

[별지 15] 레이저 장치 사양서(제47조 관련)

레이저 장치 사양서

1. 장치 구성 정보

행사명/시설명	페이지 : (총 면수) - (해당 면수)	작성일자
장치 구성 개요		

2. 광선의 특성 및 계산(운용모드만 체크하고 해당 칼럼만 기재하십시오)

운용모드	<input type="checkbox"/> 단일 펄스	<input type="checkbox"/> 연속파	<input type="checkbox"/> 반복 펄스
레이저 유형(레이저 매질)			
출력(W)	(해당없음)	최대 출력	평균 출력
펄스 에너지(J)		(해당없음)	
펄스 폭(초)		(해당없음)	
펄스 반복주기(Hz)	(해당없음)	(해당없음)	
광선 지름(1/e 지점)	cm	cm	cm
광선 발산(1/e 지점의 전체각도)			
파장(나노미터)			
최대 허용노광량(MPE) 계산(NOHD계산용)			
MPE (W/cm ²)	(해당없음)		
펄스당 MPE (J/cm ²)		(해당없음)	
시각영향 계산(가시 레이저에 대한 민감구역노출거리(SZED), 위험구역 노출거리(CZED), 민감구역 노출거리(LFED) 계산용)			
보정전 출력(PCP) 와트(W)	펄스 에너지(J)×4	최대 출력	평균 출력 또는 펄스 에너지(J) × PRF(Hz)
시각보정계수(VCF) 1.0을 기입 또는 표 5이용			
시각보정출력(VCP) PCP × VCF			

3. 광선 방향

방위각(도) <input type="checkbox"/> 진북 <input type="checkbox"/> 자북	자기편차(도)	
최소 수직각(도, 수평인경우는 0)	최대 수직각(도)	

4. 거리 계산

(NOHD용 3개 항목을 모두 기입, 가시레이저의 경우 SZED, CZED, LFED용 3개 항목을 기입)

	사선거리(ft)	수평 거리(ft)	수직 거리(ft)
공칭안장해거리(NOHD)			
NOHD (MPE 기준)			
시각영향거리 가시범위(400~700nm)에 해당하는 파장이 없는 레이저의 경우, 아래 란에 "N/A(불가시 레이저)"를 기입 가시레이저의 경우, 계산된 시각영향거리가 NOHD보다 짧다면 "NOHD보다 짧음"이라고 기입.			
민감구역노출거리(SZED) (100 μW/cm ² 수준)			
위험구역노출거리(CZED) (5 μW/cm ² 수준)			
제한구역노출거리(LFED) (50 nW/cm ² 수준)			

5 계산 방식

<input type="checkbox"/> 상업소프트웨어(제품명을 기입)	<input type="checkbox"/> 기타(방식을 기입. 예) 스프레드시트, 계산기 등)
---	---

레이저 장치 사양서 작성요령

단일한 옥외 운용의 경우에도 레이저 또는 “레이저 장치 구성”(출력설정, 펄스모드, 발산 등)의 수량은 많을 수가 있다. 옥외 레이저운용 신청서의 첨부항목의 첫 번째 열에 옥외 운용을 위한 레이저 장치구성 수량을 기입하여야 하며 레이저 장치구성 사양서에 분석할 각 장치의 구성에 대한 사항을 기입한다.

(대체분석) 레이저 장치 사양서 및 첨부된 표들은 레이저 장치구성에 관한 광범위한 사항을 다루어야 한다. 일부 레이저 장치 구성은 보다 복잡한 분석을 필요로 할 수 있다. 따라서 어떠한 대체분석이라도 수립된 방법을 기초로 하여 수행되어야 하며, 사용된 방식과 계산을 기록하여야 한다.(ICAO Doc. 9815 참조)

1. 장치구성 정보

(장치구성 개요) 광선의 투사 및 지향 시스템에 대하여 기술한다. 현장 배치에 관한 설명을 포함시켜야 하며 공간이 부족할 경우 추가정보를 별지로 첨부시켜야 한다.

2. 광선의 특성 및 계산

본 항목에는 레이저광선의 특성에 관한 자료를 기입하여야 한다. 이와 같은 특성에 관한 자료는 직접적인 측정, 제작사 규격 또는 전문 장비로부터 획득할 수 있다. 또한 자료를 합리적이고 개략적인 가설(예를 들어 특정 값은 광선을 실제보다 더 위험하게 만든다)로부터 자료를 도출할 수 있다. 모든 자료는 안전에 중점을 두어야 한다. 자료의 정확성 준수여부를 결정하기가 곤란한 경우에는 측정기술, 자료출처 및 가설에 관한 추가자료를 제시하여야 한다.

(운용모드) 해당 장치구성에 대한 운용모드(단일 펄스, 연속파 또는 반복 펄스)를 결정한다. 적절한 란에 체크를 한다. 광선의 특성 및 계산 란의 나머지 부분에만 기입한다.

- (단일 펄스) 펄스폭 0.25초 미만 또는 펄스반복주파수가 1 Hz 미만인 단일 에너지 펄스를 생산하는 레이저
- (연속파) 0.25초 이상의 연속파(비펄스)를 생산하는 레이저
- (반복 펄스) : 1 Hz 또는 더 빠른 주파수로 순환에너지 펄스를 생산하는 레이저

(주) “반복 펄스” 대 주사(scanning) : “반복 펄스”는 Q스위치 레이저와 같이 자연적으로 반복펄스를 방출하는 레이저이다. 본 설명서 및 표는 뷰어 또는 항공기를 통해 주사되는 광선(레이저 디스플레이에 사용되는 그래픽 또는 광선패턴, LIDAR를 위해 사용되는 주사 패턴 등)으로 인하여 펄스 분석용으로 고안된 것은 아니다. 주사에 의해 발생하는 펄스는 펄스 폭 및 지속시간이 매우 가변적이다. 따라서 개략적인 분석을 위해서는 광선이 고정방식(비 주사방식)이라고 가정한다. 따라서 주사방식을 적용하기 위해서는 다음을 필수적으로 준수하여야 한다.

