

KAIST 연구실 레이저안전 매뉴얼

KAIST Laboratory Manual for Laser Safety

KLS-11-2020



Contents

04 _ 요약

07 _ 1. 일반사항



1.1 목적	08
1.2 범위	08
1.3 용어의 정의	08
1.4 책임사항	10
1.5 사용제한	11

13 _ 2. 레이저 안전 및 분류

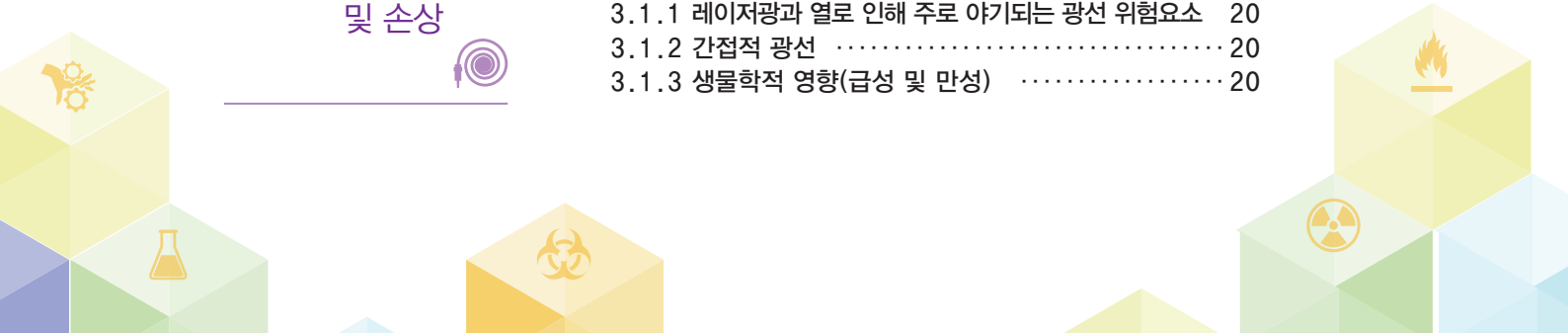


2.1 레이저 안전 준수사항	14
2.1.1 경고표지	14
2.1.2 교육	14
2.1.3 빔 위치 지정	14
2.1.4 빔 종료	14
2.1.5 반사 물질	14
2.1.6 보안경 착용	14
2.1.7 공학적 관리대책	14
2.1.8 감독	14
2.1.9 빔 투과	15
2.1.10 광학장치	15
2.1.11 비관계자의 접근	15
2.1.12 활성화된 장비	15
2.1.13 장비 비활성화	15
2.1.14 통제구역	15
2.1.15 출입구 통제	15
2.1.16 보안경 지급	15
2.1.17 장비 고정	16
2.1.18 빔 관찰	16
2.1.19 광원차단막	16
2.1.20 전원장치	16
2.1.21 비광선 위험요소	16
2.2 레이저 분류 등급	16
2.2.1 1 등급(Class 1)	16
2.2.2 1M 등급(Class 1M)	16
2.2.3 2/2M 등급(Class 2/2M)	17
2.2.4 3R 등급(Class 3R)	17
2.2.5 3B 등급(Class 3B)	17
2.2.6 4 등급(Class 4)	17

19 _ 3. 레이저 안전 및 손상



3.1 레이저 노출의 생물학적 영향	20
3.1.1 레이저광과 열로 인해 주로 야기되는 광선 위험요소	20
3.1.2 간접적 광선	20
3.1.3 생물학적 영향(급성 및 만성)	20



- 3.2 광선 위험요소 20
 - 3.2.1 눈 손상 20
- 3.3 비광선 위험요소 23
 - 3.3.1 비광선 위험요소 23
 - 3.3.2 광선 이외의 생물학적 위험 23
 - 3.3.3 광선 이외의 전기적 위험 23
 - 3.3.4 압축가스 및 색소레이저 23

25 _ 4. 레이저 안전대책 및 예방조치



- 4.1 공학적 관리대책 26
 - 4.1.1 레이저 등급별 공학적 관리대책 26
 - 4.1.2 일반 공학적 관리대책 26
- 4.2 행정적 관리대책 27
 - 4.2.1 레이저 등급별 행정적 관리대책 27
 - 4.2.2 일반 행정적 관리대책 27
- 4.3 표준작업절차서(SOP) 28
 - 4.3.1 표준작업절차서 작성 28
- 4.4 개인보호구(PPE) 29
 - 4.4.1 개인보호구 착용 29
 - 4.4.2 레이저 보안경 29
 - 4.4.3 피부 보호 29
- 4.5 빔 정렬 30
 - 4.5.1 사고형태 30
 - 4.5.2 정렬 수행 시 준수사항 30

31 _ 5. 비상대응절차



- 5.1 비상대응절차 32
- 5.2 레이저 사고 비상대응절차 33

35 _ 6. 부 록



- 부록A. 레이저 노출의 생물학적 영향 36
- 부록B. 레이저 등급 분류표 40
- 부록C. 레이저 안전 점검표 41
- 부록D. 3B등급 및 4등급 레이저 관리대책 43
- 부록E. 레이저 포인터 안전 48
- 부록F. 개인보호구(PPE) 49
- 부록G. 표준작업절차서(SOP) 50



한 눈에 살펴보는 레이저 안전

1. 목적

KAIST 레이저 안전 매뉴얼의 목적은 레이저 광선으로 인해 연구활동종사자의 상해 등 인적/물적 피해를 최소화하기 위함이다.

2. 레이저 기술기준

1. 레이저 광선

- 장거리까지 강도가 유지된다.
- 비교적 낮은 수준에서도 눈에 대한 심각한 위험을 야기한다.
- 렌즈 집광 시, 매우 높은 강도로 응축된다.
- 가시/비가시 광 스펙트럼에서 발생한다.

2. 생물학적 위험

- 레이저 광선과 유관/무관하게 발생할 수 있다.
- 모든 파장에서 발생할 수 있다.
- 주로 눈과 피부에 발생한다.

3. 레이저 사고의 특징

- 주로 눈의 손상을 유발한다.
- 빔 정렬 작업 시 발생한다.
- 작업자의 실수로 발생한다.

4. 개인보호구

- 3등급 및 4등급 레이저 사용 시 보안경을 반드시 착용해야 한다.
- 보안경은 반드시 ANSI 표준에 부합해야 하며, 광학밀도와 파장이 표시된 것이어야 한다.
- 4등급 레이저 사용 시 적절한 피부보호 장비가 필요하다.

3. 레이저 등급 분류표

Class 1/1M	<ul style="list-style-type: none">▶ 최대출력 몇 μW(마이크로와트) 수준 (가시 스펙트럼 출력)▶ 집광장치로 관찰하지 않는 한 눈/피부에 위험하지 않은 것으로 간주됨▶ 상위 등급의 레이저가 내장된 1등급 클로저가 개방된 경우에는 적용되지 않음
Class 2/2M	<ul style="list-style-type: none">▶ 최대출력 1 mW 미만 (가시 스펙트럼 출력)▶ 집광장치로 관찰하지 않는 한 인간의 정상적인 회피반응(눈깜빡임) 시간 (0.25초) 내에 피부 및 눈 손상을 야기하지 못하는 것으로 간주됨

Class 3R	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 최대출력 1 mW 이상 5 mW 미만 (가시 및 비가시 스펙트럼) ▶ 눈에 초점이 맞춰져 있고 안정된 상태에서 레이저가 직접 조사되거나 정반사되는 경우, 혹은 집광장치를 통해 레이저를 관찰하는 경우 잠재적인 위험성 존재
Class 3B	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 최대출력 5 mW 이상 500 mW 미만 (가시 및 비가시 스펙트럼) ▶ 인트라빔(직접조사) 혹은 정반사(거울반사) 시 눈에 대한 잠재적인 위험 야기 ▶ 고출력, 200~280 nm UVC 범위에서 장시간 확산 상태로 노출되는 경우 심각한 피부 위험을 초래할 수 있음.
Class 4	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 최대출력 500 mW 이상 (가시 및 비가시 스펙트럼) ▶ 인트라빔과 확산조건 모두에서 눈과 피부에 급성 위험을 초래할 수 있음 ▶ 화재(발화), 폭발 및 목표 물질이나 가공용 물질에서 발생하는 방사에 대한 잠재적인 위험성이 존재함.

4. 눈의 손상

파 장	손상 부위	병리학적 영향
180~315 nm (자외선 UV-B, UV-C)	각막 : 심자외선광은 매우 낮은 강도에서도 축적되는 손상을 야기	광각막염 : 일광화상과 유사한 각막염
315~400 nm (자외선 UV-A)	각막 및 수정체	광화학적 백내장 : 수정체 혼탁
400~780 nm (가시광선)	망막 : 가시광선이 망막에 집광됨	광화학적 손상 : 망막 손상 및 망막 화상
780~1400 nm (근적외선)	망막 : 근적외선광이 홍채에 흡수되지 않고 망막에 집광됨	백내장에 온열 손상 및 망막 화상
1400~3000 nm (적외선)	각막 및 수정체 : 적외선광의 망막 도달 전 안구의 투명부위에서 흡수됨	방수흐림 : 수양액 내 단백질, 백내장, 각막 화상

5. 레이저 사용자의 준수사항

- 레이저안전지침서를 숙독해야 한다.
- 표준작업절차서(SOP), 작업 및 안전지침과 연구실별 레이저 지침을 검토해야 한다.
- 레이저 안전 및 상세 레이저 절차에 대한 교육을 받아야 한다.
- 모든 서면절차, 안전수칙을 준수하고 적절한 개인보호구(PPE)를 올바르게 사용해야 한다.
- 연구실책임자로부터 작업허가를 받아야 한다.
- 레이저 안전에 정통한 전문가의 직접적인 감독하에 작업해야 한다.
- 적절한 PPE를 착용하고, 안전절차 및 SOP를 준수해야 한다.

- 행정적, 공학적 안전대책을 항시 준수해야 한다.
- 전원 차단 스위치 및 소화기의 위치와 사용법을 파악해야 한다.
- 고전압장비로 작업 시, 2인 이상이 작업을 함께 수행해야 한다.
- 레이저 광선 작업 시, 빛을 반사시키는 금속 악세사리를 착용하지 않아야 한다.
- 보안경을 착용한 경우라도 레이저 광선을 직시하지 않으며, 간접 관찰해야 한다.
- 비광선 위험요소에도 충분한 주의를 기울여 부상과 질병을 예방해야 한다.
- 플라즈마 및 2차 방사에 유의해야 한다.
- 잠재적으로 유해한 상황, 연구활동종사자의 부상 또는 재산피해 발생 시 안전팀(T.042-350-0119)으로 즉시 알려야 한다.

6. 연구실책임자의 준수사항

- 연구실책임자는 레이저 장비의 잠재적인 위험에 대한 정보를 연구활동종사자에게 교육하여야 한다.
- 연구실책임자는 레이저 장비의 적합한 안전설비 설치하고, 필요한 개인보호구를 연구활동종사자에게 지급하여야 한다.
- 연구실책임자는 연구실 내 연구활동종사자 중에서 레이저안전담당자를 지정하여야 한다.
- 연구실책임자는 표준작업절차서(SOP), 레이저 안전지침 및 매뉴얼을 연구실별 작성한다.
- 연구실책임자는 레이저 사고 발생 시 안전팀으로 즉시 알려야 한다.

7. 레이저안전담당자의 준수사항

- 레이저장비, 사용요령 및 비상대응절차에 대한 교육을 이수해야 한다.
- 사용 중인 장비에 적합한 안전장비를 관리한다.
- 레이저 장비의 모든 프로세스에 대한 표준작업절차서(SOP)를 구비해야 한다.
- 연구실책임자(지도교수)로부터 레이저 장비의 잠재적인 위험에 대한 정보를 확인하고 전파해야 한다.

8. 비상조치

1. 즉시 레이저를 끄고 인터록 키를 제거한다.
인터록 키를 제거할 수 없는 경우, 모든 이에게 연구실에서 대피하라고 알리고, 자신은 가장 마지막에 나간다.
2. 화재 발생 시, 연구실 내부의 사람들을 즉시 대피시킨다. 동시에 큰 소리로 “불이야”를 계속 외치고, 화재경보기를 울린다. 대피로를 확보한 다음, 출입구를 등지고 소화기를 이용하여 초기소화를 시도한다.
3. 심각한 부상 발생 시, 의료지원을 요청한다.
119와 KAIST재난안전상황실(T.042-350-0119)에 신고한다.
4. 연구실책임자(지도교수) 및 학과안전업무담당자에게 연락해 비상상황에 대해 설명한다.

01

일반사항

- 1.1 목적
- 1.2 범위
- 1.3 용어의 정의
- 1.4 책임사항
- 1.5 사용제한



1. 일반사항



1.1 목 적

이 매뉴얼은 「KAIST 연구·실험 안전관리지침」제7조에 따라 연구실 레이저 장비 사용 기준에 대하여 연구활동종사자가 이해하고 적용하기 위함이다.

1.2 범 위

이 매뉴얼은 KAIST내 레이저 장비를 사용하는 모든 연구실에 대하여 적용한다.

1.3 용어의 정의

이 매뉴얼에서 사용하는 용어의 뜻은 다음과 같다.

1.3.1 “연구실”이라 함은 과학기술분야 연구개발을 위하여 연구시설·장비·재료 등을 갖추어 설치한 실험실, 실습실, 실험준비실 등을 말한다.

1.3.2 “연구주체의 장” 이라 함은 과학기술원을 대표하는 총장을 지칭한다.

1.3.3 “연구실책임자”라 함은 연구개발과제 책임자인 지도교수, 학과장(부장), 연구소장(연구센터장) 등 해당 연구실에서 과학기술분야 연구개발활동 및 연구활동종사자를 직접 지도·관리·감독하는 자를 말한다.

1.3.4 “연구활동종사자”라 함은 과학기술분야 연구개발활동에 종사하는 학생(학부생 및 대학원생), 연구원과 연구보조원 등을 말한다.

1.3.5 “레이저안전담당자”라 함은 해당 연구실의 연구활동종사자 중에서 레이저 안전관리 및 사고예방 업무를 수행하는 자를 말한다.

1.3.6 “연구실안전환경관리자”라 함은 연구실 안전과 관련한 기술적인 사항에 대하여 연구주체의 장을 보좌하여 학과안전업무담당자를 지원하고 레이저안전담당자를 지도하는 자를 말한다.

1.3.7 “학과안전업무담당자”라 함은 해당 연구실을 관리하는 부서에 소속된 자 중에서 학과안전업무담당자로 지정되어 연구실 안전관리업무를 담당하는 자를 말한다.



1.3.8 “사용자”라 함은 레이저 제품을 운전(조작) 또는 감시하고 이용하는 사람을 말한다.

