

안전분야-연구자료
연구원 2004-84-591

레이저를 이용한 위험기계 방호장치 개발

Development of a Safety Device for Dangerous
Machines Using LASER Beams

2004. 2. 27



한국산업안전공단
산업안전보건연구원

제 출 문

한국산업안전공단이사장 귀하

본 보고서를 공단 연구사업계획에 따른 산업재해 예방기술 연구개발 및 보급 사업의 일환으로 수행한 “레이저를 이용한 위험기계 방호장치 개발”의 최종 보고서로 제출합니다.

2004년 2월 27일

연구주관부서: 산업안전보건연구원
안전공학연구실

연구책임자: 이충렬(기술직 3급)

공동연구기관: 공주대학교

공동연구책임자: 김창봉(정보통신공학부 교수)

요 약 문

1. 과 제 명 : 레이저를 이용한 위험기계 방호장치 개발

2. 연구기간 : 2003. 11. 24 - 2004. 2. 27

3. 연구목적

프레스 사용 사업장에서는 아직도 많은 협착사고가 발생되고 있는 실정이다. 여기에는 여러 가지 원인이 있을 수 있으나 이중 상당수는 방호장치와 연관이 되어 있다고 사료된다. 프레스 방호장치는 적외선을 이용하여 감지하는 광전자식 방호장치가 주종을 이루고 있으며 독일에서 개발된 라이트 커튼 방식과 국내에서 주로 사용되고 있는 광선식 방호장치로 크게 나누어진다. 독일 방식인 라이트 커튼 타입은 가격이 매우 고가이어서 현실적으로 거의 사용이 되지 못하고 있다. 가장 많이 사용되고 있는 광선식 프레스방호장치는 적외선의 퍼짐현상에 의한 이중감지로 성능상의 결함이 제기되고 있다.

이번 연구에서는 신뢰성을 확보하기 위하여 레이저광의 특성을 이용한 새로운 방식의 프레스 방호장치를 개발하였다. 개발된 방호장치는 실험결과 성능이 우수하고 신뢰성이 높은 것으로 확인되어 실용화될 경우 저렴한 가격으로 산업현장에 널리 보급될 수 있어 프레스로 인한 산업재해를 예방하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

4. 연구내용

다양한 방식의 위험기계 방호장치 중에서 광선식 방호장치의 일종으로 레이저를 이용한 방호장치를 개발하기 위하여, 레이저 기술에 바탕을 두고 프레스의 진동에도 견딜 수 있는 내진동 구조기술을 접목하여 시제품 설계 및 제작, 실험 등 아래와 같이 연구 개발하였다.

- (1) 레이저광을 위험기계 방호장치에 적용할 수 있는지에 대한 타당성 고찰
- (2) 레이저광식 위험기계 방호장치 개발 (설계 및 시제품 제작)
- (3) 레이저식 위험기계 방호장치 시제품의 현장적용
- (4) 레이저식 위험기계 방호장치 시제품의 내구성 및 사용 편의성 실험 및 분석

5. 연구개요

프레스 등의 위험기계에 장착되는 방호장치가 다양하나 주로 사용되는 방호장치는 광전자식 방호장치로 적외선을 이용하여 적외선을 발생시키는 발광부와 이를 수광하는 수광기로 구성되어 있다. 이 구조는 발광기에서 발생된 적외선이 반사판에 반사되어 수광기에 수광되는 과정에서 적외선 광선을 이용하여 인체나 물체를 감지하는 원리이다. 이러한 원리는 적외선의 퍼짐현상으로 인하여 수광기에 이중으로 감지하는 현상이 발생한다. 이로 인하여 인체나 물체가 위험역역에 들어갔어도 이를 감지 못하는 경우가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 회절과 간섭이 생기지 않는 레이저광을 이용함으로써 적외선의 퍼짐현상으로 인한 오동작을 방지할

수 있도록 개발하였다. 레이저가 인체에 미칠 수 있는 유해성을 검토하였으며 레이저를 방호장치에 적용할 수 있는지에 대한 타당성에 대한 연구를 하였으며 연구결과 레이저 광선을 이용함 방호장치를 개발하였다. 다만, 본 연구에서는 수광거리가 2m인 경우에 한해 실험하여 결과를 얻었으므로 수광거리가 더 긴 것은 향후 추가적인 연구가 필요하다.

6. 활용계획

- (1) 레이저식 방호장치의 성능 및 안전성 입증을 위한 검정 등의 추진
- (2) 프레스 사용 사업장 등에 레이저식 방호장치를 보급할 수 있도록 실용화 추진

7. 중심어

레이저, 레이저광, 방호장치, 위험기계, 위험기계 방호장치, 레이저식 방호장치

목 차

요약문	i
제 1장 서론	1
1. 연구의 필요성 및 목적	1
2. 연구개발 범위 및 방법	2
2.1. 연구범위	2
2.2. 연구방법	3
2.2.1 레이저식 방호장치 모델 설계 및 제작 방법	3
2.2.2 레이저식 방호장치 모델 설계 및 데이터 구축 방법	3
2.2.3 시제품 설계 및 제작	4
2.2.4 시제품 실험 및 보완	4
제 2장 레이저의 특성 및 유해성 평가	5
1. 레이저의 이론	5
1.1 레이저의 구조	5
1.2 레이저의 발진원리	7
1.2.1 자연방출 및 자극방출	7
1.2.2 밀도반전(Population Inversion)	12
2. 방호장치에 적용되는 레이저의 특징 및 유해성	18
2.1 레이저의 특징	18
2.1.1 단일성(Monochromaticity)	18

2.1.2 코히어런스(Coherence)	19
2.1.3 방향성(Directionality)	22
2.1.4 초점성(Focusability)	25
2.2 방호장치에 적용되는 레이저의 위해성	30
2.2.1 레이저의 강도(Intensity)	30
2.2.2 방호장치에 적용되는 레이저	34
2.2.3 레이저의 등급 및 레이저의 안전 용어	37
3. 레이저 위해정도 분석 및 평가	40
3.1 눈의 구조 및 생물학적인 반응	40
3.1.1 눈의 구조	40
3.1.2 레이저에 대한 생물학적인 반응	42
3.2 피부의 구조 및 생물학적인 반응	47
3.3 위해성 평가 분석	49
3.4 방호장치에 적용가능한 레이저광의 선정	57
제3장 레이저식 방호장치 모델 제작 및 실험	59
1. 레이저를 이용한 위험기계 방호장치 원리	59
2. 레이저를 이용한 위험기계 방호장치 모델 제작	59
3. 레이저를 이용한 방호장치 모델의 실험 및 분석	61
3.1 외광 등에 의한 노이즈 측정	61
3.2 다단반사에 의한 수광 측정	62
3.3 감지시간 측정	62
4. 레이저식 방호장치 모델 분석 결과	62

제 4장 레이저식 방호장치의 시제품 설계·제작 및 실험	63
1. 레이저식 위험기계 방호장치 설계 및 제작	63
1.1 레이저 발광부 설계 및 제작	63
1.2 레이저 반사판 선정	64
1.3 반사판 재료 실험	65
1.4 레이저 수광기 설계 및 제작	65
1.5 Main Control 장치 제작	66
1.5.1 발진부	67
1.5.2 주파수 분주 회로	68
1.5.3 수광기	68
1.5.4 Control PCB 연결회로	68
2. 레이저식 방호장치 부품 실험	69
2.1 수광기 렌즈별 실험	69
2.2 반투명 Film의 적용실험	69
2.3 수광 평판 관련 실험 및 데이터	70
2.3.1 수광기 설계 데이터	70
2.3.2 필름실험	70
2.3.3 확산각의 계산	71
2.4 반사판의 반사실험	73
3. 레이저식 방호장치 성능실험 및 결과	73
3.1 연속차광폭 및 방호높이 실험	73
3.2 지동시간의 측정	74
3.3 급정지시간 측정	75
3.4 외부광선에 대한 감응실험	76

3.5 클러치 개조 성능실험	77
3.6 무부하 동작실험	77
3.7 내노이즈실험	78
3.8 방진 및 내진실험	79
3.9 내구성실험	80
3.10 절연저항실험	81
3.11 내전압실험	81
3.12 온도상승실험	83
3.13 내한성실험	83
3.14 내열성실험	84
4. 시제품 실험종합분석	85
제 5장 레이저식 방호장치의 적용성 및 특성 비교	86
1 레이저식 방호장치의 적용성 분석	86
1.1 프레스	86
1.2 절곡기	86
1.3 로울러	86
2 기존 방호장치와 레이저식 방호장치의 특성비교	87
제 6장 결론	88
참고 문헌	89

표 목 차

<표 2-1> 광원의 선폭비교	20
<표 2-2> 다양한 레이저의 특성	33
<표 2-3> 다양한 CW레이저의 눈에 대한 MPE	52
<표 2-4> 다양한 CW레이저의 피부에 대한 MPE	53
<표 2-5> 공칭안장해거리가 0 m 지점에서 빔의 광과위의 산정	58
<표 3-1> 감지부의 감도측정조건	61
<표 3-2> 노이즈 실험 결과	62
<표 4-1> 광학 Film의 겹침 개수 별 감지거리 데이터	70
<표 4-2> 외부광선의 노이즈측정 실험결과	76
<표 4-3> 내노이즈 실험기준	78
<표 4-4> 내노이즈 실험결과	79
<표 4-5> 진동실험기준	80
<표 4-6> 절연저항 실험기준	81
<표 4-7> 내전압 실험기준	82
<표 4-8> 온도상승 실험기준	83
<표 5-1> 기존 광전자식 방호장치와 레이저식 방호장치의 특성비교	87

그림 목차

[그림 2-1] 레이저의 일반 구조	6
[그림 2-2] 루비(Ruby) 레이저의 구성	7
[그림 2-3] 자연방출 및 자극방출(흡수) 메커니즘	9
[그림 2-4] 자연방출, 자극방출 및 흡수에 대한 원자밀도 변화율	10
[그림 2-5] 원자밀도	12
[그림 2-6] 3-레벨 레이저 평형상태 및 밀보반전된 상태의 원자밀도 ..	14
[그림 2-7] 4-레벨 레이저의 동작이론	15
[그림 2-8] 레이저 공진기 내부에서의 발진과정	16
[그림 2-9] 공진기 길이가 L인 레이저에서의 광파의 형성	17
[그림 2-10] 레이저 공진기 내부의 정재파	17
[그림 2-11] 발광다이오드(LED)의 스펙트럼	18
[그림 2-12] 자극방출과 자연방출의 선폭비교	20
[그림 2-13] 텅그스텐 램프	21
[그림 2-14] 레이저 빔의 퍼짐	23
[그림 2-15] 레이저빔의 직경을 계산하기 위한 그림	24
[그림 2-16] 레이저 빔의 진행거리 대 빔의 직경(폭)	25
[그림 2-17] 다양한 광원에 따라 초점거리에 맺힌 스폿 사이즈	27
[그림 2-18] 레이저빔이 렌즈 통과후 초점거리 맺힌 스폿사이즈	28
[그림 2-19] 방호장치에 부착된 레이저의 스폿 사이즈($f=10\text{cm}$)	29
[그림 2-20] 방호장치에 부착된 레이저의 스폿 사이즈($f=40\text{cm}$)	29
[그림 2-21] 방호장치에 부착된 레이저의 스폿 사이즈($f=80\text{cm}$)	30

[그림 2-22] Gaussian 분포를 갖는 레이저 강도	31
[그림 2-23] 스폿의 직경	32
[그림 2-24] 반도체 레이저의 구조	34
[그림 2-25] 발광다이오드의 동작원리	35
[그림 2-26] 반도체 레이저의 활성영역층 및 출력 빔의 패턴	36
[그림 2-27] 렌즈가 부착된 반도체 레이저의 구조	36
[그림 2-28] 반도체 레이저의 P-I 곡선	37
[그림 2-29] 오른쪽 안구의 수평 단면도	43
[그림 2-30] 광의 파장과 안구 투과율 및 안전 흡수율	44
[그림 2-31] 청색광 장해를 1로 했을 때의 장해도	45
[그림 2-32] 레이저 조사시 피부의 반응	48
[그림 2-33] 특정 부위의 레이저의 방사량 계산을 위한 그림	49
[그림 2-34] 방호장치에 장착된 센서용 및 수광기	51
[그림 2-35] 방호장치에 쓰이는 센서용 레이저의 공칭안장해 거리	54
[그림 2-36] 방출 광파워 대 공칭 안장해 거리	55
[그림 2-37] 레이저 방출 입구에서 빔의 직경 대 공칭 안장해 거리	56
[그림 2-38] 방출 광파워 대 공칭 안장해 거리(빔의 직경을 변화)	56
[그림 2-39] 레이저방출입구에서의 빔의 직경대 공칭안장해 거리	57
[그림 3-1] 레이저식 방호장치 모델	60
[그림 3-2] 레이저광의 모델 실험 및 측정	60
[그림 4-1] 레이저 조준장치 측면 투시도	63
[그림 4-2] 레이저 조준장치 정면 투시도	64
[그림 4-3] 반사판	65
[그림 4-4] 방호장치 제어박스	66

[그림 4-5] Main PCB 회로 분할모듈	67
[그림 4-6] 레이저식 방호장치 제어 장치의 구성	68
[그림 4-7] 광의 산란에 의한 확산현상	71
[그림 4-8] 레이저광의 확산각	72

제 1 장 서론

1. 연구의 필요성 및 목적

산업현장에서는 많은 위험기계로 인하여 재해가 계속 발생하고 있는데 그 이유는 여러 가지이다. 그 이유 중의 하나가 방호장치가 장착되었는데도 불구하고 재해가 발생할 수 있다. 그 이유는 방호장치를 설치하고도 올바르게 사용하지 않은 경우도 있고 방호장치를 정확하게 사용하고 작업을 하여도 사고를 예방하지 못하는 경우가 발생할 수 있는데 이는 방호장치가 완벽하지 못하였기 때문이다.

이번 연구에서는 기존 방호장치의 문제점을 분석하고, 이에 대하여 개선 및 보완이 가능한 대체기술인 레이저식 방호장치를 개발, 위험기계로 인한 재해를 예방하고자 하였다. 위험기계는 주로 방호장치를 설치, 제조 및 판매하도록 되어 있으나 방호장치가 모든 위험기계의 방호에 절대적으로 만족한다고는 볼 수 없다. 그러나 현재의 기술로서 최적의 방호가 가능하도록 하는 것이 요구된다. 따라서 해결되지 못한 기존 방호장치의 여러 가지 결점을 새로운 기술 개발을 통하여 해결할 수 있도록 하고 이를 현장에 보급할 수 있도록 하여 이로 인한 재해를 예방하는 것이 바람직하다. 그리고 기존 제품 중에서 성능은 뛰어나지만 구입가격이 너무 높아 현장에서 사용하지 못하는 제품도 있다. 이러한 제품은 현실적으로 현장에 사용할 수 있도록 경제성 있는 제품으로 개선 또는 개발하는 것이 요구된다. 특히 프레스는 재해가 가장 많이 발생되고 있는데 프레스의 작업 방법도 매우 다양하여 이로 인한 재해를 예방하기 위한 방호장치도 다양하다. 그 중에서도 가장 많이 쓰이는 방호장치는 광선식 방호장치이다. 이는 작업에 있어서 타 방호장치에 비하여 편리하고 작업자의 구속이 적은 편이어서 사용을 많이 하고 있

는 편이다. 그러나 이 광선식 방호장치의 특성상 위험 영역에서 인체를 감지하는데 결함을 갖고 있어 개선이 시급하였다. 기존의 광전자식의 방호장치는 적외선을 이용하여 감지하는 시스템이므로 이중감지의 문제가 종종 발생되었다. 이러한 방호장치는 위험영역에서 인체를 방호하는데 있어서 상당한 결함을 가지고 있으므로 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 레이저의 특성을 이용, 방호장치에 적용하여 새로운 구조의 방호장치를 개발함으로써 기존 광선식 방호장치의 결함을 해결하여 이로 인해서 발생하는 재해를 예방하였다. 추후 이를 저렴한 생산단가로 현장 보급될 수 있게 하여 위험기계로 인한 재해를 예방하는데 진일보할 수 있게 하였다.

2. 연구개발 범위 및 방법

2.1 연구 범위

레이저를 이용한 위험기계 방호장치 개발의 연구개발 범위는 방호장치가 프레스, 전단기 및 절단기 등의 위험기계 활용될 수 있는 시제품을 개발하는데 있다.

- 가. 레이저를 이용한 위험기계 방호장치 모델 제작
- 나. 레이저를 이용한 위험기계 방호장치 시제품 제작
- 다. 레이저를 이용한 위험기계 방호장치 실험결과 분석 및 보완

2.2 연구방법

레이저의 종류별 유해성을 조사 및 연구하여 유해성이 없는 레이저를 선

정하고 레이저광의 에너지 강도를 조정하여 레이저를 이용한 방호장치의 모델을 제작 및 실험하였다. 이에 관련된 데이터를 분석 및 평가하여 시제품 설계 데이터로 활용하여 시제품 설계 및 제작을 하였다.

2.2.1 레이저식 방호장치 모델 설계 및 제작 방법

레이저식 방호장치 모델은 시제품의 설계에 필요한 데이터를 얻기 위한 실험을 위해 제작하는 것이므로 여기에 필요한 사양을 설정하여 모델을 설계 및 제작하였다. 방호장치 모델의 사양은 우선적으로 방호장치의 특성상 필요한 신뢰성, 안정성, 내구성, 내진동 및 안전장치에 필요한 기타 성능에 대한 것이다.

2.2.2 레이저식 방호장치 모델 실험 및 데이터 구축 방법

방호장치 모델의 실험 및 데이터 구축에서 시제품 제작시 필요한 데이터 확보와 설계자료를 구하는 것이 실험시에 실험 데이터의 정확도가 매우 중요하다. 따라서 여기에서 요구되는 실험 방법에 대한 선택도 신뢰도에 중요한 영향을 미치므로 그 방법에 대한 검토를 하여 실험 전에 필요한 실험방법의 적정성 검토를 실시하였다. 실험방법으로 측정장치를 사용하여 레이저 광량 및 감지거리를 측정하고 미러의 반사각도 및 미러의 수평도를 측정하여 부품 및 재료를 선정하는데 데이터로 사용하였다.

2.2.3 시제품 설계 및 제작

시제품의 설계에서 중요한 요소는 주로 모델 실험에서 구축한 데이터를 활용하였으나 작업의 편리성 구조 및 제조단가 저감 등 현장 적용에 필요한 요소를 고려하여 모델의 구조를 구상을 하였다. 또한 현장 사용에서 요구되

는 내구성 및 내진동성 등을 고려하여 설계하였다.

2.2.4 시제품 실험 및 보완

시제품의 실험에서는 내구성, 설치 및 작업편의성 등과 내진동 구조에 관련된 측정 및 분석을 하여 개선 보완하였다.

내구성은 진동에 따른 나사의 풀림 등을 방지하는 구조로 하고 진동이 발생되더라도 진동에 의한 오차가 발생되지 않는 내진동구조로 하였다. 또한 작업의 편의성을 고려하여 가능하면 작업에 장애가 발생되지 않도록 하기 위하여 미러와 미러 사이의 폭을 넓게 치수를 변경시켰다.

제 2 장 레이저의 특성 및 유해성 평가

1. 레이저의 이론

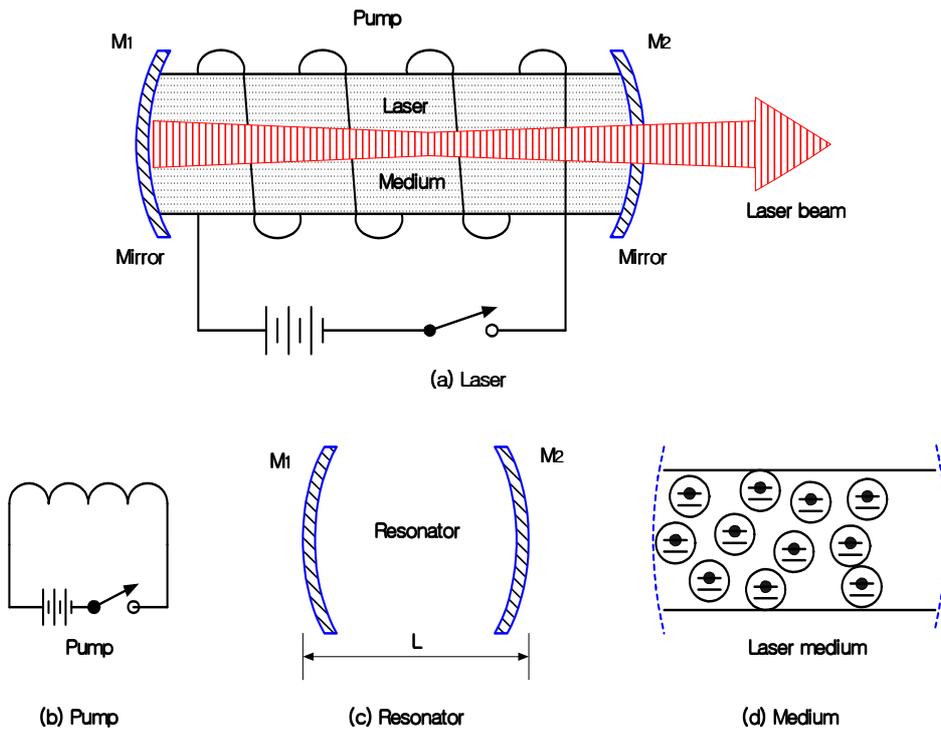
1.1 레이저의 구조

[그림 2-1]은 일반적인 레이저의 구조를 나타낸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 레이저는 크게 세 부분으로 나누어져 구성된다. 세 부분의 명칭은 펌프(Pump) 혹은 외부에너지원(External Energy Source), 이득매질(Gain Medium) 및 공진기(Resonator)이다. 각 부분의 역할을 기술하면 다음과 같다.

펌프는 레이저의 이득매질에서 밀도반전(Population Inversion)을 발생시키는 데 필요한 외부에서 공급되는 에너지를 지칭하며, 만일 펌프가 존재하지 않는다면 이득매질에서 밀도반전을 일으키지 못하여 레이저의 증폭효과를 이룰 수 없어서 레이저 기능을 할 수 없게 된다. 밀도반전에 대한 의미 및 이론적인 내용은 제 2 절에서 기술한다. 펌프는 광학적, 전기적, 화학적, 열적인 형태로 레이저의 이득매질에 있는 원자를 여기(excite)시켜서 밀도반전을 일으키는 역할을 한다. 예를 들어 기체레이저의 일종인 He-Ne 레이저의 경우 펌프는 전기적인 방전(Discharge)을 통하여 이루어진다. 이러한 펌프를 전기적인 펌핑(Electrical Pumping) 이라고 한다. 최초의 레이저로서 1960년 T. Maiman이 개발한 루비 레이저는 가시광선 영역이며 붉은색을 내며 파장이 694.3nm 이다. [그림 2-1]은 루비 레이저의 구조를 나타내는데 그림에서 루비막대(Ruby Rod)에 존재하는 Cr^{+3} 이온을 여기시키기 위하여 T. Maiman은 제논기체(Xenon Gas)로 채워져 있는 나선형 모양의 형광램프(Flash Lamp)를 이용하였다. 이러한 종류의 펌핑방법을 광학적인 펌핑

(Optical Pumping)이라고 하고 주로 액체 및 고체형태의 이득매질에서 사용된다.

