

## 코 내부 유동의 PIV 해석

김 성균\* · 손영락\*\*

## Particle Image Velocimetry Measurements in Nasal Airflow

Sung Kyun Kim, Young Rak Son

**Key Words :** 코내부유동(Nasal Airflow), CBC PIV, 영상코드화(Image Coding), 급속모델 제작법(Rapid Prototyping)

## Abstract

Researchers have investigated nasal flow both numerically and experimentally for centuries. Experimental studies most have suffered from various limitations necessary to allow the measurements to be obtained with available equipment. Nasal airflow can be subdivided into two interrelated categories ; nasal airflow resistance and heat and mass transfer between the air stream and the walls of the nasal cavity. In this study, thanks to a new method for model casting by a combination of Rapid prototyping and Solidification of clear silicone, a transparent rectangular box containing the complex nasal cavity is made for PIV experiments. The CBC PIV algorithm is used for analysis.

## 1. 서 론

코 내부의 공기 유동을 이해하는 것은 코의 호흡에서의 생리학적이고 병리학적인 면들을 설명하는데 있어 기초가 된다. 그러므로, 많은 생체공학 및 의공학 분야의 연구자들에 의해 연구되어져 왔다. 공기역학적인 실질적 연구는 20 세기 초에 시작되었으며, 최근에 몇몇 연구자들은 코 내부 공동을 모델화하여 정성적 가시화 실험을 수행하거나 열선유속계등으로 직접 속도를 측정하여 유용한 결과들을 얻었으나, 복잡한 기하학적 형상과 적절할 실험장치구성에 어려움을 겪어왔다.<sup>(1),(2)</sup> 이러한 연구들은 대부분 단순화시킨 반쪽의 코모델을 통해 이루어져 왔으며, 단순화 정도와 측정 방법에 따라 평균유동장의 결과들은 차이를 나타내며, 난류 혹은 비정상 와동 등 열전달 및 물질 전달을 활성화 시킬 수 있는 유동의 증거들을 보여 주지 못하고 있다.

최근의 Hopkins 등<sup>(3)</sup>에 의해 개발된 CT 촬영 결과를 이용한 모델형성(Rapid Prototyping)과 액체 투명 실리콘의 응고에 대한 모델 캐스팅 방법에 의해 복잡한 해부학적 코 내부 공동현상을 내포한 투명한 직육면체 유로를 만들 수 있게 됨으로써, PIV에 의한 유동해석이 가능하게 되었다.

본 연구에서는 이 방법에 의해 한국인의 코의

반쪽에 대한 모델을 형성하여, 들숨 및 날숨때의 순간, 평균, 그리고 RMS 유속을 측정하여 이전의 결과들과 비교하였다. 또한, 비후성 비염등 질병으로 인한 유로의 일부 차폐시 유동의 변화를 연구하였다. PIV 해석 알고리즘으로는 전처리과정(Hom-ologization) 과정을 거친 영상데이터에 대해 Hart<sup>(4)</sup>의 CBC 알고리즘을 적용하였고, 윈도우오프셋(Window Offset)을 수행하였다. 결과 벡터들은 이전의 결과들에 비해 신뢰 할 수 있었고, 향후 비후성 비염 등 질환에 의해 유로가 손상 혹은 변형되었을 경우에도 이 방법이 적용이 가능함을 보여준다. 주어진 레이놀즈수에 비해 큰 RMS 값을 갖음으로써, 인체의 코의 유로형상이 열 및 습도전달에 있어서 뛰어난 영향을 말해주고 효율적인 열교환기 디자인에 응용될 수 있다고 보여진다.

## 2. PIV 해석 알고리즘

PIV 해석 알고리즘에서 아픽셀정확도를 위협하는 주된 요인중 하나는 오류벡터의 제거와 보간에 의한 복원이다. 현재 주로 사용되는 방법들은 국소중간치필터등 후처리 과정에서의 제거와 복원이 이루어 지고 있으며 벡터장이 조밀하더라도 정확도의 손상은 피할 수 없다. 상호간섭계산단계에서 이루어 지는 제일 큰 피크와 2 번째 피크의 비율로서 오류벡터를 판정하는 방법은[5] 후처리 과정

