

레이저 가공시의 안전 대책

레이저가공 관련 분야 종사자들이 꼭 숙지해야 할 레이저 가공시의 안전 대책에 대해서 쉽게 소개한 일본 과학기술청 금속재료기술연구소 入江宏定 부장의 글을 실는다. 이 내용은 한국광학기기협회 주최로 7월 24일부터 26일까지 열렸던 '한·일 광학기술 전문가 초청 세미나' 가운데 '레이저 응용 및 안전'이라는 주제로 발표됐다.

♣ 글: 入江宏定 / 일본 과학기술청 금속재료기술연구소 부장

1. 서 언

레이저광선은 SF 애니메이션 영화에서 살인 무기로 보통 사용되어 매우 위험한 광선의 이미지가 강하다. 그 위에 피스톨 모양의 총으로부터 발사되어 간단히 살인무기로 사용할 수 있다는 인상이 뇌리에 새겨져 있다.

그러나 레이저광선은 이름과 같이 '광'이며 그 이상의 위험성은 없다. 그럼에도 불구하고 개발 당초부터 안전에 대한 의식이 선행되고 레이저 가공을 운전할 때의 위험성은 거의 실감되지 않는다. 오히려 아크용접시의 아크로부터 방출되는 광 쪽이, 방비를 게을리 하면 눈이 데는 것 같은 아픔이나 피부가 과도하게 햇볕에 탄 듯한 아픔을 실감하여 위험성을 느낀다. 그렇다 해도 역시 레이저는 취급을 잘못하게 되면 충분히 살인광선이 될 수 있으며 실명 직전의 장애가 발생할 수도 있다.

우리들 기술자가 법규를 읽는 것은 대단히 지루하고 잘 알 수가 없다. 특히, 안전에 대한 법규는 아주 지루하다. 따라서 여기에서 그 안전기준을 상세하게 해설하여도 결국은 법규이고 몸에 베는 것은 아니라고 상상하고 있다. 그래서 여기

에서는 법규로서는 어떠한 것들이 있는지를 소개한 후 그 법규를 읽기 위한 간단한 해설을 시도코자 한다.

2. 레이저가공(기)의 안전에 관한 규격

현재 세계에는 2개의 안전규격이 중심이 되고 있다. 하나는 IEC(국제전기표준회의)에서 종합 취급하는 규격(IEC pub. 825)이며, 다른 하나는 미국에서의 기준(ANSI)이다. 일본에서는 IEC규격을 채용하여 JIS C6801(레이저 안전용어) 및 6802(레이저 안전규격)가 제정되어 있다. 이들 규격에 기초하여 노동성에서는 레이저 가공의 안전 가이드라인을 제정하고 都道府縣의 관계기관에 통달을 하고 있다.

또 상기 JIS 규격에 대하여 (재)광산업기술진흥협회가 레이저안전 가이드북을 출판하였으며 상세한 것은 본 가이드북을 읽도록 추천하고 싶다. 더욱 주로 레이저장치 취급자를 대상으로 하여 동 협회에서는 레이저스쿨을 매년 개최하고 있으며, 여기에서는 희망자에게 레이저 물리의 기초에서 응용 및 안전기준에 이르기까지 여러 클래스의 강의를 준비하고 있기 때문에 이 들 강

의를 수강토록 추천하고 싶다.

또한 IEC Pub. 825는 개정되었고 거기에 JIS C 6802도 개정중에 있으며, 금년도에는 신 규격이 제정될 것으로 생각된다. 그러나 기본적인 점은 바뀌지 않았다. 더욱이 LED에 대하여 본 규격에 포함시킬 것인가에 대한 세계적인 논의가 이루어지고 있지만 당장은 대상이 되지 않는다고 생각된다.

