

유한요소법과 동물실험을 통한 난시교정술의 고찰 및 개발

신정욱*·한태원**·김수향*·김재호**·이성재*·박효순***

인제대학교 의용공학과*, 가톨릭대학교 의과대학 강남성모병원 안과학교실**, 이안과***
(1999년 1월 20일 접수, 1999년 2월 13일 채택)

The Investigation and Development of Astigmatism Correction Treatments by Finite Element Method and Animal Experiments

J.W. Shin, T.W. Han, S.H. Kim, J.H. Kim, S.J. Lee, H.S. Park

Dept. of Biomedical Eng., Inje Univ.*, Dept. of Ophthalmology, Kangnam St. Mary's Hospital, Catholic Univ.**,
Lee Eye Clinic, Busan***

(Received January 20, 1999, Accepted February 13, 1999)

요약: 본 연구는 동물실험과 유한요소법을 병행하여 난시교정을 위한 각막 절개 수술시 관련되는 다양한 인자의 변화가 수술 결과에 미치는 영향을 분석하고자함에 그 목적이 있다. 난시 교정술 중 각막절개에 의한 방법으로는 각막의 정점으로부터 일정거리에서 호선(arcuate)으로 절개하는 것이 일반적이나 본 연구에서는 직선(straight), 그리고 역호선(inverse arcuate) 절개방법도 시도하여 그 결과를 역학적으로 분석하였다. 연구 결과 각막절개를 이용한 난시교정은 arcuate 방법이 가장 예측 가능하였으며, 수술의 효과는 각막의 정점과 가장자리 중간위치에서의 절개가 가장 효과적인 것이 실험과 유한요소에서 공히 검증되었다. 이를 바탕으로 유한요소 방법으로 arcuate 절개술에서 절개길이를 변화시킨 결과 90도 만큼의 절개가 120도 혹은 150도까지 절개한 것보다 더 큰 굴절률 변화를 보여주어 최대 굴절률 변화를 위한 절개 각도는 90도라는 결론을 얻었다. 하지만 시술결과 각막의 점탄성 성질과 자가치유 효과에 의한 수술효과는 시간이 지날수록 감소되는 경향을 보여 앞으로의 연구는 점탄성의 성질이 고려되어야 할 것으로 사료된다.

Abstract: The purpose of this study is to investigate the effects of various factors in keratotomy for astigmatism correction on surgical outcomes by finite element method as well as animal experiments. Three kinds of surgical techniques were mechanically investigated: arcuate, straight, and inverse arcuate keratotomy. Among the three techniques the arcuate keratotomy is the most popular one while the other two techniques are being investigated in this area. The arcuate keratotomy was found to be more controllable and effective in reducing the refractive power than the others. In arcuate keratotomy it was found most effective when the incision was located in the middle position between the apex and the edge of the cornea from the results of experiment as well as finite element study. Regarding to the range of the corneal incision in arcuate keratotomy, the incision angle of 90° was found to be most effective in reducing refractive power than other angles even it was incised up to 150°. Therefore, it was concluded that 90° of incision angle results in the largest decrease in refractive power in arcuate keratotomy. However, other important findings were that the effect of the surgery decreased with time due to the visco-effect of the cornea and auto-healing process. Therefore, these factors should be considered in future studies.

Key words: Keratotomy(각막 절개 수술), Cornea(각막), Finite element method(유한요소법)

(속보논문)

본 연구는 96년도 학술진흥재단 자유공모과제(과제번호: 01F0432)의 지원에 의해 이루어진 것임.

