

국립 부경대학교

MPECVD-R6.0 사용자 매뉴얼

- 제공자 : 연사이언스
- 수요자 : 국립 부경대학교 반도체 특성화 대학 사업단

본 문서는 장비 운용 및 교육 목적의 공식 매뉴얼로서,
제공자의 사전 승인 없이 무단 복제, 배포, 전재를 금합니다.

MPECVD 6.0 사용자 매뉴얼

1. 개요

MPECVD 6.0(Microwave Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition)은 마이크로웨이브 플라즈마를 이용하여 다이아몬드, DLC, 박막 소재 등을 고품질로 성장시키는 장비입니다. 본 매뉴얼은 장비 운용자 및 연구원을 대상으로 하며, 안전한 사용과 안정적인 공정 수행을 목표로 합니다.

2. 장비 구성

2.1 시스템 구성도

- 마이크로웨이브 발생기(Microwave Generator)
- 플라즈마 챔버(Plasma Chamber)
- 가스 공급 시스템(Gas Delivery System)
- 진공 시스템(Vacuum System)
- 온도 제어 시스템(Heater & Controller)
- 제어 소프트웨어(MPECVD 6.0 Software)

2.2 주요 사양(예시)

항목	사양
마이크로웨이브 주파수	2.45 GHz
최대 출력	6 kW
공정 압력	10 ~ 300 Torr
기판 온도	최대 1,200 °C

3. 안전 수칙

3.1 기본 안전 사항

- 고전압·고온 장비이므로 반드시 교육 이수 후 사용
- 운전 중 챔버 개방 금지
- 가스 누출 시 즉시 비상 정지(E-Stop) 실행

3.2 가스 안전

- 수소(H₂), 메탄(CH₄) 등 **가연성 가스** 사용
- 가스 캐비닛 인터락 확인 필수

3.3 자외선(UV) 노출 안전

MPECVD 공정 중 발생하는 플라즈마는 UV(자외선) 복사광을 방출할 수 있으며, 특히 시창(View port)을 통한 직접 관찰 시 인체에 유해할 수 있습니다.

3.3.1 UV 발생 특성

- 수소(H_2) 기반 플라즈마에서 **UV-A / UV-B / 일부 UV-C** 방출 가능
- 고출력(3 kW 이상), 장시간 운전 시 노출 위험 증가
- 챔버 내부는 차폐되나 **시창을 통한 간접 노출 주의 필요**

3.3.2 국제 안전 기준 요약

- ICNIRP / ACGIH 기준에 따라 **UV-C 6 mJ/cm² (8시간 기준)** 초과 노출 금지
- 눈(각막염), 피부(홍반) 손상 위험 존재

3.3.3 필수 안전 수칙

- 플라즈마 점화 중 **맨눈 직접 관찰 금지**
- UV 차단 시창 또는 **UV 차단 필름(UV400 이상)** 적용
- 장비 CCTV 또는 모니터를 통한 간접 확인 권장

3.3.4 개인 보호구(PPE)

- UV 차단 보안경(UV400)
- 필요 시 Face Shield 착용
- 장갑, 긴 소매 실험복 착용

3.3.5 점검 및 감사 대응 메모

- 본 항목은 연구실 안전 점검 시 **필수 확인 대상이며**
- 구조적 차단 + PPE + 운전 절차의 3요소를 모두 갖출 것을 권장

4. 설치 및 초기 설정

4.1 설치 환경

- 청정도: Class 1,000 이하 권장
- 냉각수, 배기 덕트, 전원(3상 전원) 확보

4.2 초기 세팅 절차

1. 전원 및 냉각수 ON
2. 진공 펌프 시동
3. 가스 라인 Leak Check 수행
4. 소프트웨어 실행 및 통신 확인

5. 소프트웨어 사용법 (MPECVD 6.0)

