

애플리케이션 노트

AN1601

Revision:	KOR-01
발행일:	2023-07-26
작성자:	Paul Drexhage, Grady
결재자:	Stefan Häuser, Kendrick

키워드: 습도, 응축, 신뢰성, 환경

습도 및 응축이 전력 전자 시스템에 미치는 영향

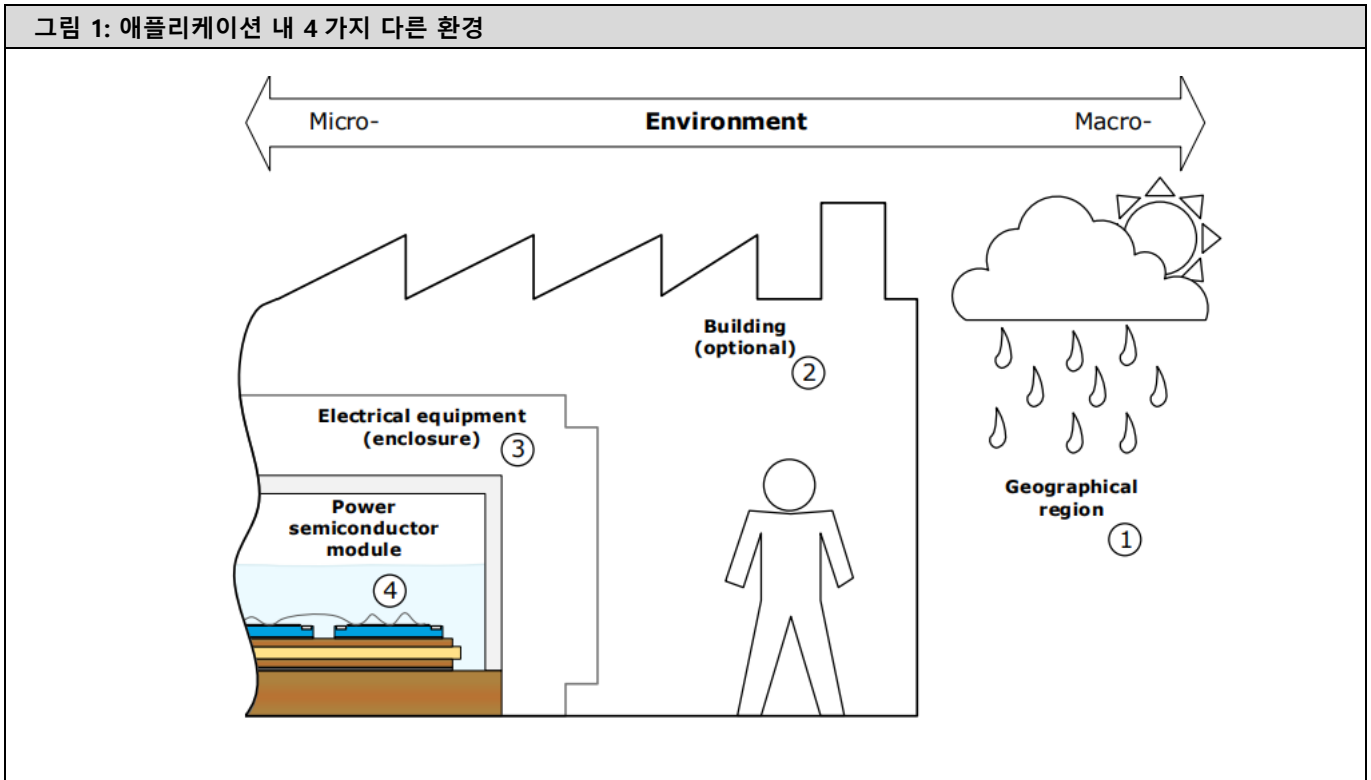
- 1. 일반 2
 - 1.1 환경의 정의 2
 - 1.2 습도 3
 - 1.3 응축 4
 - 1.4 표준 6
- 2. 측정 6
- 3. 전력 전자 장치에 미치는 효과 7
 - 3.1 습도 7
 - 3.2 응축 8
- 4. 원인 9
 - 4.1 기후 9
 - 4.2 운반/보관 9
 - 4.3 상대 공기 압력의 변화 9
 - 4.4 상대 공기 온도의 변화 10
 - 4.4.1 작동 지점 10
 - 4.4.2 펄스 작동(모듈) 11
 - 4.4.3 캐비닛 내 온도 차이 14
- 5. 저감 기술 15
 - 5.1 팬 제어장치(공냉식 계통) 15
 - 5.2 냉각수 온도 제어(수냉식 시스템) 16
 - 5.3 시동 전 예열 절차 17
 - 5.4 캐비닛 히터 18
 - 5.5 제습기 18
 - 5.6 통풍구 19
 - 5.7 건조 19
 - 5.8 DC 링크 전압 탈거 19
- 6. 설계예 20
 - 6.1 이상적인 밀봉 캐비닛 20
 - 6.2 이상적인 개방형 캐비닛 21
- 7. 요약 22

1. 일반

본 애플리케이션 노트에서는 습도와 응축이 전력 전자 시스템에 미치는 영향에 대해 설명합니다. 보다 신뢰할 수 있는 작동을 위해 이러한 영향을 완화시킬 수 있는 설계 방법에 대한 도움을 제공합니다.

1.1 환경의 정의

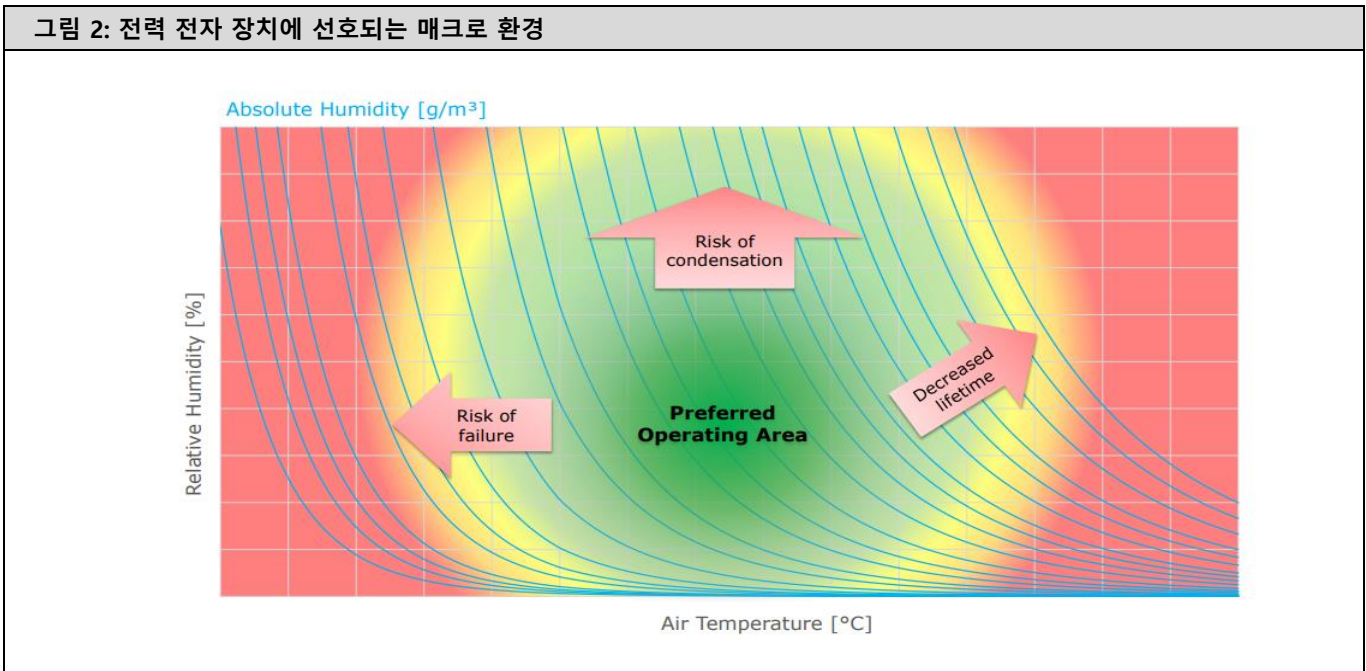
전자 시스템 주변의 "환경"과 관련하여 전력 반도체 모듈 근처 또는 내부의 실외 매크로 환경과 마이크로 환경을 구분해야 합니다(그림 1).



실외 매크로 환경(그림 1, ①)에 대해서는 일반적으로 이해하고 있는 정기적인 날씨 보고서를 비롯하여 특성(온도, 습도, 압력 등)을 정의하는 표준이 제공됩니다. 반면, 전력 반도체 모듈 내(그림 1, ④) 및 주변(그림 1, ③)의 마이크로 환경은 실외 매크로 환경과 전력 전자 시스템의 작동(전력 수준, 냉각 등)에 의해 결정됨에도 불구하고 제대로 된 정의가 미흡합니다.

IEC 60721-3-3 표준 [3] 은 전기 장비를 설치할 때 허용되는 매크로 환경 조건(즉 그림 1, ①, ②)을 정의합니다. 이 표준을 반도체 모듈(구성 요소)에 그대로 적용할 수는 없지만 (외함 등을 통해) 보호해야 하는 외부 환경에 대한 명확한 정의를 제공합니다. 또한 IEC "기후차트"(기상학에 사용되는 영어 단어와는 다른)는 어떤 환경인지와 상관없이 온도와 습도 사이의 관계를 효과적으로 이해할 수 있는 수단이 됩니다.

그림 2는 공기 온도와 상대 습도가 주요 축에 표시되고 절대 습도를 일련의 곡선으로 표시한 기후차트의 일반적인 예시입니다. 세 가지 변수를 사용하여 전자 전력 시스템에서 선호되는 작동 영역을 정의할 수 있으며, 이 범위를 벗어나면 손상이나 수명이 줄어들 수 있습니다. 설계자의 목표는 이러한 변수들이 서로 어떻게 영향을 미치는지 이해하고 시스템 설계 및 작동을 통해 시스템의 작동 지점이 선호 작동 영역 내에 있도록 유지하는 것입니다.



1.2 습도

가장 일반적인 형태의 물은 전기 전도성 및 부식성으로 인해 전기 회로에 문제를 일으키는 것으로 일반적으로 알려져 있습니다. 물이 기체 상태(수증기)에서 전자 장치에 미치는 영향에 대해서는 덜 알려져 있습니다. 이 수증기가 주변 공기로 전파되고 주어진 해당 부피 내의 온도와 압력에 따라 동작합니다. 공기 중에 있는 수증기를 습도라고 하며, 다음과 같이 다양한 방법으로 정의됩니다.

절대 습도(AH): 공기 중의 수증기 밀도로, 일반적으로 그램/입방 미터[g/m³]로 표시합니다.

