 빛의 세기가 약해지게 된다. 이것을 식으로 나타낸 것이 스텐-볼머 관계식(Stern-Volmer relation)이고, 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\frac{I_0}{I} = A(T) + B(T)\left(\frac{-P}{P_0}\right) + C(T)\left(\frac{-P}{P_0}\right)^2 + \dots \quad (1)$$

여기서 밑첨자 0는 유동이 없을 때의 값이다. 따라서  $P_0$ 는 대기압이며, 표면전체에 균일하다고 생각한다.  $I_0$ 는 유동이 없을 때의 PSP가 방사하는 붉은 빛의 세기이다. 상수 A, B, C는 코팅의 민감도와 실험적인 검정(calibration)으로 결정된다. 본 연구에서 PSP는 ISSI사의 Uni-FIB를 사용하였고, 압력 환산을 위해 2차의 스텐-볼머 관계식을 사용하였다.

### 2.2 기존의 이미지 등록

이미지 등록(image registration)을 통해 물체의 변위나 변형에 의해 생기는 기하학적인 오차를

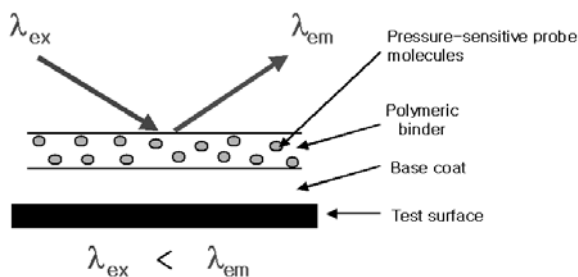


Fig. 1 Composition of PSP

보정해주기 위해서 유동이 없는 이미지와 유동이 있는 이미지 위에 표시한 기준점의 좌표변화를 통해 두 이미지 사이의 수학적 변환 함수를 구하게 된다(Fig. 2). 이 변환 함수를 사용하여 변형 및 변위가 발생한 유동이 있는 이미지를 유동이 없는 이미지 기준으로 화소의 위치를 재정렬 시켜주게 된다. 본 연구에서는 정확한 이미지 등록을 수행하기 위해서 자동으로 정확한 기준점의 좌표를 찾아내는 알고리즘을 개발하여 적용하였으며, 변환함수를 거친 화소의 좌표가 소수형이기 때문에 구하고자 하는 점의 화소값을 보간법(interpolation)을 사용하여 구하였다.

이미지 등록(image registration)을 하기 위해서는 변형이 있기 전인 유동이 없는 이미지와 변형이 생긴 유동이 있는 이미지 사이의 수학적 변환 함수(transform function)를 구해야 한다. 변환함수로 사용되는 가장 기본적인 함수로는 스케일, 회전, 이동 등의 선형적인 움직임만을 나타낼 수 있는 유사 변환 함수(affine transform function)가 있다. (식 2)

$$x = a_0 + a_1x' + a_2y', \quad y = b_0 + b_1x' + b_2y' \quad (2)$$

강체운동과 더불어 작은 정도의 변형에 적당한 투영 변환 함수(projective transform function) 그리고, 강체운동뿐만 아니라 굽힘과 같은 큰 변형과 비선형적인 움직임에 적용할 수 있는 다항 변환 함수(polynomial transform function)가 있다.

$$x = \sum_{i,j=0}^n a_{i,j} x'^i y'^j, \quad y = \sum_{i,j=0}^n b_{i,j} x'^i y'^j (i+j \leq n) \quad (3)$$

2차의 변환함수의 경우 (식 3)에서  $n=2$ 인 경우이고, 총12개의 계수 값을 구하기 위해서 물체의 움직임을 나타내주는 최소 6개의 유동이 없는 이미지의 좌표(x,y)와 유동이 있는 이미지의 좌표

