

## 코 내부 유로(비강) 내부 유동의 PIV 해석

김 성 균\*

(2001년 9월 14일 접수, 2002년 3월 20일 심사완료)

### Particle Image Velocimetry Measurements in Nasal Airflow

Sung Kyun Kim

**Key Words :** Bio-Fluid Mechanics(생체 유체 역학), Nasal Airflow(비강내부 유동), CBC PIV, Image Coding(영상 코드화), Rapid Prototyping(급속모델 제작법), CT(Computed Tomogram)

#### Abstract

For the first time, airflow in the nasal cavity of a normal Korean adult is investigated experimentally by PIV measurement. 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 the model casting by a combination of the rapid prototyping and curing of clear silicone, a transparent rectangular box containing the complex nasal cavity can be made for PIV experiments. The CBC PIV algorithm is used for analysis. Average and RMS distributions are obtained for inspirational and expiration nasal airflows. Data for the airflow at the end of meatuses are obtained for the first time. Comparisons between western and Korean nasal airflows are appreciated. Due to the difference in geometry of the frontal part of nasal cavity, the flow near nares shows the difference.

#### 1. 서론

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. 공기 역학적인 실질적 연구는 20세기 초에 시작되었으며, 최근에 몇몇 연구자들은 코 내부 공동(비강)을 모델화하여 정성적 가시화 실험을 수행하거나 열선 유속계 등으로 직접 속도를 측정하여 유용한 결과들을 얻었으나, 복잡한 기하학적 형상과 적절한 실험장치구성에 어려움을 겪어왔다.<sup>(1,2)</sup> 이러한 연구들은 대부분 단순화시킨 반쪽의 코 모델을 통해 이루어져 왔으며, 단순화 정도와 측정 방법에 따라 평균유동장의 결과들은 차이를 나타내며, 난류 혹은 비정상 와동 등 열 전달 및 물질 전달을 활성화시킬 수 있는 유동의 증거들을 보여주지 못하고 있다.

최근의 Hopkins 등<sup>(3)</sup>에 의해 개발된 CT 촬영 결과를 이용한 모델형성(Rapid Prototyping)과 액체

투명 실리콘의 응고에 의한 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 날숨 때의 비중격 부근 단면의 순간, 평균, 그리고 RMS 유속을 측정하여 이전의 결과들과 비교하였다. 또한, 기존의 결과들이 비중격 주위의 유동에만 국한되었으므로, 상하 비갑개 부근 단면들에서의 속도장들을 구하였다.

PIV 해석 알고리즘으로는 전처리과정을 거친 영상데이터에 대해 Hart<sup>(4)</sup>의 CBC 알고리즘을 적용하였고, 윈도우오프셋(Window Offset)을 수행하였다. 결과 벡터들은 이전의 결과들에 비해 신뢰할 수 있었고, 이로부터 비후성 비염, 아데노이드 흡착증 등 질환에 의해 유로가 손상 혹은 변형되었을 경우에도 이 방법을 하는데 확신을 갖게 되었다.

CT 사진들과 이를 이용한 비강 형상은 서양인의 그것과 차이를 나타내었고, 그 결과 유동과 유량 분포에서도 차이를 보였다. 주어진 레이놀즈수에 비해 큰 RMS 값을 가짐으로써, 인체의 코의 유로 형상이 열 및 습도전달에 있어서 뛰어난말해주고 효율적인 열 교환기 디자인에 응용될 수 있다고 보여진다. 한국인의 비강내의 유동에 대한 이

\* 회원, 건국대학교 기계공학과  
E-mail : skkim@kkucc.konkuk.ac.kr  
TEL : (02)450-3472 FAX : (02)3436-0540

Table 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

논문의 결과들은 향후 이비인후과 진료와 수술 등에 기본자료 및 임상 데이터로 활용될 것이며, 현재 이 분야 전문의와 공동으로 유아 아데노이드 비대증 환자의 비강 내의 공기 흐름과 압력강화에 대한 연구가 진행중이다.

