



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

치의학석사 학위논문

골격성 III급 부정교합 환자에서  
하악골 후방이동수술 후  
상기도의 변화에 대한  
전산유체역학적 유동해석

Computational fluid dynamic (CFD)  
analyses of the upper airway after  
mandibular setback operation in skeletal  
class III patients

2018년 2월

서울대학교 치의학대학원

치 의 학 과

박 상 현

치의학석사 학위논문

골격성 III급 부정교합 환자에서  
하악골 후방이동수술 후  
상기도의 변화에 대한  
전산유체역학적 유동해석

Computational fluid dynamic (CFD)  
analyses of the upper airway after  
mandibular setback operation in skeletal  
class III patients

2018년 2월

서울대학교 치의학대학원

치 의 학 과

박 상 현

골격성 III급 부정교합 환자에서  
하악골 후방이동수술 후  
상기도의 변화에 대한  
전산유체역학적 유동해석

지도교수 이 종 호, 최 진 영

이 논문을 치의학석사 학위논문으로 제출함

2017년 10월

서울대학교 치의학대학원

치 의 학 과

박 상 현

박상현의 석사 학위논문을 인준함

2017년 11월

위 원 장               김 명 진                         (인)

부위원장               이 종 호                         (인)

위      원               최 진 영                         (인)

## 국 문 초 록

**목적** : 골격성 III급 부정교합 환자에서 하악지시상분할골절단술 및 이의 변형법 등을 이용한 하악골의 후방이동 시 두경부 연조직의 변화 또한 이루어지는데, 하악골 후방이동 수술 후 상기도 공간의 축소로 인해 수면 시 기도공간 감소와 호흡장애가 관찰된 보고가 있다. 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 상기도의 공기역학적 유체 특성을 정확히 계산하여 실제 상기도 내 유량과 압력 프로파일을 예측하는 방법으로 사용되어 왔다. 본 연구에서는 골격성 III급 부정교합 환자에서 하악골 후방이동수술을 시행 시 술 전과 술 후의 상기도를 지나는 유량을 전산유체역학을 이용하여 비교하고 상기도의 유동 특성과 압력 변화를 평가하고자 하였다.

**방법** : 2015년 이후 서울대학교치과병원 구강악안면외과에서 양측성 하악지 시상분할골절단술의 방법으로 하악골 후방이동수술을 시행한 5명의 환자(남자 3명, 여자 2명)를 연구 대상으로 하였다. 환자별로 수술 전 3개월 이내에 촬영된 술 전 CBCT 영상 및 수술 후 6개월 이후에 촬영된 술 후 CBCT 영상이 후향적으로 연구에 이용되었다. 각각의 영상은 PACS에서 DICOM file format으로 추출한 후, MIMICS 소프트웨어로 읽어 각 환자의 술 전/후의 상기도를 3D 모델로 변환하였다. 이후 3-matics 소프트웨어를 이용하여 분석을 시행할 기준평면을 설정한 후 이 위치에서의 단면적을 계산하여 술 전과 술 후의 기도 면적을 비교하였다.

이 후, 2명의 환자에 대해 3D 모델의 STL file을 midas NFX 라는 CFD 소프트웨어에서 불러온 후 mesh를 생성하여 술 전 및 술 후 상기도 내 유동 시뮬레이션을 시행하였다. 호흡 중 흡기로 해석을 시행하였으며, 유체역학적 계산은 2차식  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하였다. 기준 평면에 위치한 각 절점에서 계산된 압력의 평균을

내어 술 전과 술 후의 압력 분포를 도출하고 이를 비교하였다.

**결과** : 술 전과 술 후의 단면적을 비교한 결과, 다섯 명의 환자에서 수술 이후 평균 - 7.56%의 상기도 단면적이 감소하는 것을 관찰할 수 있었으며, 특히 하악골이 후퇴된 부위의 연조직인 구개수에서 후두덮개 부위까지는 평균 - 17.71%의 단면적의 감소가 확인되었다. 이후 전산유체역학을 이용한 유동 해석결과, 수술 후 기도 면적의 감소로 인해 2명의 환자에서 평균 38.3%의 압력 강하가 관찰되었다. 본 연구를 통해 하악골 후방이동 수술 후 상기도 공간의 감소 및 이에 따른 기도 내 압력 강하 현상을 CFD 해석을 이용하여 확인할 수 있었다.

.....

**주요어** : 상기도, 전산유체역학, 하악골 후방이동 수술,  
유동해석, 압력강하  
**학 번** : 2014-23037

# 목 차

## 국문초록

I. 서론	1
II. 연구대상 및 방법	2
III. 결과	9
IV. 고찰	15
V. 결론	19
부록	20
참고문헌	22

## 영문초록

# I. 서론

하악 전돌증은 하악의 성장이 과도하거나 상악의 성장이 상대적으로 부족해서 하악이 튀어나오는 양상을 보이는 발육성 악안면기형으로, 장안모와 전치부 반대교합 등 특징적인 소견을 보이는 골격성 III 급 부정교합을 의미한다. 골격성 III급 부정교합 환자에서 전후방 및 수직적 악골의 부조화가 심하거나 안모에 대한 심미적 인식도가 클 경우 교정치료만으로는 심미적으로 만족스러운 결과를 얻기 어려우므로 악교정수술이 병행되는 경우가 종종 있다.

하악 전돌증을 보이는 골격성 III급 부정교합 환자에서 하악지시상분할골절단술 및 이의 변형법 등을 이용하여 하악골 후방이동 시 두경부 연조직의 변화 또한 이루어지는데, 하악골 후방이동 수술 후 상기도 공간의 변화에 대하여는 논란이 있다. 술 후 상기도 공간의 일시적인 감소가 일어나지만 시간 경과 후 연조직의 생리적 적응을 통해 원래의 크기로 회복된다는 보고와<sup>1)</sup>, 대조적으로 기도공간의 감소가 수술 후 상당기간 경과 후에도 유지되었다는 보고도 있다<sup>2)3)</sup>. Riley 등<sup>4)</sup>은 하악골 후방이동수술 후 야기된 심한 코골음이나 수면무호흡증 및 이때 측모 방사선 사진에서 관찰된 기도공간의 감소에 대해 보고를 하였다.

전산유체역학(Computational Fluid Dynamics, CFD)은 상기도의 공기역학적 유체 특성을 정확히 계산하여 실제 상기도 내 유량과 압력 프로파일을 예측하는 방법으로 사용되어 왔다.<sup>5)6)</sup> Wootton 등<sup>7)</sup>은 폐쇄성 수면 무호흡증 환자의 기도 폐쇄를 평가할 때 단순히 해부학적 변수만을 사용하지 않고 CFD 분석을 병행하면 좀더 정확한 예측이 가능하다고 보고한 바 있다.

본 연구는 골격성 III급 부정교합 환자에서 하악골 후방이동수술을 시행 시 술 전과 술 후의 상기도 공간을 전산유체역학(CFD)으로 비교하여 하악골 후방이동수술 후 상기도의 유동 특성과 압력 변화를 평가하고자 하였다.

