# 레이저 안전(Ⅱ)

(주)한빛레이저 부설 레이저기술연구소
이재만, 김정묵

## 1. 서 설

지난 호의 연재에서는 ANSI에서 규정하고있는 레이저 안전의 적용범위와 정의, 위험평가와 레이저시스템의 분류 및 이에 따른 일반적인 고려사항, 레이저의 사용환경 등을 중심으로 알아보았다. 이번의 연재에서 다루고자 하는 내용은 레이저의 기본구성에 대해 논한 다음, 동작모드에 따른 레이저의 출력특성에 따라서 요구되는 안전사항들이 달라질 수 있으므로 산업현장에서 주로 적용되고 있는 레이저들의 종류와 그 특성을 간단하게 알아본다. 그리고 인체의 눈과 피부에 대한 레이저빔의 생화학적 효과에 대해 살펴보고 레이저가 사용되는 환경에서 기본적으로 구비하고 준수해야 하는 보호장비에 대해 알아보고자 한다.

## 2. 일 반

### 2.1 레이저의 기본구성

레이저는 그림 1에서와 같이 종류나 크기, 응용과는 무관하게 활성매질(active medium), 여기기구(excitation mechanism), 귀환기구(feedback mechanism), 그리고 출력 결합부(output coupler)의 네 부분으로 구성된다.

우선 활성매질은 레이저 빛을 발생시키는 재료로써 루비나 Nd:YAG, 또는 Nd:Glass와 같은 고체 결정재료 일 수 있고 HeNe과 CO2 등과 같은 기체로 구성될 수도 있다. 이 밖에도 액체 색소를 사용하는 종류도 있으며 반도체 레이저에서는 GaAs와 GaAlAs 같은 반도체 재료를 사용한다. 기본적으로 활성매질은 원자나 분자 또는 이온의 집합체로써 외부의 에너지원으로부터 에너지를 흡수하고 유도방출(stimulated emission)에 의해 레이저의 빛을 발생시킨다.

여기기구는 에너지 입력소자에 해당하며 고체와 액체 레이저에서 주로 사용되는 광학적인 여기기구는 강한 빛을 발생시키는 발생원으로

구성되며, 전기적 여기방식이 사용되는 가스와 반도체 레이저에서는 활성가스를 통하여 흐르는 전류로부터 입력 에너지를 받게 된다.

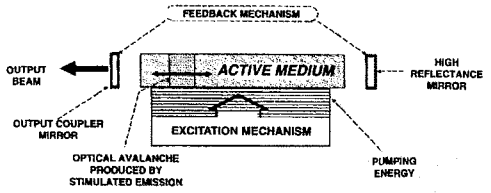


그림 1. 레이저의 기본적인 구성도

귀환기구는 공진기를 이루는 두 개의 미러로 구성되는데 이는 레이저의 파장에 맞도록 설계된 것으로써 각각의 미러는 반사면을 형성하기 위해 진공증착법으로 코팅된 면을 가진다. 고굴절(H.R) 미러는 본질적으로 100%의 빛을 반사하고 다른 하나의 미러(output coupler)는 100% 보다는 적게 반사하고 나머지의 빛은 투과시키게 된다.

## 2.2 동작모드에 따른 레이저의 구분

### 2.2.1 다이오드 레이저(Diode laser)

반도체 다이오드레이저는 일반적으로 고체레이저에 비하여 적은 출력용으로 사용되지만 어레이로 제작할 경우는 수KW급의 출력을 가지는 레이저도 가능하다. 가장 일반적인 다이오드레이저는 808㎚의 출력파장을 가지는 GaAs를 들 수 있으며 소형에 튼튼한 특성을 가지기 때문에 레이저프린터나 CD 플레이어, 거리측정기, 원격감지 시스템과 같은 다양한 분야에 응용되고 있다. 현재는 제조공정의 가속적인 발달에 힘입어 더욱 고출력을 내는 제품들이 속속 등장하고있고 자체적으로도 재료가공에 적용될 만큼의 출력을 내기도 하지만 파장 특성 때문에 재료가공에 직접적으로 적용되기보다는 DPSSL(diode pumped solid-state laser)의 여기원으로 많이 개발되고 있다.

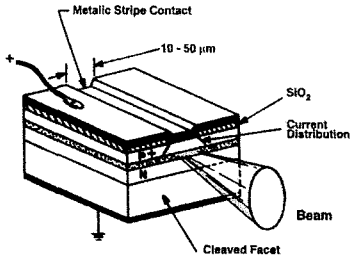


그림 2. 다이오드 레이저의 구조

### 2.2.2 고체 레이저(Solid state laser)

고체 레이저란 활성매질이 고체인 레이저를 가리키는데 이점에서 반도체 레이저와는 혼동되지 않아야 한다. 가장 널리 사용되는 고체 레이저로는 루비, Nd:Glass, Nd:YAG 등이 있다. 이들은 활성매질이 레이저 매질로 적합한 원자특성을 가지고있어야 하며 더불어 이런 원자를 함유한 결정도 레이저 동작을 위한 물리, 화학, 광학적인 요구조건을 만족해야 한다.

활성원자는 전기적으로 전도성이 아닌 모결정(host crystal) 내에 붙들려 있으므로 전류의 흐름에 의한 여기에너지의 제공은 이루어지지 못한다. 따라서 고체 레이저의 경우에는 광학적인 방식이 주로 적용된다. 출력이 CW 일 경우에는 램프의 내부가 밀한 가스로 채워진 arc lamp가 요구되고 출력이 펄스 형태인 경우엔 pulsed flashlamp가 요구된다. 그리고 이런 경우 전원공급장치는 램프의 전기적 요구조건을 만족 할 수 있어야 한다.

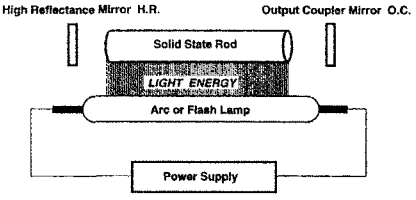


그림 3. 고체 레이저의 기본 구성도

### 2.2.3 가스 레이저(Gas laser)

모든 가스 레이저는 활성매질로 하나의 가스나 여러 가지가 혼합된 혼합가스를 이용한다.