이득매질 혹은 증폭매질(Amplifying Medium)은 레이저에서 중요한 부분을 차지한다. 많은 다양한 레이저들은 레이저를 구성하는 이득매질의 종류에 따라, 즉 이득매질이 각각 CO_2 , He-Ne, Nd:YAG 이므로 CO_2 레이저, He-Ne 레이저, Nd:YAG 레이저로 각각 불린다. 일반적으로 레이저는 이득매질(Gain Medium)의 종류에 따라 기체, 고체, 액체 레이저로 분류되며,

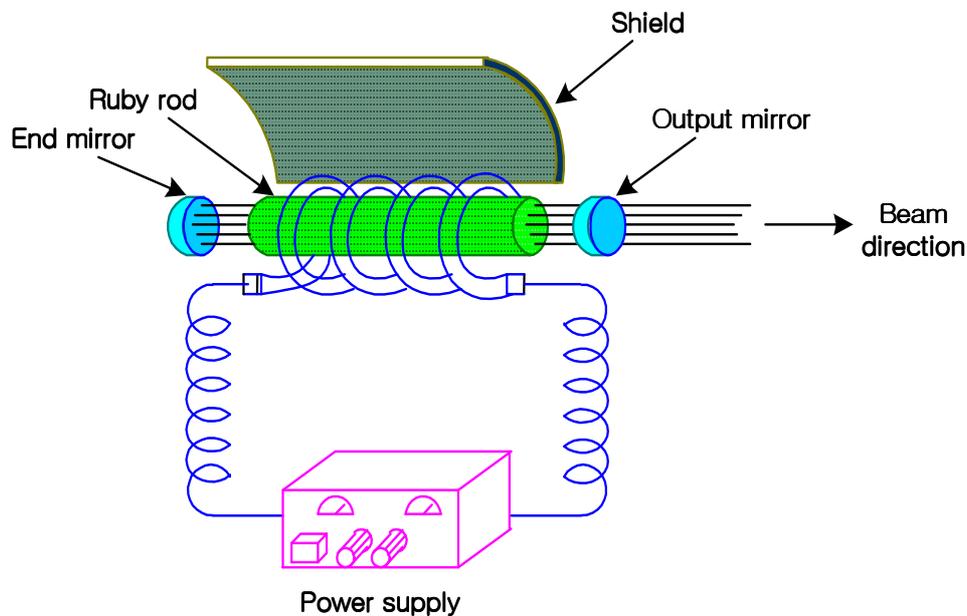


[그림 2-1] 레이저의 일반적인 구조

광센서 및 광통신소자로 쓰이는 반도체레이저(Semiconductor Laser) 및 발

광다이오드(Light Emitting Diode)등으로 분류된다. 이득매질의 가장 중요한 기능은 펌핑으로 인한 밀도반전을 지원하는 역할이다.

공진기는 광학적인 궤환기(Optical Feedback Device)로서 이득매질에서 발생된 광자를 이득매질을 통해서 앞뒤로 진행시키는 역할을 한다. [그림 2-2]에서 볼 수 있듯이 공진기는 평면 혹은 곡면형태로 된 유리거울로 한쪽 거울은 반사율이 100%인 면으로 구성하고 다른 하나의 거울면은 반사율이 100%보다 적게 만들어서 공진기 내부에서 증폭된 빛의 일부가 밖으로 유출되어 레이저 빛이 나올 수 있도록 한다.



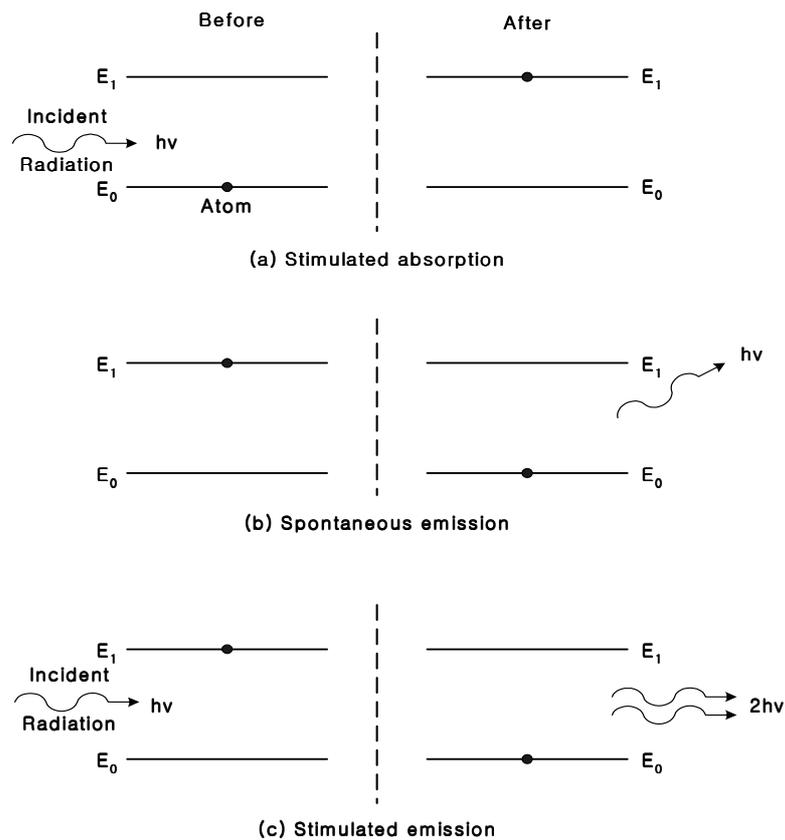
[그림 2-2] 루비(Ruby) 레이저의 구성

1.2 레이저의 발진원리

1.2.1 자연방출 및 자극방출

원래 레이저의 영어는 LASER 로서 그 어원은 **L**ight **A**mplification by the **S**timulated **E**mission of **R**adiation으로서 그 뜻을 살펴보면 자극방출에 의한 빛의 증폭이며 레이저의 어원에서도 알 수 있듯이 레이저의 동작원리는 자극방출에 의해서 빛이 증폭되고 증폭된 빛이 밖으로 나오는 것임을 알 수 있다. 자극방출에 관한 용어의 정의는 Einstein의 이론에서 나왔다. Einstein의 원리에 따르면 빛을 방출하는 메커니즘은 크게 3가지로 분류가 가능한데 각각의 과정이 [그림 2-3]에 나타나 있다. [그림 2-3]에서 볼 수 있듯이 방출 메커니즘의 기본은 자연방출(Spontaneous Emission)과 자극방출(Stimulated Emission)이며 [그림 2-3]의 (b), (c)는 자연방출 및 자극방출에 관련된 메커니즘을 그림으로 잘 보여주고 있다. 그림 (a)는 자극흡수(Stimulated Absorption)로 자극방출의 메커니즘과는 정반대의 역의 과정이라고 생각하면 된다. [그림 2-3] (b)는 자연방출의 메커니즘을 보여주는데 여기상태(Excited State) E_1 에너지상태에 있던 원자가 기저상태(Ground State)의 에너지 E_0 로 떨어지면서 에너지 차이 $E_1 - E_0 = h\nu$ (h 는 Planck 상수, ν 는 방출 주파수)로 한 개의 광자가 발생하는 것을 나타내고 있다. 이때 발생하는 광자의 방향은 일정하지 않다. 만약 외부에서 외부광을 조사하여도 자연방출광에서 나오는 광자의 방향은 일정하지 않은 특성을 갖는다. 그러나, 자극방출의 경우에는 [그림 2-3] (c)에서 알 수 있듯이 입사되는 외부광이 여기상태 E_1 에 있는 원자가 기저상태 E_0 로 떨어지도록 자극(Stimulate)하여 입사되는 외부광의 광자와 같은 에너지, 방향, 위상을 갖는 한 개의 광자를 생성하여 결과적으로 2개의 광자를 생성하는 결과를 초래하여 입사광의 광세기(Optical Intensity)를 증가시키는 역할을 한다. 이러한 메커니즘이 레이저에 있어서 빛을 증폭시키는 역할을 담당한다. 또한 [그림 2-3] (a)는 자극흡수로서 자극방출과의 정반대 과정을 보이는데 입사되는 외부광이 갖고 있는 에너지를 갖고 기저상태 E_0 에 있는 원자가 여기상태

E_1 로 올라가고 결과적으로 입사된 외부광의 광자는 흡수(absorb)되어 없어진다. 자극방출이 레이저를 발진시키는데 중요한 역할을 한다는 이론적인 배경을 설명하기 위한 간략한 그림이 [그림 2-4]에 나타나 있다.



[그림 2-3] 자연방출 및 자극방출(흡수) 메커니즘

[그림 2-4]에서 N_1 은 에너지준위 E_1 에 존재하는 원자밀도, N_2 는 에너지준위 E_2 에 존재하는 원자밀도, A_{21} 은 자연방출계수, B_{21} 은 자극방출계수, B_{12} 는 (자극)흡수계수이며 $\rho(\nu)$ 는 분광에너지밀도(Spectral Energy Density)를 나타낸다. 각각의 메커니즘에서 화살표의 방향을 주의하여 각각

의 메커니즘(자연방출, 자극방출, 흡수)에서 시간의 변화에 따라 에너지준위 E_2 에 존재하는 원자밀도 N_2 의 변화율은 자연방출에서는

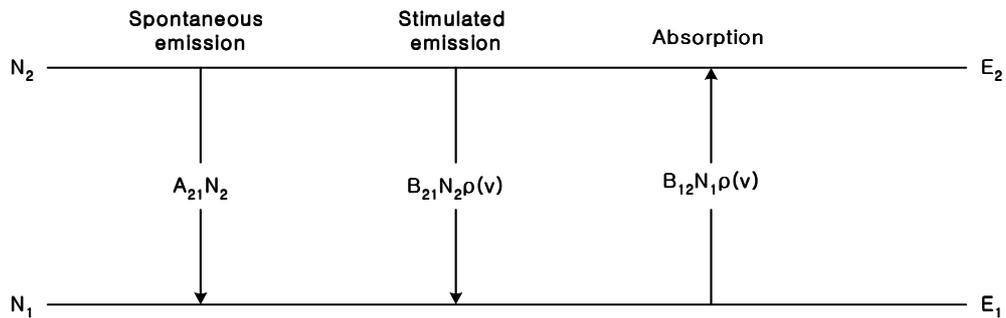
$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 \quad (2.1)$$

로 주어지고, 자극방출에서는

$$\frac{dN_2}{dt} = -B_{21}N_2\rho(\nu) \quad (2.2)$$

로 주어지고, 자극흡수에서는

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12}N_1\rho(\nu) \quad (2.3)$$



[그림 2-4] 자연방출, 자극방출 및 흡수에 대한 원자밀도 변화율

으로 주어지는데 위의 두식과 다른점은 자극흡수에서는 에너지준위 E_2 에 존재하는 원자밀도 N_2 에 대한 시간의 변화율을 나타내는 것이 아니라 에너지준위 E_1 에 존재하는 원자밀도 N_1 에 대한 시간의 변화율을 나타낸다. 왜냐하면 흡수로 인하여 에너지준위 E_1 에 존재하는 원자가 에너지준위 E_2 로 뛰어오르기 때문에 전체적으로 원자밀도 N_1 에 대한 시간의 변화율은 마이너스값

을 갖게 되며 에너지준위 E_1 에 존재하는 원자밀도 N_1 의 변화율을 나타내기 때문이다. Einstein의 양자이론에서 내세운 가정(Assumption)중 두가지 가정은 첫째 에너지준위 E_1, E_2 의 원자밀도 N_1, N_2 는 Boltzmann 분포를 따르고, 둘째는 원자밀도 N_1, N_2 는 시간변화에 일정하다는 것이다.

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT} \quad (2.4)$$

따라서 두 번째의 가정에 따라 식을 세우면

$$\frac{dN_2}{dt} = 0 = -N_2 A_{21} - B_{21} N_2 \rho(\nu) + B_{12} N_1 \rho(\nu) \quad (2.5)$$

으로 표현되고, 일반적으로 분광에너지밀도(Spectral Energy Density)인 $\rho(\nu)$ 는 다음 식으로 주어진다.

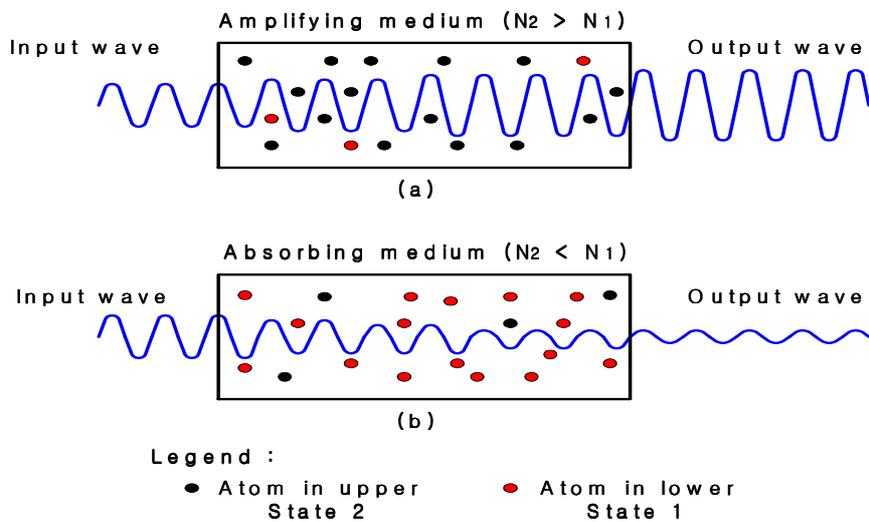
$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (2.6)$$

Boltzmann 분포를 나타내는 식 (2.4)에서 E_2 는 E_1 보다 높은 에너지준위이기 때문에 N_2/N_1 의 비는 항상 1보다 적게 되어서 Boltzmann 분포를 만족하려면 정상상태에서는 낮은 에너지준위의 원자밀도 N_1 이 높은 에너지준위의 원자밀도 N_2 보다 항상 커야한다는 것을 알수 있다. 그리고 식 (2.5)와 식 (2.6)으로부터 분광에너지밀도 (Spectral Energy Density)인 $\rho(\nu)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12}(N_1/N_2) - B_{21}} \quad (2.7)$$

1.2.2 밀도반전(Population Inversion)

Einstein의 양자이론에 입각하여 구한 식 (2.7)에서 분광에너지밀도(Spectral Energy Density)인 $\rho(\nu)$ 를 살펴보자. 분광에너지밀도에서 만약 $N_2 > N_1$ 이면(B_{12} 와 B_{21} 는 같다) $\rho(\nu)$ 는 증가되어 증폭(Amplification)이 되고 만약 $N_1 > N_2$ 이면 $\rho(\nu)$ 는 감소되어 감쇄(Attenuation)된다. 이러한 현상을 나타낸 것이 [그림 2-5]이다. 원자밀도가 (a) $N_2 > N_1$ 인 경우는 이득매질이 증폭매질(Ampifying Medium) (b) $N_1 > N_2$ 인 경우는 이득매질이 흡수매질(Absorbing Medium)으로 작용한다. [그림 2-5] (a)는 이득매질이 증폭매질로 작용하여 증폭작용을 (b)는 이득매질이 흡수매질로 작용하여 감쇄작용을 한다는 것을 알 수 있다.

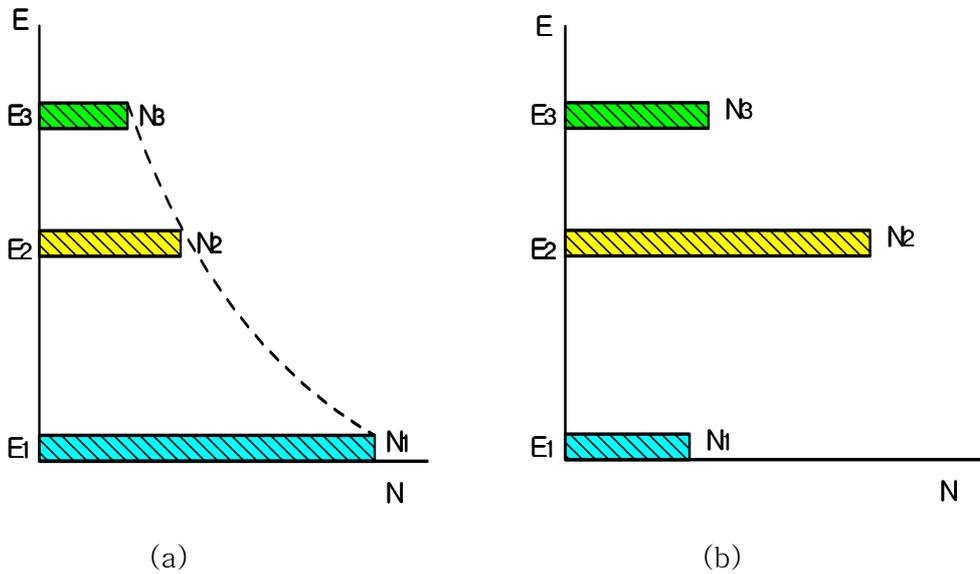


[그림 2-5] 원자밀도

Boltzmann 분포에 따르면 항상 높은 에너지준위에 존재하는 원자밀도가

낮은 에너지 준위에 존재하는 원자밀도보다 적다. 이러한 상태는 외부에서 펌핑이 없을 때는 유지되지만, 일단 외부에서 펌핑이 존재하면 Boltzmann 분포에 따른 $N_1 > N_2$ 의 관계가 성립하지 않고 펌핑으로 인하여 낮은 에너지 준위에서 존재하던 원자가 높은 에너지 준위로 뛰어 오르기 때문에 원자밀도가 $N_2 > N_1$ 인 경우가 된다. 이때 이러한 상태, 즉 높은 에너지 준위의 원자밀도 N_2 가 낮은 에너지 준위의 원자밀도 N_1 보다 클 때 밀도반전 되었다고 한다.

[그림 2-6]의 (a)는 3-레벨 시스템의 평형상태(Equilibrium)에서 각각의 에너지 준위 E_1, E_2, E_3 에 있는 원자밀도를 나타내는 그림으로 평형상태에서는 Boltzmann 분포를 따라 $N_1 > N_2$ 인 관계를 나타내고, (b)는 에너지 준위 E_1 과 E_2 에서 원자밀도가 밀도반전으로 인하여 $N_2 > N_1$ 상태가 된 그림을 보인다. [그림 2-7]은 4-레벨 레이저에서 빛이 증폭되어 나오는 과정을 나타낸다. 이 그림을 보면 레이저가 발진하는 메커니즘을 네 과정으로 보여 주는데, 각 과정을 살펴보면 다음과 같다. ① 외부에서 펌핑이 이루어져서 기저상태 E_0 에 있는 원자가 4-레벨에서 제일 높은 에너지 준위인 E_3 로 이동하는 과정이다. ② 에너지준위 E_3 에 존재하던 원자들이 아무런 방출과정이 없이 아주 빠른 속도로 에너지준위 E_2 로 이동한다. ③ 에너지준위 E_2 로 빠르게 이동한 원자들이 에너지준위 E_2 에 쌓이게 된다. 따라서 앞에서 언급한 $N_2 > N_1$ 인 경우가 발생되어 밀도반전이 되고 이득매질이 증폭매질로 작용하여 자극방출이 시작되면서 빛이 증폭되는 과정이다. ④ 자극방출이 이루어지면서 에너지 준위 E_1 으로 떨어지는 원자들은 지체없이 기저상태 E_0 로 떨어져서 소멸된다.

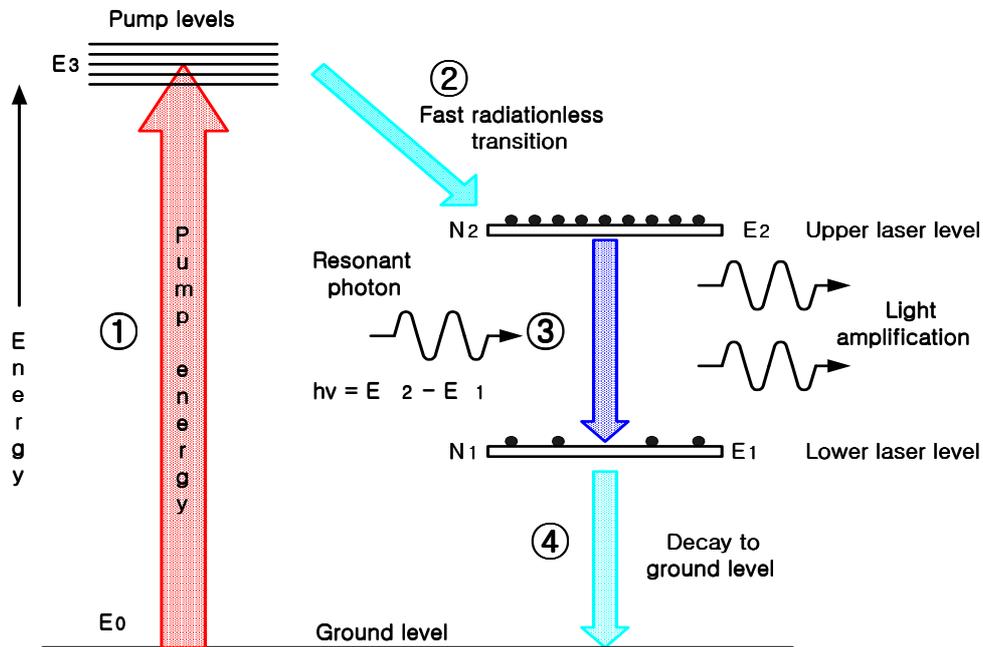


[그림 2-6] 3-레벨 레이저에서 평형상태 및 밀도 반전된 상태의 원자밀도

(a) 3-레벨 레이저에서 평형상태에서의 원자밀도 ($N_1 > N_2$)

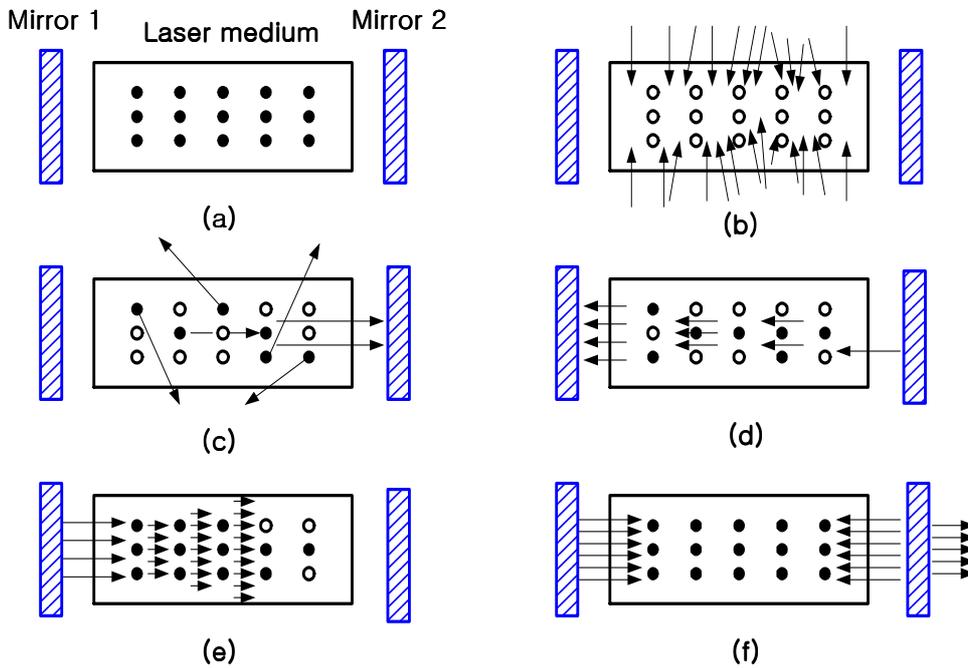
(b) 3-레벨 레이저에서 펌핑으로 인해서 밀도반전이 생김 ($N_2 > N_1$)

[그림 2-7]에서 알 수 있는 사실은 레이저의 작동을 위해서는 밀도반전의 과정과 더불어 자극방출이 되면서 빛의 증폭이 이루어져야 한다는 것을 알 수 있다. 지금까지는 4-레벨 레이저에서 밀도반전 및 자극방출이 되는 과정을 정성적으로 보았는데 다음으로 레이저의 내부에서 펌핑부터 시작하여 발진까지 보여주는 과정을 보자. [그림 2-8]은 레이저 공진기내부에서 발진과정을 간략하게 나타내는 것으로 각 과정별 설명은 다음과 같다. 이때 Mirror 1의 반사율은 100%이고 Mirror 2의 반사율은 100%가 아닌 일부분은 통과하고 일부분은 반사되는 특징을 갖는다.



