

## 각막굴절교정절제술에서 각막의 절제 깊이와 Munnerlyn 식

최운상 · 김윤경 · 이성아\*

\*부산여자대학 안경광학과, 성모안과병원  
(2007년 6월 5일 받음, 2007년 7월 6일 수정본 받음)

각막굴절교정절제술에서 각막의 절제 깊이를 Munnerlyn 식을 유도하여 계산하였다. 계산은 4 mm에서 8 mm 사이의 광학 직경과 -1 Dptr에서 -12 Dptr 사이의 교정굴절력에 대해 수행되었다. 계산결과는 Munnerlyn 근사식과 비교될 수 있는데, 낮은 교정굴절력에서는 두 식간에 오차가 없었으나, 6 Dptr 이상의 교정굴절력에서 1 Dptr의 오차가 발생하였다. 하지만 이러한 오차는 기하학적 가정에 근거한 수학적 모델에 의한 계산결과이며, 수술환경의 오차와도 비교되어야 한다.

**주제어:** 각막, 절제깊이, Munnerlyn 식, 광학직경, 교정굴절력

### 서 론

각막 굴절교정 수술은 굴절이상 교정을 위해 각막을 절제(ablation)하여 교정하는 방법으로서 과거에는 단순히 각막을 절제하는 수술이 사용되었으나, 1980년대에 엑시머 레이저(excimer laser)를 이용한 굴절교정 레이저 각막절제술이 개발되면서 급속한 발전이 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>. 레이저 각막절제술은 각막의 상피를 벗기고 실질표면을 절제하는 방법인 PRK(Photorefractive keratectomy)로 출발하여 원형의 각막절편을 만들고 그 아래 실질을 절제하는 라식(lasik; Laser in situ keratomileusis)이 개발되었고, 이후에 레이저 각막상피가공성형술인 라섹(lasek; laser epithelial keratomileusis), 그리고 최근에 와서는 부정난시까지 교정하는 웨이브 프론티 절제술(wavefront ablation)이 시행되고 있다. 이와 같이 각막굴절교정수술은 레이저라는 양자광학적 기기를 이용함으로써 비약적인 발전을 하게 되었다. 수술에 사용되는 엑시머 레이저는 그 파장이 각막에 존재하는 단백질의 흡수 에너지대와 일치하며, 광열효과 보다는 광화학효과가 극대화되어 절제성 광분해(photoablation)를 각막특정 부위에 일어나게 한다. 절제되는 각막부위의 크기 와 깊이는 교정굴절력의 함수로 계산될 수 있는데, 이를 표현한 것이 Munnerlyn 식이다<sup>[2]</sup>. 각막의 절제깊이(ablation depth)는 Munnerlyn 근사식(Munnerlyn approximated formula)에 의하면 광학직경의 제곱에 비례하고, 교정굴절력에 비례하는 수치를 갖게 된다. 굴절교정을 위해서는 절제되는 각막깊이도 중요하지

만, 실제 수술과정에서 발생하는 환경변수도 무시할 수가 없다<sup>[3]</sup>.

본 연구는 Munnerlyn 식을 일반화하여 광학직경 및 교정굴절력에 대해 각막절제깊이를 계산하였으며, Munnerlyn 근사식과도 비교하였다.

### 이론 및 방법

각막절제깊이를 그림 1처럼 광학직경과 각막의 곡률반경을 함수로 sag의 원리에 따라 구하면 식 (1)과 같다<sup>[4]</sup>.

$$s = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{d}{2}\right)^2} \quad (1)$$

여기서  $s$ 는 sag의 깊이로서 각막의 절제깊이에 해당되면

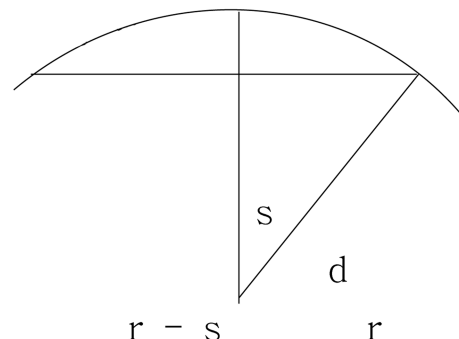


Fig. 1. Schematic diagram of curvature measurement.  $r$  and  $d$ ,  $s$  are radius, optical diameter, depth of sag, respectively.

