



이슬점 기반 반도체 클린룸 온습도 관리 상태 평가 기법

임성재^a, 조귀영^a, 정범석^{a,*}

Dew Point-Based Evaluation for Temperature and Humidity Control in Semiconductor Cleanrooms

Seongjae Rim^a, Kwiyoung Cho^a, Bumsuk Jung^{a,*}^a Department of Semiconductor Engineering, Myongji University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	26	February	2026
Revised	4	April	2026
Accepted	19	April	2026

Keywords:

Dew point
Relative humidity
Absolute humidity
Cleanroom
Temperature and humidity control

ABSTRACT

Precise control of temperature and humidity in semiconductor cleanrooms is critical for maintaining product yield and reliability. Conventional semiconductor fabrication facilities manage absolute and relative humidity levels using an outdoor air conditioner and a dry cooling coil, respectively. However, differences in measurement units between supply air and in situ sensors limit direct comparison and hinder quantitative evaluation. This study proposes a dew point-based method as a unified index to assess cleanroom conditions. By converting measured temperature and relative humidity values into dew-point values and comparing them with the supply-air dew point, abnormal humidity levels, external-air intrusion, and residual moisture effects can be effectively detected. Case studies demonstrate that the dew-point method provides more sensitive and reliable monitoring than conventional approaches, enabling early detection of humidity-induced issues and supporting higher yields in advanced semiconductor manufacturing.

1. Introduction

반도체 소자의 미세화와 집적도가 높아질수록 클린룸 내부의 온도와 습도는 제품 수율과 신뢰성을 좌우하는 핵심 관리 인자로 작용한다. Table 1은 습도 편차에 따른 대표적인 반도체 공정 불량 사례를 정리한 것으로, 높은 습도에서는 금속 부식, 스트레스 부식, 패턴 브리지 등이 발생하고, 낮은 습도에서는 Electrostatic Discharge (ESD) 손상, 포토레지스트 감도 저하, 파티클 오염 증가 등이 관찰된다. 이에 따라 첨단 반도체 FAB에서는 제한된 허용 범위(예: 온도 $23^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $45\% \pm 5\%$) 내에서 정밀한 환경 제어를 수행하고 있다^[1].

일반적인 반도체 FAB의 공조 시스템은 외조기(outdoor air conditioner, OAC)에서 외기를 이슬점 기준으로 제어하여 일정한 절대습도를 가진 공급 공기(fresh air, FA)를 생성하고, 드라이 코일(dry cooling coil, DCC)에서 온도를 조정한 후 Fan Filter Unit (FFU)를 통해 클린룸으로 공급하는 구조로 운영된다^[1]. 이 과정에서 OAC는 이슬점과 같은 절대 지표를 사용하여 제어되는 반면, 클린룸 내부는 온도와 상대습도라는 상대 지표를 기반으로 모니터링되고 있어, 공급 공기의 상태와 실제 클린룸 상태를 동일 기준에서 직접 비교하기 어렵다. 특히 OAC 출구의 공급 공기 이슬점($T_{d,sup}$)과 FFU 직하부에서 측정되는 온도(T)와 습도(RH)는 서로 다른 단위 체계를 사용하므로, 절대습도 관리 실효성을 정량적으

* Corresponding author. Tel.: +82-31-330-6694

E-mail address: bjung@mju.ac.kr (Bumsuk Jung).

Table 1 Representative defect cases caused by humidity deviation in semiconductor processes

Category	Major issues	Cases and impacts
High humidity (>50% RH)	Pattern bridge defect	High humidity in organic BARC coating causes moisture defects, leading to gate pattern bridging.
	Metal corrosion	Fluorine contamination on Al bond pads reacts with moisture under high humidity, generating HF and causing corrosion and contact failure.
	Stress corrosion in wafer bonding	Elevated humidity in wafer-to-wafer bonding induces stress corrosion at the interface, promoting crack propagation and reducing bond strength.
Low humidity (<40% RH)	ESD damage	Low humidity allows static charges to accumulate, damaging semiconductor devices through ESD stress and lowering yield.
	Photoresist sensitivity degradation	Dry lithography environments reduce moisture uptake in photoresist films, lowering photosensitivity and development rate; DNQ resists show sensitivity and contrast loss below 30% RH, causing fine pattern defects.
	Increased particle contamination	Low humidity increases electrostatic attraction of airborne particles to wafer surfaces, raising particle induced defects in circuit patterns.