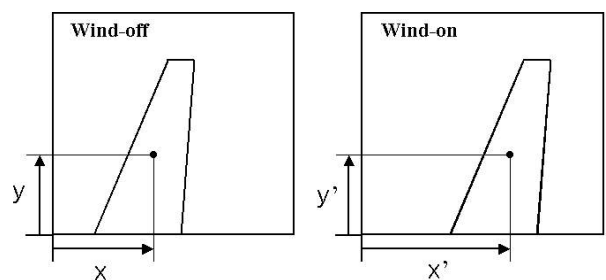


Fig. 2 Model motion due to aerodynamic load

(x',y')가 필요하고, 3차의 경우 (식 3)에서 n=3인 경우이고, 20개의 계수 값을 구해주어야 하므로 최소 10개씩의 좌표가 필요하다. 이러한 좌표는 물체 위에 기준점(control point)을 표시하여 얻어 내게 된다. 그 기준점의 좌표를 통해 유동이 있는 이미지의 화소 좌표를 유동이 없는 이미지를 기준으로 재정렬 시켜주는 변환함수를 구하여 사상(mapping) 시켜주게 된다.

2.3 상관법에 의한 이미지 등록 (Correlation-based image registration, CBIR)

다항함수를 이용한 이미지등록은 알고리즘이 간단하지만 전 영역의 화소의 움직임은 하나의 함수로 표현하기 때문에 국소적인 변형등은 표현해 주기가 힘들다. 또한 기준점을 표시하고 그것을 인식하여 다항함수를 찾아내는데 이 과정을 최적화하기 위해서는 숙련된 사람이 일일이 인자들을 조정해 줘야 하므로 자동화된 알고리즘을 만드는 데 걸림돌이 된다. 이러한 단점을 해소하고자 본 연구에서는 상관법을 이용한 이미지등록법을 제안하였다. 이 방법은  $d_e = 3 \sim 4$  픽셀이 되도록 입자크기와 확대율 등을 조절하고, wind-off, wind-on 두 영상을 가지고 입자들의 이동거리를 얻게 된다. 기본 개념은 두 입자영상의 상호상관 함수를 이용하여 조사구간(interrogation window)의 이동거리를 통계적으로 구하는 방법이다 (Fig. 3). 먼저 처음 wind-off 영상에서 조사구간의 위치와 크기( $N \times N$ )을 정한다. 그리고 두 번째 wind-on 영상에서 처음 영상의 조사구간과 같은 위치에 같은 크기의 조사구간을 정한다. 이때 상호상관 함수는 다음과 같이 주어진다.

$$R(x,y) = \sum_{i=-N/2}^{N/2} \sum_{j=-N/2}^{N/2} I_1(i,j) \cdot I_2(i+x,j+y) \quad (4)$$

여기에서  $I_1(i,j)$ ,  $I_2(i,j)$ 는 각각 첫 번째, 두

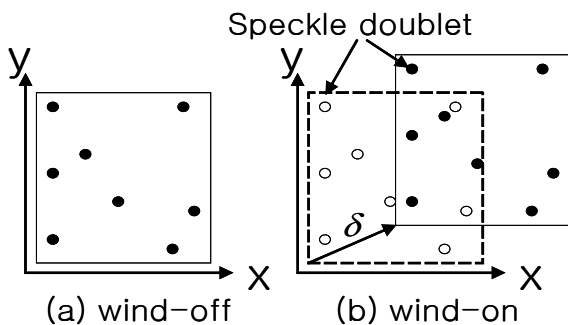


Fig. 3 Displacement of an interrogation window

번째 영상의  $i, j$  위치에서 픽셀 값이며  $x, y$ 는 첫 번째 조사구간과 두 번째 조사구간 사이의 이동거리이다.  $R(x,y)$ 는 통계적 관점에서 두 조사구간이 언제 잘 일치하는지를 알려준다. 식(4)는 쉽고 간단하지만 계산시간은  $\sim O(N^4)$ 로서 오래 걸리는 단점이 있다. 계산 시간을 줄이기 위하여 식(4)의 방법을 FFT를 이용한 식으로 바꾸는데 그 과정은 다음과 같다. 먼저, 첫 번째와 두 번째 조사구간에 2-D FFT를 수행한다. 그리고 두 번째 조사구간의 2-D FFT 결과에 켈레 복소수(complex conjugate)를 취하고 첫 번째 조사구간의 2-D FFT 결과와 곱한 후 inverse 2-D FFT를 하면 식(4)의 결과와 같다. 이 방법의 계산시간은  $\sim O(N^2 \ln N)$ 이다.