## 2. PIV 해석 알고리즘

PIV 해석 알고리즘에서 아픽셀 정확도를 위협하는 주된 요인 중 하나는 오류벡터의 제거와 보간에 의한 복원이다. 현재 주로 사용되는 방법들은 국소중간치필터등 후처리 과정에서의 제거와 복원이 이루어지고 있으며, 벡터장이 조밀하더라도 정확도의 손상은 피할 수 없다. 상호간섭 계산 단계에서 이루어지는 제일 큰 피크와 두 번째 피크의 비율로서 오류벡터를 판정하는 방법<sup>(5)</sup> 후처리 과정의 경우보다 나은 것이지만, 올바른 벡터 또한 일정량 제거하게 되며 이는 후처리 과정에서의 복원 시 정확도의 손실을 초래한다. Hart<sup>(4)</sup>의 CBC 알고리즘은 처리 시간의 큰 증가 없이 신호-잡음 비(SNR)를 증가시키는 이상적인 방법으로 보여진다. 이는 상호간섭 계산 시 두 번째 영상데이터의 검색영역을 50% 겹치는 두개의 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 수치해석 해를 이용하여 Fig. 1과 같이 가상영상(Synthetic Image)을 생성하였다.<sup>(5)</sup> 상관영역 이동(Window Shift) 없는 단순한 PIV 코드에서 벡터추적 알고리즘 부분만, 직접 계산 전영역 추적법(Full), FFT 이용 전영역 추적법(HYB), 그리고, 영상압축 및 코드화 분야에서 도입된 새삼단계 추적법(NTSS), 프로젝션 이미징법(HPM)과 CBC 알고리즘을 부착하여 가상 영상이미지에 적용한 결과를 Table 1에 요약하였다.<sup>(6)</sup>

CBC를 적용한 경우, SNR의 증가로 인하여

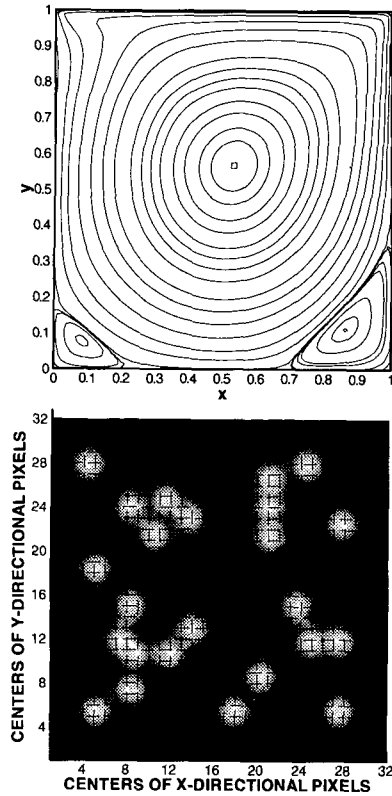


Fig. 1 Numerical solution and synthetic image

오류벡터가 감소되어, 후처리 필터가 생략될 수 있었으며, 통신 및 영상압축분야의 전체 조건인 최대이동거리 7픽셀에서는 NTSS, HPM 등에 비해 계산시간은 좀 많으나 정확도는 크게 향상되었으며, 그 이외의 큰 이동 거리에서는 계산처리시간과 오차 모두에서 우월함을 볼 수 있다.<sup>(7)</sup> 따라서, 본 논문의 실험 영상에 대한 PIV 해석은 CBC 알고리즘을 적용하였다.

## 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 간격(0.6mm)의 CT(Computed Tomogram, Somatom plus 4, Siemens Co.)촬영 데이터를(Fig. 2 참조)를 입력으로 하여 신속 성형기법(rapid prototyping) 기계(Z Co. MA. USA)를 이용하여 유로 내부 유로의 고품모델을 만들었다. (Cyber med Co.) 2개의 코 내부 통로는 목 부근에

서 연결되며, 일반적으로 8 시간 간격으로 번갈아 한쪽 통로가 호흡에 주로 사용되므로, 코 한쪽의 2 배 모델을 제작하여 유동해석 하였다. 재료는 물에 녹을 수 있는 옥수수 녹말(corn starch)을 사용하였다. 직사각형 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 해야 하며, 실리콘과 경화제는 제품에 따라 적절한 열을 가하여 경화 시킨다. 실리콘이 완전히 굳은 후 찬물을 이용하여 (실리콘에 따라 온수를 사용하면 안개처럼 뿌영게 됨) 녹말 모형을 녹여내면 유로가 완성된다. 이렇게 완성된 유로의 굴절률 등 광학적 성질은 물,공기와 다르기 때문에, Fig. 3 과 같이 물과 글리세린을 섞어 동일한 굴절률을 갖는 비율(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.

