

Pressure Sensitive Paint를 이용한 압력장 측정기술의 이미지 등록에 관한 연구

장영기* · 박상현** · 성형진†
(2003년 5월 30일 접수, 2003년 12월 4일 심사완료)

Assessment of Image Registration for Pressure-Sensitive Paint

Young-Ki Chang, Sang-Hyun Park and Hyung Jin Sung

Key Words : Image Registration(이미지 등록), Pressure Sensitive Paint(압력 감응 페인트), Stern- Volmer Equation(스턴-볼머 관계식), Automatic Detection of Control Point (기준점 자동인식), Interpolation(보간법)

Abstract

Assessment of image registration for Pressure Sensitive Paint (PSP) was performed. A 16 bit camera and LED lamp were used with Uni-FIB paint (ISSI). Because of model displacement and deformation at 'wind-on' condition, a large error of the intensity ratio was induced between 'wind-on' and 'wind-off' images. To correct the error, many kinds of image registrations were tested. At first, control points were marked on the model surface to find the coefficients of polynomial transform functions between the 'wind-off' and 'wind-on' images. The 2nd-order polynomial function was sufficient for representing the model displacement and deformation. An automatic detection scheme was introduced to find the exact coordinates of the control points. The present automatic detection algorithm showed more accurate and user-friendly than the manual detection algorithm. Since the coordinates of transformed pixel were not integer, five interpolation methods were applied to get the exact pixel intensity after transforming the 'wind-on' image. Among these methods, the cubic convolution interpolation scheme gave the best result.

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 방법은 '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

* GM대우 오토엔테크놀로지(주)
** 회원, 한국과학기술원 기계공학과
† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : hjsung@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3027 FAX : (042)869-5027

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.

본 연구에서는 PSP를 이용하여 압력을 측정하는데 필수적인 이미지 등록 기술을 개발, 적용하여 정확한 압력장을 구하고자 한다.

2. 배경 이론

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.

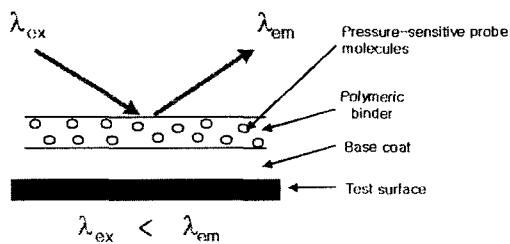


Fig. 1 Composition of PSP

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

여기서 밀첨자 0은 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 이미지 등록(Image registration)

이미지 등록(image registration)을 통해 물체의 변위나 변형에 의해 생기는 기하학적인 오차를 보정해주기 위해서 유동이 없는 이미지와 유동이 있는 이미지 위에 표시한 기준점의 좌표변화를 통해 두 이미지 사이의 수학적 변환 함수를 구하게 된다. 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.

2.2.1 변환 함수와 기준점(Transform function and control points)

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.

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

본 연구에서는 변형과 같은 비선형적인 거동에도 적합하도록 2차와 3차의 다항식을 사용하여 이미지 등록을 수행하였다.

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

본 연구에는 이미지 등록에 적당한 변환 함수와 정확한 변환 함수의 계수를 구하기 위해 필요한 기준점의 개수에 대해서 조사하였다.

2.2.2 기준점 자동인식(Automatic detection of control point)

정확한 이미지 등록을 수행하기 위해서는 기본적으로 정확한 변환함수가 필요하다. 변환함수는 기준점의 좌표를 통해서 구하기 때문에 정확한 기준점의 좌표를 얻어내야만 정확한 이미지 등록이 가능하다. 사람이 직접 기준점의 중심 좌표를 찾는 방법으로는 정확한 기준점의 좌표를 찾을 수 없으므로, 자동으로 기준점의 중심좌표를 찾아주어야 한다. 본 연구에서는 정확한 이미지 등록을 위해서 자동으로 기준점의 중심좌표를 찾아내는 알고리즘을 개발, 적용하였다. 이 알고리즘은 크게 두 가지 과정으로 이루어진다. 물체 위에 표시된 기준점의 중심 좌표를 찾는 기준점 인식(recognizing the control points)과정과 인식된 두 이미지상의 기준점의 좌표들을 서로 연결 시켜주는, 즉 유동이 없는 이미지상의 기준점과 유동이 있는 이미지 상의 기준점들 중 같은 기준점을 연결시켜주는(linking the control points)과정이다.

기준점을 인식하기 위해서, 기준점에서 PSP의

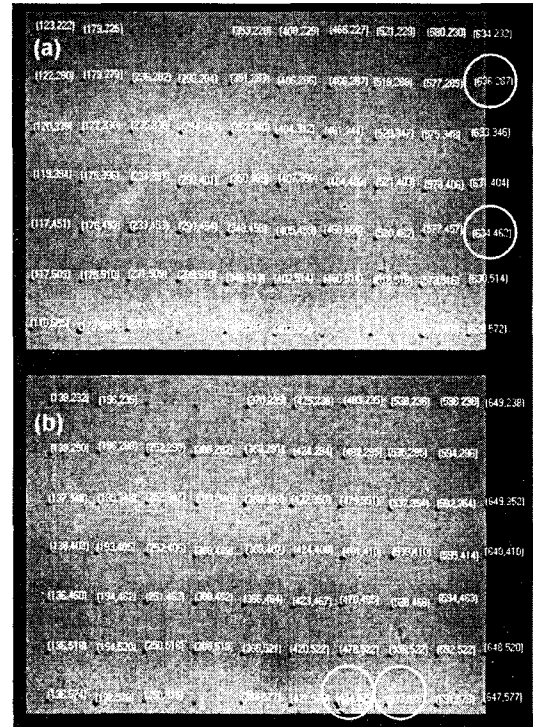


Fig. 2 Automatic detection of control points in (a) wind-off image (b) wind-on image

