

## 유한요소법을 이용한 인두의 기능이상에 대한 생체역학적 모델

김성민<sup>1</sup> · 김성재<sup>1</sup> · 배하석<sup>2</sup> · 최병철<sup>3</sup>

건국대학교 의과대학 의학공학부<sup>1</sup>, 연세대학교 의과대학 재활의학교실<sup>2</sup>, 춘해대학교 의료공학과<sup>3</sup>

(2003년 10월 6일 접수, 2003년 12월 29일 채택)

### A Biomechanical Modeling of Human Pharyngeal Muscular Dysfunction by Using FEM(Finite Element Method)

Sung Min Kim<sup>1</sup>, Sung Jae Kim<sup>1</sup>, Ha Suk Bae<sup>2</sup>, Byeong Cheol Choi<sup>3</sup>

School of Biomedical Engineering College of Medicine Konkuk University<sup>1</sup>, Dept. of Rehabilitation Medicine, College of Medicine Yonsei University<sup>2</sup>, Dept. of Biomedical Engineering, Choonhae College<sup>3</sup>

(Received October 6, 2003. Accepted December 29, 2003)

**요약**: 인두는 구강과 식도, 비강과 폐의 중간에서 능동적으로 구강을 통해 섭취되는 음식물과 비강을 통해 흡입되는 공기의 통로역할을 하는 주요한 기관이다. 본 연구는 유한요소기법을 이용한 인두의 3차원 구조의 재구성 과정을 거쳐 인두의 생체역학모델을 구현하였으며, 연하곤란환자의 인두근육의 주요부분에 대한 구조적 변형특성을 3가지로 분류하여 유한요소기법을 이용하여 인두내의 압력에 대한 형상의 변형을 관찰 후 최적화 과정을 거쳐 각 부분에서의 추정 압력 구배를 추정하여 연하과정에서 내부에 생성되는 압력의 연속적인 압력분포를 추정하였다. CT에 의한 인두의 변형 형상을 추정하여 입의 압력에 의한 인두구조의 변형 형상을 유한요소 해석에 의해 계산한 후 비교하여 실제 인두강 내에 형성되는 압력을 추정하였다. 재료적 특성은 인두의 기능이상 시 근조직경화가 발생, 즉 stiffness 가 증가하는 것으로 가정하여 응력-변형률 관계에 있어서 각각 25%, 50%, 75%씩 증가시켜 분석하였다. 이러한 인두의 생체역학모델은 인두기능장애를 가진 환자의 치료 계획 수립에 도움이 되는 유용한 자료를 제공할 것으로 생각된다.

**Abstract**: Pharynx is a system transporting foods by peristaltic motion(contraction and expansion movement) into the esophagus and functioning as airway passages. In this study, structural changes of pharyngeal dysfunction are analyzed by biomechanical model using CT and FEM(finite element method). Loading condition was assumed that equal pressure was loaded sequentially to inside of pharyngeal tissue. In order to analyze the pharyngeal muscular dysfunction by biomechanical model, the pharyngeal dysfunctions was classified into 3 cases. Taking into account the clinical complication by neuromuscular symptoms such as pharyngeal dysfunction after stroke, we assumed that a change of material property is caused by muscular tissue stiffness. A deformation of cross sectional area of the pharynx is analyzed increasing the stiffness 25%, 50%, 75% in each case on the basis of stress-strain relationship. Based on three-dimensional reconstruction of pharyngeal structure using limited factor - techniques and the optimization procedure by means of inverse dynamic approach, the biomechanical model of the human pharynx is implemented. The results may be used as clinical index illustrating the degree of pharyngeal muscular dysfunction. This study may be used as useful diagnostic model in discovering early deglutitory impediment caused by physiological or pathological pharyngeal dysfunction.

**Key words**: Dysphagia(연하곤란), Pharynx(인두), Muscular Dysfunction(근육마비), FEM(유한요소해석)

## 서 론

인두는 구강과 위장, 비강과 폐의 중간에서 능동적으로 구강

을 통해 섭취되는 음식물과 비강을 통해 흡입되는 공기의 통로역할을 하는 주요한 기관이다. 이러한 인두에 병리학적 혹은 생리학적 이상이 생기는 경우 이로 인한 인두의 기능부전은 치명적인 결과를 초래할 수 있으며, 특히 노령화와 함께 수반되는 인두기능의 약화는 조기발견이 되지 않는 경우 여러 가지 합병증을 동반할 수 있다. 따라서 이러한 인두기능부전의 종합적인 분석은 환자의 치료와 재활에 필수 불가결한 요소라

할 수 있다.

인두기능의 임상에서의 연구는 현상학적인 면에 치중되어 왔고 다양한 환자집단에서 발견되는 인두기능의 비정상적인 징후와 연계시키려는 시도에 그쳐왔다. 이러한 시도들은 정확한 기전 메커니즘의 규명이 미흡한 채 가설에 머무는 한계를 극복하지 못하고 있으며 X-선과 video를 이용한 간단한 영상분석을 연구하는 수준에 머물고 있다. 즉 이전의 연구는 인두의 연동운동시의 가시적인 현상의 묘사에 중점을 두어왔으며 다른 한편에서는 주요한 인두근육의 근전도를 통하여 근육의 활동 정도와 인두강내의 실제 압력을 측정하려는 시도[1]가 있어왔다. 이러한 연구들이 인두의 작용에 대한 여러 가지 중요한 사실들을 제공하였던 것은 사실이나 여러 가지 생리학적인 변수들을 고려한 신뢰할 수 있는 모델은 제시하지는 못하였다.

