

레이저 굴절교정 각막수술

1. 서론

13세기경 원시 교정용 안경을 발명한 이후 19세기에 들어서 근시와 난시 교정용 안경을 제조할 수 있게 되었다. 그림 1은 안경이 등장한 가장 오래된 그림으로 1352년 이탈리아 화가 Tommaso da Modena가 그린 Hugh 대주교의 초상화이며 이탈리아 Treviso의 Nicolo 사원에서 소장하고 있다.⁽¹⁾ 이후 콘택트렌즈를 포함하여 안경 제조 기술이 급속히 발달하여 눈의 굴절이상을 정교하게 교정할 수 있었다.

그럼에도 불구하고 안경 착용의 불편함을 해소하려는 욕구는 계속 남아 있었다. 이 욕구는 20세기 말 레이저로 눈의 굴절이상을 교정하는 의료기술이 개발되면서 충족되기 시작했다. 부작용에 대한 막연한 우려에도 불구하고 지금도 전 세계 많은 환자들이 이 기술을 받고 있다. 단지 안

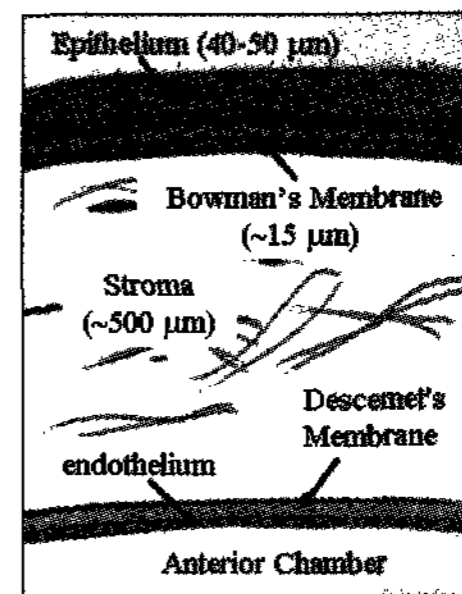


그림 2. 각막 구조

기 때문일 것이다.

한편 1960년 루비레이저가 개발된 이후에 등장한 각종 레이저들은 기초과학과 응용산업에서 폭넓게 사용하고 있을 뿐만 아니라 의료분야에서도 치료 효과가 높은 도구로 사용하게 되었다. 레이저 의료기기는 부가가치가 매우 높

특집 ■ 첨단 광학 및 광기술 해설

레이저 굴절교정 각막수술

고동섭*



그림 1. 안경이 등장한 최초의 그림

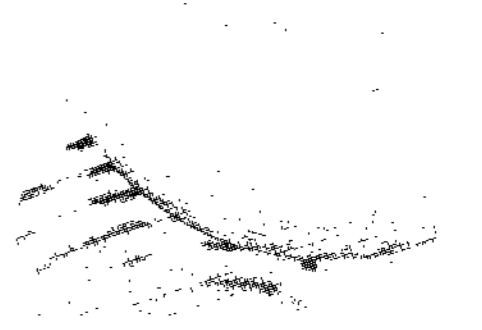
경을 벗을 수 있다는 매력 외에도 시력 회복 만족도가 높

은 산업이기 때문에 선두기업들이 앞 다투어 많은 투자를 하고 있으며 기술 진입 장벽을 나날이 높이고 있다. 본 글에서는 레이저를 사용하는 시력교정술과 관련 기술을 간략히 정리하고, 광기술이 핵심기술임을 이해하고자 한다.

2. 각막과 수정체 구조

성인 각막의 두께는 중심부가 0.5~0.6 mm, 주변부는 0.65~1 mm이며 직경은 수직 방향으로 10.6 mm, 수평 방향으로 11.7 mm 정도다. 각막은 안구를 보호하는 방어

* 목원대학교 기술마케팅학과



막 역할과 함께 망막에 초점을 맺게 하는 렌즈 역할을 하며 굴절력은 약 +43 디옵터이다. 그림 2는 각막의 구조를 나타낸 개략도이다. 각막은 투명한 무혈관 조직으로 5개 층으로 이루어져 있다.

공기와 접하고 있는 상피세포(epithelium) 층의 두께는 세포 5~7개 층에 해당하며 손상을 입으면 즉시 재생된다. 기저세포 조직으로부터 표층으로 밀려나온 상피세포 층은 7일 정도 경과하면 떨어져 나간다. 보우만 막(Bowman's membrane)은 상피세포 층 바로 아래에 있으며 투명한 교원섬유로 구성된 막으로서 각막실질의 변형된 조직으로 인식하기도 한다. 이 층은 매우 질겨서 각막 손상을 방지하는 역할을 하지만 손상되면 재생되지 않고 반흔이 남을 수 있다.

각막실질(stroma) 층은 보우만 막 다음에 위치하고 있으며 각막 중에서 가장 두꺼운 층이다. 약 1 μ m 넓이의 판상섬유 40~60층으로 구성되어 있는 결체조직이다. 각막실질 다음에 있는 데스메 막(Descemet's membrane)은 질기고 형태가 없는 층으로 각막 실질을 둘러싸서 그 형태를 지지하고 보호하는 역할을 한다. 마지막 층인 각막내피(endothelium) 층은 단층의 평평한 6각형 세포로 이루어져 있으며 각막의 함수율을 78%로 조절하여 각막의 투명도를 유지하는 중요한 역할을 한다. 각막내피는 재생 능력이 없다.

수정체는 지름 9 mm, 두께 3.7~4.4 mm 정도의 무혈관 투명 조직으로 홍채 바로 뒤에 있다. 전방 곡률반경은 약 +10 mm, 후방 곡률반경은 약 -6 mm이며 먼 곳을 응시할 때 굴절력은 약 +19 디옵터이다. 수정체는 얇고 탄력성 있는 수정체낭으로 둘러싸여 있다. 수정체 주변은 모양체가 둘러싸고 있으며, 모양체와 수정체 사이에 가늘고 투명한 섬유조직인 모양소대가 있고, 이것이 수정체를 받치고 있다. 모양체와 모양소대는 수정체 두께를 조절하여, 동공을 통해 들어온 빛의 굴절 방향을 조절한다. 가까운 물체를 볼 때는 수정체가 두꺼워져 빛이 많이 굴절되며, 먼 물체를 볼 때는 수정체 두께가 얇아져서 빛의 굴절이 약해진다.

3. 레이저굴절교정각막수술

3.1 시력교정술의 발달 과정

스페인계 미국 콜롬비아 안과의사인 Barraquer는 1949년 환자의 눈에서 각막절편을 떼어내어 냉동한 후 그림 3과 같이 연마하여 시력을 교정했다.^[2] 이후 좀 더 정밀하고 안전한 수술을 위해서 각막절편을 만드는 미세각막절삭기(microkeratome)를 개발하고, 각막 모양을 개조하는 미세각막절제술(keratotomy)을 시행하여 레이저굴절교정각막수술의 발판을 마련했다.

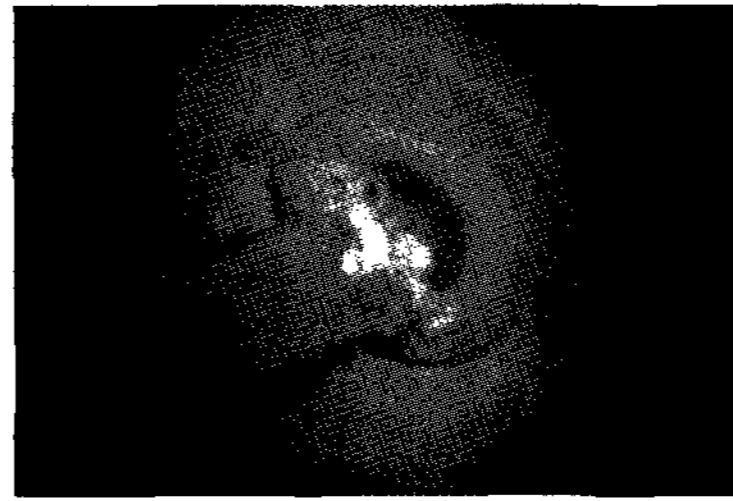


그림 3. 각막 절제 장면

이후 1970년대에 이르러 러시아의 Fyodorov가 방사상 각막절개술(radial keratotomy, RK)을 시행했다.^[3-4] 다이아몬드칼을 사용하여 반지름 방향으로 4~8 군데 직선으로 절개하고 각막이 아무는 과정에서 두께가 얇아져 각막 굴절력이 낮아진다. 그러나 각막 재생 단계에서 굴절력 변화가 심하고 상당한 기간이 지나야 안정된 시력에 도달하지만 그 결과를 예측하기는 힘들었다. 현재는 시술하지 않는 방법이다. 그 이후 1980년대 초 IBM의 Srinivasan은 자외선이 세포와 유기물질에 미치는 영향을 연구하여 자외선이 인접 영역에 열적 손상을 입히지 않고 절제할 수 있음을 입증했다.^[5] 이 현상을 절제 광분해(ablative photodecomposition)라고 불렀다.

