

아데노이드 비대증에 의한 비정상 비강 내 유동의 PIV 해석

김성균[†] · 손영락^{*}

(2002년 11월 19일 접수, 2003년 1월 28일 심사완료)

PIV Measurement on Airflows in the Abnormal Nasal Cavity with the Adenoid Vegetation

Sung Kyun Kim and Young Rak Son

Key Words : Bio-Fluid Mechanics (생체 유체 역학), Nasal Airflow (비강내부 유동), CBC PIV (CBC 입자영상 유속계), Adenoid Vegetation (아데노이드 비대증), Rapid Prototyping (신속 성형 기법), CT, Computed Tomogram (전산 단층 촬영)

Abstract

Airflow in the nasal cavity of Korean adults is investigated experimentally by PIV measurement. Quantitative data for normal and abnormal nasal cavities with adenoid vegetation are obtained. The CBC PIV algorithm with window offset is used for PIV flow analysis. Average and RMS distributions are obtained for inspirational and expirational nasal airflows. 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. For the joint research on nasal diseases, PIV measurements of nasal airflow for nasal cavities with 50% and 70% adenoid vegetation are conducted for the first time. Comparisons in nasal airflows for both normal and abnormal cases are also appreciated.

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. 코 내부 유동 연구는 서로 연관된 2개의 범주로 나누어진다. 첫째는 비강내의 공기유동 저항을 다루는 문제이고, 둘째는 점막세포와 공기 유동간의 물질(수분) 및 열 전달의 문제이다.

공기 역학적인 실질적 연구는 20 세기 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.^(1,2) 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 활성화 시킬 수 있는 유동의 증거들을 보여주지 못하고 있다.

최근의 Hopkins 등⁽³⁾에 의해 개발된 CT 촬영결과를 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. 그러나, 그들의 모델은 지나치게 단순화되어 있고 서양인의 비강모델을 사용하였으므로, 저자는 이 방법에 의해 정상 한국인의 코의 반쪽에 대한 모델을 형성하여 (보통 휴지 시, 사람들은 한쪽 비강만을 수시간의 주기로 교대로 사용하므로) CBC PIV⁽⁴⁾에 의한 들숨 및 날숨 때의 공기유동 해석과 유동저항 측정 결과를 발표하였다.⁽⁵⁾

아데노이드 비대증은 어린이의 이비인후과 질환 중에 가장 빈번한 것으로 비강 발달의 인후부의 피하 림프조직의 증식에 의해 기도가 폐쇄되는 질환으로, 보통 3,4 세에 시작되어 14-15 세에 끝난다. 이 질환의 증세로는 입으로만 호흡함으로써 혈떡임, 언어장애 등이 있으며, 방학 중 많은 학생들이 이 질환으로 이비인후과를 찾는다. 기도 폐

[†] 책임저자, 회원, 건국대학교 기계공학과
E-mail : sungkim@konkuk.ac.kr
TEL : (02)450-3472 FAX : (02)3436-0540

^{*} 회원, 건국대학교 대학원 기계공학과

쇄율이 일정량 이상이면 (70%내외) 외과적 수술에 의해 제거되며, 수술 결정과 제거후의 휴유 증세 판단 및 재수술은 의사들의 경험에 의존한다.

본 논문에서는 아데노이드 비대증에 의해, 기도의 단면적이 50%, 70% 폐쇄된 2 가지 모델에 대한 유로를 제작하여, 가시화 실험을 수행하여 CBC PIV 를 이용하여 유동을 해석하였다.

확립된 복잡한 기하학적 형상의 유로를 만드는 과정에 따라, 정상인의 CT (computed Tomogram) 스캔 데이터로부터 3 차원 재형상화 한 후, 이비인후과 전문의의 조언⁶⁾을 받아 아데노이드 비대증에 의해 변형된 유로를 나타내도록 수정을 하여, 신속성형기(Rapid Prototyping Machine)로 고품모델을 제작한 후 액체 실리콘을 성형하여 투명한 유로를 완성하였다. 제작된 2 배 크기의 한쪽 비강 모델에 실리콘과 광학적 굴절률이 동일한 유체를 작동유체로 하고, 50 마이크로미터 직경의 주적입자를 첨가하여 가시화 실험을 수행하고 얻어진 영상데이터를 획득하였다.

이 데이터들을 CBC PIV 알고리즘을 이용하여 정량적 속도장 데이터를 얻을 수 있었다. 이 결과들을 정상 비강 결과와 비교하여, 병중에 따른 유동의 차이를 밝히고, 적정 수술시기 판단에 도움이 되는 추론을 내릴 수 있었다.