1.3.9 “최대 허용 노광량(Maximum Permissible Exposure, 이하 MPE라 한다.)”이라 함은 정상 상태에서 사람에게 피해를 입히지 않을 정도로 노출되는 레이저방사 레벨을 말한다. MPE 레벨은 눈이나 피부가 노출 즉시 또는 긴 시간 후에 나타나는 상해 없이 노출될 수 있는 최대 레벨을 나타내며 방사 파장, 펄스 지속 시간, 400~1400 nm 범위에서의 가시 및 근적외선 방사에 의한 망막 상의 크기와 관계있다.

1.3.10 “레이저 안전관리자(Laser safety officer)”라 함은 레이저의 위험성 평가와 안전관리를 수행하는데 충분한 지식을 갖추고, 레이저의 위험요소 제어를 감독할 책임이 있는 사람을 말한다.

1.3.11 “정반사(Specular reflection)”라 함은 거울로부터의 반사와 같이 방사의 입사각과 반사 각 사이의 상관관계를 유지하는 표면반사를 말한다.

1.3.12 “레이저 시스템(Laser system)”이라 함은 추가 구성요소에 상관없이 적절한 레이저 에너지원과 결합된 레이저를 말한다.

1.3.13 “레이저 방사(Laser radiation)”라 함은 제어된 유도방출에 의해 레이저 제품에서 방출되는 180 nm에서 1 mm 사이의 파장 범위를 갖는 전자기파 방사선을 말한다.

1.3.14 “접근 방출 한계(Accessible emission limit, 이하 AEL이라 한다.)”라 함은 특별한 등급 내에서 허용되는 최대 접근 가능 방출 레벨을 말한다.

1.3.15 “주사 레이저 방사(Scanning laser radiation)”라 함은 고정 기준 프레임에 대하여 전파의 방향, 원점 및 형태가 시간에 따라 변하는 레이저 방사를 말한다.

1.3.16 “빔 발산각(Beam divergence)”이라 함은 빔 지름에 의해 정해지는 원추의 원거리 평면각을 말하며, 단위는 rad이다.

1.3.17 “방사 출력(Radiant power)”이라 함은 방사 형태로 방출, 전달 및 수신되는 출력을 말하며, 단위는 W이다.

1.4 책임사항

1.4.1 레이저 사용자의 책임사항

1.4.1.1 실험실에서 사용하는 레이저에 의한 사고를 예방하고 레이저 실험을 수행하고 관리할 궁극적인 책임은 사용자인 연구활동종사자 개개인에게 있다.

1.4.1.2 사용자는 레이저 광선이 눈에 노출되지 않도록 주의해야 한다. 어떤 행위나 연구활동이 위험해 보이거나 안전하지 않다고 느껴진다면 하지 않아야 한다.

1.4.1.3 사용자는 다음을 반드시 준수해야 한다.

- (1) 각 장비와 연구실별로 필요한 구체적인 레이저 교육을 이수한다.
- (2) 레이저 안전 매뉴얼을 숙독하고 모든 실험 안전 수칙을 준수해야 한다.
- (3) 표준실험절차서(SOP) 및 각 장비별 제조업체에서 제공한 운용지침 및 안전지침을 읽고 이를 숙지한다.
- (4) 행정적, 공학적 관리대책을 준수하고 활용한다.
- (5) 보안경, 자외선차단제 등의 지정된 개인보호구(PPE)와 빔 뷰어(beam viewer), 인터록(interlock), 빔 차단기(beam stop) 등의 안전장치를 적절히 사용해야 한다.
- (6) 잠재적 위험상태, 인체 상해, 재산 피해를 발견한 경우 이를 연구실책임자 및 KAIST재난안전상황실에 즉시 알려야 한다.

1.4.1.4 레이저 장비 사용에 대한 상세 교육을 받지 않았거나, 구체적인 문서와 안전대책이 없으면 레이저 장비를 사용하지 않는다.

1.4.2 연구실책임자의 책임사항

1.4.2.1 연구실책임자는 다음과 같은 책임을 수행한다.

- (1) 안전한 연구실 환경 구축
- (2) 연구실 장비 및 각종 절차의 문서화
- (3) 레이저 장비의 안전한 운용을 위해 모든 레이저 사용자 대상 교육 실시
- (4) 레이저 실험을 수행할 학생 및 연구원 허가
- (5) 적합하고 적절한 개인보호구 제공
- (6) 모든 레이저 장비를 식별하고 라벨 부착
- (7) 레이저 관련 사고 및 부상자 발생 시 즉시 KAIST재난안전상황실로 신고

1.4.2.2 연구실책임자는 레이저 사용을 허가하기에 앞서 다음을 반드시 수행해야 한다.

- (1) 레이저 안전 매뉴얼을 숙독한다.
- (2) 레이저 표준작업절차서를 문서로 작성한다.
- (3) 각 레이저 사용자에게 각 장비에 대한 레이저 실습교육을 제공한다. 이러한 교육에서는 통상적인 안전작업절차, 정렬절차, 비상대응절차, 안전요건 및 사용제한을 다루어야 한다.
- (4) 연구실 내 레이저 사용 및 작업을 감독한다.

- (5) 연구실 내 모든 레이저의 등급을 분류하고 라벨을 부착한다.
- (6) 모든 레이저 등록 자료를 작성하여 실험실안전관리시스템에 등록한다.
- (7) 레이저 사용자가 레이저 안전교육을 이수했는지 확인하고, 이후 매년 재교육을 받게 한다. 3B등급 및 4등급 레이저로 직접 작업하거나 그 주변에서 근무하는 모든 구성원이 이수한 교육에 관한 정보를 문서로 기록해서 Safety Binder에 보관한다.
- (8) 자격요건을 갖춘 연구활동종사자에게만 레이저 실험을 허가한다.
- (9) 레이저 노출로 인한 부상이 발생했거나 혹은 부상이 의심되는 경우 즉시 안전주관부서 및 KAIST재난안전상황실(내선 0119)에 알린다.

1.5 사용제한

이 매뉴얼에 따른 관리 및 취급기준을 준수하지 못한 경우에는 실험실에서 레이저를 사용할 수 없다.

02

레이저 안전 및 분류

2.1 레이저 안전 준수사항

- 2.1.1 경고표지
- 2.1.2 교육
- 2.1.3 빔 위치 지정
- 2.1.4 빔 종료
- 2.1.5 반사 물질
- 2.1.6 보안경 착용
- 2.1.7 공학적 관리대책
- 2.1.8 감독
- 2.1.9 빔 투과
- 2.1.10 광학장치
- 2.1.11 비관계자의 접근
- 2.1.12 활성화된 장비
- 2.1.13 장비 비활성화
- 2.1.14 통제구역
- 2.1.15 출입구 통제
- 2.1.16 보안경 지급
- 2.1.17 장비 고정
- 2.1.18 빔 관찰
- 2.1.19 광원차단막
- 2.1.20 전원장치
- 2.1.21 비광선 위험요소

2.2 레이저 분류 등급

- 2.2.1 1 등급(Class 1)
- 2.2.2 1M 등급(Class 1M)
- 2.2.3 2/2M 등급(Class 2/2M)
- 2.2.4 3R 등급(Class 3R)
- 2.2.5 3B 등급(Class 3B)
- 2.2.6 4 등급(Class 4)



2. 레이저 안전 및 분류



2.1 레이저 안전 준수사항

3B등급 및 4등급 레이저와 레이저 시스템의 경우 다음의 안전수칙을 준수해야 한다.

2.1.1 경고표지(Warning Signs)

레이저의 종류와 등급, 특별주의사항에 대한 지침을 명시한 경고표지를 각 연구실 입구에 부착해야 한다.

2.1.2 교육(Training)

레이저 안전과 구체적으로 수행할 레이저 사용 절차에 대한 적절한 교육을 이수한 자만이 레이저를 조작해야 한다. 모든 레이저 작업자는 레이저 조작 및 해당 작업의 수행허가를 연구실책임자로부터 받아야 한다.

2.1.3 빔 위치 지정(Beam Positioning)

레이저 광선은 서 있거나 앉아있는 사람의 정상적인 눈높이를 기준으로 항상 그 위나 아래에 위치해야 한다.

2.1.4 빔 종료(Beam Termination)

레이저는 잠재위험이 있는 광선을 적절한 매질의 빔 차단기(beam stop) 내부에서 종료시킬 수 있어야 한다.

2.1.5 반사물질(Reflective Materials)

레이저 광선 경로나 그 부근에는 가급적 산란 반사 물질만이 존재해야 한다. 레이저 실험 시에는 금속 액세서리류(특히 손목시계)를 착용하지 않아야 한다.

2.1.6 보안경착용(Wear Eye Protection)

3B등급 또는 4등급 레이저 실험 시, 위험한 수준의 직접 혹은 반사 레이저 광선에 눈이 노출될 가능성이 있는 경우 반드시 보안경을 착용해야 한다.

2.1.7 공학적 관리대책(Engineering Controls)

공학적 관리대책(인터록, 빔 차단기, 표지, 활성화 경고 시스템 등)은 레이저 위험요소에 대처하는 1차 방어책으로 항상 활용해야 한다. 작업자가 별도의 구체적인 표준작업절차서를 따르는 상황 외에는 공학적 관리대책을 항상 준수해야 한다.

2.1.8 감독(Supervision)

연구실책임자 또는 연구실책임자가 지정한 레이저장비 안전담당자의 직접적인 감독하에 레이저 실험을 수행해야 한다.



2.1.9 빔투과(Beam Transmission)

창문 및 출입구는 투과된 레이저 조사량을 최대허용노출량 이하로 감소시킬 수 있는 방식으로 차폐하거나 제한해야 한다.

2.1.10 광학장치(Optical Devices)

광학장치는 눈에 도달하는 레이저광을 집광할 수 있다. 광학부어장치를 사용할 때는 사용자가 광선 혹은 정반사된 광선을 직접 보지 않도록 주의해야 한다. 레이저 작업에서 사용하는 현미경에는 반드시 감쇠필터가 장착되어야 한다.

2.1.11 비관계자의 접근(Spectator Access)

비관계자가 레이저에 접근하지 못하도록 제한구역에 레이저를 비치해야 한다. 3B등급 및 4등급 레이저를 사용하는 연구실에는 방문객의 출입을 제한한다.

2.1.12 활성화된 장비(Activated Equipment)

점등식 경고표지, 암막커튼, 출입문 인터록 등과 같은 적절한 보호장치 없이 활성화된 레이저를 방치해서는 안 된다.

2.1.13 장비 비활성화(Equipment Disable)

정식훈련을 받지 않은 작업자가 레이저나 레이저 시스템을 사용하는 상황을 방지하기 위해 미사용 시 잠금장치 등으로 비활성화 한다.

2.1.14 통제구역(Controlled Area)

레이저는 빛 흡수 커튼 또는 기타 적절한 빛 차단장치로 둘러싸인 곳에 비치해야 하며, 이러한 차단벽, 보호막, 커튼 등은 내화성이 있어야 한다.

2.1.15 출입구통제(Entryway Controls)

4등급 레이저가 있는 곳에는 출입구 인터록 등과 같이 출입구에서의 안전통제를 위한 시스템이 갖춰져 있어야 한다.

2.1.16 보안경 지급(Eye Protection Supplies)

상태가 양호하고 적절한 보안경을 레이저 사용자에게 지급해야 한다. 보안경은 각 레이저 작업에 적합하도록 제작되어 라벨을 부착한 것으로, 레이저 파장과 호환성이 있어야 하고 적절한 광학 밀도 및 파장을 표시해야 하며, 실험을 안전하게 수행할 수 있도록 가시광선을 충분히 투과시키는 것이어야 한다.

2.1.17 장비고정(Secure Equipment)

실험 중 레이저 및 함께 사용되는 광학부품이 의도치 않게 움직여 발생할 수 있는 눈의 손상을 방지하기 위해 테이블에 단단히 고정한다.

2.1.18 빔 관찰(Viewing Beam)

보안경을 착용했더라도 레이저 등급에 관계없이 레이저 광선을 직시하지 않아야 하며, 간접수단(빔 카드, 광 검출기 등)을 사용해 관찰해야 한다.

2.1.19 광원차단막(Light Source Shield)

레이저 광선을 방출하는 광원 주변부에 차단막을 설치해 광원 폭발 시 유리 파편으로 인한 부상을 방지해야 한다

2.1.20 전원장치(Power Supply)

전원공급장치 또는 기타 고압전기장비에 접근할 때는 항상 2인 이상이 작업을 함께 수행해야 한다. 이러한 장비의 수리, 유지보수, 혹은 교체작업을 실시하는 직원들은 심폐소생술(CPR) 교육을 받아야 한다.

2.1.21 비광선 위험요소(Non-beam Hazards)

비광선 위험요소에도 충분한 주의를 기울여 그로 인한 부상과 질병을 방지해야 한다.

2.2 레이저 등급 분류

레이저와 레이저 시스템은 눈 또는 피부에 생물학적 손상을 일으킬 수 있는 능력에 따라 분류되며, ANSI Z136.1-2007 표준에서 레이저 분류 등급을 제시하고 있다. 레이저 등급은 정상적으로 작동하는 레이저 광선이 야기하는 위험성을 나타내는 것으로, 접근 가능한 광선의 잠재적인 위험성에 따라 정의된다. 일반적으로 레이저는 다음의 기준에 따라 분류 및 관리된다.

2.2.1 1등급(Class 1)

최대허용노출량(MPE)을 초과하는 레이저 광선을 방출하지 못하는 레이저 시스템으로 정상적인 작동 및 관찰조건에서 눈 손상을 야기하지 못하는 것으로 간주된다.

2.2.1.1 최대출력 : 몇 마이크로와트(μW) 수준

2.2.1.2 빔 경로를 차단하기 위해 상위 등급의 레이저가 1등급 레이저 기기에 완전 내장될 수 있으나, 이 경우 빔 인클로저(beam enclosure)가 유지보수, 장애해결, 정렬 혹은 기타 이유로 개방되는 상황에 대비해 각별한 주의가 필요하다.

2.2.2 1M등급(Class 1M)

소형 확대경(발산 빔) 또는 망원경(평행 빔) 등과 같은 광학장치를 통해 레이저 광선을 직시하지 않는 한 정상적인 작동 상황에서 유해한 노출조건을 발생시키지 않는 것으로 간주되는 레이저 시스템이다.

2.2.3 2/2M 등급(Class 2/2M)

장시간(1,000초 이상) 직시하거나 특정 광학보조도구로 관찰하지 않는 한 눈 손상을 야기하지 못하는 것으로 간주되는 가시, 저출력 레이저 시스템이다.

- 2.2.3.1 스펙트럼의 가시영역에서 빛 방출(400~700nm)
- 2.2.3.2 최대출력 : 1 mW 미만
- 2.2.3.3 인간 눈의 정상적인 회피반응으로 노출을 방지할 수 있음

2.2.4 3R등급(Class 3R)

직시 또는 반사광 관찰 상황에서는 위험할 수 있으나, 난반사 또는 화재 위험은 없는 중간 출력 레이저 시스템이다. 보안경 없이 아주 잠깐씩 보는 것은 위험하지 않다.