1983년 Trokel이 엑시머레이저로 소 눈의 각막 표면에 1 J/cm²의 에너지를 입사하여 열적 손상 없이 1 μ m 깊이로 연마함으로써 레이저교정술의 가능성을 처음 제시했으며,^[6] 1985년 독일 Seiler가 각막 외상을 치료할 목적으로 광치료각막절제술(phototherapeutic keratectomy)을 시행하여 레이저굴절교정각막수술의 가능성을 재확인했다.^[7] Seiler는 1999년 파면분석기를 사용한 맞춤형 굴절교정각막수술을 시행함으로써 이 분야의 발전에 또 다시 공헌했다. 한편 1987년 McDonald는 미국식품의약국(FDA)의 승인 하에 맹인을 대상으로 레이저굴절교정각

레이저 굴절교정 각막수술



그림 4. 미세각막절삭기로 동물의 각막절편을 만드는 장면

막절제술(photorefractive keratectomy, PRK)을 시행하여 세계 최초로 성공했다.⁽⁸⁾ 마침내 1995년 미국 FDA가 레이저 시술의 안정성을 정식 공인함으로써 환자들이 안심하고 시술받는 분위기가 조성되었다.

레이저 기술의 진보와 1950년대부터 연구해 온 시력교정에 대한 이론, 그리고 미세각막절제술과 PRK 경험을 융합하여 1988년 Peyman이 각막절편을 만드는 LASIK(laser in situ keratomileusis) 수술의 특허를 취득했다.⁽⁹⁾ 1990년 Pallikaris는 LASIK 수술의 완성도를 높이는데 기여했다. Pallikaris는 그림 4와 같이 미세각막절삭기로 동물의 눈을 대상으로 각막절편을 성공적으로 만들어 임상학적으로 LASIK 수술의 길을 열었던 것이다.^(2,10) 각막절편을 만들어 절제하는 수술은 수술 결과가 좋고 합병증 발생 빈도가 낮아서 그 이전의 수술에 비해 더 많은 대중적 인기를 얻게 되었다.

3.2 엑시머레이저를 사용한 생체조직 절제

한편 Bhaumik의 엑시머레이저 연구에 이어서 1970년 Basov가 실험적으로 엑시머레이저 발진을 실현한 이후 다양한 엑시머레이저가 개발되었다.⁽¹¹⁻¹²⁾ 예컨대, Ar₂* 126 nm, Kr₂* 146 nm, F₂ 157 nm, ArF 193 nm, KrF 248 nm, XeBr 282 nm, XeCl 308 nm, XeF 351 nm, CaF₂ 193 nm, KrCl 222 nm, Cl₂ 259 nm, N₂ 337 nm 등이 있다.

가시광선은 세포를 연소(burning) 또는 광응고(photo coagulation)시키며 적외선은 광기화(photo vaporization) 또는 광파열(photo explosion) 작용을 한다. 반면에 자외선은 분자 결합을 끊어 조직을 절제(ablation)한다. 그림 5는 엑시머레이저로 가공한 머리카락과 각막 사진이며, 정교

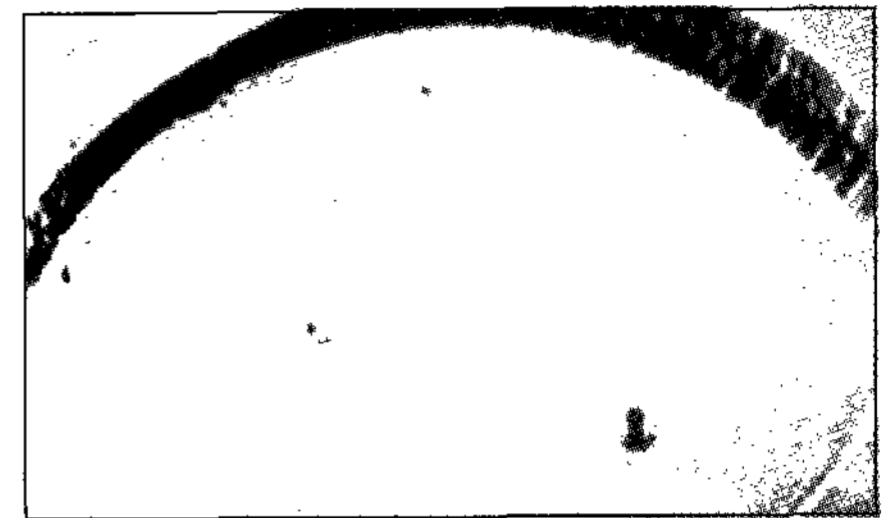


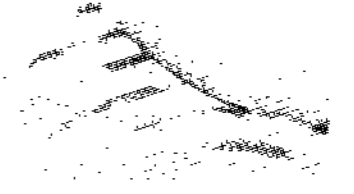
그림 5. 엑시머레이저로 머리카락과 각막을 미세하게 조각한 모습

하게 가공된 미세 형상을 눈으로 확인할 수 있다. 가시광선과 적외선은 온도상승을 유발하여 인접한 세포까지 열적 영향을 미치는 반면에 자외선은 적은 양의 조직만 제거하고 인접한 세포에 거의 영향을 미치지 않는다. 그래서 자외선을 냉광(cold light)이라 한다.

자외선이 생체조직에 미치는 영향은 다음과 같다.⁽¹³⁻¹⁵⁾ 200 nm 근방의 파장은 인접한 조직에 열적 영향을 미치지 않고 광이 조사된 조직의 분자 결합만을 끊어 그 조직을 제거한다. 반면에 KrF 레이저 파장인 248 nm 자외선은 인접한 세포에 열적 손상을 입히고 액포 조직이 생성되는 부작용이 있다. UV-B(280~315 nm)는 피부암 발생 원인이 된다. UV-C(100~280 nm)도 암 발생 원인을 제공하지만 193 nm 파장은 DNA를 손상시키지 않는다.

표1. 교정시력에 따른 절제깊이

교정시력 (디옵터)	절제깊이 (μm)		
	절제지름		
	5 mm	6 mm	7 mm
1.0	8.3	12.0	16.3
3.0	25.0	36.0	49.0
5.0	41.7	60.0	81.7
7.0	58.3	84.0	114.3
9.0	75.0	108.0	147.0
11.0	91.7	132.0	179.7



100 nm보다 짧은 파장은 세포를 투과하지만 역시 암을 유발할 수 있다.

193 nm 파장의 세포 조직 침투깊이는 약 0.25 μm 이며, 이를 이용한 조직 제거를 광절제(photoablation)라고 한다. 각막 상피세포인 경우, 세포막에서 세포핵까지 거리가 약 2 μm 내외이기 때문에 193 nm 자외선이 세포핵에 도달하지 않거나 아예 파괴되어 돌연변이 유발(mutagenesis) 확률이 낮은 것으로 보고 있다. 미미하게 손상된 세포는 재생된다. 이와 같은 이유에서 레이저굴절교정각막수술에서 193 nm 엑시머레이저를 사용하고 있다.

표1과 같이 절제영역 중심에서의 절제깊이는 교정시력과 절제지름에 의해 결정되며, 계산 공식은 다음과 같다.^[16]

$$\text{절제깊이} (\mu\text{m}) = \frac{1}{3} Dh^2$$

여기서 D는 디옵터 단위의 교정시력이며, h는 mm 단위의 절제지름이다. 교정하고자 하는 시력이 1 디옵터인 경우, 절제지름이 5 mm이면 8.3 μm , 절제지름이 6 mm이면 12.0 μm , 절제지름이 7 mm이면 16.3 μm 이기 때문에 절제지름이 커질수록 연마해야 하는 깊이가 현격하게 증가한다. 따라서 동공이 크면서 각막이 얇은 환자는 이 시술이 적합하지 않을 수 있다.

3.3 레이저굴절교정각막수술의 종류

레이저굴절교정각막수술은 각막 절제 위치에 따라 PRK(photorefractive keratectomy), LASIK(laser in situ keratomileusis), LASEK(laser epithelial keratomileusis)의 3가지로 구분한다. PRK와 LASEK은 각막절편을 만들지 않으며 LASIK은 각막절편을 만드는 것이 차이점이다.^[16-17]

3.3.1 PRK(photorefractive keratectomy)

그림 6(a)와 같이 PRK는 각막 표면에 직접 레이저를 조사하는 방법이다. 약물로 각막 중심부의 각막상피와 Bowman 막을 제거한 다음 각막실질에 레이저를 조사해 원하는 모양으로 각막을 연마한다. PRK는 각막절편을 만들지 않는 점에서 LASIK과 차이가 있으며 수술 중에 상피세포층을 보존했다가 다시 덮는 LASEK과 구분된다.

