

PSP 압력측정 시스템의 구축

전영진* · 김기수** · 서형석** · 변영환*** · 이재우***

Construction of the Pressure Sensitive Paint System

Young-jin Jeon* · Ki-su Kim** · Hyung-seok Seo** · Yung-hwan Byun*** · Jae-woo Lee***

ABSTRACT

Pressure Sensitive Paint(PSP) means a reacting paint in pressure. The calibration of PSP and the wind tunnel test of PSP painted model are required to measure pressure by using PSP. Therefore, the post processing from these results shows the information and image of the pressure distribution. PSP can show the information of total pressure from the wind tunnel test and the calibration. In this study, equipments of PSP are composed, and experiment is accomplished by using PSP. The surface pressure distribution around the wall of nozzle is measured by PSP. The measured pressure has similar results to those of the CFD and pressure tap measurement.

초 록

Pressure Sensitive Paint(PSP)는 압력에 반응하는 도료를 뜻한다. PSP를 이용하여 압력을 측정하기 위해서는 Paint Calibration과 PSP를 도포한 모델의 풍동실험이 필요하다. PSP는 이 두 가지의 결과를 이용한 이미지의 후처리과정을 통하여 압력정보를 포함한 이미지를 얻을 수 있는 신기술이다. 본 연구에서는 PSP에 필요한 장치 및 설비들을 구성하고 PSP를 이용하여 초음속 유동장 내의 압력측정 실험을 실시하였다. 압력측정 실험은 초음속 유동장의 노즐 벽면의 압력을 측정하였으며, 측정 압력에 대해서는 압력공(Pressure Tap)에 의한 결과값과 전산해석의 결과값을 통하여 비교하였고, 그 실험 결과를 바탕으로 PSP는 표면압력을 측정함에 있어서 압력공을 이용한 기존의 방식을 대체할 수 있는 기술임을 확인하였다.

Key Words: PSP(Pressure Sensitive Paint, 감압도료), Supersonic Wind Tunnel(초음속풍동), Calibration Chamber(캘리브레이션 챔버), Cavity(공동), Nozzle(노즐)

† 2007년 11월 13일 접수 ~ 2008년 2월 9일 심사완료

* 정회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
現 (주)한화 구미공장 개발2부

** 학생회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과

*** 중신회원, 건국대학교 항공우주정보시스템공학과
연락처, E-mail: yhbyun@konkuk.ac.kr

1. 서 론

공기 중에 위치한 물체 표면의 압력을 알게 되면 물체에 걸리는 힘을 알 수 있고, 결과적으

로 이러한 측정결과들은 비행체의 성능 해석 및 설계에 이용된다. 일반적으로 사용되는 측정법으로는 압력공을 이용한 방법이 있다. 압력공을 이용한 방법은 실험적으로 정확한 값을 취득할 수 있는 장점이 있지만, 압력값을 취득하는데 있어서 압력공을 뚫은 지점의 압력값만 취득할 수 있고, 압력공을 가공하는데 있어서 많은 제약이 따른다. 따라서 압력공을 이용한 압력측정방법을 보완하는 새로운 압력측정방법인 PSP (Pressure Sensitive Paint)를 이용한 압력측정법이 각광받고 있다[1].

PSP에 의한 압력측정은 빛의 흡수에 의한 발광(Photoluminescence)에 기초를 두고 있기 때문에 모델표면에 다수의 압력공을 가공할 필요가 없고, 원하는 지역의 압력값을 전역적으로 취득할 수 있다는 장점이 있다[2]. 또한 전산해석의 결과물과 마찬가지로 압력 이미지를 통해서 압력분포를 한 눈에 볼 수 있다. 또한 다수의 압력 데이터를 얻어야 하는 실험과정에 소요되는 비용과 시간도 줄일 수 있다.

현재 국내에서는 PSP를 이용한 압력측정 기술에 대한 많은 연구가 이루어지지 않고 있는 상황이다. 따라서 PSP의 기본적인 특성을 파악하고 PSP를 이용한 실험에 필요한 시스템을 구축하여 실제적인 실험을 통한 PSP의 결과를 검증하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 PSP를 이용한 압력 측정 시스템을 구축하고 그것을 적용하기 위하여 PSP Paint Calibration Chamber를 개발하였고 PSP 압력측정 시스템을 구축하였으며, 이들을 기반으로 하여 PSP를 압력측정 실험에 적용하였다.