- 2.2.4.1 최대출력: 1 mW 이상 5 mW 미만
- 2.2.4.2 0.25초 이하의 단시간 노출 시 눈 손상 없음(눈깜빡 반사)
- 2.2.4.3 가시, 비가시(자외선, 적외선) 파장을 가짐
- 2.2.4.4 안경 등 확대용 광학장치로 관찰하면 위험

2.2.5 3B등급(Class 3B)

직접 조사나 반사광이 위험을 야기할 수 있으나, 난반사된 표면(예 : 페인트칠한 벽, 흰 종이 등)에서는 위험을 거의 발생시키지 않는 고출력 레이저 시스템이다.

- 2.2.5.1 최대출력 : 5 mW 이상 500 mW 미만
- 2.2.5.2 회피반응으로 눈을 보호할 수 없음
- 2.2.5.3 가시, 비가시(자외선, 적외선) 파장을 가짐
- 2.2.5.4 펄스레이저인 경우, 잠재적으로 치명적인 고압 전력이 공급될 수 있음

2.2.6 4 등급(Class 4)

눈이나 피부에 대한 위험성이 항상 존재하는 레이저 시스템이다.

- 2.2.6.1 최대출력 : 500 mW 이상
- 2.2.6.2 직접반사, 정반사, 난반사도 눈과 피부에 심각한 손상을 야기할 수 있음
- 2.2.6.3 회피반응으로 눈을 보호할 수 없음
- 2.2.6.4 화재위험 존재
- 2.2.6.5 펄스레이저인 경우, 잠재적으로 치명적인 고압 전력 공급

Safety First 
Safe KAIST 

03

레이저 안전 및 손상

3.1 레이저 노출의 생물학적 영향

- 3.1.1 레이저광과 열로 인해 주로 야기되는 광선 위험요소
- 3.1.2 간접적 광선
- 3.1.3 생물학적 영향(급성 및 만성)

3.2 광선 위험요소

- 3.2.1 눈 손상

3.3 비광선 위험요소

- 3.3.1 비광선 위험요소
- 3.3.2 광선 이외의 생물학적 위험
- 3.3.3 광선 이외의 전기적 위험
- 3.3.4 압축가스 및 색소레이저



3. 레이저 안전 및 손상



3.1 레이저 노출의 생물학적 영향

3.1.1 레이저광과 열로 인해 주로 야기되는 광선 위험요소

3.1.1.1 작업자와 광선의 상호작용의 직접적 결과로 발생한다.

3.1.2 간접적 광선

3.1.2.1 목표물 상호작용의 결과 또는 레이저 장비특성으로 인한 직접적인 결과로서 야기되는 비광선 위험요소이다. 다음은 발생할 수 있는 비광선 위험요소의 주요 예이다.

- (1) 감전 또는 화재 위험
- (2) 압축가스 및 용제에서 발생하는 폭발 또는 화재
- (3) 레이저 색소의 발암성 특성
- (4) 연기에서 발생하는 오염물질
- (5) 이차 방사 및 플라즈마 방사

3.1.3 생물학적 영향(급성 및 만성)

3.1.3.1 급성 - 단시간 동안 높은 수준으로 노출된 경우(화상)

3.1.3.2 만성 - 장시간에 걸쳐 낮은 수준으로 노출된 경우(암)

3.2 광선 위험요소(Beam-Related Hazards)

3.2.1 눈손상

대부분의 손상은 눈에서 발생한다. 레이저는 빛으로 출력되며, 눈은 우리 몸에서 빛에 가장 민감한 기관이다. 레이저로 인해 발생한 눈 손상은 주로 급성이며, 매우 심각한 피해를 수반하는 경우가 많지만, 모든 레이저 눈 손상은 예방이 가능하다.

3.2.1.1 눈 위험으로 야기되는 손상의 유형

- (1) 광화학 손상 - 레이저 노광이 조직 내 화학반응을 유발해 분자결합을 파괴하거나 조성한다. 광화학 손상은 단파장(청색광) 및 자외선광에서 발생하며, 일정기간 동안 축적되기도 한다. 백내장은 광화학 손상의 예이다.
- (2) 온열손상 - 조사된 레이저가 흡수되어 조직 내 온도가 단백질 변성이 발생하는 수준까지 상승된다. 망막 화상이 온열손상의 예이다. 온도가 단 10°C만 순간 상승해도 망막 광수용체가 파괴될 수 있다.



- (3) 음향손상 - 온도가 급상승하면 유리체의 폭발적인 비등이 발생해 유리액이 기화하는 과정에서 기계적 충격파가 조직 전체에 가해질 수 있다. 이러한 폭발에서 발생하는 충격파는 조사점에서 상대적으로 거리가 먼 부위에도 손상을 줄 수 있다. 출혈은 펄스레이저 조사로 야기되는 음향손상의 예이다.

표3.2.1 파장대별 눈손상 부위 및 병리학적 영향

파장	손상 부위	병리학적 영향
180~315 nm (자외선 UV-B, UV-C)	각막 - 심자외선광은 매우 낮은 출력에서도 축적되는 손상을 야기	광각막염 (일광화상과 유사한 각막 염증)
315~400 nm (자외선UV-A)	각막 및 수정체	광화학적 백내장 (수정체 혼탁)
400~780 nm (가시광선)	망막 - 가시광선이 망막에 집광됨	망막의 광화학적 손상 및 망막 화상
780~1400 nm (근적외선)	망막 - 근적외선광이 홍채에 흡수되지 않고 망막에 집광됨	백내장 및 망막화상
1,400~3,000 nm (적외선)	각막 및 수정체 - 적외선광이 망막 도달 전 안구의 투명 부위에서 흡수됨	방수흐림(수양액 내 단백질), 백내장, 각막 화상
3,000~10,000 nm (원적외선)	각막	각막 화상

3.2.1.2 눈손상을 야기하는 종속 요인은 다음과 같다.

- (1) 노출지속시간 : 출력세기를 고려해야 함. 낮은 출력의 연속파에 장시간 노출되는 것이 펄스레이저에 단시간 노출되는 것에 비해 눈 손상이 훨씬 경미하다.
- (2) 에너지 : 광원의 세기
- (3) 파장 : 안구 중 레이저 광선 흡수 부위와 빛이 눈을 통해 망막으로 집광되는지 여부를 결정하는 요인이다.
- (4) 노출부위 : 시력을 좌우하는 망막황반(macula)과 중심와(fovea)가 손상되면 심각하고도 영구적인 결과를 초래할 가능성이 높다.

3.2.1.3 기타요인으로 노출이 발생하면 빛이 가시영역 범위에서 벗어날 수 있는데, 이때 뇌가 눈의 손상을 보정하려고 하기 때문에 실제로 손상이 발생해도 작업자가 이를 인지하지 못할 수 있다. 한 예로 근적외선 조사광은 인간의 육안으로 보는 것이 거의 불가능하며, 빛이 눈에 보이지 않으면 회피반응이 제대로 일어나지 않는다.

3.2.1.4 작업자가 고출력 Nd:YAG 레이저에서 발생하는 비가시광선영역의 1064nm 광선에 노출된 경우 별다른 통증을 느낄 수 없으므로 시력손상이 발생해도 이를 즉각적으로 인지하지 못할 수 있다. 안구에서 ‘딱’ 혹은 ‘딱’ 하는 소리가 나는 것이 망막 손상(100℃ 이상의 망막 가열로 국소부위에서 폭발적 비등이 발생하고 영구맹점이 그 즉시 생김)의 유일한 징후일 수 있다.

3.2.1.5 백내장, 망막 화상, 출혈, 맹점, 영구실명 등 다중복합 손상이 눈 전체와 모든 파장에서 발생할 수 있다. 일반적으로 장파장 레이저가 더 큰 위험을 야기한다. 손상에 가장 취약한 눈의 부위는 다음과 같다.

- (1) 망막 : 눈의 안쪽을 둘러싼 막으로 빛의 존재와 강도에 반응하는 감광체 신경세포로 구성된다.
- (2) 중심와 : 망막황반의 중심부에서 망막의 3~4%를 차지하는 부위로 가장 세밀하고 민감한 시력을 담당한다.

3.2.1.6 ‘망막’의 특징

- (1) 눈에서 가장 중요한 요소
- (2) 0.55 mm의 두께로 쉽게 손상됨
- (3) 낮과 밤, 색상, 주변시력, 시력 등과 같은 시각능력을 담당하는 간상세포, 원추세포, 감광체로 구성
- (4) 가시광선 및 근적외선 레이저광 손상
 - 아르곤레이저 청색광(400~550nm)에 노출 시 망막화상 발생 가능
 - 망막위험영역(400~1,400nm)에서 망막 화상/박리 발생 가능
 - 망막에 대한 레이저 충격으로 맹점 유발 가능
 - 반복된 망막 화상은 실명 초래

3.2.1.7 ‘중심와’의 특징

- (1) 원추세포의 대부분이 중심와에 위치
- (2) 중심와가 레이저 화상을 입으면 그 즉시 급성실명 발생 가능
- (3) 근적외선 레이저광은 홍채에서 강하게 흡수되지 않고, 중간와에 집광됨

3.2.1.8 피부 손상

피부 위험은 레이저광의 모든 파장에서 발생하지만, 눈에 대한 위험성에 비해 그 영향이 극심하지 않다. 피부 손상은 주로 만성적으로 발생한다. 피부 손상의 종속요인은 다음과 같다.

- (1) 시간 : 노출시간이 10마이크로초를 초과하는 경우 열반응으로 조직단백질의 변성이 발생한다.
- (2) 파장 : 레이저광이 피부의 다양한 층에서 반사 또는 흡수된다.
 - 조사광의 대부분은 피부외피 4 mm 내에서 흡수된다.
 - 10,600 nm 파장(CO₂, 원적외선)은 피부에 잘 흡수되어 표피 화상을 일으킨다.
 - 1,000 nm 파장(Nd:YAG, 근적외선)은 피부에 잘 흡수되지 않아 심부조직에 전기화상과 유사한 화상을 일으킨다.

3.2.1.9 피부에 발생할 수 있는 생물학적 손상의 종류는 다음과 같다.

- (1) 피부 화상 : 300~10,000 nm 파장에 급성노출되면 심각한 화상이 발생할 수 있다.
- (2) 피부암 : 200~280nm의 UV-C에 낮은 수준 또는 산란파로 만성노출되면 발병할 수 있다. 이러한 레이저광은 매질로 잘 흡수되지 않으며, 홍반(화상)을 야기하고 피부노화를 촉진할 수 있다.

3.3 비광선 위험요소(Non-beam Hazards)

3.3.1 비광선 위험요소

비광선 위험요소는 다음과 같은 성격을 띤다.

- (1) 화학적
- (2) 생물학적
- (3) 물리적
- (4) 인체공학적

3.3.2 광선 이외의 생물학적 위험

광선 이외의 생물학적 위험은 주로 다음과 관련해서 발생한다.

- (1) 전기적 위험(감전, 화재)
- (2) 가스, 용제(폭발, 화재)
- (3) 색소(독성, 발암물질)
- (4) 연기(생화학적 확산)

3.3.3 광선 이외의 전기적 위험

연구실 환경에서 실험하는 사용자는 대규모 전원장치와 50볼트 이상에서 작동 가능한 전원장치, 콘덴서, 장비 접지, 전류가 흐르는 노출 부위 등과 같은 전기부품으로부터 발생할 수 있는 전기위험을 인지해야 한다. 매질의 가열, 증발, 절제(ablation)의 결과로 레이저 연기가 발생하면 레이저 발생 공기오염물(Laser Generated Air Contaminants, LGAC)과 관련된 문제가 야기될 수 있다.

3.3.4 압축가스 및 색소레이저

레이저 연구실에서는 주로 압축가스, 용제, 색소의 사용과 관련한 위험이 가장 빈번하게 발생한다.

3.3.4.1 압축가스의 종류

- (1) 단순 질식성가스, 산소 희석 또는 치환으로 인한 질식사 야기
- (2) 노출허용한계치(Threshold Limit Value, TLV)가 낮은 독성가스
 - TLV는 근로자가 건강상 악영향을 받지 않고 노출될 수 있는 공기 중 물질의 최대허용농도를 의미함

3.3.4.2 색소레이저의 특징

- (1) 형광 유기화합물이 레이저 매질(lasing medium)을 조성하고, 에탄올, 메탄올 등의 발화성 용제에 주로 부유한다.
- (2) 색소레이저 공정에서 발암물질 및 독소가 활용되기도 하고 동시에 발생하기도 한다.
- (3) 분말형 색소는 알려진 발암물질로, 각별한 취급주의(장갑 착용, 두겹봉지로 보관)를 요한다.
- (4) 대부분의 색소는 알려지지 않은 돌연변이 유발요인(DNA 돌연변이)의 특징을 보인다.

04

레이저 안전대책 및 예방조치

4.1 공학적 관리대책

- 4.1.1 레이저 등급별 공학적 관리대책
- 4.1.2 일반 공학적 관리대책

4.2 행정적 관리대책

- 4.2.1 레이저 등급별 행정적 관리대책
- 4.2.2 일반 행정적 관리대책

4.3 표준작업절차서(SOP)

- 4.3.1 표준작업절차서 작성

4.4 개인보호구(PPE)

- 4.4.1 개인보호구 착용
- 4.4.2 레이저 보안경
- 4.4.3 피부 보호

4.5 빔 정렬

- 4.5.1 사고형태
- 4.5.2 정렬 수행 시 준수사항





4. 레이저 안전대책 및 예방조치

ANSI Z136.1-2007 표준에서 안전한 레이저 환경을 유지하기 위해 규정한 필수 및 권장 관리대책은 다음과 같다.