가장 널리 사용되는 가스레이저로는 HeNe, argon, $CO_2$ 등이 있다. HeNe 레이저에서의 활성매질은 Ne 원자이며 He 원자는 버퍼 가스로써 여기과정을 돕는 역할을 한다. $CO_2$ 가스 레이저는 $CO_2$와 N, 그리고 He의 혼합가스를 사용한다. 레이저 방사는 $CO_2$ 분자의 진동상태에서 발생되며 나머지 두 가스는 버퍼로 사용된다.

일반적으로 사용되는 가스의 여기는 가스층 내로 전류를 흘려서 만들지만 어떤 구조에서는 가스의 여기를 위해서 고주파(R.F.)를 사용하기도 한다.

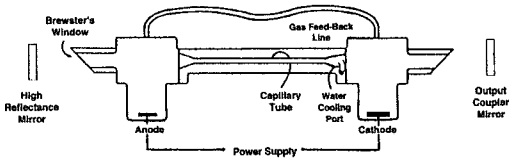


그림 4. 가스 레이저의 기본 구성도

2.2.4 CW 레이저

긴 시간동안 출력이 연속적으로 발생되도록 설계된 레이저를 CW(continuous wave) 레이저라고 하며, 아래 그림의 그래프에 나타난 출력에너지는 W의 단위로 측정된다. 즉, energy는 일을 할 수 있는 능력을 나타내고 power는 일을 하는데 사용된 에너지의 정도를 나타내므로 Energy(Joule)×Power(W)×Time(sec)의 관계를 가진다.

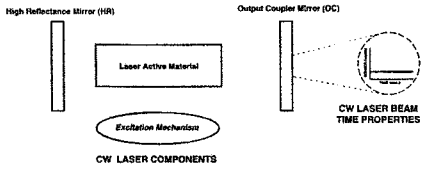


그림 5. CW 레이저의 기본 구성도 및 출력특성

2.2.5 펄스 레이저(Pulsed laser)

펄스 레이저는 펄스특성을 낼 수 있는 전원공급장치를 이용하여 거의 모든 종류의 레이저가 이 방식으로 구현될 수 있다. 가스 레이저는 높은 펄스 전류를 발생시키기 위해 가스를 통하여 커패시터를 방전시키는 방법을 사용하며, 고체 레이저와 펄스타입의 색소레이저는 전형적으로 flashlamp에서 강한 섬광을 만들기 위해 커패시터 방전방법을 사용하는데, 많은 경우 사진촬영에서의 스트로브 빛을 발생시키는 것과 동일한 방법으로 동작된다. 특수한 구조에서는 레이저에서 하나의 펄스만 발생되도록 할 수 있으나 일반적인 경우 초당 여러 개의 펄스를 발생시킬 수 있도록 설계된다. 펄스가 빠르게 발생되면 여러 가지의 변수들이 고려되어야 한다. 아래 그림 6의 그래프에 보이는 각 펄스 아래의 면적은 한 펄스 당 출력되는 에너지를 주울(J)로 나타낸다. 전체 에너지가 특정 지속시간동안 축적될 경우는 그래프에서 채색된 부분과 같은 평균 에너지를 계산할 수 있는데, CW에서의 등가 에너지로 생각할 수 있다.

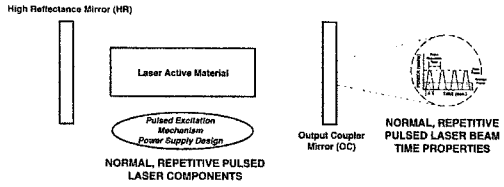


그림 6. 펄스 레이저의 기본 구성도 및 출력특성

2.2.6 Q-스위치 레이저

Q-스위치 레이저는 입력에너지가 레이저의 활성매질 내에 저장되는 종류로써 이것은 매우 빠른 셔터와 같은 소자가 공진기 내의 두 미러 사이에 놓임으로써 구현될 수 있다. 이 소자가 닫히게 되면 두 미러 사이에 존재하는 피드백작용이 차단되어 빛의 증폭이 발생하지 않는다. 닫혀있는 주기동안에 에너지는 활성매질의 원자구조 내에 저장된다. 정해진 시간에서 이 소자는 다시 개방상태가 되면 피드백에 이은 증폭이 허락된다. 증폭은 원자구조 내에 에너지를 최대로 저장하고 있는 활성매질에서 일어난다. Q-스위치는 카메라나 셔터와 같은 기계적 소자가 동작할 수 있는 것보다는 훨씬 빨리 개폐되

어야 한다. Pockel cell이라는 편광된 빛을 이용하는 소자와 결정 내에서 진동파를 발생시키는 음향광학(acousto-optic)소자, 특별한 색소를 사용하여 화학적인 표백을 일으키는 소자 등이 Q-스위치로 종종 사용된다. Q-스위치 레이저는 아주 높은 에너지로 충전된 활성레이저 재료로부터 발생되므로 레이저 펄스는 아주 짧은 시간 동안 발생되면서도 높은 피크에너지를 가진다. Q-스위치된 Nd:YAG 레이저는 펄스 당 수백 mJ 이상의 펄스를 수~수백 ns 동안에 발생시킬 수 있다. 동작주파수는 25kHz까지 발생될 수 있지만 펄스의 주파수가 높아지면 피크에너지는 자연히 낮아지게 된다. 하지만 여전히 수십 kW는 될 것이다.