\* 정회원, 건국대학교 기계공학과

\*\* 학생회원, 건국대학교 기계공학과

의 경우보다 나은 것이지만, 올바른 벡터 또한 일정량 제거하게 되며 이는 후처리 과정에서의 복원시 정확도의 손실을 초래한다. Hart[4]의 CBC 알고리즘은 처리시간의 큰 증가 없이 신호-잡음을 증가시키는 이상적인 방법으로 보여진다. 이는 상호간섭 계산시 2 번째 영상데이터의 검색영역을 50% 겹치는 2 개의 영역에 대한 상호간섭계수 테이블을 각각 구해서 화소 대 화소의 곱을 계산한 새로운 표를 만들어 여기서 최대치를 갖는 변위를 구하는 방법이다. 50%겹침으로 인해 연산 횟수의 증가는 크지 않으나 오류벡터의 수가 크게 감소되어 정확도가 증가된다. 이의 확인을 위해, 먼저, Re 수 1000의 사각공동유동(Lid Driven Cavity Flow)의 수치해석해를 이용하여 Fig.1 과 같이 가상영상(Synthetic Image)을 생성하였다.<sup>(5)</sup> 상판영역이동(Window Shift)없는 단순한 PIV 코드에서 벡터추적 알고리즘부분만, 직접계산 전영역추적법(Full), FFT 이용 전영역추적법(HYB), 그리고, 영상압축 및 코드화분야에서 도입된 새삼단계추적법(NTSS), 프로젝션 이미지법(HPM)과 CBC 알고리즘을 부착하여 가상 영상이미지에 적용한 결과를 Tab.1 에 요약하

였다.<sup>(6)</sup> SNR의 증가로 인하여 오류벡터가 감소되어, 후처리 필터가 생략될 수 있었으며, 통신 및 영상압축분야의 전제조건인 최대이동거리 7 픽셀에서는 NTSS, HPM 등에 비해 계산시간은 좀 많으나 정확도는 크게 향상되었으며, 그 이외의 큰 이동거리에서는 CPU와 오차 모두에서 우월함을 볼 수 있다.

Tab. 1 CPU(sec.) and Mean Error(pixel)

	7 pixel		15 pixel	
	CPU	Error	CPU	Error
FULL	119.8	0.18115	965.6	0.28608
HYB	5.11	0.17942	20.10	0.3277
HPM	1.78	0.21699	3.02	0.5819
NTSS	3.63	0.20765	9.12	0.5263
CBC	4.56	0.12024	4.61	0.23169

### 3. 코 내부 유로 제작 및 작동 유체

코 내부 공동내의 유동해석에 있어 주된 요소는 정확한 유로의 모델을 형성하는데 있다. 이를 위해 먼저 정상인의 코에 대한 좁은 간격의 C.T(Computed Tomography)촬영 데이터(Fig.2 참조)를 입력으로 하여 급속 프로토타이핑(rapid prototyping) 기계를 이용하여 유로내부 유로의 고형모델을 만들었다. (cyber med 사) 2 개의 코내부 통로는 목부근에서 연결되며, 일반적으로 8 시간 간격으로 번갈아 한쪽 통로가 호흡에 주로 사용되므로, 코 한쪽의 2 배 모델을 제작하여 유동해석 하였다. 재료는 물에 쉽게 녹을 수 있는 옥수수 녹말(corn starch)을 사용하였다. 아크릴 상자에 이 모델을 넣고 투명한 액체실리콘(clear silicone)을 경화제와 섞어서 거품이 일지 않도록 조심해서 부어넣어 굳힌다. 이때, 녹말모델 표면에 물에 녹는 풀을 고르게 여러 차례 발라 실리콘이 스며들지 않도록 해야하며, 실리콘과 경화제는 제품에 따라 적절한 열을 가하여 경화시킨다. 실리콘이 완전히 굳은 후 찬물을 이용하여 (실리콘에 따라 온수를 사용하면 안개처럼 뿌려지게 됨) 녹말 모델을 녹여내면 유로가 완성된다. 이렇게 완성된 유로의 굴절율등 광학적 성질은 물,공기와 다르기 때문에, Fig 3와 같이 물과 글리세린을 적당히 섞어 동일한 굴절율을 갖는 비울(6:4 정도 점도  $6.55 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$ , 비중은 약 1.2)을 찾아내어 이를 작동유체로 하여 실험을 수행하였다.