시술 과정에서 레이저를 조사하는 시간은 10~90초 정도 걸린다. 전형적인 PRK 수술에 걸리는 시간은 한쪽 눈에 약 5~10분 정도다. 수술을 종료하면 3~5일 후 각막 상피가 재생될 때까지 압박 콘택트렌즈를 착용하여 각막을 보호한다. 시력은 약간 늦게 회복되는 편이어서 한쪽 눈만 수술했을 경우, 통상 다른 눈은 1주일 후에 수술한다. PRK 수술은 예전에 시력교정 수술을 받은 환자가 재수술을 받을 때 적용하기도 한다.

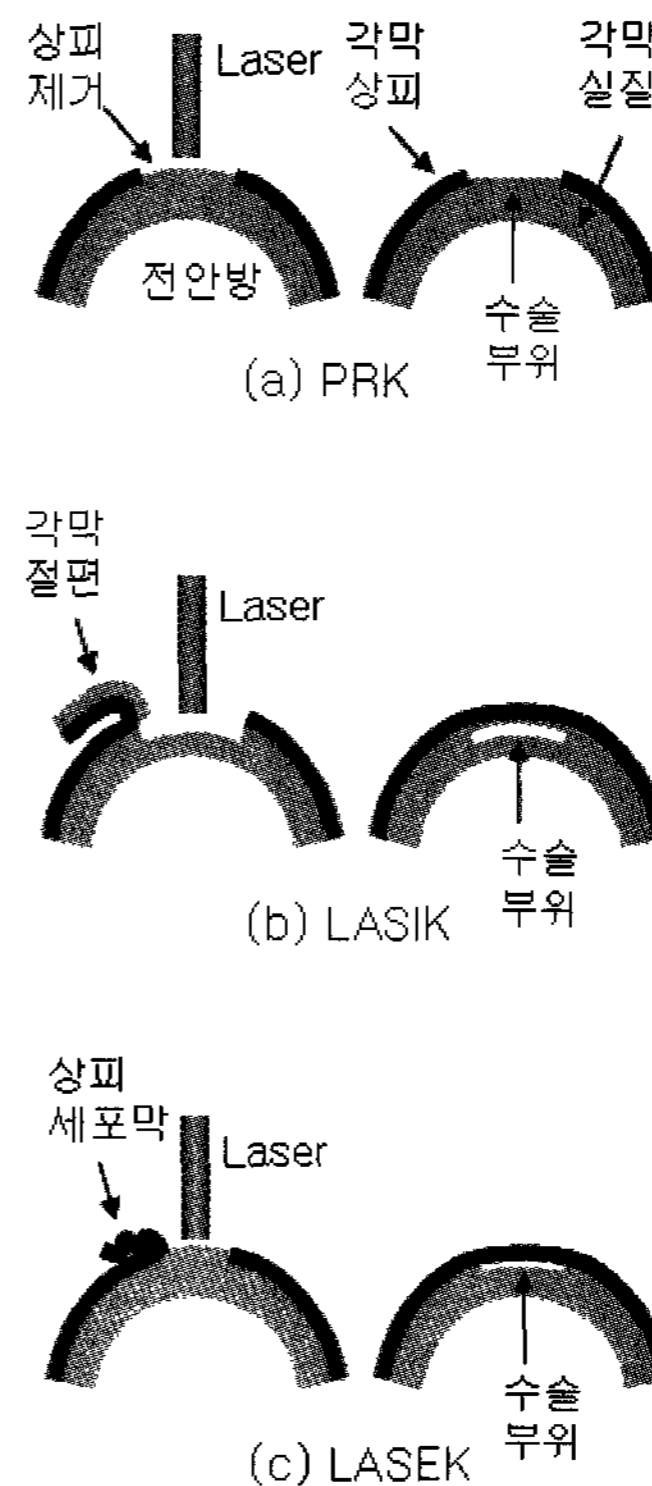


그림 6. PRK, LASIK, LASEK의 비교

3.3.2 LASIK(laser in situ keratomileusis)

LASIK은 엑시머레이저를 사용해서 각막을 연마한다는 점에서 PRK와 같지만, 각막절편을 만들고 각막실질을 연마한다는 점에서 차이가 있다. LASIK 과정은 간단하다. 그림 6(b)와 같이 미세각막절삭기로 각막실질을 덮고 있는 각막상피를 그대로 남겨둔 채 얇은 각막절편을 만들어 책장을 넘기듯 각막절편을 들어 올린 다음, 노출된 각막실질부에 약 20~50초간 레이저를 조사하고 각막절편을 원 위치로 되돌리는 것이다. 각막절편을 원래 위치로 되돌려

레이저 굴절교정 각막수술

덜으면 각막절편은 자연 흡입력에 의해 원위치에 단단히 붙게 된다.

LASIK 수술에 걸리는 시간은 약 10~20분이며 통증은 거의 없다. LASIK은 각막표면에 직접 레이저를 조사하는 PRK에 비해 여러 가지 장점이 있으나 두 가지 수술 방법 중 어느 수술을 택할지는 수술의가 결정하게 된다. 일반적으로 90% 이상이 수술 후 0.8 이상의 시력을 갖는다. 하지만 눈에 강한 타격이 가해지면 각막절편이 떨어질 수 있으므로 주의를 해야 한다.

최근에는 각막절편 절삭 기법에 따라 Micro-LASIK, Epi-LASIK, Intra-LASIK 등 다양한 LASIK 방법들이 등장하고 있다. 기존의 각막절삭기로 만든 각막절편의 두께는 160 μm 이상인 반면에 최근에 출시된 미세각막절삭기를 사용하면 90~120 μm 두께의 각막절편을 만들 수 있다. 이 미세각막절삭기를 사용한 수술을 Micro-LASIK이라 한다. 에피케라톰(epikeratome)이란 도구를 사용해서 각막상피 층만을 분리할 수 있다. 이 도구를 사용하는 수술을 Epi-LASIK이라고 하는데, 각막상피 층을 떼어내어 수술한다는 측면에서 LASEK에 가깝지만 LASEK이 약물로 각막상피 층을 떼어낸다는 점에서 Epi-LASIK과 약간 차이가 있다. 물리적인 도구로 각막절편을 만드는 반면에 펄스 레이저로 각막절편을 만들 수 있으며 (4.5절 참조), 이 수술을 Intra-LASIK이라고 한다. 위의 방법들이 각막 절편을 만들어 시술한다는 점에서 기존의 LASIK과 근본적인 차이는 없으나, 기기를 생산하는 관련 업계에서는 약간의 차이라도 강조하여 차별성을 돋보이게 하고자 새로운 수식어들을 붙인다는 생각이 든다.

3.3.3 LASEK(laser epithelial keratomileusis)

LASEK은 PRK와 LASIK의 단점을 보완하고 장점만을 살려 고안한 시력교정술로, 통증과 시력회복이 PRK와 LASIK의 중간쯤이다. LASEK은 유럽에서 시작하여 99년부터 국내에 보급되기 시작했다. LASIK은 통증이 거의 없고 회복이 빠른 수술이지만 LASIK을 시행하지 못하는 환자도 있다. 각막 중심 두께가 얇거나 시력이 극도로 나빠서 각막 절제 후에 잔여 각막의 두께가 약 300~320 μm 이하가 되는 경우에 LASEK이 더 적절하다.

LASEK은 절제 영역의 가장자리를 특수하게 고안된 기구로 찍어 누르듯이 자른 다음, 약물로 상피세포 층을 벗기고 엑시머레이저를 조사하기 때문에 잔여 각막을 최대

한 확보할 수 있다. 잔여 각막 두께가 얇으면 안압에 의해서 각막이 돌출하여 수술 후 오히려 시력이 저하될 수 있으며 그 정도가 심한 경우에는 극심한 시력 장애가 올 수도 있다. 눈이 작거나 콘택트렌즈를 장기간 착용했던 환자도 LASEK의 대상이 된다. LASEK은 수술 후 상피세포 층을 원위치에 되돌려 놓아 상피세포 층의 회복을 증진한다는 점에서 PRK와 구분된다.