인두의 기능장애 중에서 가장 많이 발견되는 중례의 하나가 연하곤란증(dysphagia)으로서, 연하곤란증은 뇌졸중이나 외상성 뇌 손상을 입은 환자에서 각기 않게 보고되고 있으며, 이로 인한 합병증[2,3]을 생각할 때에 예방 및 치료가 필수적이라 하겠다.

노령인구 군에서 많이 발견되는 뇌졸중 후 연하곤란은 30%에서 45%까지 발생한다고 보고되며, Gordon 등에 의하면 급성 뇌졸중 환자의 45%, Elliott[4]에 의하면 심한 뇌 손상을 받은 환자들의 51%에서 연하곤란증이 있다고 보고되고 있다. 연하곤란증은 환자가 느끼는 불편감이 심하며, 영양실조나 흡인성 폐렴 등의 합병증으로 인해 사망으로까지 이어질 수 있다는 점에서 객관적인 진단 및 치료가 필수적이라고 하겠다. 연하곤란증의 진단에 있어서는 환자에 대한 병력 청취 및 이학적 검사가 가장 중요하고 기초적이지만 환자의 치료 및 예후의 방침을 결정하는 데에는 부족하다. 이를 위해서 여러 가지 방법들이 시도되고 있으며 그중 비디오투시검사가 가장 표준적이며 환자에게 적절한 치료를 하기 위해서는 필수적인 검사로 받아들여지고 있다. 최근에는 초음파 내시경 검사 및 ECG, 식도 내압 검사(manometry)[5] 등의 검사 방법들이 시도되고 있으나 이를 이용하여 산출된 결과들을 개관적인 지표로 받아들이기에는 아직 많은 문제점들이 남아 있다. 현재 비교적 간단하게 시행할 수 있는 섬유조영검사를 이용한 연하곤란증의 진단 방법들이 제시되고 있으며, 비디오투시검사에 비해 정량적 측정이 가능하며 인두통과시간의 산출이 용이[6,7]하다는 장점이 있다.

현재 인두부의 생리학적 혹은 병리학적인 이상에서 파생되는 인두장애 환자의 경우 임상적인 몇 가지 진단 과정을 거치 있으나 여러 가지 제약으로 인해 정확한 진단을 내리기 어렵다. 특히 video와 X 선을 이용한 videofluoroscopy의 경우 노출되어야 하며, 환자의 협조가 반드시 필요하다. 또 주요한 근육들에 대한 활동상태를 검증할 수 있는 경우 실제의 근전도 신호를 얻기 위해서는 전극을 구강을 통해 삽입시켜 인두강 내부의 근육에 접촉을 얻어야하나 이러한 것은 실제로 거의 불가능한 경우에도 환자의 구강 내에서 인두근육의 수축이 유동에 의하여 정확한 측정이 거의 불

인두에 대한 유한요소해석은 인두부 구조를 모델링함으로써, 인두의 기능에 대한 역학적인 예측을 하여 인두기능부전의 효과적 수술에 있어서 도움을 줄 수 있는 방법이다. 식도 상부에서 인두를 지나가는 bolus의 motion을 sinusoidal 수축에 의한 연동운동(peristaltic motion)을 유체역학 모델을 제안하였으며, Kim[9] 등은 이를 이용하여 인두의 bolus의 이동을 설명하는 생체 모델을 제안하였다.

본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 인두 근육이 가진 기능이상을 구조 해석적 측면에서 모델링을 시도하여 기능 이상 환자의 진단 및 치료 계획 수립에 도움이 되는 방법을 제시하고자 하였다.

## 연구 방법

### 1. 재료 물성치

인두조직의 재료적 특성은 등방성 재료로 가정하였으며, Poisson비는 비압축성 물질에 가까운 수치로  $\nu=0.45$ 로 주었다. 점탄성(Viscoelasticity) 거동 모사를 위하여 Kim[10] 등이 제안한 relaxation modulus 와 탄성 응답 함수를 응력완화 실험, 일축성 인장실험(그림 1)과 Prony 시리즈를 사용하였다.

인두조직의 재료적 특성인 점탄성(Viscoelasticity) 거동을 나타내기 위하여 응력완화 값과 탄성응답 함수를 실험에 의하여 구하였으며, 점탄성 거동을 모사하기 위한 Prony series는 다음과 같다.

$$G_R(t) = \frac{G(t)}{G_0} = 1 - \sum_{i=1}^n g_i(1 - e^{-t/\tau_i})$$

여기서,  $G_R(t)$  는 normalized relaxation modulus,  $g_i$ 는 weighting factor,  $\tau_i$  는 완화 시간 상수,  $G_0$  는 instantaneous stiffness( $t=0$ )이며, 각 인자들은 응력완화 실험 값으

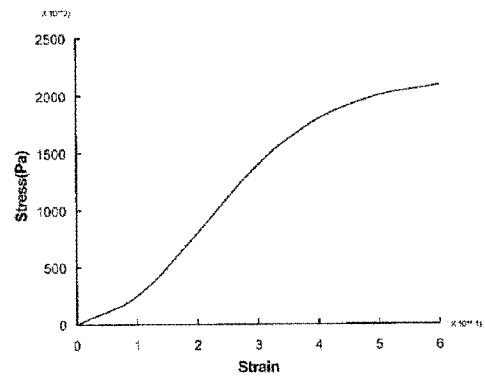


그림 1. 인두조직의 응력-변형관계  
Fig. 1. Stress-strain relationship of pharyngeal tissue used for approximate nonlinear elasticity of element