5.1 메인 화면 구성

- System Status
- Recipe Editor
- Real-time Monitoring

- Alarm & Log

5.2 레시피 생성

1. 가스 종류 및 유량 설정
 2. 공정 압력 입력
 3. 마이크로웨이브 출력 설정
 4. 공정 시간 지정
 5. Recipe 저장
-

6. 공정 운전 방법

6.1 시동(Start-up)

1. 챔버 진공 형성
2. 공정 가스 투입
3. 마이크로웨이브 출력 인가
4. 플라즈마 점화 확인

6.2 공정 중 모니터링

- 압력 안정성
- 플라즈마 색상 및 형태
- 기판 온도

6.3 종료(Shut-down)

1. 마이크로웨이브 출력 OFF
 2. 가스 차단
 3. 챔버 냉각
 4. 대기압 복귀
-

7. 유지보수 및 점검

7.1 일일 점검

- 가스 압력 확인
- 냉각수 유량 점검

7.2 정기 유지보수

- 챔버 내부 클리닝(주 1회 권장)
 - O-ring 교체(월 1회)
-

8. 트러블슈팅

증상	원인	조치
플라즈마 미점화	압력 이상	압력 재조정
출력 불안정	마그네트론 노후	교체 필요
온도 상승 불량	히터 불량	점검/교체

9. 다이아몬드 성장 공정 매뉴얼 (상세)

9.1 공정 개요

MPECVD 6.0을 이용한 다이아몬드 성장은 마이크로웨이브 플라즈마 내 수소(H_2) 기반 환경에서 메탄(CH_4)을 탄소 소스로 사용하여 기판 표면에 다이아몬드 결정 구조를 성장시키는 공정입니다.

9.2 기판 준비 (Substrate Preparation)

- 기판 재질: Si, Mo, WC, Diamond Seeded Substrate
- 전처리 권장 절차
- 아세톤 → IPA 초음파 세정 (각 10분)
- DI Water 린스 후 N_2 건조
- 나노다이아몬드 슬러리 시딩(Seed) 처리

9.3 표준 다이아몬드 성장 레시피 (예시)

항목	조건
H_2 유량	300 ~ 500 sccm
CH_4 유량	1 ~ 5 sccm (0.3~1%)
공정 압력	100 ~ 150 Torr
마이크로웨이브 출력	3 ~ 5 kW
기판 온도	800 ~ 950 °C
공정 시간	2 ~ 10 시간

9.4 공정 운전 순서 (Diamond Growth SOP)

1. 챔버 진공 형성 (Base Pressure 확보)
2. H_2 가스 투입 및 플라즈마 점화
3. 챔버 안정화 (10~20분)
4. CH_4 가스 소량 투입 → 성장 시작
5. 공정 중 압력·온도·플라즈마 상태 모니터링

-
6. 설정 시간 종료 후 CH₄ 차단
 7. H₂ 플라즈마 유지하며 Cool-down
-

9.5 공정 중 핵심 모니터링 포인트

- **플라즈마 색상:** 밝은 핑크~보라색 유지
 - **온도 편차:** ±20°C 이내
 - **CH₄ 농도 과다 주의** → 비다이아몬드 탄소 형성
-

9.6 품질 이상 사례 및 대응

문제	원인	대응
결정립 불균일	시딩 불량	재시딩 수행
흑연/아모퍼스 탄소	CH ₄ 과다	농도 감소
박막 박리	온도 급변	Ramp 조정

9.7 성장 후 공정(Post Process)

- 서서히 냉각 후 대기압 복귀
 - SEM / Raman 분석 권장
 - 챔버 내부 탄소 오염 클리닝 수행
-

9.8 용어 정리

- **NCD:** Nanocrystalline Diamond
 - **MCD:** Microcrystalline Diamond
 - **Seeding:** 다이아몬드 핵 생성 공정
-

부록 A. 신입 연구원용 Quick Guide (1장 요약)

A-1. 장비 사용 전 체크리스트 (Before Run)

- [] 냉각수 ON (유량/온도 확인)
 - [] 가스 캐비닛 이상 없음
 - [] 챔버 내부 시편 정상 장착
 - [] O-ring 손상 여부 확인
 - [] E-Stop 해제 상태 확인
-