LASEK은 수술적 측면에서 심각한 후유증 없이 상대적으로 안전하다. PRK의 가장 큰 합병증인 각막혼탁의 발생 빈도를 낮출 수 있다. 게다가 시력회복이 빠르며(5일 이내에 최대 시력의 80% 수준에 도달), 상피가 보존돼 보호막 역할을 하게 되므로 감염 우려가 적고 미세각막절삭기를 사용하지 않아 환자의 부담이 그만큼 적다. 또는 각막절편이 주름 잡히는 것과 같은 부작용도 상대적으로 적으며 반흔이 남지 않는다. 그러나 LASEK 수술을 받은 후 하루나 이틀 정도는 눈을 뜨기 힘들 정도의 통증과 이물감이 있고 유루현상이 나타난다. 또 수술 후 1주일만은 자주 경과를 관찰해야 하며 4~6개월 정도는 주기적인 진료를 해야 한다. LASEK을 기피하는 이유는 시력 회복 속도가 LASIK에 비해 떨어지기 때문이기도 하다.

3.4 레이저를 이용하지 않는 다른 시력교정술

1999년 FDA는 각막내링삽입술을 승인했다. 각막내링삽입술은 그림 7(a)와 같은 생체친화성 재질의 가느다란 링을 각막의 실질부에 삽입하는 것이다. 그림 7(b)는 각막에 링을 삽입한 상태를 보여주고 있다. 링에 의해 동경방향으로 가해진 인장력은 각막의 곡률을 변화시키고 결과적으로 눈의 굴절력을 교정하게 된다. 생체친화성 재질은 인체에 무해하면서도 별다른 생화학적 반응을 일으키지

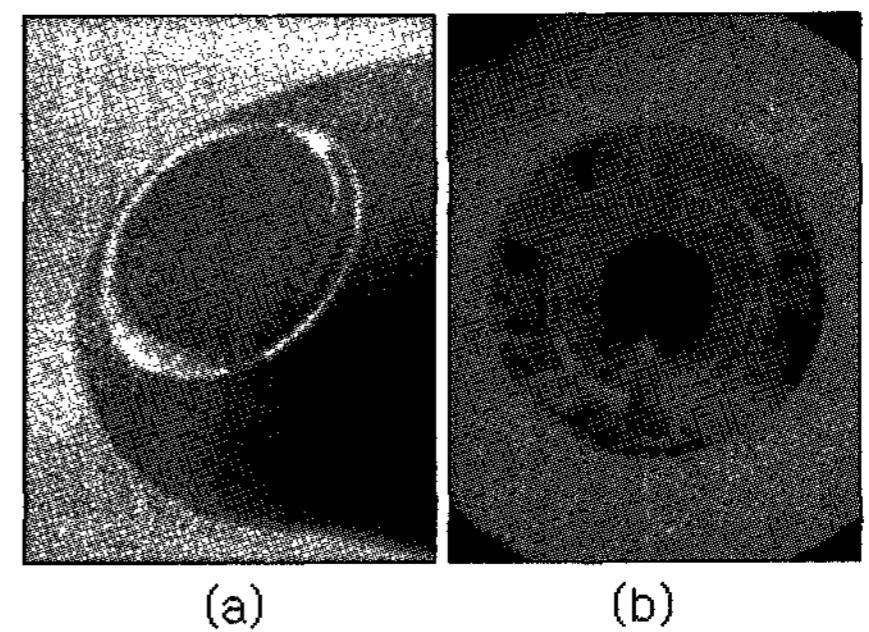
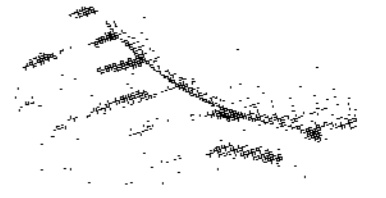


그림 7. (a)각막에 삽입하는 링의 형태, (b)각막에 링을 삽입한 모습



얇은 재질이다. 각막 주변부에 1.8 mm 정도의 아주 작은 절개 창을 만들고 안구에 음압을 건 다음 링을 삽입할 수 있도록 특수 기구를 사용하여 각막실질 층에 반원형의 터널을 만들어 링을 삽입하면 수술이 완료된다. 수술 시간은 약 5~15분 정도 걸린다.

절개하는 위치가 각막의 2/3되는 지점이기 때문에 각막 천공의 위험이 있기는 하지만 결과가 만족스럽지 않을 때는 언제든지 링을 제거해 수술 전 상태로 복구할 수 있는 것과 각막 조직 모두를 보존할 수 있는 것이 각막내링삽입술의 장점이다. 하지만 모든 수술에서 합병증 또는 부작용이 있듯이 각막내링삽입술에서 감염, 과교정, 부족교정, 겹쳐 보임, 번져 보임, 부정 난시 등의 부작용이 약 1%의 확률로 나타난다. 각막내링삽입술의 또 다른 단점은 시력 교정 단계가 0.5 디옵터라는 것이다. 레이저의 시력교정 단계인 0.1~0.25 디옵터 보다 높은 수치다.

투명수정체적출술도 시력교정의 한 방법으로 쓰이고 있다. 백내장 환자인 경우 수정체를 제거하고 인공수정체를 삽입하는 반면에, 투명수정체적출술은 투명한 수정체낭 안에 있는 안내 수정체를 제거하고, 인공수정체를 삽입하는 수술이다. 이 수술은 일반 시력교정술의 적용이 불가능한 -16 디옵터 이상의 초고도 근시안이나 원시안인 경우에 고려해 볼만한 방법이지만 조절력이 사라지는 단점이 있다. 이미 노안이 시작된 40세 이상의 성인이라면 투명수정체적출술도 하나의 선택일 수 있으나 고도 근시안은 망막 열공, 망막 변성, 망막 박리 등의 망막 질환이 있을 수 있으며 수술로 그 위험성이 증가할 수 있으므로 주의가 요망된다.

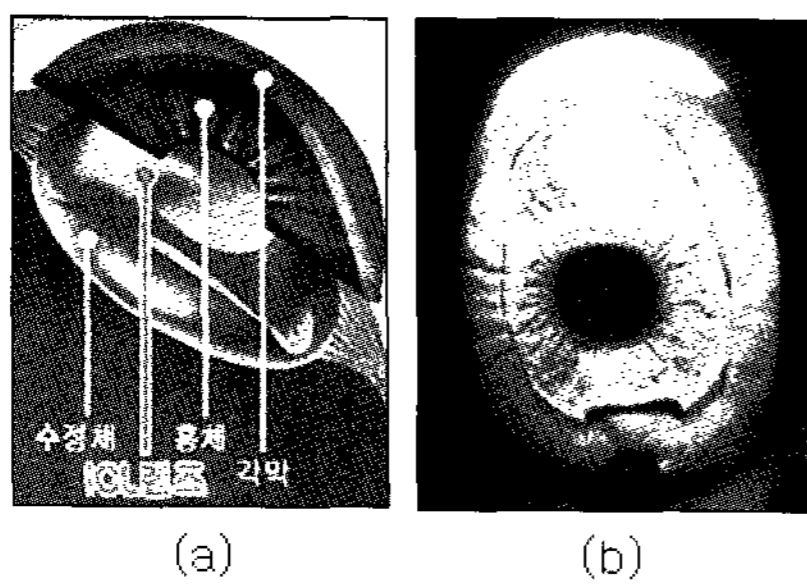


그림 8. 안내렌즈를 삽입한 모습. (a)수정체와 동공 사이, (b)동공주변부 홍채 위

그림 8과 같은 안내렌즈삽입술도 시력 교정의 한 방법이다. 렌즈를 삽입하는 위치는 전안방, 동공 주변부, 동공과

수정체 사이 등 3군데가 있다. 전안방에 삽입하는 렌즈는 PMMA 혹은 PMMA와 실리콘 재질을 혼합한 비교적 딱딱한 재질, 동공 뒤에는 콜라겐이나 히드로겔과 같은 부드러운 재질로 만든 렌즈를 장착한다. 만약 렌즈가 정확하게 자리를 잡지 못하여 동공을 막는다거나 전방각에 상처를 입히면 방수 흐름이 방해받아 안압이 상승함으로써 결국 녹내장으로 발전할 수 있다. 이를 방지하기 위해, 수술 전에 레이저로 홍채 주변부에 방수가 흐를 수 있는 구멍을 만드는 홍채절개술을 시행한다.

후방안내렌즈가 수정체와 접촉하지 않도록 고안되었음에도 수정체와 접촉하여 백내장을 유발할 수 있으며 전방안내렌즈는 각막내피세포를 손상시켜 각막부종을 유발할 수 있다. 각막내피세포는 각막 제일 안쪽에 있으며 각막의 함수율을 일정하게 유지시키는 역할을 하기 때문에 각막내피세포가 건강하지 못하면 수분이 축적되어 각막이 부영게 된다. 고도근시인 경우 안내렌즈로 교정이 가능하며 필요하면 언제든지 제거하거나 교체 가능한 것이 이 시술법의 장점이다.