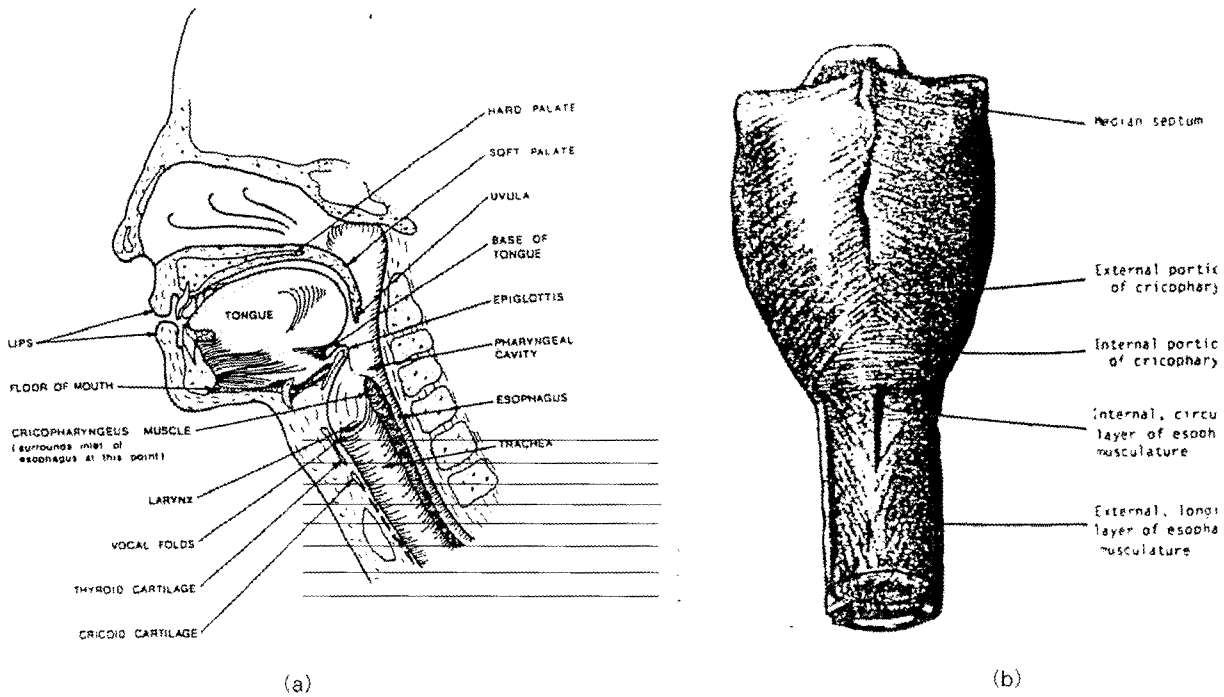


그림 2. (a) 인두와 주위 조직의 형상, (b)인두와 식도근육조직의 후부.

Fig. 2. (a) Schematic image of pharynx and adjacent structures. (b) Schematic posterior view of the musculature of the hypopharynx and adjacent esophagus

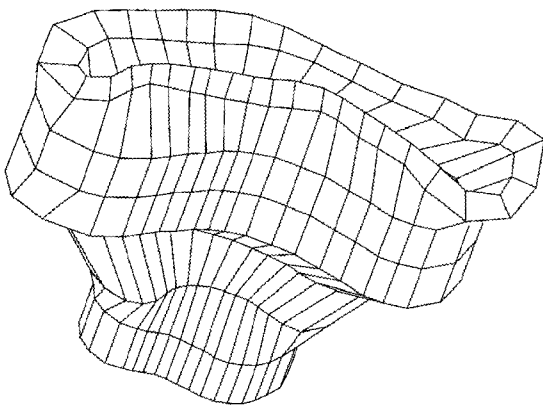


그림 3. 인두의 유한요소 모델.

Fig. 3. Finite element model of pharynx.

로부터 nonlinear least square fitting에 의해 구해진다.

## 2. 인두 구조의 유한요소 해석

융상인두부(cricopharyngeus)에서 설골기저부(base of tongue)에 이르는 부분에 대한 고주 2차원 CT단면영상 이미지를 얻었으며, 이러한 영상이미지를 3차원으로 재구성하여 유한요소 해석을 위한 기본 입력 모델을 구성하였다. 대상은 36세의 정상 남성으로 하였으며 10ml의 방사선비투과성(radio opaque)물질을 삼켜 구강에서 식도에 이르는 전과정을 CT영상으로 얻었으며 기준시간과 인두의 크기는 영상정보에 포함되었

다. CT는 그림 2(a)에서와 같이 7mm간격으로 촬영하였고 각 레벨에서는 각각 0.1초 간격으로 5단계의 단면적의 변형과정이 관찰되었다.

이때 각 레벨에서 인두의 내부 단면적이 최대가 되는 시점을 T5로 하였으며, 최대수축시점은 T1으로 하였다. 인두의 CT영상으로부터 유한요소모델의 기본 mesh 형성은 각 레벨에서 72개의 절점을 지정하였으며 전체 252개의 3D Brick element를 사용하여 구성하였고(그림 3). 유한요소 프로그램은 ABAQUS 5.7-3과 전후처리 프로그램 Hypermesh 2.1a를 사용하였다.

상부인두의 단면중심에 원점을 위치하도록 하여 이를 기준으로 좌표계를 정의하였다. 즉 Z축은 X축 그리고 Y축과 직교하도록 하였으며 X축은 medial lateral방향, Y축은 anterior posterior방향으로 정의하였다. 모델에서 두께는 동일한 것으로 가정하였고 인두의 근위부에서 원위부까지의 각단면 영상을 축방향(Z축)으로 쌓아올림으로써 인두의 3차원 모델을 구현하였다. 그림 3에 전체적인 모델의 구조를 나타내었으며 모델의 재료적 성질은 동일한 것으로 정의하였다.