2. PSP 압력측정 시스템 구축

2.1 PSP의 원리 및 소개

PSP를 이용한 압력 측정은 실험 물체의 표면에 액상의 PSP를 도포하고 완전히 굳어진 뒤 특정 파장의 빛을 PSP에 조사하여 PSP가 에너지를 흡수하게 한다. PSP는 흡수한 에너지를 다시

긴 파장의 빛을 방출하는데 산소에 의하여 발광이 억제된다. PSP는 산소에 의하여 차단된 강도에 따라서 압력의 정도를 계측할 수 있다.

PSP에서 압력을 측정할 수 있는 가장 대표적인 원리는 빛의 흡수에 의한 발광과 산소에 의한 차단(Oxygen Quenching)이다.

빛의 흡수에 의한 발광은 Fig. 1의 Jablonsky의 에너지 준위 도표에 잘 나타나 있다. 이 도표는 발광분자(Luminescence)의 에너지 준위 차이와 광자물리화적인 발광과정을 간단하게 도식화한 것이다. 가장 아랫부분의 선은 분자의 바닥상태 에너지를 표현한다. 이것은 통상적으로 S0라고 표기하며 Singlet상태이다. 이와 마찬가지로 여기상태의 Singlet과 Triplet 상태는 S1, S2, T1으로 표기한다.

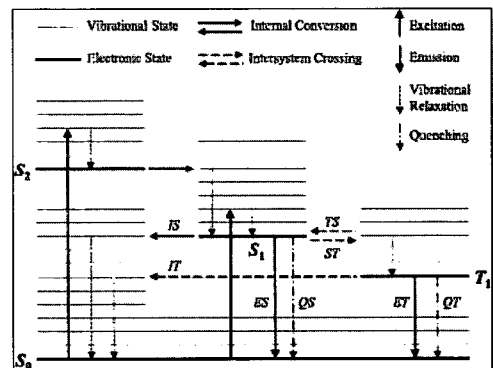


Fig. 1 Jablonsky Energy Graph[3]

PSP는 발광(Luminescence)과정을 거치면서 짧은 파장의 빛을 흡수하여 긴 파장의 빛을 방출한다. Fig. 2는 PSP Probe의 흡수(Absorption)과 방출(Emission)과장을 나타낸다.

PSP를 이용한 또 다른 압력측정 원리는 산소 분자에 의한 차단(Oxygen Quenching)이다. PSP 내의 Probe는 산소분자와 결합한다. 대기중의 산소분자가 PSP 내부에 침투하여 PSP의 Probe와 상호작용을 하게 된다. 이때 산소분자가 Probe의 발광을 차단하는 것을 'Oxygen Quenching' 이라고 한다.

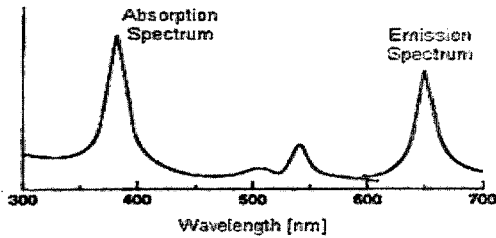


Fig. 2 Absorption and Emission of UNI-FIB PSP[3]

산소분자의 바닥상태는 보통 Triplet 상태에 있다. 그리고 한 쌍의 여기된 Singlet상태의 산소 분자가 갖는 에너지는 바닥상태와 비교하여 1.0eV 높은 상태이다. 이러한 특성은 산소분자가 효과적인 켄처로써의 역할을 함을 나타낸다. 여기상태의 발광분자와의 켄칭작용은 바닥상태의 산소분자와의 에너지 교환으로써 이루어진다[4]. 따라서 Probe는 짧은 파장의 빛을 흡수해서 긴 파장의 빛을 내지만, 산소와 결합한 Probe는 흡수한 에너지를 산소에 빼앗겨 빛을 내지 못한다. 또한 PSP가 도포된 표면에 압력 차이가 있으면, 압력이 높은 부분은 산소 분자의 침투가 많고, 압력이 낮은 부분은 반대가 된다. 이러한 차이에 의해서 압력에 따라 Probe 입자가 빛을 방출하는 정도가 달라지는 것이다. 이 차이를 CCD 카메라를 통해서 컴퓨터에 입력 받고 이미지 처리 과정에 의해서 압력의 값으로 변환 시킬 수 있다. Fig. 3은 Oxygen Quenching 과 Photon Excitation의 원리와 실험장치의 개략도를 보여 주고 있다.