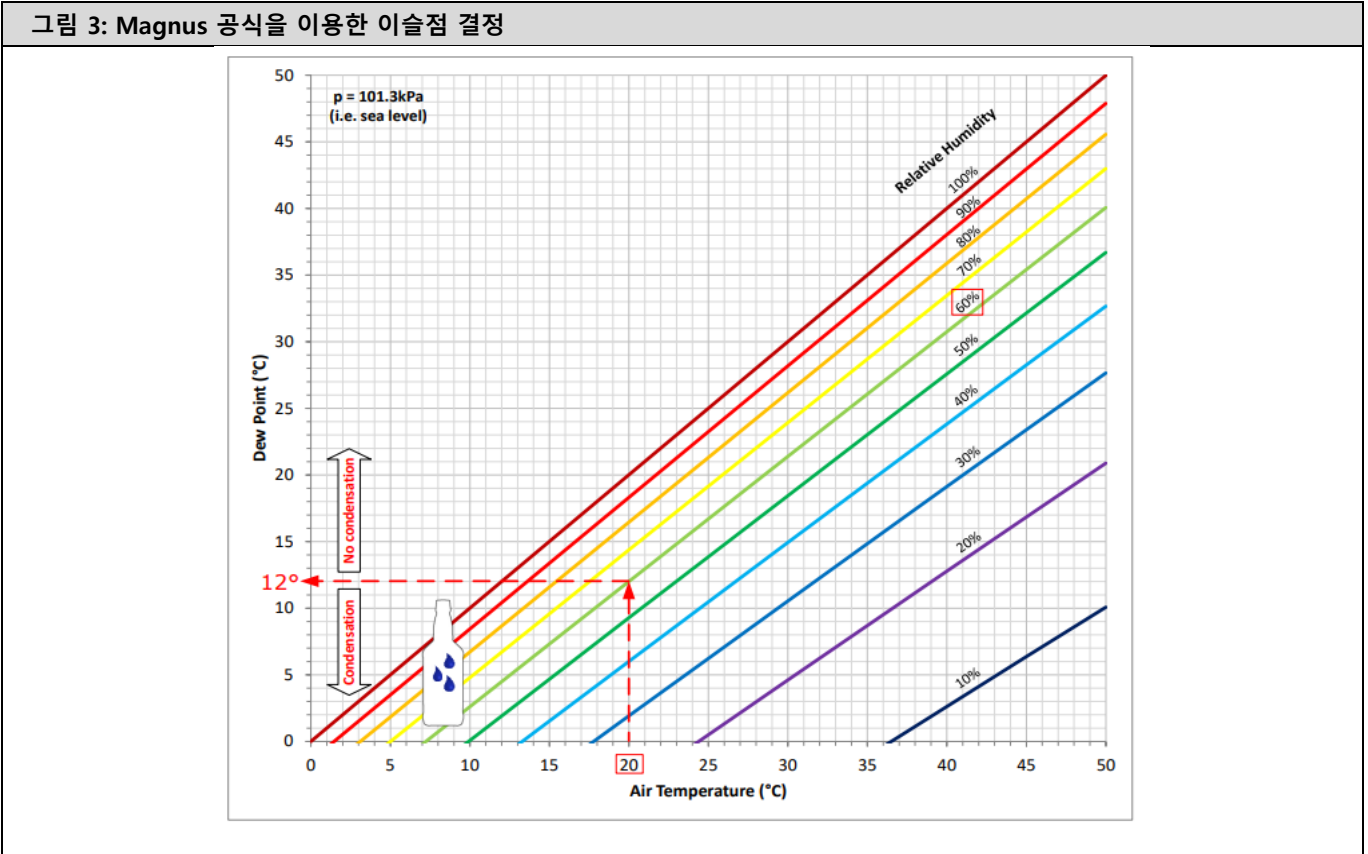
상대 습도(RH): 포화 증기 압력에 대한 수증기의 분압의 비율로, 통상 백분율[%]로 표시합니다.

절대 습도와 상대 습도는 상호 관련이 있으며 온도와 압력의 함수입니다. 센서를 통해 쉽게 측정이 가능하므로 대부분의 환경 및 제품 사양에서는 상대 습도를 사용합니다. 그러나 앞으로 설명하겠지만 물분자의 수가 일정하게 유지되더라도 습한 공기의 특정 양에 대한 상대 습도는 달라질 수 있습니다.

1.3 응축

공기 중에 존재하는 수증기가 기체에서 액체로 상태가 바뀌면 표면에 응축이(혹은 저온에서는 성애가) 발생합니다. 응축이 발생하는 온도를 이슬점이라고 하며 상대 습도에 따라 달라집니다.

그림 3 은 Magnus 공식 근사에 기초한 상대 습도, 공기 온도 및 이슬점 간의 관계를 보여줍니다. 특정 압력 및 습도에서 일정량의 공기(또는 물체)의 온도가 이슬점 아래로 떨어지면 해당 영역에서 응축이 발생합니다. 보다 구체적으로 말하자면 이 차트는 전체 조건에 따라 특정 공기량의 상대 습도가 100%가 되는 온도(이슬점)를 보여줍니다.



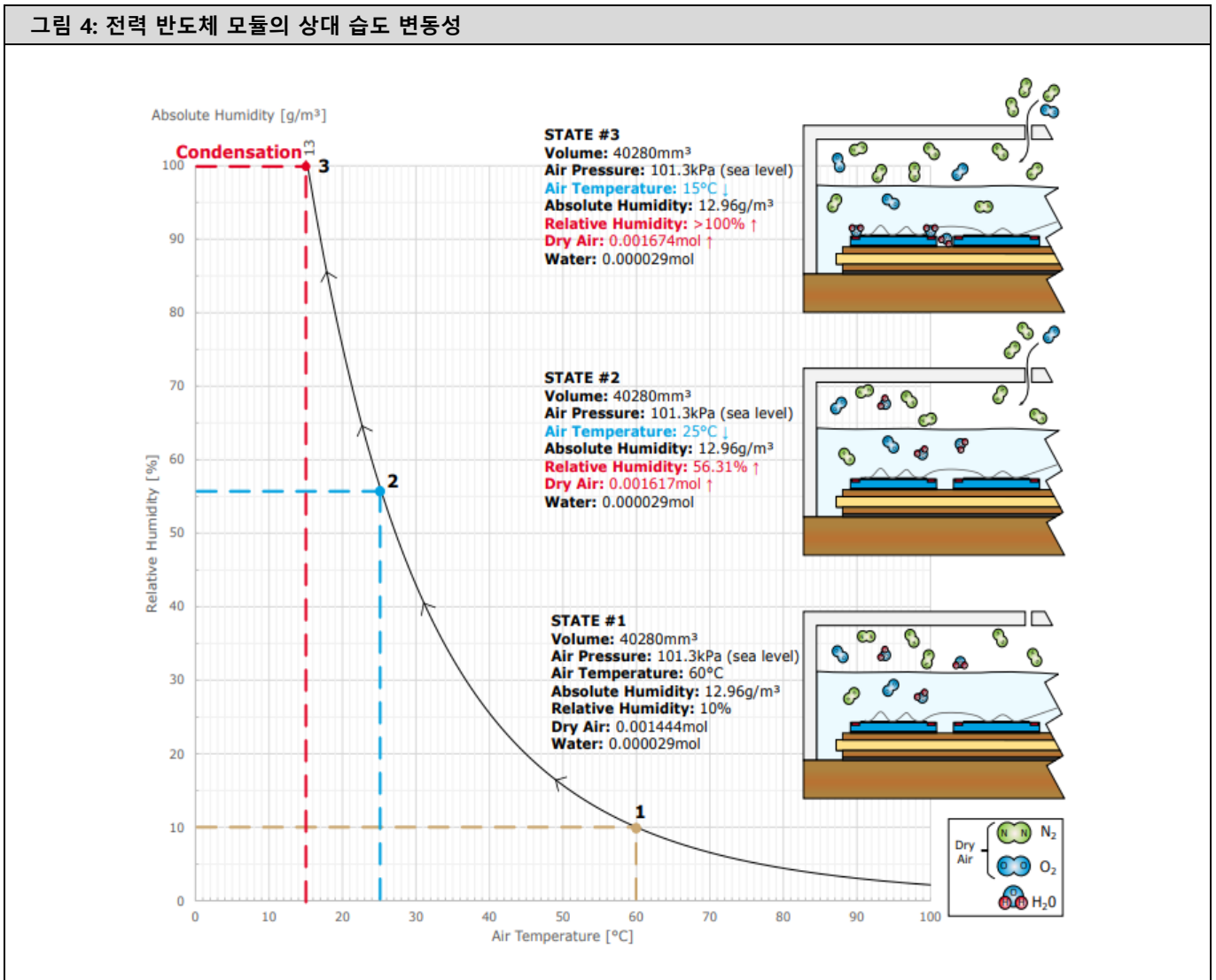
일반적인 예시로, 어떤 방의 공기 온도가 20°C 이고 측정된 상대 습도가 60%라고 가정해 보겠습니다. 냉장고에서 꺼낸 차가운 액체(예: 5°C) 한 병을 이 방안으로 가져오면 병 표면에 물방울이 응축됩니다. 차가워진 병은 차트에 표시된 이슬점(12°C) 바로 아래에 있는 공기를 냉각시킵니다. 병 주위의 공기가 100%의 상대습도에 도달했습니다. 실제로 이 환경에서 12°C 이하로 냉각된 공기 덩어리가 내부의 수분을 액체로 응축시킵니다.

이 효과는 전력 반도체 모듈 내부의 마이크로 환경(그림 1, ④)에서도 발생할 수 있습니다. IEC 기후도(climatogram)는 이러한 응축이 발생하는 시점을 계산하는 다른 방법 [4][8] 을 제공하며, 수증기의 양이 같더라도 상대 습도는 달라질 수 있음을 보여줍니다(그림 4). 가상 전력 반도체 모듈을 사용할 경우 다음과 같이 가정합니다.

1. 모듈의 부피(및 공기에 둘러싸인 영역)는 고정되어 있음($V_{State1} = V_{State2} = V_{State3}$)
2. 모듈은 투과성(n_{total} 은 가변적임)
3. 압력은 외부 환경의 지배를 받음($p_{State1} = p_{State2} = p_{State3}$)
4. 절대 습도는 고정되어 있음($AH_{State1} = AH_{State2} = AH_{State3}$; 부피가 일정하므로 n_{water} 이 일정함)

이 시나리오에서 온도가 낮아지면 이상기체법칙에 따라 수증기의 분압이 약간 감소합니다($p \cdot V = n \cdot R \cdot T$). 하지만 포화 증기 압력은 급격히 감소하며, 상대 습도는 이 두 값의 비율이므로 상대 습도는 증가합니다.

그림 4: 전력 반도체 모듈의 상대 습도 변동성

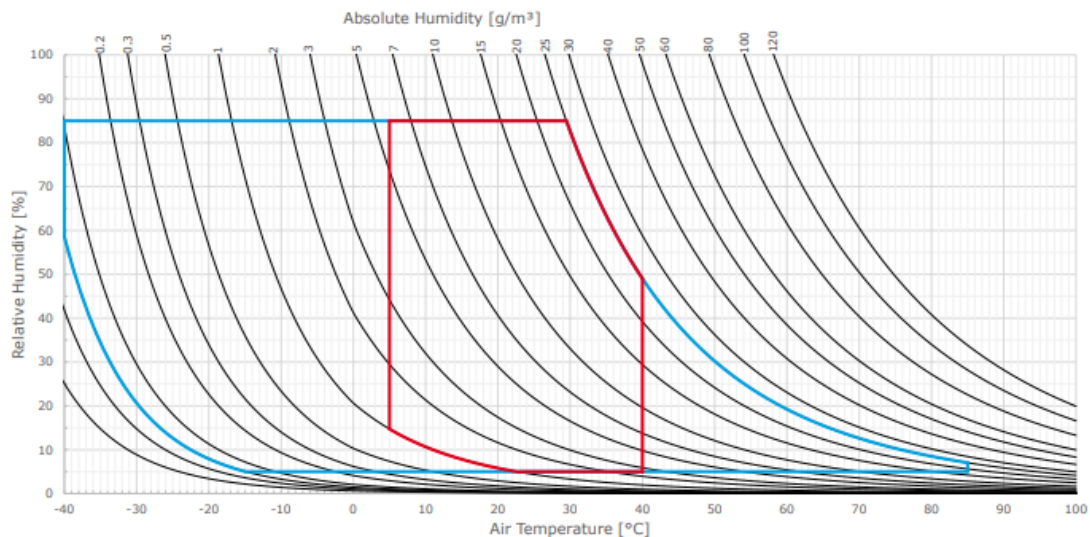


1.4 표준

현재 전력 반도체 모듈 주변에서 허용가능한 마이크로 환경을 명확히 정의하고 널리 쓰이는 표준은 없습니다. 전력 모듈 제조업체는 개별 매개변수(예: 상대 습도, 온도)에 대한 전력 모듈의 복원력을 테스트하지만 전체 환경 안전 작동 영역을 확실히 정의하기에는 미흡합니다. 대신, 모듈이 설치된 완제품 전기 장비의 제조업체는 허용되는 작동 매크로 환경(그림 1, ①, ②)을 명확히 정의하기 위해 앞서 언급한 IEC 60721-3-3 과 같은 표준을 이용하며, 제품의 내부 마이크로 환경이 응축 지점 및/또는 적합성 시험 한계치에서 너무 벗어나 있는지 여부를 확인하는 조치를 취해야 합니다(3.1 참조). 이 애플리케이션 노트에서는 이를 위한 지침을 제공합니다.