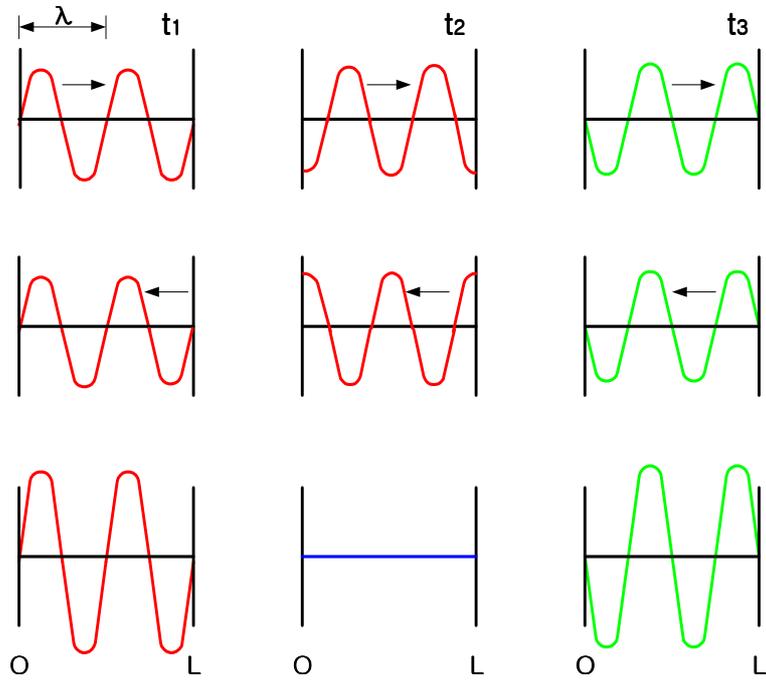
[그림 2-7] 4-레벨 레이저의 동작이론

[그림 2-8] (b)는 외부에서 펌핑이 이루어 졌을 때 레이저 공진기 내부에서 낮은 에너지준위에 있던 원자(검은점)가 높은 에너지준위의 원자(흰 점)로 변화된 것을 나타내고 [그림 2-8] (c)는 공진기 내부에서 자연방출과 자극방출이 시작되는 것을 나타내고 있고 [그림 2-8] (d)는 자극방출에 따라 빛이 증폭되기 시작하는 것을 나타내고 있고 [그림 2-8] (e)는 빛의 증폭과정이 계속적으로 일어나고 있는 것을 보이고 있고 [그림 2-8] (f)는 레이저가 발진된 것을 보여준다. 레이저의 발진과정은 레이저 공진기 내부의 광파의 중첩으로도 설명될 수 있다. [그림 2-9]은 크게 세 개의 칸 및 줄로 구성된 그림으로서 칸으로 볼 때 왼쪽, 중앙, 오른쪽으로 구분되는데 각각의 칸은 시간이 증가함($t_3 > t_2 > t_1$)에 따라 공진기 내부에서 변화하는 광파의 그림을 보여주고 있다.

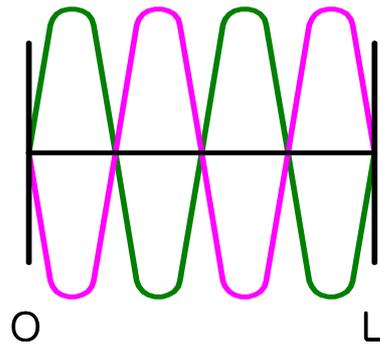


[그림 2-8] 레이저 공진기 내부에서의 발진과정

또한 줄에서는 첫번째 줄은 공진기 내부에서 광파의 진행방향이 왼쪽에서 오른쪽으로 두번째 줄은 광파의 진행방향이 반대인 즉 오른쪽에서 왼쪽으로 진행하는 것을 보여주고 있고 세 번째 줄은 왼쪽→오른쪽 진행파와 오른쪽→왼쪽 진행파를 중첩한 파를 나타낸다. L 은 레이저 내부의 공진기의 길이를 나타낸다. [그림 2-9]에서 알 수 있는 것은 가운데 칸의 중첩파는 왼쪽→오른쪽 진행파와 오른쪽→왼쪽 진행파의 위상이 90° 가 나서 서로 상쇄되어서 광파가 소멸되는 것을 나타낸다. 첫 번째 칸과 세번째칸은 위상이 변화가 없어서 중첩하면 원래파의 진폭에 2배를 갖는 증폭된 파가 생기는 것을 알 수 있다. 이때 시간 t_1, t_2, t_3 에서 생성된 광파를 모두 합치면 [그림 2-10]과 같이 되고 이러한 형태의 파를 정재파(Standing Wave)라고 한다.



[그림 2-9] 공진기 길이가 L 인 레이저에서의 광파의 형성



[그림 2-10] 레이저 공진기 내부의 정재파

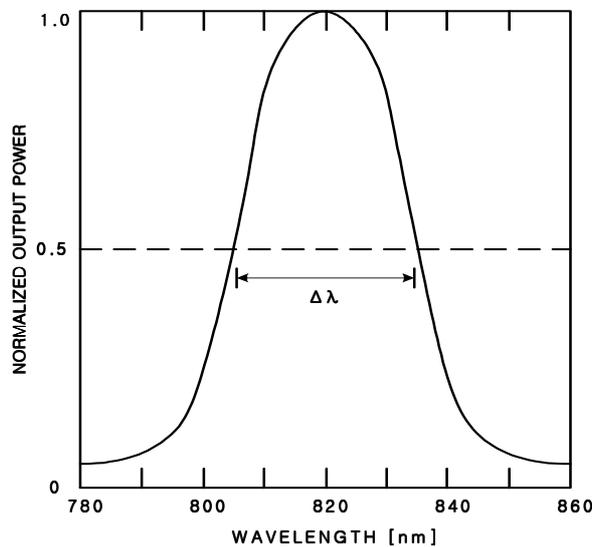
2. 방호장치에 적용되는 레이저의 특성 및 위해성

본 장에서는 방호장치에 적용되는 레이저의 위해성을 분석하기 위하여 먼저 레이저가 어떠한 특성을 갖는지와 그 특성이 어떻게 인체에 위해를 가하는지를 알아보기로 한다.

2.1 레이저의 특징

2.1.1 단일성(Monochromaticity)

레이저는 다른 광원과 달리 빛을 광스펙트럼 분석기에 분석하면 좁은 파장대에 걸쳐서 나타나지만 일반적인 램프광원등은 아주 넓은 폭의 파장대에 걸쳐서 나타난다.



[그림 2-11] 발광다이오드(LED)의 스펙트럼

완전한 단일광(Perfectly Monochromatic)이라는 것은 스펙트럼상에서 단일파장만 나타내는것을 말하는데 실제로 그러한 광원은 존재하지 않는다. 따라서 레이저는 다른 광원에 비해서 단일성(Monochromaticity)이 있다고 말하며, 단일성의 기준은 광원의 스펙트럼 상에서 정의한 선폭(Linewidth)의 크고 작음으로 판단된다. [그림 2-11]은 발광다이오드(LED: Light Emitting Diode)의 스펙트럼을 나타내며 그림에서 $\Delta\lambda$ 는 선폭을 나타내는데 선폭은 정규화된 광출력(Normalized Output Power)의 1/2 되는 파장의 폭을 말하며 FWHM(Full Width Half Maximum)이라고 정의된다. 현재 [그림 2-11]의 발광다이오드의 스펙트럼에서 선폭은 약 $\Delta\lambda=30$ ns(805-835 ns) 이다. 위에서 언급한 완전한 단일광이란 선폭 $\Delta\lambda=0$ 이라는 뜻이며 실제의 그러한 광원은 존재치 않는다. 따라서 일반적인 광원의 단일성 여부는 선폭을 측정하여 그 선폭의 크기가 적으면 적을 수록 단일광에 가깝다고 말할 수 있다. 스펙트럼 상에서 두 방출을 보면 [그림 2-12]와 같다. 자극 방출의 스펙트럼과 자연방출의 스펙트럼을 보면 그 선폭에서 커다란 차이가 있음을 알 수 있다. 자연방출은 레이저를 동작시키기 시작했을 때 아직 발진이 일어나기 전에 나오는 방출의 과정으로 그 선폭이 자극방출과는 달리 매우 넓게 나타나는 것을 알 수 있다. <표 2-1>은 일반적인 발광램프와 레이저의 선폭을 비교한 표이다. 표에서 보듯이 레이저의 선폭이 더 좁고 더욱 단일성을 갖는 것을 알 수 있다.

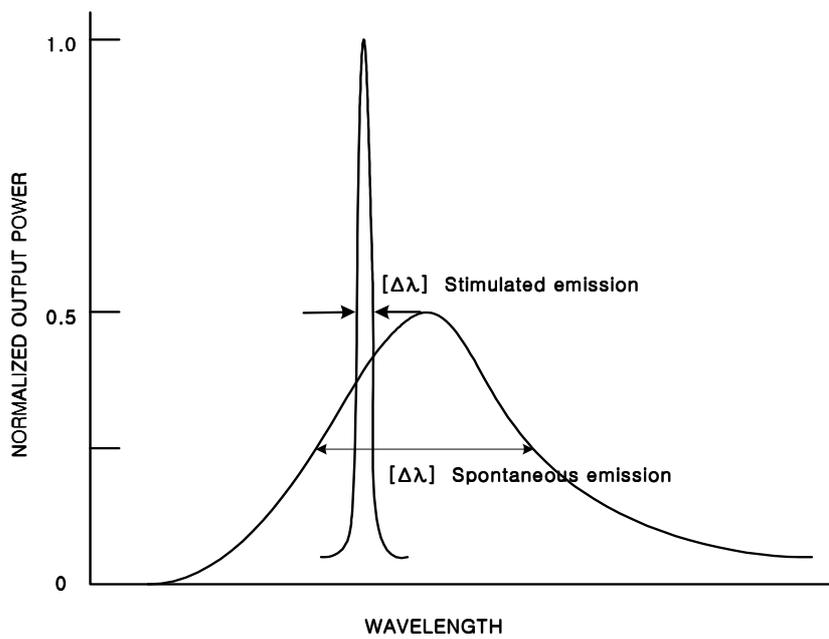
2.1.2. 코히어런스 (Coherence)

레이저의 또 다른 특징은 코히어런스하다는 것이다. 코히어런스의 정의는 다른 시간과 다른 위치에서 광원에서 나오는 광파의 위상의 상관관계의 정도를 말한다. 코히어런스는 시간적 코히어런스와 공간적 코히어런스로 분류된다.

시간적 코히어런스는 광파의 단일성의 정도를 말하고 공간적 코히어런스는 파면(Wavefront)에 걸쳐서 위상의 일치성의 정도를 말한다.

<표 2-1> 광원의 선폭비교

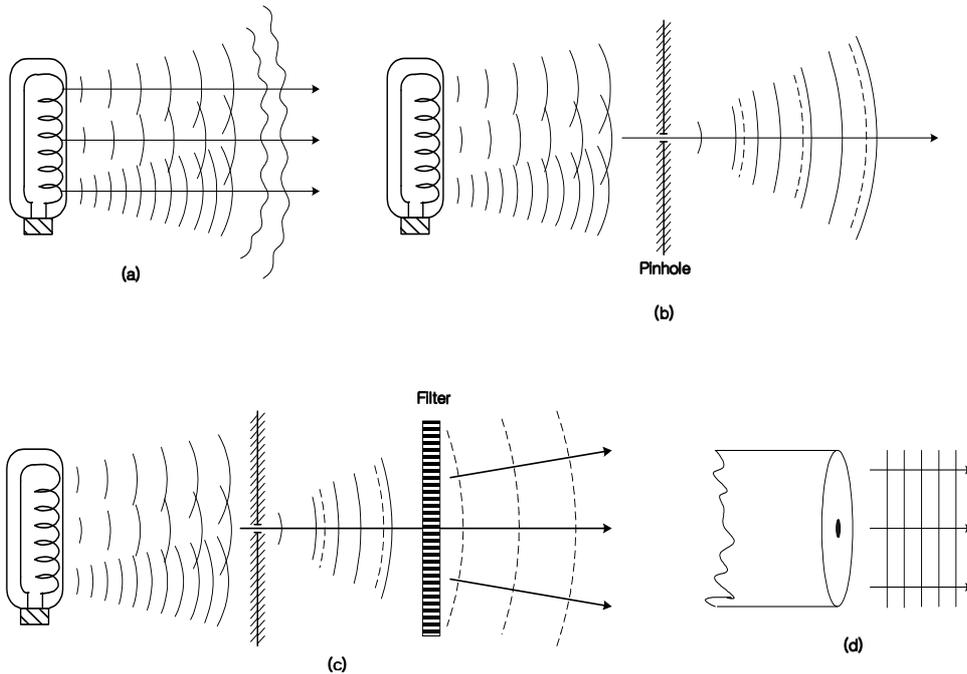
Light source	Center wavelength $\lambda_0(\text{\AA})$	FWHM linewidth $\Delta\lambda(\text{\AA})$	FWHM linewidth $\Delta\nu(\text{Hz})$
Ordinary discharge lamp	5896	1	9×10^{10}
Cadmium low-pressure lamp	6438	0.013	9.4×10^8
Helium-neon laser	6328	10^{-7}	7.5×10^3



[그림 2-12] 자극방출과 자연방출의 선폭비교

일반적인 광원과 달리 레이저는 시간적 및 공간적 코히어런스가 우수하

다. [그림 2-13]은 일반적인 광원으로 텅그스텐 램프(Tungsten Lamp)와 레이저 광원의 시간적 및 공간적 코히어런스를 알기 쉽게 나타낸다. [그림 2-13] (a)는 텅그스텐 램프가 시간적 및 공간적 코히어런스가 나쁘다는 것을 나타낸다. (b)는 Pinhole을 사용하여 공간적 코히어런스를 향상시키는 그림이다. 그러나 시간적 코히어런스는 나쁘다는 것을 나타낸다.



[그림 2-13] 텅그스텐 램프

(c)는 시간적 코히어런스를 향상 시키기 위해서 Pinhole 외에 필터를 사용하는 그림이다. 그러나 그림에서 보듯이 필터를 통과한 빛은 처음 텅그스텐에서 나오던 빛의 세기에 비해서는 많이 적다.

그러나 그림 (d)는 레이저에서 나오는 자연적으로 시간 및 공간적으로 코히어런스가 좋고 출력 광세기도 크다는 것을 보여준다.

[그림 2-13]의 텅그스텐 램프는 코히어런트한 빛을 만들기 위해서는 Pinhole과 필터가 필요하지만 레이저는 자연적으로 코히어런트한 빛을 발생한다.

2.1.3. 방향성(Directionality)

레이저의 빛은 다른 광원에서 나오는 빛과 달리 방향성이 매우 좋다. 예를 들어 햇빛을 유리거울을 사용하여 햇빛의 방향을 자신이 원하는 방향으로 반사시켜서 보낼 수는 있으나 햇빛 자체가 빛의 퍼짐 각도가 크기 때문에 대다수 많은 햇빛이 원하는 정확한 부분으로 모이기가 어렵고 흐트러지는 것을 볼 수 있다. 그러나 레이저 포인터에서 나오는 빛은 우리가 원하는 방향 및 장소에 정확하게 보낼 수 있다. 따라서 다른 광원과 비교해서 레이저의 빛은 방향성이 매우 좋다고 할 수 있다. 레이저의 방향성에서 중요한 요인은 레이저로부터 나오는 빛의 퍼짐 정도이다. 특히 본 연구과 관련하여 레이저 빛이 눈에 미치는 위해성을 고려할 때 방호기계에 장착되는 레이저에서 나오는 레이저 빔의 퍼짐 정도를 알아야 하는 것은 대단히 중요하다. [그림 2-14]는 레이저 빔이 공진기 내부에서부터 외부로 나와서 진행하면서 빛이 퍼지는 것을 보여준다.

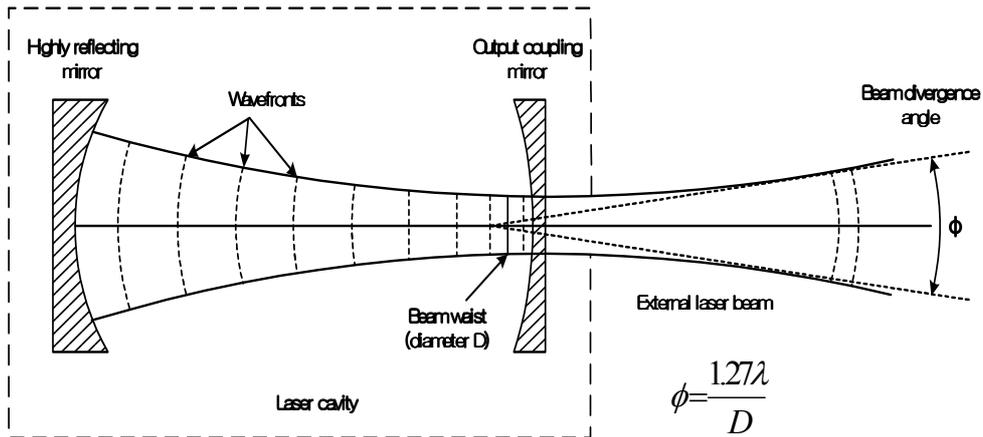
이 그림에서 퍼지는 각도 ϕ 는 다음 식과 주어진다.

$$\phi = \frac{1.27\lambda}{D} \quad (2.8)$$

여기서, λ 는 레이저의 파장이고, D 는 빔의 허리(Beam Waist) 혹은 빔의 직경(Diameter of Beam) 이다. 식 (2.8)을 볼 때 레이저 빛의 퍼지는 각도는 레이저의 파장에 비례하고 레이저 빔의 직경에 반비례함을 알 수 있다. 예를 들어 파장이 632.8 nm인 He-Ne 레이저가 빔의 직경이 0.5mm 일 때

빔의 퍼지는 각도 ϕ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\phi = 1.27 \frac{\lambda}{D} = 1.27 \frac{632.8 \times 10^{-9} m}{5 \times 10^{-4} m} = 1.6 \times 10^{-3} \text{ rad}$$



[그림 2-14] 레이저 빔의 퍼짐

만약 이 He-Ne 레이저가 10m 진행할 때 빔의 폭이 얼마나 되는지를 계산하기 위해서 [그림 2-15]를 참조한다. 이 그림에서 x 는 빛의 진행거리를 나타내고 y 는 빔의 퍼짐 반경을 나타낸다.

[그림 2-15]에 의하여 식 (2.9)와 같이 나타나고, 빔의 퍼짐 반경 y 는 식(2.3)과 같다.

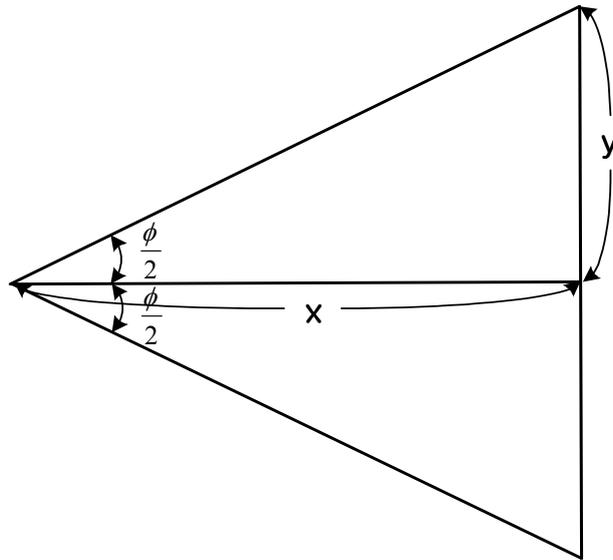
$$\tan \frac{\phi}{2} = \frac{y}{x} \tag{2.9}$$

$$y = x \tan \frac{\phi}{2} \tag{2.10}$$

이때 He-Ne 레이저 빔의 퍼짐 폭(Width) W 는 다음 식과 같이 구해진다.

$$W = 2y = 2x \tan \frac{\phi}{2} = 2 \times 1000 \times \tan(0.8 \times 10^{-3}) = 1.6 \text{ cm} \quad (2.11)$$

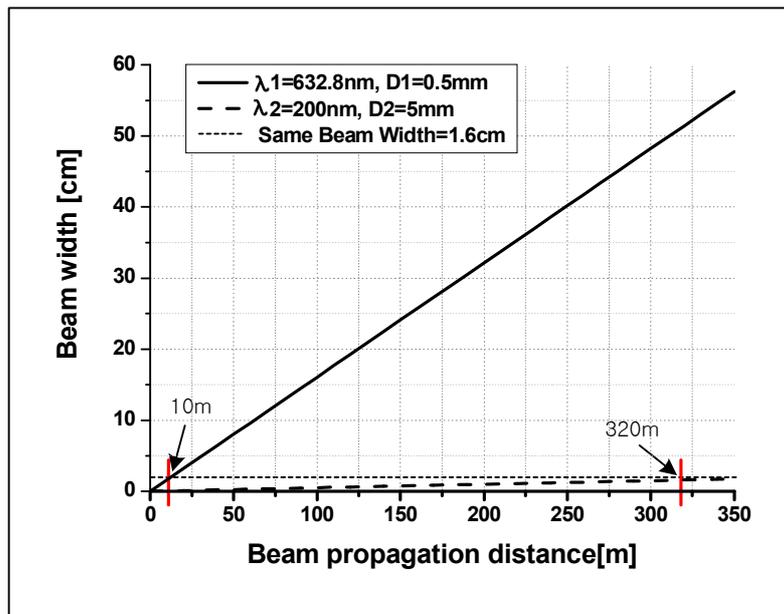
즉 위의 예제의 He-Ne 레이저는 레이저 빔이 10m 진행할 때 빔의 퍼짐 폭이 1.6 cm가 된다는 것이다.



[그림 2-15] 레이저 빔의 퍼짐 폭을 계산하기 위한 그림

또 다른 예로 레이저 빔의 퍼지는 각도 ϕ 를 예제의 He-Ne 레이저보다 적게 만들기 위해서 만약 빔의 직경 D 를 0.5 cm로 만들고 파장 λ 가 200nm 인 레이저를 만들 수 있다면 이 레이저에서 나오는 빔의 퍼지는 각도는 위 식을 사용하여 계산해 보면 5×10^{-5} rad이고, 이때 위의 He-Ne 레이저와 같은 빔의 직경 1.6 cm를 얻으려면 빛의 진행거리가 320 m가 되어야 한다는 계산 결과가 나온다. 즉, 후자의 파장이 200 nm인 레이저가 He-Ne 레이저 보다 퍼지는 각도가 적기 때문에 더 멀리 진행할 수 있다는

결과를 얻을 수 있다. 위의 2가지 레이저의 진행거리 대 빔의 퍼짐 폭을 [그림 2-16] 에 보였다.



[그림 2-16] 레이저 빔의 진행거리 대 빔의 직경(폭)

2.1.4. 초점성 (Focusability)

레이저 및 일반 비레이저 광원(열적광원(Thermal Source)도 포함)도 렌즈를 사용하여 한 점으로 빛을 모을 수 있다. [그림 2-17]은 이상적인 광원(Ideal Source), 일반적인 광원(Ordinary Source) 및 레이저 광원이 볼록렌즈를 통과하여 초점거리(Focal Length)에 맞춰 질 때의 각각의 광원의 빔의 사이즈가 다른 것을 보여준다.

[그림 2-17]의 (a)는 이상적으로 평행광인 광원이 볼록렌즈를 통과했을 때 초점거리에 맺힌 점(Point) 모양의 스폿(Spot)을 보여준다. 즉 이러한 광원은 실제로 존재하지는 않으나 이상적인 경우의 광원이 렌즈를 통과

한 후의 스폿 사이즈와 레이저 및 일반적인 광원이 렌즈를 통과한 후의 초점거리에 맺히는 스폿 사이즈를 비교하기 위해서 의도적으로 그려진 것이다.