$d$ 는 절제되는 광학부의 직경이고,  $r$ 은 각막의 곡률반경이다. 각막이 절제되기 전·후의 곡률반경을  $r_1, r_2$ 라 하고, 이에 따라 절제 전·후의 깊이를  $s_1, s_2$ 로 표기하면 절제 깊이  $s$ 는 식 (2)와 같다.

$$s = s_1 - s_2 \tag{2}$$

$s_1$ 과  $s_2$ 를 구하기 위해 식 (1)에서 둘째 항을 급수전개한다. 제곱근의 급수전개는 Taylor 급수전개에 따라 다음과 같이 된다<sup>[5]</sup>.

$$(1+x)^{1/2} = 1 + \frac{x}{2} - \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{128} + \dots \tag{3}$$

이 식에서 Munnerlyn 근사식은 둘째항까지 전개시켜서 구한 것으로 그 결과는 식 (4)와 같다<sup>[2]</sup>.

$$\text{절제깊이} \cong \frac{d^2}{3} D' \tag{4}$$

본 연구에서는 셋째 항까지 근사를 취하여 계산하였다. 계산 과정에서 수술전·후의 각막곡률반경은 식 (5)인 렌즈제작자 공식을 이용하면 곡률반경의 함수를 각막굴절률과 교정렌즈 굴절력의 함수로 변형할 수 있다.

$$D' = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \tag{5}$$

여기서  $D'$ 은 교정굴절력이며,  $n$ 은 각막의 굴절률이다. 계산된 결과로 식 (6)과 같은 Munnerlyn 식을 얻을 수 있다.

$$s = \frac{d^2 D'}{2^3 (n-1)} \left( 1 + \frac{d^2}{2^4 r_1^2} \left( 3 - \frac{3r_1 D'}{n-1} + \left( \frac{r_1 D'}{n-1} \right)^2 \right) \right) \tag{6}$$

식 (6)에서 첫 번째 항만을 취하여 각막굴절률 1.376을 대입하면, 식 (4)의 Munnerlyn 근사식과 같은 결과를 얻을 수 있다.

Munnerlyn 근사식과 식 (6)으로 표현된 Munnerlyn식과의 차이점은 Munnerlyn 근사식이 광학직경과 교정굴절력만의 함수로 구성되어 있는 것에 비해 Munnerlyn식은 각막곡률반경도 함수에 추가되어 있다.

**결과 및 고찰**

Munnerlyn 식을 계산하기 위해 각막의 전면 곡률은 비구면 모양이나 여기서는 구면으로 가정하였으며, 각막곡률 반경크기는 Gullstrand 모형안의 값에서 7.7 mm를 사용하여 계산하였다<sup>[6]</sup>. 교정굴절력은 근시인 경우에 대해 수술되는 범위를 감안하여 -1 Dptr에서 -12 Dptr의 범위로 하

Table 1. Corneal ablation depth calculated by Munnerlyn formula (unit:  $\mu\text{m}$ )

Dptr of correction	optical diameter (mm)				
	4	5	6	7	8
-1	6	9	13	19	26
-2	44	18	26	37	51
-3	17	27	40	56	77
-4	22	36	54	75	103
-5	28	45	67	95	130
-6	34	54	81	114	156
-7	39	63	95	134	183
-8	45	73	108	153	210
-9	51	87	122	168	237
-10	56	91	136	188	264
-11	62	100	150	208	292
-12	68	110	164	228	320