대부분의 전기 장비는 IEC 60721-3-3 기후 등급 3K22(기준 3K3) 내에서 작동하도록 설계되었습니다. 온도와 압력 범위 외에도 3K22 등급은 응축 발생 없이 허용 상대 습도 범위 5% ~ 85%를 제공합니다. 또한 절대 습도는 25g/m³ 로 제한됩니다. 3K22 범위는 5° ~ 40°C 의 허용 온도 범위만을 정의하지만, 일반적으로 더 큰 온도 범위(-40°C ~ 85°C)를 허용하여 결과적으로 그림 5 의 파란색으로 표시된 것처럼 작동 영역이 확장됩니다.

그림 5: IEC 60721-3-3 등급 3K22(빨강)에 따른 전기 장비의 허용 매크로 환경 및 확장 온도 범위(파랑)



2. 측정

상대 습도는 습도계를 이용하여 직접 측정할 수 있습니다. 최신 전자 산업 유형은 $\pm 2\%$ RH 의 정밀도로 보정이 가능한 용량성 또는 저항성 센서로 구성되나, 미보정 혹은 저렴한 상용 유형의 경우 $\pm 10\%$ 이므로 결과를 해석할 때 주의를 기울여야 합니다. 휴대용 데이터 로깅 유형은 통상 온도 센서와 결합되어 있고 "온도/습도 데이터 로거" 또는 "온도계"로 광고가 됩니다.

산업용 캐비닛의 내부 습도는 대개 외부 날씨에 의해 영향을 받기 때문에 내외부 상대 습도를 모두 며칠 또는 몇 주 동안에 걸쳐 측정하여 날씨와 작업 조건이 어떤 역할을 하는지 이해하도록 하는 것을 권장합니다.

3. 전력 전자 장치에 미치는 영향

3.1 습도

대부분의 산업용 전력 반도체 모듈은 도체 간에 전기 절연을 제공하는 경화 실리콘 기반 겔("소프트 몰드", "실-겔")에 캡슐화된 칩이 포함된 플라스틱 하우징으로 구성됩니다. 그러나 모듈은 완전 밀폐되지 않으므로 대기 가스가 전력 단자 등에 있는 작은 홀과 같은 공간을 통해 모듈에 침투할 수 있습니다.

소프트 몰드에는 확산 공기도 포함됩니다(그림 6). 따라서 물분자는 속도는 더 느리지만(예: 0.04mm/s @ 18°C, 1mm/s @ 100°C)물에 섞이는 것과 같은 방식으로 소프트 몰드를 통해 확산될 수 있습니다 [2]. 일단 물분자가 소프트 몰드 내부로 들어가면 다음과 같은 효과를 가져옵니다.

1. 차단 전압 감소: 방열판 온도가 감소하면 실리콘 내부의 확산된 공기의 수분량이 줄어 듭니다. 따라서 기판, 단자 및 반도체 표면과 같이 방열판에 열적으로 결합된 차가운 표면에 물분자가 쌓입니다. 또한 물분자는 쌍극자 특성으로 인해 하전된 반도체 표면으로 유인되어 전기장에서 정렬됩니다(그림 7R). 이렇게 되면 반도체 에지 종단 장치의 전기장선이 종단되어 차단 전압 강하가 발생할 수 있습니다.
2. 반도체 부식: 부식이 반도체 칩 패시베이션(반도체 칩의 표면을 보호하기 위한 코팅)에 미치는 영향은 잘 알려져 있습니다[7]. 전압과 습도가 증가되면 칩 에지 패시베이션에 부식이 발생하여 장애가 발생하고 반도체의 고장이 발생합니다. 반도체 부식은 전력 모듈 신뢰성 시험을 통해 조사하는 장기적 노화에 따른 결과입니다. 이러한 시험을 기본적으로 "고습도 고온 역바이어스"(H³TRB) 시험이라고 합니다. 다습한 환경에서 전력 컨버터의 확산에 따라 새로운 칩 세대의 공간 감소와 맞물려 이러한 시험에서 고전압(예: 정격 차단 전압의 80%)을 사용합니다. 고전압 시험을 "고전압 고습도 고온 역바이어스"(HV-H³TRB) 시험이라고 합니다.

유감스럽게도 이러한 결과로 발생하는 오류는 보통 심각하여 손상된 모듈만 검사해 습도가 근본 원인인지 결정적으로 파악하기가 매우 어려울 수 있습니다. 장애 발생 시 시스템의 작동 조건을 관찰하여 다음과 같은 습도로 인한 고장의 징후를 파악해야 합니다.

- 무부하 또는 저부하 상태에서 고장
- 전압이 인가된 비-스위칭(non-switching) 회로 고장(예: 브레이크 초퍼, UPS 유닛의 배터리 충전기, 태양열 부스터)
- 아침 또는 저녁에 발생하는 장애
- 시운전 중이나 장기 가동 중단 후 시동 중 발생하는 장애

그림 6: 실리콘 겔로 확산되는 물분자

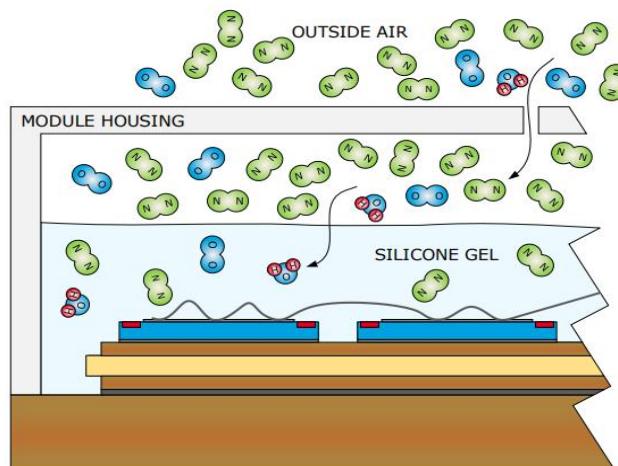
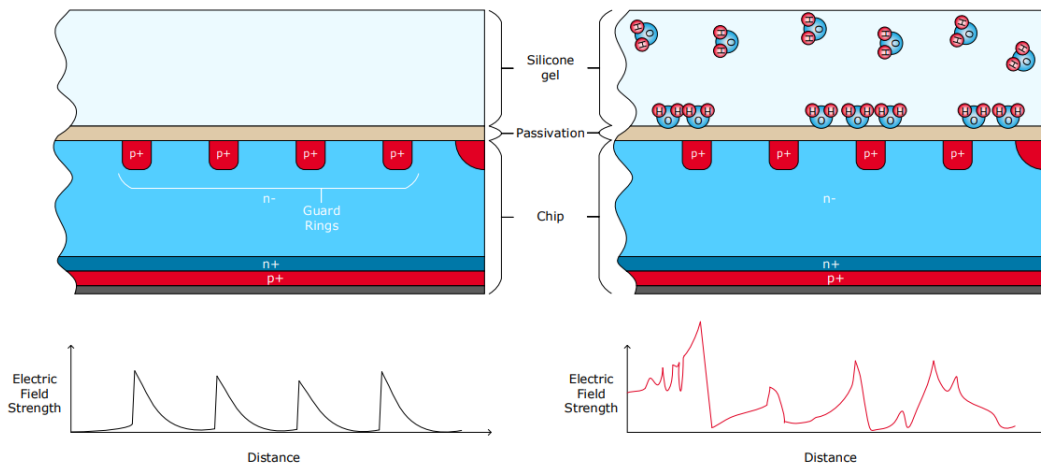


그림 7: 에지 종단의 전압 구배 파열(disruption)

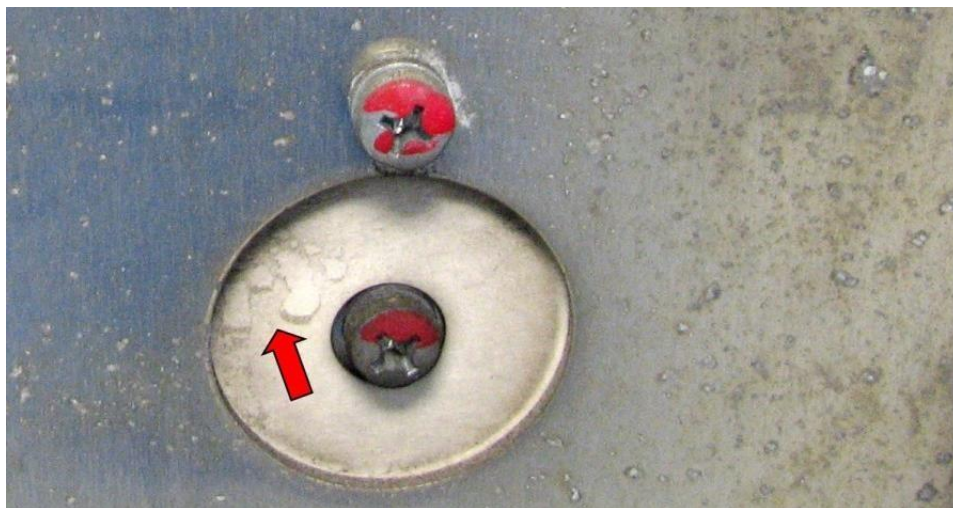


3.2 응축

수증기가 액체로 응축되면 전자 장치에 미치는 영향이 훨씬 더 분명해집니다. 방열판에 물방울이 형성되면 전원 모듈 내부에서 응축이 발생하고 있다는 표시일 수 있습니다. 장치가 작동 중이지 않을 때 물이 증발할 수 있고 어떠한 징후도 보이지 않을 수 있어 가능하면 작동 중에 응축 여부를 점검해야 합니다.

라미네이트 된 DC 링크 버스 플레이트와 같은 상도체의 경우 액체가 절연체의 전압 저항을 저해할 수 있습니다. 특히 오염된 표면에 물 자국 등이 과거 응축의 증거가 될 수 있습니다(그림 8).

그림 8: DC 링크 어셈블리의 절연체에 액체가 존재했다는 증거



4. 원인

4.1 기후

습도는 자연적으로 발생하는 현상으로 매크로 수준에서 위치와 날씨에 따라 달라집니다. 일반적으로 지구상의 특정 지역은 다른 지역에 비해 습도가 더 높은 경향이 있다고 알려져 있습니다(예: 사막과 열대). 하지만 비교적 온화한 기후에서도 고도, 수역과의 근접성 및 계절적 영향에 따라 습도가 높아질 수 있습니다.