A-2. 다이아몬드 성장 기본 SOP (요약)

1. Vacuum ON → Base Pressure 확인
 2. H₂ 가스 투입 (300~500 sccm)
 3. Microwave ON → 플라즈마 점화
 4. Stabilization (10~20분)
 5. CH₄ 투입 (1~5 sccm)
 6. 설정 시간 유지 (2~10h)
 7. CH₄ OFF → Microwave OFF
 8. H₂ 유지하며 Cool Down
 9. 대기압 복귀 후 시편 회수
-

A-3. 공정 중 반드시 볼 것 (중요

- 플라즈마 색상: 밝은 보라/핑크 유지
 - 기판 온도: 목표값 ±20°C
 - 압력 변동: ±5 Torr 이내
-

A-4. 자주 발생하는 실수 TOP 5

1. CH₄ 과다 투입 → 흑연 생성
 2. 시딩 미흡 → 성장 안 됨
 3. 급격한 출력 변화 → 박막 박리
 4. 냉각수 미확인 → 장비 인터락 발생
 5. 챔버 클리닝 미실시 → 재현성 저하
-

A-5. Run 종료 후 체크리스트 (After Run)

- [] 가스 전량 차단
 - [] 챔버 충분히 냉각
 - [] Log 파일 저장
 - [] SEM / Raman 분석 예약
 - [] 챔버 오염 상태 기록
-

※ 본 Quick Guide는 연구실 출력 및 장비 옆 부착용으로 사용 권장

부록 B. 장비 에러·인터락 대응 매뉴얼 (Emergency Guide)

B-1. 인터락(Interlock) 개요

MPECVD 6.0은 장비 및 사용자 보호를 위해 조건 이상 발생 시 자동 정지(Interlock) 기능을 갖추고 있습니다.

B-2. 주요 인터락 종류 및 대응

인터락 항목	발생 원인	즉시 조치
Cooling Water Error	냉각수 유량/온도 이상	냉각수 확인 후 Reset
Chamber Pressure Error	압력 급변, Leak	가스 차단 → Leak Check
Microwave Overload	출력 과다	출력 감소 후 재시동
Gas Safety Alarm	가스 누출/압력 이상	E-Stop → 관리자 호출
Door Open Error	챔버 개방 감지	Door 닫힘 확인

B-3. 플라즈마 이상 상황별 대응

- **플라즈마 미점화:** 압력 재설정 → 출력 단계적 상승
- **플라즈마 불안정:** CH₄ 유량 감소, 압력 안정화
- **비정상 색상(노랑/흰색):** 즉시 CH₄ 차단