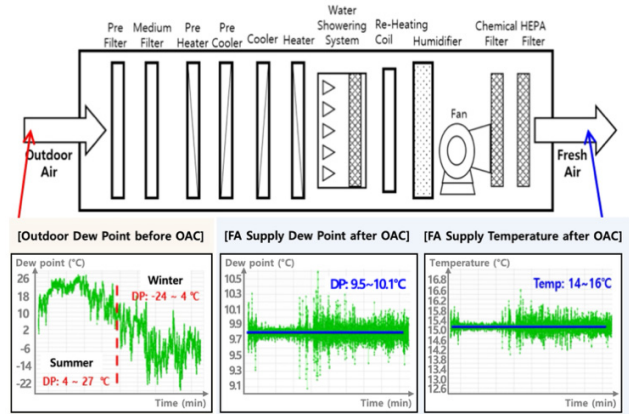


Fig. 1 Design of the outdoor air conditioner

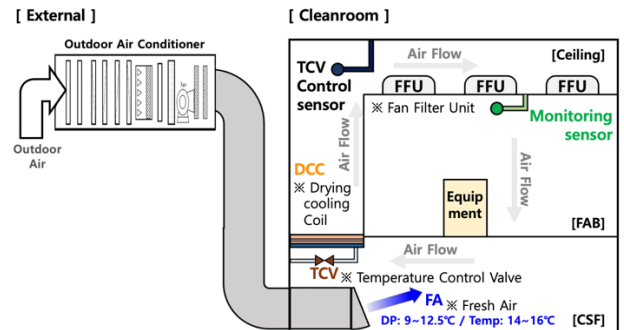


Fig. 2 Conditioned air supplied to the cleanroom via the OAC

로 평가하기 어렵다.

습도와 반도체 공정 특성의 상관관계, 클린룸 공조 설계 및 제어 알고리즘에 관한 연구는 다수 보고되어 왔으나^[1, 2], 대부분 공정 결과나 제어 로직의 성능에 초점을 두고 있어^[3], OAC 토출구에서의 이슬점과 FFU 직하부 온도와 습도 데이터를 동일한 물리량으로 변환하여 절대습도 관리 상태를 정량적으로 평가하는 방법론은 상대적으로 부족한 실정이다.

본 연구는 클린룸 내에서 측정한 온도와 상대습도를 표준 이슬점 변환식(Magnus formula)을 통해 이슬점으로 환산하고, OAC에서 관리되는 공급 공기 이슬점과의 차이(이슬점 편차, ΔT_d)를 정의함으로써, 반도체 클린룸의 온·습도 관리 상태를 이슬점 기준으로 정량적으로 평가하는 기법을 제안한다^[4]. 또한 실제 FAB의 Bay 단위 운전 데이터를 적용하여 제안 지표의 통계적 특성과 이상 탐지 성능을 분석하고, 기존 온·습도 범위 기반 모니터링과의 차별성을 논의하고자 한다.

2. Phenomenon and Analysis

2.1 클린룸 공조 시스템 개요

반도체 FAB의 공조 시스템은 외기 처리부(OAC)와 순환 처리

부(DCC), 그리고 Fan Filter Unit (FFU)로 구성된다^[1, 8]. OAC에서는 외부 공기를 여과, 냉각, 가습 또는 제습하여 이슬점을 약 9.5~12.5°C 범위로 유지한 후 건구온도 14~16°C 정도로 FAB내로 공급한다(Fig. 1). 이후 DCC는 이 공기를 약 23°C 수준으로 조정하여 클린룸에 재공급하며, FFU를 통해 HEPA/ULPA 및 Chemical 필터링과 층류 흐름을 형성한다(Fig. 2).

Outdoor air의 이슬점은 계절과 기상 조건에 따라 크게 변하지만, OAC를 통과한 후의 FA 이슬점과 온도는 좁은 범위로 잘 제어되고 있음을 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 이와 같이 OAC+DCC+FFU 조합은 대규모 고정형 클린룸의 표준 공조 방식으로 자리 잡고 있으며, 높은 유연성과 에너지 효율로 인해 국내의 반도체 FAB에서 널리 사용되고 있다.

2.2 습도 관리의 이론적 배경

습도는 절대습도와 상대습도로 구분된다. 절대습도는 공기 중 수증기의 실제 양을 나타내는 지표로 온도와 무관한 반면, 상대습도는 해당 온도에서의 포화 수증기량 대비 비율로 정의되며, 온도 변화에 따라 값이 달라진다. 동일한 절대습도 조건에서도 온도가 상승하면 상대습도는 낮아지고, 온도가 하강하면 상대습도는 높아진다.