4.2 운송/보관

장거리로 운송되거나 장기간 보관 중인 전력 전자 장치는 포장재 내부에서 수증기가 발생하여 전압이 인가되면 심각한 장애가 이어질 수 있습니다. 소형 어셈블리의 경우 건조제(5.7)를 함유한 진공 밀봉 알루미늄 복합재 백을 통해 습도에 대한 노출을 줄일 수 있습니다. 또한 시운전 절차(5.3)를 통해 전력을 공급하기 전에 상대 습도를 줄일 수 있습니다.

4.3 상대 공기 압력의 변화

특정 위치에서의 공기 압력의 영향은 매크로 환경에서 일반적인 온도 및 습도에 이미 반영되므로 대개 각 애플리케이션에서 대기 압력은 무시될 수 있습니다. 그러나 외부 공기 흐름에 대해 밀폐된 외함(예: Ip65)의 경우, 내부 공기 압력의 변화(통상 온도 변화로 인한) 발생 시 외함 내부의 상대 습도가 증가할 수 있습니다. 이 경우 다음이 중요합니다.

1. 외함 내부의 수증기가 최소화되었는지 혹은 수증기가 포함되었는지 여부(5.7 참조)
2. 외함 내부의 구성요소들의 온도가 이슬점 아래로 떨어져 응축을 유발하는지 여부

밀폐된 외함의 경우 환기구를 사용하면 공기 압력 차이가 줄어들 수 있습니다(5.6 참조).

4.4 상대 공기 온도의 변화

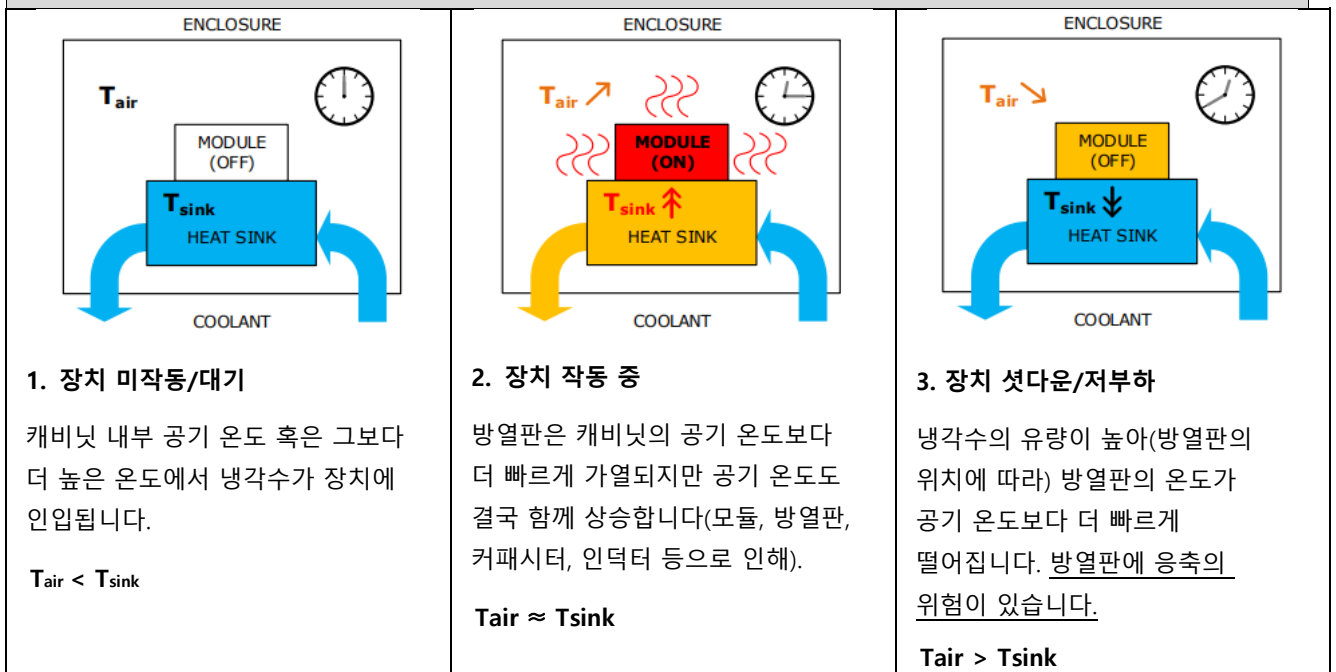
4.4.1 작동 지점

장치 내 온도 불균형을 유발하는 주요 원인 중 하나는 시스템 자체의 작동입니다. 시스템의 전기적 작동에 따라 구성 요소들의 온도와 내부 캐비닛 공기 온도가 상승합니다. 갑작스러운 작동 변화로 인해 방열판이 외함의 공기 온도보다 훨씬 빠르게 냉각되어 방열판 온도가 이슬점 아래로 떨어지는 상황이 발생할 수 있습니다. 따라서 최대 전력으로 작동하는 상태에서 다음과 같은 다른 모드로 변경되는 경우 이를 인지해야 합니다.

1. 가벼운 부하 또는 무부하
2. 대기 모드
3. 예기치 못한 작동 중단(장애로 인해)

이 문제가 발생하는 상황에 대해서는 그림 9 에서 설명하고 있습니다. 참고로 이러한 위험은 낮과 밤이 바뀌는 과정에서 공기 온도가 떨어질 때도 발생할 수 있습니다. 저녁에 공냉식 방열판의 유입부 공기 온도(외부 주변 공기 유입)가 떨어지면 방열판 냉각되어 온도가 이슬점 아래로 떨어질 수 있습니다(그림 3 을 통해 계산).

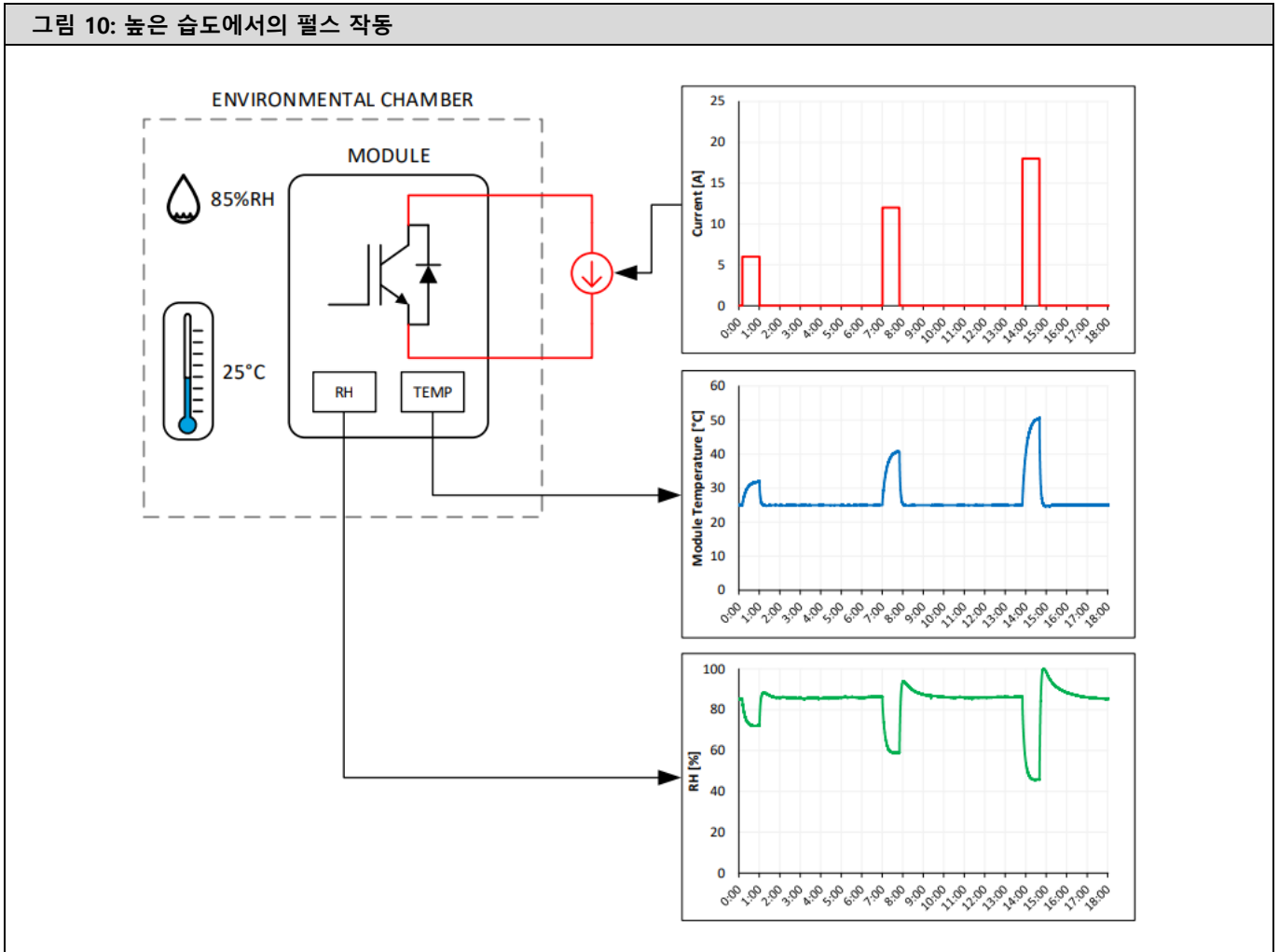
그림 9: 시스템 작동으로 인해 발생할 수 있는 온도 차이



4.4.2 펄스 작동(모듈)

SEMİKRON-DANFOSS 는 상대 습도 센서가 칩 근처(소프트 몰드 아래) 전원 기판에 장착된 특수 제작된 모듈을 사용하여 시험을 실시합니다. 이 모듈(강제 공랭식 방열판에 장착됨)을 공기 온도(25°C)와 상대 습도(85%)가 고정된 챔버(그림 10)에 배치하였습니다. 습도 센서에 가장 가까운 다이오드에 고정 기간의 전류 펄스를 인가한 후 냉각 기간을 두어 모듈이 초기 조건(온도 및 습도)으로 돌아갈 수 있도록 하였습니다. 다양한 규모의 여러 펄스를 통해 다양한 온도 변화로 인한 영향을 조사하였습니다.

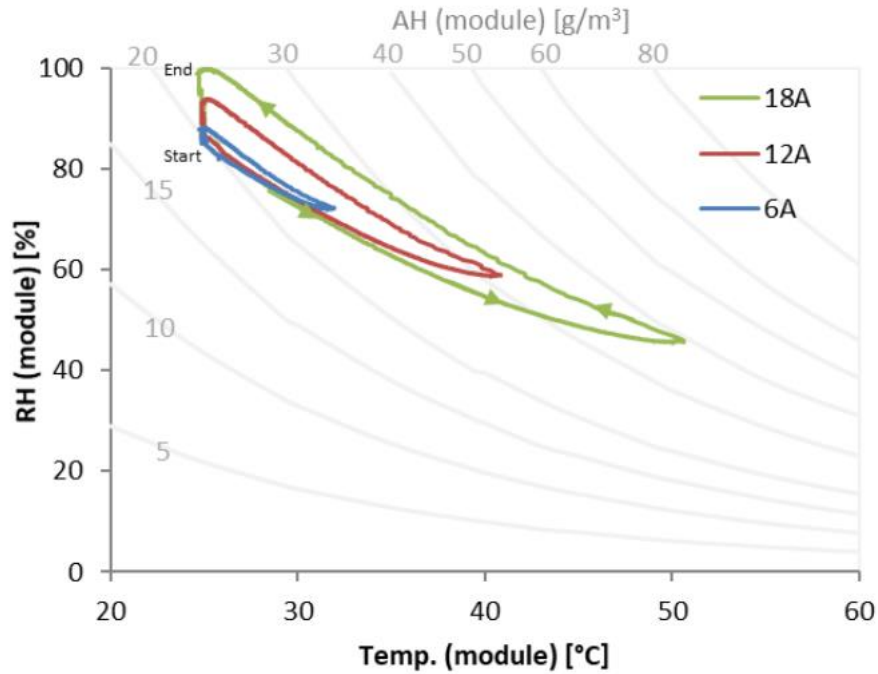
그림 10: 높은 습도에서의 펄스 작동



이 시험의 결과는 다음 3 개의 그림에 정리되어 있습니다.