였으며, 광학직경은 4 mm에서 8 mm로 하였다. 광학직경과 교정굴절력에 대해 계산한 결과를 표 1에  $\mu\text{m}$ 의 단위로 나타내었다. 표 1를 보면 교정굴절력 -1 Dptr에서 5 mm의 광학직경일 경우에 약 9  $\mu\text{m}$ 의 절제깊이가 요구된다. 또 일정한 광학직경에 대해 교정굴절력이 증가하면 굴절력의 배수로 절제깊이가 증가하며, 일정한 굴절력에 대해 광학직경이 5 mm에서 7 mm로 변할 경우에 절제깊이는 두 배로 증가한다. Munnerlyn 근사식과 비교를 위해, 표 2에 식 (6)으로 계산한 첫째 항의 값과 둘째 항의 값의 비를 계산하여 비교하였다. 교정굴절력 증가뿐만 아니라 광학직경이 증가하여도 두 계산식 사이의 차이가 커지고 있다. 표 1에서 직경이 5 mm에서 7 mm로 증가할 때 절제깊이가 두 배로 증가하는 것과 마찬가지로 표 2에서도 같은 조건에 대해 두 식 차이의 비가 2배 정도 증가한다. 광학직경 6 mm에 대해 교정굴절력이 -1 Dptr인 경우에는 11.6%의 차이가 나며, 이를 굴절력으로 환산하면 0.1 Dptr가 된다. 하지만 -12 Dptr의 값은 14%의 차이가 나서 약 1.7 Dptr의 오차가 발생하게 된다. 굴절력 변화에 대한 절제깊이의 변화를 관찰하기 위해 6 mm의 광학직경에 대해 Munnerlyn 근사식과 Munnerlyn 식으로 각각 계산된 각막 절제깊이를 교정굴절력을 함수로 나타낸 것이 그림 2에 있다. 낮은 굴절력의 경우에는 각막절제깊이를 어떤 식으로 계산된 값을 사용해도 크게 문제될 것이 없으나, 굴절력이 증가할 경우에는 두 식 사이의 계산된 결과 차이가 커지게 된다. 그림 2에 따르면 -8 Dptr부터 절제깊이 차이가 13  $\mu\text{m}$  정도 되어서 1 Dptr의 오차가 발생함을 알 수 있다. 표 2를 근거로 하여 각 광학직경에 대해 조사하면 1

Table 2. Ablation depth ratio of second term and first term calculated by Munnerlyn formula (unit: %)

Dptr of correction	optical diameter (mm)				
	4	5	6	7	8
-1	5.14	8.06	11.6	15.8	20.64
-2	5.24	8.34	11.84	15.01	21.06
-3	5.35	8.51	12.08	15.7	21.48
-4	5.46	8.68	12.32	16.21	21.92
-5	5.56	8.74	12.57	16.65	22.35
-6	5.68	9.02	12.82	17.06	22.79
-7	5.79	9.20	13.06	17.47	23.24
-8	5.91	9.37	13.32	17.86	23.62
-9	6.03	9.55	13.58	18.88	24.15
-10	6.14	9.63	13.84	19.21	24.61
-11	6.26	9.91	13.87	19.55	25.08
-12	6.37	10.10	14.11	19.88	25.55

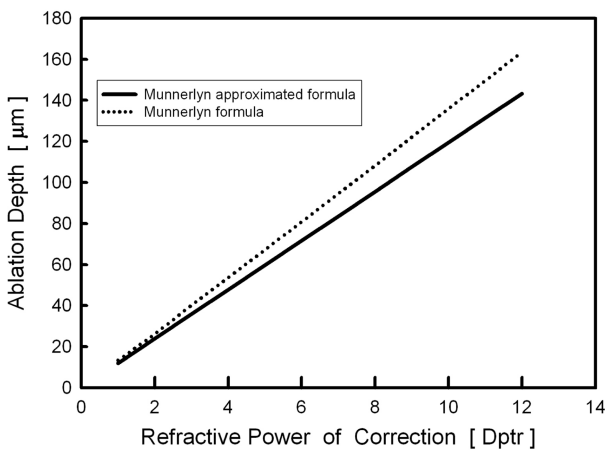


Fig. 2. Ablation depth as a function of refractive power of correction in myopic eye. Ablation depth is calculated by Munnerlyn formula and Munnerlyn approximated formula about 6 mm optical diameter.

