

Laser Safety (2)

현재 산업 전반에 걸쳐 지속적인 레이저 시스템 도입이 이뤄지고 있는 반면, 레이저 시스템의 올바른 사용을 위한 안전규정 및 제도적 장치는 미약해 심각한 문제로 떠오르고 있다. 본 고에서는 지난호에 이어서 레이저의 클래스에 따르는 위험, 안전에 관한 규정, 레이저 가공장치 사용자의 안전을 위한 예방대책 등에 대하여 알아보려고 한다. (편집자 주)

자료제공/(주)한빛레이저

<지난호에 이어서>

보호장비

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

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 불투명해야 하며 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 레이저빔

이 장벽에 직접 접촉되기 전에 다른 기구에 의해 차단되어야 한다.

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.

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 보

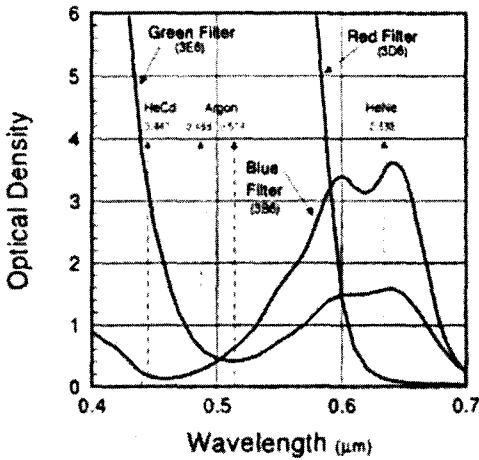


그림 9. 플라스틱 필터에 대한 광학 밀도(optical density)

호안경의 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 규정되어 있다.

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 9에서 볼 수 있다. 각 필터에 대해 주어진 투과도는 필터를 통과하는 빔의 파장과 필터 재료의 두께에 따라 결정된다.

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

4. 광학밀도(optical density)

레이저 보안경 필터는 특정파장에 대한 광학밀도로 규정된다. 특정파장에 대한 필터의 광학밀도는 오른쪽 상단과 같은 대수식 중의 하나에

의해서 결정된다.

$$D_1 = \log_{10}(H_0/MPE)$$

$$\text{또는 } D_1 = \log_{10}(E_0/MPE)$$

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 펄스입인지 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 7mm나 1mm 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.

다파장 레이저와 조율이 가능한 레이저의 경우엔 전형적인 흡수필터를 사용하여 눈을 보호하는 경우에 큰 문제점을 제시한다. 가끔 균용이나 의료, 연구용으로 사용되는 다파장 레이저는 여러층의 흡수층을 가진 필터를 요구한다. Nd:YAG($1 = 1.06\mu m$)에 사용되는 일반적인 필터 유리인 KG5와 OG550에 대한 투과곡선은 그림 10에 제시되어 있다. $1.06\mu m$ 와 $0.532\mu m$ 파장이 함께 존재하는 frequency doubled

Laser Type	Wavelength (μm)	Power	Optical Density			
			Exposure Time: (s)			
			0.25	10	600	3 x 10 ⁴
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 criteria.

표 5. 다양한 레이저의 파장에 대해 요구되는 광학밀도

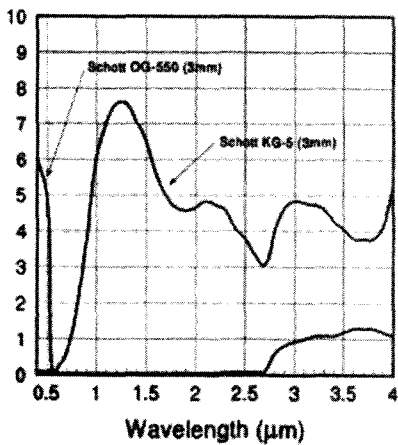


그림 10. KG5와 OG550에 대한 광학밀도곡선

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 함으

로써 보호안경으로는 거의 쓸모 없게 만드는 경우도 있다. 레이저에 대한 눈의 보호장치 중에 대부분은 시각에 큰 제약을 주지 않으면서 주요 파장에 대해 D₁>6.0 이상의 보호능력을 제공한다. 복수파장 레이저에 대한 보호안경에서만 다층의 흡수필터가 적용되고, 이로 인한 심각한 시각의 손실도 감수해야 한다.

표 5는 각기 다른 노출시간과 다른 레이저 파장에 대해 필요한 광학밀도를 나타낸다.

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 μ m의 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 노출광량 (MPE) = $2.5 \times 10^{-3} \text{W/cm}^2$ 이다.

반면 30,000초 정도로 아주 긴 시간동안 레이저빔에 노출될 경우라면 MPE는 $1.58 \times 10^{-5} \text{W/cm}^2$ 이 된다.

5W/cm^2 이 된다.

첫 번째 경우엔

$OD = \log_{10}(E_0 / \text{MPE})$ 이며 $E_0 = 0.6(\pi \cdot 0.49) / (4) = 1.56 \text{W/cm}^2$ 이 된다. 따라서

$OD = \log_{10}(1.56 / 2.5 \times 10^{-3})$

$OD = \log_{10}(6.23 \times 10^2)$

$OD = 2.79$ 로 계산할 수 있다.

두 번째의 경우엔

$OD = \log_{10}(1.56 / 2.5 \times 10^{-5})$

$OD = \log_{10}(9.8 \times 10^4)$

$OD = 4.99$ 로 계산될 수 있다.

