

유한요소기법에 의한 인두의 생체역학모델에 관한 연구

김성민*·김남현*

연세대학교 의과대학 의용공학교실*

(1998년 5월 18일 접수, 1998년 7월 29일 채택)

A study on the biomechanical modeling of human pharynx by using FEM(Finite Element Method)

S.M. Kim*, N.H. Kim*

Dept. of Biomedical Eng., College of Medicine, Yonsei Univ.*

(Received May 18, 1998, Accepted July 29, 1998)

요약 : 인두는 구강과 위장, 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 구현하여 각단면에서의 단면적을 유한요소모델의 시뮬레이션 결과에 의한 변위를 이용하여 산출하여 최적화 과정을 거쳐 인두의 기능시 내부에 생성되는 압력의 연속적인 압력 분포를 추정할 수 있었다. 즉 인두내의압력에 대한 형상의 변형을 관찰하여 각 단면에서의 단면적을 산출하고 이를 실제의 CT영상자료와 비교하여 최적화 과정을 거쳐 각 부분에서의 추정 압력구배를 구하였다. 모델 시뮬레이션 결과 추정된 압력구배는 10-55 mmHg범위에 분포되어 있으며 전체 인두부 가운데 상부의 4레벨의 압력분포는 하부의 그것과 다른 형태를 보이는 것으로 나타났다. 이러한 인두의 생체역학모델은 인두기능장애를 가진 환자군에 적용하여 비교 분석할 경우 임상자료로서 유용할 것으로 사료된다.

Abstract : Human pharynx is unique, acting as a complex interchange between the oral cavity and esophagus, and between the nasal cavity and lungs. It is actively involved in the transport of food and liquid, producing the forces that guide the bolus into the upper esophagus and away from the adjacent larynx and lungs. This study intended to develop a biomechanical model of the human pharynx, utilizing Finite Element Method(FEM). Within each model changes in cross sectional intraluminal area were calculated and compared with the area from the computer-generated FE model. Area matching allowed estimation of intraluminal pressure gradients during swallow. The estimated pharyngeal pressure gradient varies from one region to another. The estimated pharyngeal pressure gradients showed different patterns for upper four levels and lower four levels. The contraction velocity for upper four levels is much higher than lower four levels. The higher contraction velocities and pressure gradients in the upper levels are consistent with the bolus velocities required for efficient swallow.

Key words : Pharynx, Biomechanical model, FEM(Finite Element Method), Intraluminal pressure, Swallow

서론

의료기술의 발전과 평균수명의 연장으로 인한 노령인구의 증가는 기존의 국민질병형태나 과거 의료기술의 미비로 인하여 주요관심의 대상에서 소외되었던 질병에 대한 새로운 인식을 필요

로 하게되었으며 임상에서의 진단이나 치료방법에 있어서 종합적이고도 새로운 접근방식을 요구하고 있다.

인두는 구강과 위장, 비강과 폐의 중간에서 능동적으로 구강을 통해 섭취되는 음식물과 비강을 통해 흡입되는 공기의 통로역할을 하는 주요한 기관이다. 이러한 인두에 병리학적으로 혹은 생리학적으로 이상이 생기는 경우 이로 인한 인두의 기능부전은 치명적인 결과를 초래할 수 있으며 특히 노령화와 함께 수반되는 인두기능의 약화는 조기발견이 되지 않는 경우 여러 가지 합병증

본 논문은 연세대학교 의과대학 교내연구비(1997년) 지원을 받았음.
통신저자 : 김성민, (120-752) 서울시 서대문구 신촌동 134
Tel. (02)361-5114, Fax. (02)313-9028,

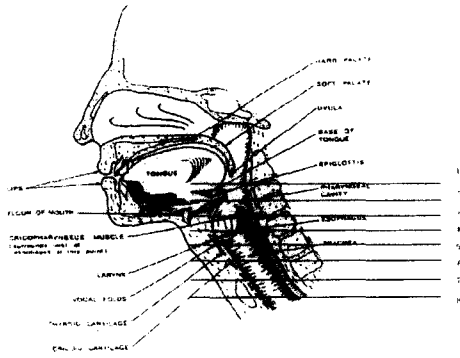


그림 1. A. 인두와 주위 조직의 형상
Fig. 1. A. Schematic image of pharynx and adjacent structures