B-4. 비상 정지(E-Stop) 사용 기준

다음 상황에서는 즉시 E-Stop을 누르십시오. - 가스 냄새 감지 - 챔버 내부 이상 소음/아크 발생 - 제어 불능 상태

B-5. 인터락 발생 후 재시동 절차

1. 원인 제거 확인
2. Alarm Log 확인
3. Supervisor 승인
4. Reset → 재가동

※ 본 Emergency Guide는 신입 연구원 필독 문서로 사용 권장

부록 C. 실제 연구실 사고 사례 기반 대응 시나리오

C-1. 사고 사례 ① CH₄ 과다 투입으로 인한 플라즈마 이상

상황 - CH₄ 유량을 빠르게 증가시킨 직후 플라즈마 색상이 노란색으로 변함 - 챔버 내부 탄소 침적 급증

즉시 대응 1. CH₄ 유량 즉시 0 sccm 2. H₂ 플라즈마만 유지 3. 출력 10~20% 감소

원인 분석 - CH₄ 농도 과다 → 비다이아몬드 탄소 형성

재발 방지 - CH₄ 유량 변경 시 0.5 sccm 단위로 조정

C-2. 사고 사례 ② 냉각수 미공급으로 인한 인터락 발생

상황 - Run 시작 직후 Cooling Water Error 발생 - 마이크로웨이브 자동 차단

즉시 대응 1. Microwave OFF 확인 2. 냉각수 밸브 및 유량 확인 3. Reset 후 재시동

원인 분석 - 외부 냉각수 차단 또는 유량 센서 이상

재발 방지 - Before Run 체크리스트 필수 확인

C-3. 사고 사례 ③ 플라즈마 점화 실패 반복

상황 - 여러 차례 점화 실패 - 압력은 정상이나 플라즈마 형성 안 됨

즉시 대응 1. 압력 20~30 Torr 낮춘 후 재시도 2. 출력 최소값부터 단계적 상승

원인 분석 - 압력/출력 조건 부적절 - 마그네트론 열화 가능성

C-4. 사고 사례 ④ Run 종료 후 급격한 냉각으로 박막 박리

상황 - 공정 종료 후 바로 대기압 복귀 - 다이아몬드 박막 박리 발생

즉시 대응 1. 다음 Run 시 Cool-down 시간 충분히 확보

원인 분석 - 열응력에 의한 박막 손상

재발 방지 - H₂ 플라즈마 유지하며 서서히 냉각

※ 본 시나리오는 실제 연구실 사고 패턴 기반 교육용 자료로 사용 권장

부록 D. 책임 연구원 점검·승인 체크리스트 (Supervisor SOP)

D-1. 목적

본 체크리스트는 신입 연구원 단독 장비 운전 승인, 고위험 공정 수행 전 점검, 사고 후 재가동 승인을 위한 책임 연구원 (Supervisor)용 공식 확인 문서입니다.

D-2. Run 사전 승인 체크리스트 (Pre-Run Approval)

항목	확인	비고
연구원 교육 이수 여부	<input type="checkbox"/> Yes / <input type="checkbox"/> No	
공정 목적 및 조건 명확	<input type="checkbox"/> Yes / <input type="checkbox"/> No	
가스 조합 안전성 검토	<input type="checkbox"/> Yes / <input type="checkbox"/> No	
레시피 검토 및 승인	<input type="checkbox"/> Yes / <input type="checkbox"/> No	Recipe Ver.
고위험 조건 여부	<input type="checkbox"/> Yes / <input type="checkbox"/> No	(고출력/고CH ₄)

D-3. Run 중 관리 포인트 (Supervisor Oversight)

- 초기 점화 시 입회 여부: Yes / No
 - 첫 30분 로그 확인: 완료
 - 플라즈마/온도 안정성 확인: 정상 / 이상
-

D-4. Run 종료 후 확인 사항 (Post-Run Review)

항목	확인
비정상 알람 발생 여부	<input type="checkbox"/> Yes / <input type="checkbox"/> No
공정 로그 저장	<input type="checkbox"/> 완료
시편 상태 육안 확인	<input type="checkbox"/> 정상 / <input type="checkbox"/> 이상
챔버 오염 여부	<input type="checkbox"/> 경미 / <input type="checkbox"/> 심각

D-5. 사고·인터락 후 재가동 승인 (Mandatory)

- 사고 원인 분석 보고서 확인: 완료
- 재발 방지 대책 수립: 완료
- 재가동 승인: 승인 / 보류

책임 연구원 서명: _____ 날짜: _____

※ 본 체크리스트는 연구실 공식 SOP 문서로 보관 권장

부록 E. 연구실 안전 점검 대비용 전체 매뉴얼 요약본 (Audit Summary)

E-1. 장비 기본 정보 요약

- 장비명: MPECVD 6.0
 - 장비 유형: Microwave Plasma Enhanced CVD
 - 주요 공정: 다이아몬드 / DLC 박막 성장
 - 사용 가스: H₂, CH₄ (가연성 가스)
-

E-2. 주요 위험 요소 및 관리 방안

위험 요소	관리 방안
고전압/고출력	인터락, E-Stop 구비
고온 챔버	냉각 후 개방 SOP
가연성 가스	가스 캐비닛, Leak Check
플라즈마	출력/압력 제한

