

inverse 접근 방법에 의한 각막의 물성치 연구와 엑시머 레이저 수술에의 응용

허 준영*, 신 정욱**, 한 근조*

*동아대학교 기계공학과

**인제대학교 의용공학과

Inverse Approach to Study the Mechanical Properties of the Human Cornea and its Application to the Excimer Laser Surgery

*Jun-Young Huh

**Jung-Woog Shin

*Geun Jo Han

ABSTRACT

This study is focused on investigating the mechanical properties of the human cornea and its shape through the inverse nonlinear finite element approach using the clinical and experimental data. The results of the inverse approach were used to construct the finite element model of the photorefractive excimer laser surgery for the myopia patients. The results of the finite element model were compared with those of the current clinical experiences and showed good agreements. Finally this study came to the conclusion that the finite element method has potential of the application to the medicine.

I. 서론

근시 및 난시교정을 위하여 최근 국내외적으로 excimer laser를 이용한 photorefractive 수술이 널리 행해지고 있다[1]. Excimer란 Excited Dimer의 복합어로서 Argonfluoride 가스 복합체의 자외선 스펙트럼에서 나오는 193nm의 파장을 가진 방출광의 일종이다[2]. 이 방출광은 조직간의 분자결합을 광화학적 작용에 의해 주위 조직에 대한 손실은 없이 분자결합만을 파괴하므로써 원하는 조직부위를 1 μ m까지 정확하게 절개 또는 절제를 가능하게 한다[1]. 이러한 성질을 가진 excimer laser를 이용한 Photorefractive 수술의 원리는 중심부위(optical zone)를 일정한 반경과 깊이로 깎아내므로써 각막의 굴절률을 변경, 빛의 굴절 정도를 감소시켜 오목렌즈의 작용과 같은 효과를 유발하여 근시의 교정을 도모한다. 역학적 견지에서 볼 때, 본 수술에는 여러가지의 역학적 인자가 수술의 결과에 영향을 미치게 된다. 대표적인 인자들은, 각막의 물성치, 안압, laser에 의해 깎여진 깊이, 수술부위의 크기, 그리고 수술전 각막의 형상 등이 있다. 이러한 인자들은 실제 임상에서도 중요한 역할을 하는 것으로 인지되고 있다[1]. 특히 본 연구에서는 유한요소법

을 이용하여 각막의 물성치와 수술전의 각막의 형상을 기존의 임상자료와 실험결과[3]를 이용하여 규명하고자 하였다. 이를 바탕으로 유한요소법을 이용하여 위의 여러 인자를 변화시켜 이에 따른 수술의 결과를 예측, 분석하여 현재의 임상결과와 비교 분석하고 그 실효성을 입증하였다.

II. 연구 방법

물성치와 각막의 형상 규명

유한요소법을 이용하여 각막의 수술 전후의 형상변화를 고찰하기 위해서는 안압이 가해지기전 상태의 형상이 필요하다. 각막의 형상은 여러가지의 방법으로 측정이 가능하나 본 연구에서는 임상에서 쓰이는 corneal topography의 결과를 이용하였다. Corneal topography는 각막의 중심부위에서 가장자리까지의 곡률반경의 변화를 제공해 준다. 실제로 각막의 형상은 축대칭이 아니나, 각막의 중심부에서 일정한 거리에서의 곡률반경 평균치를 계산하여 제공하게 된다. 곡률반경은 2차 도함수로 표시가 가능하므로 이를 Runge-Kutta의 수치해석법으로 풀면 각막의 형상을 표시할 수가 있다. 하지만 이러한 vivo 상태의 형상은 이미 안압이 부과되어 있다는 점에 주목하여야 한다. 따라서 안압이 부과되지 않은 상태, 즉 stress free 상태의 형태를 가지고[3], 이에 각막의 가정 물성치를 바탕으로 안압을 유한요소법에서 부과한 후, 변형 후의 형상을 Corneal topography에서 해석한 형상과 비교하였다. 본 연구에서는 각막의 형상을 축대칭 가정 하에 2차식으로 표시하였다. 각막은 인체내의 어느 soft-tissue와 마찬가지로 비선형의 성질을 가지고 있다[4]. 여기서 soft-tissue의 일반적인 성질인 nonhomogeneous, viscoelastic 그리고 nonisotropic의 성질도 고려가 되어야 하나 그 정량적 측정의 자료가 전무하여, 본 연구에서는 homogeneous, isotropic, nonlinear elastic을 가정하였다. 더구나 안압이 정상 조건하에서는 다른 soft-tissue보다도 매우 작은 변형을 나타내어 [3,5,7] 본 연구에서는 bi-linear의 성질을 채택하였다.