NHZ (Norminal Hazard Zone, 공칭 위험영역)

1. NHZ의 정의

레이저빔이 외부에 개방되어 있어야 하는 응용에서는 레이저빔에 노출될 가능성이 잠재적으로 존재하는 영역을 정의할 필요가 있다. 이 경우는 NHZ으로써 결정하는데, 이 NHZ는 레이저빔의 직접적인 조사나 반사, 산란된 직·간접 방사광의 세기가 허용 가능한 노광한계(MPE)의 값을 초과하는 공간영역으로 정의된다. 따라서 NHZ 영역의 외부에 존재하는 사람은 MPE 레벨 이하에 노출될 것이며 '안전' 영역에 있다고 생각해도 무방하다.

NHZ를 정하는 목적은 적절한 통제 방법이 강구되어야 하는 영역을 결정하기 위해서이다. 레이저를 잠금장치된 방에 넣고 밀폐하는 고전적인 방식은 레이저의 사용범위가 확대되어 감에 따라서 점점 제한적으로 될 수 밖에 없으며 많은 경우에는 실제 존재하는 위험정도에 비해 너무 지나친 조치들을 취할 수도 있다.

모든 제어에서의 중요한 점은 동작, 유지, 서비스의 기능 사이를 구별하는 것이다. 먼저 모든 레이저 시스템은 동작 중에 나오는 레이저 방사

의 세기에 기초하여 분류된다. 유지작용은 렌즈를 닦거나 가스의 병을 교체하는 것과 같은 작업으로 일상적인 시스템 동작이 유지되도록 하는 것을 말하며, 서비스의 기능은 유지의 작용보다는 일반적으로 훨씬 적은 빈도로 수행되는 것이 일반적이다. 여기에는 레이저 공진기의 미러 교체나 손상을 입은 부품 교체 등의 작업이 포함된다.

2. NHZ의 개념과 계산

NHZ는 레이저의 정상 동작시 허용가능한 노광한계를 넘어서는 직접 또는 반사나 산란빔의 정도 이내의 영역을 나타낸다. 빔이 개방되어 있는 Class III B와 Class IV 등급의 레이저 설치와 관련하여 NHZ는 그 영역에서의 위험을 평가하고 적합한 통제 방안을 선택할 수 있도록 기준을 제시하는 역할을 한다.

NHZ를 산정 하는 것은 레이저 안전요원(LSO)의 의무중 하나이다. 이는 ANSI Z-136.1의 규정에 아래와 같은 예로 정의되어 있다.

‘레이저 안전요원의 임무는 NHZ의 평가, 동의, 불필요한 조치나 통제의 중복을 회피하고 대안을 선택, 주기적인 시설과 장비의 점검, 훈련 등을 수행하는 행위가 포함된다.’ 만약 NHZ의 평가결과 레이저 장치의 설치 영역, 즉 동작 중에 작업자가 접근할 수 있는 레이저 주변 영역에 비해 훨씬 작은 NHZ 값이 나온다면 요구되는 통제방안들은 상당히 감소될 수 있다.

위험평가의 계산은 레이저를 사용하는 다양한 조건에 따라서 이루어진다. 특히 펄스형 class III B와 class IV 레이저 사이의 개념적 분리선은 해당 레이저가 확산반사를 할 때 발생하는 위험 정도에 따르기 때문에 확산된 레이저빔의 영역에 대한 개념이 전개될 수 있다. 이러한 개념은 개방된 빔에 대한 적절한 통제방법의 선택이 레이저장치의 설치 특성에 따라서 큰 영향을 받을

수 있으므로 이러한 요소들이 전체적인 NHZ의 분석에도 영향을 미친다는 점을 주목해야 한다.

또한, ANSI Z-136.1의 규정은 분산광원(extended source)의 확산반사 위험에 대한 특정 분석을 제공하는데, 이것은 레이저빔의 가시 확산반사에 대한 MPE값을 이용하여 구할 수 있다.

가시분산광원은 a_{min} 으로 표시되는 한계시각의 평가를 포함하는, 심각한 망막화상 위험에 대한 위험 판정기준에 근거를 둔다. 그러나 분산광원의 분석은 기준이 적절하게 선택된 아주 제한된 경우에만 유효하고 대부분의 실제적인 확산 가시조건에 대해서는 점광원 분석이 더욱 적합하다.

대부분의 산업용이나 의학용 레이저 응용에는 아주 복잡한 레이저/광학 시스템이 포함된다. 일반적인 경우엔 빔집속 광학계, 광섬유 광학계 등과 산업용 시스템에서의 빔 방향 제어를 위한 로봇이 포함된다. 종합해서 생각해보면 위험분석은 아주 복잡하다. 그리고 이러한 장비들의 방향 제한성과 고유한 성질에 의해서 위험영역은 상당히 제한될 수도 있다.

NHZ의 경계는 직접 조사되는 빔, 거울과 같은 면에서 반사된 직접 조사빔, 확산 산란된 레이저빔 뿐만 아니라 렌즈 열(trains)이나 광섬유 전송계를 투과한 빔 등에 의해서 결정된다. 달리 말해 NHZ의 주위는 해당 레이저의 설치 형태를 고려한 MPE 레벨에 의해 정해지는 공간 영역이 된다. 이러한 NHZ를 계산하기 위해서 다음과 같은 요소들이 요구된다.