3. 레이저가공에서 발생하는 장애

3.1 레이저광선의 피폭에 의한 장애

레이저광선에 피폭되었을 때 발생하는 장애는 주로 눈과 피부이다. 이것은 태양광선에 일광욕을 하였을 때 생기는 장애와 똑 같다. 이를테면 눈의 장애는 태양광선을 직시하였을 때에 발생한다. 특히 쌍안경 등으로 직시하면 실명의 위험이 있다. 또 일광욕으로 피부를 태우면 일과성인 것으로는 화상과 같은 증상이 되고, 자외선은 피부암을 유발한다고 하며, 글로벌한 환경오염으로서 오존층의 파괴가 문제가 되는데 까지 이르고 있다.

표1. 광의 종류와 상해의 종류

파 장 (nm)	장애의 종류		해당 레이저
	눈	피 부	
자외선C, B (100~315)	각막장애	홍진, 노화 색소의 증가	엑시머
자외선A (315~400)	각막장애 백내장	색소의 흑화 화상	엑시머 Ar이온
가시광선 (400~800)	망막손상		Ar이온 루비
적외선A (800~1400)	망막손상 백내장		YAG 요소
적외선B, C (1400~)	각막장애 백내장		CO ₂ CO

주 : 각 레이저는 주 파장을 나타내며, 변조파 등은 포함 되지 않음.

파장영역의 분류는 국제조명위원회에 따름.

레이저발전기는 매우 다양하지만 레이저가공에 사용되고 있는 주요 레이저발전기는 CO₂레이저, YAG레이저, 엑시머레이저, Ar이온레이저의 4종류이다. 확대해봐야 여기에 루비레이저, CO 레이저 및 요소레이저, kW 클래스의 발전이 가능하게 될 반도체레이저가 추가되는 정도이다. 그리고 장애의 성질은 그 광의 질(파장)에 따라 다르다. 광의 파장과 발생시 연계 되는 장애의 종류를 표 1에 나타내었다.

이들 장애는 이미 아주 격렬한 아크로부터의 광에 폭로되어 있는 용접기술자에게는 친숙한 것이다. 여기에 약간의 설명을 붙이면 다음과 같이 된다.

자외선 영역에 있어서 각막 장애는 레이저의 에너지가 높고, 원자간 결합을 파괴하는 소위 세포 파괴에 의한 것으로서 심하면 레이저 가공에서와 같은 abrasion 현상도 발생한다. 이 현상을 역으로 택하여 최근에는 각막 표면을 국부적으로 소량 깎아내는 근시안의 치료가 성행하고 있다. 피부의 색소가 증가하여 무늬가 생기는 일도 있고 이 것에 의한 피부암의 위험성도 지적되고 있지만 정량적인 것은 연구중에 있다.

한편 가시광선이나 근적외선에 의한 망막손상은 이 종류의 파장의 광이 체내의 수분 등으로 흡수되기 어렵고 마침 눈의 렌즈(수정체)에 의하여 초점을 망막에 모으기 때문에 강한 레이저 광선이 눈에 쏘이면 망막세포가 손상된다(이 것을 광응고라고 부르며 스폿 용접에서 용접응고 한 것 같은 상태로 된다). 특히 YAG레이저의 파장은 눈에서의 투과율이 매우 높고 위험하다. 이것을 역으로 이용한 것이 망막박리의 치료이다. 이 경우는 박리되지 않은 부분의 끝단부를 광응고 시켜서 박리의 진전을 방지한다.

(중)원적외선은 각막이나 피부의 표면에서 흡수된다. 각막장애나 피부장애는 거기에서 발생하는 열에 의한 소위 화상에 의한 장애이다. 당연히 강한 레이저광선을 장시간 쏘이면 실명 등의 중

대 장애가 된다. 의료에서는 어깨 결림의 치료나 수술의 메스로 이용되고 있다.

또한 표의 백내장에 대해서는 명확한 것은 없고 반드시 레이저를 계속 쪼였기 때문에 백내장이 되는지 어떤지는 의학분야에서도 특정되어 있지 않은 모양이다.

3.2 기타 원인에 의한 장애

레이저광선 피폭 이외의 요인에 의한 장애는 대부분 용접환경에서 발생하는 장애와 마찬가지로이다. 그들의 주된 것들을 예시하면,

(1) 전기계통

가공용 레이저는 일반적으로 에너지 공급원(펄핑원)에 고전압(수kV)을 이용하고 있다. 예를 들면 CO₂ 레이저에서는 방전전원, YAG 레이저에서는 조명램프 전원이다. 따라서 후술하는 레이저발전기의 보호경체를 뜯어내면 감전의 위험이 있다.