2.2 도료의 보정(Paint Calibration)

PSP는 도포하는 두께에 따라서 압력/온도의 민감도가 달라진다. 따라서 Paint Calibration을 통해서 PSP Coating 두께에 따른 값을 보정을 해주어야 한다. Calibration의 방법은 'A Priori Method', 'In Situ Method', 'Hybrid Method' 로 나눌 수 있다[5].

본 연구에서는 'A Priori Method'를 이용하여 실험을 수행하였다.

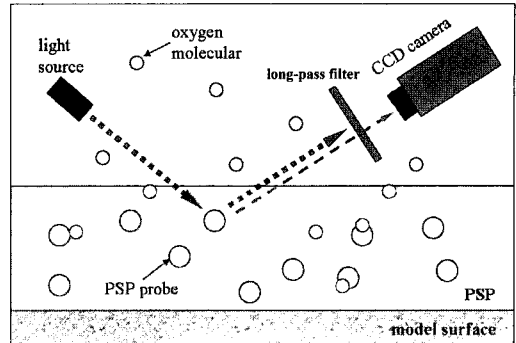


Fig. 3 Principle of PSP

2.3 Calibration Chamber의 개발

Calibration 장치는 가장 기본이 되는 Priori Calibration을 위해 필요한 장치이다. Priori Calibration은 압력과 온도를 변화시키면서 발광량의 변화를 측정하여 그 관계를 관계식으로 나타낸다. Calibration 장치는 Calibration Chamber의 내부와 외부를 완전히 차단시킬 수 있는 Chamber와 내부의 압력과 온도를 제어할 수 있는 컨트롤 모듈로 구성된다. Chamber의 설계는 ISSI사의 Calibration Chamber를 참고 하였다.

2.3.1 Calibration Chamber

2.3.1.1 Calibration Chamber의 구성



Fig. 4 Calibration Chamber

Fig. 4는 Calibration Chamber의 외형이다.

Calibration 본체는 알루미늄으로 제작하였다. 내부는 표본접시, 온도센서, 열전소자, 수냉식 쿨러, 압력호스로 구성되어 있다.

Calibration Chamber의 표본접시는 황동으로 제작해 열전도율을 높이고, 내부에는 표본접시의 중앙부에 온도센서를 설치하여 보정표본(Calibration Cell)의 온도를 직접 측정할 수 있도록 하였다.

또한 압력튜브를 통하여 밀폐된 표본접시 내부의 압력을 조절할 수 있도록 하였다. 표본접시 밀면에는 열전소자를 이용하여 표본접시를 직접 가열/냉각 한다.

2.3.1.2 Calibration Chamber의 성능

최종적으로 만들어진 Calibration Chamber의 성능은 표 1과 같다. 온도조절의 오차가 큰 것은 온도제어기의 온도 감지 동작이 초당 1회를 실시하기 때문이다.

Table 1. Performance of Calibration Chamber

Pressure Range (bar)	0.1~3.0
Pressure Measurement Errors (bar)	0.001
Pressure Control Errors (bar)	±0.02
Reaching Time of Minimum Pressure (sec)	10
Temperature Range (°C)	-8~40
Temperature Measurement Errors (°C)	0.1
Temperature Control Errors (°C)	±1
Reaching Time of Minimum Temperature (sec)	1200
Maximum Size (mm)	3×3
Calibration Chamber Size (mm)	(L)1400×(W)1200×(H)61

다음 Fig. 5는 Calibration을 실시하는 실험장면을 보여주고 있다.

2.4 PSP 압력측정 시스템 구축

PSP를 이용한 실험을 하기 위해서는 먼저

PSP 실험 및 Calibration을 할 수 있는 장비가 구축되어야 한다. 또한 압력정보를 담고 있는 이미지를 획득한 후 그것을 후처리하는 소프트웨어도 필요하다.