- 레이저 출력(에너지)
- 레이저에서 나오는 빔의 직경
- 빔의 발산
- 동작 모드 : 펄스/CW/반복 펄스형
- 노출시간, 펄스 지속시간과 펄스의 반복률
- 파장
- 빔의 광학계와 광경로

- 예상되는 최대 노출시간
- 최대 허용광량

3. NHZ 분석에 따른 지침

NHZ 분석에 의해 제공되는 지침으로는 다음과 같은 4가지를 들 수 있다.

i) Intrabeam NHZ

레이저로부터 R만큼 떨어진 거리에서의 방사

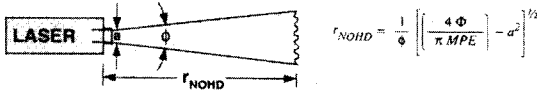


그림11. Direct beam의 NHZ 계산

조도가 MPE값이나 그 이하로 유지될 경우에 이 거리를 intrabeam NHZ 영역 또는 '안전영역'으로 간주한다. 이것을 레이저파라미터로 나타내면 아래와 같다.

$$R_{I.R.NHZ} = \frac{1}{\phi} \left[\left(4 \frac{\Phi}{\pi \times MPE} \right) - a^2 \right]^{0.5}$$

여기서 $R_{I.R.NHZ}$ 는 intrabeam NHZ의 거리 (cm)를 나타내고 ϕ 는 레이저빔의 발산각 (radian)을, Φ 는 레이저 출력(W), 그리고 a는 레이저시스템의 구경에서 빔 치수를 말하며 MPE는 허용 가능한 노광한계를 나타낸다.

예를 들어서, 100W의 산업용 Nd:YAG 재료 가공용 레이저시스템이 2mrad의 발산각과 0.2cm의 빔 직경을 가진다고 가정했을 때 8시간 정

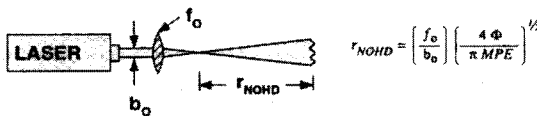


그림12. Lens로 집중되는 레이저빔의 NHZ

도의 MPE 값이 $1.6\text{mW}/\text{cm}^2$ 이라고 가정하면 앞에 제시된 식으로부터

$$R_{I.R.NHZ} = \frac{1}{2 \times 10^{-3}} \left\{ \frac{(4 \times 100)}{\pi (1.6 \times 10^{-3})} \right\} - (0.2)^2 \Big)^{0.5}$$

$$= 1.4 \times 10^3 \text{M}$$

의 결과를 얻는다. 레이저에서 나온 빔이 MPE 방사조도인 $1.6 \times 10^{-3} \text{W}/\text{cm}^2$ 정도로 퍼지려면 레이저에서 거의 1.41km 떨어진 거리가 되는 것을 알 수 있다. 이 거리는 일반적인 레이저 영역의 경우 보다는 확실히 큰 값이다. 그러므로 NHZ 공간 내에서 작업하는 사람들을 보호하기 위한 적절한 조치가 필요하다.

ii) Lens-on-laser의 NHZ

산업용 레이저들은 빔경로의 끝단에 렌즈를 사용하는 경우가 대부분이다. 이렇게 함으로써 렌즈의 초점면에서 방사조도를 증가시켜 의도된 작업수행이 가능케 되며, 초점면을 지나면 원래의 레이저빔이 가지고 있던 발산각의 수배 이상 큰 각으로 빔이 퍼지게 된다. 결과적으로 MPE 방사조도는 intrabeam NHZ보다 훨씬 짧은 거리에서 이루어진다.

이것은 lens-on-laser의 NHZ로 지칭되며 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$R_{L.L.NHZ} = \left[\frac{f_0}{b} \right] \left[\frac{4\phi}{\pi \times MPE} \right]^{0.5}$$

여기서 $R_{L.L.NHZ}$ 는 lens-on-laser의 NHZ 거리를 나타내며, ϕ 는 레이저빔의 출력, f_0 는 렌즈의 초점길이, b는 렌즈에 입사되는 빔의 직경이 된다. 예를 들어서 200mm의 초점길이 렌즈를 장착한 1kW 출력의 CO₂ 레이저를 고려해 보자. 렌즈에서의 빔 직경을 30mm로 가정했을 때 앞의 식에 의하면

$$R_{L,L,NHZ} = \left[\frac{200}{30} \right] \times \left[\frac{4 \times 1000}{3.14 \times 0.1} \right]^{0.5} = 7.5M$$

이 된다. 따라서, 원추형 레이저빔에 의해 렌즈방향으로 정해진 방향에 대해 위험영역은 7.5M의 거리만큼 된다. 그리고 이때의 빔 지름은 $D_B = (b/f_0) \times R_{NHZ}$ 에서 113cm 정도가 되고 이때의 MPE조건은 $0.1W/cm^2$ 에 해당된다. 여기서 NHZ값은 레이저 출력변수들에 의해 달라지며 어떤 경우는 적용하고자 하는 응용에 따라 서로 결정됨을 볼 수 있다. 예를 들면 레이저 용접에서 사용되는 렌즈의 초점길이는 일반적으로 레이저 절단에서 사용되는 것보다는 크다. 결과적으로, lens-on-laser에 대한 NHZ는 레이저용접에서의 경우보다는 크게된다.

iii) Fiber-optic NHZ

광섬유 광학계는 빔 확대장치와 비슷한 작용을 하는데 그 영향은 광섬유의 고유한 특성에 따른 위험영역을 초래한다. 레이저빔의 방사조도가 MPE 레벨에 이를 때의 그 거리를 fiber-optic NHZ라고 부른다. lens-on-laser의 조건과 비슷한 방법에서, 빔의 경로에 광섬유를 부착시킬 경우 광섬유에서 출사되는 빔은 확대가 이루어지며 이때 사용한 광섬유의 특성에 따른 위험영역의 축소를 볼 수 있다. 산업용 Nd:YAG 레이저에서 사용되는 일반적인 다중모드 광섬유의 경우 fiber-optic NHZ의 범위($R_{FO,NHZ}$)는 다음과 같이 주어진다.

$$R_{FO,NHZ} = \left[\frac{1.7}{NA} \right] \times \left[\frac{\phi}{\pi \times MPE} \right]^{0.5}$$