밝기값이 낮은 성질을 이용하였다. 임계값보다 낮은 화소들을 추출하여 기준점으로 인식을 하였고, 기준점의 중심 좌표를 정확히 구하기 위하여, 질량중심(center of mass) 방법을 추출된 화소 좌표들에 적용하여 정확한 기준점의 중심 좌표를 구하였다.

유동이 없는 이미지와 유동이 있는 이미지에 적용한 결과가 Fig. 2(a), (b)에 나타나 있다. 여기서 흰색 숫자들은 자동 인식된 기준점의 좌표값을 나타낸다. 유동이 없는 이미지의 경우 유동이 있는 이미지에 비해 우측의 2개의 기준점이 더 인식되었다. 또한 유동이 있는 이미지에서 기준점이 인식된 경우를 살펴보면 유동이 없는 이미지에서 인식되지 않은 하단의 2개의 기준점이 인식되었고, 그 바로 밑에 PSP 시편의 홈집에 의해 PSP 코팅이 벗겨진 부분이 낮은 밝기 값을 나타내어 기준점으로 인식되었다. 동일한 기준점이 한 이미지에서는 인식되지만 다른 이미지에서는 인식되지 않는 이유는 같은 기준점이라고 하더라도 임계값 근처의 밝기를 가진 경우, 유동이 없는 이미지에서 인식된 기준점이 유동이 있는 이

미지에서는 인식되지 않을 수도 있다. 이렇게 좋지 않은 2장의 이미지를 선택한 이유는 극단적인 상황, 즉 기준점 자동인식 알고리즘을 유동이 없는 이미지와 유동이 있는 이미지에 적용하였을 때 한 이미지에서는 기준점이 인식되었지만 다른 이미지에서는 인식되지 않거나, 실수로 인해 PSP 시편의 코팅이 벗겨져 밝기 값이 낮아진 것을 마치 기준점으로 인식하는 상황에도 이 알고리즘이 잘 적용되는 것을 보이기 위해서이다.

일단 유동이 없는 이미지와 유동이 있는 이미지의 기준점들을 인식한 이후에는 두 이미지에서 같은 기준점에 해당하는 점들을 연결시켜주는 작업이 필요하다. 이 작업을 수행하기 위해 일단 인식된 기준점들 중 각 이미지 상에 널리 분포된 최소 3개의 유동이 있는 이미지와 유동이 없는 이미지의 동일한 기준점의 좌표값을 통해서 유동이 없는 이미지상의 기준점들과 유동이 있는 이미지상의 기준점들 사이의 선형적인 움직임만을 나타내는 대략적인 위치 관계식인 유사 변환 함수를 얻어내게 된다. 이 대략적인 변환함수를 통해 유동이 있는 이미지의 모든 기준점들의 좌표를 변환하여 유동이 없는 이미지의 기준점의 좌표와 비교하여 일정 영역 내에 있는 점을 같은 기준점으로 인식하고 연결시켜준다. 따라서 어느 한 이미지에서 인식되지 않은 기준점의 경우는 그 기준점의 좌표를 대략적인 위치 관계식을 통해 변환시켰을 때 일정 영역 안에 대응되는 기준점이 없으므로 연결 되지 않게 되고, 따라서 변환 함수의 계수를 구하는 데 사용되지 않게 된다. 유동이 없는 이미지에서는 총 65개의 기준점이 인식되었고, 유동이 있는 이미지에서는 총 66개의 기준점이 인식되었지만 연결과정을 거쳐 최종적으로 변환함수를 구하기 위해 사용된 기준점은 두 이미지 사이에 공통되는 63개의 기준점이다. 이러한 알고리즘을 사용하여 정확한 기준점의 중심 좌표를 통해 정확한 이미지 등록을 할 수 있을 뿐만 아니라, 더 빨리 찾음으로써 이미지 등록 시간을 단축하고 사용자가 쉽게 이미지 등록을 수행할 수 있다.