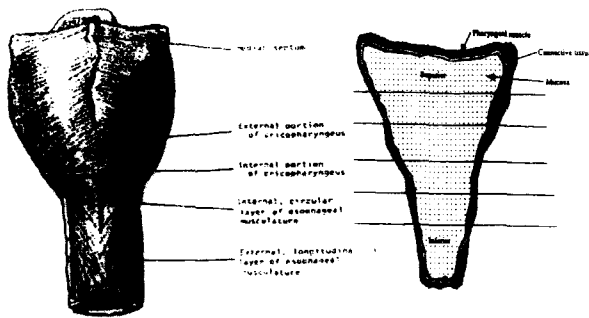


그림 1. B. 인두와 식도근육조직의 후부
Fig. 1. B. Schematic posterior view of the musculature of the hypopharynx and adjacent esophagus

을 수반할 수 있다. 따라서 이러한 인두기능부전의 종합적인 진단은 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 기전메카니즘의 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 활동정도와 인두강내의 실제 압력을 측정하려는 시도[2]가 있어왔다. 이러한 연구들이 인두의 작용에 대한 여러 가지 중요한 사실들을 제공하였던 것은 사실이나 여러 가지 생리학적인 변수들을 고려한 신뢰할 수 있는 모델을 제시하지는 못하였다.

인두의 기능장애 중에서 가장 많이 발견되는 증례의 하나가 연하곤란증(dysphagia)으로서 연하곤란증은 뇌졸중이나 외상성 뇌손상을 입은 환자에서 적지 않게 보고되고 있으며, 이로 인한 합병증[5,7]을 생각할 때에 예방 및 치료가 필수적이라 하겠다.

노령인구군에서 많이 발견되는 뇌졸중 후 연하곤란은 30%에

서 45%까지 발생한다고 보고되며, 기능적 손상뿐만 아니라, 탈수, 흡인성폐렴에 의한 높은 사망률 등의 결과를 초래한다. 연하곤란에 따른 장기간의 비관 식이는 비관의 처치 이상(misplacement), 식도 손상, 천공, 흡인성 폐렴, 기흉 등의 문제를 일으키며[1,4,9], 연하곤란증은 재활의학 영역에서 뇌졸중 및 외상성 뇌손상 환자에서 자주 접하는 증상으로, Gorden등[11]에 의하면 급성 뇌졸중 환자의 45%, Elliott[12]에 의하면 심한 뇌손상을 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 침상 평가만 가지고는 환자의 치료 및 예후의 방침을 결정하는 데에는 부족하다. 이를 위해서 여러 가지 방법들이 시도되고 있으며 그중 비디오투시검사가 가장 표적적이며 환자에게 적절한 치료를 하기 위해서는 필수적인 검사로 받아들여지고 있다. 최근에는 초음파 내시경 검사 및 ECG, 식도내압검사(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 심광조영검사를 이용한 연하곤란증의 진단 방법들이 제시되고 있으며, 비디오투시검사에 비해 정량적 측정이 가능하며 인두통과시간의 산출이 용이[7,10]하다는 장점이 있다.

연구방법

1. 인두의 해부학적 구조

해부학적으로 인두는 비강, 구강 및 후두의 뒤에서 두개골의 바닥으로부터 여섯째 경추골까지 뻗어 있으며 식도로 이어진다. 인두는 구강과 위장, 비강과 폐의 중간에서 능동적으로 구강을 통해 섭취되는 음식물과 비강을 통해 흡입되는 공기의 통로역할을 하는 주요한 기관이다(그림 1). 즉 구강을 통해 섭취되는 음식물(액체상태)을 연속적인 근육의 수축과 확대를 통한 연동운동을 이용하여 위장으로 전달할 수 있도록 해준다. 또한 인두는 비강을 통하여 흡입되는 공기가 막힘 없이 폐로 전달될 수 있도록 해주는 통로역할도 수행하고 있다.