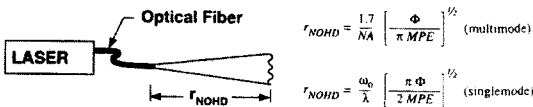


그림13. 광섬유로 전송되는 레이저빔의 NHZ

여기서 $R_{FO,NHZ}$ 는 fiber optic laser의 NHZ 거리(cm)를 나타내고 NA는 사용한 광섬유의 numerical aperture ($NA = (n_1^2 - n_2^2)^{0.5}$)를 나타낸다. 이때 n_1 광섬유의 내부 코어의 굴절률이며 n_2 코어를 싸고있는 클래딩층의 굴절률이다. 만약, NA가 0.2인 다중모드 광섬유가 5W의 아르곤 레이저에 부착된다면 이러한 조건에서 8시간 동안 노출되었을 때 ($MPE = 1 \mu W/cm^2$)의 NHZ는 다음과 같이 계산될 수 있다.

표 6 NHZ Distance Values for Various Laser Types

Laser Type	Exposure Criteria	Diffuse (100%)	Nominal Hazard Zone Hazard Range (meters)		
			Lens-on Laser	Direct Beam	Fiber Optic
Nd:YAG 100W 1.064 μ m	8 hr. 10 s.	1.4 0.8	11.3 6.3	1410 792	12.0 6.74
CO ₂ 1000W 10.6 μ m	8 hr. 10 s.	0.56 0.56	7.5 7.5	555 555	n/a n/a
Argon 5.0W 0.488 μ m	8 hr. 0.25 s.	12.6 0.25	1.7×10^3 33.3	2.5×10^4 240	107.2 2.1
QS:Nd:YAG 5.0mJ 1.064 μ m	8 hr. 10 s.	4.9 1.8	277 102	2.2×10^5 810	n/a n/a
Doub.YAG 10W 0.532 μ m	8 hr. 0.25 s.	17.8 0.35	1.4×10^3 28.3	8.9×10^3 175	151.6 3.1

Laser Criteria Used for NHZ Distance Calculation:

Laser Parameters	Q-Switched			Doubled	
	Nd:YAG	CO ₂	Argon	Nd:YAG	Nd:NAG
Wavelength(μ m):	1.64	10.6	0.488	1.064	0.532
Beam Power(Watts):	100.0	1000.0	5.0	-	10.0
Pulse Energy(J):	-	-	-	0.05	-
Divergence(mrad):	2.0	2.0	1.0	4.4	4.0
Beam at Aperture(mm):	2.0	20.0	2.0	6.0	4.0
Beam at Lens(mm):	6.3	30.0	3.0	7.0	5.0
Focal Length(mm):	25.4	200.0	200.0	200.0	200.0
Pulse Length(μ sec):	CW	CW	CW	1×10^{-2}	CW
Pulse Rate(Hz):	-	-	-	1000	-
Numerical Aperture:	0.2	-	0.2	-	0.2
MPE Criteria:					
8hr. (μ m/cm ²):	1.6×10^3	1.0×10^5	1.0	68.0	1.0
10 sec. (μ m/cm ²):	5.1×10^3	1.0×10^5	-	68.0	-
0.25 sec. (μ m/cm ²):	-	-	2.5×10^5	-	2.5×10^3

$$R_{FO,NHZ} = \left[\frac{1.7}{0.2} \right] \times \left[\frac{5}{3.14 \times 1 \times 10^{-6}} \right]^{0.5} = 107.2M$$

광섬유 광학계의 위험영역은 거의 3mm의 빔 크기와 빔경로에 초점길이 15mm의 렌즈를 적용한 것과 대등하다. 이는 광섬유 광학계가 빔경로에서 짧은 초점의 렌즈를 가진 경우와 광학적으로 대등하기 때문에 타당한 결과이다.

iv) 확산반사의 NHZ

표면에서의 레이저 방사조도가 MPE와 동일한 확산표면에서의 여현 의존적인 점광원 반사로 정의되는 공간을 확산반사의 NHZ라고 부른다. 레이저 응용분야가 발전됨에 따라서 직접적으로 레이저빔이 미치는 영역보다는 포괄적인 위험분석이 요구되는 경우가 많아진다.

일반적인 NHZ의 계산을 표 6에 정리해 놓았다. 이 표는 다음의 다섯 가지 일반적인 레이저 종류에 대한 직접 조사되는 빔, lens-on-laser, 확산반사(점광원), 그리고 광섬유 광학계의 NHZ 값을 나타낸다.

- Nd:YAG laser, : 100W/CW
- Argon ion laser : 5W/CW
- CO₂ laser : 1000W/CW
- Q-switched Nd:YAG laser :
1kHz, 50mJ/pulse
- Frequency-doubled Nd:YAG laser :
10W/CW

CW Nd:YAG, 아르곤, 그리고 CO₂ 레이저에 대한 확산반사 NHZ의 그래프적 분석이 뒷부분

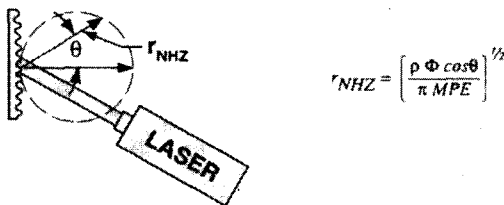


그림14. 표면에서 산란되는 레이저빔의 NHZ

에 시간의 함수로써 제시되어 있다. 아르곤 레이저의 경우, 계산에서 MPE의 값을 결정하기 위해 선택된 시간요소는 NHZ를 정하는데 있어서 매우 중요하다. 하지만 Nd:YAG 레이저의 계산에 있어서 시간의 영향은 중요하지 않다. 또한 CO₂ 레이저에 있어서 10초 이상 노출이 지속되었을 경우 NHZ는 증가하지 않는다.