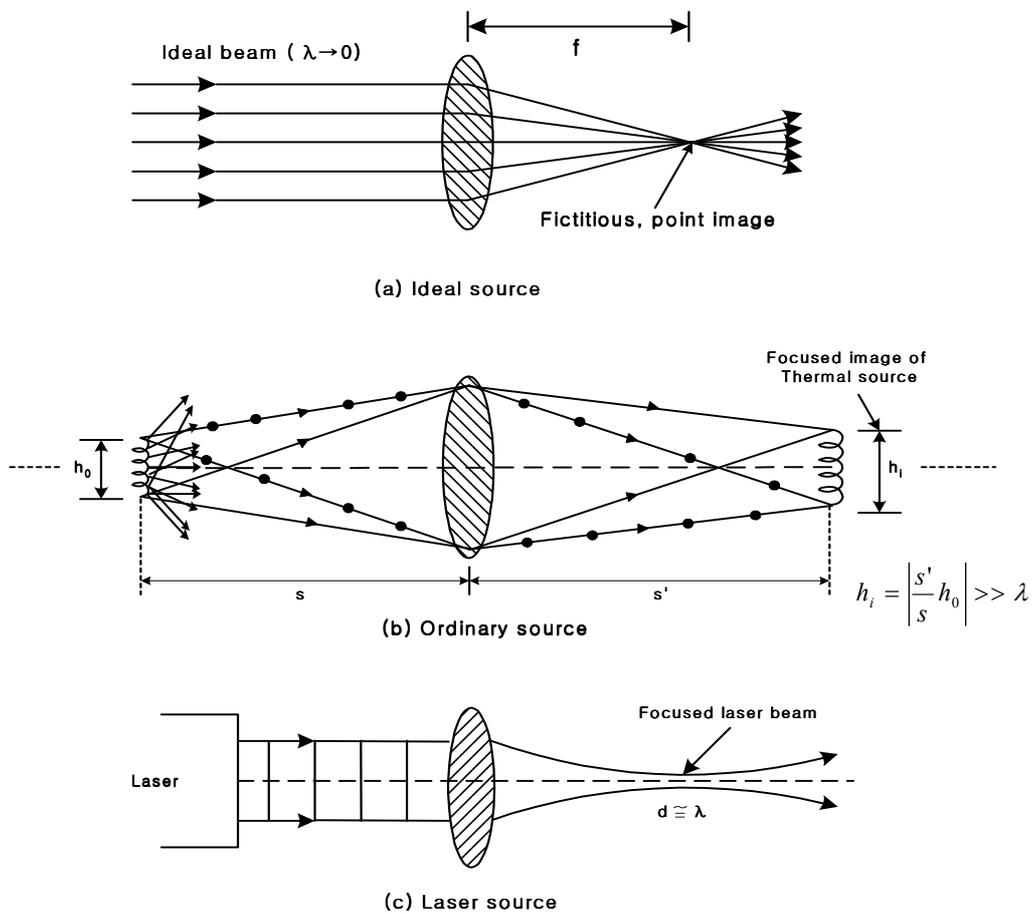
[그림 2-17]의 (b)는 일반적인 비레이저광원, 즉 이 경우에는 열적광원이 발생하는 빛이 렌즈를 통과한 후의 초점거리에 맺혀지는 스폿 사이즈를 보여주고 있다. (a)의 이상적인 광원의 경우와 비교해 볼 때 스폿의 사이즈가 무척 큰 것을 알 수 있다. 이 경우는 앞에서 코히어런스가 (a)의 경우와 비교하여 좋지 않기 때문에 스폿의 크기가 커졌다.

[그림 2-17]의 (c)는 코히어런스가 좋은 레이저 광원의 경우 렌즈를 통과한 후의 초점거리에 맺히는 스폿을 보여준다. 이 그림에서 알 수 있는 것은 레이저 광원은 이상적인 광원의 경우와 비교해서 점 모양의 아주 적은 사이즈의 스폿은 아니지만 (b)의 열적광원의 스폿사이즈와 비교해서 매우 적다는 것을 알 수 있다. 방호기계에 적용되는 센서용 레이저도 렌즈를 통과한다고 가정할 때 작업자의 눈에 어느정도의 위해가 가해지는가를 파악하기 위하여 렌즈의 초점거리에 맺히는 스폿의 사이즈를 아는것은 작업자의 안전성을 위해 필요한 정보이다.

그러면 레이저 빛이 렌즈를 통과하여 초점거리에 맺히는 스폿 사이즈는 어떻게 결정되는지를 살펴보자. 우선 결론적으로 결과만 기술하면 스폿 사이즈 혹은 직경(Diameter) d 는 다음 식과 같이 주어진다.

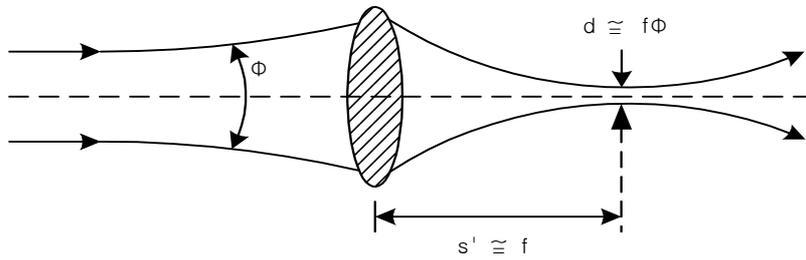
$$d \cong f \phi \quad (2.12)$$

여기서, f 는 볼록렌즈의 초점거리이고, ϕ 는 앞에서 설명한 빔의 퍼짐 각도이다.



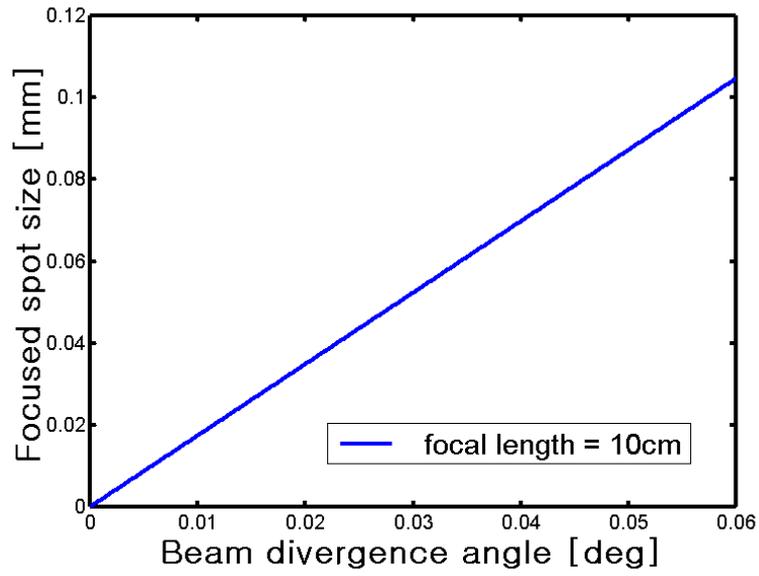
[그림 2-17] 다양한 광원에 따라 초점거리에 맺힌 스폿 사이즈

[그림 2-18]은 레이저빔이 렌즈를 통과한 후 초점거리에 맺히는 스폿의 크기를 보여준다. 예를 들어 방호장치에 적용되는 센서에 적용되는 레이저빔의 퍼짐각도 $\phi = 10^{-3}$ rad 이고, 레이저 앞에 장착된 볼록렌즈의 초점거리 $f = 10\text{cm}$ 일때 초점거리에 맺히는 스폿사이즈는 10^{-4}m 즉 0.1mm 이다.

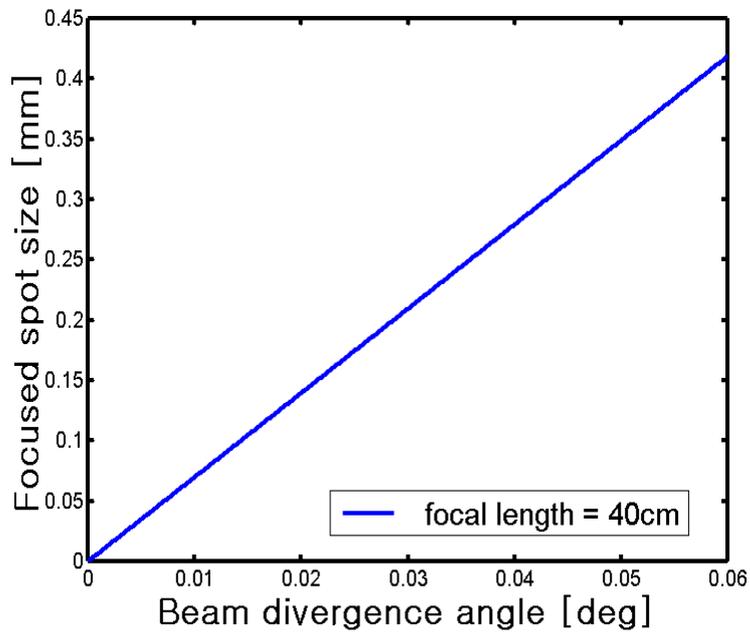


[그림 2-18] 레이저 빔이 렌즈를 통과한 후 초점거리에 맺힌 스폿 사이즈

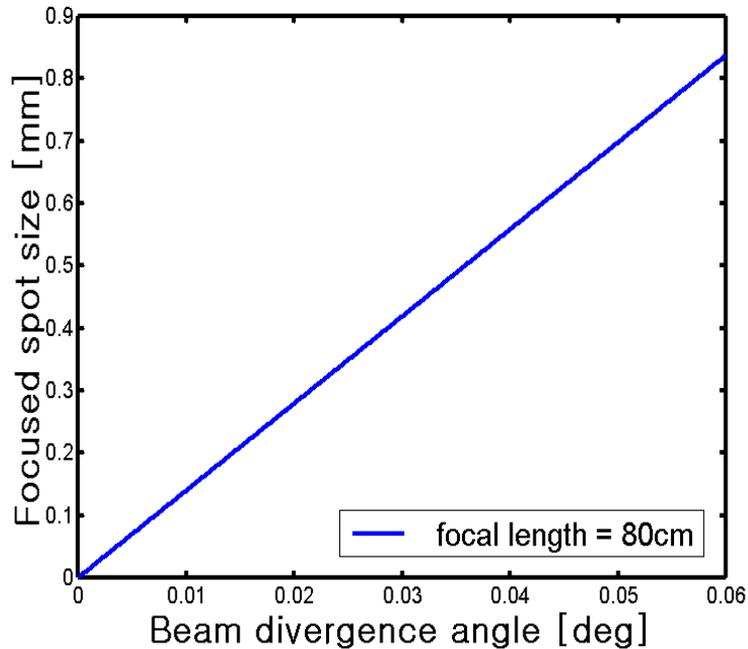
[그림 2-19]에서 [그림 2-21]은 방호장치에 적용될 수 있는 레이저의 퍼짐각도를 변화시키면서 레이저 앞에 장착된 렌즈의 초점거리를 3가지 종류, 10cm, 40cm, 80cm를 사용하였을 때의 초점거리에 맺히는 스폿 사이즈를 계산한 결과이다. 이 그림들에서 알 수 있듯이 레이저 앞에 장착된 렌즈의 초점거리가 길수록 또는 레이저 빔의 퍼짐각도가 클수록 스폿사이즈가 커져서 위험기계에 부착된 센서용 레이저 빔에 많이 노출될 수 있다. 그러나 스폿 사이즈가 적다고 작업자가 레이저빔에 적게 노출된다고 안전하다고 볼 수는 없다. 왜냐하면 레이저 빔의 사이즈가 적으면 적을수록 단위면적당의 광출력이 크기 때문에 일단 인체에 제일 취약한 부분인 눈에 노출되면 스폿 사이즈가 큰 경우 보다 더욱 치명적일 수가 있다. 따라서 방호기계를 설계하면서 방호기계에 장착하는 센서용 레이저 선정 시 레이저의 파장, 광출력 등의 선정도 중요하지만 레이저의 퍼짐각도 및 레이저 앞에 장착되는 렌즈의 초점거리도 중요한 파라미터이기 때문에 고려되어야 한다.



[그림 2-19] 방호장치에 부착된 레이저의 스폿 사이즈($f=10\text{ cm}$)



[그림 2-20] 방호장치에 부착된 레이저의 스폿 사이즈($f=40\text{ cm}$)



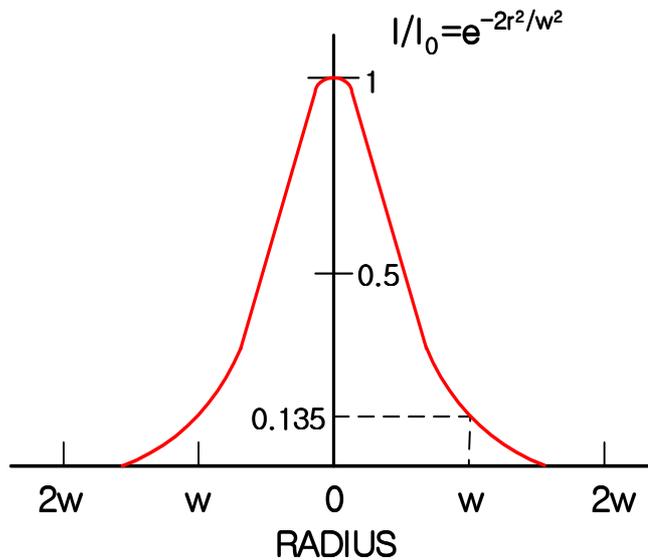
[그림 2-21] 방호장치에 부착된 레이저의 스폿 사이즈($f=80\text{cm}$)

2.2 방호장치에 적용되는 레이저의 위해성

2.2.1 레이저의 강도(Intensity)

본 연구과제에서 핵심이 되는 것은 방호기계에 부착된 센서용 레이저가 작업자의 피부 및 눈에 노출될 경우 다른 광원과 달리 치명적일 수 있기 때문에 이에 대한 연구가 필요하다. 먼저 레이저의 빛이 인체의 눈 및 피부에 위해를 가하는 것은 레이저 빛의 강도의 크기가 영향을 미치므로 레이저 빛의 강도에 대한 이론적인 분석이 필요하다. 레이저 빛의 강도를 알아보기 위해서는 먼저 레이저에서 나오는 빔의 사이즈를 정의할 필요가 있다. 일반

적으로 레이저에서 나오는 빔의 강도는 Gaussian 분포에 따라 형성된다. [그림 2-22]은 레이저의 강도가 Gaussian 분포에 따라 형성되어 있는 것을 보여준다.

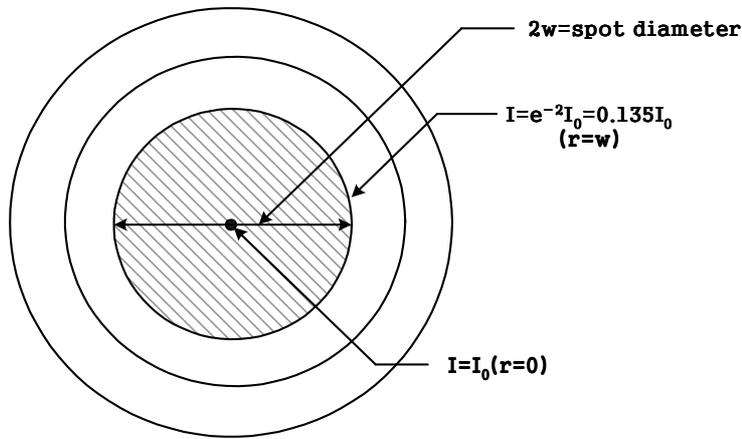


[그림 2-22] Gaussian 분포를 갖는 레이저 강도

이때 레이저의 강도는 다음 식과 같이 주어진다.

$$I = I_0 e^{-2r^2/w^2} \quad (2.13)$$

여기서, I_0 는 정규화된 레이저 강도이고, r 은 스폿의 중심으로부터 변화하는 반경을 나타내고, w 는 스폿의 반경을 나타낸다. 즉 스폿의 중앙에서(즉 $r=0$) $I=I_0$ 로 최대강도를 나타내고, 반경이 w 인 지점(즉 $r=w$)에서는 $I = e^{-2}I_0 = 0.135I_0$ 가 되며 최대강도의 13.5%가 되는 지점을 지칭하는데 통상 $2w$ 를 스폿의 직경으로 정의하고 그 이외의 지점($r > w$)의 강도는 무시한다. [그림 2-23]는 스폿의 강도를 나타낸다.



[그림 2-23] 스폿의 직경

<표 2-2>는 다양한 레이저빔의 직경, 빔의 퍼짐정도, 파장, 광과워 등을 나타낸다. 이 표에 나타나 있듯이 He-Ne 레이저는 기체 레이저로서 빔의 직경은 대단히 적은(0.5~2mm) 대신에 광과워가 0.1~50mW로 비교적 적은 편이다.

그러나 같은 종류의 기체 레이저인 CO_2 레이저는 빔의 직경은 3-4 mm 인데 광과워가 CW(Continuous Wave) 동작에서 3~100W로 대단히 큰 편 이어서 공업용으로 많이 쓰인다. <표 2-2>의 마지막에 있는 반도체 레이저 는 방호장치에 적용될 레이저로서 광센서 및 광통신의 광원으로 주로 쓰인 다.

반도체 레이저의 특성을 살펴보면 위의 표에 열거된 다른 레이저와는 달 리 빔의 퍼짐정도가 빠르고 크기 때문에 빔의 직경을 측정 하는 것은 불가 능하다. 따라서 반도체 레이저의 이러한 특성으로 인하여 반도체 레이저를 실제의 방호기계에 장착하여 센서로 적용을 하면 레이저의 빛이 너무 빨리 퍼지고 빔의 직경이 크기 때문에 빛을 감지하는 수광기에서는 빛을 감지하 기 어렵다. 따라서 반도체 레이저를 방호기계에 적용하기 위해서는 레이저

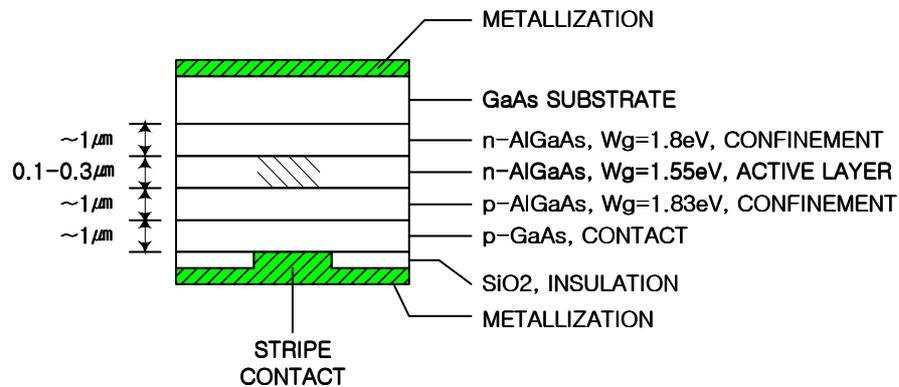
앞에 렌즈가 달린 것으로 사용하여야 하며 렌즈의 초점거리에 반도체 레이저를 놓아서 반도체 레이저의 빛이 멀리 갈수 있는 평행광(Collimated Beam)을 만들어 주어야 한다.

<표 2-2> 다양한 레이저의 특성

Type	Wavelength	Power/energy	Type of output	Beam diameter	Beam divergence
Helium-neon(gas)	632.8 nm	0.1-50 mW	cw	0.5-2 mm	0.5-1.7 mrad
Ruby(solid)	694.3 nm	0.03-100 J (per pulse)	pulse	1.5 mm-2.5 cm	02-10 mrad
Carbon dioxide(gas)	10.6 μ m	3-100 W	cw	3-4 mm	1-2 mrad
Nitrogen(gas)	337 nm	1-300 W (average per pulse)	pulsed	2×3-6×30 mm (rectangular)	1-3×7 mrad
Nd:YAG(solid)	1.064 μ m	0.04-600 W	cw	0.75-6 mm	2-18 mrad
Nd-glass(solid)	1.06 μ m	0.15-100 J (per pulse)	pulsed	3 mm-2.5 cm	3-10 mrad
Argon ion(gas)	488 ns or 514.5 nm	5 mW-20 W	cw	0.7-2 mm	0.4-1.5 mrad
Dye(liquid)	400-900 nm (tunable)	20-800 mW	cw/pulsed (pumped by argon ion laser)	0.4-0.6 mm	1-2 mrad
Argon fluoride	193 nm	Up to 10 W (average per pulse)	pulsed	6×23-20×32 mm (rectangular)	2-6 mrad
Gallium arsenide (semiconductor diode)	780-900 nm	1-40 mW cw or average per pulse	cw/pulsed	N/A (diverges too rapidly)	200×600 mrad (oval in shape)

2.2.2 방호장치에 적용되는 레이저

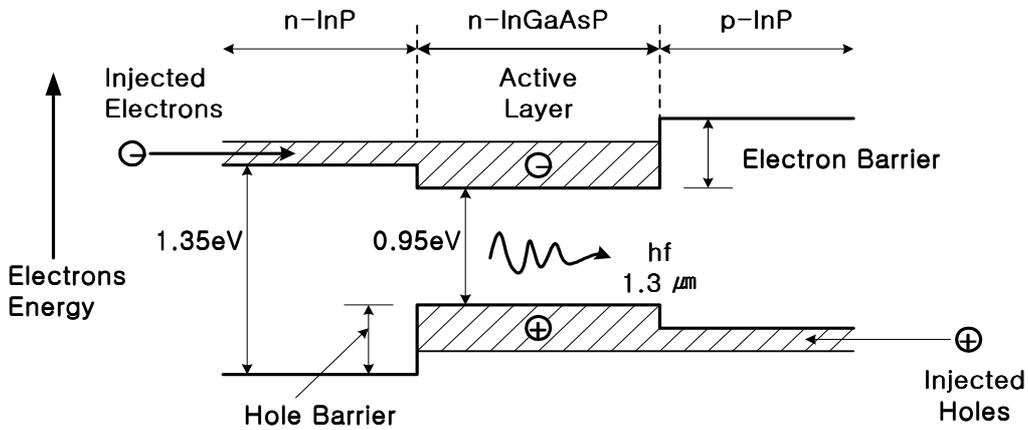
방호기계에 적용될 수 있는 레이저는 반도체 레이저 및 발광다이오드(LED: Light Emitting Diode)이다. 반도체 레이저의 구조는 [그림 2-24]에 나타나 있다. 그림에서 반도체 레이저의 빛을 발생하는 곳은 [그림 2-24]에 있는 활성영역층(Active Layer)이다. 활성영역층을 위 아래로 덮고 있는 층은 클래딩영역으로 활성영역층보다 굴절률이 적은 물질로 제작하여 활성영역층이 빛의 도파로 구실을 하도록 제작한다. 반도체 레이저의 발진 원리는 앞에서 설명한 레이저 발진 원리와 같으나 반도체 레이저에서는 양쪽의 거울면을 인위적으로 공진기 외부에 만드는 것이 아니라 활성영역층 좌우면을 그라인더 같은 장비로 갈아서 양측면이 거울면의 기능을 하도록 한다.



[그림 3-24] 반도체 레이저의 구조

[그림 2-25]는 발광다이오드의 동작 원리를 설명한다. 발광다이오드에서 빛을 생성하는 것은 n-InP 영역에서 전자를 p-InP 영역에서 정공을 제공하여 전자와 정공이 활성영역층으로 이동하여 결합과 함께 광자를 발생하여

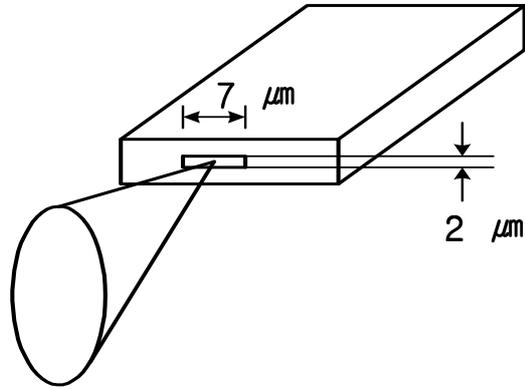
빛을 생성하게 된다.



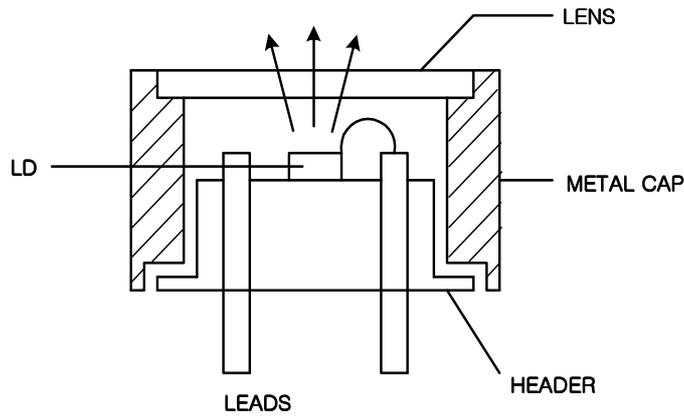
[그림 2-25] 발광다이오드의 동작원리

반도체 레이저도 마찬가지로 원리로 활성 영역층에서 전자와 정공이 결합하여 빛을 생성하는데 [그림 2-26]에 나타나 있고, 활성 영역층의 사이즈가 가로 세로 약 $7\mu\text{m}$ 와 $2\mu\text{m}$ 이다. 출력 되는 빔의 패턴은 수직인 평면과 수평인 평면으로 나누어서 볼 때 빔의 퍼지는 각도가 서로 달라서 전체적으로 타원형의 빔의 형태를 보이고 빔의 퍼지는 각도가 앞서 언급된 He-Ne 레이저와는 달리 매우 커서 빔이 멀리 진행하지 못한다. 따라서 센서의 광원으로 사용하기 위해서는 평행광을 만들 수 있는 렌즈를 부착하여 사용해야 한다. 이를 위해 일반적으로 렌즈를 부착한 반도체 레이저를 많이 사용하는데 이러한 반도체 레이저의 구조는 그림 [2-27]에 나타나 있다.