4. 레이저굴절교정각막수술에서의 광기술

4.1 각막지형도 계측기

굴절교정각막수술 후 일부이긴 하지만 코마수차, 구면수차와 같은 고위 광학수차가 증가할 수 있다. 이에 따라 야간시력이 감소하거나 빛 번짐과 같은 부작용이 생길 수

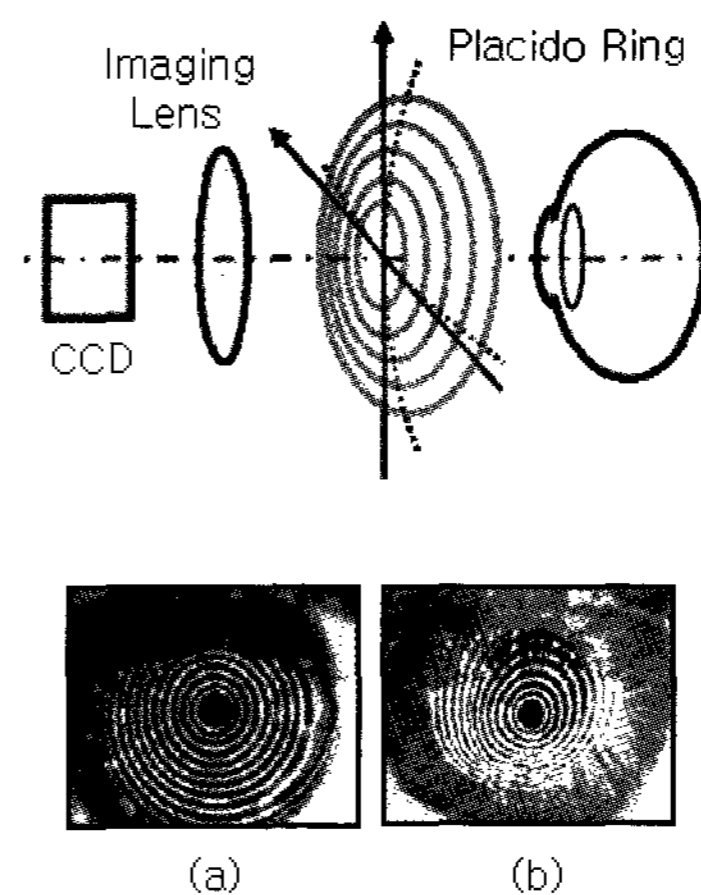


그림 9. 플라시도 링을 사용한 각막지형도 계측기

레이저 굴절교정 각막수술

있다. 또한 교정 중심이 이탈하는 경우 심각한 시력 장애가 온다. 결국 아주 정밀한 각막 절제가 필요하고, 이 필요성을 충족시키기 위해 다양한 기법과 장치들이 개발되어 왔다.

그 중 하나가 각막지형도 계측기이다. 각막지형도 계측기(corneal topographer)는 각막 곡률, 편심률, 굴절력 정보를 얻고자 사용하며 정밀한 제품이 시장에 등장함으로써 빠른 성장세를 보이고 있는 장비 중의 하나다. 현재 시력교정술에서 이 장비는 필수장비로 사용하고 있으며, 정확한 콘택트렌즈 처방이 가능하여 일반안과나 안경점의 수요도 증가 추세에 있다.

그림 9와 같이 각막지형도 계측기에는 동근 디스크에 동심원 광원(Placido ring)이 배열되어 있는 패턴이 있다. 볼록한 각막 표면 반사에 의해 각막 후면에 이 패턴의 허상이 형성된다. 볼록거울에 의해 물체의 상이 거울 후면에 정립허상이 맺히는 것과 같다. 각막 후면에 형성된 허상을 CCD 카메라로 포착하여 링 이미지의 배열 상태로부터 위치에 따른 각막 표면의 곡률 변화를 계산하고, 최종적으로 기준면에 대한 각막 표면의 상대적인 높이, 즉 각막지형도를 작성한다. 그림 9의 (a)는 동심원이 규칙적으로 잘 배열되어 있어서 정상안에서 볼 수 있는 패턴이며, (b)는 위쪽과 비교하여 아래 방향으로 선이 밀집되어 있어서 각막



그림 10. ORB-Scan의 계측 순간 사진

곡률이 비정상적으로 대칭이 아님을 알 수 있다. 각막지형도 정보를 활용하여 각막을 부드럽고 매끈한 곡면이 되도록 절제하고 일정한 패턴을 만들어 시력을 개선한다.

또 다른 각막지형도 계측기는 소위 ORB-Scan이라는 장비인데, 이것은 슬릿빔을 사용하여 각막 후면의 지형까지 측정하고 각막 전면 데이터와 비교하여 각막 위치에 따른 각막 두께를 비롯하여 상세한 각막 정보를 얻을 수 있

는 장비이다. 측정원리는 간단하다. 얇은 슬릿빔을 한쪽 방향에서 반대 방향으로 주사하면서 그림 10과 같은 각막의 단면 영상을 연속적으로 수집하여 분석하면 각막에 대한 상세 정보를 얻을 수 있다. 최근에는 Placido ring 방식과 슬릿빔 방식을 혼합한 장비도 출시되었다. 각막 후면에 대한 분석이 효과적으로 가능해져 원추각막과 같은 질환을 조기에 발견할 수 있으므로 수술의 안정성에 많은 도움을 준다. 이와 같은 3차원 각막분석장비를 사용하면 초음파 기기로 측정된 각막두께의 오차를 보정할 수 있다. 각막실질의 잔여량을 최대한 확보할 수 있기 때문에, 정확한 각막두께는 레이저굴절교정각막수술에서 매우 중요한 정보다. 또한 안내렌즈삽입술에서 전방깊이를 측정하거나 정확한 콘택트렌즈 처방을 위해 이 장비를 사용한다.

4.2 파면분석기

또 하나의 주요장비는 파면분석기이다. 적응광학 천체 망원경, 레이저빔 제어장치, 광학계 검사장비로 사용해 왔던 파면분석기를 Liang이 임상에 적용하여 그 효용성을 입증하여 1994년 발표하였고,⁽¹⁸⁾ 이후 안과장비 업체들이 앞 다투어 안과용 파면분석기를 출시했다. 단지 각막을 평평하게 만드는데 그치는 게 아니라, 이 장치를 사용하면

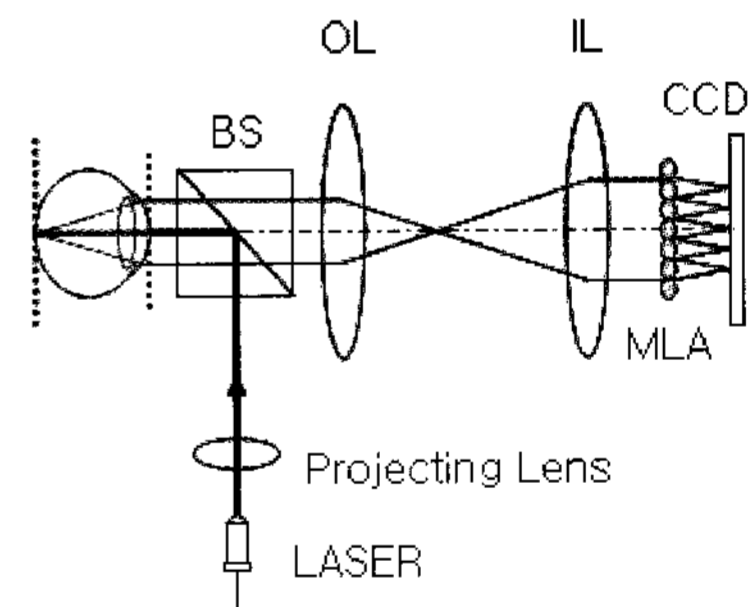


그림 11. Shack-Hartmann 파면분석기의 개략도

각막 후면, 안구 전방, 수정체에 의해서 발생하는 광학수차를 총체적으로 진단해서 더욱 정확한 수술이 가능해진다. 개개인의 다양한 눈 상태에 맞추어 절제 패턴을 산출하여 수술에 적용하기 때문에 맞춤형 수술이라고 한다.

그림 11은 Shack-Hartmann 파면분석기의 개략도이다. 망막에 작은 광점이 맺히도록 투사렌즈로 레이저광을 조사한다. 망막 표면에서 반사된 광점은 눈 밖으로 퍼져



나오는 파면을 생성시킨다. 이 파면을 측정하기 위해 그림 11과 같이 광학계를 구성한다. 즉, 대물렌즈(OL)와 결상렌즈(IL)는 각막 주요면(principal plane)과 MLA(microlens array)가, 망막과 CCD 카메라가 서로 공액관계가 되도록 배치한다. 이렇게 구성하면 각막 주요면에서의 파면은 MLA 위에, 망막 위의 광점은 MLA를 거쳐 CCD 카메라에 전달된다.