- (1) 공학적 관리대책 : 레이저가 운용되는 물리적 환경을 관리
- (2) 행정적 관리대책 : 레이저 사용 중의 운용 관련 요건을 관리

4.1 공학적 관리대책

4.1.1 레이저 등급별 공학적 관리대책

표4.1.1 공학적 관리대책

공학적관리대책	1/1M 등급	2/2M 등급	3R 등급	3B 등급	4 등급
보호외함	필수	필수	필수	필수	필수
인터록, 탈부착식 보호외함	-	-	-	필수	필수
정비점검판	-	-	-	필수	필수
키 사용제어	-	-	-	권장	필수
전체 개방빔 경로	-	-	-	필수	필수
한정 개방빔 경로	-	-	-	필수	필수
원격 인터록 커넥터	-	-	-	권장	필수
빔차단기 또는 감쇠기	-	-	-	권장	필수
활성화 경고시스템	-	-	-	권장	필수
실내레이저 통제구역	권장	권장	권장	필수	필수
임시레이저 통제구역	-	-	-	권장	권장
작업통제	-	-	-	권장	권장
장비라벨	필수	필수	필수	필수	필수
구역경고표지 및 활성화경고	-	-	권장	필수	필수

4.1.2 일반 공학적 관리대책

4.1.2.1 KAIST 교내에서는 ANSI의 공학적 관리대책 외에도 다음과 같은 일반 공학적 관리대책을 시행한다.



- (1) 통제구역에서 정상적인 레이저 사용 시 장비, 레이저 제어장치 및 비상구를 식별할 수 있도록 조명이 충분해야 한다. 4등급 레이저 통제구역은 레이저 가동 시 입구 외부에 이를 알리는 조명등에 불이 들어와야 한다.
- (2) 불소 또는 불화수소를 엑시머레이저 시스템의 여기매질(excitation medium)로 사용하는 연구실에는 실린더형 가스캐비닛 및 환기설비를 반드시 설치해야 한다.
- (3) 감전 등의 전기위험은 장비의 보호커버가 벗겨진 경우 발생할 수 있으며, 전기사고를 예방하기 위한 대책을 실시해야 한다. 차폐라벨 부착, 접지, 록아웃/태그아웃(lock-out/tag-out) 등이 주로 사용되는 안전대책이다.
- (4) 커튼, 실내비품 등의 연료원이 점화되면 화재위험이 발생하며, 가연성가스가 존재하는 경우 위험이 증가한다. 커튼, 차단벽 등은 불연성 소재여야 하고, 가스 및 유기용제는 잠재 점화원으로부터 격리시켜야 한다.
- (5) 화학적 위험에 해당하는 유기용제, 레이저 색소 등은 유해화학물질로 취급해야 한다. 색소는 용액제조 및 레이저 작업 시 특별한 취급주의를 기울여야 한다. 용제는 가연성이 있으며, 흡입 또는 피부흡수 시 독성을 유발할 수 있다. 이에 대한 안전대책으로는 색소 차단 용기(dye containment) 시스템의 누수 테스트, 2 중 차단 용기 및 폐기물 용기 사용, 개인보호구 착용 등이 있다.
- (6) 광학장치는 눈으로 향하는 레이저광의 양을 응축할 수 있으므로 레이저 사용자가 광학장치로 레이저광 또는 레이저광의 정반사를 직시하지 않도록 하는 제어책이 필요하다. 레이저 실험에 사용하는 현미경에는 감쇠필터가 장착되어야 한다.

4.2 행정적 관리대책

4.2.1 레이저 등급별 행정적 관리대책

표4.2.1 행정적 관리대책

행정적관리대책	1/1M 등급	2/2M 등급	3R 등급	3B 등급	4 등급
표준작업절차서	-	-	-	권장	필수
교육및훈련	-	권장	권장	필수	필수
허가된 연구활동종사자	-	-	-	필수	필수
정렬 절차	-	-	-	필수	필수
보호장비	-	-	-	권장	필수
비관계자통제	-	-	-	권장	필수

행정적관리대책	1/1M 등급	2/2M 등급	3R 등급	3B 등급	4 등급
지정된 정비직원	-	-	-	필수	필수
보안경	-	-	-	필수	필수
창문보호	-	-	-	필수	필수
보호차단벽 및 커튼	-	-	-	권장	권장
피부보호	-	-	-	UV엑시머인 경우 필수	UV엑시머인 경우 필수
경고표지 및 라벨	-	권장	권장	필수	필수
검안	-	-	-	권장	권장

4.2.2 일반 행정적 관리대책

4.2.2.1 KAIST 교내에서는 ANSI의 행정적 관리대책 외에도 다음과 같은 일반 행정적 관리대책을 시행한다.

- (1) 신규 레이저 또는 필수 레이저 부품을 구입하기 전에 반드시 연구실책임자의 구매검토를 받아야 한다.
- (2) 레이저 또는 레이저 시스템 전용 연구실에 대한 출입허가를 관리해야 한다. 연구실책임자가 허가한 연구활동종사자의 출입만 허용된다. 레이저 전용이 아닌 연구실에도 레이저 구역으로의 무단출입을 방지하기 위한 예방조치를 시행해야 한다.

4.3 표준작업절차서(SOP)

4.3.1 표준작업절차서 작성

4.3.1.1 표준작업절차서(SOP)는 연구실에서 사용하는 레이저 장비의 특징, 기능 및 사용에 대한 포괄적인 지침을 제공해야 한다.

4.3.1.2 SOP는 레이저광선의 위험성과 비광선 위험요소에 대해 다루어야 하며, 언제든지 손쉽게 참조할 수 있도록 조치해 두어야 한다.

4.3.1.3 SOP에는 다음의 내용이 수록된다.

- (1) 기기별 작업절차서, 요구사항 및 제약
- (2) 기기별 위험정보와 개인보호구(PPE) 필요사항
- (3) 빔 정렬 절차서
- (4) 레이저 사용 중 출입제한
- (5) 해당되는 경우, 의료적 감시 및 검안 권고사항
- (6) 해당되는 경우, 실외 사용 및 시연 요건

4.3.1.4 레이저연구실의 SOP 요건에 대한 보다 자세한 정보와 샘플 SOP는 부록G를 참조한다.

4.4 개인보호구(PPE)

4.4.1 개인보호구 착용

4.4.1.1 레이저 실험 시에는 특수한 개인보호구가 필요하다. 다만, 레이저 안전을 위해서 일반 상식과 바람직한 안전관행을 준수하는 것이 PPE를 착용하는 것 보다 더 중요하다는 점을 명심해야 한다.

4.4.1.2 눈은 레이저광으로 인해 심각한 손상을 입을 수 있는 부위이므로 눈 보호는 매우 중요하고 필수적인 사항이다.

4.4.1.3 고글, 안면가리개, 안경 등의 형태가 있으며, 작업에 사용하는 레이저의 파장과 출력으로부터 눈을 충분히 보호할 수 있는 제품을 활용해야 한다.

4.4.1.4 보안경 착용에 앞서 결함여부를 반드시 살펴보고, 사용 중인 레이저 파장에 적합한지도 확인해야 한다. 손상되었거나 부적합한 보안경은 폐기하고 교체해야 한다.

4.4.2 레이저 보안경

4.4.2.1 레이저 보안경은 눈을 적절히 보호해야 하며, 상태가 양호한 보안경을 모든 작업자가 사용할 수 있도록 충분한 수량으로 구비해야 한다.

4.4.2.2 레이저 보안경은 다음 사항을 충족해야 한다.

- (1) 3등급 및 4등급 레이저에 대한 ANSI Z87.1 표준에 부합해야 한다.
- (2) 광학밀도와 파장을 표시한 것이어야 한다.
- (3) 연구실에 신입생, 신규연구원 및 장비 또는 절차가 도입되는 경우 레이저 보안경의 수요를 반드시 재검토해야 한다.

4.4.3 피부보호

4.4.3.1 피부 보호는 화상을 야기하는 고출력 레이저에 급성 노출되거나, 일광화상, 색소침착, 피부암을 야기하는 UV 파장(295~400 nm)에 장시간 노출되는 것을 예방하기 위해 필요하다.

4.4.3.2 3B등급 또는 4등급 레이저 사용 시 장갑, 연구실 가운, 자외선차단제, 피부크림, 안면가리개 등을 적절히 활용해 피부를 보호해야 한다.

4.4.3.3 레이저 연구실의 개인보호구에 대한 보다 자세한 정보는 부록F.개인보호구를 참고한다.

4.5 빔 정렬

4.5.1 사고형태

4.5.1.1 최근 보고에 따르면, 빔 정렬은 안전에 가장 많은 주의를 기울여야하는 작업으로 다음과 같은 사고 형태를 갖는다.

- (1) 알려진 레이저 부상 중 73%가 눈과 관련해서 발생했다.
- (2) 눈과 관련된 부상의 35%가 빔 정렬 과정에서 발생했다.
- (3) 눈과 관련된 부상의 68%가 영구적인 부상을 초래한다.

4.5.1.2 광선 정렬 시 눈에 대한 위험성이 매우 크기 때문에, 눈이 광선, 혹은 광선의 정반사나 난반사의 최대허용노출량보다 높은 수준의 광선에 노출되지 않도록 주의해서 정렬 작업을 수행해야 한다.

4.5.1.3 연구과정에서 레이저를 일상적으로 사용하는 연구실은 정렬 절차를 반드시 작성해야 하며, 이 절차서에는 공급업체(자격을 갖춘 공급업체가 정렬을 수행하는 경우)에 대한 정보와 정렬 빈도에 대한 내용을 명시해야 한다.

4.5.2 정렬 수행 시 준수사항

4.5.2.1 정렬 절차를 검토하고 이를 준수한다.

4.5.2.2 레이저 정렬용 보안경을 착용한다.

4.5.2.3 정렬 작업 동안 보안경을 절대로 벗지 않아야 한다.

4.5.2.4 보안경을 착용한 상태에서 광선이 보이지 않는다면, 해당 보안경의 광학 밀도가 부적합하다는 의미이므로, 가동 중인 레이저를 끄고 올바른 광학 밀도로 제작된 보안경을 구입한 후 작업을 재개한다.

4.5.2.5 정렬보조장치를 사용한다.

4.5.2.6 가시 범위의 빛을 내는 적외선 및 자외선 카드를 사용한다.

4.5.2.7 적외선 뷰어(광선을 더 잘 보려고 빛을 낮추지 않아야 한다)를 사용한다.

4.5.2.8 감소된 출력에서 레이저를 사용하거나 낮은 출력의 레이저로 대체해 광선 경로를 추적하고 확인한다.

4.5.2.9 각 빔 구역에서 빔 블록을 사용해 미광(stray light)의 가능성을 줄인다.

4.5.2.10 정렬을 완료하고 출력을 증가시키기 전에 미광이 있는지 확인한다.

05

비상대응절차

5.1 비상대응절차

5.2 레이저 사고 비상대응절차





5. 비상대응절차

5.1 비상대응절차

일상적인 레이저 운용상황에서 벗어나는 레이저 사고가 발생한 경우, 즉시 다음을 수행한다.

1. 레이저 장치의 전원을 차단한다.

2. 화재가 발생한 경우

- 1) 연구실 내부의 사람들을 모두 대피시키고, 자신은 마지막으로 떠나야 한다.
- 2) 큰소리로 '불이야'를 계속 외친다.
- 3) 화재경보를 울린다.
- 4) 연구실 내부에서 대피로를 확보하고 출입구를 등지고 소화기를 이용하여 초기소화를 시도한다.

3. 심각한 부상 발생 시, 즉시 119에 신고한다.

부상이 경미한 경우 즉시 다음의 장소로 안내한다.

카이스트 클리닉	건강관리실
<ul style="list-style-type: none">▶ 장소 : E21▶ 연락처 : 042-350-0500▶ 근무시간 : 평일 09:00~18:00	<ul style="list-style-type: none">▶ 장소 : N13(태울관), 2104호▶ 연락처 : 042-350-4816▶ 근무시간 (평일) 09:00 ~ 22:00 (주말) 10:00 ~ 18:00

4. KAIST 재난안전상황실(0119)에 신고한다.

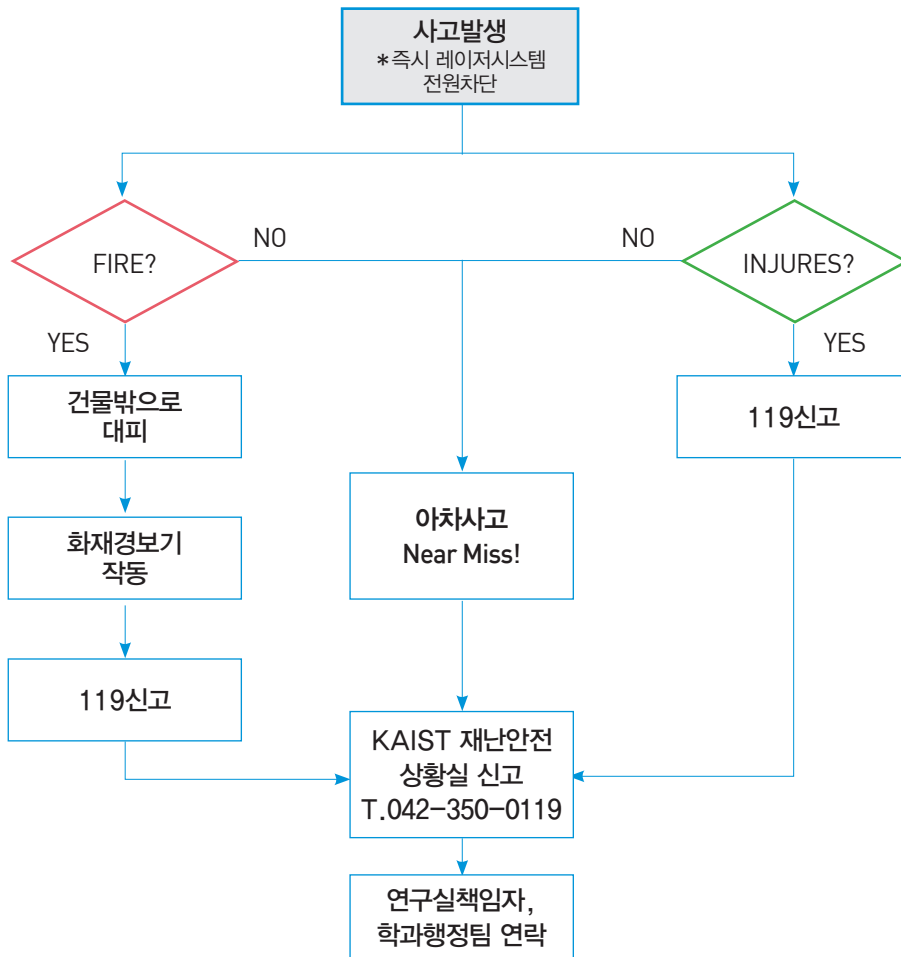
5. 연구실책임자 및 학과행정실에 연락하여 비상상황을 설명한다.



5.2 레이저 사고 비상대응절차

레이저 사고 비상대응절차 Laser Incident Emergency Procedures

레이저 사고 발생 시 즉시 다음 절차를 확인하고 수행한다.
IN THE EVENT OF LASER INCIDENT, DO THE FOLLOWING IMMEDIATELY



연구실책임자	연구실책임자 연락처	학과행정팀 연락처
--------	------------	-----------

06

부 록

- 부록 A. 레이저 노출의 생물학적 영향
- 부록 B. 레이저 등급 분류표
- 부록 C. 레이저 안전 점검표
- 부록 D. 3B등급 및 4등급 레이저 관리대책
- 부록 E. 레이저 포인터 안전
- 부록 F. 개인보호구(PPE)
- 부록 G. 표준작업절차서(SOP)



부록 A. 레이저 노출의 생물학적 영향

1. 광선위험(BEAM-RELATEDHAZARDS)

가. 피부에 대한 위험성

피부에 발생할 수 있는 생물학적 손상의 종류는 다음과 같다.

- 1) 피부화상 : 급성노출되면 심각한 화상이 야기될 수 있다.(300~10,000nm)
- 2) 착색변화 : 만성노출되면 광화학적 반응이 야기될 수 있다
(주로 중자외선 200~300 nm)
- 3) 피부암 : 200~280 nm UV-C의 산란파에 만성 노출시 유발, 홍반(일광화상)을 야기하고 피부 노화가 촉진된다.