E-3. 교육 및 권한 관리 체계

- 신입 연구원: 교육 이수 후 Supervisor 승인 필수
 - 단독 Run 허용 기준: Quick Guide + Emergency Guide 숙지
 - 고위험 공정: 책임 연구원 입회 원칙
-

E-4. 사고 대응 체계

- 1차 대응: Emergency Guide (부록 B)
 - 판단 필요 시: 사고 사례 시나리오 (부록 C)
 - 재가동 승인: Supervisor SOP (부록 D)
-

E-5. 점검·감사 대응 시 제출 자료 목록

- 사용자 매뉴얼 본문

- 부록 A~D
 - 최근 1년간 Run Log
 - 교육 이수 기록
 - 사고/인터락 보고서
-

※ 본 요약본은 연구실 안전 점검·외부 감사 대응용 공식 자료로 사용 권장

부록 F. 신입 교육용 UV 노출 안전 가이드 (1페이지)

F-1. 왜 UV가 위험한가?

MPECVD 플라즈마는 공정 중 자외선(UV)을 방출할 수 있으며, 이는 눈(각막염)과 피부(홍반)에 손상을 줄 수 있습니다. 특히 시창(View port)을 통해 직접 볼 경우 위험합니다.

F-2. 반드시 기억할 핵심 규칙 3가지

1. 플라즈마를 직접 보지 않는다
 2. UV 차단 보안경(UV400) 착용
 3. 모니터(CCTV)로 상태 확인
-

F-3. 언제 UV 노출 위험이 커지나요?

- 마이크로웨이브 출력이 높을 때($\geq 3 \text{ kW}$)
 - 수소(H_2) 플라즈마 사용 시
 - 장시간 연속 운전 시
-

F-4. 이렇게 행동하세요 (Do & Don't)

Do

- 측면에서 간접적으로 확인
- UV 차단 시창 상태 수시 점검
- 이상 시 즉시 Supervisor 호출

Don't

- 시창에 얼굴을 가까이 대고 관찰
 - 보안경 미착용 상태에서 점화 확인
 - 챔버 개방 상태에서 플라즈마 인가
-

F-5. 문제가 생기면 이렇게 하세요

- 눈 통증, 따가움 발생 시 → 즉시 실험 중단
 - Supervisor 및 안전관리자 보고
 - 필요 시 병원 진료
-

※ 본 자료는 신입 연구원 첫 교육 시 필수 설명 자료이며 ※ 장비 옆 또는 교육 자료로 출력하여 사용 권장

부록 G. 신입 연구원 전체 안전교육 요약본 (2페이지)

G-1. MPECVD 주요 위험 요소 한눈에 보기

MPECVD 6.0은 다음과 같은 **복합 위험 요소**를 포함하는 장비입니다.

위험 요소	주요 위험
가연성 가스	폭발, 화재
고온	화상, 장비 손상
고전압/고출력	감전, 장비 파손
플라즈마	UV 노출, 광손상
진공 시스템	파손, 흡입 위험

G-2. 가스 안전 핵심 요약

반드시 지킬 것

- H₂ / CH₄는 **가연성 가스**임을 항상 인지
- Run 전 **Leak Check** 필수
- 가스 알람 발생 시 즉시 **E-Stop**

절대 금지

- 승인 없는 가스 조건 변경
 - 알람 무시 후 운전 지속
-

G-3. 고온·고출력 안전 수칙

- 챔버 및 시편은 **고온 상태 유지됨**
 - Run 종료 후 **충분한 Cool-down** 후 개방
 - 마이크로웨이브 출력은 **단계적으로 조절**
-

G-4. 플라즈마·UV 안전 요약

- 플라즈마는 **자외선(UV)** 방출 가능
 - 직접 육안 관찰 금지
 - UV400 보안경 + 모니터 확인 원칙
-

G-5. 비상 상황 시 행동 요령

1. 이상 감지 → 즉시 실험 중단
 2. 필요 시 **E-Stop** 작동
 3. Supervisor 및 관리자 보고
 4. 단독 판단 금지
-

G-6. 신입 연구원 필수 행동 원칙

- 혼자 판단하지 않는다
 - 이상하면 멈춘다
 - 기록(Log)을 남긴다
-

G-7. 교육 확인

본 교육 내용을 숙지하였으며, 안전 수칙을 준수할 것을 확인합니다.