- 1) 방식 및 계산식을 기록한 문서 제공 및 좀 더 포괄적으로 분석
- 2) 주사 실패(scan-failure) 보호장치의 사용 및 문서화

(레이저 유형) "아르곤(Argon)", "네오디뮴:야그(Nd:YAG)", "구리-증기(Copper -vapour)", 이산화탄소 등과 같은 레이저 매질을 기입한다.

(출력) 연속파 레이저(둘째 칸)인 경우, 출력을 와트로 기입한다. 반복 펄스 레이저(세째 칸)인

경우에는 평균출력을 와트[펄스당 에너지(J) × 펄스반복주파수(Hz)]로 기입한다. 출력방식이 두가지 모두인 경우는 운용시 공역에 방사되는 최대출력을 기입한다.

(주) 간편성 및 안전을 위하여 레이저의 최대출력인 최고값을 기입할 수 있다. 광선이 공역에 방사되기 전에 광선 경로에서 발생하는 광학요소내의 추가적인 손실은 무시한다.

(펄스 에너지 및 펄스 폭) 단일 펄스 레이저(첫째 칸) 또는 반복 펄스 레이저(세째 칸)인 경우, 펄스 에너지를 줄(J)로 기입하고 펄스 폭은 초로 기입한다. 이는 공역에 방사되는 최대출력을 말한다. 간편성 및 안전을 위하여 레이저의 최대출력인 최고값을 기입할 수 있다. 이 경우 광선이 공역에 방사되기 전에 광선 경로에서 발생하는 광학요소내의 추가적인 손실은 무시한다.

(광선 지름) 1/e 최고 노광점을 이용하여 광선 지름을 기입한다.

(주) 지름은 흔히 밀리미터로 표현되지만 본 설명서에는 반드시 센티미터로 기입하여야 한다.

(광선 발산) 광선 발산은 1/e 광점에서의 최대 각을 의미한다. 1/e²광점에서 측정된 지름 또는 발산의 알고 있을 경우 0.707을 곱하여 1/e 지름 또는 발산으로 환산한다.

(주) 지름 및 발산측정은 복잡할 수 있으므로 안전을 위해 단순화된 가설을 이용할 수 있다. 광선 발산을 실제 발산보다 작다고 가정하는 것이 보다 더 안전하다.

예를 들면, 광선이 레이저로부터 레이저 공역 프로젝터를 통과할 때, 발산은 통상적으로 증가한다. 개략적(보다 안전하게)으로 프로젝터를 통과하기 전의 레이저의 광선 발산을 적용한다. 이와 같은 방법을 사용하면 광선이 실제보다 강력(그러므로 더 위험하다)하다는 것을 가정할 수 있게 한다.

(파장) 공역에 방사되는 레이저광의 파장을 기입한다. 만약 레이저가 복수의 파장을 방출한다면, 최대허용노광량(MPE) 및 공칭안장해거리(NOHD)를 계산하기 위해 각 파장을 개별적으로 분석하여야 한다. 또한 가시파장을 방출하는 레이저의 경우, 각 시각영향거리(LSFZ, LCFZ, LFFZ)에 상응하는 SZED, CZED, LFED)를 계산하기 위하여 각 파장을 개별적으로 분석할 수 있다. 이와 같은 처리과정은 시각영향거리(Visual Effect Distance) 부문에 보다 상세히 설명되어 있다. 모든 복수 파장 레이저에 관한 모든 경우에 방식과 계산을 기록하여야 한다. 모든 파장을 완전히 분석하지 않을 경우, 단순화되고 개략적인 가설을 명확히 기술하여야 한다.

※ 최대 허용노광량(MPE) 계산

(MPE 및 펄스당 MPE) 최대허용노광량(MPE) 계산결과를 해당 칸에 제시하여야 한다. 이 값은 추후 공칭안장해거리(NOHD)를 결정하는데 이용될 것이다. MPE를 산출하는 가장 간편한 방법은 표 1~4를 사용하는 것이다. 이 표들은 단순하고 개략적인 방식을 제시하고 있다. 만약 보다 덜 개략적인 수준을 필요로 한다면 미국가표준연구소(ANSI) Z136 표준 시리즈 또는 기타 수립된 방식을 이용할 수 있다. 방식 및 계산을 기록하여야 한다.

- **(단일 펄스(첫째 칸))** MPE를 산출하기 위해 표 1을 참조한다. “단일 펄스”칸의 “펄스당 MPE”란에 기입한다.
- **(연속파(둘째 칸))** MPE를 산출하기 위해 표 2를 참조한다. “연속파”칸의 “MPE”란에 기입한다.

- **(반복 펄스(세째 칸))** 순환 에너지 펄스를 생산하는 레이저는 단일 펄스 또는 연속파 레이저보다 더 위험한 추가적인 장애를 발생시킬 수 있다. MPE는 펄스반복주파수에 기초한 반복 펄스 레이저용으로 조정된다. 조정된 MPE는 MPE_{PRF} 로 나타낸다. MPE_{PRF} 는 펄스당 에너지 또는 평균출력을 이용하여 결정할 수 있다. 이 식은 가시 구역 및 적외선 구역내의 파장을 지닌 평균출력에 대한 MPE_{PRF} 계산을 위한 간략한 방법을 제시하고 있다. (ANSI Z136 시리즈는 보다 덜 개략적인 값을 제시할 수 있다) 비록 MPE_{PRF} 가 지정됐다 하더라도 반복펄스 칸의 “MPE” 또는 “펄스당 MPE”에 값을 기입한다. 다음은 각각의 경우에 MPE_{PRF} 값을 결정하는 단순화된 방식이다.