2.4.1 장치 및 설비 구축

PSP를 이용한 압력측정은 PSP, PSP의 흡수파장에 맞는 광원 혹은 필터장치, PSP에서 방출하는 빛을 이미지화할 수 있는 영상획득 장치 및 PSP의 방출 파장과 동일한 범위를 가지는 필터 등이 필요하다. 그 밖에도 PSP를 실험모델에 도입하기위한 장비 역시 필요하다[6].



Fig. 5 Calibration Experiment

2.4.1.1 PSP(Pressure Sensitive Paint)

일반적으로 PSP는 발광용액(Luminescent Dye)과 폴리머 고정제(Polymer Binder)를 용제(Solvent)에 섞어서 만든다. 용제는 염화 유기물(Chlorinated Organic) 용제를 사용한다. 각각의 비율에 따라 PSP의 특성이 바뀌게 된다.

본 연구에서 사용된 PSP는 일반적으로 널리 사용되고 있는 ISSI사의 PtTFPP(백금 포르피린)를 PSP Probe로 사용하고, FIB를 고정제로 사용한 UNI-FIB UF300을 사용하였다. UNI-FIB의 흡수 파장은 630 nm(Blue)이며 방출 파장은 430 nm(Red)이다.

2.4.1.2 광원(Light Source)

PSP를 풍동에서 실험하기 위해서는 PSP를 들뜬 상태로 만드는 파장의 빛을 방출할 수 있는

광원이 필요하다. PSP의 종류에 따라서 필요한 빛의 파장대는 각각 다르나 대략 600nm 안팎의 파장대 값을 가진다. 통상적인 광원은 UV 램프, LED 램프, 레이저 등을 사용한다. Fig. 6은 본 연구에 사용한 ISSI사 LM-2로 76개의 청색 LED를 사용하여 610 nm 파장의 빛을 방출한다.

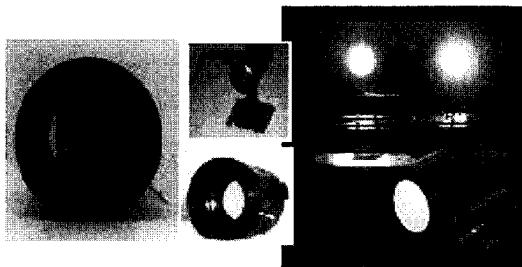


Fig. 6 610 nm LED Light Source (ISSI LM-2)

24.1.3 영상획득 장치

영상획득 장치는 PSP에서 방출하는 빛을 디지털화 하여 컴퓨터를 이용한 후처리 과정에 필요한 그림파일을 생성해내는 역할을 한다. 본 연구에 사용된 CCD 카메라는 Cooke사의 Sensi-Cam으로 12-Bit, 1024×1024 pixel의 분해능으로 고해상도로 촬영 할 수 있다. 뿐만 아니라 액체질소에 의한 냉각시스템으로 실리콘 가열에 따른 노이즈(Dark Current)를 줄일 수 있다.

24.1.4 PSP 도포 기기

PSP를 실험모델의 표면에 고르게 입히지 못하면 이미지 획득 시 노이즈가 생기는 원인이 된다. 도료를 얇고 고르게 도포하는데 적합한 도구인 ‘에어브러시(Airbrush)’를 사용했다.

24.2 후처리 과정(Post Processing)

풍동실험에서 얻은 PSP의 발광 이미지만으로는 압력정보를 도출할 수 없다. 풍동실험에서 얻은 이미지와 Calibration 과정에서 얻은 보정상수를 조합해야 압력정보를 알 수 있다. 이러한 과정이 필요하기 때문에 PSP를 이용한 실험에는 이미지의 후처리 과정이 포함된다. 또한, 풍동실험 시 물체가 움직이는 경우의 보정, CCD 카메라

라에 의한 노이즈 제거 등의 기술도 후처리 과정에 포함된다. 본 연구에서는 Calibration을 위하여 Matlab을 이용하여 제작한 프로그램을 사용하였고, 압력 이미지 획득을 위하여 상용 프로그램인 ISSI사의 ProImage OMS 3.0을 사용하였다[5].