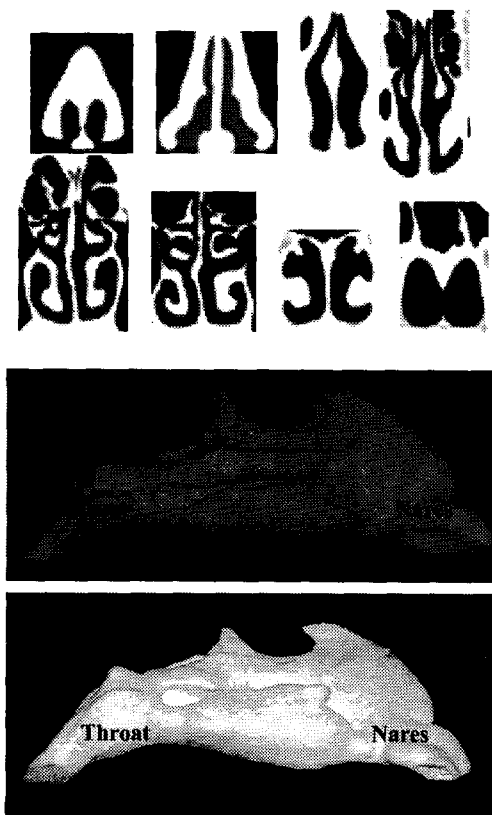


Fig. 2 Coronal CT scan of a male nasal passage (up), 3 dim. Reconstruction image (middle) and Negative model by RP machine (down)

#### 4. PIV 실험

PIV 해석을 위한 유동가시화 실험 장치의 개략도는 Fig. 4 와 같다. 재원으로는 150mJ/pulse 의 2 광원 Nd:Yag 레이저(SPECTRON Co.), 최대해상도 1208\*1024 pixels 1  $\mu\text{sec}$ . 이상의 시간 간격의 2 쌍의 영상들을 초당 8 쌍 까지 처리 가능한 CCD 카메라(LaVision Co.), CCD 카메라와 레이저를 동조시키기 위한 트리거 컨트롤러, 그리고 프레임그래버를 내장한 더블 CPU PC로 이루어져 있다.

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

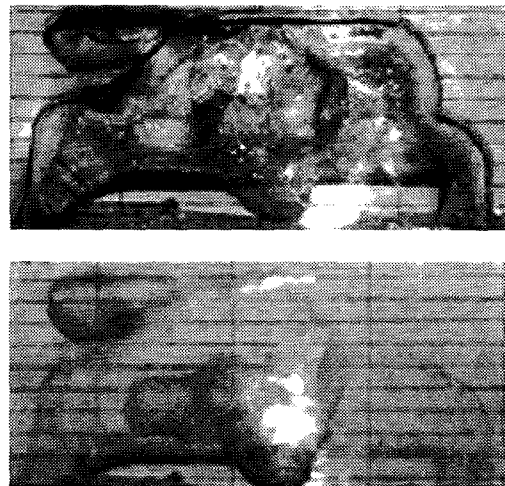


Fig. 3 Photo of model filled with water(Upper) and with Water-Glycerol mixture(Lower)

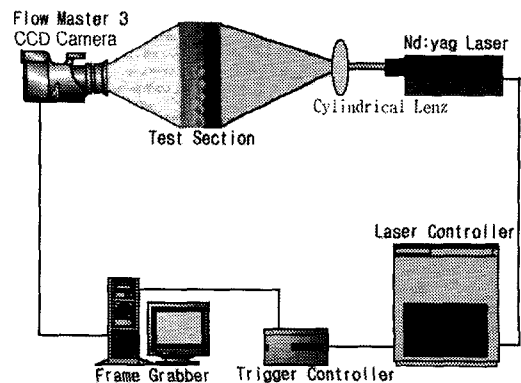
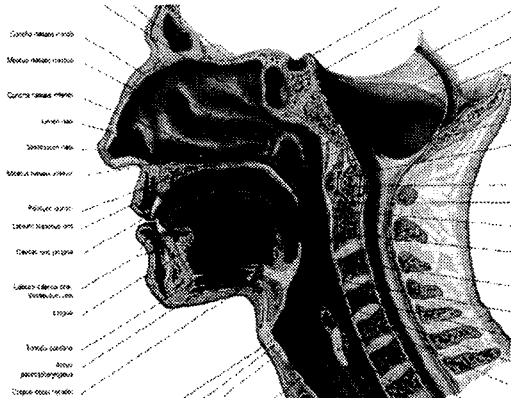