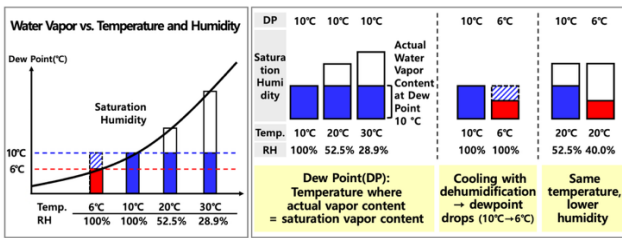


Fig. 3 Overview of dew point

FAB 공조 시스템 관점에서 보면, 외기 처리부(OAC)에서는 주로 절대습도 제어(가습/제습)가 이루어지고, 순환 처리부(DCC)에서는 냉각 정도를 조절하여 온도를 세밀하게 제어하여 상대습도 변화를 관리한다. 그러나 클린룸 내부에서는 온도와 상대습도를 각각 별도의 지표로 모니터링하기 때문에, 공급 공기와 실내 상태를 절대습도 기준으로 직접 비교하기 어렵다.

2.3 이슬점(Dew Point)의 개념과 필요성

이슬점은 공기를 냉각했을 때 수증기가 응결하기 시작하는 온도로, 공기 중 절대 수분량을 직접적으로 나타내는 지표이다. 따라서 온도와 상대습도가 서로 다른 공기 상태라도, 이슬점으로 환산하면 하나의 온도 단위(°C)로 비교할 수 있어, 공급 공기와 클린룸 내부 상태를 동일 기준에서 평가할 수 있다.

Fig. 3은 온도, 상대습도, 포화수증기량의 관계를 개념적으로 나타낸다. 예를 들어 20°C, 52.5%RH와 30°C, 28.9%RH 조건은 상대습도만 보면 큰 차이가 있는 것처럼 보이지만, 두 상태의 이슬점은 모두 약 10°C 수준으로 동일하다. 이는 절대습도가 같은 공기가 온도에 따라 서로 다른 상대습도 값을 가질 수 있음을 보여 주며, 이슬점이 절대습도 비교에 더 직접적인 지표임을 의미한다⁹⁾.

그러나 실제 클린룸 운전에서는 현재 대부분의 클린룸에서 OAC 전·후단의 이슬점만 제한적으로 모니터링하고, 내부는 온도와 상대습도 센서를 통해 관리한다. 이 경우 공급 공기의 상태와 클린룸 내부 조건을 동일한 기준으로 비교하기 어렵기 때문에, 국소적인 습도 상승이나 외기 유입, 잔류 수분과 같은 이상 현상을 조기에 포착하는 데 한계가 있다.

본 연구에서는 클린룸 내부에서 측정된 온도와 상대습도를 이슬점으로 변환하여 공급 공기의 이슬점과 직접 비교하는 방법을 제안한다. 본 방법은 기존의 T 와 RH 모니터링을 대체하는 것이 아니라 이를 보완하는 통합 지표로 운용되며 T , RH , $T_{d,sup}$ 를 동시에 기록함으로써 이상 감지 시 온도 기인 변동인지 절대습도 변화인지를 신속히 구별할 수 있다. 정상 상태에서는 두 이슬점이 거의 유사한 수준을 유지하지만, 특정 구역의 이슬점이 공급 공기 기준보다 지속적으로 높거나 낮게 나타나면 수분 공급원, 외기 유입, 과도한 냉각 등 잠재적 문제 요인이 존재함을 정량적으로 판단할

[Magnus Formula]

$$\gamma(T, RH) = \ln\left(\frac{RH}{100}\right) + \frac{bT}{c + T};$$

$$T_{dry} = \frac{c \gamma(T, RH)}{b - \gamma(T, RH)};$$

※ $b = 17.625$ and $c = 243.04$ °C.

※ $\gamma(T, RH)$: auxiliary function of the Magnus formula, computed from dry-bulb temperature T (°C) and relative humidity RH (%).

※ T_{dry} : dew point temperature (°C) estimated by the Magnus approximation.

Fig. 4 Dew point conversion formula

수 있다.

이러한 관점을 체계적으로 활용하기 위해, 이후 장에서는 이슬점 편차 지표를 정의하고 이를 이용해 클린룸 온·습도 관리 상태를 정량적으로 평가한다.