## II. 연구대상 및 방법

### 1. 연구대상

2015년 이후 서울대학교치과병원 구강악안면외과에서 악교정수술을 한 환자 중 하악골 후방이동수술을 시행한 후 6개월 이상 지난 환자들을 일차적으로 대상자로 선정하였다. 선정기준으로, 만 18세 이상의 환자로 악골 및 연조직의 성장이 끝났다고 판단되며, 임상적으로 두개안면부와 경추 부위에 연조직이나 경조직의 기형이 없으며 방사선 소견상으로도 악골내 특이병소가 없는 환자를 선정하였고, 술 전 구호흡 또는 수면시 호흡곤란 등의 호흡 장애가 있는 환자는 제외하였다. 최종적으로 골격성 제 3급 부정교합으로 양측성 하악지 시상분할골절단술(Bilateral sagittal split ramus osteotomy)의 방법으로 하악골 후방이동이 양측 하악지에서 각각 5mm 이상씩 시행된 남자 3명, 여자 2명을 대상으로 선정하였다.(Table 1) 모든 환자는 상악골에서 Le Fort I osteotomy도 함께 시행되었다. Table 1에서, 하악 좌우측 후방 이동량과 상악의 후방이동량은 수술기록표를 참고하였으며, 턱 끝을 기준으로 한 후방 이동량은 방사선 사진을 이용하여 측정되었다. 술 전 방사선 사진은 수술 전 3개월 이내에 촬영되었으며, 술 후 방사선 사진은 수술 일자 기준으로 6개월 전후(최소 141일, 최대 210일)에 촬영되었다. 피험자 보호를 위해 서울대학교치과병원 연구윤리심의(IRB No. ERI17017)를 마쳤다.

**Table 1 . Demographic data of patients**

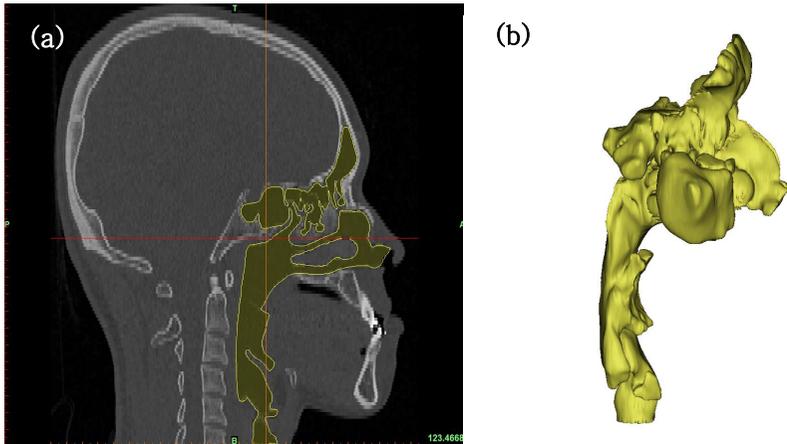
Patient ID	Sex	Age (year)	Setback on Mn right molars(mm) <sup>(a)</sup>	Setback on Mn left molars (mm) <sup>(b)</sup>	Setback length on chin point(mm) <sup>(c)</sup>	Mx setback length(mm) <sup>(d)</sup>
A	M	24	13	11	13.8	1
B	F	23	8	12	11.7	0
C	M	18	10	11	10.1	0
D	F	19	6	11	8.2	0
E	M	25	6	6.5	7.1	2

(a), (b), (d) is post-operative record referred from the operation chart. (c) was manually measured in CT.

## 2. 연구방법

### 2.1. 3D 모델의 재건 및 면적 계산

환자별로 수술 전 3개월 이내에 촬영된 술 전 CBCT 영상과, 후속 치료를 위해 술 후 약 6개월 이후에 촬영된 술 후 CBCT 영상이 후향적으로 연구에 이용하였다. 모든 CBCT 영상은 Dinnova3 CBCT scanner(HDXwill 사, Seoul, Korea)로 채득되었으며, 기계의 사양 및 촬영 시 조건은 다음과 같다: 200mm x 190mm의 field of view(FoV), 2mm의 slice thickness, 0.3mm의 voxel size, 100kVp, 9mA. 각각의 영상은 PACS에서 DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine) file format으로 추출한 후, MIMICS(Materialise 사, Leuven, Belgium) 소프트웨어로 읽어 각 환자의 술 전/후의 상기도와 두개악안면골을 3D 모델로 변환하였다.(Fig. 1) 연구에 이용된 상기도 모델은 MIMICS 소프트웨어 상에서 threshold 값을 -1024 HU(Hounsfield Units)이상 -380 HU 이하로 설정해 추출하였다. 두개악안면골은 유동해석에 직접 쓰이지는 않지만, 술 전과 후의 상기도의 3차원적 위치 및 기준평면을 동일시한 후 비교하기 위한 참조점을 설정하기 위해 추출되었으며, threshold 값은 300 HU 이상으로 하였다.



**Fig. 1. Construction of 3D upper airway from CBCT image. (a) Segmentation of the air region; (b) 3D surface model of the upper airway**

이후 STL(Stereolithography) file format으로 변환 후 3-matics(Materialise사, Leuven, Belgium) 프로그램을 이용하여 연구에 필요한 적절한 가공과정을 거쳤다. 환자 고유의 상기도 형상 데이터를 크게 소실시키지 않으면서 CFD 해석이 수월하게 이루어질 수 있도록 적절한 smoothing 알고리즘을 적용하였으며, 술 전과 술 후의 상기도가 같은 3차원적 위치와 방향으로 배열될 수 있도록 술 전과 술 후의 두개골의 위치와 각도를 최대한 일치시켰다. 또한 흡기시 입구단(비공)과 출구단(하인두의 bottom)을 동일하게 설정하였다.

이후 상기도의 면적 계산을 위해 기준 평면을 정하였다. 비강의 하방을 연장하여 인두부와 연결되는 부위를 편의상 구인두의 시작점으로 가정하고, 이 점으로부터 5mm 간격으로 평면을 설정한 후 이를 본 연구에서 기도 면적 변화와 압력 분포 변화를 도출하는 기준평면으로 사용하였다. (Fig. 2) 3-matics 소프트웨어를 사용하여 연구 대상에 대해 술 전 및 술 후에서 기준평면 위치에서의 기도 단면적을 계산하고 이를 비교하였다.

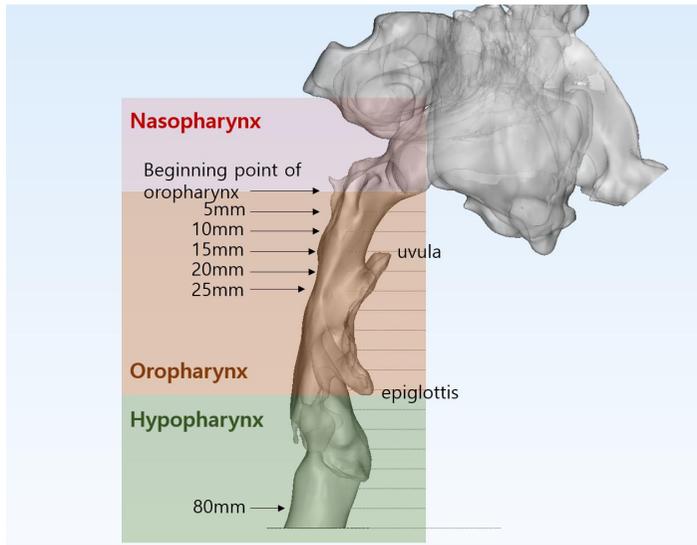


Fig. 2. Cross-section along the main stream

## 2.2. 3D 모델의 mesh 형성

이 후 3D 모델의 STL file을 midas NFX(MIDAS IT사, Seongnam, Korea)라는 CFD 소프트웨어에서 불러온 후 mesh를 생성하였다.(Fig. 3) 상기도 3D 모델을 사면체 구조의 volume mesh로 재생성한 후, 재료로서 25℃ 비압축성 공기의 물리적 특성을 대입하였다. 본 연구에서 기도 내 온도와 습도의 영향은 무시하였으며, 중력의 영향은 고려하였다.8)