3. 실험 결과

상관법에 의한 이미지 등록의 효과를 확인하기 위하여 유연한 충돌면을 가진 충돌제트의 압력장을 측정하였다. 충돌면은 임의의 변위와 변형이 가능하도록 얇은 비닐 필름으로 만들어졌으며 네 귀퉁이는 느슨하게 고정되었다. 제트의 충돌각도는 45도였으며 높이는 노즐직경(6mm)의 1.5배, 그리고 노즐의 출구속도는 200m/s로 설정하였다. PSP의 재료는 Uni-FIB(ISSI, USA)였으며 PSP를 도포하기 전에 흰색의 베이스 코팅을 도포하였으며 그 위에 상관법을 적용하기 위한 얼룩무늬 층을 회색의 페인트를 분무하여 적용하였다. 조명은 본 연구실에서 자체 제작한 LED 램프(465nm)를 사용하였고, 영상을 얻기 위한 카메라는 16비트 공랭식 CCD카메라(Andor MCD434-BV, UK)를 사용하였다. 카메라의 렌즈 앞에는 650nm에 중심파장을 갖는 밴드패스 필터를 설치하였다. Fig. 4

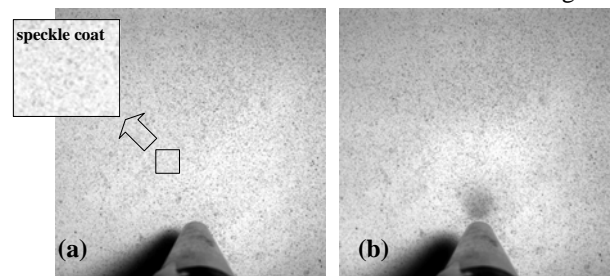


Fig. 4 Raw images of the impinging jet: (a)wind-off, (b)wind-on

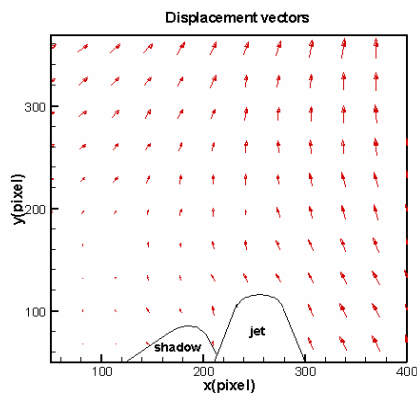


Fig. 5 Displacement vectors of interrogation windows obtained by CBIR

는 CCD카메라에 의해 촬영된 wind-off와 wind-on 이미지를 나타내고 있다. 자세히 살펴보면 얼룩무늬 층이 도포된 것을 확인할 수 있다. 충돌제트에 의해 임의의 변위와 변형이 가해진 충돌면의 움직임을 상관법을 이용하여 구한 결과가 그림(5)에 나타나있다. 상관법을 이용하면 기준점의 도움 없이 각 조사구간마다의 변위벡터가 구해지게 된다 (Fig.5).

Fig. 6에는 이미지 등록의 효과가 비교되어 있다. Fig. 6(a)는 이미지 등록을 하지 않은 압력장으로 wind-off와 wind-on 이미지 사이의 변위 때문에 제대로 압력장을 알아볼 수 가 없었다. 그에 비하여 이미지 등록을 한 경우 정확한 충돌제트의 압력장이 구해졌다. Fig. 6(b)는 기존의 변환함수와 기준점을 이용한 기존의 이미지 등록방법을 이용한 결과이고 Fig. 6(c)는 상관법에 의한 이미지 등록방법을 이용한 결과이다. 두 결과 모두 깨끗한 압력장을 나타내고 있으나 상관법을 이용한 Fig. 6(c)의 경우, 기준점을 전혀 이용하지 않고도 더 깨끗한 압력장이 구해진 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 기존의 이미지 등록의 단점을 개선하기 위한 새로운 이미지 등록방법을 제안하였다. 상관법에 의한 이미지 등록법은 wind-off와 wind-on 두 이미지 사이의 상관함수를 계산하여 각 조사구간의 변위를 구함으로써 유동에 의한