통신저자: 신정욱, (621-749) 경상남도 김해시 어방동 607번지 인제대학교 의용공학과,

Tel. (0525)320-3317, Fax. (0525)337-1303

E-mail. sjw@bme.inje.ac.kr

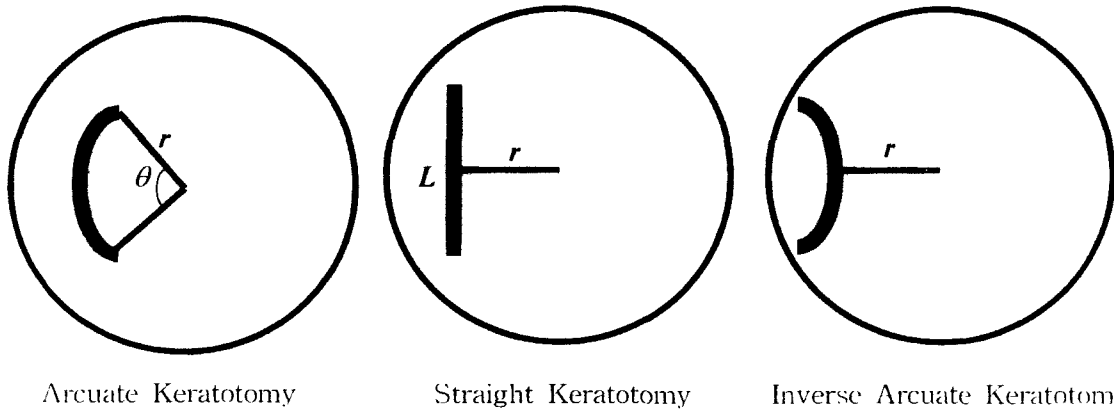


그림 1. 절개수술의 변수(r : 정점에서 수평거리, θ : 절개각도, L : 절개길이)

Fig. 1. Parameters of keratotomies(r : horizontal distance from apex, θ : incision angle, L : incision length)

서 론

각막 굴절 수술은 각막에 구조적인 변화로 인한 각막 형상의 변화를 유도하여 빛의 굴절량을 변화시킴으로써 근시 및 난시의 교정을 도모하는 수술을 말한다. 시신경에 상이 맺히기 위해서는 빛은 각막과 수정체에서 두 번의 굴절을 하게된다. 하지만 각막은 공기에 노출된 상태에 있는 반면 수정체는 주변의 안구 내물질에 접해있다. 빛이 굴절하는 양은 빛이 통과하는 두 매질 간의 굴절률 차이에 따라 결정되므로 공기에 접해있는 각막을 통과하는 동안에 필요한 굴절량의 80%정도가 이루어진다. 따라서 굴절량을 조절하는 것은 각막의 굴절률을 조절하는 것이 보다 효과적이며 또한 외부에 노출되어 있는 상황을 감안할 때 외과적 수술에도 대단히 용이하다. 한편 같은 매질의 경우에도 곡률반경의 변화에 따라 빛의 굴절률은 변화하므로 이러한 상황을 역학적인 견지에서 고찰해 보면 각막에 인위적인 곡률반경 변화를 유발하면 안구를 통과하는 빛의 굴절량을 조절할 수 있음을 알 수 있다.

이러한 원리에 근거하여 19세기 초기 소련에서 처음으로[1] 각막을 각막 정점 부근의 optical zone(일반적으로 직경 3mm)을 중심으로 방사상(radial)으로 각막의 가장자리(limbus)까지 일정한 깊이로 절개(keratotomy)하여 각막 곡률반경의 변화를 도모함으로써 근시 교정을 시도하였고, 1945년 2차대전 후 이러한 기법이 미국에 도입되면서 임상에서 뿐만 아니라[1] 생체역학적으로도 많은 연구가 진행되어 왔다[2-5]. 최근에는 의료기기의 급격한 발전으로 레이저를 이용한 수술도 널리 시술되고 있다. 이 수술 기법은 각막의 일부를 excimer 레이저를 이용하여 절제(keratotomy)하여 각막의 곡률반경 변화를 도모하는 기법이다. 이와 같은 방법으로 각막을 절개 혹은 절제하게되면 안압에 의하여 각막 형상의 변화, 즉 곡률반경의 변화를 가져오게 된다.

한편 이와 같은 수술의 결과는 여러 인자에 의해 영향을 받게

된다. 수술의 결과에 영향을 미치는 인자들 중 대표적인 것으로는 안압, 각막의 두께, 환자의 나이 등 생리학적 조건과 절개수술의 경우 각막 절개의 위치, 깊이, 그리고 길이 등을 들 수가 있으며, 절제수술의 경우에는 절제 위치, 절제 면적, 그리고 그 깊이 등을 들 수가 있다. 근시 교정에 대한 임상적, 생체역학적 연구는 많이 이루어져 왔으나[6-7], 난시에 대한 경우는 근시와 난시가 동시에 나타나는 경우가 많고 임상적, 생체역학적 연구가 미흡한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 난시 교정을 위한 각막 절개수술시 역학적 인자가 수술의 결과에 미치는 영향을 유한요소와 토끼를 이용한 동물실험을 통하여 분석하고, 이와 더불어 유한요소와 실험결과를 상호 비교하여 유한요소의 적용가능성과 앞으로의 연구방향을 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