4. 확산반사

실제적으로 아주 약간만 거친 표면일지라도 입사레이저빔에 대해서는 확산표면처럼 거동하며 이러한 확산표면은 빛에 대한 아주 작은 산란 자리로써, 빔을 방사, 대칭적으로 반사하는 면처럼 거동한다. 레이저의 파장에 비해서 표면의 거칠기가 더 크다. 표면에서 반사되는 방사상의 세기는 일반적으로 단위 입체각(W/Sr)에 대한 파워로 표현되며 $I(\theta)$ 로 표기된다.

산란된 빔의 강도는 입사강도(I_0)와 가시각(θ)의 여현에 대해 아래와 같은 관계를 가진다.

$$I(r, \theta) = I_0 \cos(\theta)$$

이 관계식은 Lambert의 코사인 법칙으로 알려져 있으며, 이러한 거동을 보이는 표면을 Lambertian surface라고 부른다.

5. 확산반사 NHZ의 개념

확산반사와 관련된 NHZ는 거의 2π스테라디안의 체적을 차지하며 물체표면에서 측정된 각의 여현 뿐만 아니라 표면반사계수에 의해서도 결정된다. 이러한 논의의 순서는 다음과 같다.

· 가능한 비스듬한 각에서의 확산반사만 인정한다. 예를 들면 $\theta = 80^\circ$ 인 각의 세기는 정상적인 각에서의 강도의 20%보다 낮다. 영구적인 빔 블록은 일반적인 근접 관측조건을 상당히 제한할 수 있다.

· 물체의 확산반사계수는 가능한 낮은 값을 유지해야 한다. 사람은 제한된 확산반사 NHZ

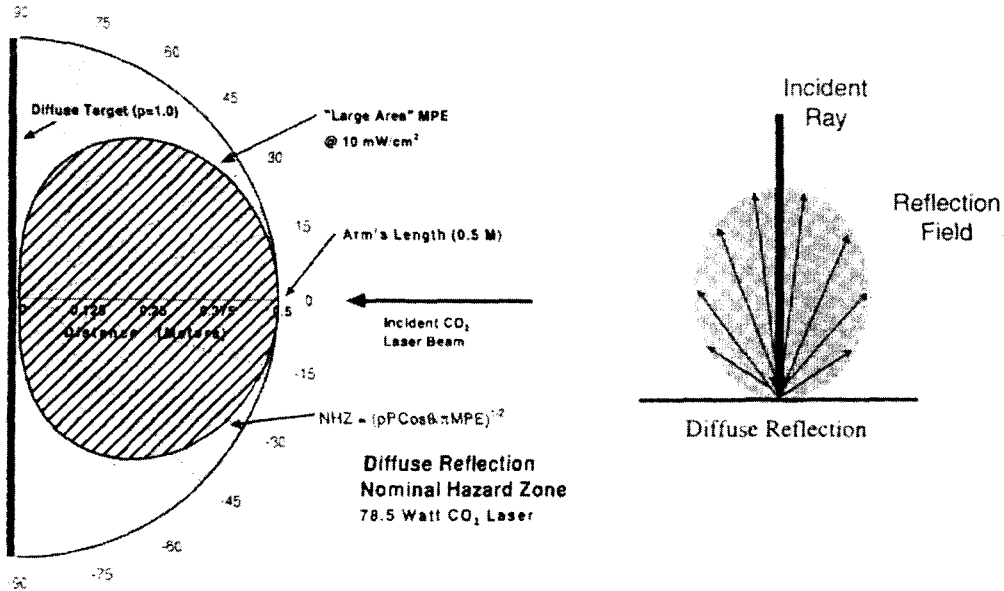


그림15. 표면에서 확산반사되는 레이저빔의 분포

영역의 외부에 있어야 한다. 이 확산반사 NHZ는 반사율이 낮을 때는 감소되고, 목표점의 주변은 빔 블록에 의해 제한되기도 한다. 이 분석결과에 의하면 NHZ의 영역 내에서 작업을 하는 사람은 레이저 보안경과 같은 보호장비를 착용해야 한다.

확산반사를 다음의 그림처럼 기술하여 설명할 수도 있다. 이것은 78.5W의 출력을 내는 CO₂ 레이저의 위험영역을 나타내는데 이 경우에는 넓은 면적의 노출(MPE = 10 mW/cm²)에 대한 MPE가 선택되었을 경우 거의 팔꿈치 길이 정도에 해당되는 0.5M의 가장 심각한 NHZ를 나타낸다. 레이저 안전요원은 몸 전체가 확산반사에 노출될 가능성이 있으면 '넓은 면적'에 대한 수정된 MPE 값을 적용할 수 있다. 이러한 상황은 산업용 레이저로 용접작업을 하는 작업장에서 여름철 작업자가 셔츠를 벗고 작업할 경우에 발생할 수 있다.

확산관찰의 비교를 위해서 표준적인 100W의 백열등을 가까운 거리에서 직접 바라보는 것은 40mW/cm²Sr 정도의 조도를 가진 확산광원을 보는 것과 동일하다고 가정하자. 비교를 위해서 10M

거리에서 1mW HeNe 레이저가 100% 반사되는 벽 위에 조준된 경우는 1.1mW/cm² 정도의 복사노출을 발생할 것이다. 100% 반사율을 가정할 때 이 확산소스로부터의 복사는 0.35 × 10⁻³W/cm² Sr 정도로 계산할 수 있다. 따라서 1mW HeNe 레이저의 확산반사는 100W의 확산된 전구를 보는 것보다 100배 이상 덜 밝음을 알 수 있다. 따라서 저출력 레이저의 확산관찰은 보편적인 광원보다 위험성이 적다. 확산반사의 위험 정도를 구분 짓는 경계는 일반적으로 0.5W(CW class III B와 class IV 레이저의 구분이 됨) 정도로 간주되고 있다.