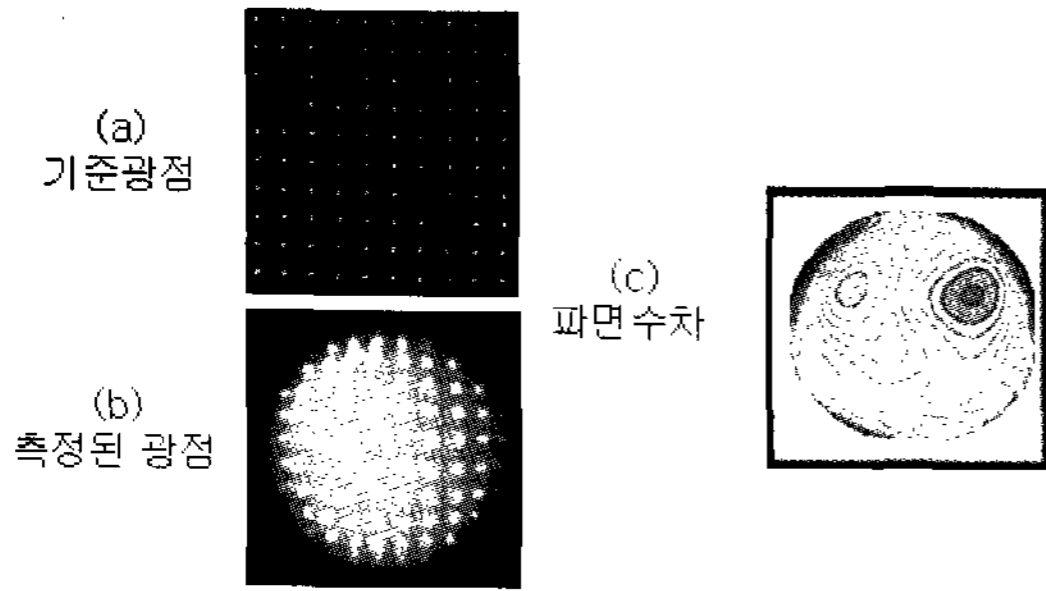


그림 12. 측정의 예

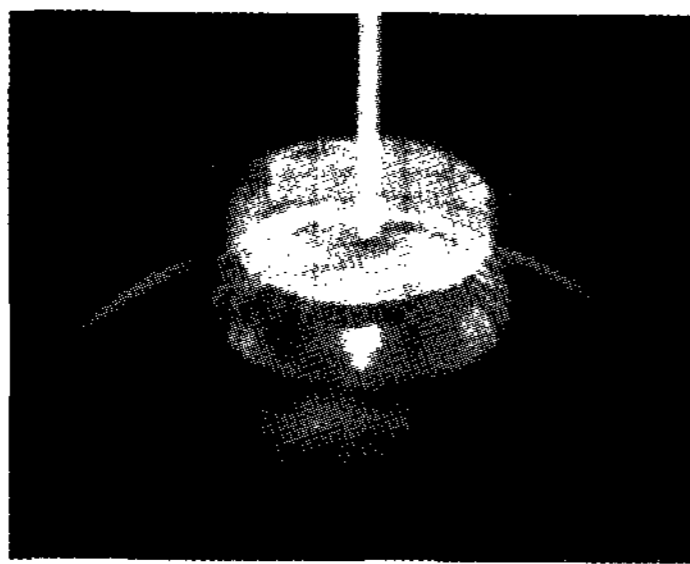


그림 13. 파면유도(wavefront-guided) 각막 절제 개념도

그림 12(a)는 CCD에 맺힌 기준상점이며, (b)는 안구를 측정하여 얻은 상점이다. 기준상점에 대해 안구상점의 편이를 산출하고 이를 근거로 광학수차를 계산하면 (c)와 같은 광학수차 지형도를 얻을 수 있다. 정상적인 근시 또는 원시인 경우에는 동심원의 광학수차 지형도가 되지만, 난시 또는 고위수차가 발생한 경우에는 그 대칭성이 깨진다. 그림 13은 광학수차 지형도를 참조하여 각막을 연마하는 수술법을 묘사한 상상도이다.

4.3 레이저빔 형태와 주사 방식

넓은빔(board beam)으로 시술하면 오목하게 절제된 영역에서 중심 부분이 불룩하게 부풀어 오르는 중심용기

(central islands)가 발생할 수 있다.^[19] 이를 보정하기 위한 프로그램도 있지만 아주 만족한 결과를 얻지 못한다. 또한 공간적으로 광세기가 균일한 넓은빔을 만드는 것이 용이하지 않으므로 기대한 수준만큼의 각막 절제 결과를 얻지 못한다. 이를 보완한 방법이 광점(spot) 주사 방식이다. 광세기가 균일한 작은 광점을 원하는 위치에 필요한 광량만큼 조사하여 정확하게 절제 두께를 제어할 수 있으며 결과적으로 각막 표면을 평탄하게 절제하게 된다.

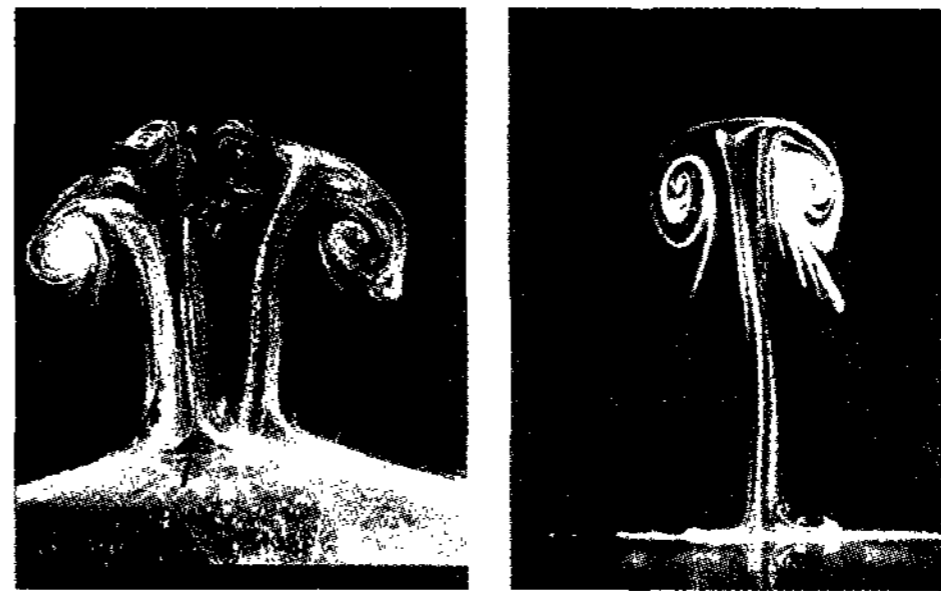


그림 14. (a)넓은빔과 (b)광점빔을 각막에 조사했을 때 발생하는 일종의 버섯구름

광점 주사의 또 다른 장점은 응력파(stress wave) 압력이 감소하는 것이다. 레이저를 각막에 조사하면 각막표면에서 버섯구름이 생성되면서 응력파가 발생한다. 그림 15는 넓은빔과 광점빔을 조사했을 때 절제 표면에서 발생하는 버섯구름을 보여주고 있다.^[20] 레이저빔이 약 6 mm 이상이면 각막 표면에서 응력파 압력이 약 40 mmHg이지만, 각막 안쪽으로 전파하면서 응력파가 압축되어 5 mm 깊이에서는 약 80 mmHg까지 상승한다.^[19] 이런 압력은 유리질이나 수정체 이상을 초래할 수도 있다. 레이저 시술을 받아도 망막박리가 발생할 확률은 높지 않으나 응력파동에 의해서 거대망막박리가 발생할 가능성이 있다는 연구 결과도 있다. 레이저빔 크기가 약 1.5 mm 이하면 응력파가 각막내피를 지나면서 분산 소멸되어 압력이 감소하기 때문에 안구 구성 물질에 미치는 영향이 거의 없다.

광점 주사 방식의 또 다른 장점은 각막 보존량이 많아진다는 것이다. 넓은빔을 사용하면 절제가 필요하지 않은 부분도 일괄적으로 절제하는 반면에 광점 주사 방식에서는 절제가 필요한 부분만 선택적으로 절제하고 절제가 필요하지 않은 부분은 보존함으로써 잔여 각막이 상대적으로 더 두껍게 된다. 레이저빔 주사방식에 따라 슬릿빔 주사 방식(slit beam scanning), 절제할 부위의 상태에 따라 광

레이저 굴절교정 각막수술

점 크기를 변화시키면서 주사하는 방식(variable spot scanning), 점사식 광점 주사 방식(flying spot scanning) 등이 있다.