2.2.3 보간법(Interpolation methods)

마지막으로 사상되는 화소의 좌표는 정수형이지만 변환함수를 거친 화소의 좌표는 소수형이기 때문에 구하고자 하는 점의 화소값을 입력 이미

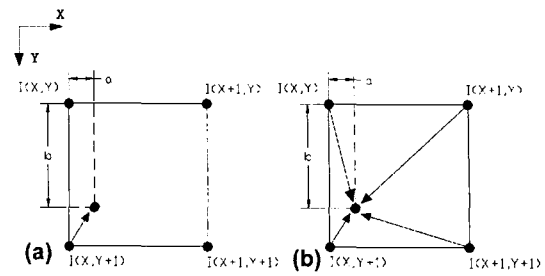


Fig. 3 (a)Nearest neighbor interpolation, (b)Bilinear interpolation

지의 주변 화소값으로부터 보간(interpolation)하여 구해야 한다. 보간법으로는 가장 간단한 가장 인접한 이웃 화소 보간법(nearest neighbor point interpolation)과 일반적으로 많이 사용되는 양선형 보간법(bilinear interpolation), 그리고 보다 정확한 보간법인 고등 차수 보간법으로 3차 회선 보간법(cubic convolution interpolation)과 B-spline 보간법(B-spline interpolation)이 있다.

가장 인접한 이웃 화소 보간법의 기본적인 개념은 출력 화소로 생성된 좌표값에서 가장 가까운 원시 화소를 출력 화소로 할당하는 것이다. (Fig. 3(a)) 따라서 원시 화소에 대하여 계산된 소수 좌표는 가장 가까운 유효한 화소의 좌표로 반올림되어진다. 이 방법은 원시 화소값을 변화시키지 않으며 구현하기에 간단하고 처리속도가 빠른 장점이 있기는 하지만, 고해상도 영상에서 직선 에지의 왜곡과 계단 효과(stair-step effect)를 일으키는 단점이 있다.

양선형 보간법에서 새롭게 생성된 화소는 네 개의 가장 가까운 화소값에 가중치를 곱한 값들의 합이다. (Fig. 3(b)) 가중치들은 선형적으로 결정되어진다. 양선형 보간법은 가장 인접한 이웃 화소 보간법보다 더 부드러운 영상을 산출하기 때문에 계단 효과를 감소시키는 장점이 있다. 하지만 이미지가 뿌옇게 되는 단점이 있고, 화소값을 변화시키며, 한 화소의 밝기값을 결정하기 위해 주위 네 개의 화소값이 필요하므로 이웃 화소 보간법에 비해 많은 계산이 요구된다. 본 연구에서는 거리에 대한 선형적인 가중치와 넓이에 대한 선형적인 가중치를 적용한 두 가지 종류의 양선형 보간법을 수행하였다.

-거리에 대한 선형적인 가중치

$$I_{x,y} = (1-a)(1-b)I_{x,y} + (1-a)bI_{x,y+1} + a(1-b)I_{x+1,y} + abI_{x+1,y+1} \quad (4)$$

- 넓이에 대한 선형적인 가중치

$$I_{x,y} = \frac{\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \frac{I_{x+i,y+j}}{(i-a)^2 + (j-b)^2}}{\sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 \frac{1}{(i-a)^2 + (j-b)^2}} \quad (5)$$

고등 차수 보간법[식 (6)]은 가중치를 부여하는 대신 보간 함수를 사용한다. 본 연구에서는 두 개의 보간 함수 즉, 3차 회선과 B-spline 보간 함수를 사용하였다. 이 함수들을 이용해 출력 화소를 생성하기 위해서 16개의 가장 가까운 화소값이 필요하다.

이 방법은 가장 인접한 화소 보간법의 단점인 계단 효과를 감소시키고, 이미지의 평활화와 선명성의 효과가 크다는 장점이 있다. 하지만 원시 화소값을 변화시키며, 1개의 화소값을 얻기 위해서 주변 16개의 화소값이 필요하기 때문에 상당히 많은 계산이 요구된다.

$$I_{x,y} = (f(1+a) \ f(a) \ f(1-a) \ f(2-a)) \cdot \begin{pmatrix} I_{x-1,y-1} & I_{x-1,y} & I_{x-1,y+1} & I_{x-1,y+2} \\ I_{x,y-1} & I_{x,y} & I_{x,y+1} & I_{x,y+2} \\ I_{x+1,y-1} & I_{x+1,y} & I_{x+1,y+1} & I_{x+1,y+2} \\ I_{x+2,y-1} & I_{x+2,y} & I_{x+2,y+1} & I_{x+2,y+2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f(1+b) \\ f(b) \\ f(1-b) \\ f(2-b) \end{pmatrix} \quad (6)$$

3차 회선 보간 함수는 스무딩(smoothing)효과와 더불어 함수에서 음수부분이 나타나기 때문에 이미지가 퍼미해지는(blurring) 효과가 적다. 3차 회선 함수는 B-spline 보간 함수나 양선형 보간 함수와 비교할 때 보간 효과가 가장 뛰어나다. 이 방법은 양선형 보간법과 더불어 가장 많이 사용된다. 이 보간법의 보간 함수는 식 (7)과 같이 정의되어지며, 형태는 Fig. 4(a)와 같다.