이 연구의 주된 목적은 비강내의 질환에 대한 진단, 치료, 수술 등의 결정에 있어서, 의사들의 경험에 의한 주관적 판단에만 의존할 것이 아니라, 유동해석 결과를 참조하여 보다 객관적인 판단을 할 수 있도록 도와 주는 데 있다. 따라서 이 논문에서 확립된 방법들은 다른 이비인후과 질환들에 대한 진단과 치료, 특히 비강내의 일부 부위를 절개 혹은 폐색시키는데 있어서 인체 시술 전에 결과를 예측하고자 할 때 도움이 될 것이다. 또한 이 방법론은 순환기나 이뇨기 등 인체내의 다른 유동시스템에도 적용이 가능할 것으로 보인다.

2. 코의 구조 및 해부학

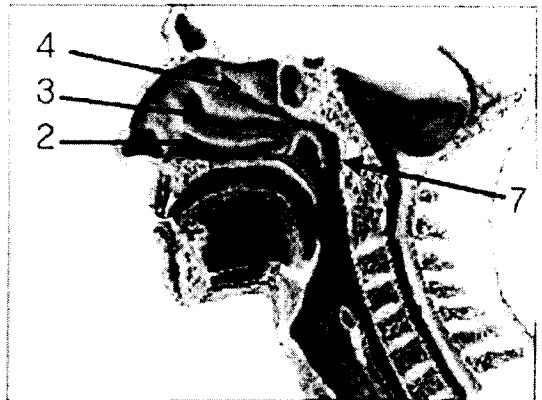
비강의 유동해석과 연관된 코의 해부학적 구조는 Fig. 1 와 같다. 유로와 유로를 둘러싼 피부조직을 간략히 설명하면, 두 비강의 세로 격막에 해당되는 비중격(Nasal Septum)과 상,중,하 비갑개 등 피부조직으로 둘러 쌓인 3 개의 고리모양의 유로(상,중,하 비도)로 이루어진다. 코의 좌우 2 개의 q 비강은 휴지 시 번갈아 가며 사용되며 (수시간 주기), 중,하 비도로 유량의 대부분이 지나간다.⁽²³⁾ 후각세포는 상비도 위쪽에 주로 밀집되어 있고 이 부분의 유량은 아주 약하므로, 휴지기 시 강한 냄새가 아니면 후각세포를 잘 자극하지 못한다. 특별히 냄새를 맡기 위해서는 코 구멍 부위(Nasal Valve)를 좁히고 속도를 크게 하면, 상부에 큰 와류가 생기고 유속이 빨라져 후각 세포를 자

극하게 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 폐쇄된 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. 아데노이드 비대 형상을 위해, Fig.2 와 같이, 이비인후과 전문의의 자문을 받아 50%, 70% 폐쇄 형상을 결정하였다. Fig.2 의 좌측 표시된 부분을 네거티브 형상에서 제거하면, 유로 상에선 이 부분이 매워진다.

3. 코 내부 유로 제작 및 작동 유체

코 내부 공동내의 유동해석에 있어 주된 요소는 정확한 유로의 모델을 형성하는데 있다. 이를



(a) Side view of 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)
- 7. 아데노이드(Adenoid)

(b) Cross sectional view (CT)

Fig. 1 Nasal Anatomy and Flow Passage in Nasal Cavity.



Fig. 2 A replicate model for Adenoid Vegetation: Sections removed (down 50% and upper 70%)

위해 먼저 정상인의 코에 대한 좁은 간격(0.6mm)의 CT(Computed Tomogram, Somatom plus 4, Siemens Co.)촬영 데이터(Fig. 3 참조)를 입력으로 하여 신속 성형기법(rapid prototyping) 기계(Z Co. MA. USA)를 이용하여 유로 내부 유로의 고정모델을 만들었다. (Cyber med Co.) 2 개의 코 내부 통로는 인후부에서 연결되며, 일반적으로 수 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 안 개처럼 뿌렇게 됨) 녹말 모형을 녹여내면 유로가 완성된다. 이렇게 완성된 유로의 굴절률 등 광학적 성질은 물,공기와 다르기 때문에, Fig. 4 와 같이 물과 글리세린을 섞어가며, 실리콘과 작동유체의 굴절률이 같아져 내부의 비강모형이 사라지는 혼합비율(체적 비 51: 49, 점도 $6.55 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$, 비중은 약 1.02)을 찾아내어 이를 작동유체로 하여 실험을 수행하였다

4. PIV 실험 및 알고리즘

PIV 해석을 위한 유동가시화 실험 장치의 개략도는 Fig. 5 와 같다. 광원으로는 150mJ/pulse 의 2 광원 Nd:Yag 레이저(SPECTRON Co.), 최대해상도 1208*1024 픽셀 1 μsec . 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 PC 로 이루어져 있다.

