

## 각막굴절수술의 역학적 고찰 및 새로운 기법의 시도

<sup>0</sup>신 정욱\*, 한 근조\*\*, 황 민철\*\*\*, 남 상희\*

\* 인제대학교 보건대학 의용공학과

\*\* 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 한국 표준과학연구원 인간공학 연구실

### A MECHANICAL INVESTIGATION OF CORNEAL REFRACTIVE SURGERIES AND PROPOSITION OF NEW TECHNIQUES

J.W. SHIN\*, G.J. HAN\*\*, M.C. WHANG\*\*\*, S.H.NAM\*

\* Department of Medical Engineering, Inje Univ.

\*\* Department of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

\*\*\* Ergonomics Lab., Korea Research Institute of Standards and Science

#### Abstract

This study investigated the effects of mechanical factors involved in several corneal refractive surgeries on the surgical outcomes. Then we proposed possible new techniques from the mechanical point of a view utilizing finite element method. The models studied are: circumferential keratotomy, combination of excimer laser photorefractive keratectomy and circumferential keratotomy for myopia treatment, arcuate keratotomy for astigmatism treatment. The cornea was assumed to be nonlinear elastic and almost incompressible material as the most soft tissue in the human body. In the circumferential keratotomy the effect of the incision location was investigated. The angle and location of the incision were varied to predict the surgical outcomes in the arcuate keratotomy. The finite element analysis results showed that the location of incision was a critical factor affecting the surgical outcomes in the circumferential keratotomy. In the combination of the excimer laser photorefractive keratectomy and circumferential keratotomy, it was predicted that the circumferential can increase or decrease the refractive power depending on the incision location or it can be used to adjust the overcorrection of undercorrection. In the arcuate keratotomy for astigmatism, the most diopter changes were predicted when the location and the angle of the incision were

3.0mm from the apex and 90°, respectively. In the arcuate keratotomy, the effects of an incision were studied within the incision area as well as outside the incision area. Also, the arcuate keratotomy with two incisions located on the opposite area of the cornea was also studied.

As a conclusion, the finite element method is a useful technique in the area of corneal refractive surgeries to develop new techniques.

#### 서론

각막 굴절 수술은 그 원리가 각막의 기하학적인 형태를 변화시켜 궁극적으로 각막 굴절률의 변화를 유발시킨다는 점에서, 역학적으로 해석이 가능하다는 것은 이미 알려져 있는 사실이고[1,2,3], 그 역학적인 원리에 대한 이해는 이미 고대의 문헌에서도 찾아 볼 수가 있다[4]. 그 중 근시교정을 위한 각막 굴절 수술의 유한요소법적인 해석은 이미 타당성이 입증되어 있다[1,2,3,9]. 하지만 대부분의 연구는 많은 임상 경험을 검토하여 유한요소법적인 접근 방법의 타당성 입증에 그쳤을 뿐, 새로운 기법 제시에는 미흡한 상태이다. 따라서 본 연구에서는 이미 입증된 방법을 바탕으로한 새로운 기법의 제시의 가능성 타진에 주안점을 두었으며, 특히 난시교정시 임상에서 간과할 수 있는 점을 지적하고자 한다. 물론 임상에서의 완전한 적용을 위해서는 그 결과가 다분히 정량적이어야

한다. 하지만, 각막의 물성치와 in-vivo 상태에서의 구속 조건에 대한 역학적인 규명이 미흡한 현 상태에서는 정량적인 예측은 기대하기가 어렵다. 하지만 정성적인 결과도 다분히 임상예의 guideline 제시에는 많은 도움을 줄 수가 있다. 이에 대한 예로 이미 근시교정을 위한 각막굴절의 한 방법인 radial keratotomy에 대한 유한요소법적인 정성적 결과는 그 타당성이 입증되었다. 따라서 본 연구에서도 정성적인 결과의 제시에 주안점을 두었으며, 정량적인 결과는 각막의 물성치에 대한 앞으로의 많은 실험적 연구를 거쳐 제시될 수가 있으므로 남겨두기로 한다.