3. Experiment and Improvement

3.1 이슬점 기반 관리 기법의 원리

클린룸 내부의 온·습도 데이터를 이슬점으로 변환하여 공급 공기와의 차이를 평가하는 절차는 다음과 같다. 먼저 FFU 직하부에 설치된 센서에서 시간 t 마다 건구 온도 $T(t)$ 와 상대습도 $RH(t)$ 를 측정하고, 동시에 OAC 출구에서 공급 공기 이슬점 $T_{d,sup}(t)$ 를 수집한다. 측정된 $T(t)$, $RH(t)$ 값은 Magnus 식과 같은 표준 이슬점 계산식을 이용해 이슬점 $T_d(t)$ 로 변환되며, 공식의 형태와 사용된 상수는 Fig. 4에 정리하였다¹⁴⁻⁷⁾.

이슬점 계산식으로는 Magnus 식 외에도 Buck 식, Sonntag 식 등이 있으며, 이들은 Magnus 식의 구조를 기반으로 특정 온도 범위(Buck 식: -80~50°C의 광범위 대역, Sonntag 식: 저온, 고습 환경)에서 정확도를 보완한 공식이다^{15, 6)}. 본 연구의 측정 환경인 22.5~23.5°C 범위는 기본 Magnus 식을 적용하더라도 이들 복잡한 보완 공식들과의 이슬점 산출 편차가 최대 0.03°C 이내에 불과하여 실질적인 차이가 거의 없다. 따라서 설비 모니터링 시스템의 실시간 데이터 연산 효율성과 범용성을 고려하여, 본 연구가 목적하는 수준의 충분한 정확도를 보장하는 Magnus Formula를 채택하였다.

Fig. 5와 Fig. 6은 클린룸에서 측정한 온도와 상대습도 시계열을 Magnus Formula를 이용해 이슬점으로 변환한 결과와, OAC에서 공급되는 FA 이슬점 값을 비교한 예를 보여준다. 두 그림에서 볼 수 있듯이, 온도와 상대습도만으로는 두 조건을 직접 비교하기 어렵지만, 이슬점으로 환산하면 클린룸과 공급 이슬점이 거의 동일한 추이를 나타내며, 제안된 변환 기법이 공급 공기 기준의 절대습도 상태를 일관된 단위로 표현해 줌을 확인할 수 있다.

이를 바탕으로, 본 연구에서는 클린룸 공기의 이슬점 $T_d(t)$ 와 공

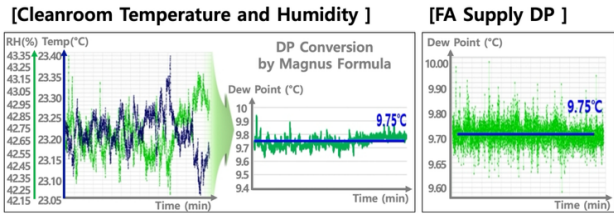


Fig. 5 Comparison between dew point converted values and supply FA values

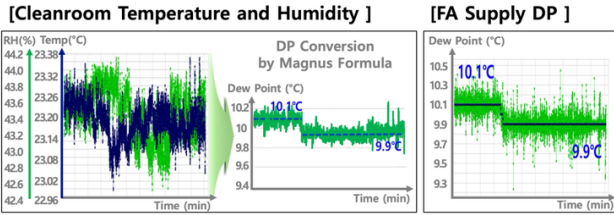


Fig. 6 Supply air dew point

급 공기 이슬점 $T_{d,sup}(t)$ 의 차이를 이슬점 편차 지표 $\Delta T_d(t)$ 로 정의한다.

$$\Delta T_d(t) = T_d(t) - T_{d,sup}(t) \quad (1)$$

$\Delta T_d(t)$ 가 0에 가까울수록 클린룸 공기가 공급 공기와 거의 동일한 절대습도 상태를 유지하고 있음을 의미하며, 양(+)의 방향으로 커지면 추가적인 수분 공급원이나 잔류 습기에 의해 공급 공기보다 더 습해졌을 가능성을 시사한다. 반대로 $\Delta T_d(t)$ 가 음(-)의 방향으로 크게 나타나는 경우에는 외기 유입, 국소적인 과도 제습 등으로 인해 클린룸 공기가 공급 공기보다 건조해졌을 가능성이 크다.

이와 같이 이슬점 편차는 온도와 상대습도 정보를 단일 물리량으로 통합하여 절대습도 관점의 이상 여부를 정량적으로 판단할 수 있게 해 주며, 이후 절에서는 실제 FAB Bay 데이터를 이용해 ΔT_d 의 통계적 특성과 이상 탐지 성능을 분석한다.