이러한 인두에 병리학적 혹은 생리학적인 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 수반할 수 있다. 실제 임상에서 신뢰할 수 있는 인두기능의 부분적인 검사 방법으로는 비디오와 X선을 이용한 검사가 시행되고 있으며 근전도검사를 통한 국소적인 인두근육의 활동을 측정하는 경우가 있다. 또한 비강을 통해 내시경이나 압력센서들을 삽입 인두강내의 조직이상과

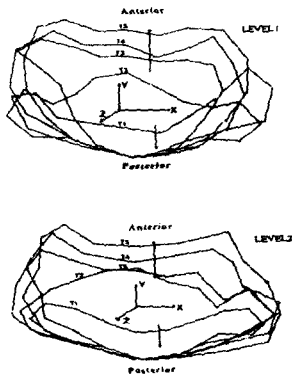


그림 2. 인두 각 레벨의 변형형상

Fig. 2. Perspective view of pharynx at each layer with deformed shape of it

압력을 관찰하는 경우도 있는데 각각의 검사법은 통증과 여러가지 인체에 유해한 요소를 지니고 있으며 종합적인 진단을 하기에는 몇 가지 부족한 점이 있다. 이러한 점을 보완하고 인체에 대한 충격을 최소화하며 국소적인 여러 가지 다른 검사에 의한 비효율성을 최대도로 개선한 컴퓨터에 의한 종합적인 진단모델의 개발을 위한 생체역학적 모델의 필요성이 대두되고 있다. 즉 이러한 인두의 생체역학적 모델을 통하여 인두근의 마비, 인두식도부의 협착, 인후암의 침윤, 암조직의 절제 등으로 인한 인두강 내에서의 비정상 압력구배(pressure gradient)를 미리 예견할 수 있는 길을 열 수 있다. 또한 의사들로 하여금 연하장애 환자들의 재활, 전기요법에 의한 치료, 유상인두부의 절개, 설골의 현수고정 등에 의한 임상효과를 미리 컴퓨터로 시뮬레이션 하여 그 결과를 예측해 볼 수 있게 된다. 더욱이 질병이나 노화로 인한 생리학적 혹은 병리학적인 인두근육조직의 변형에서 파생되는 효과를 미리 예견하여 임상에서의 치료계획을 수립하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 연구내용

인두가 지닌 해부학적 구조자체의 복잡성과 특이성으로 인해 임상에서 실제 적용할 수 있는 인두의 연하장애에 대한 체계적이고도 종합적인 연구결과는 얻기 어려운 상태이다.

인체의 여러 기관 가운데 인간이 음식물을 섭취하는데 있어서 인두의 기능은 절대적이라 할 수 있다. 그러나 국내에서 이러한 인두의 기능적 특성에 관한 체계적인 연구, 특히 생체역학적인 연구는 다른 분야 (심장역학, 정형외과분야에서의 생체역학)에 비해 거의 이루어지지 않고 있었다. 최근 서구 특히 미국에서는 인구의 노령화와 암 등 질병에 의한 인두기능장애(연하장애) 환자가 급증하여 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 최근의 의료기술 특히 생체역학, 컴퓨터기술, 영상처리기술등의 발전으로 인해 이러한 질환의 기전에 관한 연구와 이를 통한 환

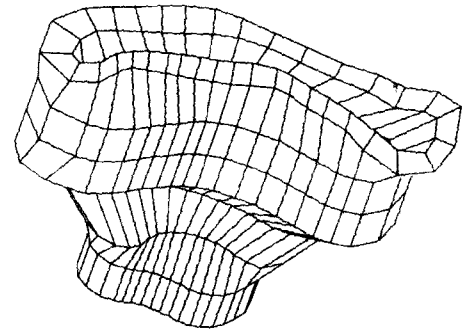


그림 3. 인두의 유한요소 모델

Fig. 3. Finite element model of pharynx

자의 조기발견 내지는 임상적 응용에까지 이르는 단계에 근접하고 있다.

인두의 기능은 인간이 매회 구강으로부터 섭취하는 음식물이 인두부로 전달되는 현상 즉 삼킴작용을 통하여 음식물이 위부로 전달될 수 있도록 하여주는 것으로 설명될 수 있다. 이러한 인두의 기능은 인두근육의 운동, 순환기계, 그리고 연체조직의 종합적인 조화에 의하여 이루어지는데 조직의 손상이나 변형에 의한 기능의 약화나 기능부전은 심각한 결과를 가져올 수 있다.