이를 위해 우선 circumferential keratotomy를 유한 요소 기법으로 재현하여 incision의 위치가 수술의 결과에 미치는 영향을 예측하였다. 그 후 excimer laser를 이용한 근시교정과 함께 해석하여 circumferential incision이 excimer laser를 이용한 수술에 어떠한 영향을 미치는가를 예측하여 보았다. 여기서 사용한 circumferential의 의미는 각막의 위선을 따라 360° 전체에 걸쳐 각막 두께의 90%까지를 절개한 형태를 뜻한다.

한편 난시 교정을 위하여 각막의 일부분만 arc형태로 절개하는 arcuate incision을 해석하였다. 이때에는 incision의 각도와 각막 중심(apex)에서의 위치를 변화시켜 이들의 변화에 따른 각막의 굴절률 변화를 고찰하였다. 더불어 incision에 의한 각막의 형상 변화를 incision부근 뿐만 아니라 각막 전체를 통하여 조사하므로써 현재 임상에서 간과하기 쉬운 점을 지적하였다. 아울러 두 개의 arcuate incisions을 반대 방향에 위치하게 하여 각막 굴절률의 변화도 고찰하였다.

**연구 방법**

**1. 각막의 형상, 구속 조건 및 물성치**

각막의 형상은 anterior surface의 곡률 반경을 8.5mm로 하였으며, 그 두께와 직경은 각각 0.55mm, 11.0mm로 하였다.

각막의 가장자리인 limbus부분은 공막이 각막보다 3-4배의 강도를 가진다는 사실을[5] 기초로 변위는 구속하되 회전은 허용하였다. 안압은 각막의 후방면에 17mmHg의 face pressure을 안구의 nominal pressure를 대신하였다.

각막은 인체내의 일반적인 soft tissue와 같이 anisotropic, nonhomogeneous, nonlinear viscoelastic, 그리고 거의 비압축의 성질을 가진다. 하지만, anisotropic에 대한 실험적 data가 전무한 상태이고, 각막의 strip을 이용하여 시도한 실험에서 strain insensitive하다[6]는 결과와 각막의 형상을 유지하는 intrafibrils의 방향이 다분히 임

의적이라는 관찰에 비추어 본 연구에서는 각막을 nonlinear elastic의 성질을 가진다고 가정하였고[8](그림.1) 이를 두개의 linear 형태로 변환한 bi-linear 형태[9]를 취하였다. 이러한 가정을 가지고 유한요소법을 이용하여 고찰한 radial keratotomy에 대한 역학적 해석이 다분히 임상예의 경험과 일치[1,2,3]함은 현 상황에서 설득력을 가진다고 보아진다. 그리고 거의 비압축성이라는 가정으로 Poisson's ratio를 0.49로 하였다.

**2. 모델의 설정**

유한요소법에 의한 다양한 각막 굴절수술의 결과예측을 위하여 아래와 같은 모델을 설정하였다.

Baseline Model(기준 모델)

이는 수술전의 형상을 나타낸다. 즉 어떠한 시술도 하지 않은 상태를 말한다. 이때 안압을 17mmHg로 가하여 각막의 굴절률을, optical zone의 직경이 5.0mm로 한 상태에서 계산하였다. 각막의 굴절률은 각막의 중심(apex)에서 가장자리로 이동하면서 감소하므로, 즉 곡률반경이 증가하므로 중심에서 반경 2.5mm까지 0.1mm 간격으로 계산하여 그 평균값을 취하였다. 이렇게 하여 계산된 굴절률은 선정된 모델에서 예측된 굴절률과 비교하여 수술 후 굴절률 변화를 계산하게 된다. 이에 대한 계산 방법은 참고문헌[9]에 나타나 있다.

근시교정 모델

크게 두가지의 모델을 선정하였다. 첫번째는 circumferential keratotomy로써 각막의 둘레를 따라 360° 회전하면서 두께의 90%까지 절개한 것이다.(Model A). Model A에서는 각막 중심으로부터의 incision 위치에 따른 각막 굴절률의 변화를 예측하였다.