(2) 레이저가스

기체레이저에서는 가스를 레이저 물질로서 사용하고 있는데, 특히 위험한 것은 엑시머레이저이다. 엑시머레이저에서는 Ar이나 Kr의 불활성 가스와 F₂나 Cl₂의 할로젠가스를 혼합하여 사용한다. 가스는 스테인리스 강관의 배관으로 공급되지만 강한 부식성 때문에 배관부식·누설의 위험이 있어 주의를 요한다.

(3) 보호가스(shield gas)

일반적으로 레이저 가공에서는 아크용접이나 가스절단과 마찬가지로 보호가스를 사용한다. 이때 금속 증기나 스파크로부터 렌즈를 보호하기 위하여 Ar이나 He가스, 고능률의 절단을 위하여 O₂가스의 유량을 많이 하는 경우가 대단히 많다. 폐쇄된 공간에서 가공작업을 행하면 불활성가스에 의한 산소결핍이 일어난다. O₂가스는 화재를 가속시킬 위험성이 있다.

(4) CO₂ 레이저에서는 렌즈 등의 광학부품에 CVD로 제조된 ZnSe가 많이 이용되고 있다. 이

것은 타게 되면 유독한 Se증기를 발생하여 극독물로 지정되어 있다. 또 투과율을 높이기 위하여 방사화물질인 트롬화합물의 피막이 되어 있어 파손시의 취급은 충분한 주의가 필요함은 물론 산업폐기물로서 처리해서는 안되며, 특정된 처리가 필요하다.

(5) 기타 작업환경

기타 작업환경에 의한 장애의 위험성은 레이저 가공에 특정된 것은 아니다. 용접이나 절단시에 발생하는 흠(fume)의 문제나 가연성의 천이나 기름 등의 정돈 불량에 의한 화재 또는 금속의 낙하, 충돌의 타박에 의한 문제 등 가공 공통의 문제이며 대책도 같다.

3.3 장애의 예

레이저가공은 그 개발 단계에서부터 안전성에 대한 관심이 높았고 실용기계가 시판되는 단계에서는 상당한 주의를 기울여 왔다. 이것은 종래 사고가 발생하고 나서 안전기준이나 안전기기의 대책이 강구되었던 많은 경우와는 사정이 상당히 다르며, 사고의 예도 많지 않다.

보고된 중대 사고로서는 CO₂ 레이저에 의한 천공가공에서의 사망사고이다. 이 경우에는 보조가스로 산소를 사용하고 가공실의 환기를 하였지만 그 것을 외부로는 방출하지 않아 작업자는 O₂ 과잉의 환경에서 작업을 하고 있었다. 목격자의 상세한 증언으로 명확하게 되었는데, 가공시의 스파크에 의하여 의류가 순간적으로 연소하여 전신 화상으로 사망하였다. 또 레이저 메스로 수술중에 기관지에 삽입한 산소용 관에 레이저를 잘못 조사하여 기관지의 화상에 의한 폐혈증에 의하여 사망한 사고가 보고되어 있다.

어느 경우나 산소과다에 의한 연소촉진으로 발생한 것이다. YAG 및 Ar 레이저에 있어서는 망막손상의 예가 20건 이상 보고되어 있다. 그 대부분은 연구실이나 개발중에 감박하여 레이저 광선을 들여다 본 결과 망막손상을 일으킨 것으로

가공중의 예는 한 예뿐으로 알려지고 있다. 이들의 사고에서는 실명까지는 되지 않고 후유증으로 시력이 저하된다. 또한 사고 전의 시력이 불명확한 일이 많고 틀림없이 시력저하에 이르렀는지 어떤지는 분명하지 않은 경우도 많다고 되어 있다. 최종 시력이 0.06 ~ 0.1로 저하된 예가 몇 인가 보고되어 있다.