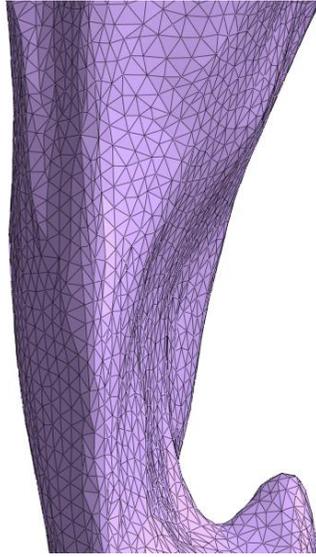


Fig. 3. Mesh generation of upper airway 3D geometry

### 2.3. 전산유체역학을 이용한 유동 해석

midas NFX 소프트웨어를 이용하여 술 전 및 술 후 상기도내 유동의 시뮬레이션을 시행하였다. 호흡 중 흡기로 해석을 시행하였으며, 정상상태 층류(steady laminar flow)를 가정하여 적용하였다. Schreck 등<sup>9)</sup>은 기도 내 유량이 분당 30L 이하일 때는 와류(turbulence)가 생기지 않음을 보고한 바 있다. 본 연구에서 흡기 유량은 분당 24L 이하이므로, 유동이 비압축성이며 층류라고 가정하였다. 또한 Xu 등<sup>5)</sup>은 정상상태(steady state, 시간에 따라 유량이 변하지 않고 일정)의 유량과 비정상상태(Unsteady state, 시간에 따라 유량이 변함, Fig. 4)의 유량에 대해 시뮬레이션을 하였을 때, 최대 흡기량점(정점)에서 정상상태의 압력 분포는 비정상상태의 압력 분포와 매우 흡사하며, 그 차이가 2 Pa 이하임을 증명한 바 있다. 이에 따라 본 연구에서는 원활한 컴퓨터 계산 수행을 위해 정상상태로 유량을 가정하여 시뮬레이션을 시행하였다. 정점에서의 조건은

$V=Q/A$  식을 이용하여 계산하였으며, 이 때  $Q$ 는 모델의 유량 (Volume flow rate)이며,  $A$ 는 출구단(하인두의 bottom)의 면적이다. 유량은 Fig. 4에서와 같이 비정상상태의 정점 유량인 600mL/s을 정상상태 유량으로 가정하고 해석하였다. 흡기 유량이므로, 경계 조건의 경우 입구단인 비공에서는 압력을 주위 정압(ambient static pressure)인 1기압, 출구단인 하인두의 bottom에서는 위에서 언급한 식으로 계산된 유속( $V=Q/A$ )을 적용하였으며, 벽면에서는 non-slip으로 가정하였다.

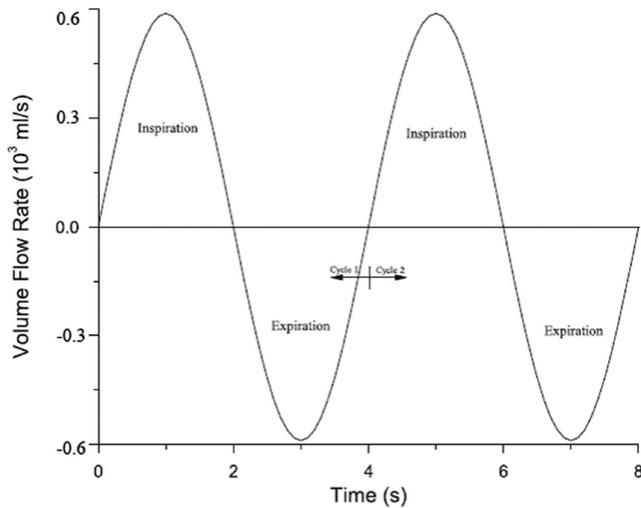


Fig. 4. A typical waveform of transient flow in a respiratory cycle<sup>8)</sup>

이후 midas NFX 소프트웨어 내 solver를 이용하여 수치해석을 시행하였다. 유체 역학적 계산은 2차식  $k-\epsilon$  난류모델을 적용하였다. 모델의 mesh 내 각 절점에서의 속도값과 압력값을 계산하였으며, 0.001초 간격으로 1000 스텝 이상 반복 계산하여 값이 수렴하는 것을 확인한 후 계산을 종료하였다. 결과 값은 앞서 Fig. 2에서 정한 기준 평면(상기도 내 위치)에서의 압력으로 하였다. 기준 평면에 위치한 각 절점에서의 계산된 압력값을 추출한 후, 이들의 평균을 내

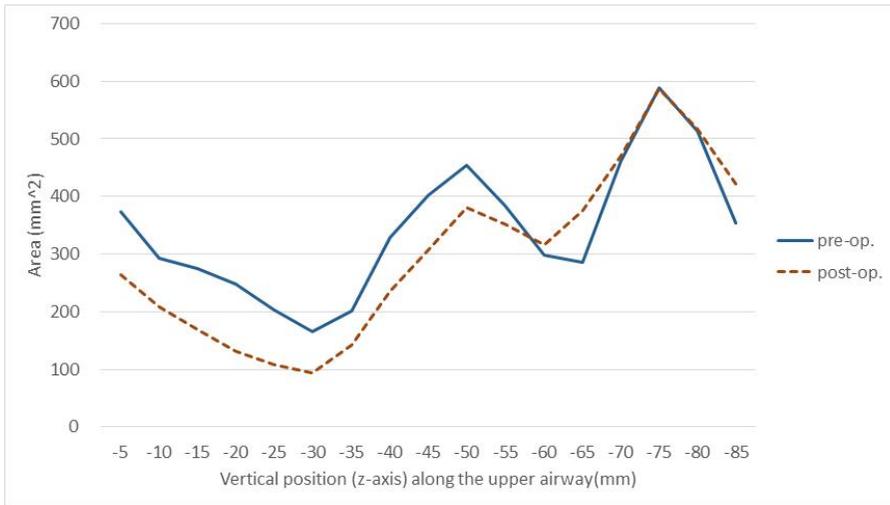
어 이를 특정 위치의 압력으로 가정하였다. 이렇게 하여 술 전과 술 후의 압력 분포를 비교하였다.