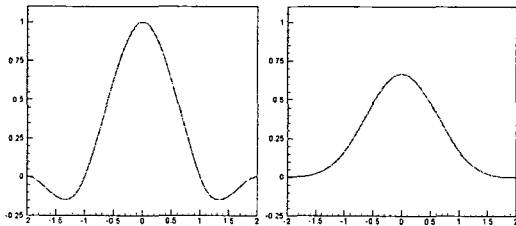


Fig. 4 (a)Cubic spline kernel (b)B-spline kernel

$$\begin{aligned} f(1+a) &= -a(1-a)^2 \\ f(a) &= (1-a) + a(1-a)^2 \\ f(1-a) &= a + a^2(1-a) \\ f(2-a) &= -a^2(1-a) \end{aligned} \quad (7)$$

B-spline 함수는 상당히 좋은 저주파 통과 필터를 만든다. 따라서 이 보간법의 경우 노이즈가 많은 경우에 효과적이다. B-spline 보간 함수는 함수 특성상 보간 특성이 3차 회선 보간 함수보다 떨어진다. 3차 회선 보간 함수와는 다르게, B-spline 보간 함수는 모두 양의 값을 가진다. 따라서 이 B-spline 함수는 등록된 화소좌표가 정수로 나와서 보간이 필요 없는 경우에도 원시 화소값을 그대로 가져오지 않고 보정을 해주어 보간 특성이 떨어지게 된다. B-spline 보간 함수는 식 (8)과 같이 정의되어지며, 형태는 Fig. 4(b)와 같다.

$$\begin{aligned} f(1+a) &= -1/6(1+a)^3 + (1+a)^2 - 2(1+a) + 4/3 \\ f(a) &= 1/2a^3 + a^2 + 2/3 \\ f(1-a) &= 1/2(1-a)^3 - (1-a)^2 + 2/3 \\ f(2-a) &= -1/6(2-a)^2 + (2-a)^2 - 2(2-a) + 4/3 \end{aligned} \quad (8)$$

본 연구에서는 위의 5가지 보간법을 사용하여 그 결과를 비교하였다.

3. 실험 장치 및 방법

3.1 선행 검정(A priori calibration)

Fig. 5는 검정장치(calibrator)의 개략적인 모습이 다. 압력과 온도가 조절되는 챔버(chamber) 내부에 PSP를 코팅한 시편을 넣고 PSP 시편에 낮은 파장의 푸른빛을 비추면 높은 파장의 붉은빛이 방사된다. 방사되는 영상신호를 CCD 카메라로 검출하여 빛의 세기와 압력사이의 관계식인 스텐-볼머식의 계수를 구하게 된다.

본 연구에 사용한 검정장치는 미국 EDGEWOOD TECHNOLOGIES사의 챔버와 압력조절 장치를 사용하였으며, 압력 조절 범위는 50~152KPa, 해상도는 10Pa이다. 온도 조절 범위는 10~60℃이며 해상도는 0.01℃이다. 광원으로는 ISSI사의 LED 램프 2개를 사용하였다. 직경 2 in(76LED), 출력 40W, 방사파장 464nm의 사양을 가지고 있다. PSP가 방사하는 높은 파장의 붉은 빛만을 측정하기 위해서 실험장치를 암막처리하고 파장이 610nm 이상의 빛만을 통과시키는 필터

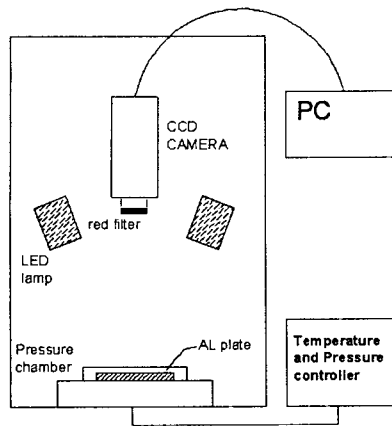


Fig. 5 Calibration facility

터를 카메라 렌즈 앞에 부착하였다. 카메라로는 16bit ANDOR의 MCD434-BV(1024 x 1024 pixels)를 사용하였다.

3.2 충돌젯 실험 장치

Fig. 6은 충돌젯 실험 장치의 개략적인 모습이 다. 압축공기 탱크로부터 온 공기는 압축 공기중의 수분을 제거하기 위해서 습기제거 필터를 거친 뒤, 압력을 조절하고 일정하게 유지해주는 압력조절계를 통과한다. 노즐로 들어가기 전에 압력 값을 읽을 수 있는 게이지를 설치하여, 실제 노즐로 들어가는 압력을 구하였다. 압력 게이지를 통과한 압축공기는 지름 $d=4\text{mm}$ 의 노즐을 통해 분사된다. 노즐의 출구속도는 180m/s 로 설정하였고, 이는 노즐출구에서 피토관을 이용하여 노즐출구속도를 맞추었다. 이 때 벽면과 노즐과의 거리를 h 라고 할 때 h/d 가 3.0이고, 노즐과 벽면과의 각도는 45° 로 설정하였다. 실제 압력과 PSP의 결과를 비교할 수 있도록 지름 1mm 의 압력탭이 2mm 간격으로 중심부분에 한 개와 양쪽에 19개씩 총 39개 설치되었다. 각각의 압력탭에서 나오는 데이터는 마노미터(manometer)를 이용하여 측정하였다. 실험 시 외부로부터의 광원을 차단하기 위하여 실험장치 전체를 암막 처리하였다.

PSP는 폭 90mm 높이가 90mm 의 알루미늄 평판에 미세한 스프레이건을 사용하여 얇게 코팅하였고, 그 위에 5mm 간격으로 기준점을 표시하였다. 기준점의 위치와 개수에 따른 이미지 등록의 영향을 살펴보기 위해 충분한 수의 기준점을 표시하였다.