4. 레이저가공기의 분류

안전성의 관점에서 레이저 가공기(안전용어로는 레이저 제품 : laser product)는 그 출력파워 등에 따라 다섯 클래스로 나누어져 있다.

레이저의 안전성에 대해서는 AEL과 MPE의 두 개의 척도가 존재한다. 간단히 이 척도를 소개한다.

용어의 설명에 의하면,

AEL(accessible emission level = 피폭 방출 한계)은 각각의 클래스 분류에서 정한 최대 피폭 방사레벨.

MPE(maximum permissible exposure = 최대 허용 노광량)은 인체에 조사하여도 유해한 영향을 미칠 수 없는 레이저 방사레벨의 최대치.

매우 이해하기 힘든 개념이다. 다소의 부정확도를 인정해 준다면 다음과 같이 이해할 수 있다. 레이저광선을 쬐었을 때 인체에 장애가 발생하는 피폭량이 문제가 되며 그 것을 규정한 MPE 값이 중요하다. 표2 및 표3은 눈의 각막 및 피부에 대한 MPE 값이다.

이 들 값을 초과하는 방사량을 쬐이면 장애가 발생할 위험이 있다.(주 : 이 값은 의학적인 한계치가 아니며 안전계수를 표준적인 사람을 대상으로 5 정도로 하여 산출되어 있다) 그러나 레이저 가공기에서는 레이저 발전기로부터 방사된 광선이 인체에 조사되기까지 매우 복잡한 경로를 거치므로 MPE 값으로 안전지표를 산출하는 것은 곤란하다. 따라서 현재의 레이저 안전면으로부터의 클래스 분류는 레이저 발전기의 방사광이 직

표2. 레이저방사시 눈의 직접노광에 대한 각막에서의 MPE(발취)

노광시간t(s) 파장(nm)	10 ⁷ ~10	10~10 ³	10 ³ ~3x10 ⁴
200~302.5	30J · m ⁻²		
302.5~315	C ₁ J · m ⁻² (t<T ₁) C ₂ J · m ⁻² (t≥T ₁)	C ₂ x10 ³ W · m ⁻²	
315~400	C ₁ J · m ⁻²	10 ⁴ J · m ⁻²	10W · m ⁻²
400~1400	1.1x10 ⁴ xt ^{0.75} J · m ⁻² 2000W · m ⁻²		
1400~10 ⁵ 10 ⁵ ~10 ⁶	5600xt ^{0.75} J · m ⁻²		1000W · m ⁻²

표3. 레이저 방사에 대한 피부에서의 MPE(발취)

노광시간t(s) 파장(nm)	10 ⁷ ~ 1.8x10 ⁵	1.8x10 ⁵ ~ 5x10 ⁵	5x10 ⁵ ~ 10	10~10 ³	10 ³ ~10 ⁴	10 ⁴ ~3x10 ⁴
200~302.5	30J · m ⁻²					
302.5~315	C ₁ J · m ⁻² (t<T ₁) C ₂ J · m ⁻² (t≥T ₁)			C ₂ J · m ⁻²		
315~400	C ₁ J · m ⁻²			10 ⁴ J · m ⁻²	10W · m ⁻²	
400~550				100J · m ⁻²	10 ² W · m ⁻²	
550~700	5x10 ³ J · m ⁻²	18xt ^{0.75} J · m ⁻²		18xt ^{0.75} J · m ⁻² (t<T ₂) C ₃ x10 ² J · m ⁻² (t≥T ₂)	C ₃ x10 ² W · m ⁻²	
700~1050	5x10 ³ C ₄ J · m ⁻²	18xC ₄ t ^{0.75} J · m ⁻²			3.2xC ₄ W · m ⁻²	
1050~1400	5x10 ² J · m ⁻²		90xt ^{0.75} J · m ⁻²		16W · m ⁻²	
1400~10 ⁵ 10 ⁵ ~10 ⁶	5600xt ^{0.75} J · m ⁻²			1000W · m ⁻²		

접 인체에 조사되는 것으로 하여 발전기 출력의 AEL로 분류되어 있다.