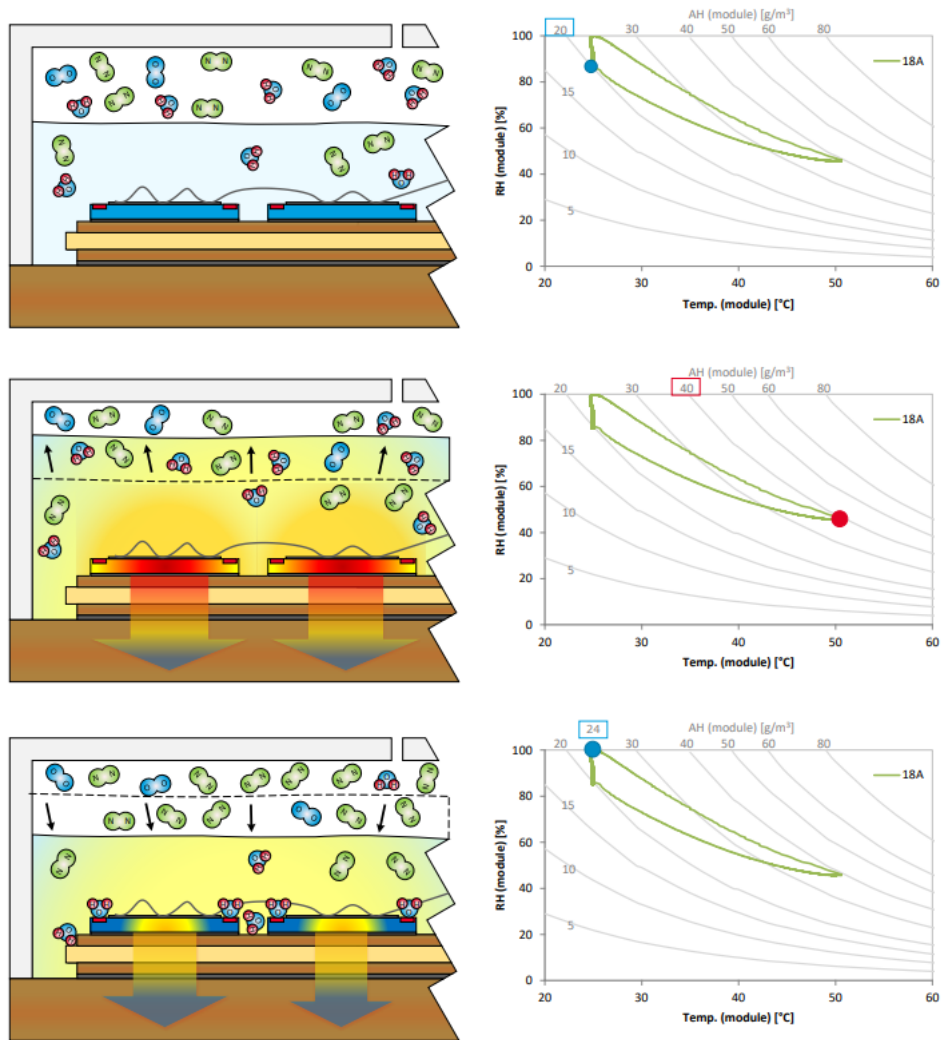
그림 11 에서 보여주듯이 인가된 전원 펄스에 의해 장치가 가열되면 상대 습도가 떨어집니다. 장치가 냉각되면 상대 습도가 증가하고 초기값을 오버슈팅 하게 됩니다. 또한 RH 에서 오버슈트의 양은 온도 변화에 따라 달라집니다. 초기 상대 습도가 높으면(예: RH = 85%), 이러한 오버슈트가 모듈 내부의 응축(RH = 100%)으로 이어질 수 있습니다.

그림 11: 다른 3 가지 전류 펄스(25°C)에서 습도-온도 반응



부하 전류에 따라 소프트 몰드가 가열 및 팽창하여(그림 12) 더 많은 수증기를 흡수합니다. 소프트 몰드가 따뜻할수록 팽창 및 수증기 흡수가 더 증가합니다. 이러한 효과는 그림 11 에서도 확인할 수 있습니다. 여기서 소프트 몰드 내부의 절대 습도는 12A(30g/m³) 또는 6A(25g/m³)에서 보다 18A(40g/m³)의 부하 전류에서 더 큼니다.

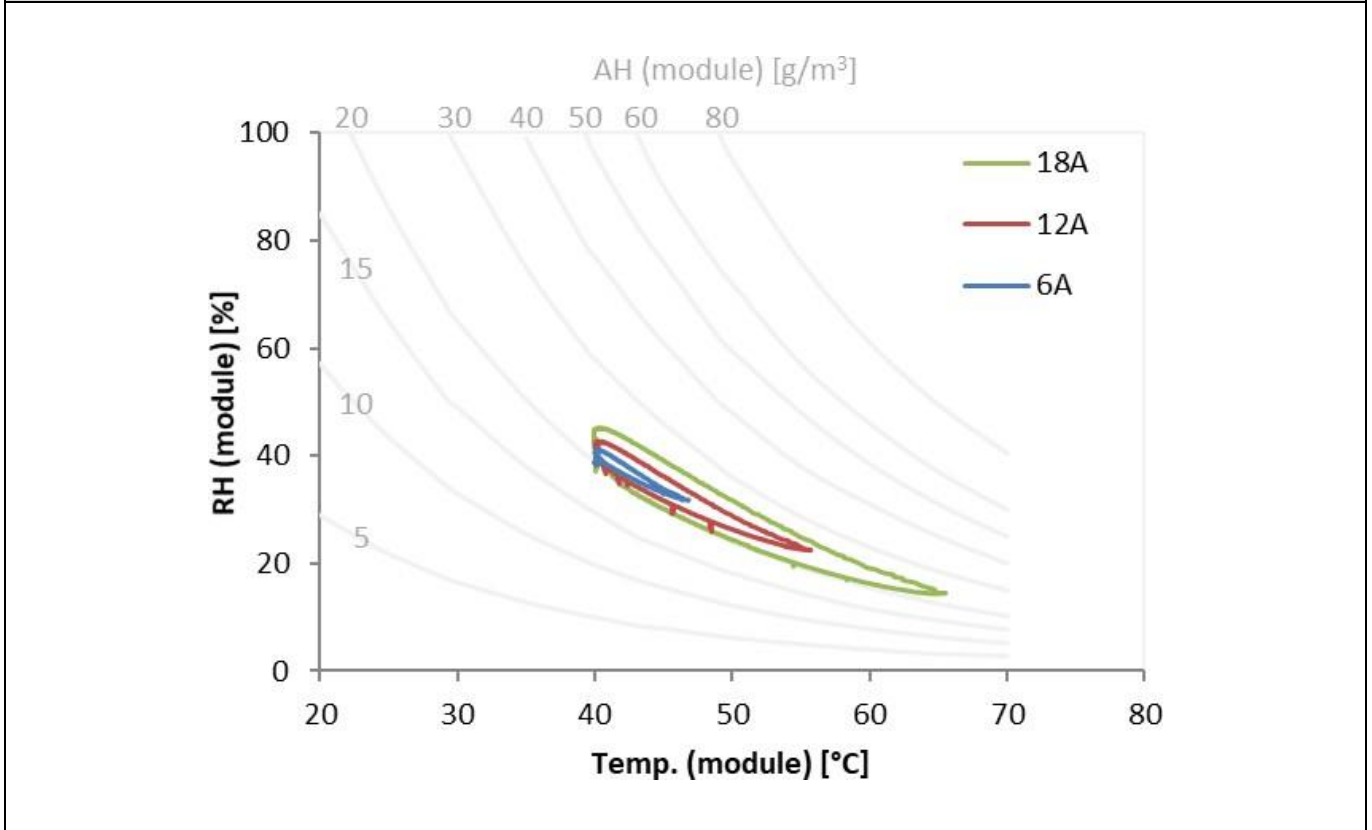
그림 12: 가열 후 수분 보유



전력 모듈에서 열 흐름 경로는 칩에서 방열판까지 가장 효율적으로 설계되었습니다. 이 경로는 열 시간 상수가 특징입니다. 열 시간 상수가 소프트 몰드 확산 상수(소프트 몰드가 환경에 수분을 방출하는 속도)보다 훨씬 작게 칩을 생각하면 칩이 이슬점 아래로 떨어질 위험이 있습니다 (1.3 에서 설명한 차가워진 병과 마찬가지로). 즉, 칩이 주변의 소프트 몰드에 비해 더 빨리 냉각됩니다. 결국, 소프트 몰드 내 여분의 수분은 환경으로 방출되어 모듈의 내부 수분/온도와 기후 챔버의 외부 수분/온도 간의 평형이 이루어집니다.

그림 13 은 그림 11 과 동일한 시작 절대 습도를 갖지만 시작 온도는 40°C 이고 상대 습도는 40%입니다. 각 부하 전류의 최종 온도에서 절대습도는 동일합니다. 하지만 부하 전류와 상관 관계가 있는 습도의 오버슈트가 여전히 존재합니다. 오버슈트는 그림 11 에 비해 작습니다. 결론적으로, 운반/전원 차단 후 작동 개시 전에 전력 모듈을 가열(방열판 가열을 통한)하는 편이 유리합니다. 이렇게 하면 작동 시 상대 및 절대 습도가 낮아지고 수명이 연장됩니다.

그림 13: 다른 3 가지 전류 펄스(40°C)에서 습도-온도 반응



4.4.3 캐비닛 내 온도 차이

작동 지점(4.4.1) 또는 캐비닛 설계(6)로 인해 캐비닛 내 특정 위치(콜드 스팟)에서 응축이 발생할 수 있습니다. 경험상 다음 위치에서 그 위험이 가장 높은 것으로 나타났습니다.