4.4 안구추적기

시술하는 동안 환자의 눈은 미세하게 움직인다. 시술 중 눈의 움직임을 고정 관련 안구 도약 운동(fixation-related saccadic eye movements)이라고 부르는데 눈의 움직임은 무작위 움직임과 초당 약 5회 정도의 왕복운동이 혼합되어 나타나고 움직인 거리에 비례해서 속도가 증가하는 특징이 있다. 운동범위는 대체적으로 회전각도로는 1~10° 또는 각막표면의 이동거리로는 0.1~2.0 mm이며, 속도는 100~800°/s 또는 22~170 mm/s로서 정교한 각막 절제 시술 중이라는 특수 상황을 고려하면 매우 빠르고 복잡한 움직임이다.^[19] 따라서 고속 추적이 가능한 안구추적 시스템이 필요하다.

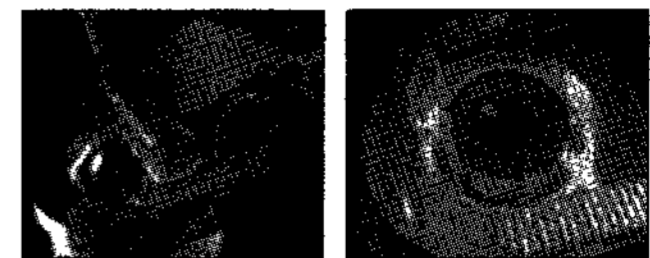
폐쇄루프 안구추적기의 표본화속도(sampling speed)는 반응속도의 10배 이상으로 하며 출시된 제품 중에는 표본화속도가 수천 Hz에 이르는 제품도 있다. 개방루프 시스템을 채용한 제품군들은 표본화속도가 비디오카메라의 촬영속도에 의존하며 반응속도는 표본화속도와 같다. 비디오카메라의 촬영속도가 점차 향상되어 최근 수백 Hz의 비디오시스템을 안구추적시스템에서 채용하고 있다. 이와 같은 안구추적기는 절제시스템에서 보았을 때 정지된 안구 영상을 제공하므로 시술의 정확도를 높여주었고 그로 인해 교정시력이 현저하게 향상됐다.

그럼에도 미약하지만 중심이탈이 관찰됨으로써, 안구추적기를 사용하더라도 각막의 원하는 위치에 레이저빔을 정확하게 조사하는 것이 아직은 힘들다는 것을 알 수 있다. 결국 시술 중에 안구를 움직이지 않으려는 환자의 노력과 환자의 머리와 안구를 고정하는 기구 개발을 연구하는 시술의 노력이 요구되며, 관련 업계에서는 초고속 안구추적기를 개발해야 할 것이다.

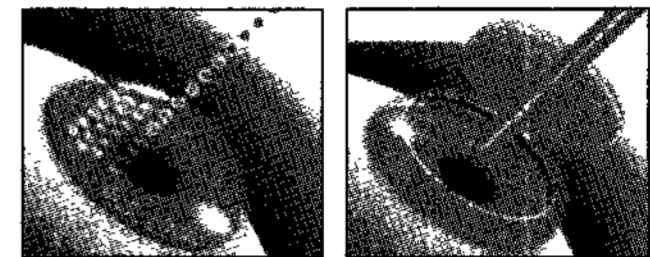
4.5 레이저 각막절삭기

레이저굴절교정각막수술에서 각막절편을 얼마나 균일하게 만드느냐는 얼마나 균일하게 각막을 연마하느냐 보다 중요하다. 비록 정교하게 각막을 연마해도 각막절편의

표면이 균일하지 않으면 그만큼 연마 효과가 감소하기 때문이다. 레이저 각막절삭기는 기계식 미세각막절삭기의 절삭 한계를 극복하는 대안으로 제시된 방법이다. 그림 15의 위쪽 그림은 기계식 미세각막절삭기로 각막절편을 만드는 장면이다. 칼날을 고속으로 진동시키면서 전진하여 절편을 만든다.



미세각막절삭기



레이저각막절삭기

그림 15. 미세각막절삭기(위)와 레이저 각막절삭기(아래)로 각막절편을 만드는 장면

미세각막절삭기 레이저 각막절삭기

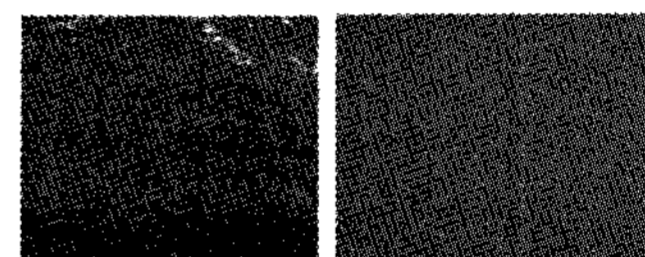
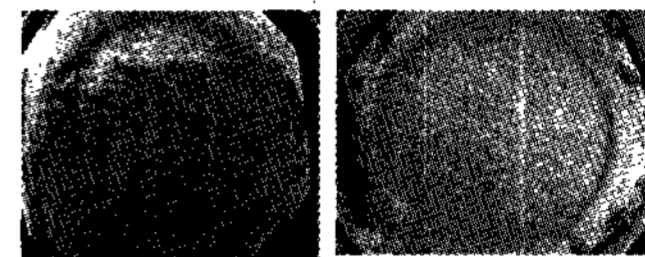
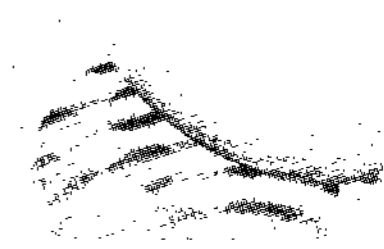


그림 16. 미세각막절삭기(왼쪽)와 레이저 각막절삭기(오른쪽)로 절제한 각막 표면의 형상

그림 15의 아래쪽 그림은 레이저 각막절삭기로 절편을 만드는 과정을 보여주고 있다. 펨토초 적외선 레이저빔을 각막의 주어진 위치에 강하게 집속하면 초점에 있는 생체 조직들이 분해되어 이산화탄소와 수증기로 이루어진 액포층이 형성됨으로써 각막절편이 만들어진다. 그림 16은 미세각막절삭기와 레이저 각막절삭기로 각막절편을 떼어내고 각막 표면을 비교한 것으로 후자의 표면이 훨씬 매끈한 것을 확인할 수 있다. 기계식 각막절삭기의 두께 오차가 ±20~40 μm인 반면에 레이저 각막절삭기의 두께 오차는 약 ±5 μm이다. 시술하는 동안 각막에 가하는 음압은 전자가 약 60~80 mmHg, 후자는 약 35 mmHg로 낮은 편이다. 음압이 높으면 망막에 부담을 줄 수가 있다. 레이저 각막 절삭 방법은 절제 가장자리의 경사각을 작게 할 수



있어서 상대적으로 야간 빛 퍼짐을 줄일 수 있는 장점도 있다.

5. 수술 전 검사

모든 수술이 그렇지만, 수술 전 정밀검사는 완벽한 수술을 위해 필요한 절차다. 레이저굴절교정각막수술에서도 다양한 검사가 진행되는데 안구건조 검사, 안압 측정, 굴절력 측정, 각막 상태 진단, 안저 검사 등이 있으며 각각 다양한 장비와 방법으로 세밀한 검사가 진행된다.

제일 먼저 문진을 통해 환자의 병력이나 현재의 증상을 물어 수술 가능성을 타진하고 검사 항목을 정하며 수술 후 나타날 수 있는 부작용이나 증상을 설명하여 환자의 협조를 구한다. 안구 상태에 따라서는 수술을 미루거나 심한 경우 수술이 불가능하다. 제일 먼저 세극등현미경을 사용해서 안구 상태를 검사하여 다음 단계의 검사를 더 진행할 것인지 판단하게 된다.

눈물은 평상시 분비되는 눈물과 감정에 의해 분비되는 눈물 두 종류가 있는데 이 중 평상시 분비되는 눈물량을 검사한다. 눈물량이 적어 각막이 건조할 경우 수술 후 상처 회복과 시력 회복이 지연될 수 있으며 안구건조가 심한 경우에는 레이저굴절교정각막수술 대상에서 제외되기도 한다. 눈물막은 점액층, 수성층, 지방층으로 구성되어 있는데 이 세층이 서로 균형을 이루지 않으면 눈물이 비정상적으로 빨리 마른다. 형광물질을 점안해서 검사하며, 이 검사를 눈물막 파괴 검사라고 한다.