『참고사항』

표2 및 표3에 있어서 보정계수 C 및 시간 T는 다음과 같다.

『참고사항』

파라미터	파장 범위 λ(nm)
$C_1 = 5.6 \times 10^3 \times t^{0.25}$	302.5~400
$C_2 = 10^{0.2(\lambda-295)}$	302.5~315
$C_3 = 10^{0.015(\lambda-550)}$	550~700
$C_4 = 10^{0.2(\lambda-700)/500}$	700~1050
$T_1 = 10^{0.8(\lambda-295)} \times 10^{-15}$	302.5 ~ 315
$T_2 = 10 \times 100^{0.02(\lambda-550)}$	550 ~ 700

레이저는 다음의 5개 클래스로 분류되고 각각의 안전성의 목표는 다음과 같다.

클래스 1: 아무리 장시간 피폭되어도 안전한 레이저

클래스 2: 가시광선에서의 안전한 레이저

완전한 안전은 아니지만 눈의 반사작용(협요 반응 = 눈을 감는 작용에 의하여 눈이 보호되는 점)을 고려한 안전레벨

클래스 3A : 광학적 수단으로 직접 레이저를 관찰하면 위험

클래스 3B : 직접 레이저 광로 내에서 피폭되면 눈에 장애가 발생할 가능성이 있는 레이저

클래스 4 : 직접 피폭되어도, 확산이나 산란된 레이저에 피폭되어도 위험한 레이저

표4. 클래스 3B 레이저제품의 AEL(발출)

노광시간 t(s)	10 ⁻⁹ ~0.25	0.25~3x10 ⁴
파장(nm)	10 ⁻⁹ ~0.25	0.25~3x10 ⁴
200~302.5	3.8x10 ⁻⁴ J	1.5x10 ⁻³ W
302.5~315	1.25x10 ⁻⁵ C ₂ J	5x10 ⁻⁵ C ₂ W
315~400	0.125 J	0.5 W
400~700	3.14x10 ⁵ t ^{0.33} J · m ⁻² 및 <10 ⁵ J · m ⁻²	
700~1050	3.14x10 ⁵ C ₄ · t ^{0.33} J · m ⁻² 및 <10 ⁵ J · m ⁻²	
1050~1400	3.14x10 ⁶ t ^{0.33} J · m ⁻² 및 <10 ⁵ J · m ⁻²	
1400~10 ⁶	10 ⁵ J · m ⁻²	

파라미터	파장 범위 λ(nm)
$C_2 = 10^{0.2(\lambda-295)}$	302.5~315
$C_2 = 10^{(\lambda-700)/500}$	700~1050

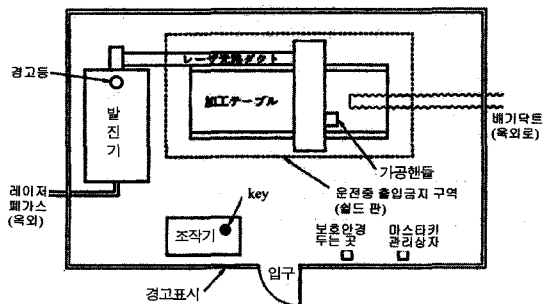
레이저 가공기는 대부분이 클래스 4에 속한다. 그 외 신변의 레이저로서는 강연시의 펜 라이트나 바코드리더의 반도체레이저로 클래스 2에 속한다. 그러면 클래스 4의 레이저는 어떠한 것인지 표 4에 나타낸다.

표 4는 클래스 3B에 대한 한계치이며, 클래스 4의 레이저는 그 이상의 출력을 가진 레이저를 나타낸다. 당연히 레이저 광선에 의한 장애는 파워밀도(조사밀도)와 조사시간에 의존한다. 연속 발진은 t=3000초로 규정된다. 또 반복 펄스발진 때에는 그 보정 계산식이 있다. 대부분의 레이저 가공기는 단시간 펄스발진인 엑시머레이저를 제외하고 0.5 kW 이상의 출력이며 클래스 4에 속한다.

