

반도체 PGMEA 증류탑 측류 추출(Side-stream) 운전 가이드

본 문서는 반도체 공정용 초고순도 PGMEA 정제 과정에서 사용되는 **측류 추출 방식(Side-stream Draw)**의 기본 원리, 2기 직렬 탑 대비 장단점, 그리고 현장 DCS(분산제어시스템) 적용을 위한 직관적인 제어 관계식과 주의점을 정리한 종합 운전 가이드입니다.

1. 측류 추출 운전 방식의 개요 및 목적

단일 증류탑에서 탑 상부와 하부에서 일부 불순물을 버리고 중간에서 제품을 뽑아내는 운전 방식은 **하나의 탑 내부에서 PGMEA보다 가벼운 물질(경비물)과 무거운 물질(중비물)을 동시에 분리**하기 위한 고효율 정제 전략입니다.

- **탑 상부 (Top) 리플렉스 라인 일부 제거 (Purge):** 수분, 메탄올, PGME 등 끓는점이 낮은 가벼운 불순물이 탑 상부에 누적되다가 제품단으로 밀고 내려오는 것을 방지하기 위해 계 외로 배출합니다.
- **탑 하부 (Bottom) 유량 일부 제거 (Blowdown):** DPGMEA(이량체), 고분자 중합물, 금속 성분 등 끓는점이 높은 무거운 불순물이 리보일러 주변에 쌓여 파울링(때)을 일으키거나 기류를 타고 제품을 오염시키는 것을 막기 위해 하부 액체를 일부 버려줍니다.
- **탑 중간 (Middle) 제품 측류 추출:** 위에서는 가벼운 물질을 날리고 아래에서는 무거운 물질을 가라앉힘으로써, 탑 중간에 형성되는 **가장 순도가 높은 영역(Sweet Spot)**에서 반도체급 PGMEA를 안정적으로 확보합니다.

2. 2개 탑 직렬 연결 방식과의 비교 (장단점)

원래 경비물과 중비물을 완벽히 분리하려면 [1번 탑: 가벼운 물질 제거] → [2번 탑: 무거운 물질 제거] 형태로 공정을 짜야 하지만, 측류 추출은 이를 탑 하나로 해결합니다.

구분	단일 탭 측류 추출 방식	2개 탭 직렬 연결 방식
경제성	매우 우수. 탭의 수와 리보일러/콘덴서가 절반으로 줄어 설비 투자비(CAPEX)와 스팀/냉각수 비용(OPEX)이 극적으로 절감됨.	불리함. 장치 수가 많고 각 탭마다 독립적인 열에너지를 공급해야 하므로 초기 비용과 에너지 소비가 큼.
제어 난이도	매우 어려움. 모든 운전 변수가 하나로 얽혀 있어, 상부 환류량 하나만 바뀌어도 중간 제품 순도가 출렁임 (고급 공정 제어 필수).	비교적 쉬움. 각 탭이 하나의 역할만 수행하므로 제어 루프가 독립적이며 트러블슈팅이 직관적임.
품질 안정성	원료 변화에 민감. 들어오는 원료의 유량이나 불순물 농도가 조금만 변해도 최고 순도 구간의 위치가 위아래로 흔들려 제품이 오염될 수 있음.	원료 변화에 강인. 1번 탭에서 완충(Buffering)이 가능하며, 공정 변동이 다음 탭으로 급격하게 전가되지 않음.
목표 순도	고순도 달성 가능. 일반 범용 신너 스펙에는 충분하나, ppb 단위의 극단적인 통제가 필요한 경우 구조적 한계(미세 비산물 혼입)가 존재함.	초고순도(Electronic Grade) 안전지대. 물리적 격리가 확실하여 반도체 최고 등급의 엄격한 품질 관리에 가장 유리함.

3. 직관적인 DCS 제어 관계식 (원료 투입량 기준)

수식 기호($R = R_f \cdot D$ 등)로 보면 현장에서 직관적으로 이해하기 어렵기 때문에, 실제 현장 제어실(DCS)에서 사용하는 **원료 투입량 기준의 연동 공식**으로 쉽게 풀어 정리했습니다.

① 상부 불순물 제거량 제어식 (가벼운 물질 버리는 양)

원료가 많이 들어올수록 가벼운 불순물도 비례해서 많이 들어오므로 상부 버림량도 비례해서 늘려줍니다.

$$\text{상부 제거 유량} = \text{원료 투입량} \times \text{상부 제거 비율 계수}$$

* 예: 원료 내에 수분 등 가벼운 물질이 약 1% 존재한다면, 계수는 0.01로 설정합니다.

* 원료가 10 ton/h 들어오면 상부에서는 0.1 ton/h(100 kg/h)를 지속적으로 빼내어 버립니다.

② 하부 불순물 제거량 제어식 (무거운 물질 버리는 양)

리보일러 주변에 고분자나 금속이 쌓이지 않도록 원료 투입량에 비례하여 밑바닥 액체를 빼줍니다.

$$\text{하부 제거 유량} = \text{원료 투입량} \times \text{하부 제거 비율 계수}$$

* 예: 원료 내 무거운 불순물 및 금속 성분이 약 1%라면, 계수를 0.01로 설정하여 비례 제어합니다.