코 내부 유로 모델은 5 개의 유량계로 이루어진 유량 조절 벤치를 거쳐 탱크로 연결된 폐 회로를 이루고 있다. 직경 50 μm 정도의 폴리비닐 구형 입자(밀도 1.02)를 추적입자로 사용하였으며, 20cm*10cm 의 이미지를 선택하여 약 0.15mm/pixel 의 공간 해상도를 갖게 하였다. PIV 해석 알고리즘에서 아픽셀 정확도를 위협하는 주된 요인 중 하나는 오류백터의 제거와 보간에 의한 복원이다. 현재 주로 사용되는 방법들은 국소 중간치 필터 등 후처리 과정에서의 제거와 복원이 이루어 지고 있으며, 백터장이 조밀하더라도 정확도의 손상은 피할 수 없다. 상호간섭 계산 단계에서 이루어 지는 제일 큰 피크와 두 번째 피크

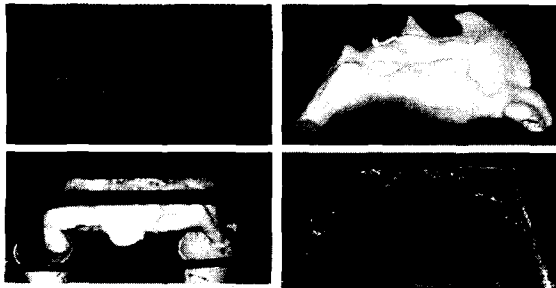
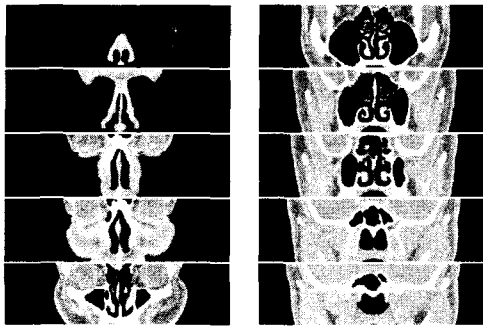


Fig. 3 Coronal CT scan of a male nasal passage (up), 3 dim. Reconstruction image(down left) and Negative model by RP machine(down right)



Fig. 4 Photo of model filled with water (left) and with Water-Glycerol mixture(right)

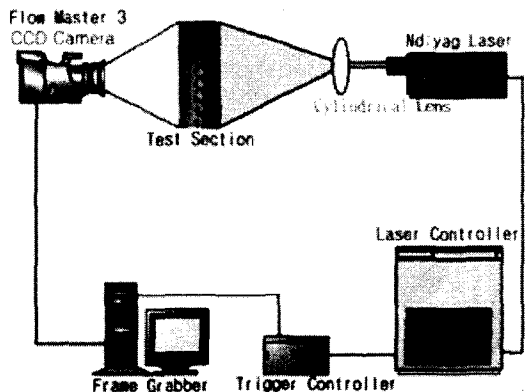


Fig. 5 Experimental set-up

의 비율로서 오류백터를 판정하는 방법은 후처리 과정의 경우보다 나은 것이지만, 올바른 벡터 또한 일정량 제거하게 되며 이는 후처리 과정에서의 복원 시 정확도의 손실을 초래한다.⁽⁷⁾ Hart⁽⁴⁾의 CBC 알고리즘은 처리 시간의 큰 증가 없이 신호-잡음 비(SNR)를 증가 시키는 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, 오류백터의 수가 크게 감소되어 정확도가 증가된다. 따라서, 본 논문의 실험 영상에 대한 PIV 해석은 2 번의 윈도 오프셋(Window Offset)을 장착한 CBC 알고리즘을 적용하였다.⁽⁷⁾

5. 결과 및 토론

정상인의 휴지시 흡입유량은 125ml/sec 이고, 이 경우 Re 수(콧구멍의 수력직경을 길이, 여기서의 평균유속을 속도로 계산할 때)는 약 200 이다. Fig.6 은 정상 비강에 대한 결과로서, 비중격 부근의 1024 개 속도장의 평균 속도장, 유선, RMS 분포를 나타낸다. 저 Re 수임에도 RMS 값은 코 입구 부근에서 20%에 이르고, 이는 코 내부 유로의 형상에 기인하며 열 전달과 물질전달(습도)을 효과적으로 증가시키는 역할을 한다.⁽¹⁾ 실제로 코 입구로부터 3-4cm 정도의 유로를 지나며 공기의 온도는 34-35°C, 습도 95% 이상이 된다. Fig. 6 의 좌측 상단의 작은 그림은 CT 상의 실험단면 위치를 나타내고 있다.⁽⁶⁾