광생물학적 스펙트럼 영역	눈에 미치는 영향	피부에 미치는 영향
자외선C (200~280 nm)	광각막염	홍반(화상) 생성 피부암 피부 노화 촉진
자외선B (280~315 nm)	광각막염	착색 증대
자외선A (315~400 nm)	광화학적 백내장	색소 침착 피부 화상
가시광선 (400~780 nm)	광화학적 효과와 온열효과로 인한 망막 손상	색소 침착 광민감성 반응 피부 화상
적외선A (780~1400 nm)	백내장, 망막 화상	피부 화상
적외선B(1.4~3.0 μm)	각막 화상, 방수호림, 백내장	피부 화상
적외선C (3.0μm~1000μm)	각막 화상만 발생	피부 화상

나. 눈에 대한 위험성

인간의 눈이 기능하는 방식을 이해하면 레이저가 야기하는 위험을 이해하는데 도움이 된다.

부록 A. 레이저 노출의 생물학적 영향

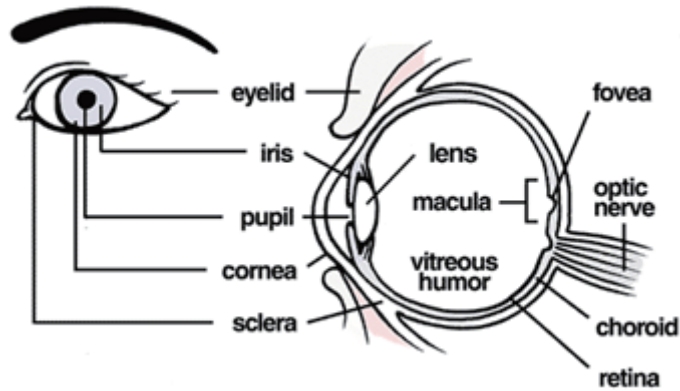


그림. 인간 눈의 단면

Eyelid 눈꺼풀 / Iris 홍채 / Pupil 동공 / Cornea 각막 / Sclera 공막 / Lens 수정체 / Macula 망막황반
 Vitreous humor 유리체 / Fovea 중심와 / Optic nerve 시신경 / Choroid 맥락막 / Retina 망막

1) 각막(Cornea)

- 빛을 전달하고 초점을 맞추는 가장 바깥쪽의 투명한 층
- 안구굴절력의 70%
- 각막 또는 상피층에 손상이 있는 경우, 눈에 모래가 들어간 듯한 불편함과 통증을 느낄 수 있으나, 보통 48시간에서 1주일 사이에 빠르게 치유된다.
- 각막의 깊은 층이 손상되면 영구적인 부상이 발생할 수 있다.
- 중적외선 및 원적외선 레이저광이 각막 화상을 유발할 수 있다.

2) 수정체(Lens)

- 빛을 모아 망막에 집중시켜 주는 각막 뒤쪽의 투명한 구조체
- 수정체로 물체의 초점을 맞춤. 수정체가 굳거나 손상되면 물체를 또렷하게 볼 수 없다.
- 안구굴절력의 30%
- 중적외선 및 원적외선 레이저광이 백내장을 일으킬 수 있다.

3) 망막(Retina)

- 안구 뒤쪽의 얇은 막으로 빛의 존재와 세기에 반응하는 감광체 신경세포로 구성
- 눈에서 가장 중요한 부위이다.
- 0.55 mm 두께로서 쉽게 손상된다.
- 낮과 밤, 색상, 주변시력, 시력 등과 같은 시각능력을 담당하는 간상세포, 원추세포, 감광체로 구성
- 가시광선 및 근적외선 레이저광
 - 아르곤 레이저 청색광(400~550 nm)에 노출되면 망막 화상 발생 가능
 - 망막 위험영역(400-1,400 nm)에서 망막 화상/박리 발생 가능
 - 망막에 대한 레이저 충격(laser strike)으로 맹점 유발 가능. 반복된 망막 화상은 실명 초래

부록 A. 레이저 노출의 생물학적 영향

4) 중심와(Fovea)

- 원추세포의 대부분이 중심와(망막황반의 중심)에 위치하며, 망막의 3~4%를 차지하고 가장 세밀하고 예리한 시력을 담당하는 부위
- 중심와가 레이저 화상을 입으면 그 즉시 급성 실명이 발생할 수 있다.
- 근적외선 레이저광은 홍채에서 강하게 흡수되지 않고, 중심와에 집광된다.

2. 비광선 위험요소(Non-beam Hazards)

레이저 위험요소는 광선과 인체의 직접적인 상호작용에만 국한되지 않는다. 추가적인 위험요소가 존재하며, 레이저 시스템을 운용할 때는 이를 충분히 고려해야 한다.

비광선 위험요소는 실험대상과 광선 사이의 간접적인 상호작용의 결과로 발생되거나, 레이저 장비의 전기적, 화학적, 물리적 속성에 의해 야기된다.

다음 목록 외에도 다양한 비광선 위험이 존재하지만, 잠재적 레이저 위험요소를 검토할 때 고려해야 하는 핵심항목은 다음과 같다.

- 전기 위험성
- 화재 위험성
- 압축가스 및 용제
- 레이저 색소
- 연기에서 발생된 오염물질
- 이차 방사 및 플라즈마 방사

가. 전기위험성

- 고전압 레이저 부품
- 전류가 흐르는 노출된 도체 또는 매개체와의 접촉
- 개인이 전기회로 구축
- 환경적 요인 : 괴어있는 물, 불충분한 가시성, 번잡한 작업공간, 정식훈련을 받지 않은 인력
- 사고는 주로 설치, 수리, 유지보수 중에 발생

나. 화재 또는 폭발 위험성

- 주로 전기적 위험요소와 함께 나타남
- 레이저 에너지(점화원)가 농축된 가연성 물질(용제, 가스 등)과 접촉시 발생 가능
- 레이저 에너지가 압축가스와 접촉시 발생 가능
- 정전화 또는 불꽃으로 점화 가능

다. 화학적 위험성

- 색소레이저 염료는 유해화학물질로 취급해야 함
- 레이저 발생 공기 오염물(LGAC, 레이저 연기)

부록 A. 레이저 노출의 생물학적 영향

- 레이저 광선과 가공된 소재 간의 상호작용, 화학적 파편, 열분해 산물 등에 의해 형성
- 광선의 세기로 공기오염의 심각도 결정
- 에어로졸, 가스, 증기 등의 형태일 수 있음
- 에어로졸은 구성, 크기, 독성이 다르나, 대부분은 미세한 크기로 폐로 흡입될 수 있음
- 일반적으로 의료용 레이저 사용시 발생하나 이에 국한되지 않음
- 전염성 물질, 혈행성 병원균(바이러스 및 박테리아), 유기재(지방족 화합물, 방향족), 산화물 및 무기재(예 : 비 금속산화물)

라. 색소레이저 위험성

- 색소레이저 염료, 용제 및 색소레이저 제품은 유독성이 있거나 발암물질임
- 색소로 실험하는 연구활동종사자는 눈, 피부 및 흡입 보호에 적합한 개인보호구를 사용해야 함
- 저장 중인 모든 색소 재료 및 폐기물은 두 겹으로 싸서 누출을 방지해야 함
- 색소 용액의 제조 및 색소레이저 작업 등 색소를 취급할 때는 주의를 기울여야 함
- 레이저 색소 용액은 화학가스 배출 후드 내부에서 제조해야 함
- 색소 용액을 사용하기 전에 색소레이저 부품의 누출검사를 실시해야 함. 모든 튜브는 단단히 고정하거나 클램프로 고정해야 함
- 펌프 및 수조 아래에 누출방지 받침판을 설치해야 함
- 모든 색소 및 용제에 대한 물질안전보건자료(MSDS)를 언제든지 참조할 수 있도록 비치해야 함
- 거의 모든 색소 용액 용제는 가연성이 있으며, 흡입 또는 피부 흡수 시 독성을 유발할 수 있음

마. 압축가스 위험성(일반 레이저 가스)

- 단순질식성가스 : 질소(N₂), 아르곤(Ar), 헬륨(He), 크립톤(Kr)
- 독성가스
- 일산화탄소(CO) : 화학적 질식제, 심장기능 저하(25ppm TLV)
- 이산화탄소(CO₂) : 질식제, 경미한 혼수 상태 유발(5,000ppm TLV)
- 불소(F) : 조직부식, 폐부종(1ppm TLV)
- 염화수소(HCl) : 눈, 피부, 점막에 자극을 주는 자극제(최대허용농도5ppm)

바. 방사선 위험

- 레이저는 가공 조제 중인 물질과 상호작용함 : 플라즈마 연기 배출
- 플라즈마는 광학 방사원(자외선, 가시광선)
- 레이저 작업에 필요한 부품으로부터 발생하는 이차 방사
- 스위치 및 기타 소스로부터 X-방사
- 배출 튜브, 플라즈마 튜브, 광펌핑 시스템으로부터 광학 방사 발생
- 무선 주파수

부록 B. 레이저 등급 분류표

1. 레이저 등급 분류

등급	세부내용
1등급	정상적인 작동 시 눈이나 피부손상을 유발하는 것으로 알려진 수준의 광선을 방출하지 못하는 레이저, 혹은 그러한 레이저가 포함된 레이저 시스템. 단, 상위 등급의 레이저가 내장된 1등급 인클로저가 정비용적으로 개방되는 상황에서는 1등급보다 높은 수준의 주의 필요
1M등급	집광장치로 관찰하지 않는 한 위험한 노출을 일으키지 않는 것으로 간주됨
2등급	인간의 정상적인 회피 반응이 작동하는 시간(0.25초) 내에 피부 및 눈 손상을 일으키는 것으로 알려진 수준의 광선을 방출하지 못하는 가시광 레이저
2M등급	가시광 스펙트럼 영역에서 방출되며, 집광장치를 통해 관찰 시 잠재위험이 존재함
3R등급	눈에 적절히 초점이 맞춰져 있고, 안정적인 상태에서 직접 조사되거나 정반사되는 경우 잠재적인 위험성이 존재하는 레이저 시스템
3B등급	직접 조사 혹은 정반사(거울반사)시 눈에 대한 잠재적인 위험을 야기하는 중간출력 레이저(가시 및 비가시 영역). 3B등급 레이저는 특정 파장영역에서 가동 중인 고출력3B 레이저를 제외하고는 확산(퍼짐) 위험 또는 심각한 피부 위험을 수반하지 않음
4등급	직접 조사 및 난반사 조건 모두에서 눈과 피부에 급성위험을 초래할 가능성이 있는 것으로 간주되는 고출력 레이저(가시 또는 비가시). 화재위험(발화) 및 목표 물질이나 가공용 물질에서 발생하는 부차적 방사로 인한 잠재위험도 고려해야 함

2. 레이저 유형

레이저유형	파장(μm)	종류	유형
아르곤(Ar)	0.488, 0.514, etc.	기체	CW*, P*
이산화탄소(CO2)	9.6, 10.6	기체	CW, P
구리증기(Cu)	0.510, 0.578	기체	CW, P
갈륨비소(GaAs)	0.82~0.95	반도체	CW, P
헬륨카드뮴(HeCd)	0.325, 0.441	기체	CW
헬륨네온(HeNe)	0.543, 0.594, 0.612, 0.633, 1.152, 3.390	기체	CW
수은증기(Hg)	0.48, 0.615, 1.530, 1.813	기체	CW
네오디뮴YAG(Nd:YAG)	0.266, 0.532, 1.064, 1.33	고체	CW, P
질소(N2)	0.869, 0.870, 0.889, 1.231, 1.048,	기체	CW, P
로다민6G	0.57~0.65	액체(색소)	CW, P
루비(홍옥)	0.694	고체	P
타이타늄:사파이어(Ti:sapphire)	0.670	고체	CW, P
수증기(H2O)	27.974, 33.033	기체	CW
염화 크세논	0.308	기체	CW, P

*CW : 연속파레이저(0.25초 이상 지속적 출력)

*P : 펄스레이저(단일 펄스 또는 연속 펄스의 형태로 에너지를 방출하는 레이저로, 펄스지속시간 0.25초 이하)

부록 C. 레이저 안전 점검표

레이저 안전 자체검사 점검표 Laser Safety Self-Inspection Checklist

학과명 Department	실험실명(건물명/호실) Lab Name(Building/Room Number)	
작성자 Written by	서명 Signature	확인일시 Check-up Date
연구책임자(지도교수) 승인	서명 Signature	연구실책임자

일련번호	유지보수일자	그렇다	아니다	해당없음
1	레이저 등급분류(2, 2M, 3R, 3B, 4)가 적절한가?			
2	표준작업절차서가 비치되어 있는가?			
3	정렬 절차서가 비치되어 있는가?			
4	유지보수 절차서가 비치되어 있는가?			
5	레이저 작업자 전원이 적절한 교육에 참석했는가?			
6	모든 레이저에 정확한 라벨을 부착했는가?			
7	레이저 연구실의 모든 입구에 적절한 경고표지를 눈높이에 부착했는가?			
8	(Class 3R, 4)점등식 경고표지판이 설치되어 있는가?			
9	(Class 3R, 4)차단벽과 보호막이 있으며, 상태는 양호한가?			
10	모든 빔 경로의 끝에 빔 차단기가 있으며 불연성인가?			
11	적절한 개인보호구가 구비되어 있으며, 이를 활용하고 있는가?			
12	레이저 작업자가 레이저 실험 중 액세서리나 시계를 착용하는가?			
13	(Class 3R, 4)보호외함에 인터록이 설치되어 있는가?			
14	(Class 3R, 4)비관계자의 출입을 제한하는가?			
15	보안경이 수행할 레이저 실험에 적절한가?			
16	(기타결함사항)			

부록 C. 레이저 안전 점검표

레이저 안전 정기점검 및 정밀안전진단 점검표 Laser Safety Inspection Form

학과명 Department	실험실명(건물명/호실) Lab Name(Building/Room Number)	
검사자 Inspector	연구책임자(지도교수) Professor	점검일시 Draw-up Date
레이저 종류 Laser Type	레이저 등급 Laser Class	모델 Model #

레이저 표지, 라벨, 보안		Y	N	Comments
1	레이저 등급 라벨이 부착되어 있는가?			
2	레이저 위험 라벨이 부착되어 있는가?			
3	레이저 상태 표시기가 연구실 밖에 설치되어 있는가?			
4	연구실 출입통제는 이루어지고 있는가?			
5	인터록장치가 설치되어 있으며, 제대로 작동하는가?			
레이저 기기 안전관리 대책		Y	N	Comments
6	보호외함이 있는가?			
7	보호외함에 인터록 장치가 설치되어 있는가?			
8	빔 셔터가 있는가?			
공학적 관리 대책		Y	N	Comments
9	레이저 발생장치가 테이블에 고정되어 있는가?			
10	정상적인 눈높이에 빔 경로가 노출되어 있지 않은가?			
11	빔 경로를 차단할 수 있는가?			
12	빔 차단벽이 있는가?			
행정 및 절차적 안전 대책		Y	N	Comments
13	표준작업절차서가 구비되어 있는가?			
14	정렬 절차서가 구비되어 있는가?			
15	허가된 연구활동종사자만 레이저 작업을 수행하는가?			
16	허가받지 못한 자를 제한하는 적절한 조치를 취하고 있는가?			
17	레이저를 취급하는 모든 연구활동종사자가 안전교육을 이수했는가?			
18	레이저로부터 눈을 적절히 보호하기 위한 장치가 마련되어 있는가?			
19	레이저로부터 피부를 적절히 보호하기 위한 장치가 마련되어 있는가?			
20	사고발생 시 비상대응절차를 이해하고 숙지하고 있는가?			