- ① (자외선 파장) 미국가표준연구소 ANSI Z136시리즈를 참조
- ② (가시 파장) MPE_{PRF} 를 산출하기 위해 표 3을 참조. 표3의 결과값에는 CW MPE요소에 대한 보정계수가 이미 적용되어 있음. 반복펄스 칸의 “MPE” 칸에 기입한다.
- ③ (적외 파장)
 - a) CW MPE값을 산출하기 위해 표 2를 사용
 - b) 적외펄스반복 보정계수를 산출하기 위해 표 4를 사용
 - c) MPE_{PRF} 를 산출하기 위해 적외선 펄스반복 보정계수에 CW MPE값을 곱한다. 반복 펄스 칸의 “MPE”칸에 기입한다.

(주) 반복 펄스 레이저 : 표2~표4까지의 단순화 방식은 W/cm^2 단위의 MPE값을 결정하기 위해 평균출력을 사용한다. J/cm^2 단위의 펄스당 MPE를 결정하기 위해 펄스에너지를 이용하는 다른 방식도 가능하다. 이와 같은 MPE를 산출하는 두 계산식중 하나만을 적용한다.

시각영향 계산(가시 레이저의 경우)

만약 레이저가 가시범위(400~700 nm)내의 파장이 없을 경우, 해당 칸에 “해당없음-비가시 레이저”라 기입한 후 다음 칸(광선방향칸)으로 넘어간다.

가시 레이저의 경우, 관계당국은 눈에 안전하지만(MPE 미만의) 승무원들의 주의를 흐트러뜨릴 만큼 밝은 광선을 염두에 둔다. ICAO 권고(부속서 14, 제2권 - 비행장 설계 및 운영 5.3.1.2항)에 따라 관계당국은 항공기에 대한 노광량이 각각 $100 \mu W/cm^2$, $5 \mu W/cm^2$, $50 \mu W/Wcm^2$ 를 초과하지 않는 레이저광선 민감, 레이저광선 위험, 레이저광선 제한비행구역을 설정하여야 한다. 명료한 밝기는 파장에 따라 다르기 때문에(녹색이 적색 또는 청색보다 더 가시적임) 필요시, 가시 보정계수를 적용할 수 있다. 이는 녹색 광선보다 적색 또는 청색광선에 보다 많은 출력을 허용하는 효과가 있다. 모든 가시레이저에 대하여 시각영향결과를 제출하여야 한다.

(보정전 출력(Pre-Corrected Power)) 보정전 출력은 시각보정계수를 적용하기 전의 출력이다. 보정 전 출력을 결정하는 방법은 사용하는 레이저의 유형에 달려 있다.

- **(단일 펄스(첫째 칸))** 펄스 에너지(J)에 4를 곱하여 해당칸에 기입한다.

(주) 이와 같은 방법은 최대펄스지속시간 0.25초 이상의 펄스에너지를 평균화 한 것이며 펄스의 시각영향에 대한 개략적인 추정값이다. 만약 보다 덜 개략적인 계산을 사용할 경우에는 그 방식과 계산을 기록하여야 한다.

- **(연속파 (둘째 칸))** 보정전 출력은 레이저의 최대출력값과 동일하다. 해당 설명서의 출력 (W) 칸에 기입했던 값과 동일한 값을 기입한다.

- **(반복 펄스(셋째 칸))**

- ① 설명서의 출력(W)칸에 기입했을 경우 그와 동일한 값을 기입한다.

- ② 설명서의 펄스 에너지(J)란에 기입했을 경우 평균출력을 결정하기 위하여 해당 값에 펄스 반복주파수(Hz)를 곱한다.

(시각보정계수(VCF) 및 시각보정출력(VCP)) 시각보정계수는 파장에 따라 다양해지는 광선의 겉보기 밝기(apparent brightness)를 고려한다. 일단 시각보정계수를 구한 후 시각보정출력을 구한다. 원하는 정확도에 따라 방식을 선택할 수 있다.

- ① (단일 또는 복수 파장 광선에 대한 가장 단순하고, 가장 개략적인 분석) 보정계수가 전혀 없고 레이저가 최대 겉보기밝기(VCF 1.0)를 가진다고 가정한다. 설명서의 시각보정계수란에 시각보정계수를 “1.0(추정)”이라고 기입한다. 시각보정출력란에는 보정전 출력과 동일한 값을 기입한다.
- ② **단일 파장 광선** : 시각보정계수를 구하기 위해 표 5를 이용한다. 시각보정출력을 구하기 위해서는 시각보정계수에 보정전 출력을 곱한다. (표 5, 예 1에 계산 예제가 제시되어 있음)
- ③ **복수 파장 광선** : 다음 방식중의 하나를 선택한다.
 - a) 단순하고, 개략적인 가설 수립 : 표 5를 이용하여 가장 큰 시각보정계수를 가지는 파장을 (가장 가시적인)를 결정한다. 해당 설명서의 시각보정계수란에 이를 기입한다. 시각보정출력을 구하기 위해서는 시각보정계수에 레이저 보정전 출력(모든 파장)을 곱한다. *주-시각보정출력을 산출한 데이터와 계산을 첨부하여야 한다.*
 - b) 각 파장에 대한 개별적인 분석과 분석값의 합산 : 첫번째로 각 파장의 보정전 출력을 구한다. 두 번째로 표 5를 이용하여 각 파장별 시각보정계수를 구한다. 각 파장의 보정전 출력을 각 시각보정계수로 곱하여 각 파장에 대한 시각보정출력(VCP)를 구한다. 모든 VCP를 합산하여 총 VCP를 구한다. 총 VCP를 해당 설명서의 “시각보정계수”란에 기입한다.(표 5, 예제 2에 계산예제가 제시되어 있음). *주-시각보정출력을 산출한 데이터와 계산을 첨부하여야 한다.*

3. 광선 방향

해당 장치 구성에 대한 광선투사 지시방향을 제시한다.