Bi-linear의 성질을 여러가지로 변형하여 평균 안압 17mmHg를 부과하여 corneal topography 분석의 결과와 비교한 결과 신[3]의 실험 측정치 결과가 타당하다는 결론에 도달하였다. 그림.1.에 각막의 안압 부과전의 형태와 구속조건, 그림.2.에는 각막의 물성치가 표시되어 있다. 그리고 대부분의 soft-tissue가 비압축성의 성질을 가지므로[4] Poisson ratio는 0.49로 가정하였다. 그리고 공막이 각막보다 3 내지 4배의 강도를 가지고 있다는 연구[6]에 기초하여 각막의 가장자리의 변형은 없는 것으로 가정하여 구속하였다. 본 연구에는 범용유한요소 프로그램인 ANSYS Ver. 5.0(교육용)을 사용하였다.

Excimer Laser 수술의 모델링

전술한 바와 같이 본 수술에는 여러가지의 역학적 인자가 관여하여 수술의 결과에 그 영향을 미치게 되므로, 위에서 규명한 각막의 형상과 물성치를 기본으로 하여 각 인자의 변화에 따른 수술의 결과를 유한요소법에 의하여 simulation을 하였다. 수술후 각막의 형상변화에 따른 굴절률의 변화를 고찰하기 위해서는 수술하기전, 단지 안압만을 부여했을 때의 굴절률과의 비교가 필요하다. 각막의 굴절을 변화는 곡률반경의 변화에 기인하므로 각막의 변형 전후의 형태를 2차식으로 선형회귀분석한 후 중심부의 곡률반경을 식(1)을 사용하여 계산하였다.

$$R = \frac{\{1 + (Z'')^2\}^{\frac{3}{2}}}{|Z''|} \quad (1)$$

수술에 관여하는 인자의 변화가 수술의 결과에 미치는 영향을 고찰하기 위해서 아래와 같이 그룹을 나누어 근시의 교정효과를 고찰하였다.

- Group A : 수술 깊이의 변화(40 μm - 80 μm)
- Group B : 수술부위 직경의 변화(3.0mm - 8.0mm)
- Group C : 안압의 변화(13mmHg - 21mmHg)
- Group D : 수술전의 각막두께(0.45mm - 0.65mm)

각 그룹에서 그 외의 조건은 안압 17mmHg, 두께 0.55mm, 수술의 깊이 60 μm, 그리고 수술의 직경을 5.0mm로 통일하였다.

III. 결과

그림.3.에 수술 직경 5.0mm, 안압 17mmHg하에서 수술의 깊이 변화가 40 μm에서 80 μm까지 변할 때 그에 따른 diopter 감소량이 나타나 있다. Diopter의 변화, 즉 근시교정의 정도는 수술의 깊이에 비례하는 경향을 나타내고 있다(Group A).

그림.4.는 수술의 깊이 60 μm, 안압 17mmHg하에서 수술직경의 크기 변화에 따른 diopter량의 변화를 나타내고 있는데, 비선형의 관계를 보여주고 있다(Group B).

그림.5.에서는 수술의 깊이 60 μm, 직경 5.0mm하에서 안압

의 변화가 수술의 결과에 미치는 영향을 예측하였다. 그 관계는 선형을 나타내었다(Group C).

그림.6.은 안압 17mmHg, 수술의 깊이 60 μm, 직경 5.0mm하에서 환자의 수술전 각막의 두께가 수술의 결과에 미치는 영향을 보여주고 있다(Group D).

IV. 토의

수술의 깊이가 결과에 미치는 영향은 그림.3.에서 나타나듯이 각막의 중심 부위를 깊게 절삭할수록 근시교정의 효과는 증가하게 된다. 이는 기하학적으로 볼 때, 주어진 직경하에서는 깊이가 깊을수록 optical zone에서의 곡률반경이 증가되는 현상에 기인한다. 절삭의 깊이가 클수록 각막의 구조는 약해져서 같은 입력력에서 각막중심부의 변형이 많이 일어나 곡률반경이 어느 정도 감소하게 되지만, 이 감소량은 수술에 의해 각막이 중심부위에서 변명해지는 정도를 넘지 못하고 있다는 것을 말해주고 있다. 만일 안압이 정상적인 범위를 넘어 과도한 값을 가지게 되면 수술의 효과는 상당히 감소하리라 예상된다.