앞서 2.1.에서 3D 모델을 재건한 결과, A, B, D의 경우 술 전과 술 후의 비강의 형상이 크게 차이가 났다. 본 연구에서 술 전과 술 후의 비교를 위해서는 관심있는 부위를 제외한 다른 모든 부위의 조건은 동일해야 한다. A, B, D의 경우 비강 내 불규칙한 국소적 부위에서 단면적이 급격하게 좁아져서 압력의 불규칙한 상승을 예측할 수 있는 부위가 많이 나타났다. 이렇듯 압력 분포는 비강의 폐쇄 정도에 영향을 받으므로, 술 전과 후의 비강의 형태는 크게 차이가 나지 않아야 정확한 비교가 가능하다고 판단하였다. 이러한 이유로 유동해석 시뮬레이션은 A, B, D를 제외한 C, E에 대해서만 시행하고 이를 정리하였다.

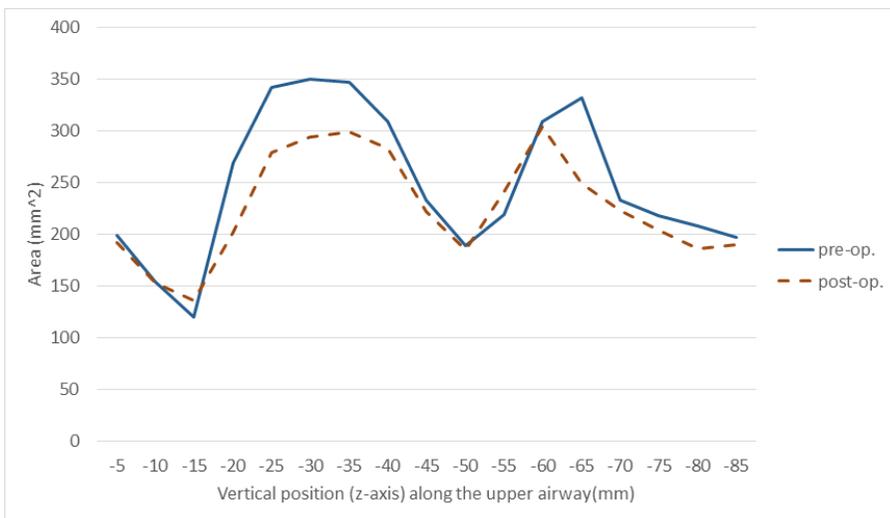
### III. 결과

#### 1. 상기도의 형태 비교

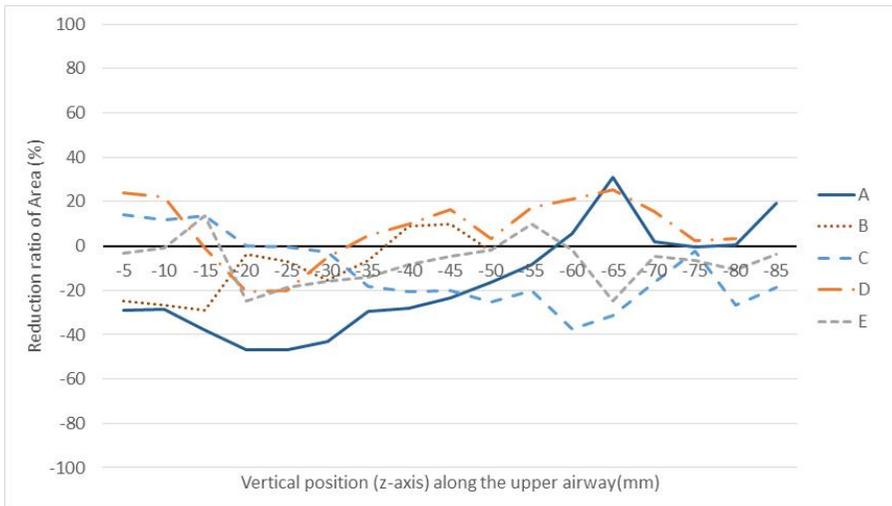
다섯 명의 환자에 대한 상기도 내 면적을 측정하여 그래프로 정리하였으며, 이중 하악골 후방 이동량이 가장 큰 환자 A와 가장 작은 환자 E의 그래프는 각각 Fig. 5, Fig. 6과 같다. 환자 B, C, D의 그래프는 부록에 첨부하였다. 또한, 술 전에 대한 술 후의 단면적 감소율을 다섯 명의 환자들에서 계산하였으며, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 7과 같다. 상기도의 위치는 앞에서 설명한 구인두 시작점을 상기도 높이 0mm 라고 가정하고, 5mm 단위로 기준평면을 지정하여 면적을 측정하였다. 술 전과 술 후의 단면적을 비교해보면, 대체적으로 수술 후 면적이 감소하는 것을 관찰할 수 있었으나, 환자 D에서는 -15mm에서 -35mm 사이를 제외하고는 면적이 오히려 증가한 것을 알 수 있었다. 그러나 공통적으로 -25mm에서 -35mm 사이는 환자 5명 모두에서 공통적으로 단면적이 감소하였다. 이 위치는 구개수(uvula)에서 후두덮개(epiglottis) 사이로, 하악골이 후방으로 이동하며 연조직의 이동도 함께 일어나 이 부위의 면적이 감소한 것으로 판단할 수 있었다. 전체 단면적의 감소량은 평균 -7.56%(±8.04%)이었으며, 구개수에서 후두덮개 사이 구간의 단면적 감소량은 평균 -17.71%(±11.58%)이었다.



**Fig. 5.** Cross-sectional area along the upper airway of patient A. (Mn setback length on chin point : 13.8mm, Average area reduction ratio : -16.49%)



**Fig. 6.** Cross-sectional area along the upper airway of patient E. (Mn setback length on chin point : 7.1mm, Average area reduction ratio : -7.13%)



**Fig. 7. Reduction ratio of area along the upper airway of patients. (Average reduction ratio in the whole airway : -7.56%, Average reduction ratio from uvula to epiglottis : -17.71%)**

## 2. 전산유체역학을 이용한 유동 해석

환자 C, E에 대해 CFD를 이용한 유동 시뮬레이션을 시행하였다. 대표적으로 환자 C의 술 전에 대한 결과는 Fig. 8, Fig. 9와 같다. 흡기 시 최대 유속은 환자 C의 경우 술 전에는 후두덮개 5mm 상방에서  $3.32\text{mm/s}^2$ 로 나타난 반면, 술 후에는 후두덮개 5mm 하방에서  $4.75\text{mm/s}^2$ 로 술 전에 비하여 증가하였다. 환자 E의 경우, 술 전과 술 후 모두 후두덮개가 위치한 부위에서 최대 유속이 관찰되었으며, 그 값 또한  $7.42\text{mm/s}^2$ ,  $7.26\text{mm/s}^2$  로 거의 차이가 없었다. 압력 분포의 경우, 모든 경우에 있어서 상기도 내 압력의 급격한 변화가 나타나는 부위는 관찰되지 않았으며, 압력의 최소값은 모든 경우에서 공통적으로 출구단인 하인두에서 관찰되었다.