방위각 : 만약 광선이 운용중에 수평으로 이동하는 경우에는 방위각란에 이동범위(예: 20~50도)를 기입한다. 이동범위는 시계방향으로 제시하여야 한다. 그렇지 않을 경우 데이터는 의도하지 않은 방위를 향하는 것으로 해석되게 된다. 방위각이 진방위 또는 자방위를 기준으로 한 값인지를 설명한다.

자기편차 : 알려져 있을 경우 해당 위치에 대한 자기편차값을 기입한다.(이는 방위각을 “자방위”로 표시하거나 통제방식의 일환으로써 나침반을 이용하는 경우 반드시 기입하여야 한다)

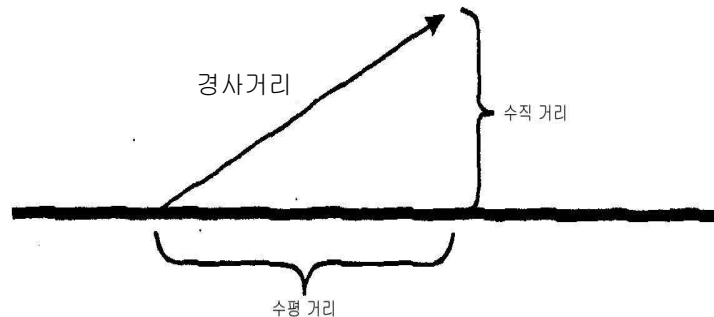
특정 장치구성의 경우 광선 방향에 대해 추가정보가 필요할 수도 있다.(예를 들면 신청서에 기재된 지리적 위치상에서 광범위하게 분산된 레이저 또는 이동하며 아래쪽으로 투사되는 항공기나 우주선에서 사용하는 레이저) 만약 추가 정보가 관계당국이 신청서를 평가하는데 유용할 경우에는 해당 신청서에 이와 같은 정보를 첨부한다.

4. 데이터로부터 산출한 거리

다음의 4가지 거리는 옥외운영의 안전성을 평가하는 데 매우 중요한 요소이다. 간단한 정의는 다음과 같다.

- (공칭안장해거리(Nominal Ocular Hazard Distance:NOHD)) 레이저 광원으로부터 특정 거리까지 광선이 눈에 장애가 됨(MPE를 초과함)
- (민감지역노출거리(Sensitive Zone Exposure Distance:SZED) 레이저 광원으로부터 특정거리까지 광선이 일시적 시각장애를 유발시킬 만큼 충분히 밝음. 이 거리를 초과하면 광선은 $100 \mu W/cm^2$ 이하임
- (위험지역노출거리(Critical Zone Exposure Distance:CZED)) 레이저 광원으로부터 특정 거리까지의 광선이 중요한 임무수행을 방해할 정도로 주의력분산을 유발할 만큼 충분히 밝음. 이 거리를 초과하면 광선은 $5 \mu W/cm^2$ 이하임
- (제한지역노출거리(Laser-Free Exposure Distance:LFED)) 이 거리를 초과하면 광선은 $50 nW/cm^2$ 이하임. 주의력분산을 일으킨다고 할 수 없을 만큼 희미함.

이와 같은 각 거리에 대하여 지상거리(수평거리) 및 고도(수직거리)뿐만 아니라 광선을 직접적으로 따라가는 거리(경사거리)를 인지하는 것이 매우 중요하다. 다음 도표는 이와 같은 세가지 거리를 나타내고 있다.



※ 공칭안장해거리(NOHD)

(공칭안장해거리(NOHD) 경사거리) 펄스에너지 및 MPE_{PRF} 를 계산하였다면 단일펄스 또는 반복 펄스에 대한 방정식 6.1을 사용한다. 평균출력 및 MPE를 계산하였다면 연속파 또는 반복 펄스에 대한 방정식 6.2를 사용한다.

(방정식 6.1)

$$SR_{NOHD} = \sqrt{\frac{1366 \times Q}{\phi^2 \times MPE_H}}$$

SR_{NOHD} = 피트단위의 공칭안장해거리(NOHD) 사선거리

Q = 펄스 에너지(J)

ϕ = 광선 발산(mrad)

MPE_H = J/cm² 단위의 펄스당 MPE

1366 = 센티미터를 피트로 라디안을 밀리라디안으로 변환시 사용되는 환산계수

(방정식 6.2)

$$SR_{NOHD} = \sqrt{\frac{1366 \times \Phi}{\phi^2 \times MPE_E}}$$

SR_{NOHD} = 피트단위의 공칭안장해거리(NOHD) 사선거리

ϕ = 광선 발산(mrad)

$$\Phi = \text{출력(W)}$$

$$MPE_E = W/cm^2 \text{ 단위의 MPE}$$

1366 = 센티미터를 피트로 라디안을 밀리라디안으로 변환시 사용되는 환산계수

(예제) 40 와트의 연속파(CW) 레이저가 1.5 밀리라디안의 광선 발산을 가질 경우

$$\phi = 1.5 \text{ mrad}$$

$$\Phi = 40 \text{ W}$$

$$MPE_E = 0.00254 \text{ (표 2로부터 } 2.54 \text{ mW/cm}^2\text{)}$$

방정식 6.2를 적용하면

$$SR_{NOHD} = \sqrt{\frac{1366 \times 40}{1.5^2 \times 0.00254}} = \sqrt{\frac{54640}{0.005713}} = \sqrt{956084} = 3092 \text{ ft}$$