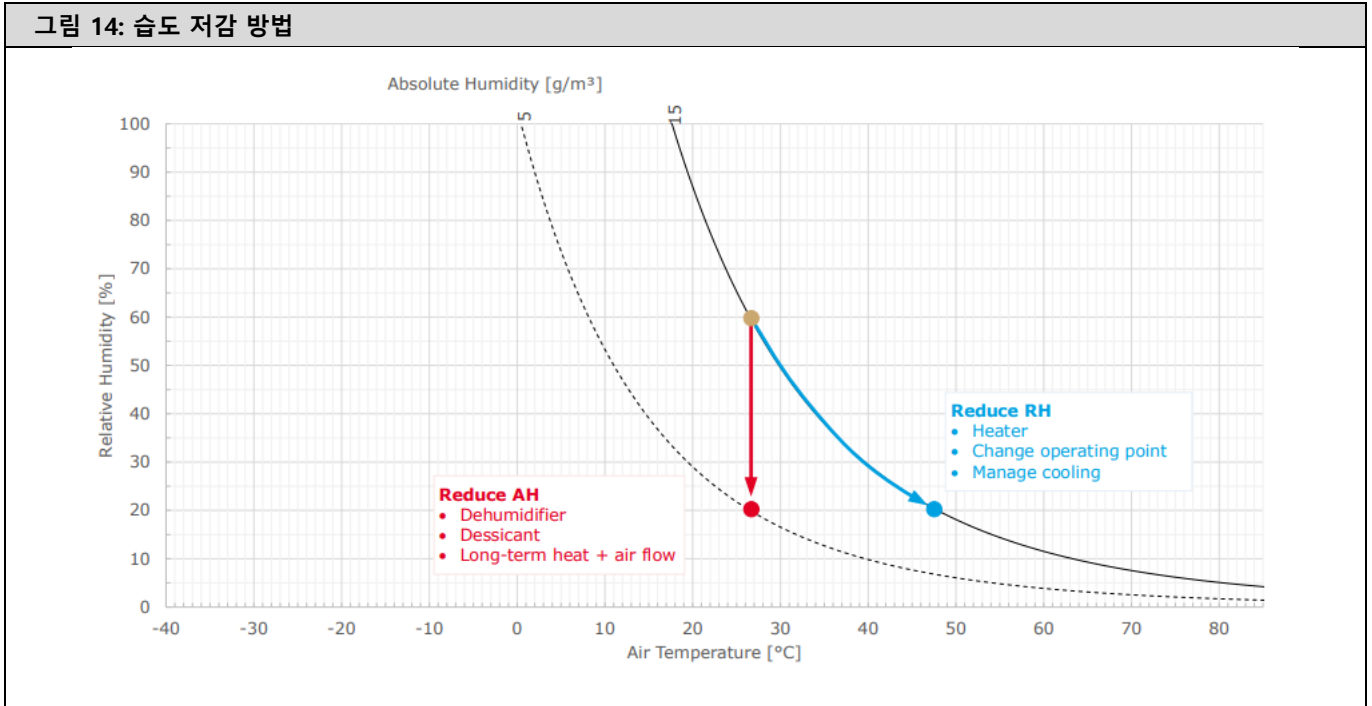
1. 외부 공기 흡입구 포트
2. 냉각수 유입구 매니폴드 및 배관
3. 캐비닛의 외(금속) 벽
4. 방열판 및 열적으로 결합되는 각종 구성 요소
5. 캐비닛의 다른 부분에 비해 공기 흐름이 낮은 영역
6. 열 시간 상수가 긴 대형(밀도가 큰) 금속 구성요소

캐비닛 천장과 벽의 응축이 전력 모듈, 전자 장치 또는 버스 바에 떨어지면 누전의 원인이 될 수 있습니다.

5. 저감 기술

외함 내부의 습도 및/또는 응축을 줄이려면 대략 두 가지 방법이 있습니다(그림 14).

1. 절대 습도 저감: 제습기, 건조제 또는 장기간의 열 및 공기 흐름을 통해 수증기를 제거(건조시킴)
2. 상대 습도 저감: 가열을 통한 공기 온도 상승(전용 히터 또는 시스템 작동 지점)
 - a. 개별 구성요소 온도(예: 방열판)를 조절하여 이슬점 아래로 떨어지지 않도록 방지



확실히 캐비닛 설계 과정에서 습도 문제를 해결하는 것이 가장 좋지만(6 참조), 아래의 저감 기술 중 몇 가지를 설치 후 적용할 수 있습니다. 냉각수(공기 또는 액체) 관리 및 부하 조건 제거가 현장 장치에 히터와 제습기를 설치하기에 앞서 비교적 저렴한 방법입니다.

5.1 팬 제어장치(공냉식 시스템)

강제 공냉식 시스템의 경우 유입되는 공기의 속도를 달리하여 방열판 온도를 조절합니다. 방열판의 온도를 모니터링하고 팬 속도를 조정하여 최저 온도에 미치지 못하는 공기가 방열판 핀 위로 유입되지 않도록 합니다.

이 방법을 적용하려면 모듈과 가까운 방열판 온도(아니면 더 좋은 것은 전력 모듈 내부의 센서)를 모니터링하여 설정점을 선택합니다. 설정값 아래에서는 팬이 완전히 꺼집니다(아니면 최저 속도로 작동). 설정값에 도달하면 팬이 작동하기 시작하고 온도가 높아지면 속도가 증가합니다. 고부하에서 팬은 최대 속도로 구동합니다. 장치가 최대 부하에서 갑자기 출력을 줄이는 경우(예: 오류), 4.2 에 설명된 높은 습도 동작을 방지하려면 팬을 즉시 스위치 오프해야 합니다. 이러한 조절 방식은 비용이 많이 들지만 반도체와 팬에 미치는 응력이 작다는 장점이 있습니다. 또한 컨버터 부하가 낮을 때 팬이 소비하는 전력을 줄여 전체 시스템 효율을 높일 수 있습니다.

어떤 사용자들은 방열판의 바이메탈 스위치를 사용하여 간단한 온/오프 팬 제어("충돌" 또는 히스테리시스 발생)를 구현합니다. 이럴 경우 특히 모터 시동 커패시터가 있는 AC 팬의 경우 스위칭에 의해

팬이 빠르게 노후화될 수 있다는 단점이 있습니다. 더 중요한 것은 정확한 제어 루프 결어로 "완전 켜짐" 및 "완전 꺼짐" 공기 흐름 사이에서 빠른 스위칭을 통해 온도 변동성이 증가하고 반도체 모듈에서 노후화가 추가로 발생합니다. 가령, 정선 온도 변화가 불과 10°C 정도라도 모듈 전력 사이클링 용량은 4-5 배 감소합니다. 따라서 이러한 제어 방법은 권장하지 않습니다.

5.2 냉각수 온도 제어(수냉식 시스템)

방열판 표면 온도가 절대 이슬점 아래로 떨어지지 않도록 냉각수 온도가 충분히 높아야 합니다. 이상적으로는 냉각수 온도가 내부 캐비닛 주변 온도보다 높아야 합니다. 냉각수 온도 제어와 관련하여 두 가지 방법을 제시합니다(그림 15).

1. 3 방향 온도 조절 밸브 사용

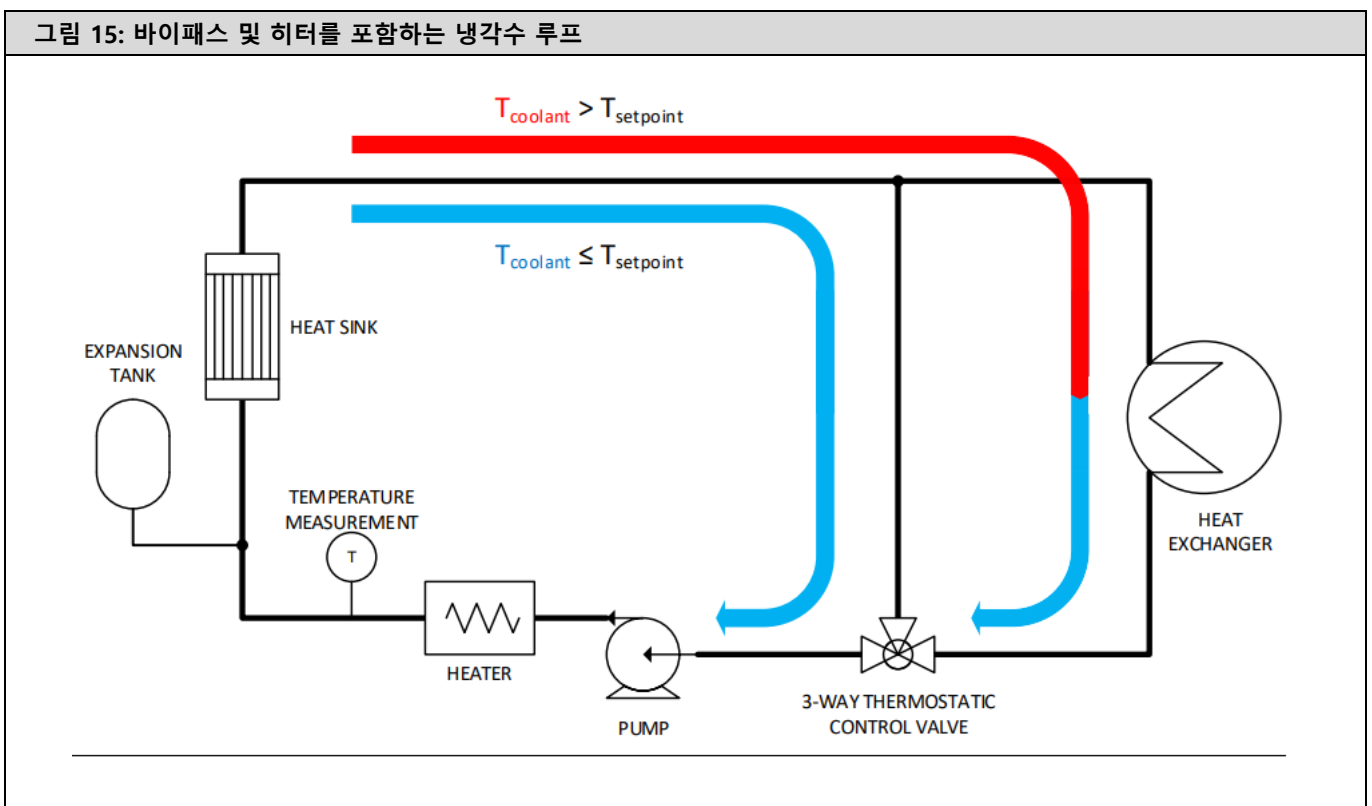
저온(일반적인 설정값 범위: 25°C ~ 30°C)에서 냉각수는 열 교환기가 아닌 바이패스 루프를 통해 흐릅니다. 설정 값에 도달하면 밸브가 열리기 시작하고 온도를 일정하게 유지하려고 합니다. 고전력에서는 냉각수가 모두 열 교환기를 통해 흐릅니다.

2. 냉각수 히터 사용

아래의 경우 냉각수 가열이 필요합니다.

- a. 시운전 후, 그리고 전압 인가 전에 오랜 시간 유휴 상태 후 작동을 재개할 때 전원 모듈 내부 또는 근처에서 국지적 상대 습도를 감소시키기 위한 경우
- b. 내부 캐비닛 공기 온도가 방열판보다 높을 경우 방열판의 응축을 방지하기 위한 경우