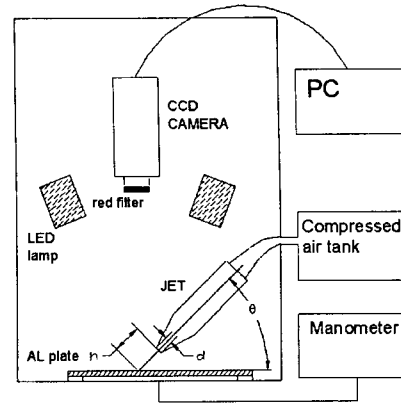


Fig. 6 Experimental setup

압력계산 프로그램 및 이미지 등록 프로그램 등 모든 영상처리 프로그램은 LabVIEW를 이용하여 직접 구현하였다.

4. 실험 결과

4.1 선행 검정(A priori calibration)

$0.6 \sim 1.4$ 기압 사이의 9단계의 압력에 대하여, 온도는 충돌제트 공기의 온도인 25.5°C 로 조절하여, PSP의 이미지를 얻어냈다. P_0 는 대기압인 101.3KPa 이다. 정확한 측정을 위해 10장의 이미지를 평균하였으며, CCD 카메라 자체의 노이즈인 암전류 노이즈(dark current noise)를 제거하였고, CCD 칩을 영하 50°C 까지 냉각하여 노이즈를 최소화하였다. 또한 PSP의 반응성을 증가시키고 시간이 지남에 따라 PSP의 반응성이 줄어드는 광퇴화(photo-degradation)를 줄이기 위해 흰색 에나멜페인트를 이용하여 바탕 코팅을 해주었다.

4.2 이미지 등록(Image registration)

Fig. 7은 CCD 카메라를 통해 찍은 실제 이미지들이다. Fig. 7(a)는 제트가 분사되지 않고 있는 유동이 없는 상태이고 Fig. 7(b)는 제트가 180m/s 로 분사되고 있는 유동이 있는 상태이다. 그림의 밝게 보이는 부분이 제트가 충돌하는 평판이며, 눈으로는 구분하기 어려우나 Fig. 7(b)에서 노즐의 바로 앞에서 약간 어둡게 보이는 부분이 산소에 의해 켄칭되어 방사되는 빛이 약해지는 부분, 즉 압력이 높은 곳을 의미한다. 실제 표면의 압력은 이 두 이미지의 빛의 강도를 나누어 앞서

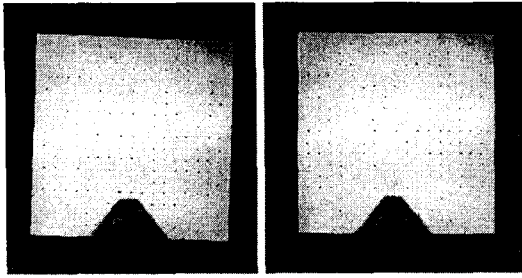


Fig. 7 (a)Wind-off image (b)Wind-on image

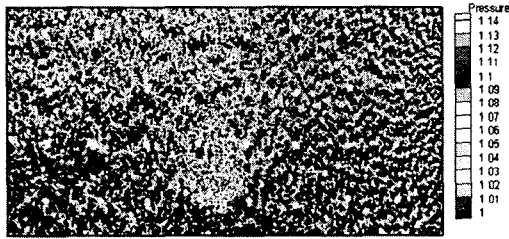


Fig. 8 Pressure distribution without image registration

구한 스티븐-볼머 관계식을 이용해 구한다. 모든 사진을 보면 검정색 점들이 표시되어 있는데, 이는 이미지등록을 하기 위한 기준점으로서 알루미늄 평판 위에 5 mm 간격으로 일정하게 표시한 것이다. 이미지 등록의 효과를 확인하기 위하여 유동이 있는 이미지의 사진을 찍기 전에 임의의 변위를 주어 두 이미지의 평판이 다르게 위치해 있음을 볼 수 있다.

이미지 등록을 하지 않고 압력장을 구한 결과가 Fig. 8에 나타나있다. 검은 점과 흰 점이 교대로 나타나는 것은 알루미늄 평판의 움직임 때문에 기준점이 제대로 정렬되지 않았기 때문이다. Fig. 9는 관심 영역인 제트 중심 영역에서 압력의 직선 분포(line profile)를 압력탭 결과와 비교한 모습이다. 압력탭으로 측정한 최대 압력인 1.127 atm에서 대기압인 1 atm의 영역에 대하여 압력장을 나타내었는데, 알루미늄 평판의 움직임과 변형에 의한 오차가 제트의 최대 압력보다 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이미지 등록이 필수적임을 다시 한번 확인할 수 있다. 이미지 등록은 압력이 가장 높은 제트의 앞부분을 중심으로 32개의 기준점을 포함하는 영역에 대하여 수행하였다.