일반적으로 인두기능의 기전에 관한 정확한 이해 특히 생체역학적인 기초연구는 이러한 인두기능 장애의 조기발견이나 임상적인 응용을 위한 전제조건이다. 그러나 현재까지 뚜렷한 연구결과가 보고되지 않고 있는 실정이며 특히 생체역학적 연구의 기본인 인두조직의 재료적 특성은 조사된 바 없으므로 본 연구에서는 연조직의 특성인 점탄성의 실험적 측정을 통한 인두조직의 모델링을 시도하였다. 이러한 연구의 결과는 곧바로 인두의 생체역학적 모델에 이용되어 인두의 기능을 컴퓨터를 이용하여 시뮬레이션 할 수 있으며 이를 통한 정상인과 환자의 대비가 가능하고 환자의 조기발견을 가능하게 할 수 있을 것으로 전망된다.

인두기능장애가 있는 환자에 대한 적절한 치료를 위해서는 현재까지 정확하게 알려지지 않고 있는 인두의 작용기전에 대한 연구가 선행되어야 하고 이러한 연구는 인두의 생체역학적 모델에 대한 필요성을 증대시키고 있다. 인두의 생체역학적 모델은 인두조직의 재료적 특성, 구조적 특성, 동력학적인 요소를 모두 포함하는 종합적인 모델이 되어야한다. 특히 정상인과 인두장애가 있는 환자의 경우와는 차이점이 존재하며 이러한 차이점에 대한 규명은 모델에 대한 여러 가지 조건을 달리 부여함으로써 가능하다.

현재까지 조사된 바로는 인두와 연관된 구강[1,2]과 위[3,4]에서의 음식물의 섭취과정에 관하여 생체역학적인 관점에서 연구사례가 보고된바 있다. 그러나 인두에 관한 생체역학적 연구는 극히 미미하여 실제 임상적으로도 상당한 어려움에 직면한 실정이다. 인두의 생체역학적 관점에서의 연구는 세 가지 형태로 나누어 볼 수 있는데 운동학(kinematics), 동력학(kinetics),

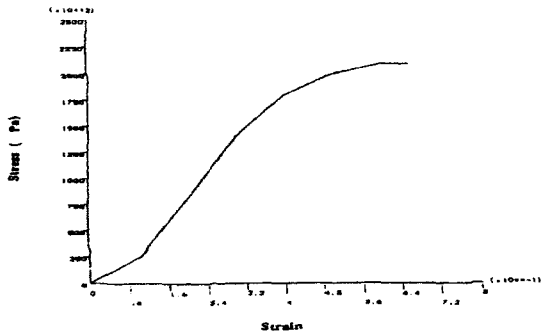


그림 4. 인두조직의 응력-변형 관계
 Fig. 4. Stress-strain relationship of pharyngeal tissue used for approximate nonlinear elasticity of element

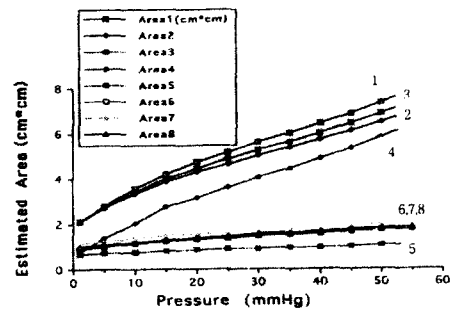


그림 6. 압력변화에 따른 각 레벨의 기하학적 변화
 Fig. 6. Estimated geometrical change of each level from FEM model according to pressure change

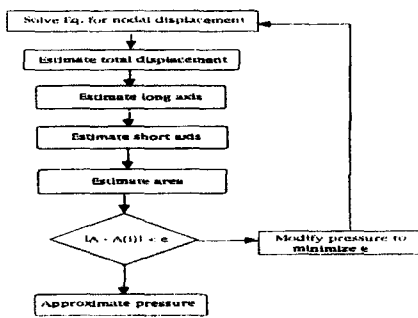


그림 5. 인두강내 압력 추정에 대한 풀이과정
 Fig. 5. Solution procedure for estimating pharyngeal swallowing