부록 D. 3B등급 및 4등급 레이저 관리대책

KAIST 연구실에서 레이저를 설치하고 사용할 때는 다음의 규정된 행정적, 절차적, 공학적 안전관리대책을 반드시 준수해야 한다.

1. 공학적 관리대책

가. 출입문 인터록

ANSI Z136.1 지침에서는 3B등급 또는 4등급 레이저가 작동중인 제한된 레이저 구역으로 진입하는 출입문에 반드시 인터록을 설치할 것을 규정하고 있다. KAIST 연구실에서 3B등급 또는 4등급 레이저를 사용하는 연구실의 출입문은 다음 항목을 고려해 인터록 설치를 권장한다.

- 레이저 전원을 차단하지 않고도 레이저 연구실에 진입하기 위한 오버라이드 신호가 장착된 키 스위치(key switch)
- 연구실 내부에서 연구실로의 진입을 허가하기 위한 수동 오버라이드 스위치
- 오버라이드 키 또는 스위치를 사용하지 않은 상태에서 내부 진입이 있을 때 셔터 또는 빔차단기를 제어하기 위한 인터록 장치(인터록이 장착된 스위치는 빔을 차단 또는 감쇠한다)
- 인터록 스위치가 작동한 이후에는 신호를 반드시 수동으로 재시작하도록 설정

출입문 인터록 장치를 설치할 때에는 안전팀에 연락해 해당 장치가 올바르게 구축되었는지 확인해야 한다.

레이저 작업 중에 자리를 비울 때는 전원공급기의 전원을 차단하고, 전원 스위치나 주 인터록 장치에서 키를 제거해 장비가 무단 작동되지 않도록 한다.

나. 출입제한

레이저 또는 레이저 시스템 전용 연구실로의 출입을 통제해야 한다. 연구실책임자 또는 연구실안전업무담당자의 허가를 받은 연구활동종사자만이 이러한 연구실에 출입할 수 있게 해야 한다.

레이저 또는 레이저 시스템을 사용하는 기타 모든 연구실은 레이저에 대한 무단접근을 방지하기 위해 특별한 예방책을 실시해야 한다. 다음은 이러한 예방책의 예이다.

- 연구실 내부에 별도의 출입통제구역 설치
- 키 제어
- 레이저 커튼 설치

다. 보호외함(모든 등급용)

가능한 경우, 모든 등급의 레이저 및 레이저 시스템에 보호외함을 설치해야 한다. 3B등급 및 4등급 레이저용 보호외함에는 레이저 작업 및 유지보수 중에 보호외함이 개방되면 작동하는 인터록 장치가 장착되어야 한다.

라. 키와 비밀번호로 출입제어

4등급 레이저 또는 레이저 시스템에는 주 스위치가 있어야 한다. 레이저 빔 및 시스템의 활성화와 차단을 제어하는 주 스위치는 키를 조작하거나 비밀번호를 입력하는 방식으로 작동한다.

부록 D. 3B등급 및 4등급 레이저 관리대책

작업 중 자리를 비워야 하는 경우, 레이저의 전원을 차단하고 무단사용을 방지해야 한다. 레이저 시스템은 키를 조작해 가동되므로, 콘솔에서 키를 제거해 안전하게 보관해야 한다. 비밀번호를 입력해서 레이저 가동을 중단할 수도 있다. 레이저 작업 중 자리를 비워야 한다면 연구실 출입문을 잠근 후 떠나야 한다. 레이저를 장시간 사용하지 않는 기간에는 주 스위치를 차단된 상태로 유지해야 한다.

마. 빔 경로

모든 3B등급 및 4등급 레이저 또는 레이저 시스템에는 빔 차단기나 감쇠기가 영구 장착되어야 한다. 빔 차단기나 감쇠기는 최대허용노출량 수준을 초과하는 레이저 조사에 접근하는 것을 방지할 수 있는 것이어야 한다.

빔 차단이 현실적으로 불가능한 경우, 다음과 같은 기타 빔 관리대책을 활용해야 한다.

- 가능한 경우 빔 경로를 광학테이블(optical table)로 제한하고, 사람들로 붐비는 구역을 횡단하지 않도록 해야 한다.
- 모든 창호를 차폐해 레이저 통제구역에는 반사 혹은 난반사 물질이 없게 한다.
- 난연자재를 4등급 레이저의 차단벽으로 설치한다.
- 레이저 투과가 불필요한 경우, 레이저를 끄거나 빔 셔터(beam shutter) 또는 캡을 활용한다.
- 빔의 유용한 경로의 종단에서 빔을 차단한다. 빔 블록이 아래로 떨어져 고강도 빔에 사람이 노출되는 상황을 막기 위해 빔 차단기(beam stop)를 견고한 기계식 받침대로 고정시켜야 한다.
- 서 있거나 앉아 있는 사람의 눈높이에 빔 경로가 위치하지 않도록 주의해야 한다.
- 빔이 출입구로 향하지 않도록 방향을 조정한다.
- 빔 정렬 작업 중에 빔이 위를 향하지 않도록 방향을 조정한다.
- 입구에서 빔을 최대허용노출량 이하 수준으로 충분히 감쇠하도록 적절한 커튼, 보호막 등으로 입구차단벽을 설치한다.

바. 조명 - 통제구역에 충분한 조명이 제공되어야 한다.

- 레이저 작업 동안 조명이 꺼지는 상황에 대비해 손이 쉽게 닿는 곳에 제어 스위치를 설치하거나 무선 제어 스위치를 설치한다.
- 작업대, 장비 모서리, 스위치 위치, 복도 등을 식별할 수 있도록 형광띠를 사용해야 한다.
- 정전 시 연구실에서 안전하게 나가기에 레이저 구역 주변의 밝기가 충분하지 않은 경우 비상등을 설치한다.
- 4등급 레이저 통제구역 입구에는 레이저 가동 중임을 눈으로 즉시 확인할 수 있는 표식(예 : 표시등)이 설치되어 있어야 한다. 레이저 가동 중에는 수동 혹은 자동으로 조명이 켜져 있어야 한다.

사. 환기

불소 또는 불화수소를 엑시머레이저 시스템의 여기매질(excitation medium)로 사용하는 연구실에서는 한국가스안전공사 인증을 받은 실린더 전용 가스캐비닛을 반드시 사용해야 한다. 모든 가스캐비닛의 내부는 음압(-50 Pa 이상)을 유지하여야 한다.

아. 전기위험 예방

레이저 사용 시 감전 위험이 존재한다. 전류가 흐르는 노출부 위에 접촉하거나 전원공급기가 50볼트를 초과해 작동하는 경우 감전이 발생할 수 있다. 이러한 노출은 레이저 구성, 설치, 유지보수, 수리 시 장비의 보호덮개가 제거된 경우 발생할 수 있다.

부록 D. 3B등급 및 4등급 레이저 관리대책

전기 위험을 예방하기 위해서는 다음의 주의사항을 준수해야 한다.

- 차단벽 시스템 : 전류가 흐르는 도체에 우발적으로 접촉하는 것을 방지하기 위한 예방조치로 차단벽 시스템을 설치해야 한다. 이는 레이저 장비로 인한 감전사고를 예방하기 위한 주요 방법이다.
- 차단막 : 콘덴서가 전력최고치를 견디는지 점검하고, 콘덴서 폭발로 인한 부상을 방지하기 위해 차단막을 구비해야 한다.
- 접지 : 모든 레이저 시스템 부품은 적절히 접지해야 한다.
- 모든 전기배선은 전기법규의 요건에 부합해야 하며, 필요 시 시설팀의 자문을 구해야 한다.
- 전기회로는 전기화재의 가능성이 있는지 검토해야 한다.
- 라벨 : 레이저 시스템에는 작동전압, 주파수와 출력 혹은 전류가 표시되어야 한다.
- 전선을 고정하고 바닥배선을 최소화해서 전선에 걸려 넘어지는 일이 없도록 한다.
- 레이저의 유지보수가 필요한 경우 록아웃/태그아웃(lock-out/tag-out) 절차를 준수한다.
- 전선과 코드가 피복으로 절연되어 있고 피복이 벗겨진 부분은 없는지 확인한다. 전기단자에도 보호커버를 씌워야 한다.
- 레이저 전원공급장치를 단단히 고정해 추락을 방지한다.
- 전기부품을 다룰 때는 반드시 2인 이상이 작업을 함께 수행한다.
- 레이저 운용 중에는 괴어있는 물 부근에서 작업하지 않는다. 냉방계통 누수등 비상사태에 대비한다.

자. 화재위험 예방

레이저는 연구실 내 커튼 및 비품 등의 연료원을 발화시킬 수 있다. 가연성가스가 있는 경우 화재위험이 증가한다. 화재 및 폭발위험을 감소시키기 위해 다음의 주의사항을 준수해야 한다.

- 빔경로 부근에 마른 재료나 종이재료를 두지 않아야 한다.
- 의도한 목표물에 레이저를 직접 조사하지 않을 때는 항상 대기모드로 전환해야 한다.

차. 레이저 색소 및 유해화학물질

실험실에는 다양한 비광선 위험요소가 존재할 수 있다. 특정 레이저 색소는 독성이 강하거나 발암성이 있으며, 모든 색소는 유해화학물질로 취급해야 한다. 모든 색소를 검토하여 유독성이나 휘발성이 낮은 색소 혹은 화학물질로 대체 가능한지 살펴봐야 한다.

색소는 잦은 교체가 필요하므로, 색소 용액 제조나 색소레이저 작동 시를 비롯해 색소를 취급할 때는 각별한 주의를 기울여야 한다. 색소 용액에 적합한 거의 모든 용제는 가연성이며, 흡입 또는 피부 흡수 시 독성을 유발할 수 있다.

레이저 색소를 사용할 때는 다음의 주의사항을 준수해야 한다.

- 색소레이저 부품은 실제 색소 용액을 사용하기 전에 누출검사를 실시해야 한다. 모든 튜브 연결부위는 단단히 고정하거나 클램프로 고정해야 한다.
- 레이저 색소 용액은 흡후드 내부에서 제조해야 한다.
- 색소로 작업하는 연구활동종사자는 눈, 피부 및 흡입 보호에 적합한 개인보호구를 사용해야 한다.
- 펌프 및 수조 아래에 누출방지 받침판을 설치해야 한다.
- 모든 색소 및 용제에 대한 물질안전보건자료(MSDS)를 숙지하고 연구실내에 비치해야 한다.

부록 D. 3B등급 및 4등급 레이저 관리대책

카. 광학장치 사용

현미경이나 관찰보조용으로 사용되는 기타 광학장치가 눈에 도달하는 레이저를 집광할 수 있고, 이때 빛의 세기는 해당 광학장치의 확대율을 제공한 수준까지 증가될 수 있다. 광학부어장치를 사용할 때는 사용자가 빔이나 빔의 정 반사를 직접 보지 않도록 주의를 기울이는 것이 매우 중요하다. 레이저 작업에 사용하는 현미경은 감쇠 필터를 반드시 장착해야 한다.

2. 행정적 관리대책

연구실책임자는 서면으로 작성된 표준작업절차서(SOP) 등을 비롯한 행정적 관리대책을 활용할 수 있다. 이러한 대책은 3B등급 및 4등급 레이저에 적용된다.

가. 라벨

레이저에는 등급과 종류를 표시한 라벨을 부착해야 한다. 레이저 등급 라벨은 레이저 외함에 명확하게 보이도록 부착되어야 한다. 레이저 사용자는 레이저 라벨에 최신 정보가 명확하게 표시되도록 관리해야 한다. 연구실책임자는 이러한 라벨의 부착 여부를 확인할 책임이 있다.

나. 경고표지

2, 3, 4등급의 레이저를 사용하는 연구실에서는 연구실 내부의 각 입구에 레이저 구역 경고표지를 눈높이에 맞춰 의무적으로 부착해야 한다. 이러한 경고표지는 해당 연구실과 레이저 시스템에 따라 다르다. 경고표지는 안전팀에서 받을 수 있다.

모든 표지에는 레이저 종류, 방출된 파장, 펄스 시간폭 및 레이저 시스템의 최대출력이 표시되어야 한다. 아래 그림은 2등급 및 3R등급 레이저 시스템의 구역경고표지의 예이다.



3B등급 및 4등급 레이저 시스템 연구실은 위험, 위치, 레이저 상세정보 및 연구실에 3등급 또는 4등급 레이저 시

부록 D. 3B등급 및 4등급 레이저 관리대책

스텝이 있음을 나타내는 적색 및 백색의 표지를 부착해야 한다. 1대 이상의 레이저 혹은 레이저 시스템이 가동 중인 연구실은 그 중 가장 높은 등급으로 표시해야 한다.

모든 표지에는 레이저 종류, 방출된 파장, 펄스 시간폭과 레이저 시스템의 최대출력이 표시되어야 한다. 아래 그림은 4등급 레이저 시스템의 구역경고표지의 예이다.



다. 점등식 경고표지판

ANSI 지침에서는 점등식 경고표지판을 설치해야 한다고 규정한다. 신규 레이저 연구실은 이를 반드시 설치해야 하고, 기존 레이저 연구실은 이를 새로 장착해야 한다. KAIST의 일부 레이저 연구실에는 레이저 통제구역의 각 입구 상단에 자동 점등식 경고표지판이 설치되어 있다. 이러한 표지판에는 “LASER ON, DANGER”라고 표시되어 있다. 이러한 표지판이 연구실의 각 레이저와 연결되어 있으므로, 레이저가 가동되면 표지판에도 자동으로 불이 켜져야 한다. 기타 구역에서는 점등식 표지판을 수동으로 켤 수 있다.

각 레이저 연구실에서는 점등식 경고표지판과 입구 경고표지판을 병행해서 사용해야 한다.



부록 E. 레이저 포인터 안전

펜 크기의 레이저 포인터는 주로 배터리를 전원으로 하여 작동하며, 제대로 사용하지 않으면 눈에 손상을 줄 수 있다. 이로 인한 잠재위험은 눈이 보호되지 않은 상태에서 레이저 광선을 직시하는 경우에 국한되며, 피부에 대한 위험성은 없다. 펜 크기의 레이저 포인터는 최근 수년간 프레젠테이션에서 일상적으로 활용되는 도구로 자리잡았다. 이처럼 배터리로 작동하는 레이저 포인터는 좁고 밝은 적색광선을 발산하고, 휴대와 사용이 간편하며, 비교적 저렴할 뿐 아니라 언제든지 사용할 수 있는 장점이 있다. 사람에게 레이저 포인터 광선을 일부러 쏘는 것과 같이 레이저 포인터를 오용하는 것은 금지되어 있다.