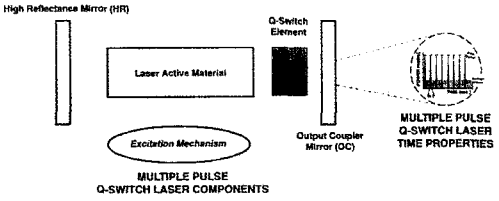


그림 7. Q-스위치 레이저의 기본 구성도 및 출력특성

2.2.7 Mode locking laser

Mode locking의 기술은 극히 짧으면서 아주 높은 에너지를 가진 일련의 펄스를 만들어낸다. 지속기간이 보통 10-12초 정도이므로 피크 출력 에너지는 엄청나게 될 수 있다. 예를 들면 포화시킬 수 있는 흡수체에 의해서 동시에 mode lock 되고 Q-스위치 되는 Nd:Glass 레이저를 사용하면 피크 에너지는 100GW를 넘을 것이다. 레이저는 정상파(standing wave) 패턴을 유지할 수 있다. 레이저 정상파는 반파장의 정수값이 레이저 공진기의 미러 사이의 거리에 정확히 일치할 때 발생된다. 모든 레이저에서 이 거리는 한 레이저 파장보다는 몇 등급이상이나 크기 때문에 레이저의 좁은 선폭(linewidth)에 맞을 수 있는 약간씩 차이가 나는 많은 정재파가 존재할 수 있다. 이것은 각기 구별되는 많은 공간 구성 요소 즉, 각각의 진폭과 주파수, 그리고 위상특성을 가지는 종파 공진모드(longitudinal cavity mode)를 발생시킨다. 정상 동작시 각각의 모드는 서로 독립적으로 발진하고 서로 위상이 연관되지는 않는다. Mode-locking 기법은 이렇게 다른 주파수 끼리 위상을 동기 시키는 기술이다. 결과적으로 레이저의 출력은 규칙적으로 떨어져서 주기적인 진동을 나타내는 맥놀이 효과(beat effect)를 보인다. 이런 mode locking은 pockels cell이나 음향광학소자, 또는 표백시킬 수 있는 색소(bleachable dye) 등의 아주 빠르게 동작하며 강도에 의존하는 스위치를 사용하여 구현할 수 있는데, 레이저 빔이 공진기 내를 한 바퀴 왕복할 시간동안에 스위치가 바뀌게되면 mode locking이 이루어진다.

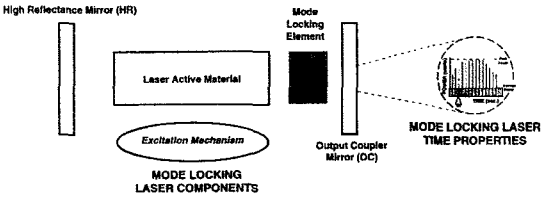


그림 8. Mode locking 레이저의 기본 구성도 및 출력특성

## 3. 레이저에 의한 손상

### 3.1 빛과 물질의 상호작용

빛이 재료에 접하게 되면 몇 가지 상호작용이 발생하게 된다. 이런 상호작용은 재료 표면에 입사되는 빛의 파장 함수이다. 실제의 경우 이런 몇 가지 상호작용은 동시에 독립적으로 발생하는데 먼지 입사 빔은 재료가 거울인 것처럼 반사할 수 있거나 뒤로 산란하여 확산반사를 일으킬 수 있다. 또한 재료 내부로 침투한 빛은 내부의 모는 방향으로 산란되어질 수 있다. 재료 내로 입사된 일부는 흡수가 되면서 재료에 열 영향을 줄 것이다. 만약 이러한 상호작용이 일어나지 않거나 아주 작은 퍼센트만 일어난다면 나머지 빛은 재료를 투과하게 된다.

## 3.2 레이저의 생화학적 영향

### 3.2.1 피부의 특성

피부의 특성은 색 분류와 일반적인 피부의 정도에 대한 묘사로 분석될 수 있다. 예를 들면, 레이저빔의 반사와 흡수 그리고 산란 등에 영향을 미칠 수 있는 피부의 특징으로는 표피조직의 거칠기, 밀도차이, 수화와 순환작용에 있어서의 차이 등이 있다. 이런 변수들과 혈관에 관련된 다른 변수들은 모든 평가에서 고려되어야 한다. 피부에서 일어나는 흡수는 조직에 있는 멜라닌, 멜라노이드, 철, 케로틴, 헤모글로빈, 산소헤모글로빈, 환원혈색소와 같은 색소들에 관련이 있다. 흡수 진행과정은 색소를 가진 조직에서의 특이한 흡수뿐만 아니라 내부에서 일어나는 다중 반사에 의한 흡수도 영향을 미친다. 피부는 확산매체로써, 피부 내에 있는 색소들은 특정 대역에서 흡수를 일으킨다. 피부는 불 균일한 구조를 하고 있기 때문에 산란현상도 발생한다. 0.3~1㎛ 대역에서 피부조직으로부터 일어나는 전체반사는 표면반사와 피부층으로부터 일어나는 후면산란의 합이다.

0.4~0.7㎛의 가시광 대역에서 일어나는 흡수는 단순한 지수함수적 관계를 따르지는 않는다. 인체의 모든 부분에 대해 멜리닌 색소층을 가진 피부의 표면구조는 그림 9에 보인 것 처럼 대단히 복잡하다. 이러한 까닭에 표피 근처에서의 흡수는 피부 아래층에서의 흡수보다 크게 이루어진다.

1~2.2㎛의 근적외선 영역에서는 지수법칙이 피부 두께에 따른 흡수를 제법 정확히 설명한다.

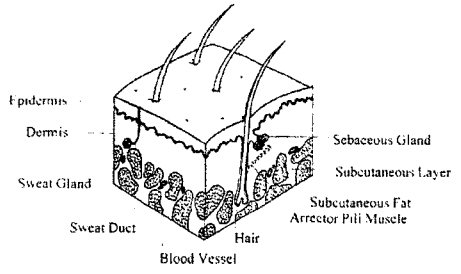


그림 9. 인체 피부조직의 층과 구조에 대한 단면

### 3.2.2 레이저의 피부손상(Laser skin damage)

레이저빔으로부터의 손상은 눈의 경우가 훨씬 쉽게 일어나므로 피부손상은 상대적으로 덜 중요하게 취급되어왔다. 그러나 특정 파장의 레이저에 대해서는 반복해서 또는 한번 노출되었을 경우라도 피부에 심한 손상을 초래할 수 있다. 게다가 고출력 레이저 시스템의 급증(특히 UV 대역에서)은 이런 레이저를 사용하는 사람들의 피부가 위험한 정도의 레이저 반사에 노출될 가능성을 증가시켰다.