수술부위의 크기에 따른 근시교정의 효과는 그림.4.에서 보듯이 정해진 수술깊이하에서는 수술 직경이 증가할수록 급격히 감소하는 경향이 나타난다. 직경 3.0mm 혹은 4.0mm일때 이론적으로는 상당한 교정의 효과가 있으나, 이는 수술부위의 가장자리에서 수술부위 외의 부위와는 곡률반경의 차이가 매우 크게 되어 동공의 크기가 크게 될 때는 빛의 산란효과를 초래하여 glare현상을 유발하므로 실제 임상에서는 피하고 있는 방법이다. 하지만, 직경을 3.0mm 혹은 4.0mm로 고정하되 이 수술부위의 가장자리도 아주 얇게, 점진적으로 깎아 이 현상을 극복할 수 있다면 고근시의 교정에도 응용이 가능하리라 사료된다.

그림.5.와 6.에서는 안압의 변화와 수술전 각막의 두께가 수술의 결과에 미치는 영향이 각각 예측되어 있다. 이러한 두가지 인자는 전자의 두가지 인자들 보다도 수술의 결과에 미치는 영향이 적고, 또 이것들은 환자의 고유성질로서 그 변화의 영역도 매우 작아 중요한 인자로는 사료되지 않는다. 이상의 연구를 종합하여 아래의 결론과 앞으로의 연구방향을 제시할 수 있었다.

- 1) 선정된 4가지 인자들중 수술의 깊이와 수술 직경이 가장 큰 영향을 미치는 인자들로 판명되었다.
- 2) 특히 그림.3.과 4.에 나타난 결과는 현재 발표된 임상적 결과[1]와도 정량적 일치치를 보여 주었다.
- 3) 본 연구에서는 각막의 비선형 성질을 이용하였는데 이는 각막의 선형성을 가정한 결과[7]보다는 정량적으로 임상과 일치하였다.
- 4) 그림.4.에서 고찰된 바와 같이, 고도의 근시환자 교정은 optical zone에서 뿐만아니라 수술의 가장자리에서의 변형도 고려되어야 한다.
- 5) 본 연구에서는 한개의 모델만을 채택하여 수술 전후를 비교·분석하였다. 하지만 환자는 각기 다른 조건을 가

Inverse Approach to Study the Mechanical Properties of the Human Cornea and its Application to the Excimer Laser Surgery

지고 있으므로, 즉 크기, 두께, 안압, 각막의 형상이 각기 다르므로 환자별 고유의 수술전 모델의 설정이 행하여지면 customized된 근시교정 모델 구축이 가능하리라 사료된다.

6) 끝으로 유한요소법의 구속조건과 각막의 점성효과 및 방향성에 대한 연구가 뒷받침되면 현재 임상에서 야기되고 있는 시간의 경과에 따른 교정효과의 변화[8]도 유한요소법에 의해 고찰가능하여 보다 정확한 모델의 구축이 가능하리라 생각된다.

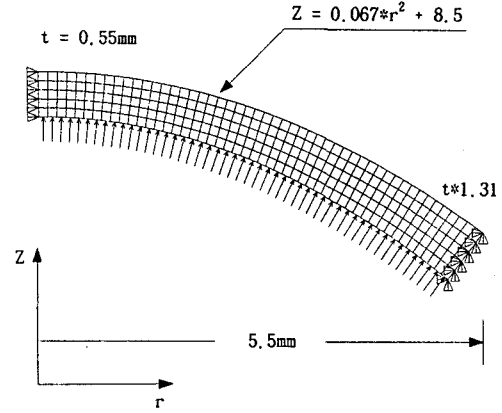


Fig. 1. Geometry and boundary conditions adopted based on the axis-symmetry

참고 문헌

- [1] 김 재호 : 엑시머레이저의 안과영역 응용, 대한의학 협회지 Vol.35, No.1, January, 1992, pp.119-124.
- [2] Dausch D, Klein, RJ, Schroder : Ophthalmic excimer laser surgery, Editions du signe, 1991, pp. 30-33.
- [3] Shin TJ : The Mechanical Properties of the Human Cornea, Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, U.S.A., 1992.
- [4] Fung YC. : Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues, Springer-Verlag, New York, 1981
- [5] Jue B, Maurice DM : The Mechanical Properties of the Rabbit and Human Cornea, J. Biomechanics, Vol.19, No.10, 1986, pp.847-853.
- [6] Woo SLY, Kobayashi AS, Schlegel WA, Lawrence C : Nonlinear Material Properties of Intact Cornea and Sclera, Exp. Eye Res., Vol.14, 1972, pp.29-39.
- [7] 신정욱, 김종현 : 엑시머 레이저 시술의 역학적 모

델, 대한의용생체공학회 춘계학술논문집, 1993, pp. 57-60.