난시교정을 위한 각막 절개수술 중 대표적인 것으로는 일반적으로 호선(arcuate) 절개법이 널리 유행하고 있으며, 본 연구에서는 호선절개법 외에, 직선(straight), 그리고 역호선(inverse arcuate)을 이용한 절개법을 시도하여 생체역학적으로 분석하여 그 가능성을 검토하였다. 검토한 각 수술의 경우 설정된 기하학적 조건이 그림 1에 나타나 있다.

1. 동물실험

실험동물은 생후 6개월 이상된 체중 2.5Kg 내외의 가토 15마리(30안)를 5군으로 나누어 암수 구분 없이 무작위로 6안씩 배정하여 실험하였다.

마취는 15마리의 가토에 ketamine hydrochloride를 체중 kg당 35mg과 2% xylazine chloride를 체중 kg당 2.5mg을 혼합시켜 근육주사하여 전신마취 후 국소마취제인 0.5% proparacaine hydrochloride를 점안하였다. 안구를 노출시킨 후 각막두께 측정을 위해 A-mode 초음파에 의한 Ultrasonic pachometer

표 1. 각 군의 절개 조건

Table 1. Conditions of keratotomy in each group

군명	절개조건	
	r(mm)	θ or L(mm)
AE-I	3.5	90
AE-II	3.0	90
AE-III	3.5	45
SE-I	3	6(=L)
IE-I	3	90

표 2. AF 모델에서의 역학적 인자의 변화

Table 2. Variation of mechanical factors in AF models

정점으로부터의 절개위치(r, mm)	절개각도(도)	목적
3	30,60,90,120,150	절개각도의 변화에 따른 고찰
2, 3, 4, 5	90	절개위치의 변화에 따른 고찰

(Ultrasonic Pachometer, Humphrey, USA.), 각막만곡도 측정을 위해 corneal topography(photokeratoscope-16, EyeSys, USA)를 수술전에 시행하였고 시술 후 감염방지를 위해 1일 4회 토브라 마이신 안약을 7일간 점안하였다. 각 군의 절개조건을 표 1에 AE(Arcuate Exp.), SE(Straight Exp.) 그리고 IE(Inverse arcuate Exp.)로 약해서 나타내었다. Sinsky hook(Katena, USA)으로 각막 중심부를 표시한 후 원형칼(trephine : Storz, USA)로 표식을 하여 각막 정점에서의 거리를 결정하였다. AE군에서는 90도 arcuate incision marker(Katena, USA), 혹은 45도 arcuate incision marker(Katena, USA)를 사용하여 표식을 하였다. 표식에 따라 Diamond Micrometer Knife(Katena, USA), 혹은 본 연구를 위해 임시적으로 만든 원호 형상의 칼(trephine을 일부 잘라서 만들)을 사용하여 각막 중심 두께의 90% 깊이로 균등히 절개하였다. SE 및 IE군에서는 AE군과 동일한 방법으로 각막 정점에서의 절개 위치를 결정하였고, 여덟 방향의 날이 있는 radial keratotomy marker(Katena, USA)로 표식을 한 후 trephine과 접하는 두 점사이(Radial keratotomy marker의 두칸, 90도 길이)를 각막 중심 두께의 90% 깊이로 절개하였다. 모든 조작은 수술현미경(k-series, Konan, Japan)하에서 실시하였으며, 절개 위치는 모든 가도에서 9시 방향을 중심으로 하였다.

Corneal topography(photokeratoscope-16, EyeSys, USA)를 사용하여 시술 후 1일, 7일, 14일, 30일째에 각막만곡도를 측정하였으며, 2명의 보조자가 가도 안구의 위치를 확인하였다. 보조자 갑은 마취된 토끼를 들어 검사대에 고정시킨 후 안검을 손으로 벌려 안구를 노출시켰고, 보조자 을은 안구 직상방에서 상직근 중심부에 삽입된 prolene이 중심에 위치하고 안구가 회전되지 않는지를 확인하였고, 검사자는 컴퓨터 화면에 나타나는 각막 만곡도 사진을 보면서 90도, 180도 축이 수직으로 위치하는지를 확인하면서 각막 만곡도를 촬영하였다.