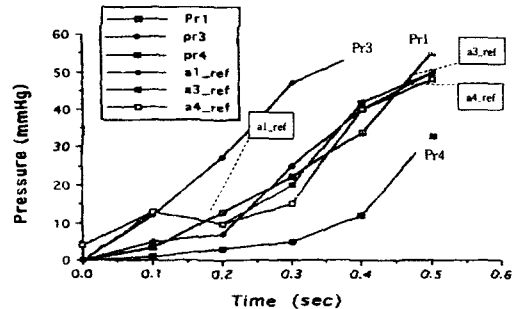


그림 7. FEM모델과 참고 측정값의 압력구배 비교
 Fig. 7. Comparison of pressure change between estimated from FEM model and interpolated data manometric measurement

그리고 근전도(EMG) 등이 있다. 이러한 연구들은 모두 최근의 연구이며 특히 인두조직의 재료적 특성에 관해서는 보고된 바 없다.

3. 연구개발 방법

1) 인두의 운동기전(kinematics) 연구

인두의 기능을 연구하기 위해서는 인두의 해부학적 구조와 인두를 구성하고있는 주요한 근육들의 기계적인 성질을 정확히 알고 이해하여야만 이에 대한 생체역학적 모델링이 가능하다. 따라서 인두의 조직학적 특성과 해부학적 구조 그리고 인두근의 기계적 성질에 대한 조사와 연구가 필수적이다. 이를 위해 CT 영상자료를 이용한 해부학적 구조와 근육의 기계적 강도에 대한 연구와 더불어 기능시의 운동기전에 대한 연구와 실험을 한다.

2) CT를 이용한 인두구조의 영상자료 수집

고속 CT를 이용하여 정상인과 비정상인의 전체인두부에 대한 2차원 단면 영상자료를 수집하고 시간적인 변화에 따른 인두부의 구조적 변화를 추적하고 이러한 데이터를 근거로 3차원 영상 처리 기법을 적용하여 입체적인 인두부의 3차원 영상을 재구성하기 위한 기본자료들을 수집한다.

3) 영상처리기술을 이용한 3차원모델 구현 및 유한요소법에 의한 구조해석

고속 CT와 컴퓨터를 이용하여 인두구조의 3차원 영상구조를 구현하고 유한요소법에 의한 인두강내의 역학적 해석을 시도한다. 해부학적인 구조와 인두근의 생리학적 기계적인 성질을 고려한 실질적인 인두의 생체역학적 모델을 구현하고자 한다. 즉 인두의 기능 시에 인두강 내에 형성되는 근육에 의한 힘을 분석하고 이를 이용하여 정상인과 비정상인의 비교를 통한 차이를 데이터 베이스화 하여 임상에서의 진단에 이용하고자 한다. 보다 정확한 분석을 위하여 최적화 기법을 이용한 비교를 시행하여 오차를 최대한 줄인다.

4) 인두의 생체역학적 모델 구현

인두의 생체역학적 모델은 인두부의 모든 조건 즉 해부학적, 생리학적, 물성적 특성을 종합적으로 고려해야만 실제 임상에 유용한 모델로 사용 가능하다. 이러한 조건을 충족시키기 위하여는 기존의 모든 검사방법(X-선 촬영, CT, MRI, Video-fluoroscopy, Manometer, etc.)을 이용한 정확한 데이터를 수집하여

모델의 구현에 반영한다.