(공칭안장해거리(NOHD) 수평거리) 지면에 대한 수평거리이다. 수평거리는 최소 수직각 (Minimum Elevation Angle)을 사용하며 다음과 같은 방정식을 사용하여 수평거리를 계산한다.

$$HD = SR_{NOHD} \times \cos(\text{최소수직각})$$

HD = 수평 지면거리, 단위는 경사거리와 동일, 만일 경사거리(SR)가 피트단위이면 수평거리도 피트단위이어야 한다.

$$SR_{NOHD} = \text{공칭안장해거리(NOHD) 사선거리}$$

최소고도각 = “최소고도각”란에 기입된 값

(예제) 공칭안장해거리 경사거리가 1000피트이고 광선이 지면으로부터 30도의 각도를 유지할 경우 수평 지면거리는 $1000 \times \cos(30)$ 또는 866피트이다.

(공칭안장해거리(NOHD) 수직거리) 지면으로부터 수직상방거리이다. 수직거리는 최대고도각 (Maximum Elevation Angle)을 사용하며 다음과 같은 방정식을 사용하여 수직거리를 계산한다.

$$VD = SR_{NOHD} \times \sin(\text{최대수직각})$$

VD = 수직거리(고도), 단위는 경사거리와 동일, 만일 경사거리(SR)가 피트단위이면 수평거리도 피트단위이어야 한다.

$$SR_{NOHD} = \text{공칭안장해거리(NOHD) 사선거리}$$

최대고도각 = “최대수직각”란에 기입된 값

(예제) 공칭안장해거리 경사거리가 1000피트이고 광선이 지면으로부터 30도의 각도를 유지할 경우 수직거리(고도)는 $1000 \times \sin(30)$ 또는 500피트이다.

(시각영향거리(Visual Effect Distances))

하나 이상의 레이저 파장이 가시적(400~700 nm이내)인 경우에만 기입한다.

- 불가시 레이저의 경우, 모든 SZED, CZED, LFED란에 “해당없음-불가시 레이저”라고 기입한다.
- 가시 레이저의 경우, 아래와 같이 SZED, CZED, LFED 계산을 수행한다.

(중요) 일부 가시펄스 레이저의 경우, SZED, CZED, LFED가 공칭안장해거리보다 작게(짧은 거리) 계산될 수도 있다. 이러한 경우는 안전상의 이유로 해당란에 거리값을 기입해서는 아니 된다. 대신에 반드시 “공칭안장해거리보다 짧음”이라고 기입하여야 한다. 이는 공칭안장해거리(눈 손상거리)가 안전거리 및 보호공역을 계산하는데 있어서 가장 중요하기 때문이다.

(민감지역노출거리(SZED) 경사거리) 다음 방정식을 사용한다.

(방정식 6.3)

$$SR_{SZED} = \frac{3700}{\phi} \times \sqrt{\Phi_{VCP}}$$

SR_{SZED} = SZED 경사 거리

ϕ = 광선 발산(mrad)

Φ_{VCP} = 시각보정출력(설명서의 해당란에 기입된 값)

3700 = 센티미터를 피트로 라디안을 밀리라디안으로 변환시 사용되는 환산계수

(민감지역노출거리(SZED) 수평거리) 아래 방정식을 이용하여 계산한다. 세부적인 계산방식은 공칭안장해거리 수평거리 계산식을 참조한다.

$$HD = SR_{SZED} \times \cos(\text{최소수직각})$$

(민감지역노출거리(SZED) 수직거리) 아래 방정식을 이용하여 계산한다. 세부적인 계산방식은 공칭안장해거리 수직거리 계산식을 참조한다.

$$VD = SR_{SZED} \times \sin(\text{최대수직각})$$

(위험지역노출거리(CZED) 경사거리, 수평거리 및 수직거리) 위의 SZED값에 4.5를 곱한 값

(예제) SZED경사거리가 5,000피트이고 수평거리(HD)가 866피트, 수직거리(VD)가 500피트일 경우, CZED경사거리는 22,500피트, 수평거리(HD)는 3,897피트, 수직거리(VD)는 2,250피트이다.

(제한구역노출거리(LFED) 경사 거리, 수평거리 및 수직거리) 위의 SZED값에 45를 곱한 값

5. 계산 방식

계산을 수행한 방법을 기입한다.

(방정식 출처) 본 방정식은 ANSI Z136.1로부터 인용한 것이며 다음과 같은 방법을 사용하여 보다 간결한 형태로 재표현하였다.

첫 번째 ANSI 소수자리를 $1/\phi$ 대신에 $1000/\phi$ 로 만들어, 광선 발산(ϕ)을 밀리라디안으로 기입한다. 0.5승으로 제공하는 대신에 근호(제곱근 수)를 이용한다. 제곱근으로 표시할 경우 $4/\pi$ 는 1.27까지 줄어드는 반면, 전체적인 경사거리까지 미치는 영향이 작기 때문에 광선 지름(a^2)은 사용하지 않는다. ANSI값은 cm^2 로 결과가 나타나고 피트로 환산할 때 0.0328의 환산계수를 사용한다.(1 $\text{cm} = 0.0328$ ft). 여기에는 2가지 상수가 있는데 피트로 된 결과값을 산출하기 위한 1,000(밀리라디안의 분수로부터)과 0.0328로서 곱하여 단일 상수 32.8로 된다. cm^2 로 된 결과값에는 1,000을 상수로 사용하고 m로 된 결과값은 "10"을 상수로 사용한다.