24.2.1 Calibration

PSP의 Calibration은 Camera Calibration과 Paint Calibration이 있다. 그러나 통상적으로 PSP에서 Calibration이라고 함은 주로 Paint Calibration을 일컫는다.

Camera Calibration은 풍동실험에서 얻은 이미지에 대한 보정작업으로 렌즈로 인하여 발생하는 왜곡에 대한 보정과 CCD 카메라에서 발생하는 노이즈에 대한 보정으로 나눌 수 있다. CCD 카메라에서 발생하는 노이즈에 대한 보정은 CCD를 빛에 노출시키지 않은 이미지를 원래 이미지에서 빼주는 작업으로 보정할 수 있다. 렌즈로 인하여 발생하는 왜곡에 대한 보정은 렌즈 고유의 왜곡정보가 포함된 상수를 포함하는 변환함수를 통해서 보정을 할 수 있다. Fig. 7은 렌즈 왜곡에 대한 보정을 실시하여 왜곡을 실시한 이미지이다[3].

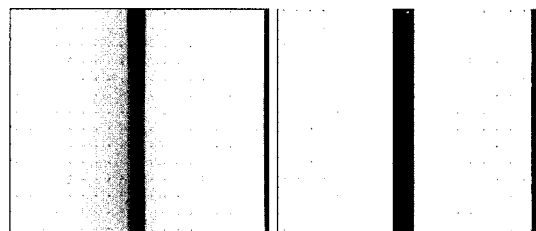


Fig. 7 Before Correction of Lens Distortion (Left) After(Right) [3]

Paint Calibration은 PSP의 도포된 두께에 따라서 압력과 온도에 대한 민감도가 다르다. 그렇기 때문에 실험전에 Paint Calibration을 통하여 PSP의 압력과 온도에 따른 발광도를 수식화하는 과정이 필요하다. 본 연구에서는 일반적인 형태의 스텐-볼머식과 유사한 형태로 압력이 온도와

발광도비의 제곱까지의 항으로 구성된다고 가정하고 Eq. (1)을 통하여 압력, 온도, 발광비의 관계를 구하였다.

$$[P] = a_0(T) + a_1(T) \left[\frac{I_0}{I} \right] + a_2(T) \left[\frac{I_0^2}{I^2} \right] \quad (1)$$

$$a_i(T) = \gamma_{0i} + \gamma_{1i} \cdot T + \gamma_{2i} \cdot T^2$$

여기에서 γ_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$)는 Calibration을 통하여 구할 수 있는 보정상수로써 압력, 온도, 발광비의 곡면의 방정식을 결정한다. 보정상수는 Least Square법을 이용하여 구하였다. 위의 식을 행렬화하여 정리한 뒤 오차항을 포함시키고, 이 오차항을 제곱하여 표현하면 Eq. (2)와 같다.

$$S_r = \sum_{i=1}^n (e_i)^2 = \sum_{i=1}^n \left(p_i - \sum_{j=1}^m \gamma_j a_{ji} \right)^2 \quad (2)$$

여기서 9개의 γ 에 대한 편미분을 취하고 그것을 0으로 놓으면 최소값을 구할 수 있다. 그리고 정리하면 Eq. (3)과 같은 행렬식을 얻을 수 있다 [7].

$$[[A]^T [A]] \{T\} = [A]^T \{P\} \quad (3)$$

Eq. (3)의 행렬식으로 γ 에 대한 행렬을 구할 수 있다. Fig. 8은 Eq. (3)을 이용하여 구한 3차원 곡면의 이미지이다. 총 24가지의 온도와 압력 조합으로 얻은 PSP의 발광도 정보가 사용되었다.