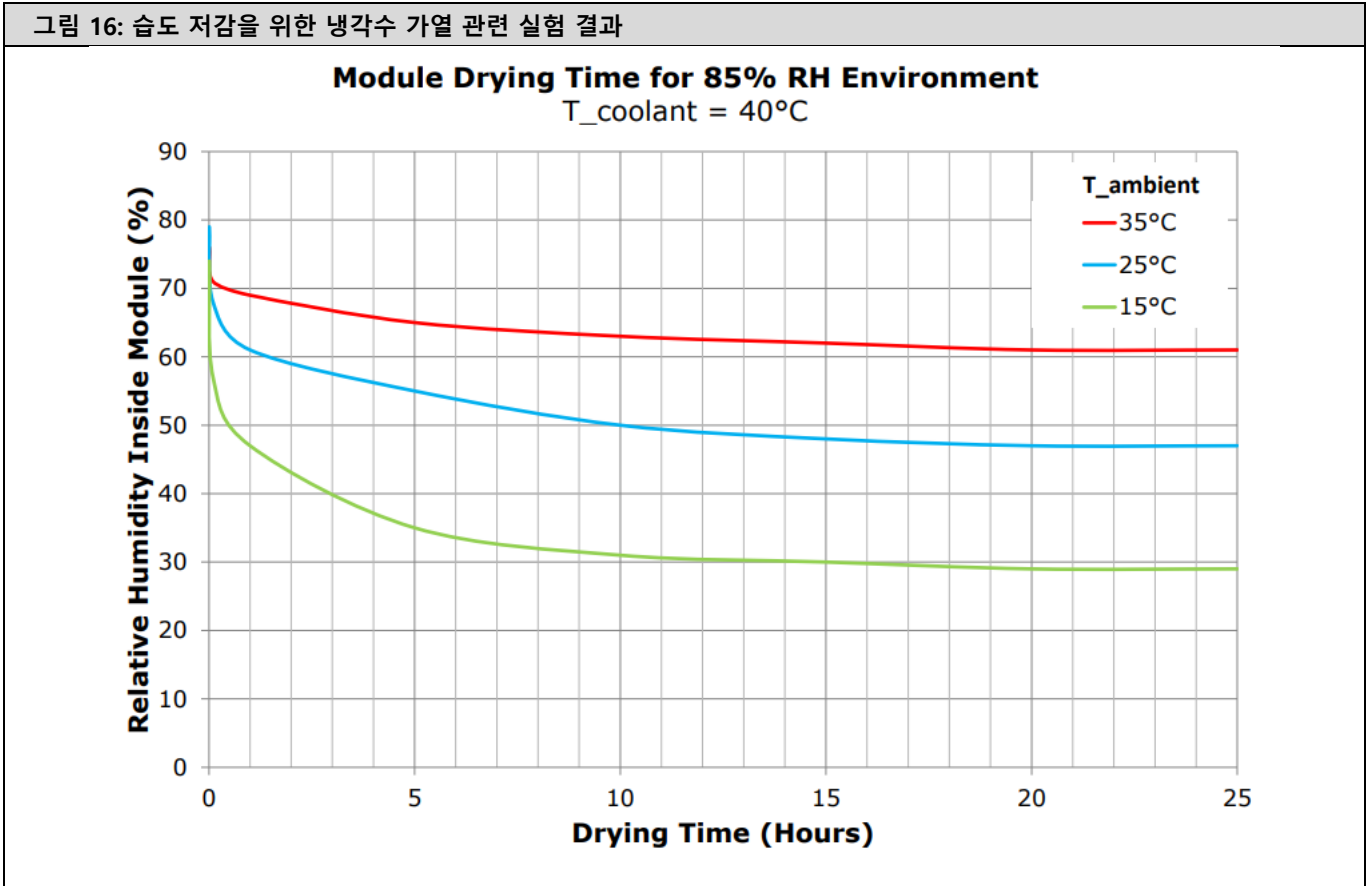
효율적인 열 교환기 사용 및/혹은 최대 전력으로 작동 시 주입구 온도는 보통 주변 온도보다 몇 도 높습니다. 부하가 낮고 습도가 높은 내부 캐비닛 온도에서는 응축을 막기 위해 냉각수 온도를 더 높여야 할 수 있습니다.



5.3 시동 전 예열 절차

상대 습도가 85%인 환경에서 전력 모듈을 사용한 실험 결과 냉각수 온도가 주변 공기 온도보다 최소 5°C 이상 높은 경우 모듈 내부의 상대 습도가 감소되는 것으로 나타났습니다.

그림 16 은 주변 온도가 다른 고습도 환경에서 따뜻한 냉각수(40°C)를 적용하여 모듈 내부의 실리콘 겔 아래 습도를 측정한 시험 결과를 정리한 것입니다.



특히 이 실험에서는 상대 습도의 정상상태 값은 24 시간 안에 도달하며 그 특징은 거의 역 지수 곡선을 따릅니다. 위 시험 결과와 실제 고객 애플리케이션을 통한 경험을 바탕으로 다음 사항을 권장합니다.

1. 전력 전자 모듈의 초기 작동(시운전) 전에 운반 또는 보관 과정에서 높은 습도에 노출될 위험이 있는 시스템의 경우, 최저 온도가 25°C 이고 주변 공기 온도보다 5°C 이상 높은 냉각수를 고전압(>50VDC) 적용 전 24 시간 동안 사용해야 합니다.
2. 8 시간 이상 작동하지 않은 시운전 대상 시스템(실외 또는 습도가 높은 환경에 설치)의 경우, 고전압(>50VDC) 적용 전 1 시간 동안 주변 공기 온도보다 5°C 이상 높은 냉각수를 사용해야 합니다.

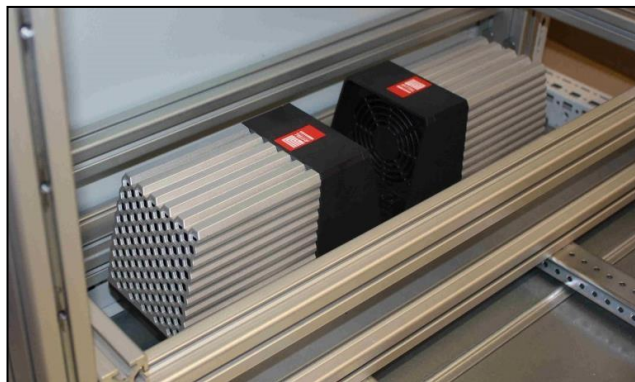
5.4 캐비닛 히터

앞서 설명한 대로 고정 절대 습도에서 주변(건조한) 공기 온도가 상승하면 상대 습도가 감소합니다. 이러한 용도의 산업용 캐비닛 히터(그림 17)는 시중에서 구입이 가능합니다. 이러한 장치는 저항성 가열 소자, 온도조절장치 및 간혹 공기 순환 팬으로 구성되며 다음과 같은 기능을 수행합니다.

1. 초기 시운전 후 캐비닛 내부의 상대 습도를 낮춥니다.
2. 통풍구를 통해 캐비닛에서 습한 공기를 배출시킵니다.
 - a. 참고로 물 분자가 여전히 존재하므로 열을 가해도 공기가 스스로 "건조"되지 않으므로 공기 흐름이나 기타 수단(예: 건조)을 통해 시스템에서 제거해야 합니다.
3. 내부 캐비닛 벽/천장에 응축이 발생하지 않도록 합니다.
4. 외부 주변 온도가 더 높은 경우 내부 금속 부품에 응축이 발생하는 것을 막습니다.
5. 작동 전에 전기 캐비닛을 예열하고(최저 작동 온도에 도달하지 못한 경우) 주변 온도가 낮은 상황에서 작동 중에 전자 장치를 보호합니다.
6. 대기 모드에서 작동 부품을 주변 온도보다 높게 유지합니다.

온도 설정 값(예: 온도조절장치)으로 간단한 ON/OFF 작동이 가능하지만, 습도조절기로 히터를 제어하여 캐비닛 내부의 공기 온도가 이슬점 아래로 떨어지지 않도록 할 수 있습니다. 히터는 캐비닛 하단에 배치하고 외부 온도가 낮을 때 정의된 수준으로 내부 주변 온도를 가열할 수 있도록 전원이 충분해야 합니다.

그림 17: 2000mm x 800mm x 600mm 캐비닛 하단에 설치된 800W 히터 2 개



5.5 제습기

가장 직접적으로 습도를 줄이는 방법은 제습기를 이용해 공기 중 수분을 제거하는 것입니다. 제습기는 습한 공기를 강제로 냉각시키는 코일로 이루어져 있습니다. 공기 중의 습기가 코일에 응축되어 시스템에서 제거 혹은 배출됩니다. 산업용 캐비닛 제습기는 상용 제품과 비교해 다음과 같은 차이가 있습니다.

1. 사전 정의된 공기량을 건조하는 컴팩트한 크기
2. 캐비닛 외부로 수분을 바로 배출하기 위한 응축수 배수 호스 또는 펌프
3. 제어 또는 캐비닛 습도/온도 제어기와 상호작용 기능을 위한 내부 온도조절장치/습도조절기
4. 사용 가능한 제어 전력을 공급하는 저전압 작동(예: 24VDC)
5. 연속 작동 및 높은 사이클 속도를 위한 더욱 견고한 구조
6. 장착 부품(예: DIN 레일, 브라켓)

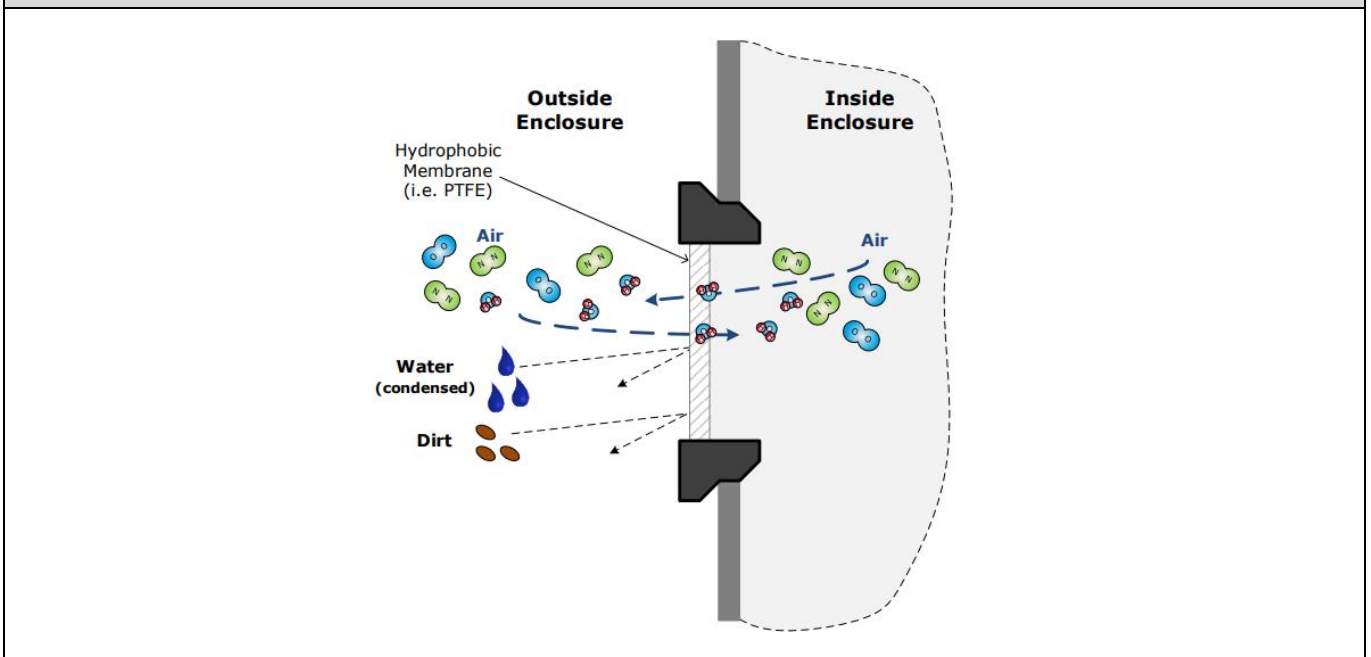
제습기는 대개 캐비닛 하단 및 측면에 장착되며 응축수 호스가 벽 또는 바닥을 통해 응축수를 외부로 배출시킵니다. 내부 캐비닛 팬을 통하거나 내부 제습기 팬을 장착하여 제습기를 통해 공기가 순환하는지 확인해야 합니다.

제습기는 시스템에 비용이 많이 드는 추가 장치라 볼 수 있지만 다습한 환경에 설치된 고전력(500kW +) 시스템이 총투자 비용에서 차지하는 비율은 작으며 습기로 인한 고장(폭발) 비용은 그에 비해 훨씬 높습니다.

5.6 통풍구

압력이 균일해야 하는 소형 밀폐 외함의 경우에는 특수 스펀지 또는 나사형 통풍구를 사용할 수 있습니다 [5]. 이러한 통풍구는 반투과성 소수성 막을 포함하고 있어 물방울과 기타 오염을 차단하면서 수증기가 통과할 수 있도록 합니다(그림 18). 이러한 통풍구는 수증기가 통과할 수 있으므로 절대 습도를 낮추지는 않는다는 점을 이해하는 것이 중요합니다. 그러나 통풍구는 압력 불일치가 발생하여 외함 내부의 상대 습도가 증가하지 않도록 하는 것이 중요합니다.