- [8] 이영춘, 주광로, 한태원, 김재호 : 엑시머레이저에 의한 근시교정수술후의 시력 및 굴절변화, 대한안과 학회지, Vol.34, No.6, pp.514-522.

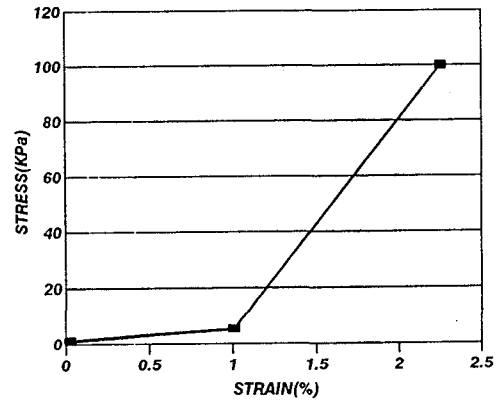


Fig. 2. This graph shows the bilinear material property of the human cornea [3]

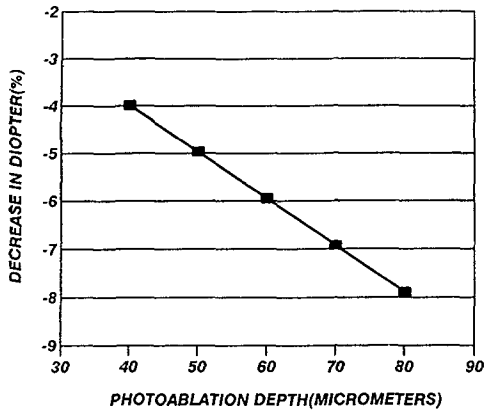


Fig. 3. This graph predicts the diopter changes with various values of photoablation depth at the apex. (Photoablation zone diameter=5.0mm, IOP=17mmHg, Corneal thickness at the apex=0.55mm)

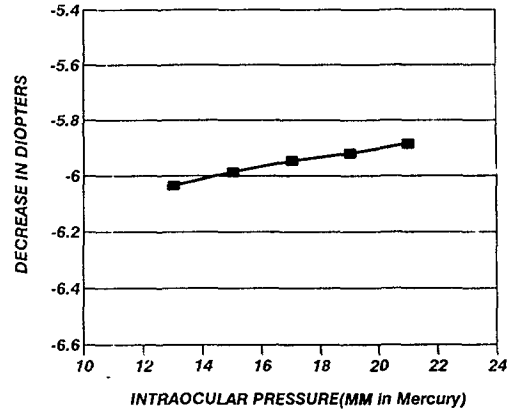


Fig. 5. This graph shows the effects of the intraocular pressure on the surgical outcomes. (Photoablation depth=60 μm, Photoablation zone diameter=5.0mm, Corneal thickness at the apex=0.55mm)

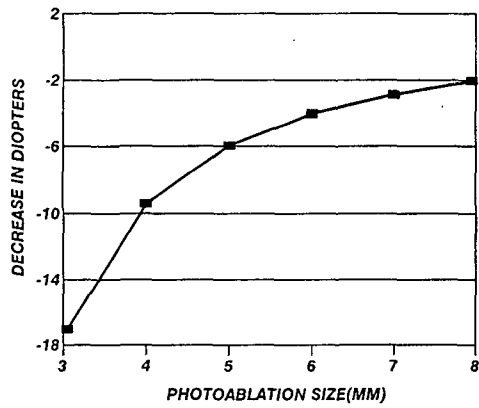


Fig. 4. This graph shows the diopter changes with various sizes of photoablation zone diameters. (Photoablation depth=60 μm, IOP=17mmHg, Corneal thickness at the apex=0.55mm)

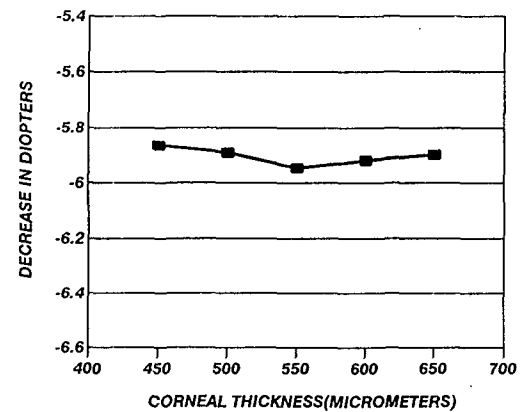


Fig. 6. This graph represents the effect of the corneal thickness before operation. (Photoablation depth=60 μm, Photoablation zone diameter=5.0mm, IOP=17mmHg)