압력값들은 초기 3mmHg에서 36mmHg까지 6mmHg씩 증가시키면서 해석하였고, 경계조건은 해부학적 인두 상단부의 posterior 부분은 경추에 의해 구속받고, 양쪽 횡측면 자유도를 고정하였다.

인두의 근육에 대한 기능이상에 대하여 다음 3가지의 경우로 분류하여 해석하였다(그림 4).

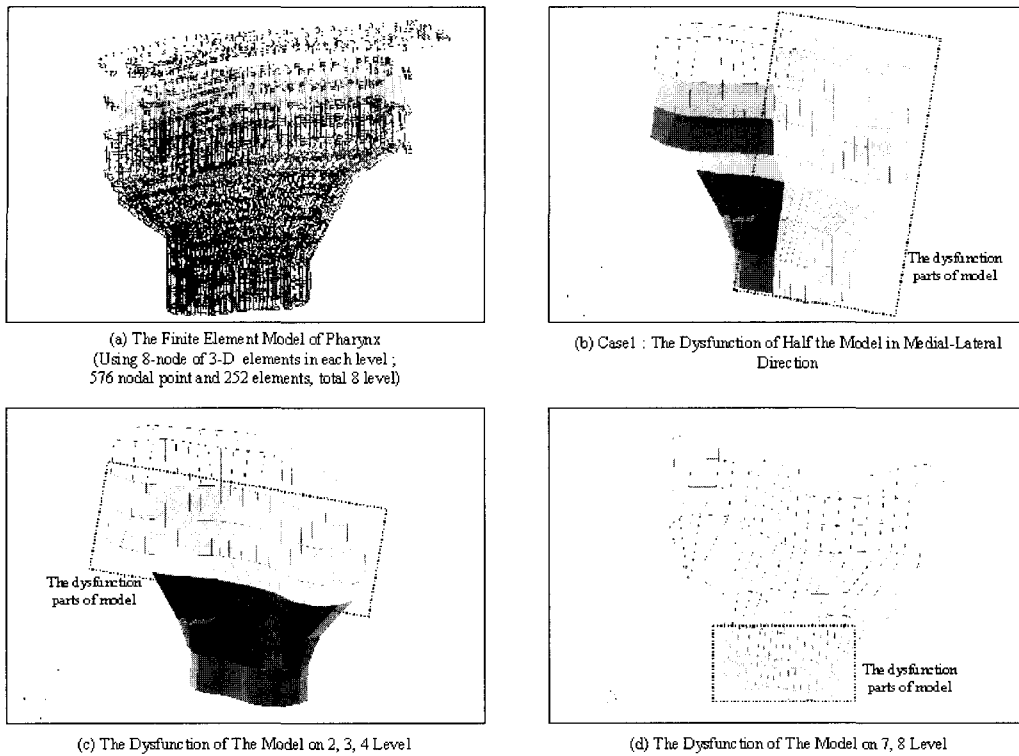


그림 4. 인두의 기능이상에 대한 유한요소 모델.  
 Fig. 4. Finite element model of pharyngeal muscular dysfunction

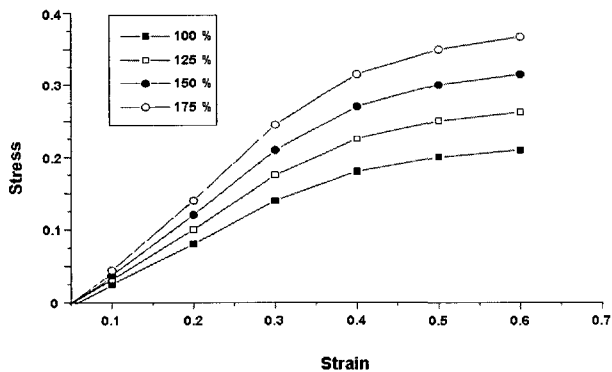


그림 5. 인두 근육마비에 대한 응력-변형률 관계  
 Fig. 5. Stress-Strain relation condition for pharyngeal muscular dysfunction

Case1 : medio-lateral 방향으로 모델의 절반이 이상이 있는 경우

Case2 : 2,3,4레벨에 이상이 있는 경우

Case3 : 7,8레벨이 이상이 있는 경우

인두의 연동운동에 따라 형성되는 인두강 내 bolus의 driving force는 압력구배로 나타나며 이에 대한 직접적인 측정이 매우 어렵기 때문에 CT에 의한 인두의 변형형상을 추정하여

임의의 압력에 의한 인두구조의 변형 형상을 유한요소 해석에 의해 계산한 후 비교하여 실제 인두강 내에 형성되는 압력을 추정하였다.

재료적 특성은 인두의 기능이상 시 근조직경화 발생으로 가정하였으며 이는, 즉 근조직의 stiffness가 증가하는 것으로 가정하여 응력-변형률 관계에 있어서 각각 stiffness를 25%, 50%, 75%씩 증가시켜 해석하였다(그림 5).