교육자 서명: _____ 날짜: _____ 교육 대상자 서명: _____ 날짜: _____

※ 본 요약문은 신입 연구원 전체 안전교육 및 점검 대응용 공식 자료로 사용 권장

부록 H. 마이크로웨이브 누설 안전 기준 및 대응 절차 (Microwave Leakage Safety)

H-1. 적용 범위 및 중요성

MPECVD 6.0은 **2.45 GHz** 고출력 마이크로웨이브(최대 6 kW)를 사용하므로, 누설 발생 시 인체 위해 및 장비 오동작 위험이 있습니다. 본 부록은 연구실 안전관리·점검·감사 대응용 공식 기준으로 사용합니다.

H-2. 마이크로웨이브 누설 허용 기준 (국제·산업 표준)

다음 기준은 산업용 마이크로웨이브 장비에서 일반적으로 적용되는 안전 한계입니다.

구분	기준	비고
인체 노출 허용치	$\leq 5 \text{ mW/cm}^2$	장비 외부 접근 가능 지점 기준
측정 거리	5 cm	챔버, 도파관, 시창 주변
주파수	2.45 GHz	ISM Band
적용 기준	IEC / FDA / OSHA 관행	연구실 안전 점검 인정 수준

※ 5 mW/cm² 초과 시 **비정상 누설**로 간주

H-3. 주요 누설 발생 위치 (점검 포인트)

- 도파관(Waveguide) 플랜지 결합부
- 챔버-도파관 연결부
- 시창(View port) 실링 부위
- 도어/커버 인터락 주변
- 마그네트론 교체 후 체결 부위

H-4. 누설 점검 방법 (정기 점검 SOP)

1) 점검 장비

- Microwave Leakage Detector (2.45 GHz 대응)
- 측정 범위: 0~10 mW/cm² 이상

2) 점검 조건

- 플라즈마 점화 상태
- 최대 사용 출력 조건(대표적으로 3~5 kW)
- 장비 외부 접근 가능 위치 전수 스캔

3) 점검 주기

- 정기 점검: **6개월 1회**
- 마그네트론/도파관 작업 후: 즉시

H-5. 누설 발생 시 즉시 조치 절차 (중요

기준 초과 감지 시 ($\geq 5 \text{ mW/cm}^2$)

1. 즉시 **Microwave OFF**
2. 필요 시 **E-Stop** 작동
3. 장비 주변 인원 이탈
4. Supervisor 및 안전관리자 보고
5. 재가동 금지 (원인 제거 전까지)

H-6. 원인별 시정 조치 가이드

원인	조치
도파관 체결 불량	플랜지 재체결, 토크 관리
가스켓/O-ring 손상	즉시 교체
시창 실링 열화	시창 교체 또는 재실링
마그네트론 정렬 불량	제조사/전문 엔지니어 점검

H-7. 재가동 승인 조건 (Mandatory)

- 누설 재측정 결과 $\leq 5 \text{ mW/cm}^2$ 확인
- Supervisor 확인 및 서명
- 점검 기록(Log) 보관

Supervisor 서명: _____ 날짜: _____

H-8. 연구실 안전 점검 대응용 핵심 문구 (복사용)

“본 연구실의 MPECVD 장비는 2.45 GHz 마이크로웨이브 누설 기준을 5 mW/cm^2 이하로 관리하고 있으며, 정기 점검 및 기준 초과 시 즉시 운전 중단 SOP를 운영하고 있습니다.”

※ 본 부록은 **중대위험(고출력 전자기파)** 관리 항목으로 분류되며 ※ 연구실 안전 점검·외부 감사 시 제출 문서로 사용 권장