결과 및 분석

운상인두부(cricopharyngeus)에서 설골기저부(base of tongue)에 이르는 부분에 대한 고속 2차원 CT단면영상 이미지를 얻었다. 이러한 영상이미지를 3차원으로 재구성하여 유한요소해석을 위한 기본 입력 모델을 구성하였다. 실험은 36세의 정상남성을 대상으로 하였으며 10 ml의 방사선비투과성(radio-opaque)물질을 삼켜 구강에서 식도에 이르는 전과정을 CT영상으로 얻었으며 기준시간과 인두의 크기는 영상정보에 포함되었다. CT는 그림 1a에서와 같이 7mm간격으로 촬영하였고 각 레벨에서는 각각 0.1초간격으로 5단계의 단면적의 변형과정이 관찰되었다(그림 2). 이때 각 레벨에서 인두의 내부 단면적이 최대가 되는 시점을 T5, T1은 최대수축시점을 나타낸다. 인두의 CT영상으로부터 FE모델의 기본 mesh가 형성되어졌다. FE모델은 각 레벨에서 72개의 node점을 지정하였으며 전체 252개의 3-D Brick element를 사용하여 구성하였고(그림 3). 유한요소 프로그램은 ANSYS(Swanson Co.)를 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 동일(isotropic)한 것으로 정의하였다. Poisson비율은 비압축성(incompressible)물질에 가까운 수치로 산정 하였으며 탄성계수(modulus of elasticity)는 실험에 의해 측정된 인두조직의 비선형 응력-변형률의 곡선(그림 4)을 이용하여 처리하였다.

인두의 3차원 유한요소 모델

본 연구에서 모델의 시뮬레이션에 의해 얻어진 결과는 인두의 내경을 나타내주는 단면적과 geometrical parameter이다. 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 node점에서의 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 취하였

다. 따라서 인두의 FE모델은 가정된 임의의 힘에 의한 인두구조의 형상을 추정하여 실제 인두강내에 형성되는 압력을 추정하려는 데 그 목적을 두고 있다. 모델의 경계조건으로 상부에 위치한 모든 node점에서의 자유도는 고정된 것으로 가정하였고 인두의 해부학적 구조상 posterior부분은 경추에 의해 구속을 받기 때문에 이 방향으로의 변위는 제한된다. 모델의 시뮬레이션은 가정된 일련의 내압을 인가하여 모델의 각 node점에서의 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 5에서 보여주고 있다 이렇게 산출된 인두강내의 압력구배는 기존에 보고된 조사자료와 비교되었으며 추정된 인두강내 상부의 세부분의 레벨에서의 값이 Kahrilas[1]에 의해 측정된 압력구배치와 비교되었다.

모델 시뮬레이션 결과 추정된 압력구배는 10-55 mmHg범위에 분포되어 있으며 이는 소형압력센서를 비강을 통해 인두강내로 삽입하여 인두내의 압력구배를 측정하여 얻은 Kahrilas[1] 등에 의한 연구결과와 상응하는 결과라 할 수 있다. 인두전체 부분 가운데 상부의 4레벨의 압력분포는 하부의 그것과 다른 형태를 보이는 것으로 나타났다(그림 6). 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 할 수 있다. 운상연골(cricoid carilage)과 갑상선연골(thyroid carilage)이 anterior부분에 위치하고 있어 원위부의 자유도를 제한하고 있으므로 이 부분의 변형형태가 상부와 다른 양태를 보이게 된다. 그러므로 이 부분에서의 X축과 Y축 방향으로의 변위는 상대적으로 작은 값을 갖게 되고 따라서 단면적의 변화도 적게 된다.

McConnel등[3,6]은 정상인과 후두를 절제한 환자들에 있어서의 인두의 기능시에 인두강내에 형성되는 압력분포와 음식물의 성상을 조사하였다. 그들의 결과에 의하면 10 ml의 bolus에 의해 형성되는 인두압력은 대략 20-80 mmHg의 범위에서 변화하는 것으로 밝혀졌다. 또한 Sokol[7]에 의하면 인두조직의 상부, 중위부, 하부에 압력측정용 센서를 삽입하여 위치시키고 고속 CT촬영을 시도하였는바 인두부의 압력이 20-70 mmHg에 분포하는 것으로 조사되었다. Cerenko[4]는 인두에서 위장으로의 액체화된 음식물에 인가되는 힘에 대해 정량적인 분석을 시도하였고 그에 의하면 이러한 전달과정에 연관되어 조사되었던 압력분포는 본 연구의 모델 시뮬레이션 결과와 큰 차이를 보이지 않