#### 3.2.2.1 열적인 영향

조직의 손상에 있어서 열적인 영향은 대단히 중요하다. 흡수된 레이저 복사가 피부의 온도를 증가시킬 경우엔 열적 손상이 발생한다. 피부의 온도를 높인 열은 단백질 조직을 변성시킨다. 피부의 직접적인 열적 손상은 근자외선부터 원적외선(0.315~$10^3$㎛) 영역의 레이저빔에 10ms보다 긴 시간동안 노출될 경우 가장 흔히 발생한다.

살아있는 조직에서 CW 레이저에 노출됨으로써 일어나는 작용은 분명하지 않다. 이 작용은 깊은 전기적 화상에 의한 조직파괴와 가장 유사하다.

#### 3.2.2.2 광-화학적인 영향

조직손상은 광화학적 영향 때문에 일어날 수 있다. 광화학적 손상은 0.2~0.4㎛ 파장의 UV에 특정노출시간동안 노출되었을 경우 일어난다. 0.4~0.55㎛의 단파장 가시광에서 저준위 일지라도 10초 이상 지속되면 망막조직에서 이러한 영향이 발생할 수 있다.

#### 3.2.2.3 음향 충격

세 번째 피부손상의 메커니즘은 음향충격파인데 열적으로 발생된 음향충격파는 ㎲보다 더 짧은 노출이라도 피부손상을 일으킬 수 있다. 보통 Q-스위치 레이저에서 쉽게 발생된다.

피부손상은 피부의 불균일한 구조에 의해서 일어나며 이러한 불균일함은 레이저 방사의 내부 산란을 초래할 수 있다. 이로 인해 다수의

내부반사가 있게되고 이와 더불어서 입사 레이저빔의 흡수와 투과가 발생한다.

그림 11에서 보는 것처럼 피부를 침투하는 방사선의 99% 정도가 조직의 4㎜ 이내에서 흡수될 것이다. 이것은 0.3~1㎛ 파장대에서 동작하는 일반적인 레이저 소스에 대해서도 적용된다.

0.4㎛보다 큰 파장에 대한 피부손상은 열적인 응고괴사이다. 피부조직의 열적 영향의 정도는 다음과 같은 변수들에 의해 결정된다.

1) 다양한 레이저 파장에 대한 피부조직 내에서의 빔의 흡수와 산란
2) 조직 내로 주사되는 레이저빔의 조사
3) 노출의 지속정도와 펄스의 반복특성
4) 국부적인 혈류의 범위
5) 조사 면적

그림 10에 흡수계수값이 제시되어있다. 예를 들어보면 1.06㎛ 파장의 Nd:YAG 레이저가 발생한 빔의 99%가 흡수되는 깊이를 계산할 수 있는데, 이것은 Lambert의 법칙에 따라서

$$I=(1.0-0.99)I_0=I_0\exp(-aL)$$

따라서 $L=-(1/a)\times\ln(0.01)$이 된다.

그림 10을 보면 1.06㎛에서 조직의 흡수계수는 $a=11cm^{-1}$이므로

$$L=-(1/11)\times\ln(0.01)$$
$$=-0.091\times(-4.6)=0.42cm=4.2mm$$으로 된다.

Nd:YAG 레이저에 대한 조직에서의 투과정도는 그림 11에 지수적으로 표현되어 있다. 위의 계산에서I는 주어진 두께의 조직을 투과한 세기이고, L은 주어진 레벨의 빛을 흡수하기 위한 두께를 나타내며, a는 레이저파장($cm^{-1}$)에서 조직의 선형 흡수계수를 나타낸다.

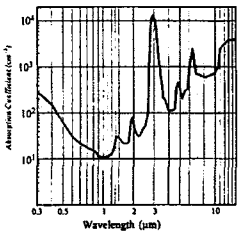


그림 10. 인체조직에서의 흡수계수

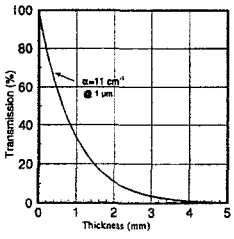


그림 11. 1㎛ 파장에 대한 피부의 흡수계수

3.2.3 눈의 생리(학)

눈이 레이저 복사선에 의해 어떻게 손상을 입는지를 이해하기 위하여 눈의 생리에 대해 이해할 필요가 있다. 눈은 구별가능한 세 부분의 층으로 이루어져 있다. 질긴 최외각층은 강막(sclera)이라 하며, 눈에서의 흰부분을 구성한다. 맥락막(choroid)이 눈의 두 번째 층을 구성하며, 이 층은 눈에 영양을 공급하는 혈관을 가지고 있다. 망막(retina)이 눈의 제일 안쪽 층을 차지한다. 이 층은 시각기능을 발생하는 광 수용기(receptor)를 가지고 있다. 그림 12는 눈의 다양한 부분을 나타낸다.

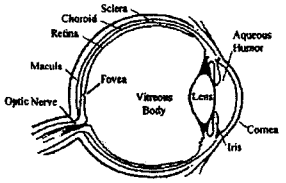


그림 12. 사람의 눈

창과 같은 역할을 하는 각막(cornea)은 강막의 앞에 있는 투명한 커버이며 눈에서의 주요한 굴절구조를 가진다. 각막과 공기의 굴절지수 차이 때문에 80% 이상의 굴절된 빛이 눈의 내부로 들어가게 된다.

홍채(iris)는 맥락막 층에서 각막의 바로 뒤에 위치해 있다. 이 홍채는 동공의 확장이나 수축에 의해 눈으로 들어오는 빛의 양을 조절하는 근육구조를 하고있는데, 여기서 동공은 홍채에서 중앙의 투명부분에 해당된다.