(주) 이전에 계산된 SZED로부터 CZED와 LFED을 산출하기 위해 상수를 사용할 수 있다는 가설은 대기 감쇠(atmospheric attenuation)을 무시할 경우에만 유효한 가설이다. 안전 요소에 관한 대기 감쇠를 고려할 필요가 있을 때는 반드시 3가지 시각영향거리를 독립적으로 계산하는 상세한 분석방법을 사용하여야 한다.

표 1. 단일 펄스 선택 최대허용노광량(MPE) 한계

파장(nm)	노출지속시간(초)	MPE(J/cm²)
자외선		
180~400	$10^{-9} \sim 10$	참조 미국가표준연구소(ANSI) Z136시리즈
가시광선		
400~700	$< 10^{-9}$ $10^{-9} \sim 18 \times 10^{-9}$ $18 \times 10^{-6} \sim 10$ 0.25	참조 ANSI Z136시리즈 0.5×10^{-6} $0.5 \times t^{0.75} \times 10^{-3}$ 0.64×10^{-3}
적외선		
700 ~1,050	$< 10^{-9}$ $10^{-9} \sim 18 \times 10^{-6}$ $18 \times 10^{-6} \sim 10$ 0.25 10	참조 ANSI Z136시리즈 $0.5 \times C_A \times 10^{-6}$ $1.8 \times C_A \times t^{0.75} \times 10^{-3}$ $0.64 \times C_A \times 10^{-3}$ $10 \times C_A \times 10^{-3}$
1,050 ~1,400	$< 10^{-9}$ $10^{-9} \sim 50 \times 10^{-6}$ $50 \times 10^{-6} \sim 10$ 10	참조 ANSI Z136시리즈 $5.0 \times C_C \times 10^{-6}$ $9 \times C_C \times t^{0.75} \times 10^{-3}$ $50 \times C_C \times 10^{-3}$
1,400 ~1,500	$< 10^{-9}$ $10^{-9} \sim 10^{-3}$ $10^{-3} \sim 10$ 10	참조 ANSI Z136시리즈 0.1 $0.56 \times t^{0.25}$ 1.0
1,500 ~1,800	$< 10^{-9}$ $10^{-9} \sim 10$ 10	참조 ANSI Z136시리즈 1.0 1.0
1,800 ~2,600	$< 10^{-9}$ $10^{-9} \sim 10^{-3}$ $10^{-3} \sim 10$ 10	참조 ANSI Z136시리즈 0.1 $0.56 \times t^{0.25}$ 1.0
2,600 ~10,000	$< 10^{-9}$ $10^{-9} \sim 10^{-7}$ $10^{-9} \sim 10$ 10	참조 ANSI Z136시리즈 10×10^{-3} $0.56 \times t^{0.25}$ 1.0

C_A 값 산출방법:

파장이 700 ~1,050 nm 인 경우 $C_A = 10^{0.002(\text{파장}-700)}$

예1 : 레이저파장이 850nm인 경우 $C_A = 10^{0.002(850-700)} = 10^{0.002*150} = 10^{0.3} = 1.995$

예2 : 레이저파장이 933nm인 경우 $C_A = 10^{0.002(933-700)} = 10^{0.002*233} = 10^{0.466} = 2.924$

C_C 값 산출방법 :

파장이 1,050~1,150 nm인 경우 $C_C = 1.0$

파장이 1,150~1,200 nm인 경우 $C_C = 10^{0.018(\text{파장}-1150)}$

예3 : 레이저파장이 1175 nm일 경우 1,200 ~ 1,400 nm이면, $C_C = 8.0$

t 값 산출방법 : "t"는 초로 표시되는 펄스지속시간임.

표 2. 연속파(CW) 모드 최대허용노광량(MPE) 한계
의도적이지 아닌 주시의 경우

파장(nm)	MPE(W/cm ²)
자외선	
180~400	참조 미국가표준연구소(ANSI) Z136시리즈
가시광선	
400~700	2.54×10^{-3}
적외선	
700 ~ 1,050	$(10^{0.002(\text{파장}-700)})(1.01 \times 10^{-3})$
1,050 ~ 1,150	5×10^{-3}
1,150 ~ 1,200	$(10^{0.018(\text{파장}-1150)})(5 \times 10^{-3})$
1,200 ~ 1,400	4.0×10^{-2}
1,400 ~ 10,000	0.1

예제 1 : 레이저 파장이 가시적인 경우, MPE = 0.00254 W/cm²

예제 2 : 레이저 파장이 850nm일 경우

$$\begin{aligned} \text{MPE} &= (10^{0.002(850-700)})(1.01 \times 10^{-3}) = (10^{0.002 \times 150})(0.00101) = (10^{0.3}) \times (0.00101) \\ &= 1.995 \times 0.00101 = 0.002 \text{ W/cm}^2 \end{aligned}$$

예제 3: 레이저 파장이 1175nm일 경우

$$\begin{aligned} \text{MPE} &= (10^{0.018(1175-1150)})(5 \times 10^{-3}) = (10^{0.018 \times 25})(0.005) = (10^{0.45}) \times (0.005) \\ &= 2.818 \times 0.005 = 0.01409 \text{ W/cm}^2 \end{aligned}$$

“비의도적 관측” 연속파(CW) 노출에 대한 비의도적인 관측에 사용되는 노출지속시간은 가시용레이저의 경우 0.25초 또는 그보다 짧고 적외선 레이저의 경우 10초 또는 그보다 짧다. (가시광선의 경우 0.25초 이내에 사람이 눈을 깜빡이거나 빛을 피해 시선을 옮긴다고 가정한다. 적외선의 경우 정상적인 신체운동으로 인하여 레이저가 10초이상 동일한 지점에 머무르지 않는다고 가정한다.