6. 확산반사의 NHZ 영역

'점광원' 확산반사로부터 특정한 방사조도가 도달되는 점까지의 떨어진 거리를 계산하는데 유용한 예가 있다. 확산반사 NHZ(R_{D,R,NHZ})는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$R_{D,R,NHZ} = \left(\frac{\delta \phi \cos \theta}{\pi \times MPE} \right)^{0.5}$$

여기서 R_{D,R,NHZ}는 확산반사의 NHZ 거리이며

ϕ 는 레이저빔의 출력이다. 그리고 δ 는 반사율을 나타내고 θ 는 입사각이다. 예를 들면, 0.488 μm 파장에서 100% 반사를 일으키는 표면 위에서 5W 아르곤 이온 레이저의 관찰각이 0° ($\cos \theta = \cos 0 = 1$)라고 가정하면 $1\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 의 long term MPE 방사조도가 발생하는 거리는 얼마일까?

앞의 식에 값들을 대입해보면

$$R_{D,R,NHZ} = \left[\frac{1 \times 5 \times 1}{3.14 \times (1.0 \times 10^6)} \right]^{0.5}$$

따라서 이 경우에는 후면 산란된 아르곤 레이저빔에 대해 노출 시에도 안전할 수 있는 거리는 12.6M이다.

레이저 시스템을 사용할 경우 다음의 세 측면은 전체적인 위험 평가에 중요한 영향을 미친다.

- 레이저 시스템이 인체에 피해를 끼칠 수 있는 능력
- 레이저가 사용되는 환경
- 레이저빔을 이용하거나 노출될 수 있는 사람

위의 세 가지 측면은 통제방법을 정하는데 있어 잠재적인 위험과 동등하게 간주되어야 한다. 레이저가 사용되는 환경은 각각 위의 세가지 응용에 따라서 바뀔 수 있다. 그러나 통제방법이 적당하지 아니면 다소 불필요한 것인지를 결정할 경우 레이저가 사용되는 환경은 아주 중요하다. 예를 들면, 제품생산에 사용되는 레이저 로봇 시스템의 제어는 연구실험실에서 사용되는 시스템과는 상당히 다를 것으로 예상할 수 있다. 최소한 다음의 사항들은 고려되어야 한다.

- 사용된 레이저 시스템의 수
- 격리의 정도
- 교육을 받지 않거나 보호되지 않은 사람이 존재할 확률
- 빔 경로의 지속성
- 빔 경로 주변에서 빔을 반사시킬 수 있는 물

체의 지속성

- 렌즈, 현미경, 광섬유 등과 같은 광학계의 사용

NHZ에 근거한 통제를 수행하는데 있어서 중요한 점은 언제 이와 같은 분석이 요구되는지를 이해하는 것이다. ANSI Z-136.1 규정은 다음과 같은 몇 개의 주요 부분으로 이루어진 NHZ 분석을 요구한다.

- 레이저 로봇 시스템의 설치
- 보호 창
- 경고표시와 라벨
- 영역 표시

앞의 모든 것들은 한정된 레이저 영역에서 밀폐되지 않은 class III B와 class IV 레이저의 상황에 관련된다. 적합할 것으로 간주되는 요소들은 통제방법에 다음과 같이 포함될 것이다.

- Class IV의 NHZ 영역에 정기적으로 들어가는 사람은 적절한 교육훈련을 받아야 하며 보호장비를 착용해야 한다. 그리고 모든 통제방안을 지켜야 한다.

· 레이저 시스템에는 '위험' 과 같은 경고표시가 부착되어야 한다. 또한 서비스 절차가 진행되는 동안에는 '주의' 표시를 레이저 영역밖에 부착하여 잠재적인 위험요소를 알려야 한다.

· NHZ 내에 사람이 들어갈 때에는 물리적 장벽, 차단막, 보호안경, 보호의 또는 적당한 행정적 조치를 조합하여 적용해야 한다. 장벽이나 스크린 장막 등은 레이저에 대해서 적어도 60초 정도는 견딜 수 있어야 한다.

· 보호되지 않고 훈련도 받지 않았으며 출입허가가 되지 않은 사람은 영역밖에 있어야 한다.

· 잠재적인 위험성을 가진 빔은 적당한 재료로 된 beam stop 내에서 차단되어야 한다.

· 빔 경로 주변에는 오직 확산반사 재료만 있어야 된다.

· NHZ 영역을 줄이기 위해서는 빔의 경로를 안전하게 해야 한다.

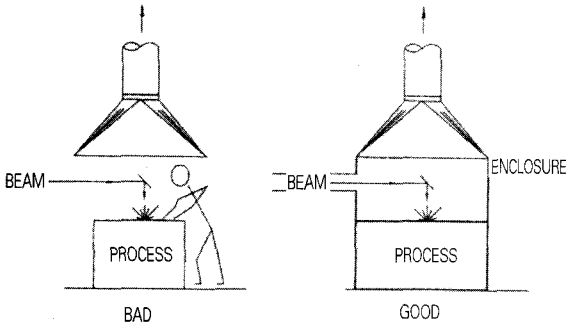


그림 17. 레이저에 의해 발생된 공기오염물질 제거를 위해 필요한 배기시설

· 모든 창문, 출입문, 개방된 입구 등은 NHZ를 제한하기 위해서 엄격하게 규제되어야 한다.

· 모든 class IV 레이저의 NHZ는 응급상황 발생시 레이저 동작자가 레이저 영역에 신속히 출입할 수 있도록 설계된 출입문을 가져야 한다.

· 응급상황을 위해 'emergency'라고 선명하게 새겨진 버튼이 있어서 레이저 시스템을 차단 또는 MPE 레벨 이하로 출력을 줄일 수 있어야 한다.