수정체(lens)는 맥락막에서 동공의 바로 뒤에 위치하고 있다. 수정체는 눈으로 들어오는 빛의 초점을 맞춘다. 수정체는 맥락막 층에 붙어있는 근육에 의해 지지되며, 이 근육이 수정체의 모양을 변화시켜 눈으로부터 상이한 거리에 있는 물체들에 적응될 수 있도록 한다.

각막과 수정체 사이의 공간은 전방수(aqueous chamber)라고 하는데, 맑은 물과 같은 유체를 함유하고 있으며 눈을 보호하기 위한 쿠션처럼 동작한다. 수정체의 뒤에는 유리체(vitreous

humor)가 두꺼운 유체로 채워져 있으며 눈의 형태와 견고성을 유지시킨다.

눈을 투과한 빛은 눈의 뒷 표면에 있는 망막에서 흡수되며, 망막은 간체(rods)와 추체(cones)라는 특별한 신경 수용기를 가지고 있다. 간체는 매우 민감하여 빛이 희미한 곳에서 시각을 조정한다. 간체는 색을 구분하지 못하므로 야간의 시각은 밝은 빛과 어둠의 다양한 구성으로 이루어진다. 밝은 빛에서는 추체가 활성화되어서 두뇌에서 색에 대한 감각을 갖게 한다.

망막에서 가장 예민하고 색을 분별하는 부분은 오목(fovea)이라는 곳으로 이 구조는 망막의 중심부분에서 거의 2°정도의 각을 차지한다. 이 오목은 (망막의) 황반(macula lutea)이라고 부르는 부분의 중앙에 있는 조그마하고 깊은 곳에 위치해있다. 이 각막반(macula)은 거의 1㎜ 직경을 차지한다.

망막에 있는 간체 추체로부터의 자극은 광신경을 통해 눈으로부터 두뇌로 전달된다. 두뇌에서는 광신경에서 전달된 전기적 신호가 해독되어서 영상을 만들어 낸다.

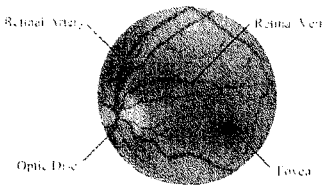

그림 13. 사람 눈의 구조와 안저

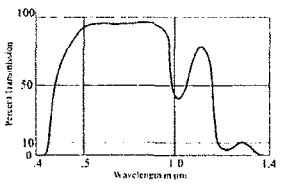


그림 14. 안구매체의 투과도

3.2.4 눈의 손상

레이저 복사선의 파장은 눈의 어느 층에서 복사선의 흡수가 일어날지를 결정한다. 또한 눈에 의해서 초점이 형성될 수 있는 복사선도 파장에 의해 결정된다. 이러한 이유로 파장은 레이저의 잠재적인 위험을 결정하는데 있어 가장 중요한 요소가 된다.

레이저의 잠재적 위험을 결정하는데 간주되어야 하는 두 번째 요소는 노출 시간이다. 이것은 CW 레이저의 경우에는 조사가 W/㎠으로 표시되고 펄스의 경우에는 J/㎠으로 표시된다. CW 레이저에 노출되어서 생기는 상처는 주로 열적으로 생기거나 광 화학적 메커니즘에 의해서 일어난다. 펄스 레이저에 노출되어서 생기는 상처는 열에 의한 것일 수도 있고 보다 짧은 펄스의 경우엔 음향충격파(acoustic-shock wave)의 영향일 수 있다. CW 레이저의 경우와 비교하면 펄스 레이저는 더 적은 에너지로도 눈에 손상을 초래할 수 있다. 펄스의 지속시간이 더욱 짧아지고 반복율이 증가될수록 단펄스 레이저에 의한 위험도 증가한다.

복사선의 조사는 빔의 크기에 따른 함수이므로 빔의 직경을 줄이면 조직결함을 일으킬 위험도 증대된다. 하지만 큰 크기의 망막노출에 대해 망막손실을 초래할 수 있는 임계레벨은 조그만 점이 노출되었을 때의 임계치보다 훨씬 낮다는 점을 명심해야 한다.

손상의 정도를 결정하는 세 번째 요소는 눈에서의 노출 위치이다. 오목(시각영역의 중앙 2°)은 세부적인 시각에 가장 예민한 망막의 부분이다. 직경이 1㎜ 이내인 각막반이 파손되면 장님이 된다. 각막반이 파손되었을 경우엔 Snellen 챠트에 나오는 'large E'를 구분할 수 없게 되는데, 이는 시각의 예민함이 10~200 정도나 그 이하로 감소되었음을 뜻한다.

지극히 짧은 시간동안의 레이저빔에 노출된 경우라도 각막반은 파괴되어 장님이 될 수 있다. 각막반이 타는 대부분의 경우는 사람이 레이저빔을 직접 보거나 경면반사 등을 통해서 이루어진다.

반면에, 망막의 주변에서도 유사한 상처가 종

종 초래되지만 시각기능엔 거의 손상이 없다. 망막의 나머지 부분인 망막 주변의 중심와부근(parafovea)은 빛에 대해 덜 민감하다. 그러나 망막의 어느 부분에서나 레이저에 의해서 생긴 상처자리는 보통의 경우 시각장애를 회복할 수 없으며 의학적으로도 치료가 불가능하다. 주변이 타는 현상은 눈이 레이저에 직접적으로 노출되지 않은 경우의 사고노출을 통해서도 일어날 수 있다.

네 번째의 위험요소는 상의 크기이다. 노출시간이 10초 이상인 경우에 대해 상이 100㎛보다 크면 상이 작은 경우보다 빠르게 열을 제거할 수 없다. 따라서 망막이 최소한으로 손상을 입으려면 20㎛ 정도의 작은 상에 비하여 10~100 정도 낮은 망막조사가 요구된다. 때문에 점광원으로 동작하는 레이저와 빔이 확장된 레이저에 대한 노출 위험의 판정기준이 달라지게 된다.