3.2 실험 대상 및 측정 시스템

제한한 이슬점 기반 관리 기법의 유효성을 검증하기 위해, 국내 300 mm 반도체 FAB의 생산 클린룸 Bay 다섯 곳(A, B, C, D, E)을 대상으로 실험을 수행하였다. 다섯 Bay는 모두 ISO Class 1000 수준의 청정도를 유지하며, 온도 $23^\circ\text{C} \pm 0.5^\circ\text{C}$, 상대습도 $45\% \pm 5\%$ 조건에서 연중 운전되는 공정 구역이다.

클린룸 내부 온·습도는 휴대형 온·습도 측정기(Vaisala HM70)를 사용하여 각 Bay의 대표 위치에서 FFU 직하부 1.5 m 높이에서 1분 간격으로 측정하였다. 해당 높이는 ISO 14644-3에서 규정하는 작업면(plane of work activity) 기준 높이로, 직립 작업자의 호흡 영역에 해당하며 클린룸 내 오염 노출 영향이 가장 직접적으로 나타나는 위치이다^[10]. 따라서 이 높이에서 측정한 온·습도는

Table 2 Normal-operation statistics of for five bays

Bay	Mean ΔT_d [$^\circ\text{C}$]	Standard deviation [$^\circ\text{C}$]	95% range of ΔT_d [$^\circ\text{C}$]
A	0.12	0.16	-0.36 ~ 0.44
B	0.25	0.13	-0.08 ~ 0.56
C	-0.10	0.14	-0.48 ~ 0.26
D	0.19	0.14	-0.21 ~ 0.57
E	0.27	0.12	-0.08 ~ 0.56

클린룸 환경 전체의 관리 상태를 대표하는 값으로 볼 수 있으며, 본 연구에서는 이를 기준으로 이슬점 변환 및 ΔT_d 산출을 수행하였다. HM70의 온도 정확도는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 습도 정확도는 $\pm 1.0\% \text{RH}$ 로, 반도체 클린룸 환경 모니터링에 요구되는 정밀도를 만족한다. 외조기 출구의 공급 공기 이슬점은 공통 외조기 라인에 설치된 냉각 미러식 이슬점 트랜스미터(Vaisala DMT143, T_d 정확도 $\pm 1.5^\circ\text{C}$)로 측정하였다. 두 측정기는 정기 교정을 통해 설치 전후 오차를 확인하였으며, 측정 데이터는 설비 모니터링 시스템을 통해 자동 수집/저장한 뒤, 후처리 단계에서 Magnus 식을 이용해 이슬점과 ΔT_d 를 산출하였다.

실험에는 연속 운전이 유지된 1년간의 데이터를 사용하였다. 원시 1분 데이터를 5분 평균값으로 다운샘플링하여 각 Bay당 105,120 point, 다섯 Bay 합산 525,600 point의 시계열을 확보하였다. 이후 분석에서는 설비 트러블 이력과 공정 로그를 참조하여 명백한 이상 구간을 제외하고, 각 Bay별로 나머지 구간을 정상 운전 데이터로 정의한 뒤 ΔT_d 의 통계 특성과 정상 범위를 도출하였다.

3.3 통계 특성 및 정상 운전 범위 설정

3.2에서 정의한 정상 운전 구간에 대해 시점 마다 $\Delta T_d(t) = T_d(t) - T_{d,sup}(t)$ 를 계산하고, Bay별로 평균과 표준편차를 산출하였다. 그 결과는 Table 2에 나타내었다. 각 Bay는 7~8개의 FFU 토출구를 포함하며, 토출구별 ΔT_d 데이터를 종합하여 평균, 표준편차, 95% range를 산출하였다.

5개 Bay의 평균 ΔT_d 는 약 $-0.10 \sim 0.27^\circ\text{C}$ 범위에 분포하였고, 표준편차는 $0.12 \sim 0.16^\circ\text{C}$ 로 Bay 간 산포가 유사하게 나타났다. 95% range는 각 토출구의 ΔT_d 데이터로부터 개별 95% range를 산출한 뒤, Bay 내 하한 최솟값과 상한 최댓값을 취하여 보수적으로 정의하였으며, 전체적으로 약 $-0.48 \sim +0.56^\circ\text{C}$ 이내에 수렴하였다. 이는 HM70과 DMT143의 측정 불확도 및 공조 제어에 따른 미세한 변동을 고려할 때 정상 상태에서 기대되는 오차 수준과 잘 일치한다.