두번째로는 최근 보편화 되어 있는 근시교정을 위한 excimer laser photorefractive keratectomy와 circumferential keratotomy를 조합한 것(Model B)이다. 이러한 모델은 excimer laser를 이용한 근시교정술에 circumferential incision을 추가로 하였을 때의 그 영향을 파악하고자 함에 그 목적이 있다. Excimer laser를 이용한 수술에는 laser 조사 범위를 직경 5.0mm로 하였고, 조사 깊이는 60μm로 하였다. Excimer laser를 이용한 근시교정 수술에 대한 유한요소의 예측 결과는 참고 문헌[9]에 나타나 있는데 임상적으로는 일반적으로 6.0 diopter의 근시교정의 효과가 있는 것으로 보고되고 있다. 근시는 이상적으로 각막의 형태가 축대칭을 이루고 있으므로, 각막 단면의 반만을 가지고 모델링하였다.

난시교정 모델

난시에 대한 고찰은 그 형태가 근시와는 달리 축대칭이

지 못하므로, 각막 전체의 모델링이 필요하다. 난시교정의 첫번째 모델(Model C)로 한개의 arc type의 incision을 만들어 각막 굴절률의 변화를 baseline model과 비교하였다. 각막의 한 부분에만 incision을 만들었으므로 당연히 수술후의 각막 형상은 비대칭이 된다. 따라서 각막 굴절률의 변화 또한 각막 표면 전체에 걸쳐서 고찰하였다.

난시교정의 두번째 모델(Model D)은 같은 형상의 incision을 두개로 하되 그 위치를 마주 보게하여 한개의 incision때와의 굴절률의 변화를 고찰하였다.

Arcuate keratotomy에서 변화시킨 수술의 인자에 대한 그림과 그 범위가 그림.2와 표.1에 나타나 있다.

## 결과 및 토의

### 1. 근시교정 모델

#### Circumferential Keratotomy(Model A)

Circumferential keratotomy에서 incision의 위치에 따른 각막 굴절률의 변화가 그림.3에 나타나 있다. 안압은 17mmHg로, 절개의 깊이는 각막 두께의 90%로 고정하였다. Incision의 위치가 각막 중심부에 가까워 질수록 근시교정의 효과가 높은 것으로, 즉 각막의 중심부위가 편평해져서 각막 굴절률을 감소시키는 경향을 나타내고 있다. 이는 각막 중심부위의 구조적 변화로 인한 자연스러운 현상이라고 볼 수 있다.

하지만, 그림에서 나타나 있듯이 circumferential incision은 그 위치가 각막의 중심부에서 상당히 멀어지면, 예를 들어 4.0mm이상 위치하게 되면, 근시 교정 효과의 역 방향, 즉 원시 교정의 효과를 보이고 있다. 앞서 구축조건에서 서술했듯이 각막의 최가장자리인 limbus는 그 변위를 구축하고, 회전은 허용하였다. 한편, incision의 위치가 limbus에 가까워 질수록 incision 부근이 이제 회전의 중심 역할을 하게 되어 각막의 중심부위(optical zone) 변형의 수직 성분이 수평 성분보다 우위에 있어 각막의 형상이 optical zone부근에서 편평해지기 보다는 볼록해지는 경향을 보여 주고 있음을 뜻하게 된다. 하지만, 굴절률 변화량은 excimer laser를 이용한 근시교정의 경우 - laser 조사 범위=5.0mm(직경), 조사 깊이=60 $\mu$ m 일 경우 일반적으로 약 6.0 diopter의 교정, 참고문헌[9] - 보다 적다.