3.2.4.1 가시광과 적외광 파장에 대한 눈의 노출

0.4~1.4㎛ 사이의 광파장은 눈의 수정체를 통과하여 초점을 형성한다. 이런 파장에서 망막에 대한 확대변수는 그림 15에서 보는바와 같이 2㎜와 7㎜ 사이의 동공 지름에 대해 $10^5$~$10^7$ 만큼 크게 될 수 있다. 그림에서 보인 이론적인 곡선은 망막에 대한 최대조사에 대한 Airy disk 식을 사용하여 구한다. 중간에 있는 곡선은 망막의 최대조사에 대한 광 이득을 나타낸다. 바닥에 있는 곡선은 이론곡선을 Strehl ratio(Imax/Iavg)로 곱하여 유도한 광 이득으로 가장 잘 추정한 것으로 여겨진다.

만약, 레이저빔의 직경이 동공의 직경보다 크다면 홍채의 가장자리에서 회절이 발생한다. 그리고 동공보다 작은 경우에는 구면수차와 전방산란 때문에 상이 퍼지게 된다. 그림 14에 제시된 것처럼 0.4~1.4㎛ 사이의 파장에 대해서는 안구매체의 투과도가 최대가 된다. 이 파장에서는 대부분의 에너지가 망막에서 흡수된다. 가시광과 IR-A의 대역에서는 각막과 수정체, 안구매체가 투과성으로 된다.

눈으로 들어온 빛 중의 5%만이 시각에 사용되며 나머지는 망막의 색소 상피층에 있는 색소과립(pigment granule)과 추체 간체 아래의 맥락막 층에서 흡수된다. 이런 파장의 레이저빔은 눈에 의해 집속 되어 극히 적은 초점크기가 망막에 맺힌다. 이 초점형성 효과 때문에 더 낮은 각막의 노출레벨에 대해서도 망막이 탄다. 노출레벨이 더 높아지면 망막에 분화구가 형성되고 안구에 출혈이 일어난다. 그림 16a는 손상 임계치를 약간 넘는 Q-스위치 레이저에 의해 망막이 탄 것을 보인다.

IR-A 복사선은 사람의 눈에는 보이지 않지만 수정체에 의해서 여전히 초점을 형성한다. 이 때문에 IR-A 레이저가 특히 위험하다. 심지어 더 낮은 펄스출력의 Nd:YAG 레이저는 눈에 영구적인 결함을 줄 수 있으며, 0.7~1.4㎛ 사이의 IR-A 복사선에 노출되면 백내장(cataract)과 망막손상을 초래할 수 있다. 1.4~3.0㎛의 IR-B 복사선에 노출되면 수정체와 각막 모두 손상을 입는다. 3.0㎛~1㎜의 IR-C는 안구매체 내의 물에 흡수되고 안구매체를 불투명하게 만든다.

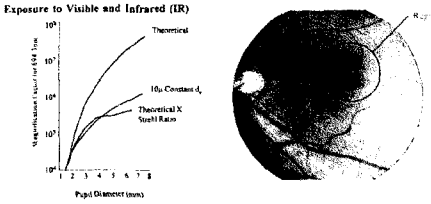


그림 15. 광이득과 동공과의 관계

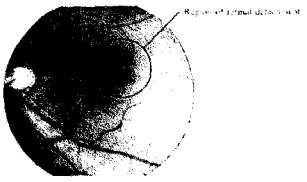

그림 16a. Q-스위치 루비레이저에 의한 망막의 상처

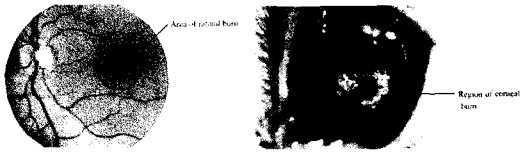

그림 16b. 레이저 확산빔에 의한 망막의 큰 손상

그림 16c. CO2레이저에 노출된 토끼눈의 각막화상

3.2.4.2 자외광 파장에 대한 눈의 노출

자외광 복사선은 눈의 외각에서 흡수되며

UV-B(0.28~0.315㎛)나 UV-C(0.20~0.2.8㎛)에 극히 짧은 시간동안 눈이 노출될 경우 각막의 외각 표피세포층의 손상으로 인한 광 각막염(photokeratitis)이 발생할 수 있다. 이 상처는 광선공포증(photophobia), 눈의 충혈, 눈거풀(결막) 내면의 경계인 점막으로부터 나오는 눈물, 각막 표면 세포층의 찢어짐(박리) 등으로 규정된다.

1970년대 말까지 강한 가시광 광원으로부터 생긴 모든 영구적인 망막손상은 10㎲ 이상 노출되었을 경우에 생기는 열적 손상으로 여겼다. 또한 밝은 빛에 갑자기 노출되면 섬광맹(flashblindness)이라는 일시적인 시각상실이 초래되기도 한다.

그러나 최근의 연구에 따르면 영구적인 망막손상은 광 화학적 영향으로 생긴 것으로 판명되었다. 가시광과 UV-A 영역 파장에 장시간 노출될 경우 일어나는 광 화학적 손상 메커니즘은 1975년 Dr. William Han에 의해서 최초로 밝혀졌다. 0.442㎛ 파장의 복사선은 1000초 동안 동일하게 노출되었을 경우 0.633㎛ 파장에 비해 천배나 심한 망막손상을 보였다.

레이저 복사선에 노출된 다음 즉시 나타나는 열적 상처와는 달리 광 화학적인 상처는 24~48시간 지난 다음에 나타난다. 이러한 사실로부터 초기의 열적 손상에 대한 연구가 광 화학적 영향을 발견하지 못했는지를 설명할 수 있을 것이다.

## 4. 보호장비

보호벽이나 장막, 보호의, 보호안경 등의 사용은 다른 제어방법으로는 적당한 MPE 수준으로 복사선을 제어할 수 없을 경우에 적용된다.