따라서 본 연구에서는 값을 반올림하여 $-0.5^\circ\text{C} \leq \Delta T_d(t) \leq 0.6^\circ\text{C}$ 를 Bay에 공통으로 적용 가능한 정상 관리 범위로 정의하였다. 이후 절에서 제시하는 이슬점 기반 이상 탐지 사례에서는 이

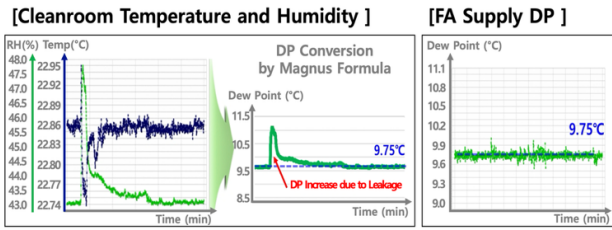


Fig. 7 Cleanroom dew point due to leakage

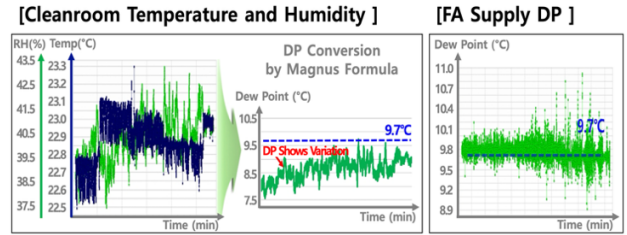


Fig. 8 Dew point change due to outdoor air infiltration

기준을 사용하여 공급 이슬점 설정 오류, 누수, 외기 유입 등 다양한 습도 이상을 판별하고, 조치 전·후에 ΔT_d 가 정상 범위로 수렴하는 양상을 비교함으로써 제안 지표의 실효성을 검증한다.

3.4 이슬점 기반 이상 탐지 및 개선 사례

3.3에서 정의한 정상 운전 범위 $0.5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_d(t) \leq +0.6^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로, 본 절에서는 세 가지 대표 사례를 통해 이슬점 기반 기법이 실제 FAB에서 어떤 이상을 탐지하고 개선하는 데 활용될 수 있는지 살펴본다.

3.4.1 누수(UPW)로 인한 국소 과습 사례

첫 번째 사례는 Bay의 설비 하부에서 발생한 UPW 누수로 인해 국소 구역의 습도가 급격히 상승한 경우이다. 정상 운전 구간에서 Bay의 이슬점 편차 ΔT_d 는 평균 약 0.1°C , 95% range $-0.5^{\circ}\text{C} \sim +0.6^{\circ}\text{C}$ 수준으로 유지되었으나, 누수 발생 시점 이후 특정 구간에서 ΔT_d 가 $+1^{\circ}\text{C}$ 이상으로 급상승하는 패턴이 관찰되었다. 이는 공급 공기 이슬점이 변하지 않은 상태에서 클린룸 공기만 추가 수분 공급원(UPW 누수)에 의해 급격히 습해졌음을 의미하며, 단순 상대습도 모니터링보다 이슬점 편차가 이상 발생을 더 민감하게 포착한 사례이다.

본 연구에서는 동일한 측정 데이터(T, RH)를 기반으로 기존 상대습도 모니터링 방식과 Magnus 식을 통해 변환된 이슬점 편차 ΔT_d 를 동시에 산출하여 비교하였다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 누수 발생 구간에서 RH는 관리 범위($45 \pm 5\%$) 이내에 머물러 기존 모니터링 방식으로는 이상을 즉각 판별하기 어려웠던 반면, 동일한 데이터를 Magnus 식으로 변환한 이슬점은 누수 발생 직후 명확한 상승 패턴을 나타냈다. 이는 온도 변화의 영향을 제거하고 절대습도 변화만을 직접 반영하는 이슬점 기반 방식이 기존 RH 모니터링 대비 이상을 더 민감하고 빠르게 감지할 수 있음을 동일한 데이터 내에서 정량적으로 보여준다.

설비 점검을 통해 해당 위치에서의 UPW 누수를 확인하고, 복구 및 국소 건조 조치를 수행한 이후 ΔT_d 값은 다시 정상 운전 범위로 수렴하였다. Fig. 7은 누수 전후의 T_d 변화를 시간에 따라 나타낸 것으로, 조치 이후 과습 구간이 소거되고 전체 분포가 정상 범위 내에서 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