아데노이드에 의해 인후부가 일부 폐쇄된 비강 모델에 대한 결과는 대체적으로 인후부 주위를 제외하면, 정상 비강의 경우와 큰 차이를 나타내지 않는다. Fig. 7,8 은 휴지기 비중격 주위의 흡기 유동해석 결과이고 Fig. 9,10 은 호기 유동해석 결과로서, 각각 50%, 70% 폐쇄된 경우의 유동을 보여 준다. 정상유동에 비해 유선이 중,상비강계쪽으로 약간 쉬프트됐으나 인후부 전방의 비강내의 유동은 큰 변화가 없었다. 그러나, 인후부에서는 아데노이드 비대증에 의한 유로 폐쇄의 결과로 RMS 값이 증가함을 볼 수 있으며, 70% 폐쇄의 경우에는 크게 증가함을 볼 수 있다. 이 부근의 유동장을 자세히 살펴보기 위해, 유동 해석 영역을 인후부 주위로 국한시켜 실험하였고, PIV 해석한 결과를 Fig. 11 에 나타내었다. 50% 폐쇄된 경우 아데노이드 전에 1 개의 재순환 영역을 볼 수 있는데

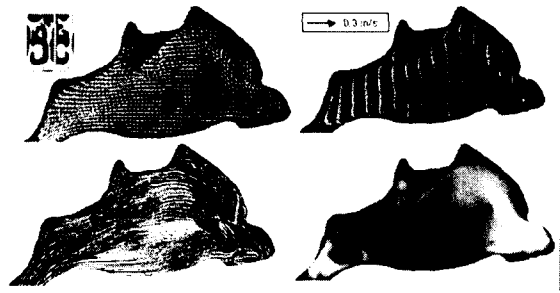
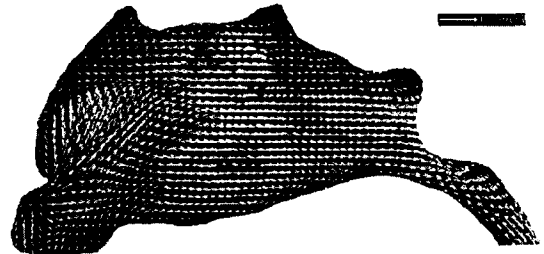


Fig. 6 PIV Results for Airflow of resting inspiration at Nasal Septum: Flow rate of 125 ml/sec.

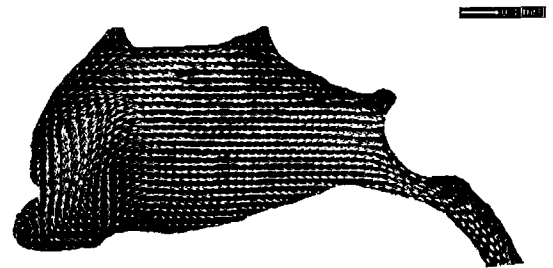


(a) Mean velocity distribution



(b) Mean streamlines (c) RMS distribution

Fig. 7 PIV Results of resting inspiration at Nasal Septum (50% Adenoid Vegetation)

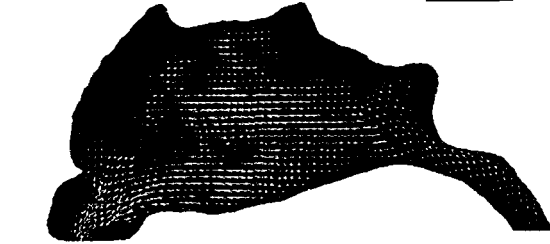


(a) Mean velocity distribution



(b) Mean streamlines (c) RMS distribution

Fig. 8 PIV Results of resting inspiration at Nasal Septum (70% Adenoid Vegetation)



(a) Mean velocity distribution



(b) Mean streamlines (c) RMS distribution

Fig. 9 PIV Results of resting expiration at Nasal Septum (50% Adenoid Vegetation)