Dptr의 오차가 발생하는 수치는 5 mm에서는 -10 Dptr이 후에, 7 mm에서는 -6 Dptr, 8 mm에서는 -5 Dptr 이후에 일어나게 된다.

지금까지 Munnerlyn 근사식과 Munnerlyn 식 사이에서 굴절력오차를 계산하였다. Munnerlyn 식을 구하기 위해

급수 전개식을 둘째 항 또는 셋째 항까지 취하는 문제는 절제깊이의 정밀성을 위해서 급수전개의 많은 항을 계산에 포함시키는 것이 좋을 것이다. 하지만 이러한 계산은 수학적인 과정에 기인한 각막절제깊이에 대한 값으로서 실제 각막절제수술과정에서는 계산된 절제깊이뿐만 아니라 각막의 함수율을 비롯하여 각막의 비구면, 절제 수술에 사용되는 레이저의 변수, 수술실의 공기상태 등 여러 가지의 환경변수가 영향을 끼칠 수 있다. 이러한 이유 때문에 각막절제깊이에 대한 정확한 계산은 이론적인 필요성은 중요하지만, 실제 수술과정에서 발생하는 여러 가지 환경 변수의 오차와 비교될 수 있다.

### 결론

각막굴절교정절제술에서 절제되는 각막의 깊이를 Munnerlyn 식을 유도하여 계산하였다. 낮은 굴절력의 경우에는 각막절제깊이에 대한 계산값은 크게 문제될 것이 없으나, 굴절력이 증가할 경우에는 Munnerlyn 근사식과 일반식 사이의 계산된 결과 차이가 커져서 각막절제 깊이의 값을 신중히 결정해야 한다. 물론 이러한 결과는 수학적인 계산의 결과이며, 수술과정에서 발생하는 환경 변수의 오차도 크게 고려되어야 될 것이다.

### 참고문헌

- [1] 한국외안부연구회편, “각막”, 2판, 일조각, 서울 pp. 413-439(2005).
- [2] Munnerlyn CR, Koons SJ, and Marshall J, “Photorefractive keratectomy: a technique for laser refractive surgery”, J. Cataract Refract. Surg., 14:46-52(1988).
- [3] Kim W-S, and Jo J-M, “Corneal hydration affects ablation during laser in situ keratomileusis surgery”, Corneal, 20:394-397(2001).
- [4] Freeman MH, and Hull CC, “Optics”, 11th Ed. Butterworth-Heinemann, Spain, pp. 54-58(2003).
- [5] Arfken G, “Mathematical methods for physicists”, 2nd Ed., 연합출판, 서울, pp. 259-267(1984).
- [6] Bennett AG, and Rabbetts RB, “Clinical visual optics”, 2nd Ed. Butterworths, London, pp. 207-214(1989).

## Ablation Depth of Cornea and Munnerlyn Formula in Refractive Keratectomy

Woon Sang Choi, Yoon-Kyung Kim and Sung Ah Lee\*

Department of Ophthalmic Optics, Pusan Women's College

\*St. Mary's Eye Hospital, Inc

(Received June 5, 2007; Revised manuscript received July 6, 2007)

Ablation depth of cornea in refractive keratectomy was calculated by Munnerlyn formula. The calculations were preformed for various optical diameter (4 mm~8 mm) and various amount of corrections (-1 Dptr ~ -12 Dptr). The results to be compared with the Munnerlyn approximated formula had little effect within lower corrections, but in higher corrections > 6 Dptr can be occurred the error of 1 Dptr. Although ablation depth were evaluated, the results were only calculated by mathematical model of geometric assumptions. Because ablation depth can vary with operation conditions, the correction factor should be considered not only ablation depth by Munnerlyn formula but also surgeon-specific factor.

**Key words:** cornea, ablation depth, Munnerlyn formula, optical diameter, refractive power of corrections