#### Combination of Circumferential Keratotomy and Excimer Laser Photorefractive Keratectomy(Model B)

본 모델링의 목적은 excimer laser를 이용한 수술을 받

은 환자에게 circumferential keratotomy를 시술하였을 때의 각막 굴절률의 변화를 예측함에 있다. 전술한 바와 같이 가장 많이 사용되고 있으며 임상적으로도 안전한 excimer laser 수술의 조건인 경우 excimer laser 수술만으로 6.0 diopter의 교정 효과가 있으나, circumferential keratotomy가 가미되면 그 효과가 incision의 위치에 따라 다소간의 변화를 일으킬 수가 있음을 예측할 수 있다. 그림.4에 의한 근시교정의 효과는 앞의 Model A의 결과에 비추어 incision의 위치에 따라 그 영향에 차이가 있음은 물론이다. 따라서 이러한 circumferential keratotomy는 그 자체 단독의 시술보다는 기존의 시술에 대한 보정의 한 방법으로 그 가능성이 있다는 결론이 유추된다. 즉 시술자의 실수나, 예기치 않은 상황으로 인한 과보정, 혹은 미달보정의 경우 그것을 조정하는 데에 사용한다면 보다 효과적일 것이다.

### 2. 난시교정 모델

#### Arcuate Keratotomy with One Incision(Model C)

표.1과 같이 incision의 위치와 incision angle을 변화시키면서 이에 따른 각막 굴절률의 변화를 예측하고자 하였다.

그림.5에 incision angle은 고정한 채 그 위치에 변화를 주어 굴절률의 변화를 예측해 보았다. 그림.5에 표시된 굴절률의 변화는 incision의 중앙을 통과하는 경선을 따라서 예측한 자료이다. 이때에는 각막의 위치가 각막의 중심에서 3.0mm 상에 위치할 때에 가장 큰 굴절률의 변화를 가져오음을 보여 주고 있다. 이는 임상에서도 주로 이에 상응하는 위치에 각막을 절개하는 경험과도 일치하고 있다.

그림.6은 incision의 위치를 3.0mm에 고정한 채, 절개 각도의 변화에 따른 굴절률의 변화를 예측하고 있다. 절개 각도가 90° 일때 가장 큰 교정의 효과를 보여주고 있음은 흥미로운 일이다. 이를 설명하기 위해서 다음의 경우를 가상해 보자. 고무 풍선에서 어느 한 부분이 다른 부분보다 얇다면, 즉 구조적으로 취약하다면 이 부분에서 많은 변형을 기대할 수가 있을 것이다. 하지만 이러한 취약 부분의 면적이 고무 풍선의 전체 면적에 비해 대단히 좁다면 미처 변형을 일으키지 못하게 된다. 반면 그 부분이 상대적으로 넓다면, 그 변형이 이번에는 고무 분포하게 되어 곡률의 변화에는 큰 영향을 미치지 못하게 될 것이다. 따라서 보다 많은 상대적인 곡률반경의 변화를 위해서는 그 취약부분의 넓이가 적당해야 할 것이다. 이에 상응하는 것이 incision 각도가 90°에 해당한다고 볼 수가 있다.

그림.7은 arcuate keratotomy에서 두개의 incision을 만들었을 때, incision 한개의 경우와 비교하여 예측한 자료가

다. 굴절률의 변화가 계산된 지점은 한개의 incision의 증상을 통과하는 경선이다. Incision의 위치에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타나 있다.

그림.8은 한개의 incision을 시술하였을 때 incision의 중앙부위와 정반대되는 지점( $\theta=135^\circ$ )의 굴절률의 변화를 예측한 것이다. 그다지 큰 변화를 보이고 있지는 않으나 incision의 위치가 거의 각막의 가장자리, 즉 limbus 부근에 위치할 때에는 약간의 변화를 보이고 있다. 이는 incision 부근의 회전이 과도하여 반대부위를 신장시키는 효과에 기인하는 것으로 추정된다.

그림.9는 incision부위 내에서의 굴절률의 변화를 예측한 자료이다. 중앙 부위가 가장 많은 변화를 경험하고, incision의 양단으로 이동할수록 그 변화가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이상과 같은 연구결과로 아래와 같은 결론을 도출함과 아울러 앞으로의 연구 방향을 제시할 수가 있었다.