레이저 포인터를 사용할 때는 다음의 지침을 준수해야 한다.

- 레이저 포인터에 적절한 레이저 위험기호로 표시한 라벨을 부착해야 한다. 출력이 0.5 mW 이상인 포인터는 반드시 레이저 등급, 최대출력, 레이저 파장 등을 표시해야 한다.
- 레이저 포인터 사용 전에 제품 안전지침을 검토해야 한다.
- 교내에서 레이저 포인터를 사용할 때는 포인터의 소유자가 관련 책임을 진다.
- 레이저 포인터를 본래 용도로만 사용해야 한다. 무분별한 사용은 눈에 손상을 입힐 수 있다.
- 레이저포인터의 광선을 자신이나 타인에게 의도적으로 쏘지 않아야 한다. 레이저광선을 일부러 직시하지 않아야 한다.
- 레이저 포인터는 안전한 장소에 보관하고, 사용하지 않을 때는 전원을 꺼야 한다.
- 레이저 포인터를 사용할 때는 거울과 같은 표면(유리, 금속 및 기타 반사가 잘 되는 물질)을 피해야 한다.
- 망원경, 쌍안경, 관찰용 광학장치 및 기타 유사장치 등의 광학도구를 사용해 레이저포인터의 광선을 볼 수 있는 상황에서는 3R등급 레이저 포인터의 사용을 금한다.

부록 F. 개인보호구(PPE)

레이저로 작업할 때는 특정한 개인보호구가 필요하다. 무엇보다 우리의 눈이 레이저로 인해 심각한 손상을 입을 수 있음을 확실히 인식하는 것이 중요하다. 연속파 레이저와 펄스레이저 모두 우리 눈에 잠재적인 위험을 일으킬 수 있으나, 레이저가 펄스마다 강력하게 방사되면서 눈에 여러 가지 심각한 손상을 미칠 수 있는 펄스레이저의 위험성이 더 높다. 보안경 착용에 앞서 결함유무를 반드시 확인하고, 사용 중인 레이저의 파장에 적합한지 점검해야 한다.

다음의 요건을 충족해야 한다.

- 최대허용노출량(MPE)이 초과될 수 있는 상황에서는 보안경을 반드시 착용해야 하나, 그렇지 않더라도 레이저를 사용하는 상황에서는 항상 보안경을 착용하는 것이 바람직하다.
- 4등급 및 3B등급 레이저를 사용하는 경우 항상 보안경을 착용해야 한다. 레이저 보안경에는 고글, 안면가리개, 눈의 노출을 MPE 수준 이하로 낮추기 위해 특수 여과소재나 반사코팅을 사용한 도수 있는 안경 등이 있다.
- 보안경은 얼굴에 잘 맞고 착용감이 편해야 한다.
- 보안경은 반드시 ANSI 승인 또는 KS 인증을 받은 것으로, 보안경으로 보호 가능한 광학 밀도 및 파장을 라벨에 명확히 표시해야 한다. 사용자는 보안경의 감쇠재에 구멍이났거나 금이 가지 않았는지를 정기적으로 검사하고, 안경테의 기계적 무결성과 빛의 누출여부를 확인해야 한다.
- 각 레이저 통제구역에 고글을 비치해 눈을 보호해야 한다. 이러한 고글은 출입이 쉬운 보호구역에 보관해야 하며, 레이저 작업자와 레이저 구역을 방문하는 이들이 사용할 수 있도록 제공되어야 한다. 각 고글에는 보호대상인 레이저의 종류가 명확히 표시되어 있어야 한다. 레이저 구역 방문 시 적절한 고글을 반드시 착용해야 한다.
- 보안경은 레이저 스펙트럼의 좁은 범위로부터 눈을 보호한다. 한가지 파장으로부터 눈을 보호하는 보안경은 다른 종류의 파장에 대해서는 보호기능이 거의 혹은 전혀 없을 수 있다. 적절한 보안경을 고를 수 있도록 보안경 제조업체 및 안전팀과 상의한다.
- 피부 화상을 초래할 수 있는 높은 수준의 레이저 조사에 대한 급성노출을 방지하기 위해 피부를 적절히 보호해야 한다. 피부 보호는 일부 높은 수준의 UV 파장에 만성 노출되는 경우에 특히 필요하며, 안면가리개와 전신의 노출된 피부를 모두 가릴 수 있는 보호복이 요구되기도 한다.
- 레이저 안전을 위해서는 일반적인 상식과 바람직한 안전수칙을 지키는 것이 PPE보다 우선한다는 점을 인식해야 한다.

부록 G. 표준작업절차서

필수사항 및 권장사항

서면 표준작업절차서, 즉 SOP(Standard Operating Procedures)는 3B등급, 4등급 레이저 및 레이저 시스템에 필요하며, 광선 위험요소와 비광선 위험요소를 다뤄야 한다.

작성된 SOP는 실험실의 모든 구성원들이 공유할 수 있도록 연구실안전 바인더(safety binder)에 보관할 것을 권장한다.

표준작업절차서에 다음 사항이 포함되어야 한다.

1. 장비설명

모든 절차서에는 다음의 내용을 포함한 구체적인 설명이 제공되어야 한다.

- 해당 장비의 통칭이름과 위치
- 장비가 비치된 연구실의 연구실책임자 이름과 전화번호
- 장비운용 주책임자의 이름과 전화번호

장비설명에서는 개별 광선 정렬 및 시작절차가 필요하고 별도의 전원공급장치가 있는 레이저 시스템 부품에 대한 상세정보도 제공해야 한다.

2. 행정적 요구사항

행정적 요구사항은 허가된 레이저 작업자로서 연구실에서 실험하기에 필요한 요건을 연구실책임자와 연구실에서 규정한 것으로, 주로 다음의 항목이 포함된다.

- 모든 레이저 작업자는 레이저 안전교육을 이수해야 한다.
- 모든 레이저작업자는 레이저 안전관리 매뉴얼을 숙독하고 준수해야 한다.
- 연구실책임자는 레이저로 실험하는 모든 연구활동종사자를 대상으로 레이저 및 레이저 부품의 안전한 운용에 대한 교육을 실시해야 한다. 부품별 제조업체의 사용 지침서를 참고할 수 있다. 교육 후에는 승인된 레이저 작업자의 이름을 레이저 교육 등록부에 입력할 수 있다. 연구실책임자가 레이저 교육 등록부(이름, 과정, 강사, 날짜 등)를 관리하고 기록한다.
- 오직 허가된 레이저 작업자(레이저 교육 등록부에 이름이 입력된 연구활동종사자)만이 레이저 및 그 부품으로 실험하도록 허용된다.
- 연구실의 전 구성원이 이 문서를 읽고 서명해야 한다.

3. 일반작업 요구사항

아래와 같은 전반적인 연구실 레이저환경에 관한 개요서를 절차서의 앞부분에 수록할 수 있다.

레이저의 작동 및 빔 정렬은 복잡한 작업으로, 상세작업지침서에 명시된 여러 가지 주요 부품이 사용될 수 있다. 모든 작업자와 학생은 레이저 시스템에 대한 실무숙련도를 갖추어야 하며, 안전한 표준작업지침을 숙지해야 한다. 레이저 작업에 숙달하려면 수개월에서 수년이 걸릴 수 있다. 따라서 처음에는 작업자와 학생이 보조역할을 담당하는 가운데 연구실책임자 또는 연구실책임자가 정한 레이저장비 안전담당자가 대부분의 레이저 작업을 수행한다.

4. 인터록

인터록 장치의 위치를 구체적으로 제시해야 하고, 인터록이 유난히 복잡한 경우에는 이를 조작하기 위한 구체적인 작업지침서가 필요할 수 있다.

작업 시 기본 요구사항에는 다음의 내용이 포함된다.

- 레이저 구역에서는 항상 적절한 보호장비를 착용해야 한다.
- 교육을 받지 않았거나 연구실책임자의 허가를 받지 않은 이는 레이저나 레이저 부품을 작동시킬 수 없다.
- 그 누구도 연구실책임자가 승인하지 않은 목표물에 레이저를 조사할 수 없다.
- 그 누구도 연구실책임자의 허가 없이 레이저 또는 레이저 부품의 유지보수를 수행할 수 없다.
- 그 누구도 연구실책임자의 허가 및 감독 없이 그 어떠한 목적으로도 레이저의 경로를 변경할 수 없다.
- 그 누구도 연구실책임자의 허가 및 감독 없이 그 어떠한 목적으로도 레이저의 부품 혹은 정상적인 설정을 변경할 수 없다.
- 그 누구도 연구실책임자의 허가 없이 레이저 안전커버를 제거할 수 없다.
- 그 누구도 레이저의 정상적인 작동 중에 레이저 안전 인터록을 중지할 수 없다. 정비, 유지보수, 문제해결 작업 중에는 연구실책임자 및 레이저 제조업체의 직원이 인터록 장치의 중단이 필요한 보수작업을 수행할 수 있다. 이 작업이 진행되는 동안에는 레이저 구역에서 그 밖의 어떠한 작업도 수행할 수 없다.
- 레이저 또는 부품이 레이저를 조사하고 있는 동안에는 방문자의 레이저 구역 진입을 금한다.
- 모든 레이저 작업자는 작업개요 및 빔 정렬 절차서에 설명된 비상대응절차를 준수해야 한다.

작업 시 추가 요구사항은 다음과 같은 내용을 포함한다.

- 그 누구도 혼자 작업하면서 레이저 또는 레이저 부품을 조작할 수 없다.
- 그 누구도 연구실책임자의 허가 없이 주말이나 휴일에 레이저 혹은 레이저부품을 작동시킬 수 없다.
- 레이저 구역에 의자 혹은 기타 그 어떠한 종류의 좌석도 비치할 수 없다.
- 레이저 구역에서는 레이저 작업과 관련 실험을 제외한 그 어떤 프로젝트도 수행할 수 없다.

기본 필수사항을 제시한 다음에는 작업자가 해당 문서를 읽었고, 모든 요구사항에 부합했으며 허가된 작업자로 승인되었음을 작업자, 연구실책임자가 확인하는 부분을 추가한다.

5. 작업절차서

작업절차서는 레이저 시스템의 작업에 관한 것으로, 이러한 시스템이 여러 개의 개별장비로 구성될 수 있다. 이 경우, 각 장비의 시작과 종료 절차를 별도로 작성해야 할 수도 있다. 적용 대상 부품에 대한 혼선이 없도록 각 부품의 상대적 위치와 간략한 설명이 반드시 제공되어야 한다.

필요시, 관련보조문서(작업자지침서, 안전지침서, 계산용지, 비상대응절차서 등)의 정확한 위치도 작업절차서에 명시해야 한다.

부록 G. 표준작업절차서

6. 개요

상세 작업절차서의 도입부에 해당 레이저 시스템의 기능을 개략적으로 설명하는 개요를 제시하기도 하는데, 다음은 그 예이다.

레이저는 800 nm 파장에서 고출력의 짧은 펄스를 방출한다. 본 레이저는 처프펄스증폭(chirped pulse amplification)의 원리에 따라 작동한다. 레이저 발진기에서 발생하는 짧은 펄스는 시간이 경과함에 따라 확장되어 강도가 감소한 후, 여러 증폭기를 거치면서 증폭되며, 이후 재압축되어 고출력의 짧은 펄스를 방출한다. 이러한 고출력의 짧은 레이저 펄스가 실험이 수행되는 곳의 목표물로 전송된다. 일반적으로 레이저는 532 nm의 녹색 레이저 빛으로 펄프되고 800 nm에서 레이저 광선을 방출한다. 이러한 녹색 펄프레이저 없이 레이저가 광선을 방출하지 않는다. 본 레이저의 파장에 적합한 보안경이 레이저구역의 입구 옆 보관함에 비치되어 있다.

7. 장비상세설명

각 시스템 부품의 특징 및 기능에 대한 설명이 작업지침서에 포함되어야 한다. 다음은 이러한 설명의 일반적인 예시이다.

스핏파이어(Spitfire) 펄스확장기와 재생증폭기 및 에볼루션(Evolution) 녹색 펄프레이저 발진기에서 방출된 펄스가 펄스확장기와 재생증폭기로 전달된다. 스피트파이어(제조업체 : Spectra Physics)는 펄스확장기와 재생증폭기가 복합된 제품으로, 1 kHz에서 구동하며 약 1 W의 평균출력을 방출하는 4등급 레이저이다. 스피트파이어는 동일제조업체의 제품인 에볼루션 녹색 펄프레이저로 펄프된다. 에볼루션은 1kHz에서 구동되면 약 10 W의 평균출력을 방출하는 제품으로, 역시 4등급 레이저로 분류된다. 작업자 및 학생들은 교육의 일부로서 에볼루션 사용자지침서를 숙독해야 한다.

스핏파이어는 적외선 뷰어(IR viewer)로 광선을 관찰하기에 충분한 800nm 레이저를 방출한다. 광선 정렬 출력단을 스피트파이어에서 방출되는 빔의 경로, 증폭기, 압축기, 집광기를 거쳐 목표물로 연결되는 선상에 설치한다. 작업자와 학생들은 필요에 따라 적외선 뷰어 사용법과 광선 정렬 상태를 점검하기 위한 카메라 빔 정렬 시스템의 사용법, 그리고 출력단을 통해 광선 경로를 조정하는 방법을 배울 것이다.

빔덤프 및 샘플링(Beam dumping and sampling)

레이저는 보통 진공챔버 내부의 빔 덤프로 전송된다. 일부 경우에는 레이저광의 1% 미만 정도를 진공챔버로부터 추출해 카메라, 분광기, 자동상관기 등을 통한 광학측정샘플로 활용하기도 한다. 해당 레이저가 고출력이므로, 샘플 추출된 광선으로 작업할 때도 필요한 모든 주의를 기울여야 한다. 학생 및 작업자들은 샘플 추출된 광선과 측정기기의 안전한 사용법에 대한 교육을 받아야 한다.

광선 빔 정렬 절차가 관련된 경우, 이를 별도의 문서로 작성하거나 제조업체의 운용지침서를 참고문서로 제공해야 한다.

부록 G. 표준작업절차서

8. 레이저시작절차

구체적인 장비설명이 없는 경우에는 개별 시작절차서에 이러한 설명이 반드시 제공되어 시작과정을 단계별로 제시해야 한다. 다음은 시작절차의 일반적인 예시이다.