### 결 과

본 연구에서 모델의 시뮬레이션에 의해 얻어진 결과는 인두의 내경을 나타내주는 단면적과 기하학적 파라미터이다. 모델의 상부는 고정된 것으로 가정하였고 인두벽에 인가되는 외력에 대응하는 내부의 압력에 의한 resultant displacement를 계산하였다. inverse dynamics에 의한 이러한 계산과정은 최적화기법을 이용하여 balance pressure를 인두강내에 형성되는 swallowing pressure로서 산출하도록 하였다. 즉 일반적인 유한요소기법에 의하면 구조의 형상, 재료적 성질, 그리고 적절한 하중조건이 정해진 상태에서 절점에서의 변위를 직접 계산해내는 과정이라 할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 인체의 특성상 이와 같은 접근방법을 사용할 수 없기 때문에 inverse dynamic 접근 방식을 취하였다. 즉 CT에 의한 영상으로부터 변형된 인두의 형상을 추정하여 하중조건을 역으로 산출해내는 방식을 취하였다. 따라서 인두의 FE모델은 가정된 임의의 힘

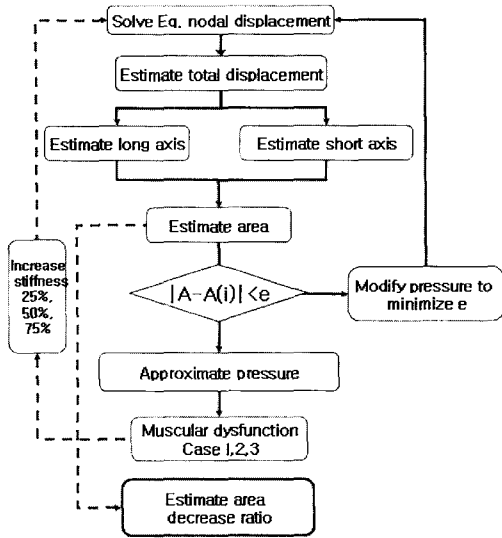


그림 6. 인두강내 압력추정 및 기능이상에 대한 단면적 감소율 풀이과정  
 Fig. 6. Solution procedure for estimating internal pressure of pharyngeal cavity and decrease ratio of cross-sectional area for muscular dysfunction

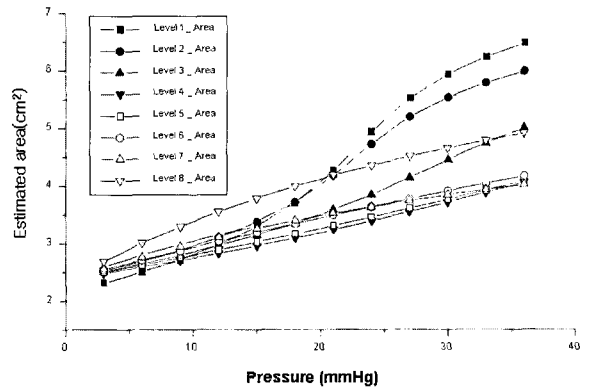


그림 7. 유한요소해석에 의한 정상 인두강내 단면적 추정치  
 Fig. 7. Estimated cross-sectional area of pharyngeal cavity by FE analysis

terior부분은 경추에 의해 구속을 받기 때문에 이 방향으로의 변위는 제한된다. 모델의 시뮬레이션은 가정된 일련의 내압을 인가하여 모델의 각 절점에서의 변위(radial 방향)를 구하고 이를 이용하여 단면적을 산출하였으며 CT영상으로부터 추출된 인두의 단면형상과 비교하여 가장 일치하는 것을 찾아 이때의 단면적을 산출하여 분석하였다. 원래의 CT영상으로부터 추출된 인두의 단면형상에서 산출된 단면적과 FE모델에 의해 산출된 단면적의 차이를 %에러로 정의하고 이것이 최소가 되는 때의 압력이 실제 인두강내에서 형성되는 압력으로 추정해 볼 수 있다. 이때 %에러의 최소화는 여러번의 최적화 과정을 거쳐 이루어 졌으며 이러한 과정을 그림 6에서 보여주고 있다 이렇게 산출된 인두강내의 압력구배는 기존에 보고된 조사자료와 비교되었으며 추정된 인두강내 상부의 세부부분의 레벨에서의 값이 Kahrilas[11]에 의해 추정된 압력구배치와 비교되었다.

모델 시뮬레이션 결과 추정된 압력구배는 10 55 mmHg범위에 분포되어 있으며 이는 소형압력센서를 비강을 통해 인두강내로 삽입하여 인두내의 압력구배를 측정하여 얻은 Kahrilas[11] 등에 의한 연구결과와 상응하는 결과라 할 수 있다. 인두전체 부분 가운데 상부의 4레벨의 압력분포는 하부의 그것과 다른 형태를 보이는 것으로 나타났다(그림 7). 이 두 부분의 차이는 상이한 해부학적인 구조의 차이에서 비롯된 것으로 보이며 따라서 상부의 수축속도(contraction velocity) 또한 원위부에 비해 높은 것으로 추정된다. 이에 대한 이유는 상부조직의 생리학적인 유연성과 원위부의 해부학적인 제한요소(piriforms and cricopharyngeus)에 기인한다.

정상 인두모델의 인두강 내의 임의의 압력에 대한 단면적 변화의 시뮬레이션 결과를 그림에서 보여주고 있으며 실제 압력구배 측정실험을 CT로 촬영한 결과와 상응한다고 할 수 있다.

이로부터 산출한 인두근의 파비로 인한 기능이상에 대한 예측결과인 근조직의 경화에 의한 단면적 감소율 변화추이는 모든 케이스에서 30mmHg까지 감소율이 증가하다가 이후 감소하는 추세를 보이며, 가장 큰 단면적 감소율을 보여준 사례는