24.2.2 이미지의 정렬(Image Alignment)

풍동실험 시 풍동의 가동에 따라서 실험모델의 변형이나 움직임이 생긴다면 CCD 카메라에 입력되는 이미지는 풍동 가동의 유무에 따라서 달라진다. 뿐만 아니라 카메라의 위치에 따라서도 이미지의 왜곡이 일어날 수 있다. 이러한 움직임은 풍동 가동/비가동의 이미지를 나누어서 압력값을 구하는 방법에 있어서 큰 오차의 원인으로 작용한다. 따라서 후처리 과정에서 모델표

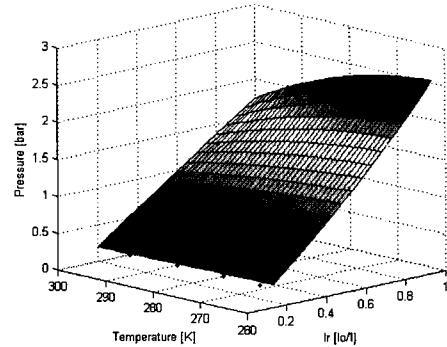


Fig. 8 Result of Calibration

면에 새겨진 기준좌표(Maker)를 바탕으로 이미지를 정렬하여 실험모델의 움직임에 대한 보상을 해준다. 모델의 변형이나 움직임으로 인한 이미지의 변형은 변환함수(Transform Function)를 통하여 바로 잡는다.

대표적인 변환함수는 Polynomial Transform Function이다[8].

24.2.3 압력 이미지의 획득

Camera Calibration과 이미지의 정렬을 마친 이미지는 풍동의 가동여부와 카메라의 위치에 상관없이 실험모델의 좌표점과 동일한 위치에 이미지가 정렬해 있다. Eq. (1)에 풍동 비가동 이미지를 풍동 가동이미지로 나눈 값, 풍동실험 시 실험모델의 온도, Paint Calibration을 통하여 획득한 보정상수를 입력하면 압력에 대한 이미지를 획득할 수 있다. 이 때 실험모델의 온도를 균일하다고 가정하면 단 하나의 온도를 입력하게 된다. 하지만 온도의 변화가 심한 실험조건에 대해서는 TSP나 그 밖의 도구를 이용하여 모델 전체의 온도정보를 입력해야 한다.

3. PSP를 이용한 압력측정 실험

PSP를 이용한 압력측정 시스템의 구축을 완료하고 다음과 같은 실험을 통하여 PSP를 이용한 압력측정의 유용성과 정확도를 판단한다.

이러한 실험은 이미 Calibration 방법에 대한 수정을 위하여 NASA에서 행해졌다[9].

3.1 초음속 풍동 노즐의 압력측정

본 실험에서는 PSP를 이용하여 M=2.5 초음속 풍동의 노즐 벽면 압력 측정하고 압력공을 이용한 압력측정과 CFD의 결과와 비교하여 PSP를 이용한 압력 측정법의 검증을 수행하였다

3.1.1 실험장치 및 실험과정

초음속 풍동의 광학창과 크기가 같은 알루미늄 재질의 평판에 PSP를 도포하고 실험을 실시하였다. PSP는 노즐 목에서부터 30mm × 120mm의 면적으로 도포하였다.

기준점(Maker)은 총 19개로 이중 압력을 측정할 부분은 13개이다. Fig. 9는 실험모델과 실험장면을 보여주고 있다.

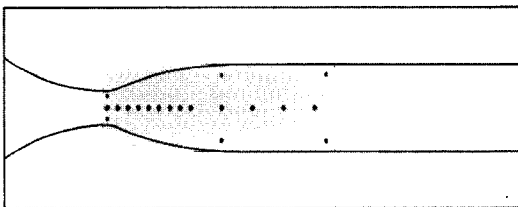


Fig. 9 Wind Tunnel Model(Upper) and Wind Tunnel Experiment(Bottom)

건국대학교 교육용 초음속 풍동은 Blowdown 형태로 건국대학교에서 설계하여 2003년 설치된 후 2005년 블록 설치가 용이하게 개량한 모델이다. 초음속 풍동의 노즐은 교체 가능한 형태이며, 현재 보유하고 있는 노즐은 M 2.5 이다. 두 개의 40 l 탱크에 압축공기

를 저장하여 볼밸브로 된 메인밸브를 열면 레귤레이터를 통해 고압의 공기가 정체실로 전달된다. 정체실의 고압은 노즐을 통해 M=2.5의 유동장을 만들어낸다. 초음속 풍동의 Test Time는 약 24 s 이고 Test Section은 30(W)×35.6(H)mm이다. 풍동 정체실의 압력과 온도는 각각 4.0MPa, 290K이며 유동장의 압력과 온도는 약 P=0.2MPa, T=129K이다.