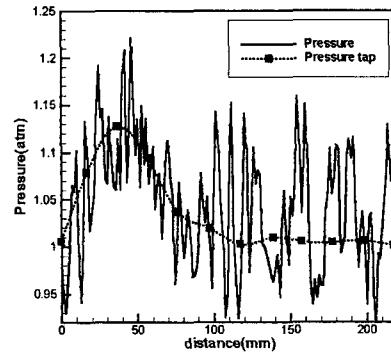


Fig. 9 Pressure centerline profile without image registration

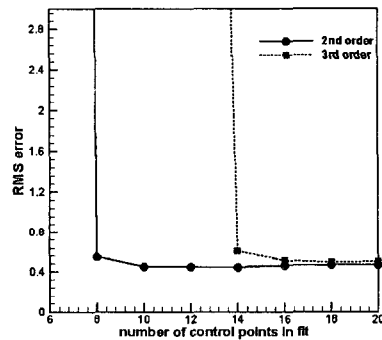


Fig. 10 RMS error with respect to the number of control points

4.2.1 변환 함수와 기준점

2차와 3차 다항 변환 함수를 사용하여 움직임과 변형이 생긴 유동이 있는 이미지를 유동이 없는 이미지를 기준으로 보정하였다. 2차 변환 함수의 경우 관심 영역내의 32개의 기준점 중 변환 함수를 구하기 위해 필요한 최소 6개의 기준점으로부터 20개의 기준점을 변환함수를 구하기 위하여 사용하였으며, 3차 변환 함수의 경우 변환함수를 구하기 위해 필요한 최소 10개의 기준점으로부터 20개의 기준점을 변환함수를 구하기 위하여 사용하였다. 두 변환함수의 정확도를 측정하기 위해 유동이 없는 이미지와 이미지 등록후의 유동이 있는 이미지의 34개의 기준점들의 근제곱오차(Root Mean Square Error)를 구하였다. (Fig. 10) 2차의 경우는 약 10개 이상의 기준점이 필요한 것으로 나타났다. 3차 다항 변환은 2차에 비해 불안정성(instability)이 높아 만족할 만한 결과를 얻기 위해서 더 많은 기준점이 필요하였고,

약 16개 이상의 기준점이 필요하다.

만족할 만한 결과를 얻기 위해서는 두 함수의 계수를 구하기 위해 필요한 최소한의 기준점의 개수보다 약 1.5~2배 이상의 기준점이 필요하다. 또한 적당한 변환 함수는 2차 변환 함수이다. 그 이상의 차수를 갖는 변환함수는 함수 자체의 불안정성이 높아지고 또한 함수의 계수 값을 정해 주기 위해 많은 기준점이 필요하게 되므로 무조건 차수를 높여주는 것은 바람직하지 않다.

4.2.2 기준점 자동인식

기준점 자동 인식의 효과를 검증하기 위하여 손으로 이미지 등록을 수행한 결과와 자동으로 이미지 등록을 수행한 결과를 비교해 보았다. 관심 영역내의 32개의 기준점들 중 동일한 12개의 기준점에 대하여 Fig. 11(a)는 손으로 직접 기준점의 좌표를 구하여 이미지 등록을 수행하여 계산한 압력장이다. Fig. 11(b)는 기준점을 자동으로 인식하여 이미지 등록을 수행하여 계산한 압력장이다. 압력장을 비교해 보면 기준점을 자동으로 인식하여 이미지 등록을 수행한 압력장이 좀 더 깨끗한 것을 알 수 있다.

따라서 기준점을 자동으로 인식하는 것이 손으로 직접 기준점을 인식하는 것에 비해 정확한 이미지 등록을 수행할 수 있다. 또한 기준점을 자동으로 인식함으로써 이미지 등록 시간을 단축할 수 있었고, 사용자의 편의 또한 향상되었다. 최종적으로 구한 압력장은 관심 영역내의 32개의

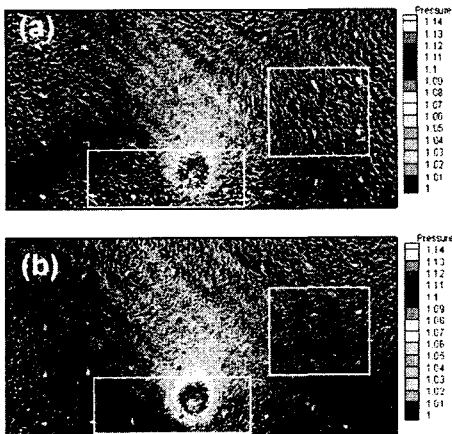


Fig. 11 (a)Manual detection, (b)Automatic detection

기준점을 자동으로 인식하여 정확한 변환함수를 통해서 이미지 등록을 수행하였다. 유동이 없는 이미지와 유동이 있는 이미지에서는 각각 33개의 기준점이 인식되었지만 실제 변환함수를 구하기 위해서 사용된 기준점은 두 이미지의 공통된 32개의 기준점이다. 모든 압력장은 32개의 기준점을 자동으로 인식하여 정확한 이미지 등록을 수행하였다.