5. 레이저가공에서의 안전대책

레이저가공에서의 안전대책은 모든 조건하에서 사람에게 잘못 조사될 수 있는 레이저강도 레벨을 클래스 1 이하로 하는 것이다.

현재 사용되고 있는 레이저 가공기는 다양각색이어서 구체적인 안전대책을 말하는 것은 곤란하다. 여기에서는 원칙적인 안전대책을 CO₂ 레이



▲ 그림1. 레이저 가공기의 안전대책

저 가공기를 예로 들어 소개한다. 상세한 것은 가공기 도입시에 가공기 메이커나 안전설비 메이커에 상담할 것을 추천한다.

그림 1은 주요 CO₂레이저 가공기의 안전대책을 나타낸 것이다. <메이커 측에는 다음과 같은 것이 의무화되어 있다.>

(1) 발진기 및 레이저 광로의 차폐 : 발진기 및 레이저 광로는 보호경체로 덮는다. 보호경체는 렌치나 드라이버 등 공구를 이용함으로써 비로소 분해 가능한 구조로 한다. 발진기에는 고압 위험표시, 레이저발진기에 관한 경고(레이저 클래스나 보호경체의 취급 등)의 표시가 의무화되어 있다. 보호경체 철거시는 발진 정지(한계 안전기구 장착)

(2) 발진기에는 셔터 폐쇄시의 템퍼가 부착되어 레이저 출력시(셔터 개구시)는 발진중의 경고 등의 점등이나 경고음의 발생

(3) 조작반에는 키 조작에 의하여 최초로 전원이 투입될 수 있도록 한다.

(4) 사용자에게 대한 안전상의 주의사항 통지 <한편 사용자측에는 다음과 같은 것이 의무화되어 있다.>

(1) 레이저 안전관리자의 지명 : 업무=관리구역의 지정, 레이저 작업자의 지명과 안전교육, 보안대책 등

(2) 레이저 안전관리 구역의 지정 : 관리구역 외에서는 누설된 레이저광선이 클래스 1 이하의 레벨로 유지할 대책(CO₂ 레이저에서는 아크릴이나 유리의 보호벽에 의한 두름 등)

(3) 관리구역의 출입구에 경고 표시판 : 레이저 관리구역 표시, 보호안경 착용 주의, 레이저 경고 라벨(레이저 출력이나 레이저 클래스, 종류 등의 표시), 안전관리자 이름, 관계자 이외의 출입금지 표시

(4) 레이저 작업자의 지명 : 안전관리자가 지명한 작업자만이 조작반의 키 조작 등이 가능

(5) 레이저 작업자는 레이저 발진중에는 보호

안경, 화상 방지장비 등의 안전장비를 착용

(6) 레이저 작업자에 대한 보호대책 : 가공실 또는 보호 울타리(차단판 등)의 설치, 가공중 레이저광선의 확산 등으로부터 작업자를 보호. 가공실 등의 개구시에는 발진 정지(도어 스위치 등)에 의한 한계 보호기구)

이상은 레이저광선의 피폭에 의한 재해 방지대책이지만 기타의 대책은 용접작업과 마찬가지로이다. 이를테면 작업가스에 대한 안전대책(봄베, 집중배관), 가공중에 발생하는 유해물질이나 가스에 대한 배기 대책, 스파크 등에 의한 화상의 대책 등.

일반적으로 CO₂레이저 절단 등의 가공에서는 매우 큰 피가공물이 대상이 되는 수가 많아 안전관리 구역이나 가공실은 커지게 된다. 다행히 원격외선에 대해서는 값이 싼 아크릴수지가 차폐에 효과적이기 때문에 이 들로 만들어지는 것이 많다. 한편, YAG 용접이나 역시머레이저에 의한 가공에서는 대상물이 작은 경우가 많으며, 이들의 차폐판은 작업을 감시할 수 있는 투명한 창 재료는 고가이기 때문에 금속판에 의한 최소한의 필요 가공실을 설치하고 들여다보는 창 부분만 투명 차광판으로 만드는 경우가 많다.