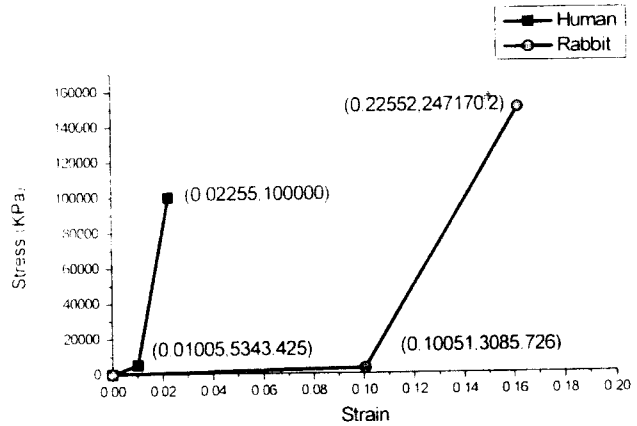


그림 2. 토끼와 사람의 응력-변형률선도 (bilinear 탄성 모델)

Fig. 2. Stress-strain curves of rabbit and human cornea (bilinear elastic model)

수술전과 시간 경과에 따른 각막 굴절률 변화는 paired t-test를 사용하여 검정하였고, 절개방법에 따른 각 군간의 비교는 unpaired t-test를 이용하여 분석하였다.

2. 유한요소 모델

우선 수술전후의 각막의 곡률반경의 변화에 따른 굴절률(diopter)의 변화 계산을 위해 수술전의 형상을 재현하여 이를 기본모델로 설정하였다. 또한 표 1에서 나타난 5가지 조건하의 실험과 같은 상황의 모델을 구축하여 각각 AF(Arcuate FEM)-I, II, III, SF(Straight FEM)-I, 그리고 IF(Inverse arcuate FEM)-I로 설정하였다. 또한 각 유한요소모델에서 역학적 인자가 수술 결과에 미치는 영향을 고찰하고자 AF 모델에서 위치 및 길이를 표 2와 같이 변화시키면서 그 결과를 비교하였다.

각막의 형상은 정점에서의 두께를 0.33mm, 정면에서의 크기는 11mm, 그리고 측면에서의 반경을 8.5mm로 설정하였다. 각막의 물성은 일반적인 인체의 soft tissue와 같이 비선형 점탄성으로 간주되고 있다. 하지만 점성의 성질을 규명한 실험이 전무한 상황이고 또한 인간의 각막은 생리학적으로 하중하에서는 비교적 strain-rate에 민감하지 않다는[8] 실험결과에 근거하여 비선형 탄성체라 가정하였다. 또한 일반적으로 soft tissue의 비선형성은 두 개의 선형 성질이 조합된 bilinear 형태로 모델 가능하다. 응력-변형도 선도로써 물성을 나타낼 때 bilinear 모델의 경우 두 개의 직선에 대한 기울기와 기울기가 변하는 점을 지정하게 된다. 본 연구에서는 탄성체 가정에 2차원 측정으로 얻은 사람과 토끼의 bilinear 모델[9]과 3차원 측정으로 얻은 사람에 대한 bilinear 모델[10]의 각 기울기 및 변형점의 위치를 비율로 계산하여 토끼에 대한 3차원 측정치에 의한 bilinear 탄성 성질을 구하였다.(그림 2) 또한, 일반적인 soft tissue의 성질인 비압축성을 가정하여 Poisson's ratio는 0.49로 채택하였다. 구축조건은 각막보다 공막(sclera)의 강도가 수십배 정도 크다는 문헌[11]에 근거하여 안압 부과시 각막의 변형에 비해 공막의