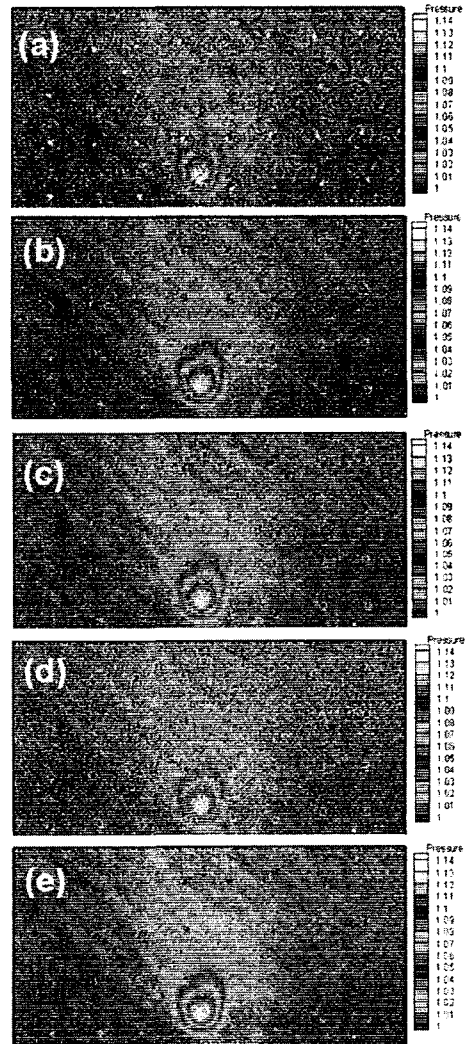


Fig. 12 Pressure distribution obtained by (a)Nearestneighbor, (b)Bilinear(distance weighting), (c)Bilinear(area weighting), (d)B-spline, (e)Cubic spline

4.2.3 보간법(interpolation)

5가지 보간법의 정확도를 평가하기 위해서 변형된 이미지를 변형전의 이미지를 기준으로 등록시켰을 때 등록된 이미지와 변형전 이미지의 밝기 차이를 비교하였다. 두 이미지 사이에 밝기 차이가 없을 경우가 이상적으로 등록이 된 것이라고 할 수 있다. 압력을 가하게 되면 압력이 가해지는 부분의 밝기가 변하기 때문에 보간법의 정확도를 평가할 수 없게 된다. 따라서 유동이 없는 이미지와 유동이 있는 이미지의 압력변화가 없는 영역의 24000개의 화소에 대해서 보간법의 정확도를 평가하였다. 같은 변환함수를 사용하므로 5가지 보간법의 정확도만을 평가하게 된다. 각각 10장씩 이미지 평균을 수행하였고 암전류 노이즈를 제거하였으며 CCD 칩을 영하 50℃ 까지 냉각하여 노이즈를 최소화하였다. 변환함수로 2차 다항 변환 함수를 사용하였고, 관심영역 내 15개의 기준점을 자동 인식하여 얻어낸 정확한 변환 함수를 사용하였다. 유동이 있는 이미지를 등록하여 유동이 없는 이미지와 비교하였다. 이상적으로 등록이 되었다면 두 이미지의 같은 화소끼리 나누었을 때 1.0이 나와야 한다. 하지만 CCD 카메라의 특성상 이미지 등록이 완벽히 되더라도 등록된 이미지와 변형전의 이미지의 모든 화소에서 밝기 값이 같을 수는 없다. 따라서 보간법의 정확도를 평가하기 위해서 변형이 없는 이미지와 변형이 되었지만 이미지 등록을 통해서 보정해 준 두 이미지의 같은 화소끼리 밝기 값을 나누었을 때, 관심 영역의 24000개의 화소 중 0.97~1.03, 0.98~1.02, 0.99~1.01 그리고 0.995

~1.005 사이의 값을 가지는 화소의 개수를 측정하였다.

Table 1을 보면 이 네 가지 경우 모두 3차 회선 보간법이 가장 좋은 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그리고 주위 16개의 화소값을 통해서 보간하는 B-spline 보간법이 2가지의 양선형 보간법(면적 가중법과 길이 가중법) 보다도 상대적으로 좋지 않은 결과를 보이는 이유는 B-spline 보간 함수의 특성상 보간하는 성질이 떨어지기 때문이다. 하지만 B-spline 보간 함수는 저주파 통과 필터로 쓰이는 가우시안 함수와 비슷한 형상을 나타내기 때문에 노이즈를 감소시키는 효과가 있다. 따라서 B-spline 보간법은 노이즈를 무시할 수 없는 경우에 효과적이다. 각각의 보간법을 사용하여 구한 압력장이 Fig. 12에 나타나 있다.

가장 인접한 이웃 화소 보간법을 적용한 압력장의 경우(Fig. 12(a)) 이미지 등록을 하지 않은 압력장(Fig. 8)보다 정확한 압력장을 구할 수 있었지만, 다른 보간법에 비해 압력장이 균일하지 않고 기준점들이 두드러져 보이는 것을 확인할 수 있다. 거리에 의한 가중치(Fig. 12(b))와 넓이에 의한 가중치(Fig. 12(c))를 사용한 양선형 보간법을 적용한 압력장의 경우 가장 인접한 이웃 화소 보간법 보다는 훨씬 더 균일한 압력장을 얻을 수 있었고 또한 기준점들도 많이 상쇄된 것을 확인할 수 있다. 3차 회선 보간법을 적용한 압력장의 경우(Fig. 12(e)) 이전의 보간법과 비교할 때 가장 균일한 압력장을 얻을 수 있었으며 기준점들도 가장 많이 상쇄되어 잘 보이지 않는 결과를 얻었다. 고등 차수 보간법인 B-spline 보간법을 적용한 압력장의 경우(Fig. 12(d)) 양선형 보간법보다도 떨어지는 압력장을 얻었고 기준점도 두드러져 보이는 것을 확인할 수 있다. 이 이유는 앞서 말한 바와 같이 B-spline 보간 함수의 특성 때문이다. Fig. 13 과 Fig. 9를 비교해보면 이미지 등록을 통해서 훨씬 더 정확한 압력장을 얻은 것을 확인할 수 있다.