다음은 시력 검사를 실시한다. 자동굴절력측정기를 사용해서 타각식으로 대략적인 굴절이상 정도와 각막곡률을 측정하고 현재 환자가 착용하고 있는 안경 또는 콘택트렌즈 도수를 비교하여 보다 정확한 굴절력 검사와 판단의 기초 자료로 삼는다. 환자의 조절력에 따라 시력 검사 결과가 달라질 수 있다. 조절마비제를 점안해서 조절 능력을 제거한 후 굴절검사를 시행하여 환자가 평상시 조절을 많이 하고 있는지를 판단한다. 두 눈의 굴절력이 서로 다른 환자들은 평소 더 잘 보이는 눈을 사용하는 습성이 있다. 이를 확인하는 검사가 우성안 검사다. 물체의 입체감을 얼마나 정확하게 인식하는지도 검사한다. 이것은 입체시 검사 또는 양안시 검사를 통해 진단한다. 입체시 기능을 감소시키는 요인으로 사시, 사위, 약시 등이 있다. 시신경 계

통의 이상 유무는 융합 검사로 진단할 수 있다. 각막 연마의 최종 자료로 사용하는 굴절력 분포의 정밀 계측은 파면 분석기로 실시한다(4.2절 참조).

각막 검사는 다음과 같다. 각막지형도 계측기로 각막 모양과 굴절력 분포를 측정하고 원추각막 유무도 진단한다. 레이저굴절교정각막수술 전에 반드시 해야 하는 검사다. 각막두께는 초음파를 이용해서 실시하며 이 역시 레이저 굴절교정각막수술 전에 거쳐야 하는 중요한 검사다.

안저의 건강상태도 정밀하게 진찰한다. 동공을 확장하지 않고 사용하는 무산동 안저카메라로 망막을 촬영하여 망막, 시신경유두, 맥락막의 질환뿐만 아니라 전신질환에 의한 망막의 이상소견 유무를 판단한다. 이상소견을 보일 때는 다음 단계의 정밀 검사를 한다. 도상검안경 검사가 그 중의 하나다. 동공을 확장하는 안약을 점안하여 눈을 산동시킨 후 도상검안경으로 망막 중심부뿐만 아니라 주변부, 시신경 유두, 유리체 등을 정밀 관찰한다. 망막을 단층 촬영하는 광간섭단층촬영기(OCT)를 사용하면 보다 정확하게 망막 상태를 진단할 수 있으며, 형광안저촬영기를 사용하면 일반검사로는 판단하기 힘든 망막혈관, 맥락막, 모세혈관의 이상 유무를 찾아낼 수 있다. 형광안저촬영을 위해서는 형광물질을 혈관에 투입해야 한다.

녹내장이 의심되면 시야계로 손상된 시신경이 있는지, 있다면 어느 부분이 손상을 입었는지 검사한다. 녹내장이 진행하면 안압이 상승하여 시신경이 손상을 입는다. 비접촉식 안압계 검사도 녹내장의 초기 단계를 진단할 수 있다. 정상적인 안압을 벗어나면 정밀 검사를 해야 한다. 더 정확하게 안압을 측정하려면 접촉식 안압계를 사용한다. 이때는 마취제를 점안한다.

6. 결론

레이저를 사용한 시력교정술의 연혁과 종류 그리고 광기술을 핵심으로 하는 의료기기에 대해 간략히 정리했다. 생체조직을 절제하는 방식의 시력교정술에서 비접촉 절제 수단인 레이저는 매력적인 도구다. 수술의 핵심 수단인 만큼 레이저 시스템의 안정성을 확보하는 노력은 지속되어야 한다. 또한 수술 전과 후에 안구 상태를 정확하게 진단하는 것이 중요하므로 관련 기기의 연구개발도 계속되어야 한다.

레이저 굴절교정 각막수술

한편 수술에 대한 막연한 불안감에도 불구하고 한국은 인구 대비 레이저굴절교정각막수술 환자 비율이 다른 나라에 비해 높은 편이다. 그러나 이 분야에서 국내 기술이 기여한 바는 전무하다시피 극히 미진하고 대부분 기술 수입에 의존하고 있다.^[21] 이제부터라도 엄청난 안과용 의료 기기 수요국인 한국에서도 기술적으로 낙후된 현실을 직시하고 기술 개발 노력을 해야 할 것이다. 안과용 의료기기는 광기술이 핵심인 고부가가치의 환경친화산업이다. 한국의 기술경쟁력 강화를 위해 광기술 전문인력의 양성에 힘써야 하며, 의료진과 광기술 전문인력들이 상호 협력하여 시장의 높은 장벽을 타개하고 국가기관이 지원하는 연구개발 시스템을 구축할 필요가 있다.

감사의 글

푸른세상안과 압구정센터(02-3448-7070) 이경섭 원장님께서 본 글의 내용을 검토하고 조언을 해주셨습니다. 이에 깊이 감사드립니다.

참고문헌

[1] <http://backreaction.blogspot.com/2007/01/eyeglasses-and-james-webb-space.html>.
 [2] <http://www.northdallaseye.com/lasikhistory.html>.
 [3] J. V. Jester, T. Venet, J. Lee, D. J. Schanzlin, and R. E. Smith, "A statistical analysis of radial keratotomy in human cadaver eyes," *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 92, no. 2, pp. 172-177, 1981.
 [4] <http://en.wikipedia.org/wiki/LASIK>
 [5] R. Srinivasan and W. J. Leigh, "Ablative photodecomposition: action of far-ultraviolet (193 nm) laser radiation on poly(ethylene terephthalate) films," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 104, pp. 6784-6785, 1982.
 [6] S. L. Trokel, R. Srinivasan, and B. Braren, "Excimer laser surgery of the cornea," *Am. J. Ophthalmol.*, vol. 96, no. 6, pp. 710-715, 1983.
 [7] T. Seiler, T. Bende, and J. Wollensak, "Use of far UV light in photoablation of the cornea," *Fortschr. Ophthalmol.*, vol. 83, no. 5, pp. 556-558, 1986.
 [8] http://www.visx.com/corporate/company_overview/history.php.
 [9] G. A. Peyman, "Method for modifying corneal curvature," US Patent 4,840,175 (1988).
 [10] I. G. Pallikaris, M. E. Papatzanaki, E. Z. Stathi, O. Frenschok, and A. Georgiadis, "Laser in situ keratomileusis," *Lasers Surg. Med.*, vol. 10, no. 5, pp. 463-468, 1990.
 [11] N. G. Basov, V. A. Danilychev, Y. Popov, and D. D. Khodkevich, "Laser operating in the vacuum region of the spectrum by excitation of liquid xenon with an electron beam," *JETP Lett.*, vol. 12, p. 329, 1970.

[12] D. Basting, K. Pippert, and U. Stamm, "History and future prospects of excimer lasers," *Proc. SPIE*, vol. 4426, pp. 25-34, 2002.
 [13] <http://www.prk.com/medical.html>.
 [14] J. J. Salz, P. J. McDonnell, and M. B. McDonald, *Corneal Laser Surgery* (Mosby, Amsterdam, 1995).
 [15] P. P. Van Saarloos and J. Rodger, "Histological changes and unscheduled DNA synthesis in the rabbit cornea following 213-nm, 193-nm, and 266-nm irradiation," *J. Refract. Surg.*, vol. 23, no. 5, pp. 477-481, 2007.
 [16] B. F. Boyd, S. Agarwal, A. Agarwal, and A. Agarwal, *Lasik and beyond lasik (Highlights of Ophthalmology, El Dorado, 2001)*.
 [17] 고동섭, 이경섭, 유용성, 김진국, 김광원, 이인식, 최철명, 파면분석을 이용한 맞춤형굴절교정각막수술 (ALC, 서울, 2002).
 [18] J. Liang, B. Grimm, S. Goelz, and J. F. Bille, "Objective measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a Hartmann-Shack wave-front sensor," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 11, no. 7, pp. 1949-1957, 1994.
 [19] S. M. MacRae, R. R. Krueger, and R. A. Applegate, *Customized corneal ablation (SLACK, Thorofare, 2001)*.
 [20] R. R. Krueger, "Steep central islands: have we finally figured them out?" *J. Refract. Surg.*, vol. 13, pp. 215-218, (1997).
 [21] 최용목, 레이저를 이용한 각막절제수술과 특허동향, 한국특허정보원, 2003.

약 력



고동섭

• 학력 : 연세대학교 물리학과 (박사)

• 경력 : 독일 하이델베르크대학교 박사후연구원
 목원대 의료광기술연구소 연구소장
 (주)휴비츠 기술고문, 이사

• 근무처 : 목원대학교 기술마케팅학과 (교수)
 (주)IMAH 광기술 대표이사 (겸직)

E-mail : dsko@mokwon.ac.kr