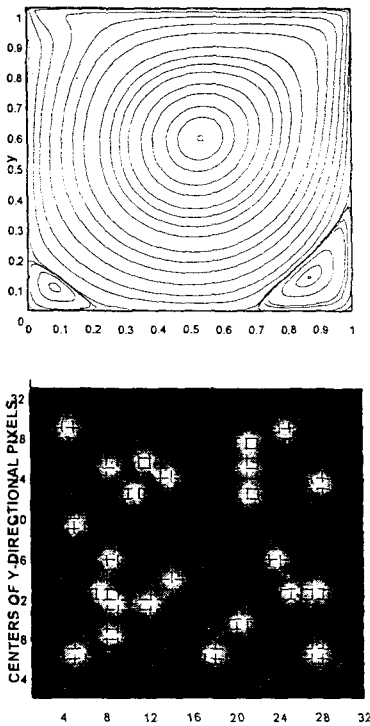


Fig. 1 Numerical Solution and Synthetic Image



Fig.2 Coronal CT Scan of a male nasal passage

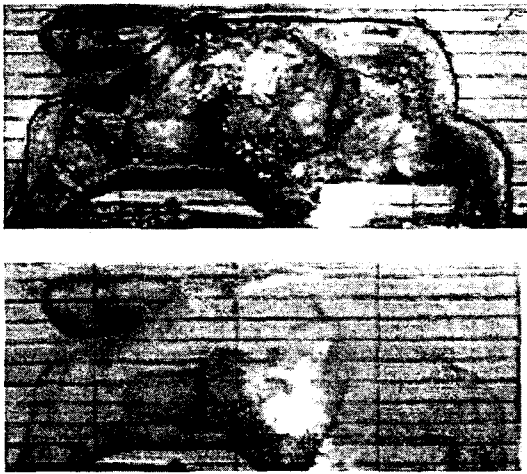


Fig.3 Photo of Model filled with water(Upper) and with Water-Glycerol Mixture(Lower)

#### 4. PIV 실험

PIV 해석을 위한 유동가시화 실험 장치의 개략도는 Fig.4 와 같다. 제원으로는 150mJ/pulse 의 2 광원 Nd:Yag 레이저(SPECTRON), 최대해상도 1208\*1024 pixels 1 microsec 이상의 시간 간격의 2 쌍의 영상들을 초당 4 쌍까지 처리가능한 CCD 카메라(LaVision Co.), CCD 카메라와 레이저를 동조시키기 위한 트리거 콘트롤러, 그리고 프레임grabber를 내장한 더블 CPU PC로 이루어져 있다.

코 내부 유로 모델은 5 개의 유량계로 이루어진 유량 조절 벤치를 거쳐 탱크로 연결된 폐회로를 이루고 있다. 직경 80 microm 정도의 폴리비닐 구형 입자(밀도 1.02)를 추적입자로 사용하였으며, 20cm\*20cm 의 모델을 택하여 약 0.15mm/pixel 의 공간 해상도를 갖게 하였다.

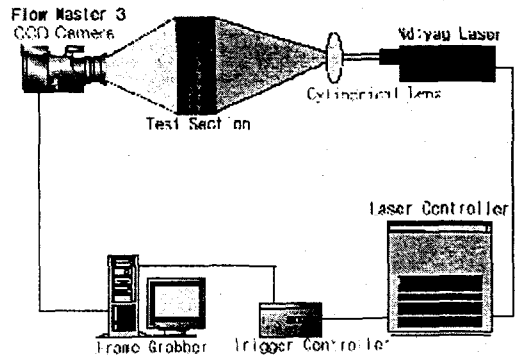


Fig.4 Experimental Set-up

#### 5. 결과 및 토론

먼저, 휴지상태의 흡기상태의 유동에 대하여 해석하였다. 정상인의 휴지시 흡입유량은 125ml/sec 이고, 이 경우 Re 수(코터멍의 수력직경을 길이, 여기서의 평균유속을 속도로 계산할 때)는 약 200 이다. Fig.5 는 영상 이미지, 순간 속도장, 그리고, 100 개 속도장의 평균 속도장과 RMS(Xrms, Yrms)를 화살표로 나타냄) 분포를 나타낸다.

저 Re 수임에도 RMS 값은 20%정도를 나타내는데, 이는 코내부 유로의 형상에 기인하며 열전달과 물질전달(습도)을 효과적으로 증가시키는 역할을 한다. 실제로 코입구로부터 3-4cm 정도의 유로를 지나며 공기는 섭씨 30 도이상 습도 95%이상인 된다. Fig.6 은 유량 1000 ml/sec. 에 대한 결과로서, 위쪽의 와동이 발달하고, 유속과 RMS 값이 크게 증가함을 볼 수 있다. 후각세포는 주로 위쪽에 분포하여, 이 경우 냄새를 보다 잘 맡을 수 있으며, 이 경우 인간은 무의식적으로 유속을 증가시킨다. 속도분포는 이전의 결과[1][2][3]들에 비해 신뢰도와 밀집도에 있어 개선되었다.