③ 중간 제품 추출량 제어식 (수율 제어)

총 물질수지(들어온 양 = 나간 양)에 따라, 원료에서 상·하부 버림량을 제외한 나머지를 제품으로 안전하게 추출합니다.

$$\text{중간 제품 추출 유량} = \text{원료 투입량} \times \text{목표 제품 수율 계수}$$

- * 위의 예시대로 상·하부 불순물을 각각 1%씩 버린다면, 목표 제품 수율 계수는 0.98(98%)이 됩니다.
- * 원료가 10 ton/h이면 중간 제품은 항상 9.8 ton/h가 나오도록 밸브가 자동으로 조절됩니다.

④ 상부 환류량(Reflux) 제어식 (탑 내부 액체 공급)

기존의 어려운 수식($R = R_f \cdot D$)을 원료 투입량 기준으로 변환한 식입니다. 결국 환류량도 원료 유량에 직접 비례하게 만듭니다.

$$\text{상부 환류 유량} = \text{원료 투입량} \times [\text{상부 제거 비율 계수} \times \text{설비 환류비}]$$

- * 설비 설계 시 정해진 고유 환류비(예: 4.0)가 있다면, 앞서 정한 상부 제거 계수(0.01)와 곱해져 최종 연동 상수가 됩니다.
- * 원료 유량의 움직임에 따라 상부 환류 밸브가 즉각적으로 전방먹임(Feedforward) 대응을 하여 탑 상부 온도 무너짐을 방지합니다.

⑤ 리보일러 스팀 공급량 제어식 (에너지 제어)

탑 내부를 끓여 올리는 스팀량 역시 원료 투입량에 비례하도록 기본 축을 잡고, 뒤에 현장 보정값을 더해줍니다.

$$\text{필요 스팀 공급량} = (\text{원료 투입량} \times \text{스팀 비례 계수}) + \text{운전원 보정값(Bias)}$$

- * 이론적으로 원료 가동률에 맞춰 스팀 밸브 개도율이 정비례하여 움직이도록 기본 로직을 구성합니다.
- * 계절 변화나 외기 온도, 탑 자체의 열손실을 고려하여 운전원이 실시간으로 더하거나 뺄 수 있는 '보정값(Bias) 탭'을 반드시 DCS 화면에 확보해야 합니다.

4. 데미스터(Demister) 및 탑 내부 차압(ΔP) 관리 주의점

측류 추출탑 운전의 최대 아킬레스건은 **하부의 무거운 물질이 기류를 타고 제품단으로 튀어 올라오는 현상(비산, Entrainment)**입니다. 이를 막기 위해 제품단 아래에 설치된 데미스터와 차압 관리가 매우 중요합니다.

① 구간별 차압계(DPT) 모니터링

탑 전체 차압만 보면 데미스터 공극이 막혔는지 알 수 없습니다. 반드시 **[탑 하부 ~ 측류 제품단]** 구간의 차압을 분리 측정하여 데미스터 전후의 압력 손실을 상시 감시해야 합니다.

② 데미스터 오염(Fouling)의 가동 중 판단 방법

투입 유량과 스팀 공급량이 몇 달 전과 완전히 동일함에도 불구하고, 데미스터 구간의 차압이 지속적으로 우상향(성장 트렌드)하고 있다면 내부 가스 통로가 불순물로 막히고 있다는 증거입니다. 틈새가 좁아지면 가스 유속이 칼바람처럼 빨라져 액적을 찢고 위로 올려보내므로, **차압 상승과 동시에 중간 제품의 금속(Metal) 성분 스펙이 흔들린다면** 즉시 세정 계획을 수립해야 합니다.

③ DCS 오버라이드(Override) 및 안전 인터록 설계

- **주의 제어 (Warning):** 차압이 관리 기준치 상한에 도달하면, 스팀 밸브를 강제로 조여 증기 유속을 낮추는 오버라이드(Override) 회로를 구성하여 플러딩(Flooding)으로 인한 제품 오염을 선제적으로 차단합니다.
- **안전 차단 (Trip):** 차압이 임계치(High-High)를 넘어서면 탑 내부 트레이와 데미스터가 물리적으로 뜯겨 나가거나 파손될 수 있으므로, 즉시 리보일러 스팀을 차단(Trip)하는 인터록을 이중으로 걸어야 합니다.

현장 엔지니어 핵심 요약:

측류 추출탑은 결국 '**경계선 유지 싸움**'입니다. 상부의 가벼운 물질 농축 구간과 하부의 무거운 물질 농축 구간이 내가 지정한 중간 제품 추출단(Tray)을 절대 침범하지 못하도록, 원료 유량에 맞춰 상·하부 밸브와 환류량, 스팀량을 칼같이 비례 연동시키고 데미스터 차압을 통해 최후의 방어선을 감시하는 것이 운전의 전부입니다.