또한 반도체 레이저는 전류를 한계전류 이상 증가시켜야 자극방출이 시작되어 빛이 증폭되고 출력 광파워가 급격히 증가하지만 한계전류 이하에서는 자연방출만 이루어져 빛의 증폭이 이루어지지 않아서 출력 광파워가 대단히 적다.

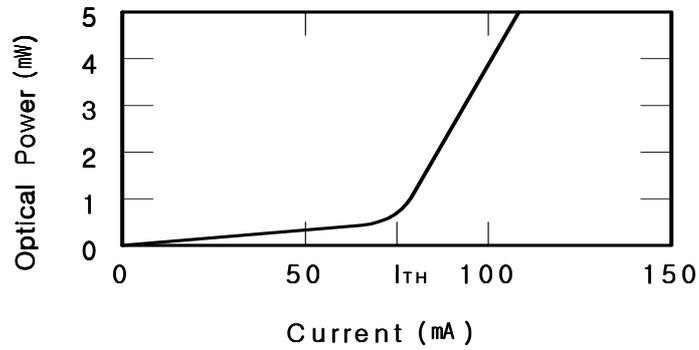


[그림 2-26] 반도체 레이저의 활성영역층 및 출력 빔의 패턴



[그림 2-27] 렌즈가 부착된 반도체 레이저의 구조

이러한 한계전류를 문턱전류(Threshold Current)라고 하고 반도체 레이저의 광파워-전류 즉 P-I 관계를 나타내는 곡선을 P-I 곡선이라고 한다. [그림 2-28]에 반도체 레이저의 P-I 곡선을 나타내었고, 이 그림에서 I_{th} 는 문턱전류를 지칭한다.



[그림 2-28] 반도체 레이저의 P-I 곡선

2.2.3 레이저의 등급 및 레이저 안전 용어

레이저의 등급은 미국 켄터키대학의 레이저 안전연구실 및 ANSI에서 분류한 내용을 참조했다.

가. I 급 레이저

이 레이저는 일반적으로 지속파로서 $0.4 \mu W$ 정도로서 출력이 매우 낮다. 1급 레이저의 예는 레이저 프린터 내부에 장착된 스캔용 레이저, 콤팩트 디스크 플레이어 내에 장착된 레이저, CD ROM용 레이저등에 쓰인다. 출력이 낮기 때문에 특별한 통제조건이나 경고표시가 필요없다. 그러나 직접적으로 사람의 눈에 노출시키는 것은 피해야 한다.

나. II 급 레이저

이 레이저는 낮은 출력의($< 1mW$) 가시광선 레이저이지만 인체의 눈에 노출될 경우 위해를 가할 수 있다. 2급 레이저의 예의 대표적인 것은 레이저 포인터이다. 2급 레이저를 장시간(15분 이상) 눈에 노출되면 위험하다.

따라서 2급 레이저를 자신의 눈에 직접 비추는 것은 위험할 뿐만 아니라 다른 사람의 눈에 비추어도 안 된다.

다. IIIa 급 레이저

이 레이저는 지속파로서 1-5 mW 정도의 광출력을 갖는 레이저이다. IIIa 등급에 속하는 레이저의 예로서는 위의 II급 레이저인 레이저 포인터 또는 레이저 스캐너 등이 포함된다. IIIa 급 레이저를 직접 눈으로 보는 것은 매우 위험하다. 따라서 자신 및 타인의 눈에 이 레이저를 겨누어서는 안 되며, 더욱이 렌즈등의 집광렌즈를 통해서 보아서는 더욱 더 위험하다.

라. IIIb 급 레이저

이 레이저는 지속파로서 5-500 mW 정도의 펄스동작으로 10 J/cm² 정도의 광출력을 갖는 레이저이다. IIIb 등급에 속하는 레이저의 예로서는 레이저 쇼에 쓰이는 레이저 등을 들 수 있고, IIIa 급 레이저와 마찬가지로 눈으로 직접 보는 것은 위험하다.

마. IV 급 레이저

이 레이저는 고출력 레이저로서 지속파로서는 500mW 이상이고 펄스동작으로서는 10 J/cm² 이상의 광출력을 갖는다. IIIb 등급에 속하는 레이저의 예로서는 공업용, 의료용으로 쓰이는 레이저로서 의료용은 수술용으로 공업용은 용접 및 커팅의 용도로 쓰인다. 이 레이저가 직접적 혹은 간접적(반사파)으로 인체의 눈 및 피부에 노출되면 치명적이므로 세심한 주의가 필요하다. 따라서 IV 급 레이저가 설치된 장소에서는 경고 사인을 부착하는 것은 물론이고, 눈을 보호하는 안경을 꼭 착용하여야 한다. 또한 레이저 주변에

빛이 반사가 될 수 있는 어떠한 물체라도 있으면 레이저 빛이 반사되어 눈에 치명적인 결과를 초래 할 수 있으므로 모든 반사 될 수 있는 물체는 레이저 주변에서 먼 곳으로 띄어 놓아야 한다

다음으로 레이저의 안전과 관련된 용어를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 최대 허용 노광량(Maximum Permissible Exposure, MPE)

인체의 눈 및 피부에 조사하여도 해로운 영향을 주지 않는 범위내의 최대의 방사 레벨을 말한다.

(2) 피폭 방출 한계(Accessible Emission Limit, AEL)

레이저 제품의 각 급에서 정한 최대 피폭 방출 레벨을 말한다.

(3) 한계시각(Limiting Angular Subtense)

단위는 rad 이며, 기호로는 α_{min} 로 표시하며, 관측자의 눈 위치에서 바라본 레이저 광원의 대응 시각을 말하며, 점광원 시각 (Small-Source Viewing)과 확산광원 시각 (Extended-Source Viewing)으로 분류가 되며 $\alpha_{min}=1.5$ mrad 으로 정한다. 즉 1.5 mrad보다 적으면 점광원으로 크면 확산광원 시각으로 분류한다.

(4) 공칭 안장해 거리(Nominal Ocular Hazard Distance, NOHD)

레이저의 방사노광이 눈에 대한 최대 허용 노광량(MPE)과 같아지는 곳의 레이저 광원으로 부터의 거리를 말한다.

이 용어들은 다음의 3절에서 방호장치 적용조건에서의 레이저의 위해성 평가를 위하여 사용되어질 파라미터들이다.

3. 레이저의 위해정도 분석 및 평가

본 장에서는 방호장치에 적용되는 레이저의 위해 정도를 분석 및 평가하려고 한다. 인체의 피부 및 눈에 미치는 위해성을 분석 및 평가하기 위해서 눈과 피부의 구조 및 레이저에 대한 생물학적인 반응을 한국 산업 규격 [36]에서 레이저 제품의 방사 안전 기준을 참고로 작성하며 그 위해 정도를 분석 및 평가 하고자 한다.

3.1 눈의 구조 및 생물학적인 반응

3.1.1 눈의 구조

안구는 지름 약 24mm의 구형으로서 바깥쪽의 대부분은 각막이라 불리는 두께 약 1mm 의 희고 튼튼한 결합조직으로 이루어져 있다. 앞면의 안털 사이에 투명한 각막 (흔히 말하는 검은자위)과 결막으로 덮여진 각막(흔히 말하는 흰자위)이 보인다.

각막은 두께 0.5mm 로서 상피, 내피 및 실질로 나누어진다. 상피는 결손 되면 강한 통증, 눈물이 나거나 눈부심 등의 증상을 일으킨다. 세균 감염에 대한 저항력이 극단적으로 떨어진다. 그러나 상피의 재생력은 극히 좋다.

내피가 결손되면 방수가 각막 실질 내에 침입하여 각막에 부종이 생겨 백탁된다. 내피의 재생력은 극히 약하기 때문에 장애가 일어나면 개선을 바랄 수 없다.

각막을 통하여 안구 내의 일부, 홍채와 동공이 보인다. 홍채와 각막 사이는 전방이라 불리며 혈청과 비슷한 투명한 액체로 채워져 있으나 정상 상태 일 때 이 부분은 투명하다고 볼 수는 없다. 홍채에 있는 평활근은 자율신경의 작용으로 수축 이완되어 동공의 크기를 바꾼다. 홍채의 색은 색소 함유

량에 따라 다르며 갈색 눈이나 청색 눈이 된다.

동공의 크기는 청년기에 가장 크며 노인, 유아는 작다. 일반적으로 실내에서 5mm 전후의 지름을 갖는다. 밝은 곳, 가까운 곳을 보았을 때 잠잘 때 등에는 동공 지름이 작아지고, 어두운 곳 먼 곳을 볼 때 긴장 시에는 커진다.

동공의 바로 뒤에 수정체가 있다 주변을 털 모양체가 지지하고 그 작용에 의해 수정체의 두께가 변하고 핀트를 맞춘다. 나이와 함께 수정체가 단단해지며 조절의 폭이 좁아진다. 또, 나이와 함께 수정체가 황색을 띠고 단과장광을 감소하도록 작용한다.

수정체는 나이, 열, 외력, 염증, 방사선등으로 쉽게 백탁되고 이 상태를 백내장이라 한다. 백탁은 비가역적이며 영속한다. 백탁이 강하면 동공 내에 수정체를 볼 수 있으나, 정상 상황에서는 투명하기 때문에 육안으로는 보이지 않는다.

수정체의 뒤는 초자체라 불리는 젤리 모양의 투명한 물질로 채워져 있다. 초자체보다도 안쪽을 관찰하려면 특별한 장치가 필요하다.

강막의 내벽에는 초자체에 접하여 망막이 있고 다시 망막 색소 상피, 맥락막의 순서로 강막 방향의 층상구조 조직으로 되어있다. 망막은 반투명한 0.2 mm 정도 두께의 막이다. 초자체 쪽에 신경선 줄기층, 이어서 신경 세포의 층, 시세포의 순서로 이어지고 시세포는 망막 세포상피에 밀착되어 있다.

시세포에는 2종류가 있으며 각각 추체(錐體). 간체라 부른다. 추체는 안축 중앙부에 있는 황반부. 특히 중심와(窩)에 밀집하고 극히 분해능이 양호한 장소이다. 중심와에서는 시력 1.0 (시각1분)의 분해능이지만 약간 벗어나면 시력은 0.1이 된다.

추체는 색의 식별도 한다. 간체는 분해능이 나쁘고 색의 식별도 할 수 없으나, 감도는 양호하다. 간체가 장애를 받으면 야맹, 시야 협착을 일으키고 추체가 장애를 받으면 시력저하를 일으킨다. 추체의 최대 감도는 파장

555ns 부근, 간체의 그것은 515ns 부근에 있다. 감도는 밝기에 따라 변하며 밝기에 따라 변하며 밝아지면 저하, 어두워지면 상승하지만 추체에서는 그 시정수가 짧고 간체에서는 길다. 그 때문에 극단적으로 밝거나 어둡지 않은 일상에서 양자의 작용 정도는 꽤 복잡하여 추정이 어렵다.

시세포에서 가시광이 흡수되면 그 자극은 쌍극 세포, 층상 세포의 순서로 전해지며, 층상 세포에서 나온 신경선 줄기가 안구 코, 폭 15° 부근에 있는 유두에 모이고, 시신경이 되어 안구로부터 나온다. 이 유두 부분에는 망막이 없기 때문에 그 부분에 생긴 상은 보이지 않는다[맹점盲點].

망막을 앞면 각막 방향에서 보면 중앙부에 약간 노랑을 띤 황반부. 그 중앙부의 점모양의 중심와가 보이고 코 쪽 15°, 아래쪽 1° 인 곳에 흰 원형의 시신경 유두가 보인다. 유두부에는 시신경만이 아니고 동정맥 내상, 내하, 외상, 외하의 4방향에 분기되어있다.

시세포의 바로 아래에는 일층의 색소를 포함하는 세포층(세포 색소 상피)이 있으며 대부분의 빛은 여기에서 흡수된다. 이 세포층과 각막 사이는 색소, 혈관에 풍부한 맥락막이 있다.

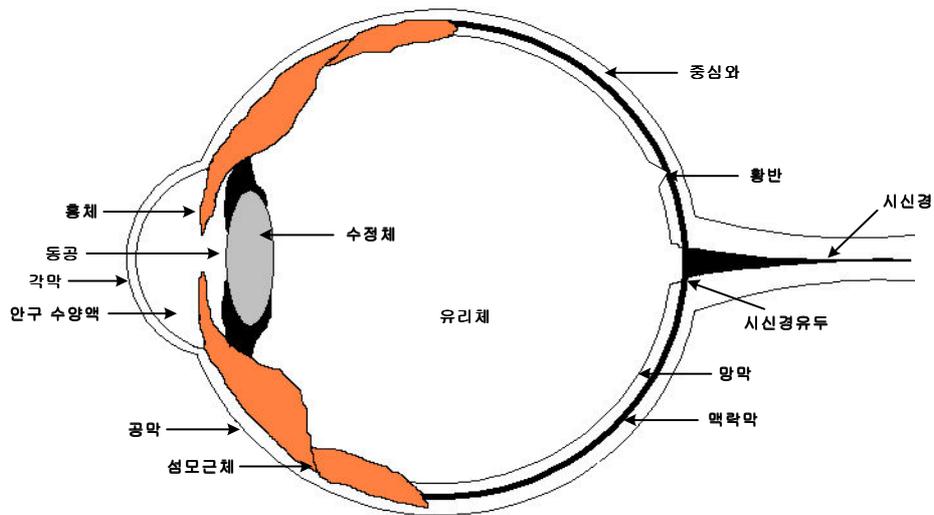
3.1.2 레이저에 대한 생물학적인 반응

자외선 또는 1500ns 보다도 장파장인 원적외선에서는 눈 안에 빛이 거의 들어가지 않고 각막 표층에 에너지가 흡수된다. 이 때문에 조사부위 표면에 영향을 준다.

가시광 및 근 적외선(400~1200nm)에 대하여 각막 및 수정체는 투명하고 그 집광 작용에 의해 안저에서는 단위 면적당 레이저 광 강도가 쉽게 각막면 상의 10⁴배로도 된다. 이것은 눈이 레이저 광으로 장해를 받기 쉬운 것의 한 가지 원인이다.

안저에서의 빛의 흡수율은 파장이 짧을수록 크지만, 400nm보다도 단파

장 쪽에서는 광로 도중에서의 흡수도가 커지기 때문에 안저에 거의 도달하지 않는다. 청색광은 흡수율이 안저에서는 크고 장파장이 됨에 따라 흡수율이 감소한다. 이와 같은 사실에서 청색광이 가장 안저에 영향을 주기 쉽고 파장이 길어지면 안저까지 도달하여도 흡수율이 작기 때문에 에너지의 집중력이 줄어들고 영향력이 작아진다.

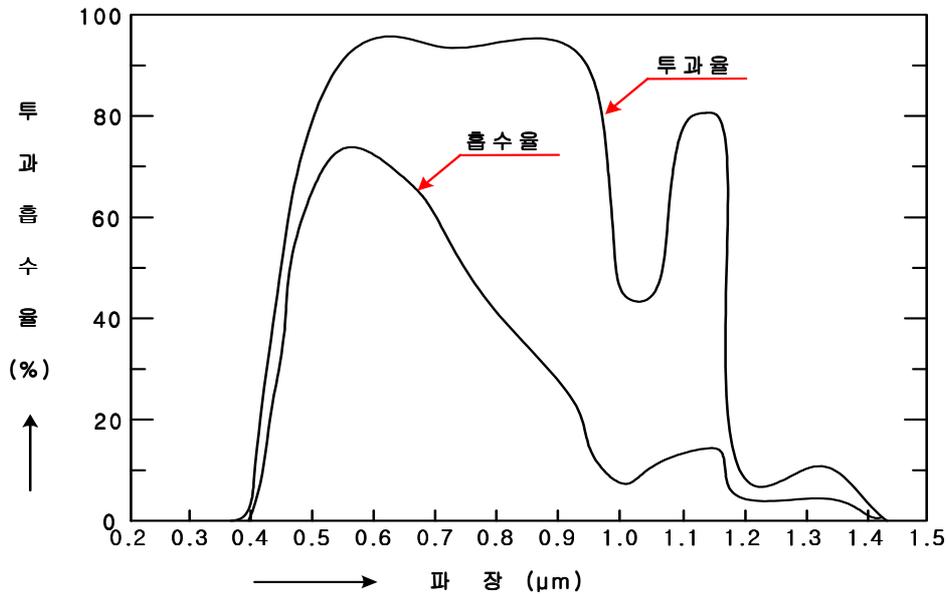


[그림 2-29] 오른쪽 안구의 수평 단면도

[그림 2-30]에 각막으로부터 들어온 빛의 안저까지의 투과율과 안저에서의 흡수율(양자 모두 각막위를 100%로 한다.)의 파장의 관계를 표시한다. 1200 ~ 1500nm까지의 파장의 빛은 약간 파장이 달라짐에 따라 눈 안 조직의 투명도가 크게 다르며 파장이 길어질수록 불투명해진다. 1300nm인 빛에서는 눈 안에서는 흡수율이 꽤 크게 각 부분에서 흡수되며 1곳에 에너지가 집중되지 않는다.

레이저 광이 눈에 조사되었을 때 반응은 온도 상승에 따른 조직 구성 단백질의 변성 파괴 및 광화학 반응에 의한 장애와 플라즈마류나 압력파에 의

한 파괴의 3종류가 있다. 단독으로 또는 복수의 형태로 장애가 발생한다.

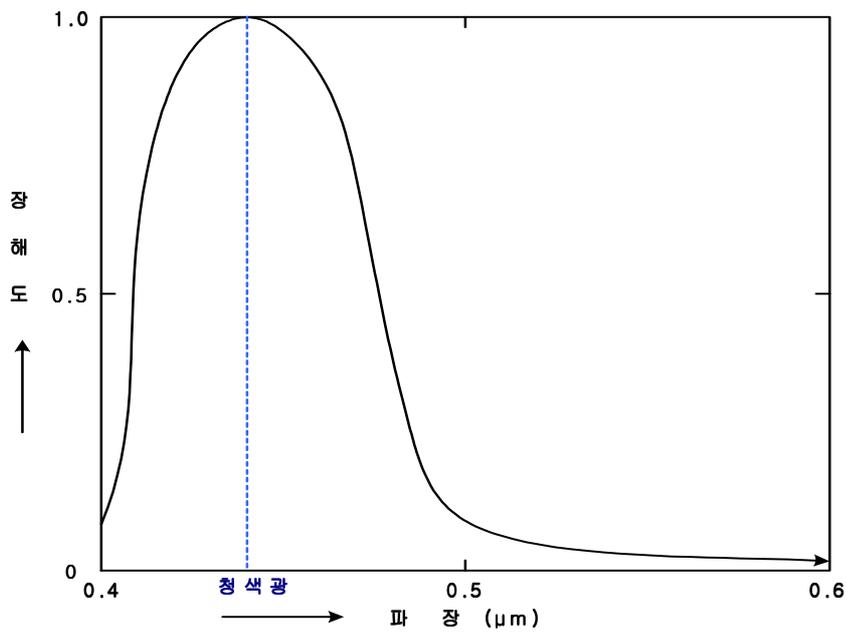


[그림 2-30] 광의 파장과 안구 투과율 및 안저 흡수율

온도 상승은 광에너지가 1곳에 집중할수록 일어나기 쉽다. 탄산가스 레이저의 원적외선에서는 각막의 극히 표면에 에너지가 집중되어 장애를 일으킨다. 아르곤 레이저(녹색)에서는 망막색소 상피층에서 대부분의 빛이 흡수되기 때문에 그 부분의 온도 상승으로 망막에 장애를 초래한다. 1300nm의 근적외선 레이저에서는 흡수 장소가 분산되기 때문에 온도 상승이 작아진다.

시세포는 가시광선을 흡수하여 그 정보를 시신경에 전하지만, 과량의 가시광선에 의해서는 광화학 반응을 일으켜 시세포가 장애를 받는다. 이 반응은 온도 상승이 생기지 않는 정도의 비교적 약한 빛으로 일어난다. 태양광을 장시간 (30-60초간) 관찰하면 생기고, 또 일반 텅스텐 등에서도 일어날 수 있다.

망막의 광화학 반응은 단파장만큼 강하지만, 도중의 안내 조직에서 400nm 이하의 단파장광은 흡수되기 쉽다. 가장 영향이 큰 것은 435-440nm 파장의 빛으로서 청색광 장애라 부른다. 435-440nm 파장에서의 장애를 1로 했을 때 다른 파장에서의 장애도를 [그림 2-31]에 표시한다.



[그림 2-31] 청색광에서의 장애를 1로 했을 때의 장애도

적외선에서 눈 조직의 광화학 반응은 알려져 있지 않다. 자외선은 각막 표층에서 흡수되어 각막 상피의 장애를 일으키고 강한 통증과 눈물을 흘린다. 흔히 말하는 “설맹”은 이것에 의한 것이다. 수정체의 광화학 반응에 의한 장애는 알려져 있지 않다.

광화학 반응은 조사 직후에는 생기지 않고 6-12 시간 후에 발견된다. 이 동안에 재조사가 있으면 누적효과가 생긴다.

단위 면적당 강도가 극단적으로 크면, 광학적 항복을 일으키고 플라즈마류, 압력파에 의해 주변 조직의 파괴 일어난다. 홍채, 망막, 맥락막 등의 혈

관이 장애를 받으면 안구 안으로의 출혈이 생긴다. 때로는 상당한 큰 출혈이 된다. 장애 부위와 시기능의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

(1) 각막의 장애

각막 표층에 장애가 국한되어 있으면 쉽게 치유되고 후유증은 남지 않는다.

각막 실질의 장애에서는 부정난시나 불투명화가 남고, 장애 범위가 넓으면 각막의 렌즈 작용이 손상되어 시력의 저하를 초래한다. 각막 내피에 까지 장애가 퍼지면 각막의 불투명화, 부종이 남고, 시력이 저하는 강하게 영속된다. 후유증의 치료에는 콘택트 렌즈를 사용하고 특히 증상이 심할 때는 각막 이식이 필요하다.

(2) 수정체

수정체가 백탁된 경우(백내장)에는 적출 수술을 한다.

(3) 망막

망막에는 재생 능력이 없기 때문에 장애가 영속된다. 주변부 망막의 작은 장애에서는 자각 증상은 거의 없지만, 황반부 특히 중심와의 장애는 시력의 저하가 심하고 색각도 장애를 받는다.

(4) 초자체

초자체로 망막으로부터의 출혈이 많으면 초자체의 흐름이 남는다. 그 양이 많으면 시력의 저하, 시야 결손이 일어나고 그 양이 적으면 비문증이 된다.

다음으로 눈의 의학적 관리면에서 살펴보면 눈은 레이저 광의 조사로 장해를 받기 쉬운 기관이지만, MPE값 이하의 약한 빛의 조사누적에 의한 장해는 알려져 있지 않다. 따라서 정기적인 전안부, 안저 등의 특별한 안과 검진은 예방면에서 유효성이 적다. 오히려 정기적인 안장해에 대한 교육이 바람직하다.

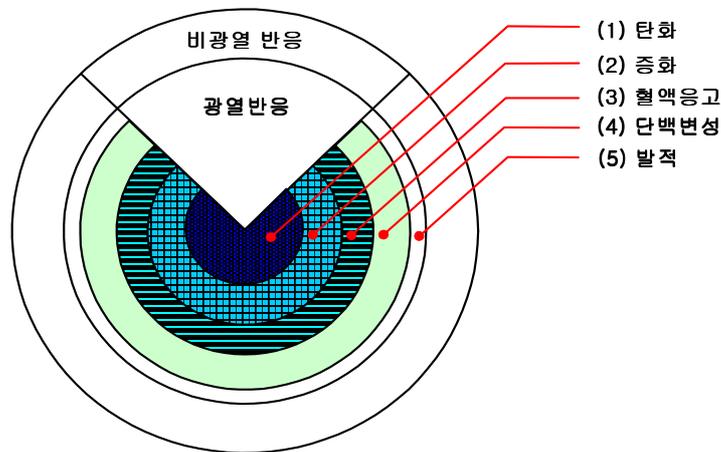
3.2 피부의 구조 및 생물학적인 반응

피부는 표면적이 넓기 때문에 레이저 방사에 우발적으로 또한 반복적으로 피복되기 쉽게 되어 있다. 자외, 가시광 및 적외 영역의 레이저를 피부에 조사하여도 생체학적으로 보면 피부손상은 일반적으로 회복 가능하며 가역성이 있으므로 눈의 조사만큼 중대한 것은 아니다. 그 영향을 크게 나누어 열 반응과 비열 반응으로 분류된다.

