

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 플라즈마**를 이용하여 다이아몬드, DLC, 박막 소재 등을 고품질로 성장시키는 장비입니다. 본 매뉴얼은 **장비 운전자 및 연구원**을 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) 복사광**을 방출할 수 있으며, 특히 시창(View port)을 통한 직접 관찰 시 인체에 유해할 수 있습니다.

3.3.1 UV 발생 특성

- 수소(H₂) 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 대상**이며
- 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(H₂) 기반 환경**에서 메탄(CH₄)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 N₂ 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. H₂ 가스 투입 및 플라즈마 점화
3. 챔버 안정화 (10~20분)
4. CH₄ 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:** $\pm 20^{\circ}\text{C}$ 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 $\pm 20^{\circ}\text{C}$
 - 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
- 플라스마/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(≥ 3 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 요소를 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

- H_2 / CH_4 는 가연성 가스임을 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 요약본은 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 사용됩니다.

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