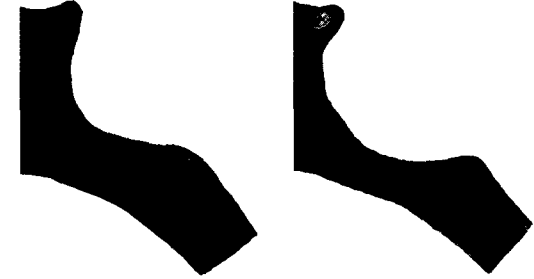
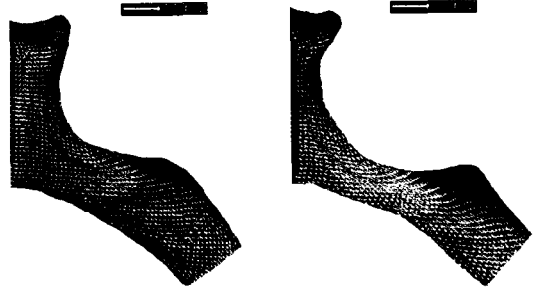
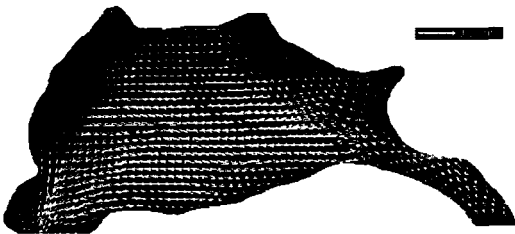


Fig. 11 PIV Results of resting inspiration at throat: From top, Mean Velocity, Streamline, RMS and left for 50%, right for 70% Adenoid Vegetation



(a) Mean velocity distribution



(b) Mean streamlines (c) RMS distribution

Fig. 10 PIV Results of resting expiration at Nasal Septum (70% Adenoid Vegetation)

반해, 70% 경우 아데노이드 전후 2 개의 재순환 영역이 발생하여 유로 수축 현상(Vena Contracta)을 보이고 있고 RMS 값이 급증했다. 비정상 스톨은 관찰되지 않았으나, 많은 유동저항이 예상된다. 이러한 사실들은, 이비인후과 전문의들이 수술을 결정하는 경우도 폐쇄율 70% 전후가 되는 이유를 설명할 수 있다. 이로써, PIV 등 의한 유동해석이 의학적 판단의 객관적 자료가 될 수 있음을 알 수 있고, 보다 세분화된 폐쇄율에 대한 모델을 제작하여 실험함으로써 적정 수술 결정 시기를 결정하는데 도움이 될 것이다. 물론, 비강의 구조는 사람마다 다르기 때문에 일반화 되기 어려우나, 객관

화된 데이터를 축적하는 것은 중요하며, 본 논문의 결과들은 한국인의 비정상 비강 모델에 대한 첫 유동 해석 결과이다. 향후 CT 스캔 데이터를 이용하여 수치모델을 만들고 직접 수치 해석 할 수 있는 소프트웨어 제작 시, 검증용으로도 쓰일 수 있을 것이다.

6. 요약

비강 내의 공기 유동을 PIV 를 이용하여 정량적으로 측정하는 방법론을 확보하고, 표준 한국인의 비강 모델을 기본으로 하여, 비정상 비강 내의 공기 유동에 대한 첫 데이터를 제공하였다. 이비인후과 수술 및 진단에 필요한 기초 임상자료로서의 첫 응용으로 유아 청소년기의 빈번한 비강 질환인 아데노이드 비대증에 걸린 비강 모델을 제작하여 폐쇄율 50%, 70%인 경우에 대해 가시화 실험을 수행하여 PIV 유동 해석결과를 얻었다.

이비인후과 전문의들은 경험상 70% 내외 폐쇄 시 수술을 결정하는데, 유동해석 결과들은 이 경우 아데노이드 주위에 2 개의 재순환 영역이 발생하여, 유로를 좁게 만들어 유속이 증가하고, RMS 값의 증가로 유동저항이 급증함을 보여주고 있다.

보다 많은 폐쇄율을 갖는 모델에 대한 해석은 수술 결정 폐쇄율에 대한 정밀도를 높일 것이며, 향 후 외과적 수술에 의해서 아데노이드의 일부를 제거한 후의 CT 스캔 데이터에 의한 모델들에 대한 유동해석을 통하여 회복에 대한 객관적 자료를 제시할 수 있을 것으로 보인다.

또한, 확립된 방법론을 활용하여 비후성 비염, 선천적 기형 비강 등 비정상 비강에 대한 실험을 수행하여 이비인후과 질병과 유동 현상의 관계를 규명하고 수술과 진단에 대한 생체 유체 역학적 가이드 라인을 제공하고, 순환계 등 다른 생체 유동에의 적용도 가능하리라 본다.

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.* 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* 29, 13~22
- (5) Kim, S.K 1999, "Particle Image Velocimetry Measurements in Nasal Airflow," *Trans. KSME, B*, Vol. 26, No. 6, 811~816
- (6) Chung, S.K (MD in Samsung Medical Center) 2002, Private Discussion.
- (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. 1853~1859