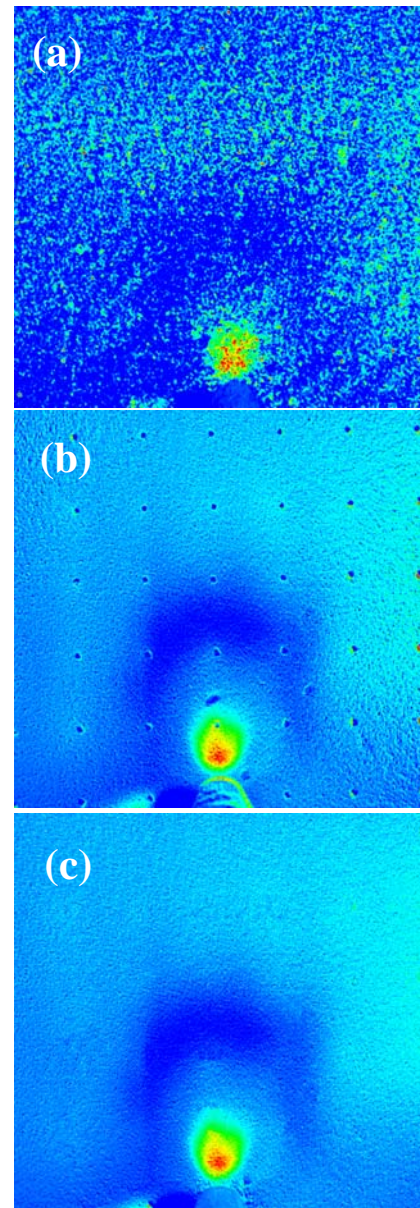


Fig. 6 Pressure distributions of the impinging jet: (a)no image registration, (b)conventional method, (c)CBIR

모형의 움직임을 보정하는 방법이다. 두 이미지의 작은 조사구간에서 상관관계를 극대화하기 위해서 회색의 얼룩무늬를 분무하였다. 또한 상관함수의 계산시간을 단축하기 위하여 FFT를 이용한 식으로 바꾸어 계산하였다. 상관법에 의한 이미지 등록법을 충돌제트 유동장에 적용하여 본 결과, 기준점의 도움 없이 기존의 이미지 등록보다 정밀한 압력측정이 가능하다는 것을 확인하였다.

## 참고문헌

- (1) Bell, J.H., Schairer, E.T., Hand, L.A. and Mehta, R.D., 2001, "Surface Pressure Measurements Using Luminescent Coatings," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 33, pp. 155-206.
- (2) Donovan, J.F., Morris, M.J., Pal, A., Benne, M.E. and Crites, R.C., 1993, "Data analysis techniques for pressure and temperature-sensitive paint," *AIAA Paper 93-0176, Aerosp. Sci. Meet. Exhib.*, 31st, Reno, NV.
- (3) Bell, J.H. and McLachlan, B.G., 1996, "Image registration for pressure-sensitive applications," *Exp. Fluids*, Vol. 22, pp. 78-86.
- (4) Shanmugasundaram, R. and Samareh-Abolhassani, J., 1995, "Modified scatter data interpolation used to correct pressure sensitive paint images," *AIAA Paper 95-2041. Thermophys. Conf.*, 30th, San Diego, CA.
- (5) Le Sant, Y., Deleglise, B. and Mebraki, Y., 1997, "An automatic image alignment method applied to pressure sensitive paint measurements," *Int. Congr. Instrum. Aerosp. Simul. Fascil.*, 17th, Pacific Grove, CA.
- (6) Weaver, W.L., Jordan, J.D., Dale, G.A. and Navarra, K.R., 1999, "Data analysis for the development and deployment of pressure sensitive paints," *AIAA Paper 99-0565, Aerosp. Sci. Meet. Exhib.*, 37th, Reno, NV.
- (7) Scarano, F. and Riethmuller, M.L., 1999, "Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset," *Exp. Fluids*, Vol. 26, pp. 513-523.
- (8) Hart, D.P., 2000, "PIV error correction," *Exp. Fluids*, Vol. 29, pp. 13-22.
- (9) Scarano, F., "Iterative image deformation methods in PIV," 2002, *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, pp. R1-R19.