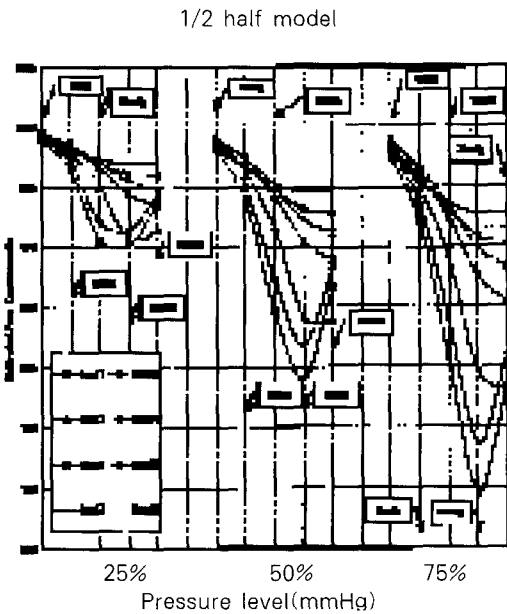


그림 8. 유한요소해석을 이용한 인두근육마비 단면적 감소율 추정치 (Case 1 : 1/2half model,좌 : 25%, 중 : 50%, 우 : 75% 증가)  
 Fig. 8. Estimated cross-sectional area decrease ratio of pharyngeal muscular dysfunction by FE analysis (Case 1 : 1/2half model, left: 25%, center: 50%, right: 75% increase)

에 의한 인두구조의 형상을 추정하여 실제 인두강내에 형성되는 압력을 추정하려는데 그 목적을 두고 있다.

모델의 경계조건으로 상부에 위치한 모든 절점에서의 자유도는 고정된 것으로 가정하였고 인두의 해부학적 구조상 pos

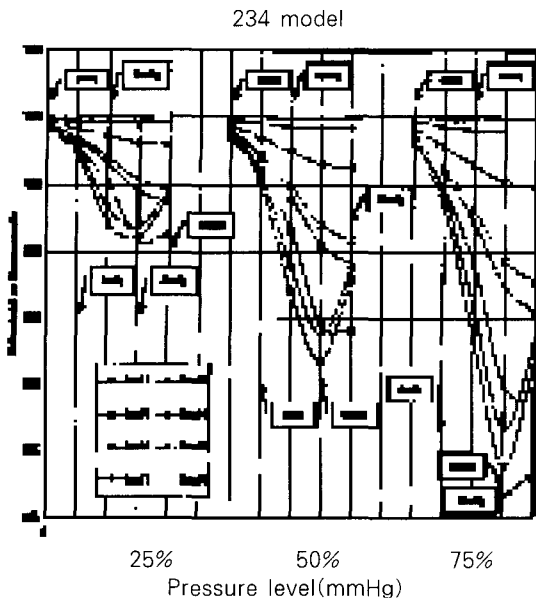


그림 9. 유한요소해석을 이용한 인두근육마비 단면적 감소율 추정치 (Case 2 : 234 model, 좌 : 25%, 중 : 50%, 우 : 75% 증가)  
 Fig. 9. Estimated cross-sectional area decrease ratio of pharyngeal muscular dysfunction by FE analysis (Case 2 : 234 model, left: 25%, center: 50%, right: 75% increase)

Case 2였으며, 인두모델 전체의 감소율은 Case 1이 상대적으로 컸다.

Case 1 모델의 경우, 9mmHg 일 때까지 모든 레벨의 단면적은 정상인두의 단면적과 비교했을 때 1%~8%사이의 감소율을 보이며, 레벨4, 즉 UES(Upper Esophageal Sphincter)를 기준으로 레벨1,2,3의 상부는 경화가 25% 증가했을 때 30mmHg의 압력에서 8~10%, 50%증가했을 때, 15~21%, 75%증가했을 때, 20%~30%의 감소율을 보이며, 레벨 5,6,7,8의 하부는 경화가 25% 증가했을 때 36mmHg의 압력에서 3~5%, 50%증가했을 때, 5~12%, 75%증가했을 때, 7%~15%의 감소율을 보인다(그림 8).

Case 2 모델의 경우, Case 1과 마찬가지로 9mmHg 일 때까지는 모든 레벨의 단면적이 정상인두의 단면적에 비해 1%~7%사이의 미미한 감소율을 보이며, UES(Upper Esophageal Sphincter)를 기준으로 레벨1,2,3의 상부는 경화가 25% 증가했을 때 30mmHg의 압력에서 7~9%, 50%증가했을 때, 15~18%, 75%증가했을 때, 20%~27%의 감소율을 보인후 감소하는 추세이며, 레벨 4,5, 부위는 25%일 때 36mmHg에서 5~6%, 50%일 때 9~11%, 75%일 때 12~15%를 보이며, 레벨 6,7,8의 하부는 경화의 정도가 증가하여도 단면적의 감소는 5%이내의 수치를 나타내고 있다(그림 9).

Case 3 모델의 경우, 레벨 7,8의 하부의 단면적 감소율이 경화가 25% 증가했을 때 36mmHg의 압력에서 2~5%, 50%증가했을 때, 4~9%, 75%증가했을 때, 6%~12%의 감소율을 보이며, 다른 나머지 부위는 경화의 정도가 증가하여도 단면적

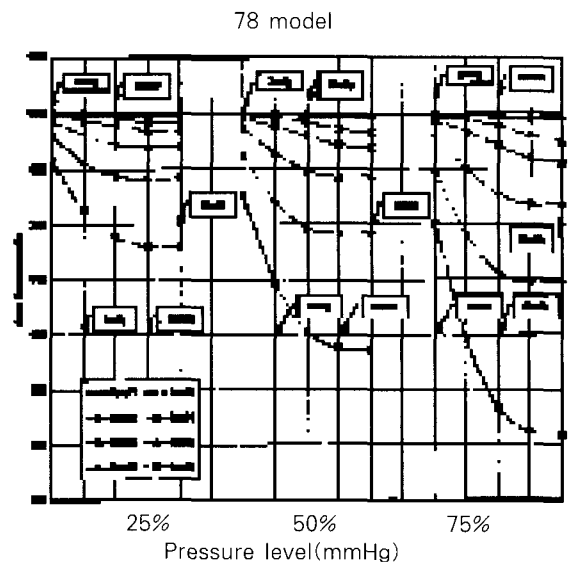


그림 10. 유한요소해석을 이용한 인두근육마비 단면적 감소율 추정치(Case 3 : 78 model, 좌 : 25%, 중 : 50%, 우 : 75% 증가)  
 Fig. 10. Estimated cross-sectional area decrease ratio of pharyngeal muscular dysfunction by FE analysis (Case 3 : 78 model, left: 25%, center: 50%, right: 75% increase)

의 감소는 7%이내의 감소율 수치를 나타내고 있다(그림 10).