인체는 체온이 36.5°C인 항온동물이며 가열에 의해 피부 온도가 상승하면 피부에 발적, 단백변성, 혈액응고, 증화, 탄화 등의 반응이 일어난다. 레이저를 피부에 조사한 경우, 줄 열이 피부조직에 발생하여 조직의 온도를 상승 시킨다. 따라서 레이저의 파워밀도를 제어함으로써 피부 온도를 제어하고 거기에 대응하는 피부의 반응을 일으킬 수가 있다. 또 파워 밀도를 높이고, 조사 면적을 넓히면 그 손상은 피부만이 아니라 피하조직 및 기관에까지 미친다. 한편 레이저 광을 인체에 조사하여 36°C 이하에서 일어나는 생체 반응을 비열 반응이라 하여 광화학 반응, 전자 반응, 압반응, 이온화 반응 등이 포함된다. 이 비열반응의 영역은 파장 의존성이 높다. 1064nm의 Nd-YAG 레이저는 콜라겐 선 유지의 증식을 억제하고 아르곤 레이저나 헬륨-네온(He-Ne) 레이저는 피부 궤양부에서의 표피화를 촉진시키고 830nm의 GaAlAs 반도체 레이저는 피부혈행을 높인다.

비응집성 자외광을 사용한 연구에서는 UVA(315~400nm)에 의한 피폭

에 의해 피부 멜라닌은 산화되어 피부에 색소 침착을 일으키고(즉시 산탄), UVB(280~315nm)의 피폭에 의해 피부에 발적이 일어나고, 발적의 쇠퇴 또는 경감하는 3일째쯤부터 멜라닌의 색소 증강이 나타난다(발적이 늦어지면 탄다.). 320nm 이하의 파장 또는 수은 스펙트럼의 313nm, 302nm, 297nm 및 254nm의 휘선은 발암에 관계가 있다. 따라서 이들 파장의 레이저를 사용하는 경우에는 앞에 기술한 비응집성 자외선 반응을 충분히 고려해야 한다.



[그림 2-32] 레이저 조사시 피부의 반응

상기의 레이저에 의한 피부에 대한 열 및 비열 반응은 단일형으로 나타나지 않는다. 싱글 모드의 레이저 광은 가우스 빔이므로 중심부의 파워 밀도가 높고 주변부에 가까워짐에 따라 서서히 낮아진다.

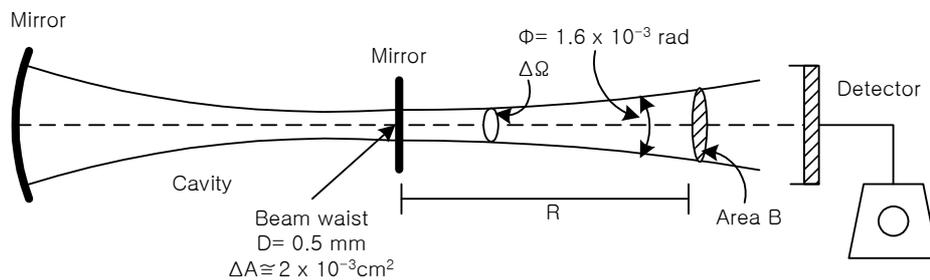
다중 모드의 레이저 광이라도 피부에 조사됨으로써 산란되고, 주변부 및 심부를 향하여 Gaussian 빔을 형성한다.

따라서 중심부에 탄화 반응이 일어난 경우에는 주변부에는 증화, 혈액응고, 단백질변성, 발적, 비열 반응의 순서로 반응 사이클이 생긴다([그림

2-32] 참조). 중심부에 혈액 응고가 일어나는 파워 밀도의 레이저 조사를 하면, 탄화, 증화를 제외한 반응이 일어난다. 이산화탄소 레이저인 경우는 탄화, 증화의 폭이 크고, 혈액응고, 단백 변성의 폭이 작은 데 비해, Nd-YAG 레이저에서는 오히려 반대 경향을 볼 수 있다. 아르곤 레이저는 이 중간에 속한다.

3.3 위해성 평가 분석

방호장치에 적용될 레이저의 특정부분의 방사량을 계산하기 위하여 다음의 예를 보자. 만약 4 mW의 출력을 갖는 He-Ne 레이저가 있다고 하자. 이 레이저는 빔의 직경이 0.5mm 이고, 빔의 허리의 면적은 약 $2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$ 이고, 파장이 633 nm라고 하자. 이때의 그림이 [그림 2.33]에 나타나 있다.



[그림 2-33] 특정 부위의 레이저의 방사량 계산을 위한 그림

오른쪽에 있는 Detector는 광검출기(Optical Detector)로서 그 기능은 빛이 광검출기로 입사가 되면 방사량이 얼마나 되는지를 측정해 주는 기기이다. 기기로 방사량을 측정하기에 앞서 이론적으로 방사량 L 은 다음 식을 이용하여 계산할 수 있다.

$$L = \frac{P}{\Delta A \Delta \Omega} \quad (2.14)$$

여기서, P는 레이저의 광출력, ΔA 는 빔의 허리의 면적, $\Delta\Omega$ 는 입체각 (Solid Angle)을 의미한다. 입체각 $\Delta\Omega$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$\Delta\Omega = \frac{B\text{의 면적}}{R^2} \quad (2.15)$$

여기서, B의 면적은 πr^2 이다(r 은 스폿의 반경). 그런데 스폿의 반경 r 은

$$r = R \tan\left(\frac{\Phi}{2}\right) \quad (2.16)$$

로 주어지므로, B의 면적은 다음 식으로 나타내어진다.

$$B\text{의 면적} = \pi \left[R \tan\left(\frac{\Phi}{2}\right) \right]^2 \quad (2.17)$$

식 (2.14)에 식 (2.17)을 대입하면 면적 B의 방사량은 다음 식과 같다.

$$L = \frac{4P}{\pi \Phi^2 \Delta A} \quad (2.18)$$

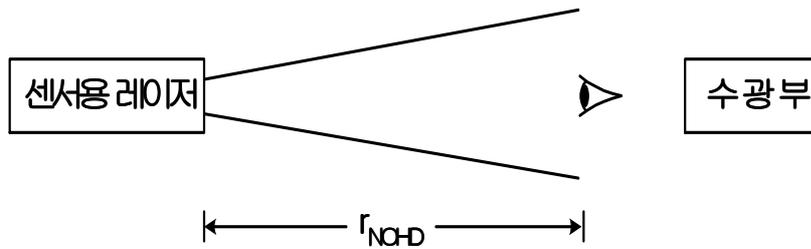
이 식에 실제 파라미터값들을 대입하면 방사량 L의 값은 다음과 같이 계산된다.

$$L = \frac{4(4 \times 10^{-3} \text{ W})}{\pi(1.6 \times 10^{-3})^2(2 \times 10^{-3} \text{ cm}^2)} = 1 \times 10^6 \text{ W/cm}^2 \quad (2.19)$$

이 예제에서는 특정 부위의 방사량은 계산 혹은 광검출기로 측정이 가능하다는 것을 보여주며 빔의 퍼짐각이 적을수록 방사량이 큰 것을 알 수 있고, 또한 레이저 입구에서 나오는 빔의 면적이 적으면 적을수록 방사량이 커진다는 것을 알 수 있다.

이제부터 실제의 방호장치에 부착된 레이저의 위해정도를 분석해 보기로

한다. 방호장치에 실제로 적용되는 센서용 레이저는 아래의 [그림 2-34]와 같이 보일 것이다.



[그림 2-34] 방호장치에 장착된 센서용 레이저 및 수광부

[그림 2-34]에서 r_{NOHD} 는 3절에서 정의되었던 공칭 안장해 거리이다. 작업자가 위험기계를 다루다가 무심코 눈 및 피부에 레이저 빛에 노출되었다고 할 때 제일 먼저 눈 및 피부의 위해정도를 분석하기 위해서는 센서용으로 장착된 레이저에 대한 MPE의 값을(이미 3절에서 정의한 최대 허용노광량(MPE)) 알고 있어야 한다. MPE의 값뿐만 아니라 본 절에서 제시된 모든 레이저의 데이터 값은 미국 ANSI 시방서에서 나온 것임을 밝힌다. 위해성을 이론적으로 분석하기 위해서 몇 가지 가정을 하자. 먼저 센서에 적용되는 레이저가 지속파(Continuous Wave, CW)로 작동된다고 가정하고 적용되는 레이저의 한계시각 α_{min} 이 1.5mrad보다 적다고 보는 즉 점광원으로 가정한다. 이때 ANSI 시방서에 나오는 다양한 레이저의 MPE의 값이 <표 2-3>과 <표 2-4>에 나와 있다. <표 2-3>은 표에 열거된 다양한 레이저가 한계시각보다 적은 점광원으로 가정하고 지속파로 동작한다고 가정할 때 눈에 대한 MPE의 값을 나타낸다.

<표 2-3> 다양한 CW 레이저의 눈에 대한 MPE

Laser Type	Wavelength (μm)	Exposure Duration (s)	Maximum Permissible Exposure	
			(J·cm ⁻²)	(W·cm ⁻²)
Argon	0.275	10 to 3×10 ⁴	3×10 ⁻³	-
Helium-Cadmium	0.325	10 to 3×10 ⁴	1	-
Argon	0.351	10 to 3×10 ⁴	1	-
Helium-Cadmium	0.4416	0.25	-	2.5×10 ⁻³
Argon	0.488	10 to 58	-	1×10 ⁻³
	0.488	58 to 10 ²	5.8×10 ⁻²	
	0.488	>10 ²	-	5.8×10 ⁻³
	0.5145	10 to 3×10 ⁴	-	1×10 ⁻³
Helium-Neon	0.632	0.25	-	2.5×10 ⁻³
Helium-Neon	0.632	10 to 3×10 ⁴	-	1×10 ⁻³
Krypton	0.647	0.25	-	2.5×10 ⁻³
Krypton	0.647	10 to 3×10 ⁴	-	1×10 ⁻³
InGaAlP	0.670	0.25	-	2.5×10 ⁻³
GaAs	0.905	10 to 3×10 ⁴	-	2.6×10 ⁻³
Neodymium:YAG	1.064	10 to 3×10 ⁴	-	5×10 ⁻³
InGaAsp	1.310	10 to 3×10 ⁴	-	4×10 ⁻³
InGaAsp	1.550	10 to 3×10 ⁴	-	0.1
Carbon-Dioxide	10.600	10 to 3×10 ⁴	-	0.1

<표 2-4>는 표에 열거된 다양한 레이저가 한계시각보다 적은 점광원으로 가정하고 지속파로 동작한다고 가정할 때 피부에 대한 MPE의 값을 나타낸다. 두 표에서 우리가 방호장치에 적용할 GaAs 반도체 레이저(파장=0.905 μm)를 주목하자.

두 표에서 같은 레이저 종류 일지라도 눈과 피부에 대한 MPE 값은 큰

차이가 (눈의 경우는 $MPE=2.6 \times 10^{-3} W/cm^2$ 이고, 피부의 경우는 $MPE=0.5 W/cm^2$)나는 것을 알 수 있다. 즉 레이저 빛이 조사될 때 눈의 경우가 피부보다 더 치명적이기 때문에 눈의 최대 허용 노광량이 피부보다 훨씬 적다는 것을 알 수 있다.

<표 2-4> 다양한 CW 레이저의 피부에 대한 MPE

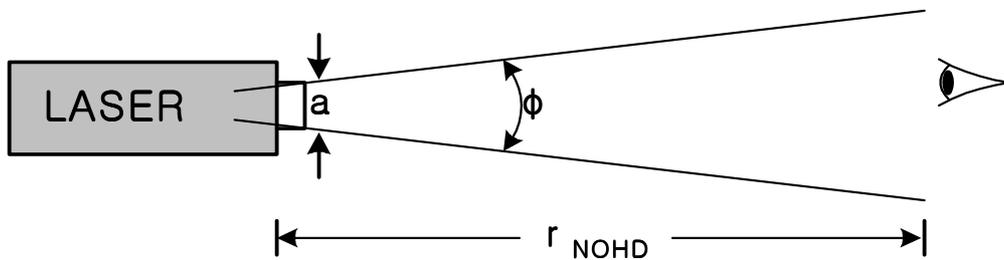
Laser Type	Wavelength (μm)	Exposure Duration (s)	Maximum Permissible Exposure	
			(J·cm ⁻²)	(W·cm ⁻²)
Argon	0.275	3×10 ⁴	3×10 ⁻³	-
Helium-Cadmium	0.325	10 to 1000	1	-
	0.325	>1000		1×10 ⁻³
Argon	0.351	10 to 1000	1	-
	0.351	>1000	-	1×10 ⁻³
Helium-Cadmium	0.4416	>10	-	0.2
Argon	0.488	>10	-	0.2
Argon	0.5145	>10	-	0.2
Helium-Neon	0.6328	>10	-	0.2
Krypton	0.647	>10	-	0.2
GaAs	0.905	>10	-	0.5
Neodymium:YAG	1.064	>10	-	1.0
Carbon-Dioxide	10.600	>10	-	0.1

실제의 방호장치에 부착된 센서용 레이저에 눈이 노출되는 그림이 [그림 2.34]에서도 나와 있고, 또한 작업자의 안전성을 확보하기 위한 거리인 r_{NOHD} , 즉 공칭 안장해 거리에 대한 데이터를 제시하는 것이 필요하다. 따라서 ANSI 시방서에서 제시하는 공칭 안장해 거리에 대한 [그림 2-35]를

고려하자. 이 그림에서 r_{NOHD} 는 눈의 안전거리를 확보하기 위한 공칭 안장해거리이고, a 는 레이저에서 나오는 입사입구에서의 빔의 직경, ϕ 는 빔의 퍼짐각도를 나타낸다. 이때 r_{NOHD} 는 다음 식으로 주어진다.

$$r_{NOHD} = \frac{1}{\phi} \left[\left[\frac{4 \Phi}{\pi MPE} \right] - a^2 \right]^{1/2} \quad (2.20)$$

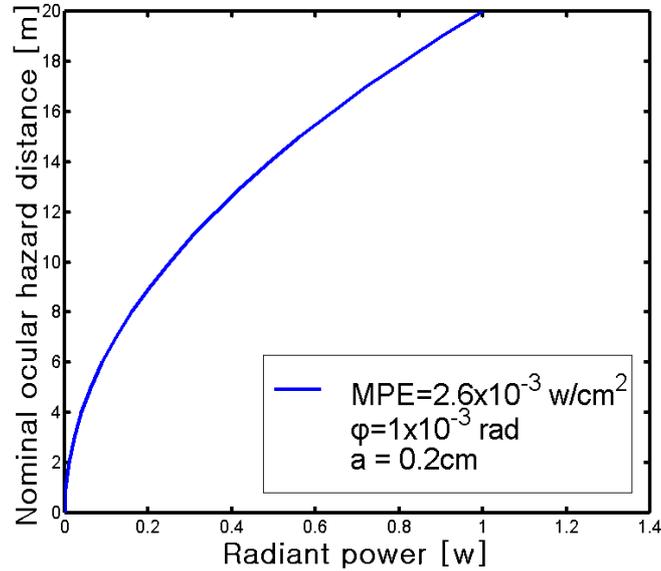
여기에서 Φ 는 방출 광파워로 단위는 W이다.



[그림 2-35] 방호장치에 쓰이는 센서용 레이저의 공칭 안장해 거리

[그림 2-36]부터 [그림 2-39]까지는 여러 가지의 파라미터를 변화시켰을 때 작업자의 눈의 안전성을 확보할 수 있는 거리 r_{NOHD} 를 계산한 시뮬레이션 결과이다. 먼저 [그림 2-36]은 방호장치에 적용되는 레이저를 GaAs 반도체 레이저를 사용하고(이때 $MPE = 2.6 \times 10^{-3} W/cm^2$), 빔의 퍼짐 각도 ϕ 는 $1 \times 10^{-3} rad$ 를 사용하고, 레이저 방출 입구에서의 빔의 직경 a 는 약 0.2cm라고 가정할 때 레이저의 방출 광파워를 증가시켰을 때의 공칭 안장해 거리를 보인 것이다.

이 그림들은 대체적으로 방출 광파워 대 공칭 안장해 거리는 비례관계를 보임을 알 수 있었다. 즉 방출 광파워가 커질수록 눈의 안전성을 확보하기 위한 거리는 커진다는 뜻으로 해석된다.

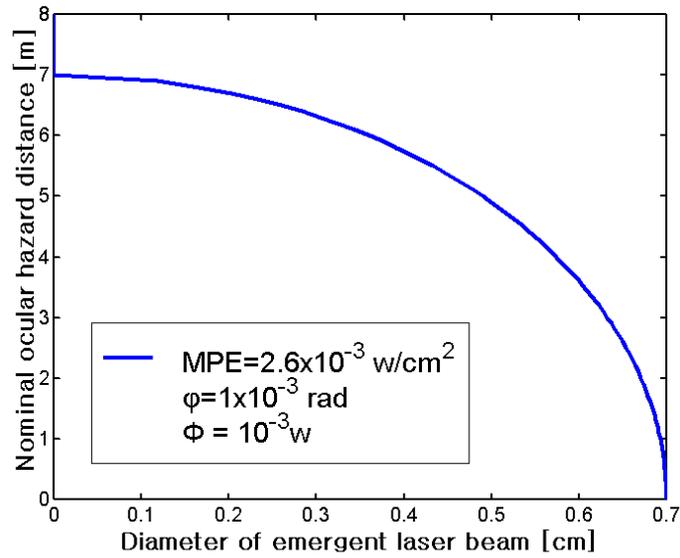


[그림 2-36] 방출 광파워 대 공칭 안장해거리

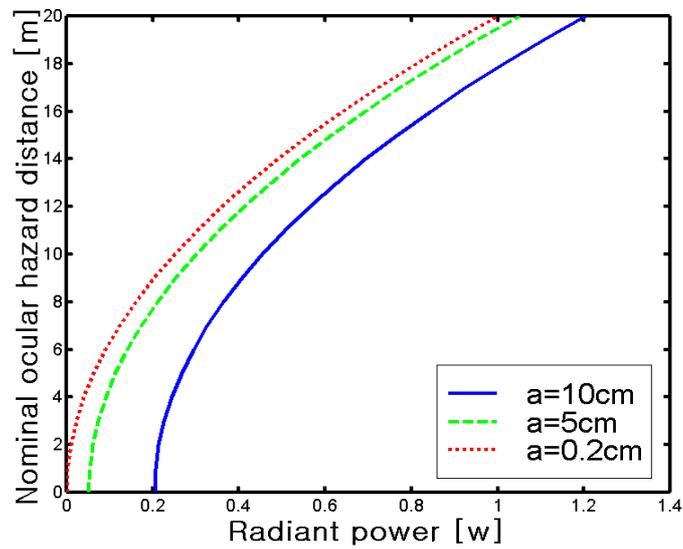
[그림 2-37]은 방출 광파워를 10^{-3} W로 하고, 레이저 방출 입구에서의 빔의 직경 a 를 변화 시켰을 때 r_{NOHD} 의 변화를 관찰한 그림이다. 이 그림에서 방출 입구에서의 빔의 크기가 커질수록 r_{NOHD} 는 짧아 지는 것을 볼 수 있다. 그 이유로서는 빔의 직경이 커지는 것은 그 만큼 광파워 밀도가 적어져서 눈에 대한 위해성이 적어진다는 것을 의미한다.

[그림 2-38]은 레이저 방출 입구에서의 빔의 직경 a 를 0.2cm, 5cm, 10cm로 증가시키면서 방출 광파워 대 안장해거리에 대한 관계를 보여준다.

[그림 2-38]의 결과는 [그림 2-37]의 결과와 마찬가지로 빔의 직경이 작아질수록 r_{NOHD} 는 길어지는데 이 의미는 빔의 직경이 적을수록 눈과 레이저간의 거리가 멀어야 안전하다는 것을 보여준다.



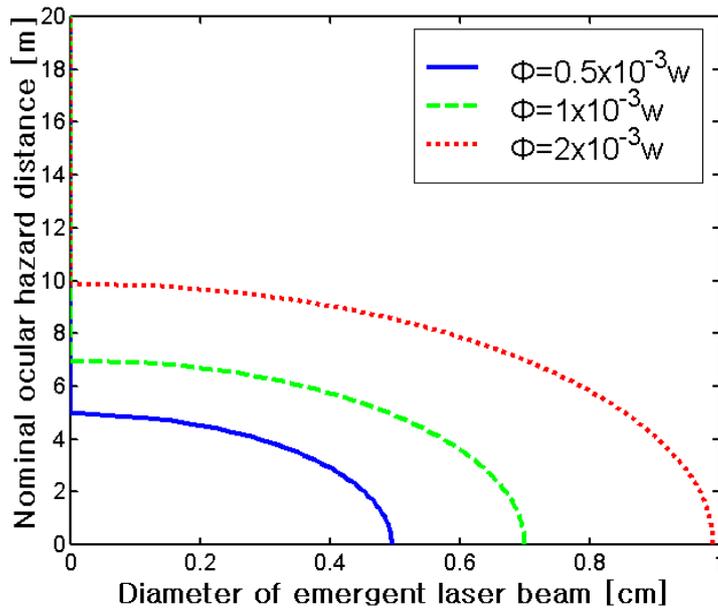
[그림 2-37] 레이저 방출 입구에서의 빔의 직경 대 공칭 안장해 거리



[그림 2-38] 방출 광파워 대 공칭 안장해 거리(빔의 직경을 변화)

[그림 2-39]는 방출 광파워를 변화시키면서 빔의 직경 대 r_{NOHD} 의 관

계를 관찰하였는데, [그림 2-37]의 결과와 마찬가지로 같은 빔의 직경을 갖는 레이저에서 방출 광파워가 큰 레이저일수록 r_{NOHD} 가 길어진다는 의미이다.



[그림 2-39] 레이저 방출 입구에서의 빔의 직경 대 공칭 안장해 거리 (방출 광파워를 변화)

3.4 방호장치에 적용 가능한 레이저광선의 선정

[그림 2-39]에서 방호장치 적용 가능한 레이저 빔의 직경 사이즈와 방출 광파워를 구할 수 있다. 따라서 공칭안장해거리가 0 m가 되는 지점에서 빔의 직경과 광파워가 얼마인지 찾아내면 <표 2-5>와 같이 3 지점을 찾게 된다. 여기서 레이저빔의 직경이 가능한 한 작은 것이 수광기의 초점을 맞추기가 편리하고 발광기의 생산이 용이하므로, 방출 광파워는 $0.5 \times 10^{-3} \text{ W}$, 레

이저빔의 직경은 0.5cm로 정하여 방호장치에 적용하는 것이 좋다.