실험은 Fig. 9과 같이 LED 램프 2개와 CCD 카메라를 같은 방향에 두고 실시하였으며, Calibration 방법으로는 Hybrid 방법을 사용하여 실험 전 External Calibration을 실시하고 실험 중 측정된 압력데이터를 이용해 다시 보정을 하였다. Fig. 10은 Calibration 이미지와 그 결과를 보여주고 있다.

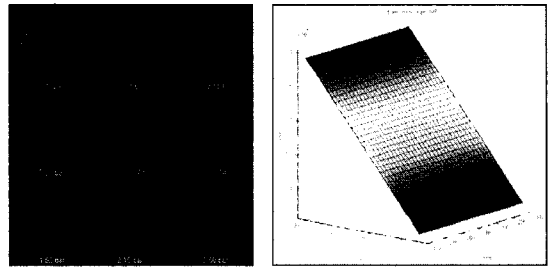


Fig. 10 Calibration Images(Left) and Result(Right)

3.1.2 실험결과

Fig. 11과 12에서 PSP를 이용한 압력측정 결과, CFD를 이용한 해석 결과[11], 압력공을 사용한 압력측정 결과를 비교해 보았다. X, Y 축에 표기된 값은 무차원화 된 값으로 각각은 압력측정 위치와 실험면 길이의 비, 정압(Static Pressure)과 전압(Total Pressure, 대기압사용)의 비를 나타낸다. 압력은 노즐 목에서 높은 값을 가지며, 노즐이 팽창되면서 급격히 감소하게 된다. 압력장의 비교는 거의 유사한 면을 보이지만 압력비의 비교에서는 X/L이 0.6부근부터는 노즐의 뒤쪽으로 갈수록 PSP에서 측정된 압력이 다른 압력값 보다 다소 높게 나온다. 이것은 노즐팽창에 의한 온도 차이로 판단한다. 따라서 노즐과 같이 온도 변화가 급격한 유동조건에서는 TSP 등의 방법으로 온

도장에 대한 정보를 입력 하거나, 실험에 관심이 있는 부분의 온도를 대표온도로 하는 것이 오차를 줄이는 방법이 될 수 있다.

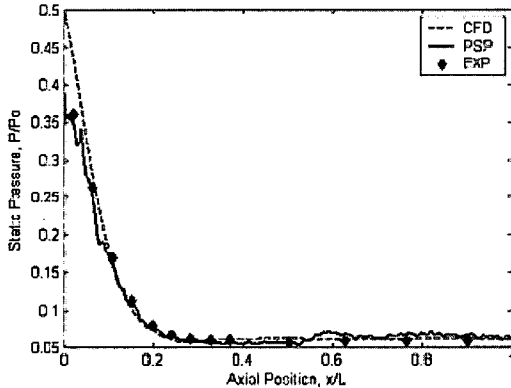


Fig. 11 Pressure Ratio Curve at Nozzle Center Line

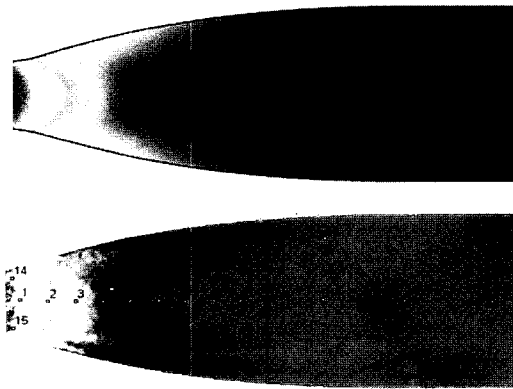


Fig. 12 Compare CFD(Upper) with Experiment (Bottom) Pressure Field

한 가지 더 문제가 되는 점은 풍동내부의 반사이다. 풍동 노즐의 면은 연마도가 높아서 반사율이 좋다. 따라서 PSP에서 방출되는 빛이 풍동노즐에 반사되어서 CCD 카메라로 들어와서 풍동 노즐의 모양 자체가 변한 듯한 이미지를 얻게 되었다. 이것은 풍동노즐을 어두운 색깔로 도금을 한 후에 해결되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 PSP 압력측정 시스템 구축에 필요한 지식을 습득하고, PSP를 이용한 압력측정 시스템을 구축하였다. 또한 PSP를 이용한 압력측정 실험을 통하여 PSP 압력 측정 시스템이 기존의 압력측정 실험을 대체할 수 있는가에 대하여 알아보았다.