· 적당한 영역/출입문 안전장치가 있어야 한다. 자동화된 시스템의 경우에는 부적절한 동작의 발생이나 레이저 영역 내로 예상 밖의 출입이 있었을 경우 레이저의 동작을 제한하는 잠금장치가 포함되어야 한다.

· 출입구에는 class IV 레벨의 레이저가 동작 중임을 알리는 가시적 또는 가청적인 표시장치가 있어야 한다.

Class IV 레이저 시스템이 안정적으로 동작되기 위해서는 레이저 경고시스템이 다음과 같이 설치되어야 한다.

a. 레이저 동작을 알리는 경광등이 class IV 레이저 시스템을 가진 시설물의 각 레이저실 입구 바깥에 설치되어야 한다.

b. 경광등은 세 가지 등(lamp)의 조합으로서 다음과 같은 방법으로 동작한다. 하나의 등은 고전압 차단상태, 즉 비동작 중임을 나타내고 또 하나의 등은 비동작 중이지만 고전압이 인가되

어있는 상태를 나타낸다. 마지막 등은 레이저가 동작 중에 있음을 나타낸다.

빔 외적인 위험(Non-beam Hazards)

레이저 안전의 문제는 빔과 빔 이외의 외적인 위험 모두를 포함한다. 산업용과 연구용 레이저 시설의 안전문제를 정리하는 동안 동일한 종류의 기초적인 안전문제가 반복적으로 발견되었는데, 이에 는 다음과 같은 것들이 포함되어 있었다.

- 레이저에 의한 화재
- 유독성 연기의 발생
- 보호되지 않은 배선과 배관 조직
- 물, 염료, 그리고 화학약품의 누설
- 부적절하거나 부착되지 않은 경고표시
- 레이저 통제영역의 미표시
- 부적절한 배기시설
- 부적절한 관측방법

· 레이저 보호 케이스의 개방 또는 위치이탈

· 잠금장치의 파손

· 화학적 유해성과 유독연구에 대한 자료의 부족(MSDS 자료의 부족)

연구용 실험실이나 의학적인 이용, 산업용 재료 가공 등에서의 많은 레이저 이용에서 부수적인 위험의 측면도 고려되어야 한다.

레이저에 의한 플라스틱의 절단작업에 있어서 가장 중요한 위험요소는 그림 17과 같이 레이저에 의해 발생하는 공기의 오염이다. Polymethyl methacrylate와 polyvinyl chloride의 CO₂ 레이저 절단에 의한 부산물의 분석결과 polyacetylic aromatic hydrocarbons과 같은 잠재적 위험성을 가진 다른 화학성분들이 포함되어 있음을 알 수 있었다.

최근의 연구에 따르면 Kevlar와 같은 고온직물을 CO₂ 레이저로 절단할 때는 몇 가지의 유독성 및 발암성의 오염물질이 발생할 수 있음을 나

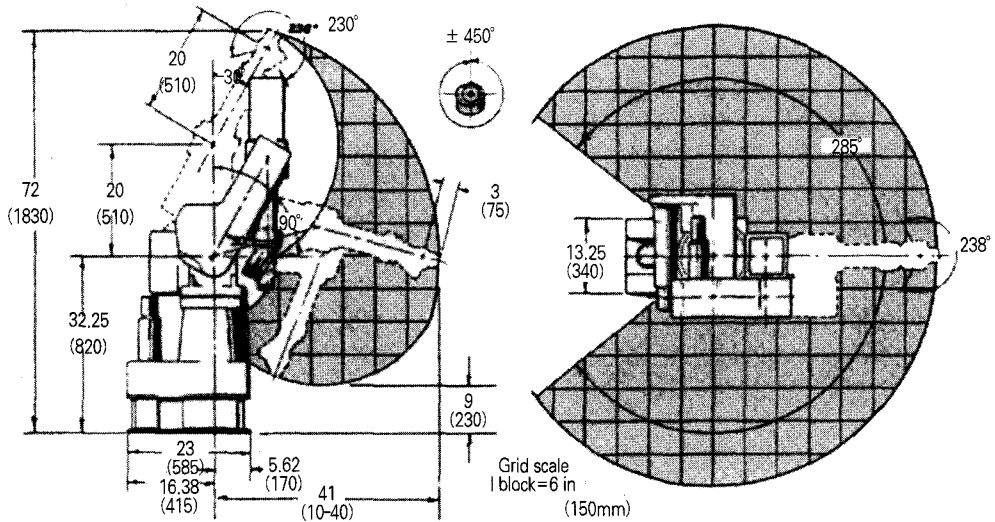


그림18. 일반적인 로봇의 작업영역

타낸다. 가장 높은 농도의 발암물질은 벤젠이었다. 이러한 연구에서 주목할 점은 오염물질의 적절한 배출시스템을 사용하여 작업자를 보호할 필요가 있다는 것이다. 또 하나의 주목할 점은 보호가스로 아르곤을 사용하면 벤젠 발생을 증가시킨다는 사실이다. 그러므로 보호가스는 공정 측면에서의 요구뿐만 아니라 산업적, 위생학적 기초 위에서 선택되어야 하는 중요한 문제이다.

Class IV 레이저 시스템의 사용에서는 레이저 복사출력에만 관심이 있고 화재 위험은 종종 무시된다. 화재는 장비의 고장에 의해서 발생한 경우가 보고되기도 했다. 이러한 화재에 대비해서는 통제영역 내에 화재 발생 시 배출될 가능성이 있는 화학물질과 인화성 재료의 종류 등을 지역 화재센터(소방서)에 알려 놓을 필요가 있다.