<표 2-5> 공칭안장해거리가 0 m 지점에서 빔의 직경과 광파위의 산정

순번	방출 광파위	빔 직경
1	$0.5 \times 10^{-3} \text{w}$	0.5
2	$1 \times 10^{-3} \text{w}$	0.7
3	$2 \times 10^{-3} \text{w}$	1

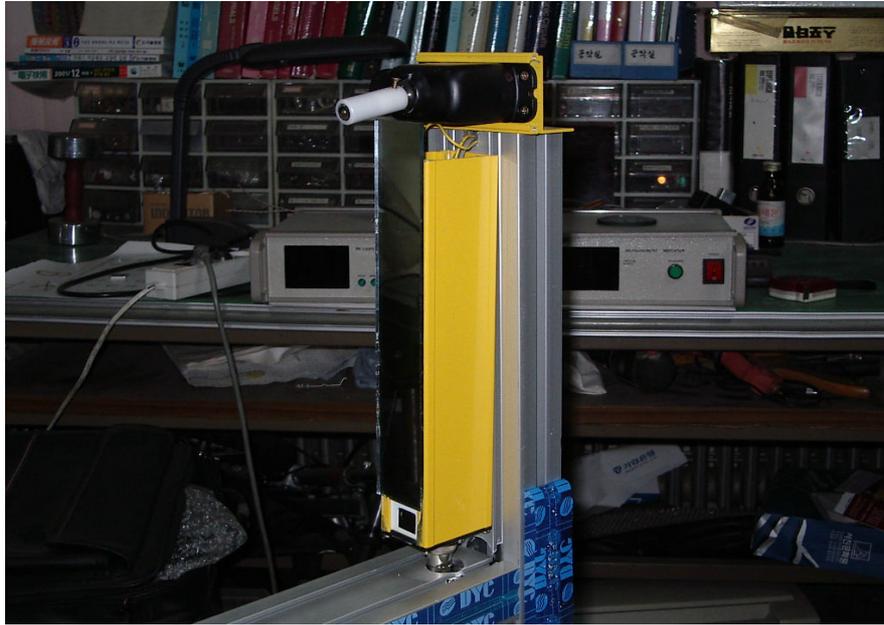
제 3 장 레이저식 방호장치 모델 제작 및 실험

1. 레이저를 이용한 위험기계 방호장치의 원리

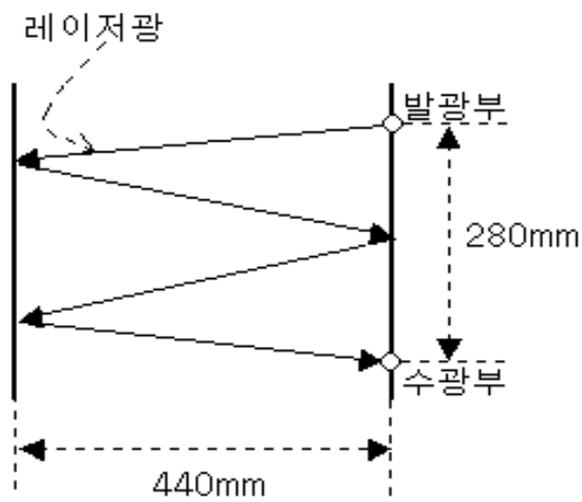
레이저를 이용한 위험기계 방호장치는 발광부와 수광기가 있어 기존의 광전자식 방호장치 유사한 구조라고 볼 수 있지만 실제적으로는 상당한 차이가 있다. 이는 기존 광전자식 방호장치는 반사미러가 한 개로 되어 있으나 레이저식 방호장치의 구조에서는 발광부 및 수광기가 부착되어 있는 바(Bar)에도 미러가 장착되어 양방향에서 반사가 이루어지게 되어있다. 또한 광축이 형성되는 형상에도 차이가 있는데 이는 기존의 광선식은 적외선 조사 방식이므로 일정한 각도로 광선이 퍼져 나아감으로 인하여 반사판에 부딪쳐서 반사되어 되돌아와 주변의 수광기에 감지하게 된다. 이때 두개 이상의 발광부에서 오는 적외선이 하나의 수광기에 이중으로 감지하게 됨으로 오동작이 발생될 수 있다. 이에 반하여 레이저 방식은 광선의 폭을 가늘게 조정할 수 있고 레이저의 특성상 산란이 발생되지 않는다. 이러한 특성을 방호장치에 적용함으로써 하나의 광선으로 다단 반사가 가능하고 두 광선이 겹쳐서 감지되지 않도록 함으로써 오동작이 발생되지 않는 방호장치의 개발이 가능하였다.

2. 레이저를 이용한 방호장치 모델 제작

레이저 발광부, 레이저, 수광기 및 레이저광 반사판 등을 제작하여 조립한다. 레이저의 직진성을 이용한 프레스방호장치는 Frame, 레이저 발광부, 레이저 각도 조절장치, 반사판, 제어부 등으로 구성된다.



[그림 3-1] 레이저식 방호장치 모델



[그림 3-2] 레이저광의 모델 실험 및 측정

3. 레이저를 이용한 방호장치 모델의 실험 및 분석

실험 초기에는 미러의 성능부족으로 감지가 어려웠으나 미러의 재료를 변경하고 가공을 정밀하게 한 결과 레이저광을 감지하는 데는 어려움이 없었다.

<표 3-1> 감지부의 감도 측정조건

순번	항 목	실험조건	순번	항 목	실험조건
1	레이저 광량	1mw(밀리와트)	3	감지거리	440mm
2	종이와 센서와의 거리	10mm 이내	4	반사횟수	3회

본 연구결과 제작된 모델의 실험방법 및 기준은 산업안전보건법 제33조의 시행령 제27조 관련 방호장치 검정기준(노동부 고시 2003-18호)을 준용하였다.

3.1 외광 등에 의한 노이즈 측정

방호장치의 특성상 예기치 않았던 외부 노이즈에 의한 오동작은 안전확보에 치명적인 결과를 초래할 수 있는바 태양열, 주위환경 등에 의한 노이즈가 제작된 모델에 미치는 영향을 실험해 본 결과 <표 3-2>와 같다.

방호장치 검정기준에 따라 모델의 수광기 중심부 최외각으로부터 반경이 50mm이내에의 구간에서 오동작이 없었음을 확인할 수 있었다.

<표 3-2> 노이즈 실험 결과

측정위치	실험조건	기 준 치	측 정 치
외부노이즈	백열전구, 100W, 측정거리 1m이내	오동작 발생 유무	없음
내부노이즈	회로내 노이즈발생	오동작 발생 유무	없음
전원부노이즈	서지전압 발생	오동작 발생 유무	없음

3.2 다단반사에 의한 수광 측정

반사용 미러의 성능을 확인인하여 레이저광이 3회 반사(3단 반사) 후 수광기에 감지되는지의 여부는 실험하여 본 결과, 양호하게 감지되었다.

3.3 감지시간 측정

피검체가 감지구역에 접근하였을 때 이를 감지한 전자회로를 지나 Relay에 도달하는 시간을 전자적 감지시간이라 한다. 방호장치의 검정규격에는 0.03ms의 이내에서 감지토록 규정되어 있으나 모델에 대하여 측정해본 결과 0.02ms로 양호하였다.

4. 레이저식 방호장치 모델 분석 결과

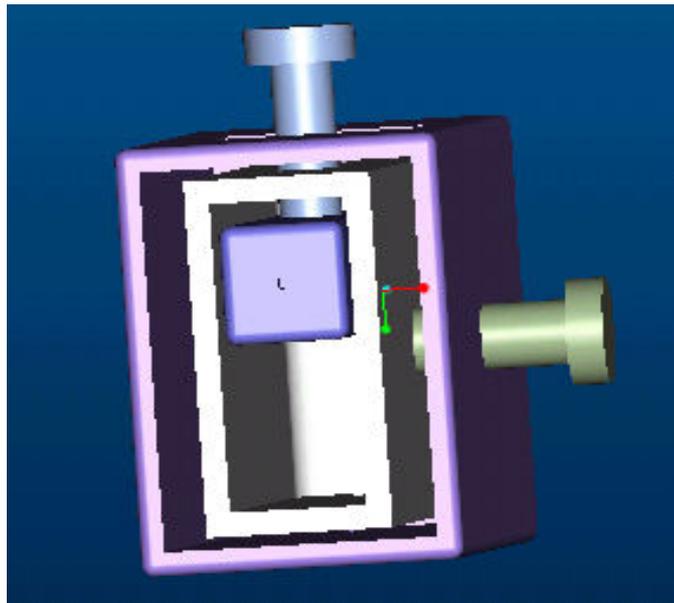
제작된 레이저식 방호장치 모델(Prototype)을 실험한 결과 시제품을 개발하는 데에는 어려움이 없는 것으로 판단되었다. 개선 보완이 요구되는 부분으로는 더욱더 정확한 미러(Mirror)의 개발인데 수광기의 감지 범위의 확대를 위한 개선이 요구된다. 따라서 시제품 설계에 필요한 개선 및 실험을 통하여 필요한 데이터를 구축하고 정확한 설계가 될 수 있도록 하였다.

제 4 장 레이저식 방호장치의 시제품 설계·제작 및 실험

1. 레이저식 방호장치 설계 및 제작

레이저식 방호장치의 구조는 기존의 광선식과 유사한 구조이므로 광선식 방호장치의 규격과 공통된 부분은 여기에 맞게 설계 및 제작하였다.

1.1 레이저 발광부 설계 및 제작

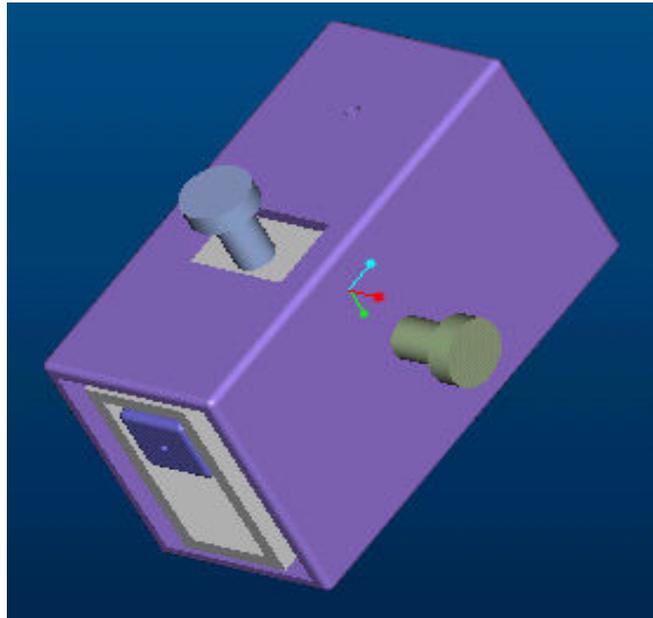


[그림 4-1] 레이저광 조준장치 측면 투시도

레이저의 발광기는 레이저광을 조사하기 위한 부분으로 레이저광이 미러 및 수광기에 정확하게 조준되어야 하며 프레스 등 위험기계의 진동에 의해 위치가

변동되지 않아야 한다.

레이저광을 정확하게 조준할 수 있도록 [그림 4-1] 및 [그림 4-2]와 같이 상하좌우로 미세 조정할 수 있는 레이저광 조준장치를 설계·제작하였다.



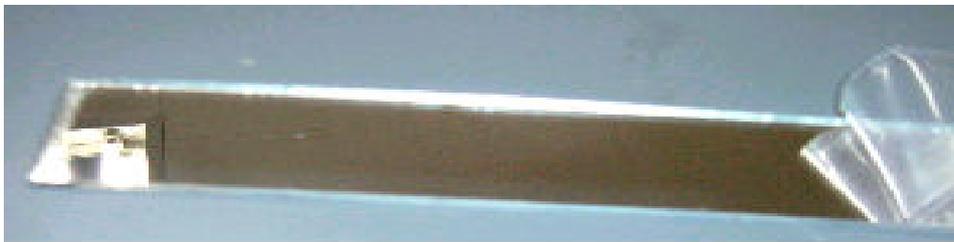
[그림 4-2] 레이저 조준장치 정면 투시도

1.2 레이저 반사판 선정

본 방호장치는 방호장치의 레이저 발광부에서 조사된 레이저가 반대편의 반사판과 발광부 측의 반사판 사이에서 일정 횟수만큼 반사된 후 수광기에 감지되는 시스템이다. 레이저광이 수광기에 부착된 반사판의 중앙에 도달되어 반사판 외측으로 빔나가지 않도록 하려면 반사판의 재질을 잘 선택하고 정밀하게 가공하여야 한다. 따라서 반사판은 반사판의 표면 거칠기가 매우 중요하며 외부의 충격에도 파손되지 않는 내진동 특성을 갖춘 재질이어야 한다.

1.3 반사판 재료 실험

1차 실험은 스테인리스를 연마하여 사용하였으나 표면에 굴곡이 있어 레이저광이 반사판을 이탈하여 외부로 나감으로써 방호장치의 성능을 유지하기 어려웠다. 2차 실험에서는 일반 미러를 사용하여 실험하였으나 만족할만한 결과를 얻지 못했다. 3차 실험은 [그림 4-3]과 같이 가로 40mm, 세로 250mm, 두께 7mm로 제작한 P.E. 재질을 도금하여 실험하였다.



[그림 4-3] 반사판

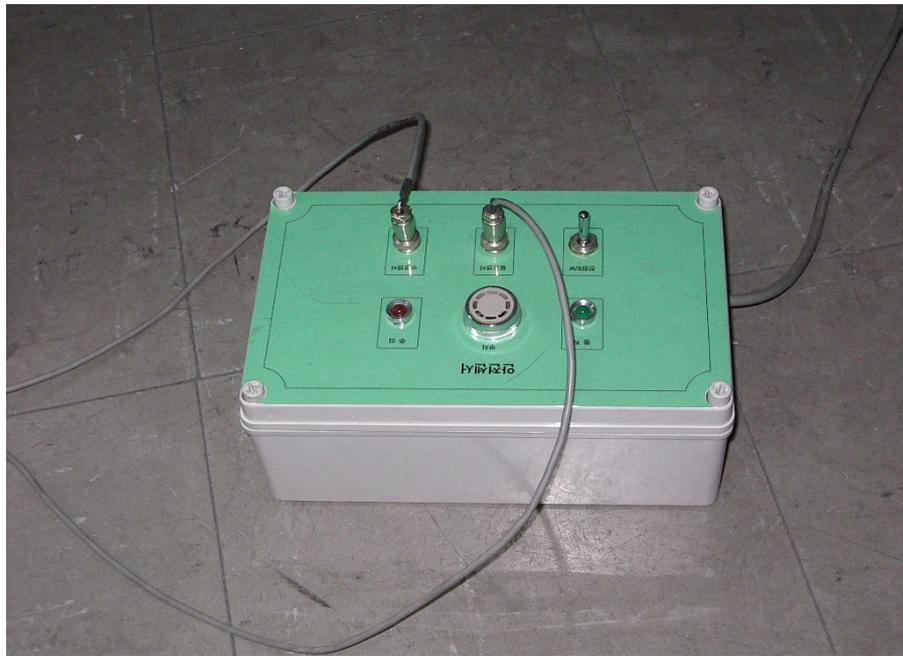
유리 미러에 비하면 반사 상태가 양호하였으나 반사반경이 $R=7m$ $\Phi=2^\circ$ 로 휘어져 반사되었다. 반사판 사이의 거리가 1m정도에서는 양호하게 반사되었으나 3m이상에서는 적용에 어려움이 있다. 따라서 재료의 강도와 안전성, 운반 등의 사용의 편의성을 고려하여 P.E. 재질의 반사판을 사용하는 것으로 결정하였다.

1.4 레이저 수광기 설계 및 제작

반사된 레이저와 유사한 파장대가 외부에서 수광기에 유입되면 노이즈가 발생할 수 있다. 가시광선 파장대의 외부 빛(형광등, 백열등, 햇빛 등)에 영향을 받지 않도록 레이저 펄스 PCB에 Filter를 장착하였다.

1.5 Main Control 장치 제작

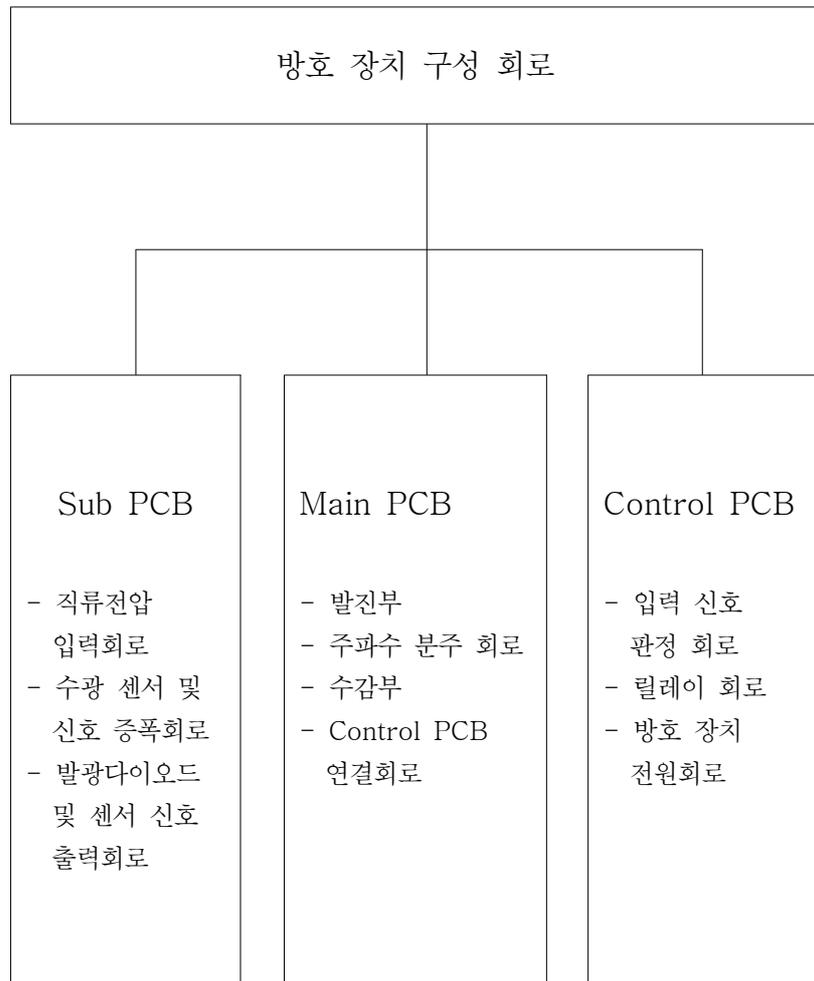
컨트롤장치는 방호장치의 중앙처리 장치와 동일한 것으로 감지부에서 온 신호를 처리함으로써 방호장치의 위험영역을 방호할 수 있도록 [그림 4-4]과 같이 제작하였다.



[그림 4-4] 방호장치 제어박스

레이저광은 630~680nm의 파장대의 레이저를 사용하였다. 햇빛과 전등 등의 광원으로부터 외부 노이즈가 발생될 수 있으므로 이를 방지하기 위하여 아날로그 신호를 디지털화함으로써 노이즈를 방지할 수 있도록 하였다.

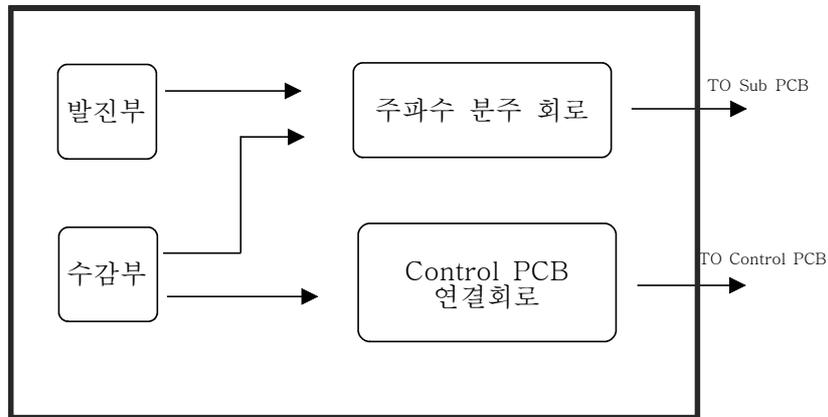
방호장치의 구성회로는 [그림 4-5]와 같다. 프레스 안전 방호장치를 구성하는 회로는 기능을 중심으로 이 그림과 같이 세 가지 모듈로 구성된다. 각 분할된 회로 모듈의 기능은 그림에 표시되어 있는 바와 같다.



[그림 4-5] 레이저식 방호장치 제어장치의 구성

1.5.1 발진부

발진부는 [그림 4-6]의 Main PCB전체 회로에서 왼쪽 상단의 위치하고, 3단의 Not Gate로 구성된 불안정 멀티바이브레이터(Unstable Multi-Vibrator)이다. Main PCB에서 발진부는 방호 장치 전체에 시스템 클럭을 제공한다.



[그림 4-6] Main PCB 회로 분할 모듈

1.5.2 주파수 분주 회로

주파수 분주 회로는 [그림 4-6]의 Main PCB 전체 회로에서 오른쪽 상단에 위치하고, Sub PCB에서 투광 다이오드와 반사판 사이에서 투·수광기에 시간 편차를 두어 센서 사이의 간섭 효과를 없애기 위한 목적으로 클럭 2개 정도의 투광 시간차를 만드는 역할을 한다.

1.5.3 수감부

수감부는 [그림 4-6]의 Main PCB 전체 회로에서 왼쪽하단에 위치한다. 이 부분은 Sub PCB와 직접 연결되어, 현재의 방호 장치 상태를 LED를 통해 알려주는 역할을 한다. 광이 "On" 되어 있을 경우는 차단이 없는 상태, 광이 "Off" 되어 있을 경우는 방호 장치가 차단이 되어 있는 상태라는 정보를 알려준다.

1.5.4 Control PCB 연결회로

Control PCB 연결 회로는 [그림 4-5]의 Main PCB 전체 회로에서 오른쪽 하단에 위치하며, Main PCB의 신호를 Control PCB로 넘겨줄 경우 필요로 하는 신호 증폭과 주파수 발진 등의 역할을 한다.

2. 레이저식 방호장치 부품 실험

2.1 수광기 렌즈별 실험

수광기 렌즈의 실험 결과는 다음과 같다.

블록렌즈 실험결과는 블록렌즈 적용 실험 시에 블록렌즈가 레이저광을 한 곳으로 모아주는 역할을 함으로서 센서의 주변에 레이저광이 조준되어도 감지를 하게 하나 렌즈의 직경보다도 더 좁은 면적에 도달하여 감지가 가능함으로서 그 감지 범위가 좁은 편으로 나타났다.

오목렌즈를 이용하여 실험한 결과 오목렌즈는 레이저광을 분산시켜서 센서가 이를 쉽게 감지 할 수 있도록 하려고 하였으나 레이저광 자체가 단색광이므로 분산의 효과를 볼 수 없었다.

2.2 반투명 Film의 적용실험

반투명 Film를 적용하여 실험한 결과 광선이 확산되는 효과가 있으므로 방호장치의 발광부에서 조사된 레이저광이 수광기에 감지되는 범위가 넓어져 그 효과가 매우 좋았다.

센서의 감도가 좋아 에너지를 집중시키는 렌즈를 사용하는 것 보다 약간 불투명한 평판 플라스틱을 사용하는 것이 수광상태가 좋았다. 이와 같은 재료는 레이저를 사방으로 분산시키므로 센서 주변으로 레이저광이 입사되어

도 센서가 쉽게 감지할 수 있다. 또한 평판의 크기를 최대한 크게 하여 레이저광의 조준을 쉽게 할 수 있도록 하였다. 수광기의 안쪽은 난반사된 후의 빛을 센서 방향으로 반사시키도록 반사율이 높은 재료를 사용하면 좋다.

2.3 수광 평판 관련 실험 및 데이터

2.3.1 수광기 설계 데이터

수광기는 센서가 레이저를 감지할 수 있는 확산각의 범위를 실험해보아 확산각의 70% 수준에서 안전확산각(sa)을 정한다. 센서와 평판과의 거리는 안전확산각(sa)과 평판의 크기를 기준으로 설계한다. 수광기의 재질은 반투명 Film으로 인하여 센서와 필름사이의 거리는 28mm로 설계하였다.

2.3.2 필름실험

<표 4-1> 광학 Film의 겹침 갯수에 따른 감지 거리 데이터

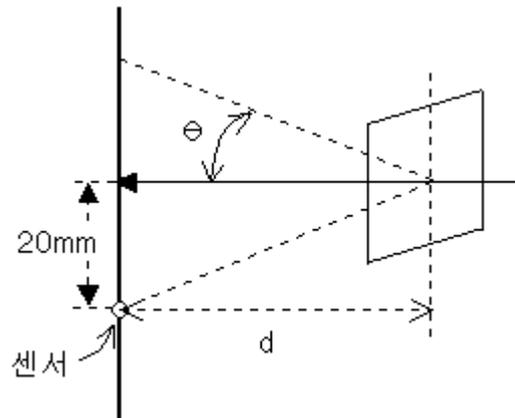
감지거리(d) 측정회수	1장	2장	3장	4장
1회	25 mm	20 mm	18 mm	16 mm
2회	24 mm	20 mm	16 mm	18 mm
3회	25 mm	18 mm	16 mm	17 mm
4회	26 mm	19 mm	15 mm	18 mm
5회	26 mm	19 mm	17 mm	18 mm
평균거리(md)	25.2 mm	19.2 mm	16.4 mm	17.4 mm

Film을 여러장 겹쳐서 설치해가며 발광된 광을 수광기에서 감지할 수

있는 거리를 측정하였다.

Film 겹침을 추가하여 감지기의 두께를 확대하였으나 3겹 이상의 셀로 판을 겹쳐 썼을 때에는 확산효과의 상승이 거의 없었다. (허용오차 10%감 안) 따라서 3겹의 수광판을 사용하기로 하였다.

2.3.3 확산각(θ)의 계산



[그림 4-7] 광의 산란에 의한 확산현상

확산각(θ)은 감지영역을 넓히기 위하여 광선이 투과하여서 퍼져나가는 각을 말한다.

위의 [그림4-7]에서 평균거리와 삼각함수를 이용하여 다음과 같이 확산각을 구한다.

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{r}{md}\right) = 50.65 \quad (4.2)$$

여기서, r = 수광반경 = 20mm, md = 평균 수직감지거리(d) = 16.4mm.

(md는 허용오차 10%를 적용하여 Film 3장을 겹쳤을 때의 평균인 16.4mm를 적용함.)