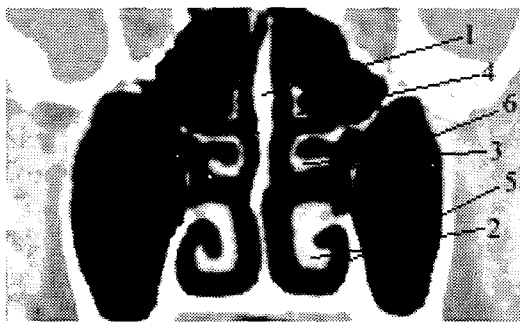
Fig. 4 Experimental set-up



(a) Side view of nasal anatomy



(b) Side view of nasal anatomy (Death body)



(c) Cross sectional view (CT)

Fig. 5 Nasal Anatomy:

1. 비중격 (Nasal septum)
2. 하비갑개 (Inferior concha),
3. 중비갑개 (Middle concha),
4. 상비갑개 (Superior concha)
5. 하비도 (Inferior miatus)
6. 중비도 (Middle miatus)

### 5. 코의 구조 및 해부학

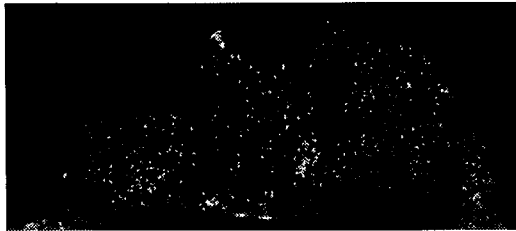
비강의 유동해석과 연관된 코의 해부학적 구조는 Fig. 5 와 같다. 유로와 유로를 둘러싼 피부조직을 간략히 설명하면, 두 비강의 세로 격막에 해당되는 비중격(Nasal Septum)과 상,중,하 비갑개 등 피부조직으로 둘러 쌓인 3 개의 고리모양의 유로(상,중,하 비도)로 이루어 진다. 코의 좌우 2 개의 유로는 휴지 시 번갈아 가며 사용되며(8 시간 가량), 중,하 비도로 유량의 대부분이 지나게 된다.<sup>(2,3)</sup> 후각세포는 상비도 위쪽에 주로 밀집되어 있고 이 부분의 유량은 아주 약하므로, 휴지시 강한 냄새가 아니면 후각세포를 잘 자극하지 못한다. 특별히 냄새를 맡기 위해서는 코 구멍 부위(Nasal Valve)를 좁히고 속도를 크게 하면, Fig. 8 에서 보듯이 상부에 큰 와류가 생기고 유속이 빨라져 후각 세포를 자극하게 된다.

일반인의 경우, 내,외상에 의해 유로의 일부가 폐쇄되거나, 휘는 경우가 많아 정상인의 코 모델을 얻기가 매우 힘들다. 예를 들어, 비후성 비염의 결과로 하 비도가 폐쇄 된 경우나 외상에 의해 비중격이 휘는 경우는 아주 흔한 경우이다. 따라서, 전문의의 자문을 받아, 정상에 가까운 한국 성인의 코 CT 스캔 데이터를 골라 컴퓨터 그래픽 수정을 가하여 정상 한국인의 코 모델로 선정하였다.

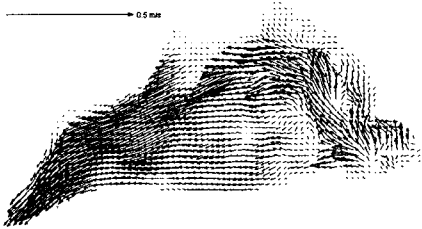
### 6. 결과 및 토론

먼저, 휴지 시의 흡기 상태(반쪽 유로로 수시간씩 번갈아 호흡)의 유동에 대하여 해석하였다. 정상인의 휴지 시 흡입유량은 125ml/sec 이고, 이 경우 Re 수(콧구멍의 수력직경을 길이, 여기서의 평균유속을 속도로 계산할 때)는 약 200 이다. Fig. 6 은 비중격 부근의 영상 이미지, 순간 속도장, 그리고, 1024 개 속도장의 평균 속도장과 RMS 분포, 유선을 나타낸다. 저 Re 수임에도 RMS 값은 코 입구 부근에서 20%에 이르고, 이는 코 내부 유로의 형상에 기인하며 열전달과 물질전달(습도)을 효과적으로 증가시키는 역할을 한다.<sup>(1)</sup> 실제로 코 입구로부터 3-4cm 정도의 유로를 지나며 공기는 섭씨 34-35 도, 습도 95% 이상이 된다. Fig. 6(d)의 좌측 상단의 그림은 CT상의 실험단면 위치를 나타내고, 있다. 호기 시 평균유속과 RMS 분포는 Fig. 7 에 나타내었으며, 목 부근의 RMS 이 크게 나타난다.