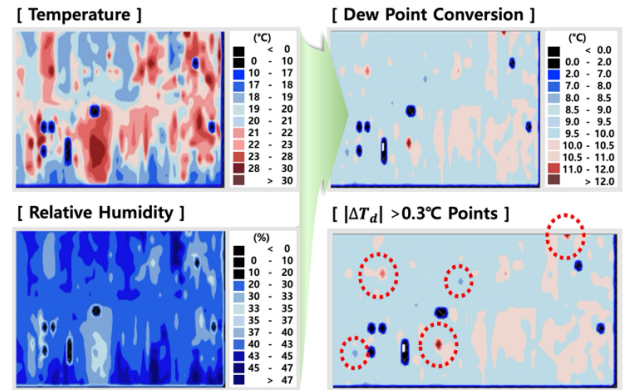


Fig. 9 Vulnerable areas identified by dew point conversion

3.4.2 외기 유입에 따른 과도 제습 사례

두 번째 사례는 Bay 인근 출입구의 기밀 저하로 인해 외기가 유입되면서 클린룸 공기가 공급 공기보다 과도하게 건조해진 경우이다. 정상 상태에서 Bay의 ΔT_d 는 다른 Bay와 마찬가지로 $-0.5^{\circ}\text{C} \sim +0.6^{\circ}\text{C}$ 범위에 분포했으나, 특정 기간 동안 ΔT_d 가 -1°C 이하의 음의 방향으로 크게 벗어나는 패턴이 반복적으로 나타났다. 이는 OAC에서 공급되는 공기보다 상대적으로 건조한 외기가 클린룸으로 유입되어, 절대습도가 공급 공기 기준보다 낮아졌음을 시사한다.

온도와 상대습도만으로는 계절 변화나 제습 제어에 따른 영향과 외기 유입에 의한 영향을 구분하기 어려웠으나, 공급 이슬점과의 차이인 ΔT_d 를 이용하면 “ 지나치게 건조한 ” 상태가 되었는지를 명확히 판별할 수 있다. 원인 분석 결과, 해당 기간 동안 출입구 도어의 패킹 손상과 주변 차압 불균형으로 인해 외기가 지속적으로 새어 들어온 것으로 확인되었다. 도어 기밀 보수 및 차압 재조정 이후 Bay의 ΔT_d 분포는 다시 $-0.5^{\circ}\text{C} \sim +0.6^{\circ}\text{C}$ 범위로 수렴하였으며, Fig. 8에 나타난 것처럼 장기간 지속되던 음의 편차 구간이 소거되고 정상 운전 상태가 회복되었다.

3.4.3 공간적 취약 구역 식별 사례

마지막으로, 계측한 온·습도 데이터를 이슬점으로 변환한 뒤 공정 구역별로 ΔT_d 의 공간 분포를 작성하면, 누수, 외기 유입, 국소 과습이 반복적으로 발생하는 취약 지점을 지도 형태로 표현할 수 있다. Fig. 9는 클린룸의 T_d 를 평면 상에 매핑하고, $T_{d,sup}$ 와 비교하

여 ΔT_d 를 산출하여 나타난 등고선도이다. 하단 우측은 정상 운전 범위($-0.5^{\circ}\text{C}\sim+0.6^{\circ}\text{C}$)의 절반 수준인 $|\Delta T_d| > 0.3^{\circ}\text{C}$ 를 간이 스크리닝 기준으로 설정하고, 이를 초과하는 측정 지점을 붉은 점선 원으로 표시하였다. 이는 이슬점 지표가 일시적인 온도 차이나 습도 편차보다 근본적인 수분 상태를 나타내므로, 실질적인 문제 구역을 선별해내는 데 매우 유용함을 보여준다.

4. Conclusion

본 연구에서는 반도체 클린룸의 온·습도 관리에서 기존의 상대습도 범위 중심 운전이 갖는 한계를 보완하기 위해, 이슬점을 공통 지표로 사용하는 평가 기법을 제안하였다. 실험을 통해 FFU 하부에서 계측한 온도와 상대습도 데이터를 표준 이슬점 계산식으로 변환하고, OAC 공급 공기 이슬점과 비교함으로써 클린룸 절대습도 상태를 일관된 단위로 표현할 수 있음을 확인하였다. 또한 공급 이슬점과의 차이로 정의한 이슬점 편차에 대해 정상 운전 범위를 $-0.5^{\circ}\text{C}\sim+0.6^{\circ}\text{C}$ 로 설정하고, 이를 기준으로 UPW 누수에 의한 국소 과습, 출입구 기밀 저하에 따른 외기 유입, 공간적 취약 구역 등 다양한 이상 패턴을 조기에 탐지할 수 있음을 사례 분석으로 검증하였다.




본 연구의 기여는 새로운 물리 모델이나 이론을 제시하는 데 있 기보다는, 공조 설비 측에서는 절대습도 기준으로 관리되던 이슬점 정보를 클린룸 내부 운전 평가 지표로 확장하여, 공급 공기 조건과 현장 상태를 동일 기준에서 비교·해석할 수 있는 실용적인 관리 프레임워크를 제시한 데 있다.