가. 안전확산각(sa)

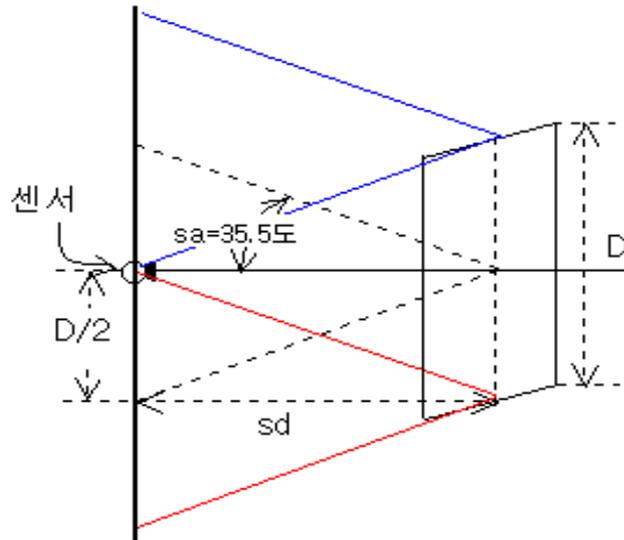
안전확산각은 확산각에 안전계수(0.7)를 곱하여 구한다.

$$sa = 50.65 \times 0.7 = 35.5 \quad (4.2)$$

나. 평판의 크기에 따른 센터와의 안전거리(sd) 확보

평판의 크기(D)에 따른 센서와 평판의 거리는 안전거리(sd) 이상으로 설계하여야 한다. 안전거리 sd는 다음과 같이 구한다. (D=40mm인 경우)

$$sd = \frac{D/2}{\tan 35.5} = \frac{20}{\tan 35.5} = 54.95 \text{ mm} \quad (4.3)$$



[그림 4-8] 레이저광의 확산각

2.4 반사판의 반사실험

레이저식 방호장치의 시제품에 대한 종합 실험한 결과 반사판의 반사의 정확도 측면에서 반사판의 사이가 2.2m의 거리일 경우 조준하여 조정하면 수광기에 도달할 수 있으므로 문제는 없으나 현장에 용이하게 설치하기 위해서는 미리평판의 정밀도가 더욱더 좋은 것을 개발하여야 한다.

3. 레이저식 방호장치 성능실험 및 결과

레이저식 위험기계 방호장치는 현재 성능검정 기준이 제정되어 있지 않아 본 시제품의 성능실험은 광전자식 프레스 방호장치의 성능검정기준에 준하여 성능실험을 실시하였다.

3.1 연속차광폭 및 방호높이 실험

가. 성능실험 기준

방호장치 성능실험 기준에 의하면 연속차광폭(투·수광기의 사이에서 연속차광을 할 수 있는 차광봉의 직경)은 30mm이하이고, 방호높이(차광이 시작된 점에서 끝나는 점까지의 높이)는 그 변화량의 차이가 15% 이내이어야 한다. (단, 12광축 이상으로 광축과 작업점과의 수평거리가 500mm를 초과하는 프레스에 사용하는 광전자식 방호장치의 경우에는 연속차광폭을 40mm이하로 한다)

나. 성능실험 방법

연속차광폭 및 방호높이에 대한 성능실험은 투·수광거리를 2m로 유지

하고 그 사이를 측정하여 광선의 평형상태의 변화량을 방호장치 성능검정 기준 제7조 1항에 의거 실험한다.

다. 성능실험 결과

레이저식 프레스 방호장치는 연속 차광폭의 실험기준에 만족시키는 것은 어려운 문제가 아니다. 왜냐하면 광전자식 방호장치와는 달리 광폭을 원하는 대로 조절할 수 있기 때문이다. 따라서 레이저의 반사각도를 작게 조절하여 차광폭을 30mm 이내로 할 수 있다.

3.2 지동시간의 측정

지동시간은 방호장치의 감지 속도에 관한 것으로 차광상태를 검출하여 프레스 슬라이드를 정지시킬 때까지의 시간을 말한다.

가. 성능실험 기준

차광상태를 검출하여 프레스 슬라이드에 정지신호를 발할 때까지의 전기적 동작시간(T_e)은 30ms이하이어야 한다.

나. 성능실험 방법

지동시간은 임의의 광선을 차단하여 그것에 대응하는 수광소자의 펄스 광에 의한 신호가 소실한 시점부터 출력릴레이가 "Off" 하여 Breaker 접점이 열리는 시점까지를 Memory Scope 등을 이용하여 측정한다.

다. 실험결과

측정된 지동시간은 20ms로서 성능실험 기준에 적합한 것으로 나왔다.

3.3 급정지시간 측정

급정지시간은 광선을 차단한 시간부터 슬라이드가 정지될 때까지의 시간을 말한다.

가. 성능실험기준

급정지시간($T = T_e + T_m$)은 전자적지동시간과 기계적 지동시간을 더한 시간이며 300ms이하이어야 한다. (A-1형에 한한다)

나. 성능실험방법

급정지시간은 광선이 차단된 시점부터 프레스 슬라이드가 완전히 정지할 때까지의 시간을 측정하여야 한다.

임의의 광선을 차단하여 그것에 대응하는 수광소자 부분의 펄스광 등에 의한 광신호가 소실한 시점부터 출력릴레이가 "Off"하여 Breaker 접점이 열리는 시점까지를 Memory Scope 등을 측정한다.

다. 실험결과

실험결과 급정지시간은 250ms로서 성능실험기준에 적합하였다.

3.4 외부광선에 대한 감응실험

가. 성능실험기준

외부광선에 대한 감응실험은 백열전구와 태양광선을 이용하는데 외부의 광선에 의하여 노이즈가 발생하는지 확인하는 실험으로 아래의 사항을 만족해야 한다.

- 백열전구(100V, 100W, 50~60Hz) 빛의 간섭실험에서 감지현상이 없어야 한다.
- 태양광선이 투/수광기에 접했을 때 감지현상이 없어야 한다.

<표 4-2> 외부광선의 노이즈측정 실험결과

측정각도 측정거리	°5	10	15	20
25mm	○	○	○	○
50mm	○	○	○	○
75mm	○	○	○	○
100mm	○	○	○	○
125mm	○	○	○	○
150mm	○	○	○	○
175mm	○	○	○	○
200mm	○	○	○	○
225mm	○	○	○	○
250mm	○	○	○	○

※ ○의 표시는 노이즈의 발생이 없었음을 뜻함.

나. 성능실험 방법

실험조건은 아래와 같다.

- 외부광선 감응실험방법은 투·수광기 사이의 거리를 4m로 유지하고 백열전구를 수광기 주변에서 비치면서 실험하여 이상동작의 발생이 없어야 한다.
- 햇빛을 수광기에 비추가며 노이즈에 의한 오동작 유무를 확인한다.

다. 성능실험 결과

백열전구의 위치를 25 mm ~ 250 mm 범위에서 25 mm 간격으로 변화시키고 측정각도는 °5~ 25범위에서 °5간격으로 변화시키면서 노이즈의 영향을 실험한 결과 <표 4-2>와 같이 이상 없이 동작하였다.

3.5 클러치 개조 성능실험

클러치 개조성능실험은 기계식 프레스 중에서도 확동식 프레스에 사용을 하기위해서 개조된 프레스에 장착하여 성능실험을 하는 것이므로 이번 실험에서는 제외하였다.

3.6 무부하 동작실험

무부하 동작실험은 프레스에 설치시 작업에 장애가 있는지 등을 알아보기 위한 실험이다.

가. 성능실험 기준

방호장치를 프레스 또는 이와 동등한 실험기에 부착하여 동작상태를 확인, 안전상의 이상유무를 검사한다.

나. 성능실험 결과

무부하 실험을 55회 실시한 결과 이상이 발생되지 않았다.

3.7 내노이즈 실험

내노이즈 실험은 전자기기의 신뢰성을 평가하기 위하여 아래의 기준에 의하여 노이즈 실험을 한다.

가. 성능실험방법 및 기준

노이즈 시뮬레이터 (Simulator)에 의거 <표 4-3>의 조건에서 실험하여 방호장치의 이상 유무를 검사한다.

<표 4-3> 내노이즈 실험 기준

신 호 종 류	시 험 조 건	비 고
펄 스 전 압	1,000V	
펄 스 폭	100 ~ 500nm의 임의 값	
펄 스 시 간	1 ns 이하	
펄 스 극 성	정 및 부	
펄스조정반복주기	전 원 동 기	
펄스주입위상각	0 ~ 360 가 변	
출력 임 피 던 스	50 Ω 이하	

나. 성능시험 결과

아래의 <표 4-4>와 같이 시험결과 이상이 발생되지 않았다.

<표 4-4> 내노이즈 시험결과

펄스폭 \ 펄스주입위상각	100	200	300	400	500
0	○	○	○	○	○
30	○	○	○	○	○
60	○	○	○	○	○
90	○	○	○	○	○
120	○	○	○	○	○
150	○	○	○	○	○

※ ○의 표시는 노이즈의 발생이 없었음을 뜻함.

3.8 방진 및 내진시험

방진 및 내진시험은 방호장치의 내진성능을 파악하기 위한 시험이다.

가. 시험기준 및 방법

시험기준은 아래와 같다.

- 시험방진 및 내진구조의 투, 수광기 및 콘트롤 박스를 시험하여 방호장치에 이상이 없어야 한다.
- 방진 및 내진장치 부분을 진동시험기에 의해 <표 4-5>과 같이 시험한 후

방호장치의 이상 유무를 검사한다.

<표 4-5> 진동시험기준

진동 변화 (Hz)	공진폭 (mm)	진동 주기 (5분)	시험 시간
10 ~ 55	1	10 ~ 55 ~ 10	3

나. 실험 결과

진동시험 기준에 의하여 실험한 결과 이상이 없었다.

3.9 내구성 실험

가. 실험기준

방호장치에 작동빈도를 높여주어 KS C 6021(전자제품의 기계적 반복동작 실험방법)에 의거 200,000회 이상 실험한 후 방호장치에 이상이 없어야 한다.

나. 실험방법

내구성 실험(KS C 6021 전자제품)은 기계적 반복 동작실험방법에 의거 실험한 후 이상이 없어야 한다.

다. 실험결과

현재는 5,000회 기계적 반복동작실험 후 이상 유무를 검사한 결과 이상이

없었으나 내구성 실험기준에 의거 200,000회까지 실험해 보아야 내구성 여부를 판단할 수 있으므로 추가적인 실험이 필요하다.

3.10. 절연저항 실험

가. 실험기준

절연저항계(발전식 및 전기식)은 <표 4-6>의 기준에 의하여 측정한다.

<표 4-6> 절연저항 실험기준

사 용 전 압	저 항	비 고
500 V	5 MΩ 이상	

나. 실험방법

500V 절연저항계로 각 충전부분과 외함 사이에서 절연저항을 측정하여 그 값이 7.5MΩ 이상이어야 한다.

다. 실험결과

절연저항실험결과 7.5MΩ 이었다.

3.11 내전압실험

내전압실험은 이상전압의 공급에도 이상이 발생되는지 확인하는 실험이다.

가. 실험기준

주파수 60Hz 정현파에 가까운 실험전압을 <표 4-7>와 같이 1분간 실험한 후 이상이 없어야 한다.

<표 4-7> 내전압 실험기준

사용전압의 구분	시 험 전 압
150 이하	1,000
150 V와 300 V 이하	1,500

나. 실험방법

상용주파수와 정현파에 가까운 파형으로 다음 식에서 구한 전압을 각 충전부분과 외함 사이에서 1분간 실험한다. 단, 최저 1,500V로 한다 .

$$\text{시험전압} = 2E + 1,000 \text{ (V)}$$

여기서, E = 정상상태에서 실험품 회로에 걸리는 최고전압

사용전압 220V를 기준으로 하였으므로 1,500V에서 실험을 실시하였다.

다. 실험결과

내전압실험결과 오동작 등의 이상이 발생되지 않았다.

3.12 온도상승실험

온도상승실험은 열간작업으로 인한 공장내부의 온도 상승이나 여름 날씨의 고온 작업 시 온도가 상승된 조건에서 프레스 작업을 할 경우 이상발생에 대비한 실험이다.

가. 실험기준

온도상승실험은 <표 4-8>의 실험기준에 적합해야 한다.

<표 4-8> 온도상승 실험기준

측 정 개 소	온 도
권 선	65 ℃ 이하

나. 실험방법

정격전류를 통하여 내구성 실험을 한 후 저항법 등으로 측정한다.

다. 실험결과

65℃에서 실험한 결과 방호장치의 전선 등이 이상이 없었다.

3.13 내한성 실험

가. 실험기준

40℃에서 24시간 처리 후 전기적 지동시간을 측정하여 30ms 이하이어야 한다.

나. 실험결과

40℃에서 24시간 처리 후 전기적 지동시간을 측정한 결과 20ms로서 적합하였다.

3.14 내열성실험

가. 실험기준

+70℃에서 24시간 처리 후 전기적 지동시간을 측정하여 30msec 이하이어야 한다.

나. 실험방법

온도 처리된 제품을 꺼내어 지동시간을 측정하여, 이상 유무를 검사한다.

다. 실험결과

+70℃에서 24시간 처리 후에 전기적 지동시간을 측정결과 20ms 이었다.

4. 시제품 실험 종합분석

레이저식 방호장치에 실험을 실시하여 분석해본 결과, 미러의 수평성능의 확보로 레이저광 수광의 정확도 확보, 조정의 편이성, 내진동성 등이 양호한 것으로 나타났다.

그러나, 시제품의 성능개선을 위해서는 레이저광의 반사성능을 향상시켜야 될 것으로 판단된다.

- (1) 주변환경에 의한 전자파 영향 실험에서 전원부 노이즈와 외부광선 노이즈가 없어 오동작이 발생되지 않았다.
- (2) 방호장치의 신뢰성 측면에서 감지부 광선의 이중감지로 인한 오동작이 발생되지 않은 구조이므로 신뢰성이 좋다.
- (3) 구조 자체를 블록화하여 볼트로 체결하였으므로 내구성이 좋은 편이다.

제 5 장 레이저식 방호장치의 적용성 및 특성 비교

1. 레이저식 방호장치의 적용성 분석

1.1 프레스

프레스는 협착 등의 사고가 많이 발생하는 기계임으로 방호장치가 다양하나 주로 사용되는 방호장치는 광선식 방호장치이다. 레이저식 방호장치는 이와 유사한 구조임으로 프레스에 적용하는데 별다른 문제점이 없을 것으로 판단된다.

1.2 절곡기

절곡기에 주로 사용하는 방호장치는 광전자식이지만 작업이 불편하기 때문에 사용 빈도는 매우 낮은 편이다. 그러나 하나의 광축을 사용하여 절곡날의 하강함에 의하여 리미트스위치를 작동시켜 광축을 "Off" 상태로 놓도록 하여서 절곡작업이 중단되지 않도록 하면 레이저식의 방호장치도 사용이 가능하다.

1.3 로울러

로울러는 고무제품 등 기타 제품의 압착을 통한 성형 및 분쇄를 목적으로 사용하는 기계이며 로울러 사이에 인체가 말려 들어가 사고가 발생되고 있다. 레이저식의 방호장치를 사용할 경우 유색광을 사용하면 작업자가 이를 보면서 작업을 할 수 있으므로 작업에 지장을 주지 않고 사용이 가능할 것으로 판단된다.

2. 기존 방호장치와 레이저식 방호장치의 특성 비교

기존 광전자식 방호장치와 레이저식 방호장치의 특성을 비교하여 보면 <표 5-1>과 같다. 이 표에서 알 수 있듯이 레이저 방식은 성능과 제조 단가 면에서 우수하다. 따라서 사업장 보급에 있어서 경쟁력이 있을 것으로 판단되며, 널리 사용될 경우 프레스 등 위험기계로부터 발생하는 재해를 예방하는데 큰 도움이 될 것으로 판단된다.

<표 5-1> 기존 광전자식 방호장치와 레이저식 방호장치의 특성 비교

분 류	광 전 자 식		
	라이트커튼식	광 선 식	레 이 저 식
원 리	적외선 프리즘 투과 방식	적외선 조사 방식	레이저광 조사 방식
성 능 (차 광 폭)	차광폭이 없음	차광폭이 30mm	차광폭 10mm 이내로 조정 가능
감지구조	광선차단방식	광선차단방식	광선차단방식
구조일반	복 잡	복 잡	단 순

제 6 장 결 론

본 연구에서는 프레스 등 위험기계 방호장치의 성능 및 신뢰성 향상을 위해서 레이저를 이용한 방호장치를 개발하였다. 레이저 방호장치의 시제품을 제작하여 실험한 결과 기존의 광전자식 방호장치에 비하여 성능이 우수하고, 주변 환경의 전자파 노이즈에도 영향을 받지 않는 등 신뢰성이 향상되었으며, 또한 내구성과 작업의 편의성 등도 양호한 것으로 나타났다.

- (1) 레이저식 방호장치는 외부 전자파에 대한 노이즈 실험결과 오동작이 발생되지 않았고 전원부에서 오는 서지전압과 같은 노이즈로 인한 오동작도 발생되지 않았다.
- (2) 레이저식 방호장치의 작동은 내부 및 외부 노이즈의 영향이 없고 감지부에서 이중감지로 인한 오동작이 발생되지 않았으므로 신뢰성이 매우 양호한 것으로 판단된다.
- (3) 레이저식 방호장치 구조자체를 블록화하여 볼트로 체결하였으므로 내구성이 양호한 것으로 판단된다.
- (4) 기존 광전식 방호장치와 작업성이 유사하나 자동복귀 시스템으로 가동하는 것이 가능하므로 작업에 편리하다.
- (5) 레이저식 방호장치는 그 구조가 매우 간단하여 제작이 용이하고 고장율이 낮으며 유지보수가 간편하다.

본 연구에서는 수광거리가 2m인 경우에 한하여 제작·실험한 것인바, 향후 수광거리가 더 긴 것을 개발하기 위한 후속 연구가 필요하다.

참고 문헌

- [1] American Conference of Governmental Industrial Hygienists, "A guide for control of laser hazard", Cincinnati, OH, 1990.
- [2] American Conference of Governmental Industrial Hygienists, "Documentation for the threshold limit values for chemical substances and physical agents in the workroom environment", Cincinnati, OH, 1993.
- [3] American National Standard Institute, "Safe use of Laser", New York, American National Standard Institute; Standard Z-136-141, 1978
- [4] C.B. Barger, O.J. Deters, R.A. Farrell, and R.L. McCally, "Epithelial damage in rabbit corneas exposed to CO₂ laser radiation", Health Physics, 1989.
- [5] T. Begqvist and B. Hartmann, "Imaging properties of the eye and interaction of laser radiation with matter", Stockholm, Karolinska Institute, Department of Ophthalmology, 1978.
- [6] D. Courant, L. Court, B. Abadie, and B. Brouillet, "Retinal damage thresholds from single-pulse laser exposures in the visible spectrum", Health Physics, 1989.
- [7] A. Duchene, J. Lakey, and M. Irpa.. Repacholi, "Guidelines on protection against nonionizing radiation", New York, Pergamon Press, 1991.
- [8] W.J. Geeraets and E.R. Berry, "Ocular spectral characteristics as related to hazards from lasers other light sources", Amer. J. Ophthal, 1968.
- [9] A.I. Goldman, W.T. Jr. Ham, and H.A. Mueller, "Ocular damage

- thresholds and mechanisms for ultrashort pulse of both visible and infrared laser radiation in the rhesus monkey", *Exp. Eye Res.*, 1977.
- [10] G.A. Griess, M.F. Blankenstein, and G.G. Williford, "Ocular damage thresholds for multiple-pulse laser exposures", *Health Physics*, 1980.
- [11] W.T. Ham Jr., H.A. Mueller, and D.H. Sliney, "Retinal sensitivity to damage from short wavelength light", *Nature*, 1976.
- [12] W.T. Ham Jr. , H.A. Mueller, J.J.Jr. Ruffolo, D. GuerryIII, and R.K Guerry, "Action spectrum for retinal injury from near ultraviolet radiation in the aphakic monkey", *Am. J. Ophthalmol*, 1982.
- [13] International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, Geneva: World Health Organization, Solar and Ultraviolet Reaention, 1992.
- [14] IRPA/INIR,. Guidlines of limits of exposure to laser radiation of wavelengths between 180 nm and 1mn, *Health physics*, 1985.
- [15] IRPA/INIRC, Recinnebdatuibs fir minor updates to the IRPA 1985 Guidelines on limits of exposure to laser radiation and Erratum, *Health Physics*, 1988.
- [16] J.J.M. Kremers and D.Van Noren, "Two classes of photochemical damage of the retina Lases and Light in *Ophthalmol*", 1988.
- [17] D.J. Lund, and E.S. Stuck, "Biological research in support of project MILES", San Francisco, CA: Lettrman Army Institute of Research Presidio of San Francisco, Repor, 1981.
- [18] T.L. Lyon, "Hazard analysis techniques for multiple wavelength lasers", *Health Physics*, 1985.
- [19] T.L. Lyon, "Laser measurement techniques guide for hazard evaluation", *J. Laser Appl.*, 1993.

- [20] J. Marshall, "Eye hazards associated with lasers", *Ann. Occup. Hyg.*, 1978.
- [21] R.L. McCally, R.A. Farrell, and C.B. Baraeron, "Corneepithelial damage thresholds in rabbits exposed to Tm: YAG laser radiation at $2.02\mu\text{m}$ ", *Lasers Surg. Med.*, 1992.
- [22] R.J. Rockwell Jr. and L. Goldman, "Research on human skin laser damage thresholds", Brooks Air Force Base, TX: U.S. Air Force School of Aerospace Medicine, Final Report, 1974.
- [23] D.H. Sliney, "The development of laser safety criteria biological considerations" Plenum Press, New York, 1971.
- [24] D.H. Sliney, "Interaction mechanisms of laser radiation with ocular tissues", Departement de Protection Sanitarie, 1988.
- [25] D.H. Sliney and M.L. Wolbarsht, "Safety with lasers and other optical radiation sources", New York, Plenum Press, 1980.
- [26] B.E. Stuck, D.J. Lund, and E.S. Beatrice, "Ocular effects of holmium ($2.06\mu\text{m}$) and erbium ($1.54\mu\text{m}$) laser radiation", *Health Physics*, 1981.
- [27] M.J. Suess and D.A. Benwell-Morison, "Non-ionizing radiation protection", 2nd edition, WHO Regional Publications, European Series, 1989.
- [28] United Nations Environment Programme; Lasers and optical radiation, World Health Organization, Environmental Health Criteria, 1982.
- [29] M.D. Rockville, "Department of Health and Human Services products", U.S. Food and Drug Administration; Performance standards for laser, 1994.

- [30] A. Vassiliadis, "Ocular damage from laser radiation", Plenum Press, New York, 1971.
- [31] M.L. Wolbarsht and D.H Sliney, "The formulation of protection standards for lasers", Plenum Press, New York, 1974.
- [32] A.L. Yarbus, "Eye movements during fixation on stationary objects", Plenum Press, New York, 1967.
- [33] J.A. Zuclich and J.A. Connolly, "Ocular damage induced by near-ultraviolet laser radiation", Invest. Ophthal, 1976.
- [34] D.H. Sliney and M.L Wolbarsht, "Safety with Lasers and Other Optical Sources", Plenum Publishing Corp, New York, 1980.
- [35] E.E. Stuck, D.J. Lund, and E.S. Beatrice, "Ocular effects of laser radiation from 1.06 to 2.06 μm ", SPIE Institute Series, 1980.
- [36] 한국 산업 규격, "레이저 제품의 방사 안전기준", 1995.
- [37] 한국산업안전공단 산업안전보건연구원, 안전장치검정규격, "프레스 및 전단기 방호장치 검정규격", 2001.

안 내 문

본 연구보고서의 내용은 연구책임자의 개인적 견해이며, 우리 공단의 공식 견해와 다를 수 있음을 알려드립니다.

산업안전보건연구원 원장

레이저를 이용한 위험기계 방호장치 개발

(안전분야-연구자료 연구원 2004-84-591)

발 행 일 : 2004.02.27

발 행 인 : 산업안전보건연구원 원장 김광중

연구책임자 : 안전공학연구실 기술직 3급 이충렬

발 행 처 : 한국산업안전공단 산업안전보건연구원

주 소 : 인천광역시 부평구 구산동 34-4

전 화 : (032) 510-0896

F A X : (032) 518-0867

Homepage : www.kosha.or.kr

인 쇄 :