레이저 시스템을 조정(서비스작업)하는 작업자 중에서 전기적 쇼크사고로 사망이나 치명상을 입은 경우가 아주 많다. 이것은 펄스레이저 시스템의 경우 순간적으로 거의 2kA 정도의 전류를 흘리므로 놀랄 일이 아니다. 일반적으로 고출력 CW CO₂ 레이저는 레이저 방사가 이루어

지는 동안에는 20 ~ 30A 정도의 전류가 흐른다. 60Hz에서 사람의 인체에 치명적인 손상을 주는 전류는 50 ~ 100mA 정도이다.

제조업 분야에서는 레이저와 로봇의 조합시스템이 많이 사용된다. 이러한 시스템의 사용 증가는 아래와 같은 새로운 안전문제들을 발생시킨다.

- 보호된 로봇의 작업구역 내에서 NHZ는 있는가?
- 로봇의 고장으로 인한 레이저빔으로부터의 위험성은 있는가?
- 이러한 시스템을 서비스 할 때 잠재적인 위험성은 없는가?
- 'Pinch effect'가 발생할 수 있는가? 이것은 작업자가 로봇과 벽 등과 같은 물체 사이에 끼일 경우에 나타난다.

산업용 로봇의 사용에 있어서는 많은 경우 로봇 주의에서 10 ~ 20피트가 작업영역으로 정해진다. 하지만 로봇에 레이저가 부가되면 로봇의 작업영역은 레이저와 관련된 NHZ를 포함해야 한다. 또한 이것은 광학계와 목표물체로부터의 산란도 고려해야 한다.

고압의 arc lamp나 필라멘트 램프 또는 레이

저 용접장치들은 보호덮개로 감싸져야 한다. 이러한 보호물은 램프의 폭발이나 분열로 초래되는 최대압력을 견딜 수 있어야 하며, 레이저의 목표물과 레이저의 동작동안 단혀있어야 하는 광학부품들도 밀폐되어야 한다.

레이저 장비의 올바른 사용을 위해서는 전기적 설치방법과 전원공급장치의 올바른 연결방법(예를 들면 냉각수 연결문제와 전원선의 정격용량 및 적절한 배선)이 적절하게 선택되어야 한다.

전기와 전기관련 장비가 노출될 경우에는 두 가지의 기본적인 위험부류가 존재하며 전기적 위험과 기계적인 위험으로 나눌 수 있는데, 산업용 전력 시스템과 장비들은 엄청난 에너지를 이용할 수 있기 때문에 기계적 위험에 대한 조치들이 고려되어야 한다. 결함이 있거나 제대로 설치되지 못한 장비가 전기적 파동(서지전류)을 만나게 되면 소자에 물리적인 결함이나 파손을 일으키며 재빠르게 에너지를 방전한다. 이러한 손상은 용융금속을 튀게 하거나 화재 등의 원인이 된다.

적당히 땀을 지닌 엔지니어가 120V 회로를 손으로 잡으면 피부와 몸의 전기저항은 대략 12,000Ω 정도가 된다. 그러므로 전류는

$$I = \frac{V}{R} = \frac{120}{12,000} = 10\text{mA}$$

정도가 되고 감전상태가 더 지속되면 저항은 더욱 떨어지고 전류는 증가된다. 동일한 조건에서 12,000V가 회로에 인가된다면 인체에는 1A의 전류가 흐르게 된다. 이런 전기적 또는 기계적인 위험으로부터 사람들을 보호하기 위해서는 특별한 장비와 훈련이 필요한데, 이런 것들을 아래의 기본적인 두 규칙으로 정리해 놓았다.

i) 전기회로에 접촉을 피한다. 어쩔 수 없는 경우는 적당한 거리를 유지하거나 절연을 시키는 등의 방법을 사용하여 인체의 저항을 증가시킨다.

ii) 안전한 위치를 유지하라. 즉 피할 만큼의 여유공간을 유지하고 안전거리를 유지하며 보호를 증가시킬 수 있는 하드웨어를 사용하라.

전원이 살아있는 시스템은 그 상태로는 서비스를 하지 않는 것이 가장 바람직하다. 하지만 전원이 없으면 문제점을 개선하기 어려운 전기회로도 있다. 전압이나 전류부하, 동작순서, 소자의 성능 등을 점검할 경우 전기 시스템은 전원이 살아있어야 한다. 이럴 경우 안전한 작업을 진행하기 위해서는 600V 이하의 전기적 시스템에서만 안전하게 서비스를 수행할 수 있다.

결론

레이저는 전기·전자를 비롯한 많은 분야의 선도기술이 집적되어야 구현 가능한 기술로 그 유용성은 많은 분야에서의 사용 예로 입증되고 있다. 과학 및 군사분야의 특수목적으로 이용되는 경우를 제외하고라도 의료나 산업분야에서의 많은 기술분야가 레이저에 의해 대체되고 있다.

이런 추세에 힘입어 레이저는 점점 소형화, 고출력화, 고기능화를 추구하고 있다. 하지만 레이저 사용의 추세에 따라 발생하는 부수적인 안전의 문제는 실제 사고를 경험하기 이전에는 큰 주목을 받지 못하고 있는 실정이다.

산업전반에 걸쳐 우리보다 레이저의 도입이 빨랐던 선진국에서는 지난 수년간에 걸쳐 여러건의 안전문제들이 반복적으로 보고되었으며 안전에 대한 중요성도 많이 인식되어 있으므로 이에 대한 규정 및 교육기관도 많이 운용되고 있는 실정이다.

하지만 안전의 문제는 항상 경각심을 가지고 사고발생 이전에 예방을 하는 것이 최선의 방법 이므로 레이저 관련 분야의 종사자를 비롯한 책임자들의 지속적인 관심과 교육이 우선되어야겠다.