- ① Circumferential keratotomy는 그 자체적으로는 근시교정의 효과가 다른 기법과 비교하여 효과적이지는 못하나, 다른 시술과 병행을 하게 되면, 보정 기술로는 효과적일 것으로 사료된다.
- ② 한개의 incision을 이용한 arcuate keratotomy에서 최대의 굴절률의 변화를 위해서는 최적의 incision angle과 위치가 존재한다.
- ③ 난시의 교정에 있어서는 incision 부근 뿐만 아니라 그 incision이 미치는 영향을 각막 표면 전체에 걸쳐서 고찰되어야 한다.
- ④ 이와 같이 유한요소를 이용한 각막 굴절수술에 대한 역학적 해석은 아직 각막의 물성치 및 in-vivo상태의 구속조건이 완전히 규명되지 않아 정량적인 결과를 기대하기는 어려운 상태이므로, 이들에 대한 실험적인 연구가 필요하다.
- ⑤ 이러한 정성적인 예측은 비록 임상예의 적용에는 미흡하나, 수술시 관여되는 여러 인자들의 영향의 경·중여하에 대한 판단은 가능하므로 많은 경우의 동물 실험을 거쳐 시도되는 새로운 수술기법의 개발에 있어서 그 실험의 경우의 수를 상당히 줄이는 데에 큰 역할을 하게 된다.

**참고문헌**

[1] RP Vito, TJ Shin, and B McCarey, "A Mechanical Model of the Cornea: The Effects of Physiological and Surgical Factors on Radial Keratotomy", J Refractive and Corneal Surgery, Vol.6, 1989, pp.82-88.  
 [2] PM Pinsky, DV Datye, "Numerical Modelling of Radial, Astigmatic, and Hexagonal Keratotomy", J

Refractive and Corneal Surgery, Vol.8, 1992, pp.164-172.  
 [3] T Huang, T Bisarasin, RA Schachar, and TD Black, "Corneal Curvature Change due to Structural Alteration by Radial Keratotomy", J Biomech., Vol.110, Aug. 1988, pp.249-253.  
 [4] GO Waring, "Chap.I: History of Radial Keratotomy", Refractive Corneal Surgery, Ed. by DR Sanders, RF Hofmann, and JJ Salz, Slack Incorporated, New Jersey, 1986  
 [5] SL-Y Woo, AS Kobayashi, WA Schlegel, and C Lawrence, "Nonlinear Material Properties of Intact Cornea and Sclera", Exp Eye Res, Vol.14, 1972, pp.29-39.  
 [6] RP Vito, SB Kirschner, JP Frazier, DL Vawter, G Waring, and B McCarey, "The Elastic and Viscoelastic Properties of the Human Cornea", Proc. of the 34th Annual Conference on Engineering in Medicine and Biology, 1982, p.134.  
 [7] TJ Shin, "The Mechanical Properties of the Human Cornea" PhD Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, U.S.A., 1992  
 [8] YC Fung, "Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues" Springer-Verlag, New York, 1981, p.211.  
 [9] 신정욱, 김재호, 한근조, 김만수, 사우진 "엑시머 레이저 수술의 역학적 모델" 대한안과학회지, 1995; 36(3), pp.392-398.

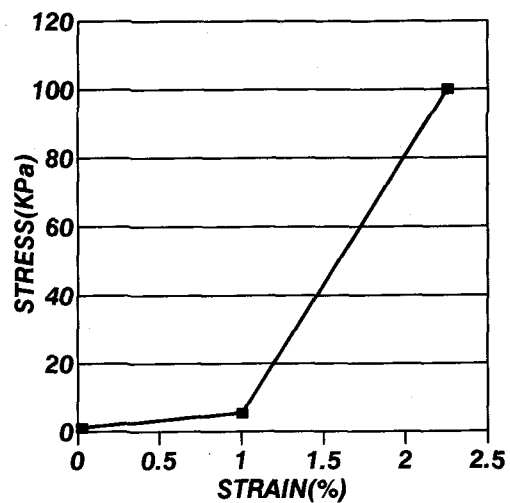


Fig. 1: Bilinear elastic property of the human cornea[7]