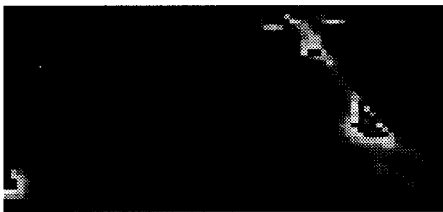
서양인의 경우와 가장 큰 차이는 Fig. 2 의 두 번째, 세 번째 그림에서 보듯이, 코의 입구 부분(우측)에서 유로 경계가 큰 굴곡을 갖는 기하학적 형상의 차이로 인해, 한국인의 경우 상반부 앞쪽에 느리지만 큰 와동을 형성하고 있는데 서양인의 경우 관측되지 않고 있다. 최근의 결과<sup>(3)</sup> 에서는



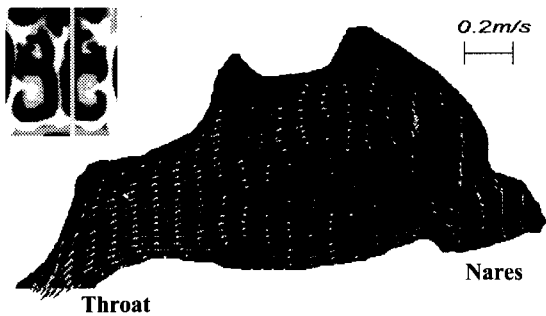
(a) Raw image



(b) Instantaneous velocity field



(c) RMS distribution (1024 images)



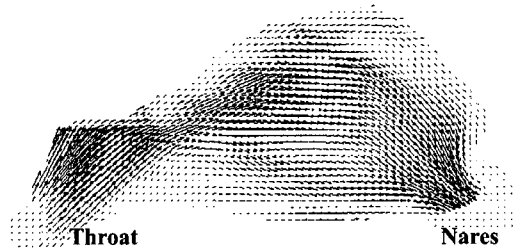
(d) Reduced mean velocity distribution (1024 images)



(e) Mean streamline (1024 images)

**Fig. 6** PIV Results for Airflow of resting inspiration at Nasal Septum : Flow rate of 125 ml/sec.

입구부위를 지나치게 단순화(얼굴 정면에서 유입)하였고, Hess 등<sup>(2)</sup>의 경우 시신을 이용하였기 때문에 이 부분이 분명치 않으며, Scherer 등<sup>(1)</sup>의 경우 20 배 모델에 대한 열선 유속계를 이용하여 측정하였으나, 와동은 보고되지 않고 있다. 앞에 든 이유들로 본 논문의 결과가 보다 신뢰할 수

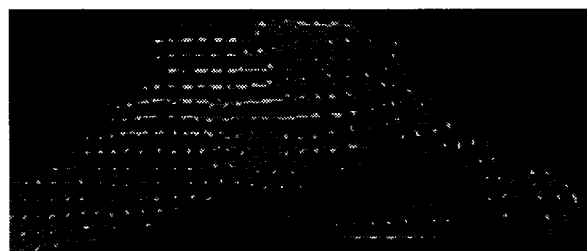


(a) Mean velocity distribution (1024 images)



(b) RMS distribution (1024 images)