Calibration 장치를 개발하여 Paint Calibration을 실시하였다. 그 결과 Paint의 특성을 나타내는 보정상수(Calibration Coefficient)를 도출할 수 있었고 이를 PSP의 발광이미지에 대입하여 압력정보를 얻을 수 있었다.

PSP 실험에 필요한 모델의 준비부터 이미지의 후처리 과정까지 일련의 과정을 정립하여 PSP를 이용한 압력측정을 위한 가이드를 마련하였다. 또한 이것을 이용한 노즐 주변 압력분포 측정 실험을 통하여 PSP 실험을 통한 압력값, 압력공을 이용한 압력값, 전산해석의 압력값을 비교하여 정확성을 비교하였다.

본 연구에서 사용한 광원은 LED램프 2개로써 넓은 면적에 사용하는데 한계가 있다. 따라서 광원의 개조 혹은 더 많은 수량의 광원을 이용하여 모델 전역에 일정한 양으로 고르게 조사해야 한다. 또한 본 연구에서는 광학기기들을 일일이 삼각대에 고정을 시키고 실험을 하였다. 이로 인하여 삼각대 사이의 간섭이 있어서 서로의 위치를 고정시키는데 많은 어려움이 있었다. PSP 실험을 위한 받침대를 제작하여 사용하는 것이 실험의 편의를 위해 좋다.

PSP를 이용한 압력측정법은 압력공과 압력센서를 이용한 압력값을 대신하여 전역적인 압력분포를 측정할 수 있는 유용한 측정법이다. 그러나 유동의 성질(온도, 압력)과 PSP의 특성을 파악하지 못한 채 실시하는 실험은 오히려 압력측정 과정에 있어서 오차와 노이즈를 동반하게 된다. 따라서 광학적인 이미지를 이용한 실험은 더욱 실험에 앞서 철저한 실험계획과 실험과정의 통제를 통하여 오차와 노이즈를 줄이는 노력이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초 연구지원 (과제번호 R01-2006-000-10034-0) 및 방위사업청 과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD0700 41AD)으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Liu, T. and Sullivan, J. P., Pressure and Temperature Sensitive Paint, Springer ISBN 3-540-22241-3, 2005
2. Ksutdky, J. and Hitsch, H., Detection of Minutest Amounts of Oxygen by Extinction of Phosphorescence (in German), Z. Anorg. Allg. Chem., 1935, pp.222-216
3. Fonov, V. S., Development and Analysis of Data Processing Methods Applied to Luminescent Coating Systems in Aerodynamics, ISSI PSP References, 2003
4. Gouterman M., Oxygen quenching of Luminescence of Pressure Sensitive Paint for Wind Tunnel Research, Journal of Chemical Education, Vol. 73, No. 6, 1997
5. ISSI ProImage Version 3.0 User's GUIDE
6. Crites, R. C., Measurement Techniques-Pressure Sensitive Paint Technique, von Karman Institute for Fluid Dynamics Lecture Series 1993-05
7. Chapra, S. G. and Canale, R. P., Numerical Methods for Engineers - Third Edition, McGRAW-Hill
8. Brown, L. G., A Survey of Image Registration Techniques, ACM Computing Surveys, 24(4), 1992, pp.325-376
9. Lepicovsky, J., Bencic, T. J., and Bruckneral, R. J., Application of Pressure Sensitive Paint to Confined Flow at Mach Number 2.5, AIAA-93-3214
10. 이준희, 최보규, 김희동, 박종호, 음속/초음속 이젝터 시스템의 2차정체실 압력특성, 한국 추진공학회지, 제5권, 제4호, 2001, pp.50-56
11. 이진호, 교육용 초음속 풍동 개발 및 성능검 증에 관한 연구, 건국대학교 대학원 석사학 위 논문, 2004