표 3. 동물실험 결과

Table 3. Results of animal experiments

Group	Pre-Operation	Post-Operation (days)			
		1	7	14	30
AE-I ($r=3.5\text{mm}$, $\theta=90^\circ$)	N	6	6	6	6
Mean Keratotomy(D)	50.30	43.66	47.11	47.98	48.42
SD	1.06	1.81	1.34	1.56	1.50
Average Decrease	-	6.64	3.19	2.32	1.88
P-value	0.000	0.001	0.008	0.02	
AE-II ($r=3\text{mm}$, $\theta=90^\circ$)	N	6	6	6	6
Mean Keratotomy(D)	51.22	43.76	47.67	48.29	49.14
SD	1.67	1.70	2.39	2.02	1.93
Average Decrease	-	7.46	3.55	2.93	2.08
P-value	0.000	0.008	0.013	0.05	
AE-III ($r=3.5\text{mm}$, $\theta=45^\circ$)	N	6	5	5	5
Mean Keratotomy(D)	50.73	47.47	48.59	49.31	49.57
SD	2.04	2.01	2.07	1.36	1.09
Average Decrease	-	3.26	2.07	1.36	1.09
P-value	0.02	0.05	0.1	0.15	
SE-I ($r=3\text{mm}$, $L=6\text{mm}$)	N	6	6	6	6
Mean Keratotomy(D)	50.66	46.53	47.79	48.68	49.36
SD	1.72	1.81	1.56	1.55	1.87
Average Decrease	-	4.13	2.87	1.98	1.30
P-value		0.001	0.008	0.05	0.15
IE-I ($r=3\text{mm}$)	N	6	6	6	6
Mean Keratotomy(D)	48.66	49.48	47.80	47.30	47.71
SD	1.52	0.54	2.27	1.37	0.92
Average Decrease	-	-0.82	0.86	1.36	0.95
P-value		0.15	0.3	0.1	0.15

변형이 미소하다는 가정을 도입하여 각막의 가장자리인 limbal area는 모든 방향에서 구속하였다. 또한 안압은 일반적으로 10-12mmHg이므로 평균값을 취하여 11mmHg를 각막의 후면에 가하였다. 형성된 각막 모델은 직육면체(brick element)를 사용하여 분할하였다. 각 절점은 3개의 자유도를 가지고 있으며 해석은 비선형 탄성이론에 근거한 해석 방법을 취하였다. 본 연구에 사용된 유한요소 프로그램은 ANSYS(Ver.5.4, USA)이다.

실제 수술시 안구는 이미 안압을 받고 있는 상황이나 본 연구에서는 수술 후, 즉 절개가 된 상황에서 안압을 가하여 각막의 형상을 계산하였다. 기본 모델에서도 아무런 절개가 없는 상황에서 안압을 가하여 그 때의 각막 곡률반경을 계산하여 수술전 후의 결과를 상호 비교하였다. 각막 형상의 변화는 절개의 중양을 통과하는 경선을 따라 각막 전방부에서 각 절점의 위치를 파악, 선형회귀 분석을 통하여 이차함수($Z = a * r^2 + b * r + c$)로 표시하였다. 이와 같이 각막의 선정된 경선이 이차함수로 표시되면 임의의 위치에서의 곡률반경 (R)은 아래와 같이 구

해진다.

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

여기서 Z' , Z'' 은 Z 를 r 에 관해서 각각 1, 2회 미분한 것을 뜻한다.

곡률반경은 정점에서부터 그 위치에 따라 변하게 되므로, 즉 R 은 r 의 함수이므로 정점에서 1.5mm(동공이 확장되었을 때의 반경)까지를 선정하여 각막의 정점에서 절개부위의 중심을 통과하는 경선을 따라 0.1mm 간격으로 R 을 구한 후 또다시 정점에서 그 반대편으로 0.1mm 간격으로 R 을 구한 후 두 값의 평균값을 최종적으로 사용하였다. 한편, 곡률반경과 굴절률을 나타내는 diopter간의 관계는 아래의 식들을 이용하여 구하였다.

$$\frac{1}{f} = (n-1) \frac{1}{R} \quad f: \text{focal length(m)}$$

$n=1.376$ (각막의 굴절계수)

표 4. Arcuate, straight, inverse 절개술간의 유의성 검정
Table 4. Significant test among arcuate, straight and inverse keratotomy

	AE-II	SE-I	IE-I
AE-II		0.015	0.000
SE-I	0.015		0.0025
IE-I	0.000	0.0025	

표 5. 유한요소 해석 결과
Table 5. Results of finite element study

Model	Post-Operation	
	Diopters(D)	Decrease in Diopters
Baseline	47.54	-
AF-I (r=3.5mm, θ=90°)	39.49	8.05
AF-II (r=3mm, θ=90°)	34.40	13.15
AF-III (r=3.5mm, θ=45°)	41.58	5.96
SF-I (r=3mm, L=6mm)	34.77	12.77
IF-I (r=3mm)	36.42	11.13

$$D = \frac{1}{f(\text{meters})} \quad D: \text{diopter}$$

위와 같은 단계를 거쳐서 각 모델의 diopter를 기본모델의 diopter와 비교하여 그 감소량을 조사하였다.