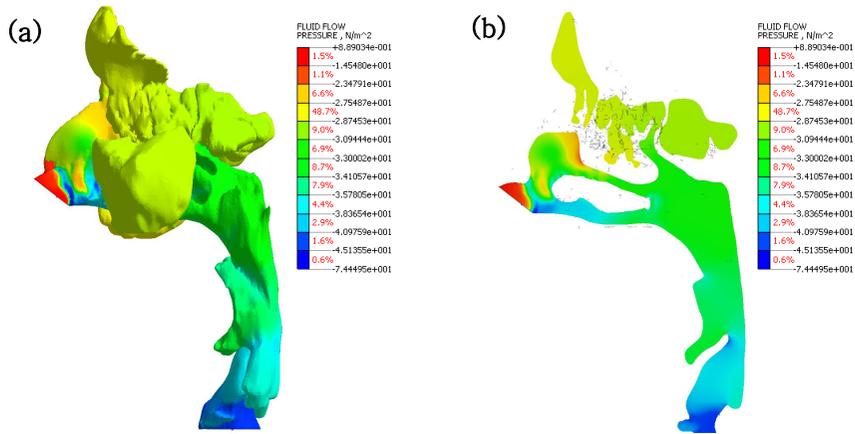


Fig. 8. The pressure profile of the upper airway calculated using CFD, (a) whole; (b) a cross-section

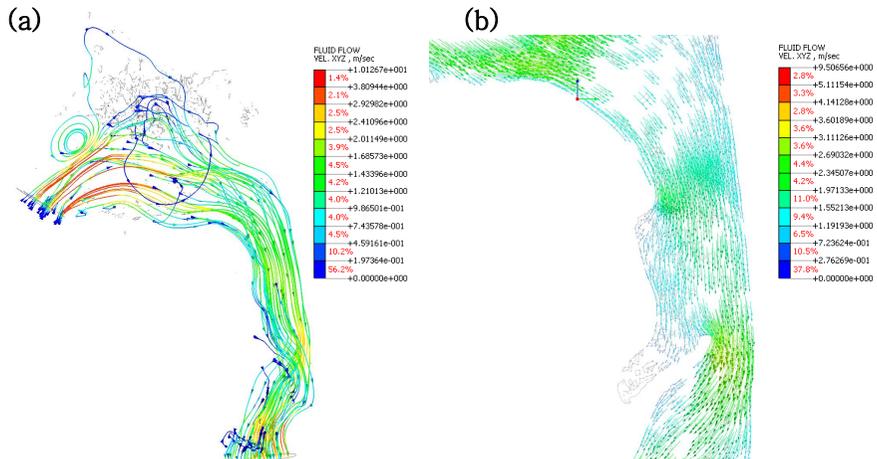


Fig. 9. The flow velocity profile of the upper airway calculated using CFD, (a) a few fluid velocity curves; (b) a cross-section

### 3. 수술 전과 수술 후의 압력 비교

환자 C와 E에 대한 압력 분포를 상기도 위치에 따라 정리하여 그래프로 나타내면 Fig. 10, Fig. 11과 같다. 두 환자 모두에서 수술 전

에 비해 술 후에 압력이 떨어졌는데, 환자 C의 경우 평균 40.5%(최소 34.9%, 최대 49.1%, 표준편차 3.74), 환자 E의 경우 평균 36.1%(최소 27.5%, 최대 56.4%, 표준편차 7.75) 압력이 하강하였다. 최대 압력 강하는 환자 C의 경우 후두덮개 하방 20mm인 -65mm(하인두의 상방 1/3)에서 나타났으며, 환자 E의 경우 구인두의 시작 부위인 -5mm(구인두의 상방 1/3)에서 나타났다. 특히 환자 C에서는 최대 압력 강하가 술 후 단면적이 가장 크게 좁아지는 구간에서 나타남을 알 수 있었다.

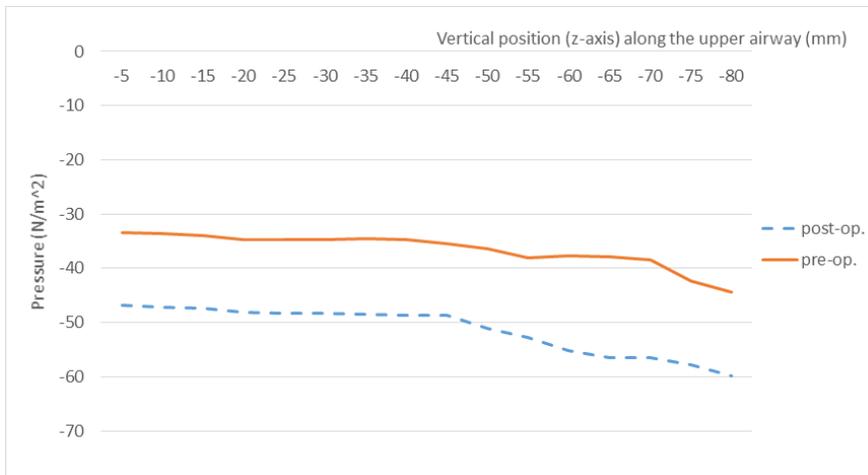
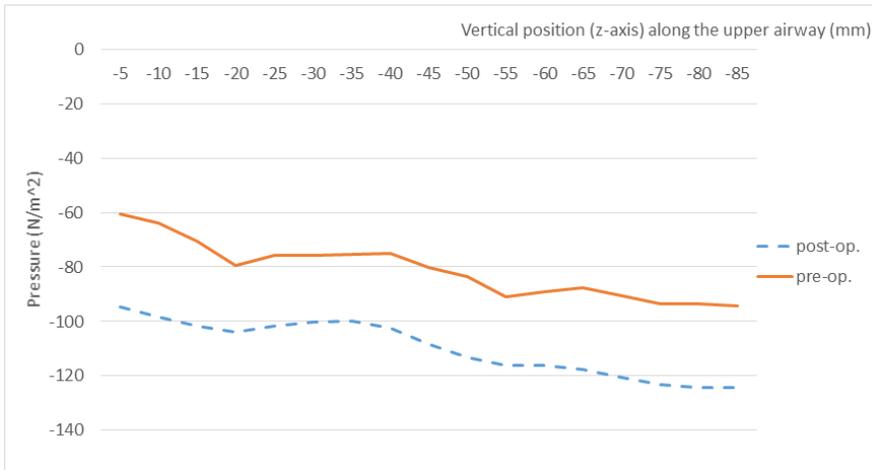


Fig. 10. The average pressure along the upper airway of patient C. (Average pressure reduction ratio : 40.5%)



**Fig. 11.** The average pressure along the upper airway of patient E. (Average pressure reduction ratio : 36.1%)

## IV. 고찰

본 연구는 골격성 III급 부정교합 환자에서 하악골 후방이동수술 후 상기도 내 유동 변화에 대해 평가하고자 진행하였으며, 이를 위해 전산유체역학을 이용해 3D 모델을 재건하여 유동 해석 시뮬레이션을 시행하였다. 환자의 CBCT 영상을 이용해 상기도의 3D 모델을 생성한 결과, 1명을 제외하고는 모두 하악골 후방이동수술 후에 상기도가 좁아진 것을 확인할 수 있었으며, 특히 구개수에서 후두덮개에 이르는 위치에 대해서는 5명 모두 공통적으로 기도 면적이 감소됨이 확인되었다. 이후 2명의 환자들에 대해 CFD 유동해석 소프트웨어를 이용해 최대 유량으로 흡기 시 상기도내 압력 분포를 계산해본 결과, 하악골 후방이동수술 후에 압력 강하가 30~40%가량 더 크게 일어남을 알 수 있었다.