- 연구실책임자로부터 인터록 키를 입수한다.
- 적절한 레이저 안전 보안경을 구입해서 착용한다.
- 비상연락망이 바로 보이는 곳에 있는지 확인한다.
- 연구실 내 모든 인원이 손목시계와 빛이 반사되는 장신구를 벗어서 다른 곳에 보관하고, 플라스틱 ID카드가 겹으로 드러나지 않게 한다.
- 모든 인원에게 레이저 작동을 곧 시작한다고 알린다.
- 허가된 연구활동종사자 외 비관계자들을 모두 연구실에서 나가게 한다.
- 연구실의 문단속을 하고, 연구실 인터록 장치를 작동시킨다(인터록 절차를 설명한다). 비인가자나 레이저 안전 보안경 미 착용자가 연구실에 들어오는 경우 레이저를 즉시 종료할 수 있도록 대비한다.
- 레이저 구역 작동등을 켜다.
- 구역 레이저표지판에 '레이저사용중'이 표시되게 한다.
- 레이저 셔터를 닫고 압축기로 빔 경로를 차단한 후 시작한다.
- 빔 라인 광학장치에서 모든 비닐봉지를 제거한다.
- 장비 재순환수의 밸브를 연다.
- 레이저 수냉각기를 켜다.
- 시간 점검장치와 진단장치를 켜다.
- 진공펌프를 켜다.
- 녹색 펌프레이저의 공급장치를 켜고 2시간 가량 예열한다.
- 발진기를 모드로킹(mode-lock) 한다.
- 기준 트레이스(reference trace)에 발진기 스펙트럼을 조율해서 맞춘다.
- 에블루션을 켜다.
- 기준 트레이스(reference trace)에 스피트파이어를 조율해서 맞춘다.
- 적절한 펄스를 출력하고 있는지 확인한다.
- MP1과 MP2를 통해 빔 정렬을 확인한다. 필요 시 조정한다.
- 격자 압축기와 진공챔버를 통해 빔 정렬을 확인한다.
- 진공챔버를 펌프다운한다.
- 항상 절차수행에 필요한 최저출력의 광선을 사용한다. 필요시 빔 출력을 증가시켜 할당된 작업을 완료한다.

기기와 장비마다 시작절차가 상이하겠지만 그 과정은 포괄적이고 구체적이며, 순서가 정확해야 한다. 또한 직원, 장비, 연구실 안전을 달성할 수 있도록 모든 단계가 포함되어야 한다.

시스템 종료절차도 유용하며, 중대한 문제가 있는 경우 연구실 자원의 보호를 위해 필요할 수 있다.

부록 G. 표준작업절차서

9. 비상대응절차

작업절차서에는 비상대응절차서 또는 관련 참조문서가 포함되어야 한다. 일반적인 비상대응절차에는 다음이 포함된다.

- 다른 이들에게 비상상황에 대해 알린다.
- 레이저 가동을 즉시 중지한다. 레이저의 키를 꺼짐상태로 돌린다.
- 부상이나 화재 등과 같은 비상상황이 발생해 필요한 경우 구내전화 0119에 전화한다.
- 화재 발생시, 연구실 내부의 사람들을 즉시 대피시킨다. 동시에 큰소리로 “불이야”를 계속 외치면서 화재경보기를 작동시킨다. 연구실 내에서 화재진압을 시도하지 말고, 대피로를 확보하고 신속히 대피한다.
- 연구실책임자에게 가급적 빨리 연락한다.
- 모든 레이저 사고는 안전팀(T.042-350-0119)에 보고해야 한다.

10. 유지보수, 문제해결, 정비절차서

유지보수, 문제해결, 정비 등의 작업은 정상적인 작업환경에서 벗어나는 것으로, 해당 상황에 대한 설명을 제공해야 하고 다음과 같은 예외적인 안전대책을 포함해야 한다.

- 임시안전표지판
- 작업상의 특수제약(예 : 정비직원 및 연구실책임자 외 전원 출입금지)
- 정비직원의 자격요건에 대한 자료
- 직원, 장비, 연구실 환경의 고유안전에 필요한 기타 상세작업절차

11. 빔 정렬 절차서

빔 정렬 시 눈이 부상을 입을 수 있으므로, 레이저 빔 정렬 작업을 수행할 때는 주요광선, 광선의 정반사나 난반사로 인해 눈이 해당 최대허용노출량보다 높은 수준에 노출되지 않도록 주의해야 한다.

레이저를 일상적으로 사용하는 연구실은 빔 정렬 절차서를 작성해야 한다. 인증된 공급업체가 빔 정렬 작업을 수행하는 경우 해당 공급업체에 대한 정보와 빔 정렬 빈도를 반드시 SOP에 명시해야 한다.

빔 정렬 작업은 매우 복잡할 수 있으므로, 절차서를 통해 상세하게 설명해야 한다. 빔 정렬 작업이 정기적으로 상당 부분 변경되는 경우, 아래와 같은 안전요건에 부합하는 일반 빔 정렬요건을 작성해 연구실 상황에 관계없이 우선적으로 준수할 수 있게 해야 한다.

레이저 빔 정렬 시에는 반드시 다음 단계를 따라야 한다.

- 본 연구실의 인가를 받은 레이저 사용자만이 이 레이저를 조작하고 빔 정렬을 할 수 있다.
- 연구실책임자로부터 인터록 키를 입수하거나, 본인이 레이저로 작업할 것임을 연구실책임자에게 알린다.
- 비상전화번호가 바로 볼 수 있는 곳에 있는지 확인한다.
- 연구실 내부의 모든 인원이 적절한 레이저 보안경을 착용하게 한다.
- 비인가자들은 연구실에서 나가게 한다.

부록 G. 표준작업절차서

- 연구실 문을 고정하고 연구실 인터록 장치를 가동한다. (인터록 절차를 설명한다) 비인가자나 레이저 보안경을 착용하지 않은 이가 연구실에 들어오는 경우를 대비해 레이저를 즉시 종료할 수 있도록 준비한다.
- 연구실 내 모든 인원이 손목시계와 빛이 반사되는 장신구를 벗어서 다른 곳에 보관하게 하고, 플라스틱 ID카드가 겹으로 드러나지 않게 한다.
- 실험에 필요한 광학부품을 설치한다.
- 모든 빔 차단기가 제자리에 있고, 광학 경로상에 불필요한 반사표면이 없게 한다. 1개의 빔 블록을 최초 정렬할 광학부품 뒤쪽에 위치시킨다. 두 번째 빔블록을 두 번째 정렬할 빔 블록 뒤쪽에 위치시킨다.
- 레이저로 가는 냉각수를 켜다.
- 레이저 출력 제어장치를 최저출력치로 설정한다.
- 레이저 스위치에 인터록 키를 넣고 레이저의 잠금을 해제한다.
- 레이저 작동을 시작한다는 것을 숫자를 카운트다운하면서 큰소리로 알린다.
- 레이저를 켜다.
- 레이저에서 가장 가까이 있는 광학부품부터 정렬을 시작한다. 이 부품의 정렬이 완료되면 첫 번째 빔 블록을 세 번째 광학부품의 뒤쪽으로 옮겨서 두 번째 광학부품을 정렬한다. 전체 광학 시스템이 모두 정렬될 때까지 이 절차를 반복한다. 전체 시스템이 정렬될 때까지는 레이저빔 정렬을 한번에 한 부품으로 제한하는 것이 중요하다. 이렇게 해야만 정렬 과정에서 우발적인 반사를 최소화할 수 있다.
- 목표물로의 정렬이 완료되면 정확한 추적이 가능하도록 빔 경로를 신중하게 확인한다. 필요시, 누출 빔이나 의도하지 않은 빔이 없도록 정렬을 수정한다.
- 빔 경로가 정확하고 누출 빔이 없다고 확인하면, 작업수행에 필요한 수준으로 출력을 증가시킨다.

레이저 실험을 진행하지 않을 경우,

- 레이저의 출력을 감소시키고 모든 장비의 전원을 끈다. 레이저가 식히고 냉각수를 끈다.
- 레이저 인터록 스위치에서 키를 제거한다.
- 연구실을 나서기 전에 연구실 장비와 연구실의 문단속이 되어 있는지 점검한다.
- 연구실책임자에게 인터록 키를 반환한다.
- 레이저 보안경을 정해진 보관장소에 보관한다.

12. 참고

- 정렬 과정 중에는 레이저 보안경을 절대로 벗지 않아야 한다. 광선의 흐릿한 이미지를 볼 수 없다면 광학 밀도가 어긋난 보안경을 착용하고 있는 것이다.
- 레이저를 끄고 올바른 광학 밀도로 된 보안경을 입수한다.

13. 의료적 감시 및 검안 권고사항

1등급, 2등급, 3R등급 레이저 작업자들은 검안을 받지 않아도 된다.

3B등급 또는 4등급 레이저에 노출될 수 있는 구역에서 작업하는 레이저 작업자나 개인은 실험 수행 전과 완료 후에 검안을 받는 것이 바람직하다.

부록 G. 표준작업절차서

레이저 노출로 인한 부상이나 부작용이 의심되는 경우 의료검진을 최대한 빨리(48시간 이내) 수행해야 하며, 모든 종류의 레이저 부상은 KAIST 안전팀(T.042-350-0119)으로 즉시 보고해야 한다.

레이저 작업자는 레이저 노출이 의심되는 증상이 나타나면 연구실책임자에게 보고해야 한다. 이러한 증상에는 광원의 잔상이 계속해서 보이거나, 가렵거나 화끈한 느낌, 통증, 붉어짐 등이 있다. 연구실책임자는 이러한 노출을 즉시 안전팀으로 보고해야 한다.

레이저로 인한 눈 손상은 예방이 가능하다. 레이저 손상의 주요 원인은 다음과 같다:

- 정렬 시 예기치 못한 눈의 노출
- 피로로 인한 부주의 혹은 준수해야 할 절차를 부적절하게 생략하는 행위
- 정렬이 제대로 되지 않은 광학장치 및 상향광선
- 보안경 미착용이나 잘못된 보안경 착용
- 과도한 자신감 : 무사안일주의 또는 호기
- 레이저 장비에 대한 숙련도 부족
- 정비 후 부적절한 장비 복구
- 제조업체에서 설치한 안전기능을 무시
- 플라즈마 및 이차 방사로 인한 부상
- 표준작업절차서 미준수

14. 레이저작업자

- 레이저 안전과 구체적으로 수행할 레이저 절차에 대한 적절한 교육을 이수한 자만이 레이저를 조작해야 한다. 레이저 작업자는 연구실책임자로부터 레이저작업 허가를 받아야 한다.
- 레이저는 레이저 안전에 정통한 전문가의 직접적인 감독하에 작업을 수행해야 한다.
- 연구실 구성원들은 연구실책임자의 승인이 있을 때에만 레이저 시스템을 가동할 수 있다.
- 레이저 구역에서 실험하는 전구성원이 장비의 잠재위험에 대해 인식하도록 하는 것은 연구실책임자의 책임이다.
- 레이저의 빔 경로상이나 그 부근에는 난반사 물질 외에는 아무것도 없어야 한다. 금속 장신구(특히, 손목시계)의 착용을 피한다.
- 보안경을 착용중일 지라도 레이저 등급에 관계없이 레이저 광선을 절대로 직시하지 않아야 한다. 광선을 관찰할 때는 간접적인 방법(빔 카드, 광검출기등)을 활용한다.
- 전원공급장치 혹은 기타 고압전기장비를 다룰 때는 2인 이상이 작업을 함께 수행한다. 이러한 장비의 수리, 유지 보수, 혹은 교체작업을 실시하는 전 직원은 심폐소생술(CPR) 교육을 받아야 한다. 심장충격기가 부근에 있다면 전구성원이 그 위치를 알아 두고 필요시 사용할 수 있어야 한다. CPR 및 심장충격기 교육을 받으려면 안전팀으로 연락한다.
- 비광선 위험요소로 인해 야기될 수 있는 부상이나 질병의 예방을 위해 비광선 위험요소에도 충분한 주의를 기울인다.
- 플라즈마 및 이차 방사에 주의한다.

부록 G. 표준작업절차서

15. 접근제한

- 비관계자가 레이저에 접근하지 못하도록 제한해야 한다. 3B등급 및 4등급 레이저를 사용하는 연구실에는 방문객의 출입을 제한하는 것이 바람직하다.
- 창호 및 출입구는 전파된 레이저 조사량을 최대허용노출량 이하로 감소시킬 수 있는 방식으로 차폐하거나 제한해야 한다.
- 3B등급 및 4등급 레이저는 보통 검정색의 빛 흡수 커튼으로 둘러싸야 하며, 이러한 커튼은 내화성이 있어야 한다.
- 가동 중인 레이저를 점등식 경고 표지판, 암막커튼, 출입문 인터록 장치 등과 같이 적절한 보호장치 없이 방치해서는 안 된다.
- 4등급 레이저는 출입구 인터록 장치 등과 같은 출입구 안전통제를 위한 시스템이 구축된 상태에서 사용해야 한다.
- 정식훈련을 받지 않은 작업자가 레이저나 레이저 시스템을 사용하는 상황을 방지하기 위해 미사용시에는 반드시 키로 비활성화시켜야 한다.
- 광원 폭발 시 유리 파편으로 인한 부상을 예방하기 위해 레이저를 추출하는 광원 주변부에 차단막을 설치해야 한다.
- 실험 중 레이저 및 함께 사용되는 광학부품이 의도치 않게 움직여 발생할 수 있는 눈의 손상을 방지하기 위해 테이블에 단단히 고정해야 한다.
- 공학적 관리대책(인터록, 빔 차단기, 표지, 활성화 경고시스템 등)을 레이저위험요소에 대처하는 1차 방어책으로 항상 활용해야 한다. 운영자가 특정한 표준작업절차서를 따르는 상황을 제외하고는 공학적 관리대책을 항상 준수해야 한다.
- 레이저 광선은 서 있거나 앉아있는 사람의 정상적인 눈높이를 기준으로 항상 그 위나 아래에 위치해야 한다.

16. 교육과 훈련

레이저 작업자 및 유지보수작업자에게 교육과 훈련이 제공되어야 한다. 관련 연구활동종사자는 레이저 작업의 시작 전에 적절한 교육을 이수해야 한다. 교육은 주어진 잠재위험의 수준에 맞추어 진행한다. 연구실책임자가 해당 연구활동종사자에게 각 레이저의 잠재위험요소를 알려야 한다.

정식훈련을 받은 작업자만이 레이저 유지보수 및 수리를 실시해야 한다. 연구실책임자는 외부 공급업체 직원이 정식훈련을 받았으며, 정비작업이 레이저 안전수칙을 준수하여 수행되도록 할 책임이 있다.



KAIST 연구실 레이저안전 매뉴얼

KAIST Laboratory Manual for Laser Safety

발행일	2020년 10월
등 록	KLS-11-2020
발행처	한국과학기술원(KAIST) 안전팀 대전광역시 유성구 대학로 291
연락처	T. (042)350-2341~5 F. (042)350-2550 safety.kaist.ac.kr
심의·의결	KAIST연구실안전관리위원회 (2020.11.)

본 매뉴얼은 한국과학기술원 안전팀에서 발간하였습니다.
매뉴얼에 대한 소유권은 발행처에 있으며, 무단으로 전재·
복제하거나 상업적인 목적으로 사용하는 것을 금합니다.