기존 온도와 상대습도 범위 기반 관리 방식은 클린룸 내부 센서와 공급 공조 조건 간의 직접적인 비교가 어렵고, 누수나 외기 유입처럼 공급 조건과 불일치하는 이상 징후를 정량적으로 평가하는 데 한계가 있었다. 반면 제안된 이슬점 기반 관리 기법은 공급 공기 조건을 기준으로 절대습도 상태를 통합적으로 해석할 수 있게 해 주며, 미세한 과습, 과건조 경향을 수치화하여 설비 점검과 운전 조건 조정의 우선순위를 설정하는 데 유용하다. 향후에는 본 기법을 실시간 모니터링 시스템과 연계하여 자동 경보 및 피드백 제어로 확장하고, 더 다양한 FAB 라인과 공정 단계에 적용함으로써 습도 기인 불량률의 조기 예방과 수율 향상에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Choi, K.-M., Lee, J.-E., Cho, K.-Y., Kim, K.-S., Cho, S.-H., 2015, Clean Room Structure, Air Conditioning and Contamination Control Systems in the Semiconductor Fabrication Process, J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg., 25:2 202-210, <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2015.25.2.202>.
- [2] Zhuang, C., Wang, S., 2020, Uncertainty-Based Robust Optimal Design of Cleanroom Air-Conditioning Systems Considering Life-Cycle Performance, Indoor Built Environ., 29:9 1214-1226, <https://doi.org/10.1177/1420326X19899442>.
- [3] Song, G. S., Jung, J. S., Kim, C. S., Yang, J. S., Lee, K. H., Yoo, K. H., 2023, Assessment of Transient Response of Indoor Temperature and Energy Consumption in a Semiconductor Manufacturing Cleanroom Using Various Feedback Control Schemes, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B, 47:5 281-287, <https://doi.org/10.3795/KSME-B.2023.47.5.281>.
- [4] Magnus, G., 1844, Versuche über die Spannkraft des Wasserdampfes, Annalen der Physik, 137:2 225-247, <https://doi.org/10.1002/andp.18441370202>.
- [5] Buck, A. L., 1981, New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor, J. Appl. Meteorol., 20:12 1527-1532, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1981\)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1981)020<1527:NEFCVP>2.0.CO;2).
- [6] Sonntag, D., 1990, Important New Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on the ITS-90 and Psychrometer Formulae, Z. Meteorol., 40:5 340-344.
- [7] Parish, O. O., Putnam, T. W., 1977, viewed 29 May 2026, Equations for the Determination of Humidity from Dew-Point and Psychrometric Data, NASA Technical Note NASA-TN-D-8401, <https://mathscinotes.com/wp-content/uploads/2016/03/87878main_H-937.pdf>.
- [8] Yin, J., Liu, X., Guan, B., Zhang, T., 2020, Performance and Improvement of Cleanroom Environment Control System Related to Cold-Heat Offset in Clean Semiconductor Fabs, Energy and Buildings, 224 110294, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110294>.
- [9] Vaisala, 2019, viewed 29 May 2026, Humidity Measurement in Cleanrooms, <https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/vn180_Humidity_measurement_in_cleanrooms.pdf>.
- [10] ISO, 2019, Cleanrooms and Associated Controlled Environments - Part 3: Test Methods, ISO 14644-3:2019, International Organization for Standardization, Geneva.

- [1] Choi, K.-M., Lee, J.-E., Cho, K.-Y., Kim, K.-S., Cho, S.-H., 2015, Clean Room Structure, Air Conditioning and Contamination Control Systems in the Semiconductor Fabrication Process, J.

	<p>Seongjae Rim Ph.D. Course in the Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interests include FAB cleanroom environments and the control of airborne molecular contaminants (AMCs) in HVAC systems. E-mail: rsj1211@gmail.com</p>
	<p>Kwiyoung Cho Ph.D. Coursework Completed in the Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interests include equipment fan filter unit (EFU) vibration analysis, ultra-low penetration air (ULPA) filter outgassing evaluation, and moisture/humidity control in semiconductor equipment. E-mail: myhope04@naver.com</p>
	<p>Bumsuk Jung Professor in Department of Semiconductor Engineering, Myongji University. His research interests focus on sustainable semiconductor manufacturing and environmental technologies for emission reduction and energy efficiency. E-mail: bjung@mju.ac.kr</p>