**Fig. 7** PIV Results for Airflow of a resting respiration: Flow rate in the real nose of 125 ml/sec.

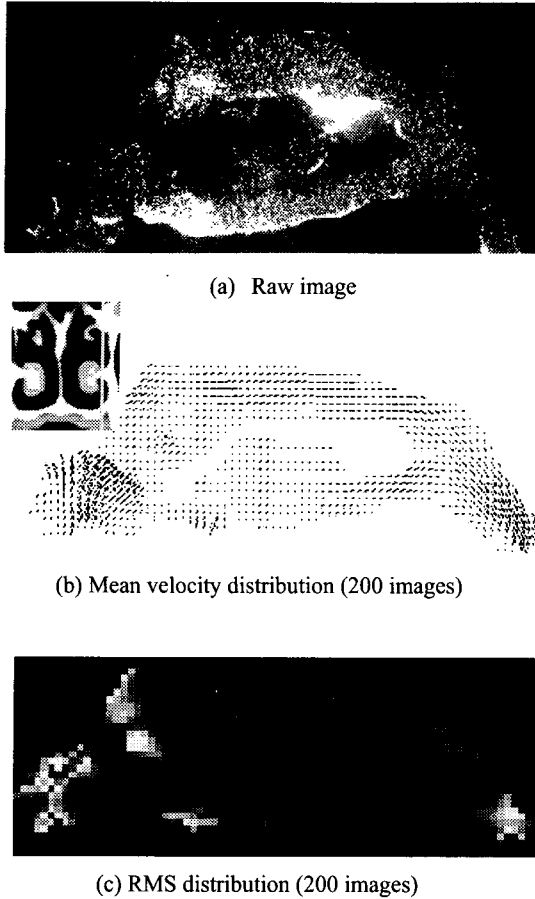


(a) Mean velocity field



(b) RMS distribution

**Fig. 8** PIV Results for airflow of inspiration: Flow rate in the real nose of 1000 ml/sec.



**Fig. 9** PIV Results for Airflow of a resting inspiration:  
Flow rate in the real nose of 125 ml/sec.

있다고 보여지며, 비강의 기하학적 형상의 차이가, 발생학적 이유는 알 수 없으나, 유동의 차이를 보이고 있으며, 이의 휴지시 호흡에서의 역할은 현재로서는 분명치 않다. Fig. 8 은 유량 1000 ml/sec. 에 대한 결과로서, 위쪽의 와동이 발달하고, 유속과 RMS 값( $U_{RMS}$  과  $V_{RMS}$  성분을 벡터모양으로 표시) 이 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 결과들(1-3)에 비해 신뢰도와 밀집도에 있어 개선되었다.

Fig. 9 는 비갑개 끝에서의 단면에 대한 PIV 결과로서, 유속이 상대적으로 적으며, 중간에 빈 부분은 코 내부의 피부 조직이다. 입,출구 부분을 제외하면 속도와 RMS 모두 비중격 주위에 비해 적은 편이다. 이 단면내의 속도 분포에 대한 데이터는 기존 결과에서는 보고된 적이 없는 것이다.

유동장에 대한 자세한 분석과 유동과 물질, 열 전달, 그리고, 후각과의 관계는 향후 보다 엄밀이 연구되어야 할 분야이다.

## 7. 요약

비강 내의 공기 유동을 PIV 를 이용하여 정량적으로 측정하는 방법론을 확보하고, 표준 한국인의 비강 모델을 형성하여, 비강 내의 공기 유동에 대한 첫 데이터를 제공하였다. 비강 형상의 차이로 인해, 서양인의 경우와 차이를 보이며, 이비인후과 수술 및 진단에 필요한 기초 임상자료를 확보할 수 있었다. 중,하 비갑개 하단부 등 보다 많은 단면의 데이터를 확보하여 유량 분포를 알아내고, 압력 강하를 측정하여 실질적 자료를 제공하려 한다. 또한, 확립된 방법론을 활용하여 비후성 비염, 아데노이드 흡착증 등 비정상 비강에 대한 실험을 수행하여 질병과 유동 현상의 관계를 규명하고 수술과 진단에 대한 생체 유체 역학적 가이드 라인을 제공하고자 한다.

## 후 기

본 논문은 건국대학교 2001 년 학술지원과제의 지원으로 수행하였음.

## 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, pp. 265~278.
- (2) Hess, M.M., Lampercht, J., Horlitz, S., 1992, "Experimentelle Untersuchung der Strombahnen in der Nasenhauptthoehle des Menschen am Nasen-Modell," *Laryngo-Rhino-Otol.* 71, pp. 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, pp. 91~95.
- (4) Hart, D.P., 2000, "PIV Error Correction," *Exp. Fluids* 29, pp. 13~22.
- (5) Kim, S.K., 1996, "Secondary Steady Flows due to the Small-Amplitude In-phase Oscillation of Multi-Cylinders," *Trans. KSME*, 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.
- (7) Kim, S.K., 2001, "An Experimental Study of Developing and fully developed Flows in a Wavy Channel by PIV," *KSME Int'l. Journal*, Vol.15, No.12.