### 4.1 레이저 보호벽과 보호장막

레이저 동작영역에 대한 적절한 제어는 레이저빔의 직접적인 조사나 확산된 산란빔 모두를 견딜 수 있도록 특별히 제작된 특수 보호벽이나 장막을 사용하여 효과적으로 수행할 수 있다. 보호장벽이나 장막은 레이저의 파장에 대해서는 불투명해야하며 레이저빔의 예상노출강도에 대한 임계장벽제한(BTL) 특성을 가져야 하는데 이는 임계치가 특정노출시간(보통 60초) 동안 조사된 레이저빔을 투과시키지 않고 장벽이 지탱할 수 있는 레이저빔의 조사량을 나타낸다. 만약 장벽의 임계값이 레이저빔의 직접적인 노출에 의해 일어나는 조사량보다 낮다면 레이저빔이 장벽에 직접 접촉되기 전에 다른 기구에 의해 차단되어야 한다.

### 4.2 보호의(protective clothing)

만약 작업자가 피부에 대한 적정 MPE의 값을 훨씬 넘어서는 정도의 복사선에 노출될 가능성이 있다면 어떠한 경우라도 보호의를 착용해야 한다. UV 레이저와 class 4 레이저는 피부의 상처를 가장 위협하는 등급이다. Class 4의 레이저에 적용되기 위한 재질은 불에 대한 저항성이 있어야 하며 녹지 않아야 한다. UV 에너지가 확산반사 되는 경우에는 조밀하게 짜여진 옷이 적당한 차단기능을 할 수 있다.

### 4.3 보호안경(protective eyewear)

일반적으로는 보호안경을 사용하여 눈의 안전을 신뢰하는 것보다는 레이저 안전규정을 따르는 것이 권장된다. 그 까닭은 보호안경을 착용할 수 있었음에도 불구하고 착용을 하지 않아서 발생한 사고들이 빈번하기 때문이다. 보호안경의 착용을 꺼리는 이유로는 가장 일반적인 것이 보호안경의 착용시 어두워짐에 의한 시각의 제한과 착용의 불편함 때문이다. 안전규정에 따르면 MPE의 정도를 넘어서는 복사선에 노출될 어떤 가능성이라도 존재한다면 레이저의 파장과 출력에 적당한 보호안경을 착용해야 한다고 규정되어있다.

눈의 보호를 위해 사용되는 필터로는 보통 흡수유리 또는 플라스틱으로 만들어진다. 각각의 필터가 가지는 투과도 곡선은 보호안경 제공자에 의해서 주어질 것이다. 가장 많이 사용되는 세 종류의 플라스틱 필터에 대한 투과도 곡선을

그림 18에서 볼 수 있다. 각 필터에 대해 주어진 투과값은 필터를 통과하는 빔의 파장과 필터 재료의 두께에 따라 결정된다.

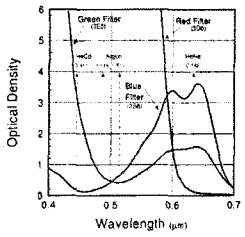


그림 17. 레이저장벽의 사용 예 그림 18. 플라스틱 필터에 대한 광학밀도(optical density)

레이저에 대한 눈의 보호장비들은 고글(goggles), 스펙터클(spectacles), 또는 높은 광학밀도의 필터재료로 특별히 만들어진 보호안경 등이 있다.

### 4.4 광학밀도(optical density)

레이저 보안경 필터는 특정파장에 대한 광학밀도로 규정된다. 특정파장에 대한 필터의 광학밀도 $D_\lambda$은 아래와 같은 대수식 중의 하나에 의해서 결정된다.

$$D_\lambda = \log_{10} (H_0/MPE)$$

또는

$$D_\lambda = \log_{10} (E_0/MPE)$$

$H_0$와 $E_0$는 예상되는 최악의 노출을 나타내며, 보통은 레이저의 구경에서 나오는 직접적인 빔에 대한 노출로 가정된다. $H_0$는 $J/cm^2$의 단위로 표현되며, $E_0$는 $W/cm^2$로 표현된다. 그리고 레이저가 펄스타입인지 CW형인지에 따라서 선택된다. 만약 MPE가 $J/cm^2$으로 주어지면 $H_0$가 사용될 것이며, $W/cm^2$으로 주어지는 경우는 $E_0$가 사용될 것이다.

MPE값이 제한구경에 대하여 분포하고 있기 때문에 제한구경보다 작은 빔에 대한 $H_0$와 $E_0$의 계산은 실제의 작은 빔 크기 대신에 제한구경의 면적(ALA)을 요구한다. 즉, 계산은 빔이 제한구경의 영역 전체에 걸쳐 분포하는 것으로 계산되는 것을 말한다. 많은 경우에 레이저의 파장에 따라서 7㎜나 1㎜ 원의 면적이 이용된다. 광학밀도의 값을 결정하는데 있어서는 제한구경의 영역보다 더 작은 영역을 적용할 필요는 없다.

광학밀도의 값은 다음과 같은 변수들에 의해서 결정되는데, 먼저 가장 중요한 변수는 MPE의 값이다. MPE는 시간에 따라 변하기 때문에 0.25초의 노출에 대해 요구되는 보호의 정도는 동일한 레이저에 대해 30,000초(8시간 직업근무에 따른 노출) 동안 노출된 경우에 요구되는 것보다는 훨씬 적다.