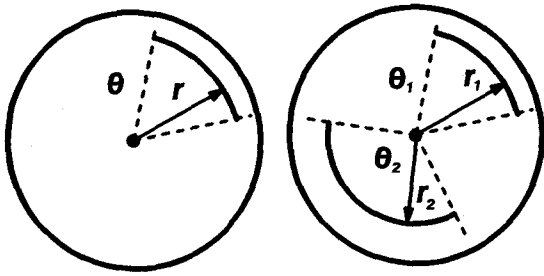


Fig. 2: Graphical representation of the selected surgical factors in the arcuate keratotomy

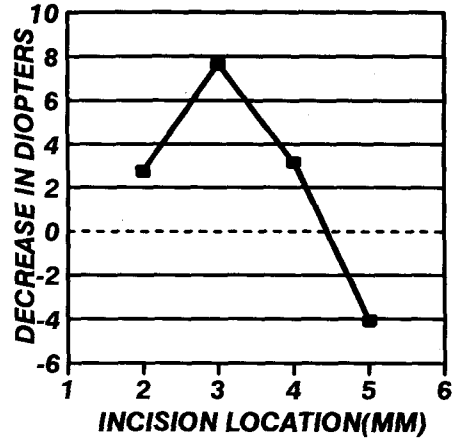


Fig. 5: The predicted effect of incision location in one incision arcuate keratotomy

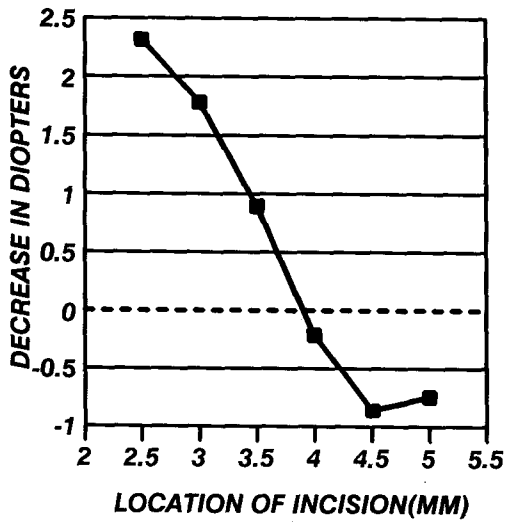


Fig. 3: The effect of incision location in the circumferential keratotomy

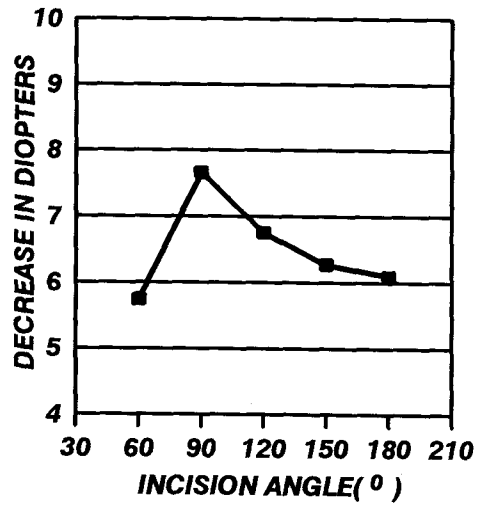


Fig. 6: The predicted effect of incision angle in one incision arcuate keratotomy