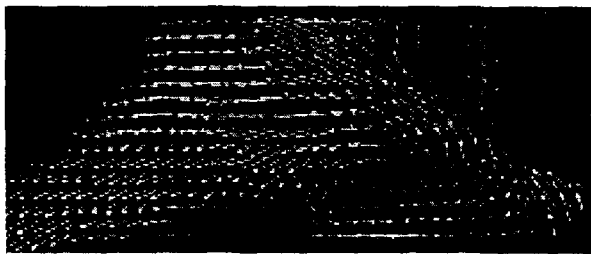
#### 후 기

이 연구는 한국과학재단 목적기초연구(2000-1-30400-002-3) 지원으로 수행되었음

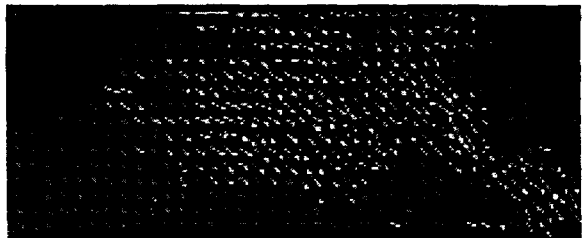
#### 참고문헌

- (1) Scherer, P.W., Hahn, I.I., Mozell, M.M., 1989, "The Biophysics of Nasal Airflow", Otol. Clinics N. Ame. Vol. 22, No. 2, April, 265-278

- (2) Hess, M.M., Lampercht, J., Horlitz, S., 1992, "Experimentelle Untersuchung der Strombahnen in der Nasenhauptohle des Menschen am Nasen-Modell", *Laryngo-Rhino-Otol.* Vol. 71, 468-471
- (3) Hopkins, L.M., Kelly, J.T., Wexler, A.S., Prasad, A. K., 2000, "Particle image velocimetry measurements in complex geometries". *Exp. Fluids* 29, 91-95
- (4) Hart, D.P., 2000, "PIV error correction", *Exp. Fluids* Vol. 29, 13-22
- (5) Kim, S.K., 1996, "Secondary Steady Flows due to the Small-Amplitude In-phase Oscillation of Multi-Cylinders". *Trans. Korean Society of Mech. Eng.* Vol. 20, No. 2, pp. 649-658
- (6) Kim, S.K., 1999, "The fast vector search algorithms in PIV Analysis By introducing the image coding techniques", *Proc. PSFVIP-2* May, in Hawaii



(a) Mean Velocity field

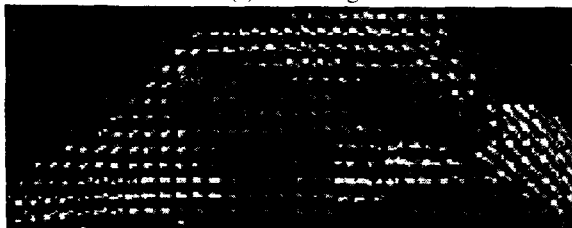


(d) RMS distribution

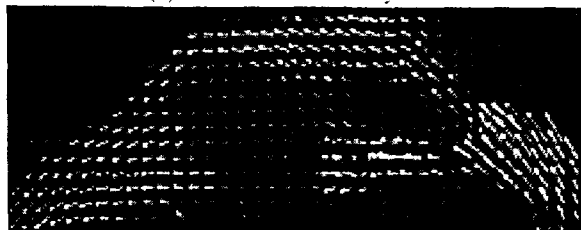
Fig.6 PIV Results for Airflow of a resting respiratory Flow rate in the real nose of 1000 ml/sec.



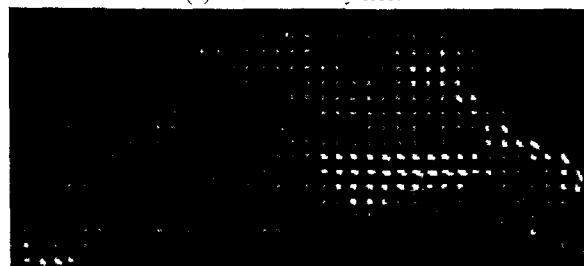
(a) Raw Image



(b) Instantaneous Velocity field



(c) Mean Velocity field



(d) RMS distribution

Fig.5 PIV Results for Airflow of a resting respiratory Flow rate in the real nose of 125 ml/sec.