그림 19. 코팅된 전형적인 유리 보호안경 그림 20. Nd:YAG레이저에 대해 2kW까지 견딜 수 있도록 설계된 다층의 poly-carbonate 보안경

그림 21. 일반적인 레이저에 대해 OD = 4를 제공하는 대면적의 Filtron Acrylic 플라스틱 윈도우

다파장 레이저와 조율이 가능한 레이저의 경우엔 전형적인 흡수필터를 사용하여 눈을 보호하는 경우에 큰 문제점을 제시한다. 가끔 군용이나 의료, 연구용으로 사용되는 다파장 레이저는 여러층의 흡수층을 가진 필터를 요구한다. Nd:YAG( $\lambda$=1.06㎛)에 사용되는 일반적인 필터 유리인 KG5와 OG550에 대한 투과곡선은 그림 22에 제시되어있다. 1.06㎛와 0.532㎛ 파장이 함께 존재하는 frequency doubled Nd:YAG 레이저에 대한 보호를 위해서는 각 파장에 해당하는

정확한 두께를 가진 필터들을 조합하여 사용할 수 있다. 이러한 조합필터는 가시광의 투과도를 줄인다. 어떤 경우의 필터조합은 가시광이 겨우 5% 정도만 투과될 수 있게 함으로써 보호안경으로는 거의 쓸모 없게 만드는 경우도 있다. 레이저에 대한 눈의 보호장치 중에 대부분은 시각에 큰 제약을 주지 않으면서 주요 파장에 대해 $D_i$>6.0이상의 보호능력을 제공한다. 복수파장 레이저에 대한 보호안경에서만 다층의 흡수필터가 적용되고, 이로인한 심각한 시각의 손실도 감수해야 한다.
표 1은 각기 다른 노출시간과 다른 레이저 파장에 대해 필요한 광학밀도를 나타낸다.

표 1. 다양한 레이저의 파장에 대해 요구되는 광학밀도

| Laser Type | Wavelength (μm) | Power | Optical Density, Exposure Time: (s) 0.25 | 10 | 600 | 3 x 10⁴ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| XeCl | 0.308[b] | 50 Watts | -.- | 6.2 | 8.0 | 9.7 |
| XeFl | 0.351[b] | 50 Watts | -.- | 4.8 | 6.6 | 8.3 |
| Argon | 0.514 | 1.0 Watt | 3.0 | 3.4 | 5.2 | 6.4 |
| Argon | 0.514 | 5.0 Watts | 3.7 | 4.1 | 5.9 | 7.1 |
| Krypton | 0.530 | 1.0 Watt | 3.0 | 3.4 | 5.2 | 6.4 |
| Krypton | 0.568 | 1.0 Watt | 3.0 | 3.4 | 4.9 | 6.1 |
| HeNe | 0.633 | 0.005 Watt | 0.7 | 1.1 | 1.7 | 2.9 |
| Krypton | 0.647 | 1 Watt | 3.0 | 3.4 | 3.9 | 5.0 |
| GaAs | 0.840[b] | 50mW | -.- | 1.8 | 2.3 | 3.7 |
| Nd YAG | 1.064[b] | 100Watt (CW) | -.- | 4.7 | 5.2 | 5.2 |
| Nd YAG | 1.064[b] | (Q-switched)[a] | -.- | 4.5 | 5.0 | 5.4 |

a Repetitively pulsed at 11 Hz., 12ns pulses, 20mJ/pulse.
b OD for UV & FIR beams computed using 1mm limiting aperture which presents a "worst case" scenario. All visible/NIR computations assume 7mm limiting aperture.
-.- Invisible beams, aversion response time does not apply.

NOTE. OD values obtained using ANSI Z-136.1 (1986) MPE critieria.

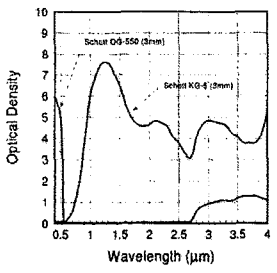


그림 22. KG5와 OG550에 대한 광학밀도곡선

## 4.5 눈의 보호장비에 대한 요구조건

ANSI 규정에 따르면 class 3b 레이저가 눈이 직접 노출되는 곳에 사용될 경우엔 눈의 보호를 위한 장비가 사용되어야 하며, class 4의 레이저도 동일한 방식의 응용에 사용될 경우, 눈 보호장치들이 사용되어야 한다.

적절한 보호안경을 선택하기 위한 요건들은 ANSI 규정에 의하면 아래와 같다.

1) 출력되는 레이저빔의 파장
2) 다파장으로 동작될 잠재성
3) 보호가 요구되는 최악의 조사레벨
4) 노출시간의 기준
5) 최대 허용가능 노출광량(MPE)
6) 레이저 출력파장에 대한 보호안경 필터의 광학밀도의 요구정도
7) 보호에 대한 각도의 의존성
8) 보호안경을 착용하였을 때 작업수행 능력에 대한 영향의 판정과 요구되는 가시광 투과도
9) 측면보호와 주변시각의 최대값에 대한 요구조건
10) 일시적인 백화(bleaching)현상을 포함하여 보호안경이 손상(투과)을 받을 시간변수에 일치하는 조사 또는 복사노출
11) 특별히 제조된 안경(prescription glasses)의 필요성
12) 착용감과 적합성
13) 광 백화현상(photo-bleaching)과 같은 흡수매체의 퇴화
14) 재료의 강도(기계적인 충격에 대한 저항성)
15) 거울면 반사(specular reflection)를 발생시킬 수 있는 전면부의 능력
16) 안개서림을 방지하기 위한 구조 또는 코팅의 요구조건

0.630㎛의 파장을 가지는 색소레이저가 CW로 0.6W의 출력을 가질 경우 보호를 위해 필요한 광학밀도를 계산하는 예를 들어보자. 우선 먼저 예상 노출시간을 결정해야 한다. 만약 0.25초(밝은 빛에 대한 혐오반응이 일어나는 시간)로 할 경우 최대 허용가능 노출광량은 MPE = 2.5 × $10^{-3}$W/cm$^2$이다.

반면 30,000초 정도로 아주 긴 시간동안 레이저빔에 노출될 경우라면 MPE는 $1.58\times10^{-5}W/cm^2$이 된다.

첫 번째 경우엔 $OD=\log_{10}E_0/MPE\}$)이며 $E_0=0.6/[\pi 0.49]/(4)=1.56W/cm^2$이 된다. 따라서

$$OD=\log_{10}(1.56/2.5\times10^{-3})$$
$$OD=\log_{10}(6.23\times10^{2})$$
$$OD=2.79$$

로 계산할 수 있다.

두 번째의 경우엔

$$OD=\log_{10}(1.56/1.58\times10^{-5})$$
$$OD=\log_{10}(9.8\times10^{4})$$
$$OD=4.99$$

로 계산될 수 있다.