Table 1 Accuracy comparison of interpolation methods

Interpolation method	Intensity ratio(I/I') (24000) (단위 : %)			
	0.97~1.03	0.98~1.02	0.99~1.01	0.995~1.005
Nearest Neighbor	94.56	84.14	55.85	30.77
Bilinear (distance)	98.40	93.64	68.15	38.36
Bilinear (area)	98.50	94.21	68.94	39.07
B-spline	97.06	88.91	58.75	31.84
Cubic convolution	98.88	96.26	74.01	43.40

5. 결론

PSP를 이용하여 정확한 압력장을 측정하기 위해서는 물체의 움직임을 보정해주는 이미지 등록 기술이 필수적이다. 이미지 등록 기술을 적용함으로써 물체의 움직임에 의한 오차를 줄임으로써

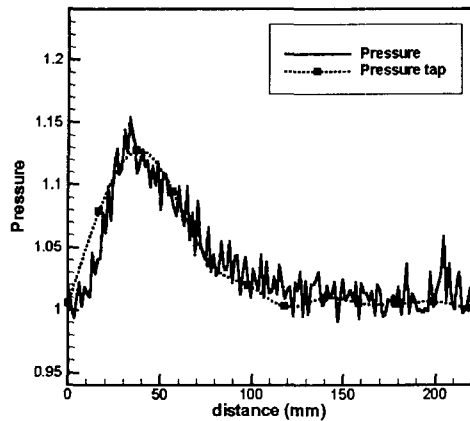


Fig. 13 Pressure centerline profile with cubic convolution interpolation

훨씬 정확한 압력장을 얻어낼 수 있었다.

이미지 등록을 위해 필요한 기준점의 개수가 이미지 등록의 정확성을 좌우하므로 최소한 요구되는 기준점 개수의 약 1.5배 이상의 기준점을 사용하여 변환함수의 계수를 결정해주는 것이 바람직하다. 또한 변환함수의 경우 선형적인 거동을 표현하기 위한 다항 변환 함수의 차수는 2차의 경우 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 비선형성이 큰 변형에는 높은 차수의 다항 변환 함수가 필요하나, 함수 자체의 불안정성이 높아지고 많은 기준점이 필요하게 되므로 무조건 차수를 높여주는 것은 바람직하지 않다.

정확한 기준점의 좌표를 구하기 위해 자동으로 이미지 상의 기준점을 인식하는 알고리즘을 적용함으로써 사람이 직접 기준점을 찾아주는 것에 비해 훨씬 더 정확한 기준점의 중심좌표를 얻을 수 있었다. 정확한 기준점의 인식과 연결과정을 통해 변환함수를 구하여 보다 정확한 이미지 등록을 수행할 수 있었다.

마지막으로 변환함수를 거친 화소 좌표의 소수부분을 보정해주기 위해 보간법을 적용하였다. 5가지의 보간법들 중 3차회선 보간 함수를 사용한 보간법이 계산 시간은 다른 함수들에 비해 많이 걸리지만 가장 정확한 보간 효과가 있는 것으로

나타났다.

후 기

이 연구는 과학기술부 국가지정연구실 사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) McLachlan, B. G., Kavandi, J. L., Callis, J. B., Gouterman, M. and Green, D., et al., 1993, "Surface Pressure Field Mapping Using Luminescent Coatings," *Exp. Fluids*, Vol. 14(1/2), pp. 33-41.
- (2) Bell, J. H. and McLachlan, B. G., 1996, "Image Registration for Pressure Sensitive Paint Applications," *Exp. Fluids*, Vol. 22, pp. 78-86.
- (3) Le Sant, Y., Deleglise, B. and Mebarki, Y., 1997, "An Automatic Image Alignment Method Applied to Pressure Sensitive Paint Measurements," *ICIASF*, pp. 57-65.
- (4) Novak, K., 1992, "Rectification of Digital Imagery," *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 58(3), pp. 339-344.
- (5) Liu, T., Campbell, B. T., Burns, S. P. and Sullivan, J. P., 1997, "Temperature-and Pressure-Sensitive Luminescent Paints in Aerodynamics," *Appl. Mech. Rev.*, Vol. 50(4), pp. 227-246.
- (6) Weaver, W. L., Jordan, J. D., Dale, G. A. and Navarra, K. R., 1999, "Data Analysis Methods for Development and Deployment of Pressure-Sensitive Paints," *37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan 11-14*.
- (7) Wolberg, G., 1992, *Digital image warping*, IEEE Computer Society Press.
- (8) Jensen, R. J., 1996, *Introductory digital image processing*, Prentice-Hall.