출처 : 연속파(CW) 노출은 ANSI Z136.1 <표 5> 참조

표 3. 최대 허용노광량 - 가시레이저 관련 펄스 반복주파수(MPE_{PRF}) 한계

펄스 반복 주파수(Hz)	MPE_{PRF} (W/cm ²)	펄스 반복 주파수(Hz)	MPE_{PRF} (W/cm ²)	펄스 반복 주파수(Hz)	MPE_{PRF} (W/cm ²)
1	7.07×10^{-07}	30	9.06×10^{-06}	5,000	4.20×10^{-04}
2	1.19×10^{-06}	40	1.12×10^{-05}	10,000	7.07×10^{-04}
3	1.61×10^{-06}	50	1.33×10^{-05}	15,000	9.58×10^{-04}
4	2.00×10^{-06}	75	1.80×10^{-05}	20,000	1.19×10^{-03}
5	2.36×10^{-06}	100	2.24×10^{-05}	25,000	1.41×10^{-03}
6	2.71×10^{-06}	150	3.03×10^{-05}	30,000	1.61×10^{-03}
7	3.04×10^{-06}	200	3.76×10^{-05}	40,000	2.00×10^{-03}
8	3.36×10^{-06}	250	4.45×10^{-05}	50,000	2.36×10^{-03}
9	3.67×10^{-06}	500	7.48×10^{-05}	55,000	2.54×10^{-03}
10	3.98×10^{-06}	1,000	1.26×10^{-04}	100,000	2.54×10^{-03}
15	5.39×10^{-06}	1,500	1.70×10^{-04}		
20	6.69×10^{-06}	2,000	2.11×10^{-04}		
25	7.91×10^{-06}	2,500	2.50×10^{-04}		

만약 레이저의 펄스반복주파수가 두개의 표사이의 값에 해당되면 두개의 MPE_{PRF} 결과값중에서 더 개략적인(값이 적은) 값을 사용한다.

(주) MPE_{PRF} 에 대한 위의 표는 1 ns ~ 18 μs 사이의 펄스폭을 지닌 반복펄스레이저를 기준으로 하고 있다. 이와 같은 MPE_{PRF} 값들은 보다 큰 펄스폭을 추정하기 위해서 사용될 수 있으며 개략적인(안전한) 결과를 제시할 것이다.

주사(Scanning) 분석용이 아님: 본 표는 Q스위치 레이저와 같이 자연적으로 반복펄스를 방출하는 레이저용으로 고안된 것이다. 뷰어 또는 항공기에서 빠르게 광선을 이동시킴으로써 발생하는 “주사식” 펄스(레이저 디스플레이에 사용되는 그래픽 또는 광선패턴, 대기 분석에 사용되는 주사 패턴 등)의 분석을 위하여 고안된 것은 아니다. 주사에서 발생하는 펄스는 종종 펄스폭 및 지속시간이 매우 다양하므로 보다 엄격한 분석이 요구된다.

표 4. 반복 펄스 적외선 레이저용 보정 계수(MPE_{pulsed} / MPE_{CW})

1 μ s~18 μ s 펄스폭을 가지는 반복펄스 적외선(700~1400nm) 레이저광선의 MPE_{PRF} 를 구하기 위해 사용함.

펄스반복주파수 (Hz)	보정계수	
	파장 700~1,050 nm용	파장 1,050~1,400 nm용
1	2.8×10^{-4}	5.5×10^{-4}
5	9.4×10^{-4}	1.8×10^{-4}
10	1.6×10^{-3}	3.1×10^{-3}
15	2.1×10^{-3}	4.2×10^{-3}
20	2.6×10^{-3}	5.2×10^{-3}
25	3.1×10^{-3}	6.2×10^{-3}
50	5.3×10^{-3}	1.0×10^{-3}
75	7.1×10^{-3}	1.4×10^{-3}
100	9.0×10^{-3}	1.7×10^{-3}
150	1.2×10^{-2}	2.4×10^{-2}
200	1.5×10^{-2}	2.8×10^{-2}
250	1.8×10^{-2}	3.5×10^{-2}
500	3.0×10^{-2}	5.9×10^{-2}
1,000	5.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}
2,000	8.2×10^{-2}	1.7×10^{-2}
3,000	1.1×10^{-1}	2.3×10^{-1}
4,000	1.4×10^{-1}	2.8×10^{-1}
5,000	1.7×10^{-1}	3.3×10^{-1}
10,000	2.8×10^{-1}	5.6×10^{-1}
15,000	3.8×10^{-1}	7.3×10^{-1}
20,000	4.7×10^{-1}	9.3×10^{-1}
21,000	4.8×10^{-1}	9.7×10^{-1}
22,000	5.0×10^{-1}	1.00*
23,000	5.2×10^{-1}	1.00
24,000	5.4×10^{-1}	1.00
25,000	5.5×10^{-1}	1.00
30,000	6.3×10^{-1}	1.00
40,000	7.9×10^{-1}	1.00
50,000	9.3×10^{-1}	1.00
55,000	1.00*	1.00

※ 파장 700 ~1050 nm에 55,000 Hz(또는 파장 1,050~1,400nm용 22,000 Hz)보다 큰(빠른) PRF값에서 운영되는 레이저의 MPE값은 연속파 레이저와 동일하며 따라서 보정계수는 1이다. 반복펄스레이저에 대한 MPE값을 구하기 위해 본 표에서 CW 모드 MPE값에 보정계수를 곱한다. 만약 레이저의 반복주파수가 두개의 표사이의 값에 해당될 경우 두개의 보정계수 결과값중에서 더 개략적인(값이 적은) 값을 사용한다.