결과 및 고찰

1. 동물실험

표 1에 따른 동물실험의 결과를 표 3에 나타내었다. 각 모델의 P 값은 시술전과 시간의 경과에 따른 diopter 양의 변화를 분석하여 그 유의수준을 나타낸 것이고 표 4는 arcuate keratotomy의 대표 모델인 AE-II와 straight, inverse arcuate keratotomy 간의 유의 수준을 표시한 것이다. 표 3에서 나타난 바와 같이 절개의 위치가 3.0mm인 경우(AE-II)가 arcuate 절개술중에서 가장 많은 효과를 나타냈으며, straight(SE-I), 혹은 inverse arcuate(IE-I) 절개술에서는 굴절률의 감소가 arcuate 절개술에 미치지 못하였다. 표 4에서 보여 주듯이 각 수술기법 간에는 상당한 유의수준을 보여 주었다. 각 모델에서 시간의 경과에 따라 수술의 효과가 감소하는 경향을 보여 주었다. 수술 직후 즉 수술 후 하루 경과 시 arcuate keratotomy 그룹(AE)의 경우 절개의 위치가 각막의 정점에서 3.0mm가 되는 AE-II에서 가장 많은 굴절률의 변화를 보여 주었다. Straight keratotomy와 inverse arcuate keratotomy의 경우에는 각막의 정점에서 3.0mm의 위치에서 절개한 경우보다 적은 굴절률의 감소를 보여 주었다.

시간이 경과함에 따라 수술의 효과가 감소하는 것, 즉 굴절률

표 6. 각 수술기법에서 절개지점에서 반대 부위까지의 굴절률의 변화 양상(유한요소)

Table 6. Variation of refractive power from incised region to the opposite side(finite element study)

	Degrees	Diopters	Decrease in Diopter
AF-II	0	29.14	18.40
	45	42.39	5.15
	90	49.76	-2.21
	135	42.57	4.97
	180	39.65	7.89
SF-I	0	27.26	20.28
	45	41.76	5.79
	90	48.36	-0.81
	135	42.66	4.88
	180	42.29	5.26
IF-I	0	31.90	15.64
	45	49.52	-1.98
	90	48.61	-1.07
	135	42.38	5.16
	180	40.94	6.61

의 감소량이 줄어드는 것은 healing process와 visco-effect에 기인하는 것으로 여겨진다. 토끼의 경우 인간의 각막보다 강도(stiffness)는 작고 healing process가 매우 빨라 절개한 부분에서의 봉합효과가 탁월하여 regression 현상이 두드러지기 때문인 것으로 사료된다.

동물실험에서 straight, 혹은 inverse arcuate 형상의 절개를 정확하게 하기 위한 수술도구가 아직 개발되지 않아 수술의 역학적 인자를 다양하게 변화시키지 못하였다.

2. 유한요소 해석결과

그림 2의 토끼 각막의 물성치를 근거로 하여 다양한 역학적 인자의 변화에 따른 각막 굴절률의 감소를 고찰하였다. 표 5는 동물실험의 5가지 모델에 맞추어 해석한 결과를 나타내고 있다. 정량적인 일치는 이를 수가 없었으나 정성적인 결과는 동물실험의 결과(표 3)과 일치하였다. 한편, arcuate, straight, 그리고 inverse arcuate keratotomy의 경우 절개부위에서부터 절개하지 않은 반대편으로 45도씩 이동하면서 각 경선을 따라 굴절률의 변화를 고찰하여 그 결과를 표 6에 나타내었다. 여기서 0도는 절개의 중심부위를, 180도는 절개 중심부위와 정 반대의 경선을 각각 나타내고 있다. Arcuate의 경우 비교적 고른 굴절률의 변화를 가져왔으나, straight와 inverse arcuate keratotomy의 경우에는 급격한 변화를 보여 주었다. 이러한 현상은 임상적으로 각막 굴절률을 측정하는 데에도 많은 오류를 포함시킬 소지가 있으며, 임상적으로도 바람직한 결과가 되지 못한다. 이를