### 토 의

본 연구에서는 Y.C.Fung에 의해 제안된 Quasi-linear viscoelastic theory에 의한 인두조직의 점탄성 특성을 고려하고, 인두기능의 이상 시 근조직 경화의 영향을 고려하기 위해 stiffness를 증가시켜 이에 따른 탄성의 감소로 인해 인두구조의 변형이 각 모델에 따라 부분적인 구조의 왜곡으로 나타내는 유한요소 해석모델을 구현하였으며 이러한 모델을 구성하는 파라메타들은 실험적인 방법 즉 stress relaxation test로부터 도출한 reduced stress relaxation function과 일축성 인장시험에서 구한 지수함수형태의 elastic response로 알려진 함수에서 구하였다. 이러한 reduced stress relaxation function과 지수함수형태의 elastic response의 수학적 convolution을 시행하여 시간에 따른 응력의 주기적 변형상태를 해석할 수 있는 함수를 도출하였다. Cyclic load test 실험결과와 이론적으로 구한 모델과 비교한 결과 초기에 발생하는 오차를 제외한 이후의 시간에 따른 변화에서는 비교적 일치하는 것을 관찰하였으며 따라서 이러한 모델이 인두조직의 점탄성특성을 잘 나타낼 수 있음을 확인하였으며 이러한 결과는 곧바로 인두의 생체역학적 모델에 적용하여 유한요소기법을 이용한 인두의 3차원 구조의 재구성과 inverse dynamic 접근방식에 의한 최적화 과정을 거쳐 인두의 기능시 내부에 형성되는 압력의 연속적인 압력구배를 추정할 수 있었다. 인두내의 압력에 대한 형상의 변형을 관찰하여 각 단면에서의 단면적을 산출하고 이를 실제의 CT영상자료와 비교하여 최적화 과정을 거쳐 각 부분

에서의 추정 압력구배를 구하였다. 인두전체 부분 가운데 상부의 4레벨의 압력분포는 하부의 그것과 다른 형태를 보이는 것으로 나타났다. 이 두 부분의 차이는 상이한 해부학적인 구조의 차이에서 비롯된 것으로 보이며 따라서 상부의 수축속도(contraction velocity) 또한 원위부에 비해 높은 것으로 추정된다. 이에 대한 이유는 상부조직의 생리학적인 유연성과 원위부의 해부학적인 제한요소(piriforms and cricopharyngeus)로 생각된다. 윤상연골(cricoid carilage)과 갑상선연골(thyroid carilage)이 anterior부분에 위치하고있어 원위부의 자유도를 제한하고 있으므로 이 부분의 변형형태가 상부와 다른 양태를 보이게 된다. 그러므로 이 부분에서의 X축과 Y축 방향으로의 변위는 상대적으로 작은 값을 갖게되고 따라서 단면적의 변화도 적게된다.

레벨4 이하, 즉 UES(Upper Esophageal Sphincter)부분에서의 추정된 인두압력구배는 감소하는 경향을 보이는데 이것은 이 레벨이하의 원위부에서의 압력구배는 다른 경향을 보이는 것으로 추정된다. 근위부에서 원위부로 접근함에 따라서 압력구배는 감소하는 경향을 보여준다. 레벨4이하(arytenoid & post cricoid level)에서는 압력의 변화에 의한 뚜렷한 형상의 변화가 관찰되지 않았으며 이는 이 부분이 해부학적으로 thyroïd cartilage와 cricoid cartilage로 둘러싸여 있기 때문이다 할 수 있다. FE모델의 검증은 위하여 CT영상으로부터의 결과와 모델시뮬레이션에 의한 결과를 비교하였다. 또한 현재까지 보고된 인두부에 대한 압력구배의 측정결과를 모델에 의한 결과와 비교하여 보았다. 그림 7에서 나타낸 바와 같이 모델의 시뮬레이션에 의해 얻어진 상부의 세 레벨의 결과와 알려진 측정결과에 의한 압력구배치를 비교하여 보았다. 최근 Ka-hrillas[12,13,14] 등은 bolus volume에 의한 인두부의 단면적의 변화에 대한 연구결과를 보고하였다. 그는 인두내부의 동적변화의 발생을 관찰하였다. 본 연구에서는 인두부에서 다양한 압력구배의 변화를 quasi static방법에 의해 추정할 수 있었으며 얻어진 결과에 의하면 인두부의 압력구배는 근위부에서 원위부에 이르는 전과정에 걸쳐 변화를 보였다. 또한 인두부의 최대 변화는 posterior방향보다는 anterior방향으로 발생하였으며 더욱이 인두의 posterior부위에 국소적인 압축응력의 집중현상을 추정할 수 있었다. 유한요소모델 시뮬레이션에 의해 인두의 각 부분에서의 압력구배가 산출되었으며 근위단에서 원위단에 이르는 동안 인두강내의 압력구배는 변화하는 것을 관찰하였으며 이는 CT영상에서 관찰된 인두의 형상변형 결과와 일치함을 알 수 있었다. 모델로부터 인두강내의 압력분포를 추출하였고 이를 이전의 연구에서 보고된 실험결과와 비교하여 본 결과 본 연구의 결과와 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

이러한 진단모델은 중풍이나 외상성 뇌손상에 의한 연하곤란, 인두근의 마비, 인후암의 전이에 의한 인두근조직의 변형 등에 의한 여러 가지 병리학적 또는 구조적인 변형을 생체역학적인 모델을 통하여 시뮬레이션이 가능하며, 이를 활용하여 치료계획이나 수술후의 재활치료에 유용한 자료로 이용될 수 있을 것으로 전망된다.