다양한 선행연구들에서 폐쇄성 수면무호흡(OSAS) 환자와 상기도 내 면적 감소와의 상관관계가 보고되어왔다.<sup>10)11)12)</sup> Wootton 등<sup>7)</sup>은 OSAS의 심도와 기도 단면적 감소 및 압력 강하가 양의 상관관계를 가지고 있다고 하였으며, 따라서 기도의 단면적과 압력 분포가 상기도의 폐쇄 정도를 암시하는 중요한 두 가지 인자라고 하였다. Riley 등<sup>4)</sup>은 하악골 후방이동수술 후 야기된 심한 코골음이나 OSAS 및 이때 측모 방사선 사진에서 관찰된 기도 공간의 감소에 대해 보고를 하였으며, Powell 등<sup>13)</sup>은 하악골 전방이동술 혹은 상하악 전진술을 통하여 현저한 증상 개선과 함께 측모 방사선 사진에서의 기도 공간의 증가를 보고한 바 있다. 기술의 발전과 함께 3차원 영상 및 전산유체역학적 방법을 이용한 연구 또한 이루어졌는데, 김 등<sup>11)</sup>은 OSAS 환자에서 상하악 전진술 후 면적 변화와 압력 변화가 나타났으며 치료효과에 대한 분석이 가능함을 CFD 해석을 통해 확인하였다.

호흡 시 상기도 내 저항을 평가할 수 있는 직접적인 방법으로는 수면 다기능검사(Polysomnography)<sup>14)</sup>와 공기유속계(Air flowmete

r)<sup>15)</sup>가 있다. 수면 다기능검사에는 뇌파검사, 근전도, 안전위도 검사 및 코와 입에 위치하는 이산화탄소 분석기, 동맥혈내 산소포화도를 측정하는 산소측정계 등이 포함되며, 공기유속계는 코에 마스크를 대고 공기 흐름의 속도와 압력을 측정하는 것이다. Strelzow 등<sup>16)</sup>은 수면 다기능검사등을 통하여 수면 무호흡증으로 진단된 환자들의 술 전 평가에서 측모 방사선 사진이 유용하게 사용될 수 있는 가를 알아보려고 했는데, 증상이 있는 경우 구인두(oropharynx)와 하인두(hypopharynx)에서 그 면적이 감소하는 것을 감소하는 것을 관찰하여 실제의 증상정도와 방사선 사진상의 측정치와 상관성이 있음을 밝혔다.

Lowe 등<sup>17)</sup>은 면적의 감소정도를 전산화단층촬영 영상을 통한 3차원적 조립으로 평가하고자 시도하였다. Lowe는 이러한 방법이 기도 공간을 입체적으로 관찰할 수는 있지만 시간, 비용, 방사선 노출 등의 문제 외에도 두 구조물간에 공간적인 관계를 정량화하지 못한다는 한계를 지적하였다. 이러한 점에서 본 연구에서도 기도 면적을 측정하기 위한 구간 설정시 두부 자세의 변화를 전혀 고려하지 않았으므로 정확성면에서 다소 떨어짐을 볼 수 있었으며, 상기도의 3D 모델의 재건시 술 전과 술 후의 비강의 형태가 다소 차이가 있던 점 등에서 한계가 나타난 것으로 생각되었다.

인두의 세 부위 중 구인두(Oropharynx)는 골격성 III급 환자의 하악골 후방이동수술 이후 주로 영향을 받는 부위로서, 하악골 후방이동수술로 골격적인 변화뿐만 아니라 연조직에서의 변화가 동시에 일어난다. 혀와 설골은 하악골 형태변화에 따른 연관성과 기도 공간에 영향을 주는 구조물로 인식되어 그 동안 많은 연구가 있었는데, 장 등<sup>18)</sup>은 하악골 후방이동수술 직후 혀의 후방이동량이 크며 이에 따른 설골의 하방이동이 나타남을 관찰하였으며 그 후 1년 정도에 도달하면서 이들의 회귀현상을 보고하였다. Enacar 등<sup>19)</sup>은 하악전돌증 환자에서 하악골 후방이동수술을 시행하였을 때 설골의 하방이동을 발견하였으나, Lew 등<sup>20)</sup>과 조 등<sup>21)</sup>의 연구에 따르면 하악골

후방이동수술 후 장기간에 걸친 관찰 결과 설골의 위치는 거의 술 전의 상태로 되돌아가는 경향이 있다고 하였다. 본 연구에서도 또한 대부분의 환자의 상기도의 단면적이 감소하였으나 일부 구간에서는 면적이 오히려 증가하는 모습을 보였으며 환자 D의 경우 면적 변화가 거의 없었다는 점에서 Lew 등<sup>20)</sup>과 조 등<sup>21)</sup>의 보고들과 어느 정도 일맥상통하는 부분이 있었다. 즉 하악골 후방이동 수술 후에는 혀의 후방이동과 설골의 하방이동이 이루어지나 장기간의 시간이 지나면서 설골은 거의 원래의 위치로 회복되며 이러한 현상은 혀의 후방이동으로 인한 상설골근(Suprahyoid muscle)의 긴장 감소 및 인두전벽의 후방이동으로 인한 기도 공간 감소를 최소화하여 적절한 호흡을 유지하려는 생리적 기전으로 해석할 수 있었다.

환자 C와 E에 CFD를 이용한 압력강하 정도를 계산한 결과, 술 후에 환자 C와 E에서 각각 40.5%, 36.1%의 압력 강하가 나타남을 알 수 있었다. 술 후 기도의 단면적이 감소하면서 베르누이의 원리에 의해 유속이 빨라져 음압이 더 크게 작용함을 알 수 있으며, 이 음압에 의해 기도가 더 좁아지는 악순환이 일어날 뿐만 아니라 음압을 크게 만들기 위한 근육의 긴장이 더 커져 호흡이 더 힘들어질 수 있음을 예측할 수 있었다.

본 연구의 한계점을 살펴보면, 먼저 연구 대상의 수가 충분하지 않았다고 판단된다. II.1.에서 서술한 선정·제외 조건에 부합하는 연구 대상은 13명이었으나, 이 환자들은 CBCT 촬영 시 2가지 다른 방식의 CBCT 촬영 조건(FoV, voxel size) 중 하나로 촬영되었다. 서로 다른 조건으로 촬영된 CBCT를 기반으로 연구를 진행할 수 없었기에 이 중 환자 수가 더 많은 방식(PACS상 Requesting name'3D facial CT')을 선택하였다. 이 후 악골 내 금속 매식물이나 브라켓에 의한 X-ray 산란 현상, 비강과 상기도의 과도한 협착 등으로 3D 모델의 재형성이 불가능하거나 정확도가 떨어지는 것을 제외하여 최종적으로 연구대상이 5명으로 축소되었다. 이 때문에 후방이동량에 따른 상기도 면적 감소량의 상관관계를 관찰하려 했으나,