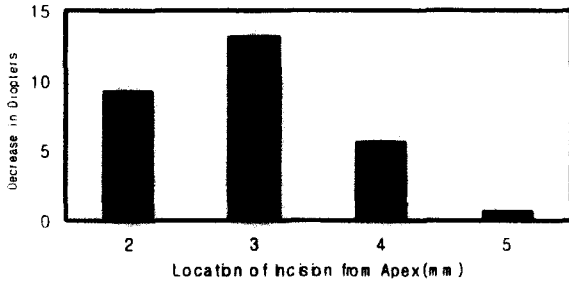


그림 3. 절개위치에 따른 굴절률의 감소량
Fig. 3. Decrease in diopter with various locations of incision

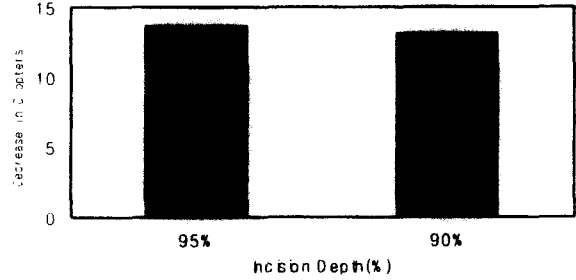


그림 5. 절개 깊이에 따른 굴절률의 감소량
Fig. 5. Decrease in diopter with various depths of incision

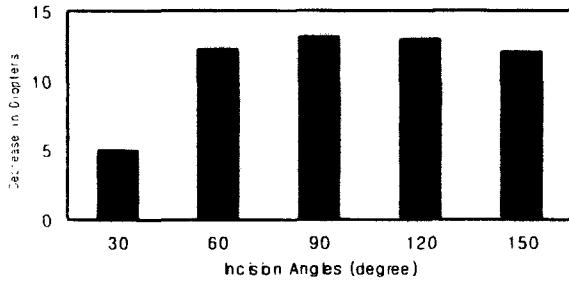


그림 4. 절개각도에 따른 굴절률의 감소량
Fig. 4. Decrease in diopter with various angles of incision

바탕으로 arcuate keratotomy에서 역학적 인자의 변화에 따른 각막 굴절률의 변화를 고찰하였다. 각막의 절개 각도를 90도로 고정시킨 후 절개 위치의 변화에 따른 굴절률의 감소 변화를 그림 3에 나타내었다. 그 결과 절개가 각막의 정점과 가장자리의 중간에 위치할 때가 가장 많은 효과를 나타내었다. 이는 동물실험 AE 모델 중에서 AE-II가 가장 많은 굴절률의 감소를 가져오는 것과 일치하였다. 각막 절개의 위치를 정점에서 3.0mm로 고정시킨 후 각막의 절개 길이에 따른 굴절률 감소의 변화를 고찰한 결과가 그림 4에 나타나 있다. 그 결과 정점에서 90도로 절개한 경우가 가장 많은 굴절률의 변화를 가져왔다. 이는 정점으로부터의 위치가 같은 경우에 각막절개각도의 증가가 필연적으로 굴절률 변화의 증가를 가져오지 않는다는 것을 의미하고 있다. 예를 들어 고무풍선에 공기를 주입할 경우 어느 부위가 주위의 다른 부위에 비해 구조적으로 취약하게 되면 그 부분이 많이 부풀어올라 곡률반경 변화량이 많을 수가 있으나 취약한 부분이 넓은 경우에는 전반적으로 부풀어오르는 부위가 많아지므로 굴절률의 변화는 많지 않게 된다. 반대의 경우 구조적으로 취약한 부위가 대단히 좁을 경우에는 미처 부풀어오르지 못하게 된다. 이러한 근거에 의해 각막 절개 수술에서도 최대의 굴절률 변화를 도모하기 위해서는 절개의 길이에 최적의 값이 존재한다는 것을 보여주고 있다.

한편 각막의 절개를 각막 깊이의 90%와 95%의 경우로 나누어 비교한 결과 그 차이는 미미한 것으로 나타나 있다.(그림 5) 이는 실제로 시술자가 90% 혹은 95%로 절개하고자 하는 선택의 심리적 부담을 들어 줄 수 있는 근거를 제공하고 있다.