는 것을 관찰할 수 있었다. 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. 레벨4 이하(arytenoid & post cricoid level)에서는 압력의 변화에 의한 뚜렷한 형상의 변화가 관찰되지 않았으며 이는 이 부분이 해부학적으로 thyroid cartilage와 cricoid cartilage로 둘러싸여 있기 때문이다 할 수 있다. FE모델의 검증을 위하여 CT영상으로부터의 결과와 모델시뮬레이션에 의한 결과를 비교하였다. 또한 현재까지 보고된 인두부에 대한 압력구배의 측정결과를 모델에 의한 결과와 비교하여 보았다. 그림 7에서 나타난 바와 같이 모델의 시뮬레이션에 의해 얻어진 상부의 세 레벨의 결과와 알려진 측정결과에 의한 압력구배치를 비교하여 보았다. 최근 kahrilas[8-10]등은 bolus volume에 의한 인두부의 단면적의 변화에 대한 연구결과를 보고하였다. 그는 인두내부의 동적변화의 발생을 관찰하였으나 변형에 의해 생성되는 단면적의 변화에 대한 부분에 대하여는 언급하지 않았다. 본 연구에서는 인두부에서 다양한 압력구배의 변화를 quasi-static방법에 의해 추정할 수 있었으며 얻어진 결과는 인두부의 압력구배는 근위부에서 원위부에 이르는 전과정에 걸쳐 변화를 보였다. 또한 인두부의 최대변화는 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 압력계측을 추출하였고 이를 이전의 연구에서 보고된 실험결과와 값들과 비교하여 본 결과 본 연구의 결과와 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 유한요소기법을 이용한 인두의 3차원 구조의 재구성 및 inverse dynamic접근방식에 의한 최적화 과정을 거쳐 인두의 기능시 내부에 생성되는 압력의 연속적인 압력구배를 추정할 수 있었다. 이러한 연구결과를 이용하여 인두기능의 이상 정도를 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.

향후 보완되어야 할 연구로써 근전도측정에 의한 인두의 주요한 근육에 대한 활동과 작용기전에 대한 연구를 수행하여 인두

근의 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 재활에 유용한 자료로 이용될 수 있을 것으로 전망된다. 더욱이 이러한 모델은 연하장애의 정도와 병이나 노화에 관련된 근육의 무기력화로 인해 파생되는 인두이상을 조기에 진단하여 안전한 치료계획을 수립할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. P. J., Kahrilas, J. A., Logemann and P., Gibbons, "Food intake by maneuver; an extreme compensation for impaired swallowing", *Dysphagia*, Vol. 5,, pp. 155-160, 1992
2. FMS. McConnel, "Analysis of pressure generation and bolus transit during pharyngeal swallowing". *Laryngoscope*, Vol. 98, pp. 71-78, 1988
3. FMS. McConnel, Ms. Mendelsohn and JA. Logemann, "Examination after total laryngectomy using manofluorography", *Head Neck Surg*, Vol. 9, pp. 3-12. 1986
4. D. Cerenko, FMS. McConnel and RT. Jackson, "Quantitative assessment of pharyngeal bolus driving forces", *Otolaryngol Head Neck Surg*, Vol. 100, pp. 57-63, 1989
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. FMS. McConnel, D. Cerenko and MS. Mendelsohn, "Dysphagia after laryngectomy", *Otolaryngo. Clin. N. Am.*, Vol. 21, pp. 721-726, 1988
7. 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
8. P. J. Kahrilas, J. Chen and J. A. Logemann, "Oropharyngeal Accommodation to swallow volume.", *Gastroenterology*, 1996

9. P. J. Kahrilas, J. Chen and J. A. Logemann, "*Three-dimensional modeling of the Oropharynx during swallowing.*" Radiology, Vol. 194, pp. 575-579, 1995
10. P. Poudoux, P. J. Kahrilas, "*Deglutitive tongue force modulation by volition, volume, and viscosity in humans.*", Gastroenterology, Vol. 108 pp. 1418-1426, 1995
11. C. Gordon, R. L. Hewer, D. T. Wade, "*Dysphagia in acute stroke*", Br. Med. J., Vol. 295, pp. 411-414, 1987
12. J.L.Elliott, "*Swallowing disorders in the elderly*", Geriatrics, vol. 43, pp. 95-113, 1988