증례의 수가 적어 경향성을 찾기 힘들었다. CFD 분석 시에는 2명으로 대상이 더 축소되었는데, 이는 앞서 설명한 것과 같이 다른 3명의 연구대상이 술 전과 술 후의 비강 형상 차이가 심하여 압력과 유속이 불규칙성이 급격하게 증가하였기 때문에 타당한 비교 분석이 어려웠기 때문이다. 이는 후향적 연구의 한계점이라고 생각되며, 이를 극복하기 위해서는 처음부터 같은 방사선 촬영 기기와 같은 촬영 조건을 설정하고 연구를 진행해야 한다고 생각되었다. 두 번째로, CFD 유동 해석시 상기도의 벽면은 움직이지 않는 강체로 가정하였으나, 실제로 상기도는 연조직으로 둘러싸여 있다. 따라서, 상기도 내 음압을 발생시키는 유체와 주변 연조직의 상호작용으로 인해 호흡 시 유속에 의한 상기도 벽면의 기능적 움직임이 발생하는데,<sup>22)</sup> 이를 고려할 수 있는 연구가 필요할 것이다. 세 번째로, OSAS와 같이 호흡에 장애를 느끼는 현상은 실제로 주로 수면 중에 일어나는데, 수면 중에는 상기도의 확장근과 호흡펌프 근육이 덜 활성화되어 연조직의 형태와 위치에 적응하지 못하고 기능적 움직임이 덜 발생한다. 반면 본 연구에서는 환자가 깨어있을 때 촬영한 CBCT를 이용해 상기도를 모델링하였으며, 수면 중과 깨어있을 때에는 상기도의 크기와 형태가 다르기 때문에 실제 증상 정도와 방사선 사진상의 측정치와는 다를 수 있다. 마지막으로, 본 연구에서는 기도 면적을 측정하기 위한 구간 설정시 두부 자세의 변화를 전혀 고려하지 않았으므로 정확도가 다소 떨어지며, 술 후의 비강 내 연조직 부종이나 체액의 잔류로 인한 비강의 국소적인 막힘이 존재할 시 CFD를 이용한 해석 결과의 타당성이 다소 부족할 수 있다고 판단되었다.

## V. 결론

골격성 III급 부정교합 환자에서 하악골 후방이동수술을 시행하고 6개월 이후 방사선 영상을 이용하여 상기도의 단면적을 측정한 결과, 5명의 환자에서 평균  $-7.56\%(\pm 8.04\%)$ 만큼 감소하는 것을 확인하였으며, 특히 하악골이 후퇴된 부위의 연조직인 구개수에서 후두 덮개 부위까지는 평균  $-17.71\%(\pm 11.58\%)$ 의 단면적 감소가 확인되었다. 이후 전산유체역학을 이용한 유동 해석결과, 수술 후 기도 면적의 감소로 인해 2명의 환자에서 평균  $38.3\%(\pm 2.2\%)$ 의 압력 강하가 관찰되었다. 본 연구를 통해 하악골 후방이동 수술 후 상기도 공간의 감소 및 이에 따른 기도 내 압력 강하 현상을 CFD 해석을 이용하여 확인할 수 있었다.

## 부록

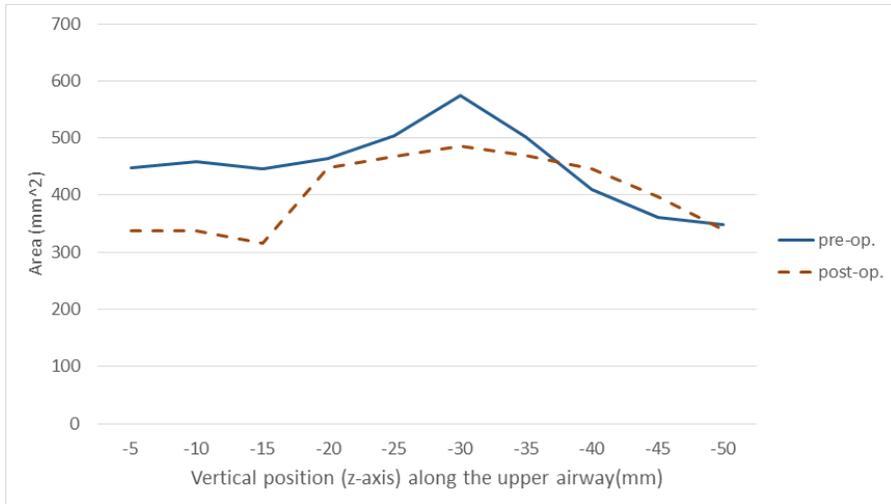


Fig. 12. Cross-sectional area along the upper airway of patient B

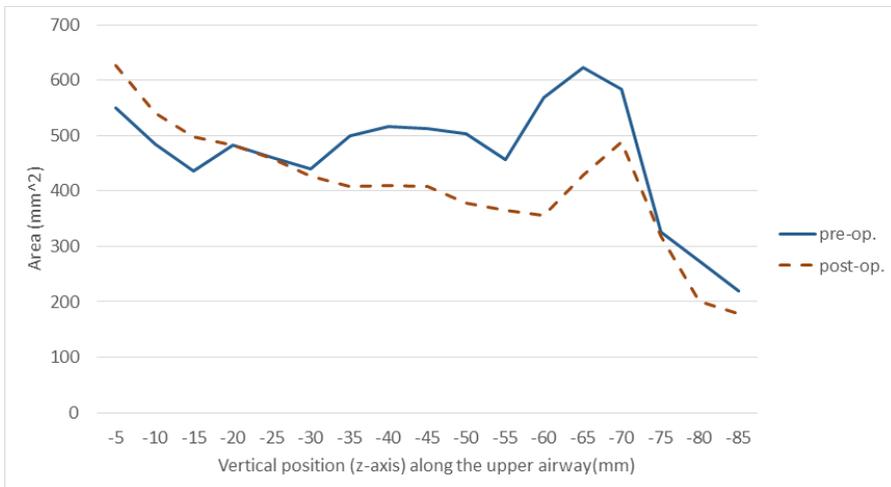
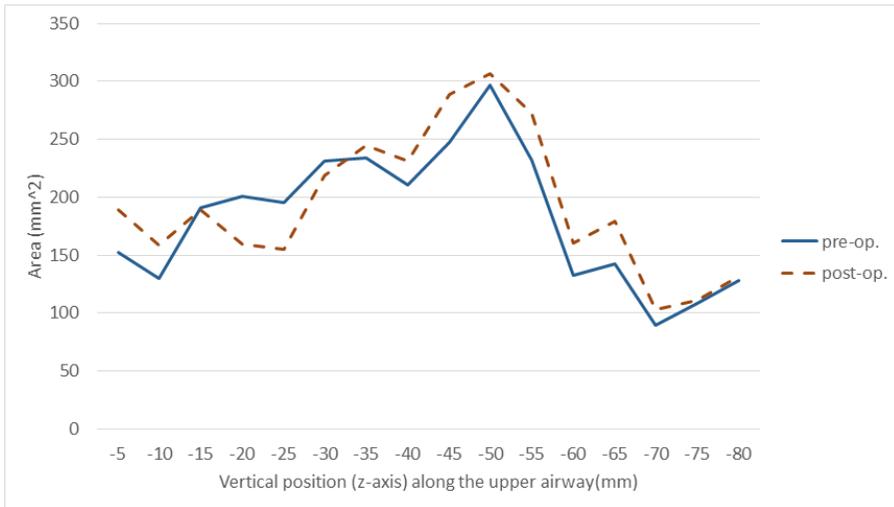