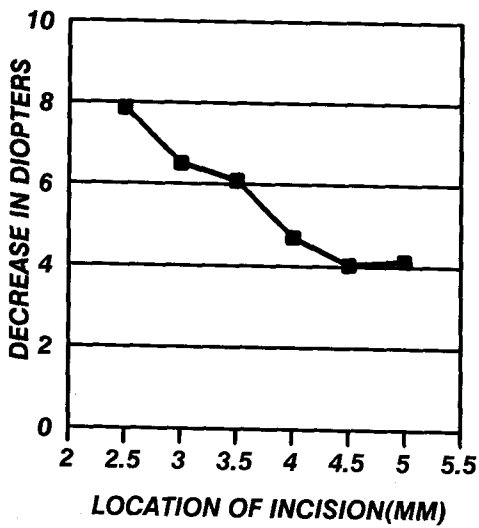


Fig. 4: Predicted surgical outcomes in the combined surgery

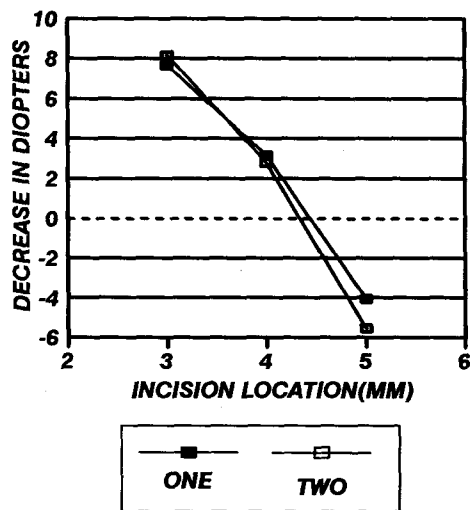


Fig. 7: Comparison of one-incision with two-incision arcuate keratometries

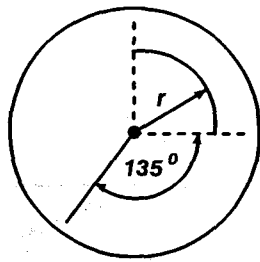
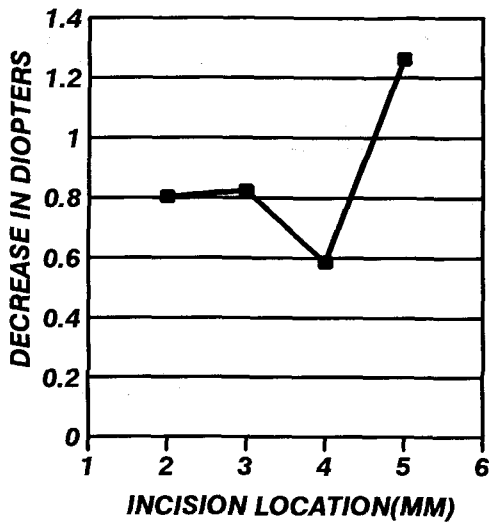


Fig. 8: Change of refractive power in the opposite area of the incision

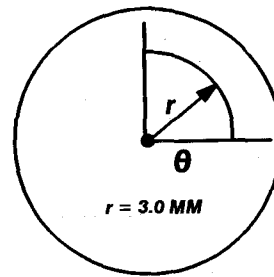
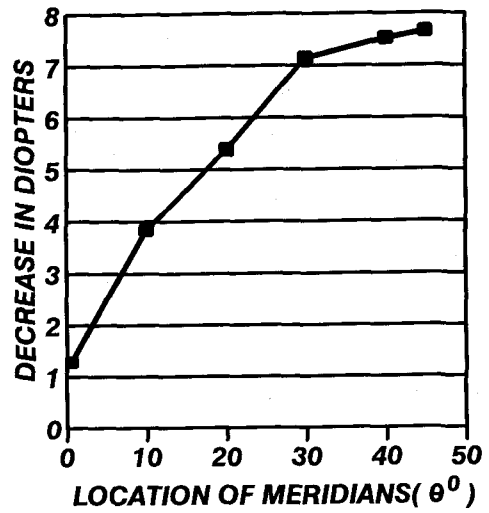


Fig. 9: Change of refractive power within the incised area

표.1 : Range of the Selected Surgical Factors

One Incision(Model C)		Two Incisions(Model D)	
r(mm)	$\theta^\circ$	$r_1=r_2$ (mm)	$\theta_1=\theta_2^\circ$
2 - 5	90	3.0 - 5.0	90
3.0	60-180		

(안압 = 17mmHg, 절개 깊이 = 각막 두께의 90%)