결론

본 연구는 난시교정을 위한 각막 절개수술에서 수술의 결과에 영향을 미치는 많은 인자 중에 역학적인 요소와 절개 형상에 따른 수술 후의 각막굴절률의 변화를 동물실험과 유한요소 방법을 병행하여 고찰한 결과 아래와 같은 결론을 내릴 수 있었다.

1. 난시교정을 위한 다양한 각막 절개술 중에서 arcuate 절개술이 현재로서는 가장 효과를 예측할 수 있는 교정술이다.
2. 절개의 위치는 각막의 정점과 가장자리의 중간위치에서 가장 많은 굴절률의 변화를 가져 왔으며, 가장자리로 갈수록 그 감소율은 급격히 감소하였다.
3. 절개의 길이는 arcuate keratotomy의 경우 90도 호선의 절개가 가장 효과적이며 90도 이상, 즉 120도, 혹은 150도의 절개에서는 절개한 길이에 비해 얻는 효과가 미미하였다.
4. 유한요소에 의한 연구는 각 인자의 변화에 따른 정성적인 결과의 도출은 현재 가능하나 임상에 적용 가능한 정량적인 결과는 각막 물성치에 대한 보다 정확한 실험이 선행되어야 할 것이다.
5. 유한요소의 결과와 동물실험의 결과가 정량적으로는 일치하지 않으나 정성적인 결과는 일치하고 있다. 예를 들어 arcuate keratotomy의 경우 3mm, 90°의 경우가 가장 많은 굴절률의 감소를 나타내고 있다.
6. 토끼의 경우 healing process가 빠른 관계로 유한요소 모델의 결과와 비교하여 정량적인 결과는 여전히 일치하나 그 차이가 수술 후 시간이 경과함에 따라 일치정도가 감소하고 있다. 각막절개 수술을 유한요소로 분석하여 임상의 결과와 비교한 문헌[7]보다 일치 정도가 낮다. 이는 토끼의 각막이 특성상 사람의 각막보다 visco-effect가 심한 결과로 수술의 효과가 감소하는 regression 현상이 두드러지기 때문인 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. G. O. Waring, "Chap. I: History of Radial Keratotomy" in Refractive Corneal Surgery, Ed. by D. R. Sanders, R. F. Hofmann, J. J. Salz, New Jersey, Slack Incorporated,

- 1986
2. M. S. Bryant, S. A. Velinsky, M. E. Plesha and G. P. Clarke, "Computer-Aided Surgical Design in Refractive Keratotomy", *CLAO Journal*, Vol.13, July, pp.238-242, 1987
 3. T. Huang, T. Bisarasin, R. A. Schachar and T. D. Black, "Corneal Curvature Change due to Structural Alternation by Radial Keratotomy", *J. Biomech*, Vol. 110, Aug, pp. 249-253, 1988
 4. R. P. Vito, T. J. Shin and B. McCarey, "A Mechanical Model of the Cornea: Model of Radial Keratotomy Surgery", *Refractive Surgery*, Vol. 5, March/April, pp. 82-88, 1989
 5. R. P. Vito, J. W. Shin, B. McCarey and G. O. Waring, "Finite Element Based Model of Radial Keratotomy Surgery", *Proc. of World Congress on Medical Physics and Biomedical Engineering*, San Antonio, TX. p. 368, 1988
 6. 신정욱, 김종현, "엑시머 레이저 수술의 역학적 모델", 대한의용생체공학회 춘계학술대회 논문집, 15권 1호, pp. 57-60, 1983
 7. 신정욱, 김재호, 한근조, 김만수, 사우진 "엑시머레이저 수술의 역학적 모델", *대한안과 학회지*, 36권 3호, pp.392-398, 1995
 8. R. P. Vito, S. B. Kirschner, J. P. Frazier, D. L. Vawter, G. O. 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*, p.134, 1981
 9. B. Jue and D. M. Maurice, "The Mechanical Properties of the Rabbit and Human Cornea", *J. Biomech*, Vol. 19, No. 10, pp. 847-853m 1986
 10. T. J. Shin, "The Mechanical Properties of the Human Cornea", Ph.D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Georgia Inst. of Technology, USA, 1992
 11. S. L-Y. Woo, A. S. Kobayashi, W. A. Schlegel and C. Lawrence, "Nonlinear Material Properties of Intact Cornea and Sclera", *Exp. Eye Res.*, Vol.14, pp. 29-39, 1972