Fig. 13. Cross-sectional area along the upper airway of patient C



**Fig. 14.** Cross-sectional area along the upper airway of patient D

## 참 고 문 헌

- 1) Athanasiou AE, Toutountzakis N, Mavreas D, Ritzau M, Wenzel A. Alterations of hyoid bone position and pharyngeal depth and their relationship after surgical correction of mandibular prognathism. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1991;100:259-265.
- 2) Enacar A, Aksoy AU, Sencift Y, Haydar B, Aras K. Changes in hypopharyngeal airway space and in tongue and hyoid bone positions following the surgical correction of mandibular prognathism. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 1994;9:285-290.
- 3) Greco JM, Frohberg U, Van Sickels JE. Long-term airway space changes after mandibular setback using bilateral sagittal split osteotomy. *Int J Oral Maxillofac Surg* 1990;19:103-105.
- 4) Riley RW, Powell NB, Guilleminault C, Ware W. Obstructive sleep apnea syndrome following surgery for mandibular prognathism. *J Oral Maxillofac Surg* 1987;45:450-452.
- 5) Xu C, Sin S, McDonough JM, Udupa JK, Guez A, Arens R, Wootton DM. Computational fluid dynamics modeling of the upper airway of children with obstructive sleep apnea syndrome in steady flow. *J Biomech* 2006;39:2043-2054.
- 6) Mylavaram G, Murugappan S, Mihaescu M, Kalra M, Khosla S, Gutmark E. Validation of computational fluid dynamics methodology used for human upper airway flow simulations. *J Biomech* 2009;42:1553-1559.
- 7) Wootton DM, Luo H, Persak SC, Sin S, McDonough JM, Isasi

- CR, Arens R. Computational fluid dynamics endpoints to characterize obstructive sleep apnea syndrome in children. *J Appl Physiol* 2014;116:104-112.
- 8) Zheng Z, Liu H, Xu Q, Wu W, Du L, Chen H, Liu D. Computational fluid dynamics simulation of the upper airway response to large incisor retraction in adult class I bimaxillary protrusion patients. *Sci Rep* 2017;7.
- 9) Schreck S, Sullivan KJ, Ho CM, Chang HK. Correlations between flow resistance and geometry in a model of the human nose. *J Appl Physiol* 1993;75:1767-1775.
- 10) Kim HY, Bok KH, Dhong HJ, Chung SK. The correlation between pharyngeal narrowing and the severity of sleep-disordered breathing. *Otolaryngol Head Neck Surg* 2008;138:289-293.
- 11) 김형호, 서상호, 최진영, 김태윤. 폐쇄성 수면무호흡증 환자의 상하악 전진술 후 상기도 내 유동해석. *대한기계학회 논문집 B 권* 2015;39:443-448.
- 12) 모성서, 안형택, 이정선, 정유삼, 문윤식, 배웅권, 성상진. 폐쇄성 수면무호흡 환자의 상기도 형태의 특징과 압력강하에 관한 3 차원 전산유체역학해석. *대한치과교정학회지* 2010;40:66-76.
- 13) Powell N, Guilleminault C, Riley R, Smith L. Mandibular advancement and obstructive sleep apnea syndrome. *Bull Eur Physiopathol Respir* 1983;19:607-610.
- 14) Pepin JL, Ferretti G, Veale D, Romand P, Coulomb M, Brambilla C, Levy PA. Somnofluoroscopy, computed tomography, and cephalometry in the assessment of the airway in obstructive sleep apnoea. *Thorax* 1992;47:150-156.

- 15) Riley R, Guilleminault C, Herran J, Powell N. Cephalometric analyses and flow-volume loops in obstructive sleep apnea patients. *Sleep* 1983;6:303-311.
- 16) Strelzow VV, Blanks RH, Basile A, Strelzow AE. Cephalometric airway analysis in obstructive sleep apnea syndrome. *Laryngoscope* 1988;98:1149-1158.
- 17) Lowe AA, Gionhaku N, Takeuchi K, Fleetham JA. Three-dimensional CT reconstructions of tongue and airway in adult subjects with obstructive sleep apnea. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 1986;90:364-374.
- 18) 장현호, 김재승, 이충국. 하악골 후방이동 수술후 기도 공간과 두개 및 경추 각도의 변화에 관한 연구. *대한구강악안면외과학회지* 2000;26:115-131.
- 19) Enacar A, Aksoy AU, Sencift Y, Haydar B, Aras K. Changes in hypopharyngeal airway space and in tongue and hyoid bone positions following the surgical correction of mandibular prognathism. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 1994;9:285-290.
- 20) Lew KK. Changes in tongue and hyoid bone positions following anterior mandibular subapical osteotomy in patients with Class III malocclusion. *Int J Adult Orthodon Orthognath Surg* 1993;8: 123-128.
- 21) 조병욱, 안병근. 하악골 시상골 골절단술후의 설골과 상기도의 변화에 관한 연구. *대한구강악안면외과학회지* 1990;16:1-5.
- 22) Rasani MR, Inthavong K, Tu JY. Simulation of pharyngeal airway interaction with air flow using low-re turbulence model. *Model Simul Eng* 2011;2011;5.

## Abstract

# Computational fluid dynamic(CFD) analyses of the upper airway after mandibular setback operation in skeletal class III patients

Sang-Hyun Park

School of Dentistry

Seoul National University

**Purpose** : Mandibular setback using bilateral sagittal split osteotomy in orthognathic surgery of skeletal class III patient causes structural change of soft tissue, and many studies have demonstrated that mandibular setback causes volumetric decrease of the upper airway and weakening of the respiratory function during sleeping.

Computational fluid dynamics (CFD) is a validated method to accurately compute aerodynamic flow characteristics of the upper airway, which allows description of regional flow and pressure profiles in the upper airway. The aim of this study was to investigate the changes of flow patterns in the upper airway after mandibular setback in skeletal class III patients based on computational fluid dynamics.

**Methods** : The subjects were five patients (three males and two females); who underwent bilateral sagittal split osteotomy to set back the mandible in the Department of Oral and Maxillofacial Surgery at Seoul National University Dental Hospital between 2015 and 2017. Two CBCT scans from each patient, one of which was taken pre-operatively(3 months before the surgery) and the other post-operatively (6 month after the surgery), were used retrospectively. The dataset collected from all CBCT scans was exported in DICOM file format; and then read into MIMICS software to obtain 3D models of the upper airway pre-operatively and post-operatively. 3-matics software was used to set the reference plane, and the cross-sectional area in the upper airway was calculated for each reference plane to compare airways post-operatively and pre-operatively.

The STL files of the 3D models of two patients were imported into Midas NFX software for mesh generation and flow simulation. Flow simulations and analysis of inspiratory upper airway flow were performed using the second-order k- $\epsilon$  turbulence model. Average pressure values of all mesh points in each reference plane were calculated, and the pressure profiles in the post-operative upper airways were compared with those of the pre-operative upper airways.

**Results** : As a result of comparing the pre-operative and post-operative cross-sectional areas, it was observed that the average cross-sectional area decreased by 7.56% in the five patients after surgery. From the uvula to the epiglottis, a decrease of -17.71% in cross-sectional area was observed. Flow analysis using computational fluid dynamics revealed an average pressure drop of 38.3% in two patients due to a decrease in

airway area after surgery. In this study, the reduction of airway space and the pressure drop in the airway after mandibular setback surgery were confirmed by CFD analysis.

.....

**keywords : Upper airway, Computational fluid dynamics, Mandibular setback, Flow analysis, Pressure drop**

***Student Number : 2014-23037***