주의 : 용접작업에서는 적절한 차광판을 장착하면 작업자의 눈은 완전하게 보호된다. 그러나 레이저에서 보호안경은 단지 확산광선에 대한 눈의 보호에 불과하다. 보호안경을 착용하여도 강한 레이저광선을 직접 들여다보면 보호안경은 간단히 파손된다. 따라서 레이저 작업에서는 보호안경을 과신해서는 아니된다.

6. 차폐판의 설치위치

앞 절에서는 관리구역이나 가공실에서의 안전대책을 설명하였는데, 구체적으로 레이저로부터 어느 정도 떨어져서 설치하면 좋은지가 중요하다. 근년에는 레이저가공기와 로봇시스템을 조합

한 3차원 레이저가공기도 보급해오고 있다.

그러나 규격이나 통달에서는 단지 클래스 1의 광선으로 감쇠하는 위치로만 규정되어 있기 때문에 현실적으로 어떻게 생각하면 좋을지 판단할 수 없다. 눈에 대한 안전거리는 JIS나 ANSI에서 계산식이 제안되어 있다. 이를테면 레이저 발진 기로부터 충분히 떨어진 거리로서 눈에 장애가 발생하는 거리 r 을 공칭 시각장애거리 r_{NOHD} 라고 하며,

$$r_{NOHD} = \frac{1}{\psi} \sqrt{\frac{1.27P}{MPE}} \quad \text{이다.}$$

여기에서 P는 레이저 파워, ψ 는 발산 각도이다. 이 r_{NOHD} 보다 떨어지면 안전영역이 된다. 그러나 일반적으로 차폐가 없는 경우에는 안전영역

(관리구역)이 크게 되어 비경제적이다. 그래서 차폐판을 두게 되며, 이 거리는 현재 규정된 값이 없다. 따라서 필자 등이 CO₂ 레이저에서 종종 이용되는 아크릴수지의 레이저광에 의한 관통시간을 측정한 것을 표 5에 나타내었다.

표5를 보면 아크릴수지가 데미지를 받기 시작하는 것은 파워밀도가 1W/cm²의 수준으로부터이다. 또한 아크릴수지는 이 이상의 파워밀도에서도 최초로 타기 시작하므로 위험을 조기에 감지하는 것이 가능하다.

이 값은 목표이며, 현실적으로는 케이스 바이 케이스로 관리구역을 설정하는 외에 방법이 없다. 특히 3차원 레이저를 이용하는 경우에는 충분히 주의할 필요가 있다.

표 5. CO₂ 레이저에 의한 아크릴수지 차폐판의 손상속도

파워 P(W) *1		200		500		1000	
초점편차 거리(mm)	판두께 r (mm)	관통시간 ² t(sec)	천공속도 v(mm/s)	관통시간 t(sec)	천공속도 ³ v(mm/s)	관통시간 t(sec)	천공속도 v(mm/s)
100	1	0.71	1.14	0.48	2.08	0.23	4.35
	2	1.47	1.36	0.81	2.47	0.48	4.17
	3	2.13	1.35	1.24	2.42	0.75	4.00
	4	3.15	1.27	1.62	2.47	0.93	4.30
	5	4.53	1.10	2.01	2.48	1.29	3.88
200	1	2.38	0.42	1.33	0.75	0.83	1.20
	2	4.49	0.45	2.31	0.87	1.48	1.35
	3	6.90	0.43	3.49	0.86	2.32	1.29
	4	8.40	0.48	4.20	0.95	2.71	1.48
	5	11.48	0.43	5.38	0.93	3.39	1.47
300	1	4.91	0.20	2.44	0.41	1.67	0.60
	2	8.74	0.23	4.38	0.46	3.05	0.66
	3	13.76	0.22	6.07	0.49	4.65	0.65
	4	18.52	0.22	8.00	0.50	5.97	0.67
	5	25.51	0.20	10.18	0.49	7.33	0.68

*1 : 빔은 싱글모드

*2 : 관통시간은 3회 측정의 평균치

*3 : 천공속도=판 두께/관통시간