예제 : 12,000 Hz의 펄스반복주파수(PRF)로 운영되는 레이저는 850nm의 적외선을 방출한다. 첫째로 <표 2>에서 850nm 파장의 CW 모드 MPE를 구하면 0.002 W/cm²(표 2의 예제2 참조)이다. 다음으로 위의 <표 4>에서 오른쪽의 두개의 칸에 수록된 값중에서 어느 값을 사용할 지를 결정한다. 이 경우에는 “보정계수 파장 700~1,400 nm용”열이다. 12,000 Hz인 레이저의 PRF는 10,000~15,000행 사이에 해당되므로 보다 개략적인(적은) 10,000 Hz의 PRF값인 2.8×10^{-1} 을 적용한다. 그러므로 보정계수는 0.28이다. $0.028 \times 0.002 \text{ W/cm}^2 = 0.000056 \text{ W/cm}^2 = 5.6 \times 10^{-4} \text{ W/cm}^2$ 인 MPE_{PRF} 값을 구하기 위해서는 <표 2>에서 구한 CW모드 MPF값에 보정계수를 곱한다.

표 5. 가시레이저용 시각보정계수
(가시레이저(400~700 nm)에만 사용)

펄스반복주파수(Hz)	시각보정계수(VCF)
400	2.6×10^{-4}
410	2.3×10^{-3}
420	4.0×10^{-3}
430	1.16×10^{-2}
440	2.30×10^{-3}
450	3.80×10^{-2}
460	5.99×10^{-2}
470	9.09×10^{-2}
480	1.391×10^{-1}
490	2.079×10^{-1}
500	3.226×10^{-1}
510	5.025×10^{-1}
520	7.092×10^{-1}
530	8.621×10^{-1}
540	9.524×10^{-1}
550	9.901×10^{-1}
555	1.0×10^0 (VCF=1)
560	9.901×10^{-1}
570	9.524×10^{-1}
580	8.696×10^{-1}
590	7.576×10^{-1}
600	6.329×10^{-1}
610	5.025×10^{-1}
620	3.817×10^{-1}
630	2.653×10^{-1}
640	1.751×10^{-1}
650	1.070×10^{-1}
660	6.10×10^{-2}
670	3.21×10^{-2}
680	1.70×10^{-2}
690	8.2×10^{-3}
700	4.1×10^{-3}

특정 파장에 대한 시각보정출력(VCP)을 구하기 위해서, 파장(위의 표)에 대한 시각보정계수(VCF)에 평균출력을 곱하면 된다. 만약 레이저의 파장이 두개의 표사이의 값에 해당될 경우 두개의 VCF 결과값중에서 보다 개략적인(큰) 값을 사용한다.

(예제 1) 주파수 배가식 YAG레이저가 532nm 연속파 광선을 10와트 출력으로 방출하는 경우

표에서 532는 530~540사이의 값이므로 보다 개략적인(큰) 파장인 540nm의 시각보정계수 9.524×10^{-1} 을 적용한다. 시각보정계수(VCF) 0.9524에 평균출력 10와트를 곱하여 시각보정출력 9.524 와트를 구한다.

(예제 2) 18와트의 아르곤 레이저가 514nm 연속파 광선을 10와트 출력으로 방출하고 488nm 연속파 광선을 8와트 출력으로 방출할 경우

각 파장을 개별적으로 계산한 뒤 VCF 결과값을 합산한다.

• 파장 514nm, 출력 10와트 : 본 표에서 514는 510~520사이의 값이므로 보다 개략적인(큰) 파장인 520nm의 시각보정계수 7.092×10^{-1} 을 적용한다. 시각보정계수(VCF) 0.7092에 평균 출력 10와트를 곱하여 시각보정출력 7.092와트를 구한다.

• 파장 488nm, 출력 8와트 : 본 표에서 488은 480~490사이의 값이므로 보다 개략적인(큰) 파장인 490nm의 시각보정계수 2.079×10^{-1} 을 적용한다. 시각보정계수(VCF) 0.2079에 평균 출력 8와트를 곱하여 시각보정출력 1.66632와트를 구한다.

마지막으로 두개의 시각보정출력(VCP)값을 합산한다 : $7.092 + 1.6632 = 8.7552$.

(주) - 이 예제에 있는 18와트 레이저는 8.7552와트의 시각보정출력만을 가지고 있다. 예제 1의 10와트의 YAG($9.5 W_{VCP}$)가 18와트 아르곤($8.8 W_{VCP}$)보다 눈에 밝아 보인다.

출처 : 본 표(C_F)에 사용된 시각보정계수는 표준비시각도에 대한 국제조명위원회(Commission Internationale de l'Eclairage, CIE)의 일반화된 명소시각기능 효율곡선이다. 조광($\text{lm} \cdot \text{cm}^{-2}$)은 C_F 값과 683을 곱하여 측정한 복사도를 말한다. 실효복사도는 C_F 를 곱한 실제(측정) 복사값이다. $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$ 를 실효복사도($\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$)를 곱한 값이 조광도($\text{lm} \cdot \text{cm}^{-2}$)이다. 레이저광선의 면적으로 나눈 “시각보정출력”이라는 용어는 본 지침에서 “실효복사도”로 사용된다.