## 결론

본 연구에서는 유한요소기법을 이용한 인두의 3차원 구조의 재구성과 inverse dynamic 접근방식에 의한 최적화 과정을 거쳐 인두의 기능시 내부에 생성되는 압력의 연속적인 압력구배를 추정할 수 있었다. 이러한 연구결과를 이용하여 인두기능의 이상정도를 예시해주는 임상지표로서 이용할 수 있을 것으로 사료된다. 인두내의 압력에 대한 형상의 변형을 관찰하여 각 단면에서의 단면적을 산출하고 이를 실제의 CT영상자료와 비교하여 최적화 과정을 거쳐 각 부분에서의 추정 압력구배를 구하였다. 하나의 연구성과로는 이러한 접근방식을 인두기능장애를 가진 환자군에 적용하여 비교 분석할 경우 임상자료로서 유용할 것으로 사료된다.

실제 인두기능이상에 대한 조기 진단에 적용하기 위하여 향후 보완되어야 할 과제로서, bolus의 점성력과 운동속도를 고려한 모델을 개발하여야 할 것으로 사료된다. 또한 근전도 측정 등에 의한 인두의 주요한 근육에 대한 활동과 작용기전에 대한 연구를 수행하여 인두근의 활동기전과 일반 생체조직의 근육의 활동기전의 차이점을 밝혀내고 또한 정상인과 비정상인의 근전도 신호의 패턴사이의 차이점과 연하장애가 있는 환자들의 근전도 신호 패턴에 대한 연구가 병행되어야 한다. 또한 정상인과 비정상인 집단에 대한 광범위한 적용을 통해 실제 임상에서 사용될 수 있는 진단사례를 수집한다.

본 연구는 인두부의 생리학적 혹은 병리학적인 이상에서 발생할 수 있는 연하장애를 조기에 발견하고 인두기능의 비정상기전을 알아낼 수 있는 유용한 진단모델로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 진단모델은 인두근의 마비, 인후암의 전이, 암 종양절제, 인두식도부의 협착 등에 의한 여러 가지 병리학적 또는 구조적인 변형을 생체역학적인 모델을 통하여 시뮬레이션이 가능하며 이를 활용하여 치료계획이나 수술후의 재활치료 계획수립에 유용한 자료로 이용될 수 있을 것으로 전망된다.

## 참고문헌

1. FMS. McConnel, "Analysis of pressure generation and bolus transit during pharyngeal swallowing". Laryngoscope, Vol. 98, pp. 71-78, 1988
2. Finestone HM, Greene Finestone LS, Wilson ES, Teasell RW, "Malnutrition in stroke patients on the rehabilitation service and at follow up: prevalence and predictors". Arch Phys Med Rehabil Vol. 76, pp. 310-316, 1995
3. Gordon C, Hewer RL, Wade DT, "Dysphagia in acute stroke", Br Med J vol. 295, pp. 411-414
4. J.L.Elliott, "Swallowing disorders in the elderly", Geriatrics, vol. 43, pp. 95-113, 1988
5. DJ. Curtis, DF. Cruess and AH. Dachman, "Normal

- erect swallowing. Normal function and incidence of variations.*, Invest Radiol, Vol. 20, pp. 717-726, 1985
6. EM. Sokol, P. Heitmann, BS. Wolf and BR. Cohen, "Simultaneous cineradiographic and manometric study of the pharynx.", hypopharynx and cervical esophagus. Gastroenterology, Vol. 51, pp. 960-974, 1966
  7. P. Poudoux, P. J. Kahrilas, "Deglutitive tongue force modulation by volition, volume, and viscosity in humans.", Gastroenterology, Vol. 108 pp. 1418-1426, 1995
  8. Brasseur JG and Dodds WJ, "Interpretation of intraluminal manometric measurements in terms of swallowing mechanics", Dysphagia, Vol. 6, pp. 100-119, 1991
  9. Kim SM, McCulloch TM and Lim K., "Pharyngeal pressure analysis by the finite element method during liquid bolus swallow", Ann Otol Rhinol Laryngol, Vol. 109, No. 6, pp. 585-589, 2000
  10. Kim SM, McClouc and TM, Rim K., "Evaluation of the Viscoelastic Properties of Pharyngeal Tissue", Tissue Eng, Vol. 4, No. 4, pp. 393-398, 1998
  11. Kahrilas, P.J., Logemann, J.A. and Gibbons, P., Food intake by maneuver; an extreme compensation for impaired swallowing, Dysphagia, Vol. 5, pp. 155-160, 1992
  12. P.J. Kahrilas, J. Chen and J.A. Logemann, "Oropharyngeal Accommodation to swallow volume.", Gastroenterology, 1996
  13. P.J. Kahrilas, J. Chen and J.A. Logemann, "Three-dimensional modeling of the Oropharynx during swallowing.", Radiology, Vol. 194, pp. 575-579, 1995
  14. P. Poudoux, P.J. Kahrilas, "Deglutitive tongue force modulation by volition, volume, and viscosity in humans.", Gastroenterology, Vol. 108 pp. 1418-1426, 1995