그림 18: 통풍구 플러그 작동



5.7 건조제

건조제는 공기에서 수분을 흡수하여 저장하는 흡습성 물질입니다. 일반적으로 건조제는 실리카 겔(또는 점토와 같은 다른 천연 물질)로 구성되며, 수분이 함유된 공기가 통과할 수 있는 투과성 막으로 포장됩니다. 건조제가 수증기를 포집하기 때문에 용량이 제한되어 결국 포화상태가 됩니다. 이런 이유 때문에 건조제는 통상 잔류 수증기 포집을 위해 밀폐 용기의 운송 중에만 사용됩니다. 개방형 시스템에서는 건조제가 빠르게 포화 상태가 되어 그 효과가 사라집니다. 대부분의 실리카 겔 건조제는 포집된 수분의 양을 어느 정도 시각적으로 표시합니다(예: 건조한 경우 파란색, 수분이 있는 경우 분홍색). 건조제는 가열하여 포집된 수분을 배출시킨 다음 재사용이 가능합니다.

5.8 DC 링크 전압 제거

3.1 에서 설명한 바와 같이 전압이 인가되면 반도체 경화의 장기적 부식을 가속화합니다. 많은 전력 전자 시스템은 장시간 대기 작동 모드가 있으며 이때 DC 링크에 고전압이 존재하지만 시스템은 전력을 처리하지 않습니다. 이러한 애플리케이션의 경우 시스템이 대기 모드일 때 DC 링크를 방전하면 이러한 부식 메커니즘이 존재할 수 있는 고습도 환경에서 수명이 향상될 수 있습니다. 이때 대개 접촉기를 열고 방전(및 사전 충전) 프로세스를 진행해야 하기 때문에 이 기술은 시스템 설계 과정에서 고려해야 하며 시스템 설계 후에는 구현이 힘들 수 있습니다(예: 반복적인 사이클링으로 인해 다른 구성 요소에서 추가적인 마모가 발생할 수 있음)

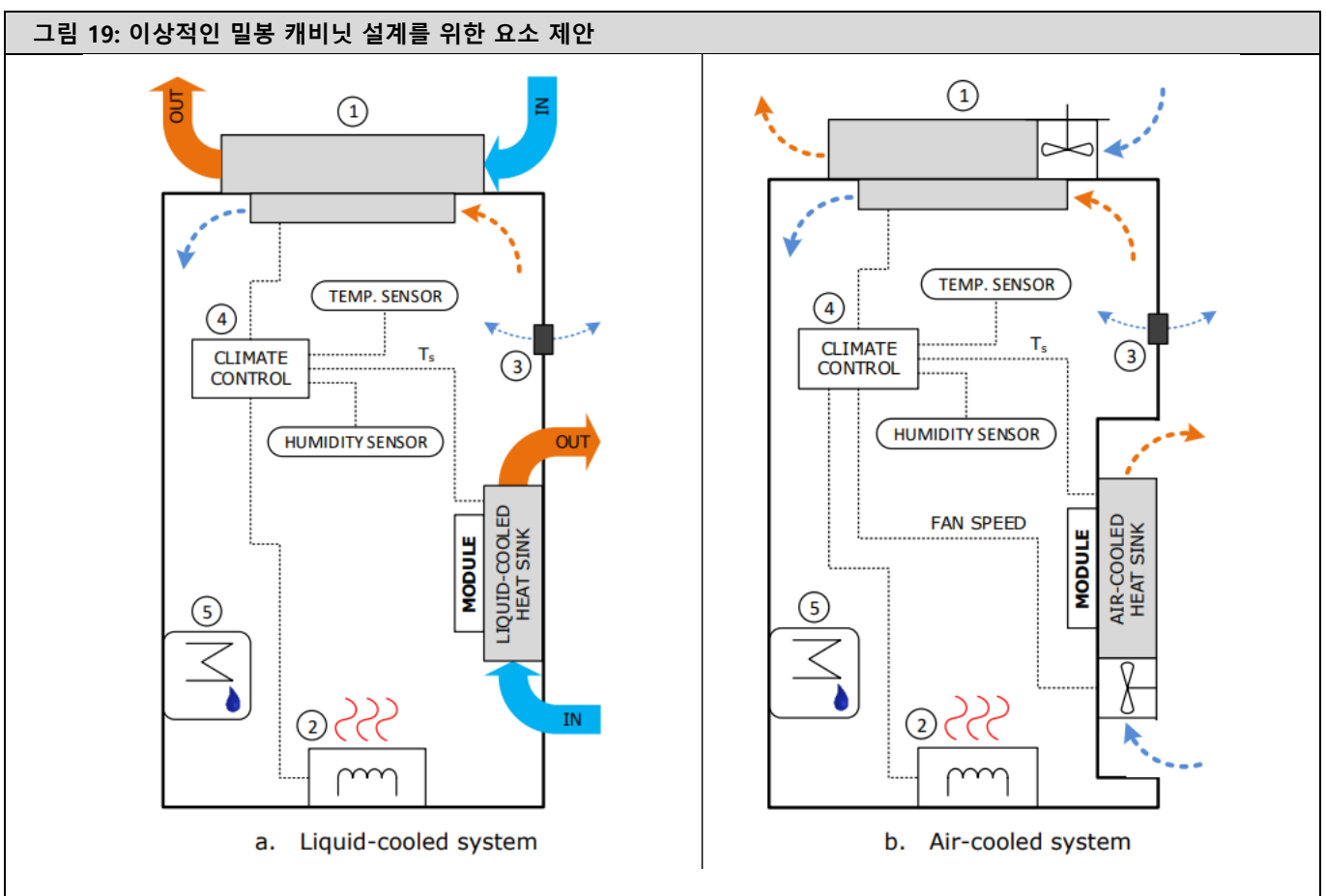
6. 설계 예

외부 매크로 환경(및 이와 관련된 오염, 온도 및 습도 수준)은 통상 전기 캐비닛의 밀봉 여부를 결정하는 주요 요인입니다.

이를 위해 밀봉(폐쇄) 캐비닛은 IEC IP(Ingress Protection) 등급 65 이상인 캐비닛으로 정의됩니다 [6]. 이는 캐비닛이 먼지성 침투물이나 특정 방향의 저전력 물 분사로부터 보호되어 있다는 의미입니다. 그러나 이는 또한 캐비닛 내부와 외부 환경 사이의 공기 흐름이 제한되어 온도와 압력 차이가 발생할 수 있음을 의미합니다. 역으로, 개방형 캐비닛은 캐비닛 내부와 외부 공기가 자유롭게 교환되는 캐비닛으로 정의됩니다.

6.1 이상적인 밀봉 캐비닛

그림 19 는 가능한 모든 습도 저감 요소를 통합한 이상적인 밀봉 캐비닛 설계를 보여줍니다. 실제로 이러한 요소들이 모두 필요한 것은 아닙니다.

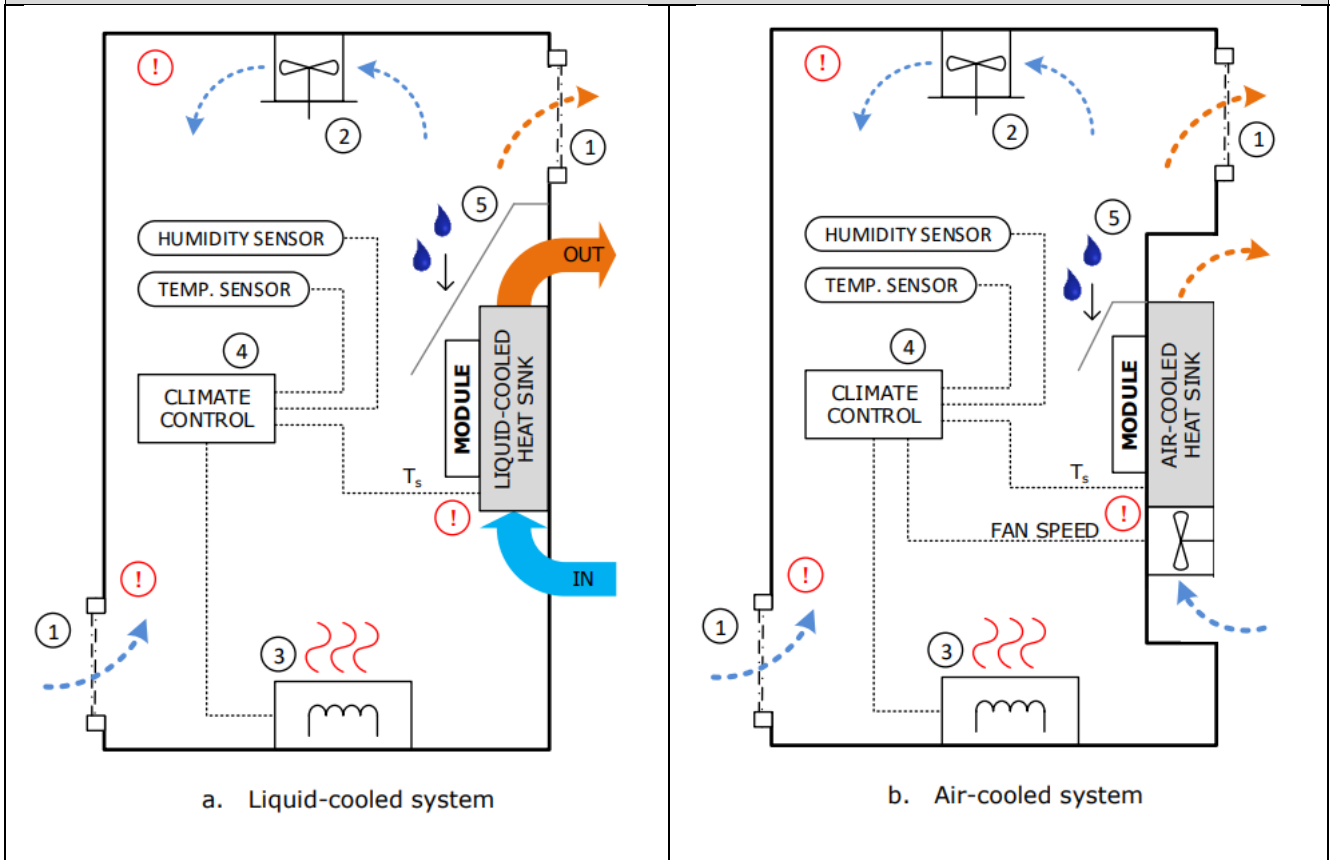


1. **공기-물(또는 공기) 열 교환기:** 내부 및 외부 공기를 교환하지 않고 내부 공기를 냉각합니다. 또한 캐비닛 내부에 순환을 통해 열점 또는 냉점이 형성되지 않습니다.
2. **히터:** 상대 습도를 낮게 유지하고 최저 작동 온도를 유지합니다.
3. **통풍구:** 내부 공기 압력이 외부 대기압보다 높아지지 않도록 막습니다.
4. **기후 제어:** 제어 시스템(예 PLC 또는 시스템 컨트롤러의 일부)를 사용하여 내부 습도, 공기/방열판 온도를 모니터링하고 필요에 따라 히터/팬을 조정합니다.
5. **제습기:** 내부 캐비닛 공기 중 수분을 응축하여 이를 외부로 배출합니다.

6.2 이상적인 개방형 캐비닛

그림 20 는 가능한 모든 습도 저감 요소를 통합한 이상적인 개방형 캐비닛 설계를 보여줍니다. 실제로 이러한 요소들이 모두 필요한 것은 아닙니다.

그림 20: 이상적인 개방형 캐비닛 설계를 위한 요소 제안

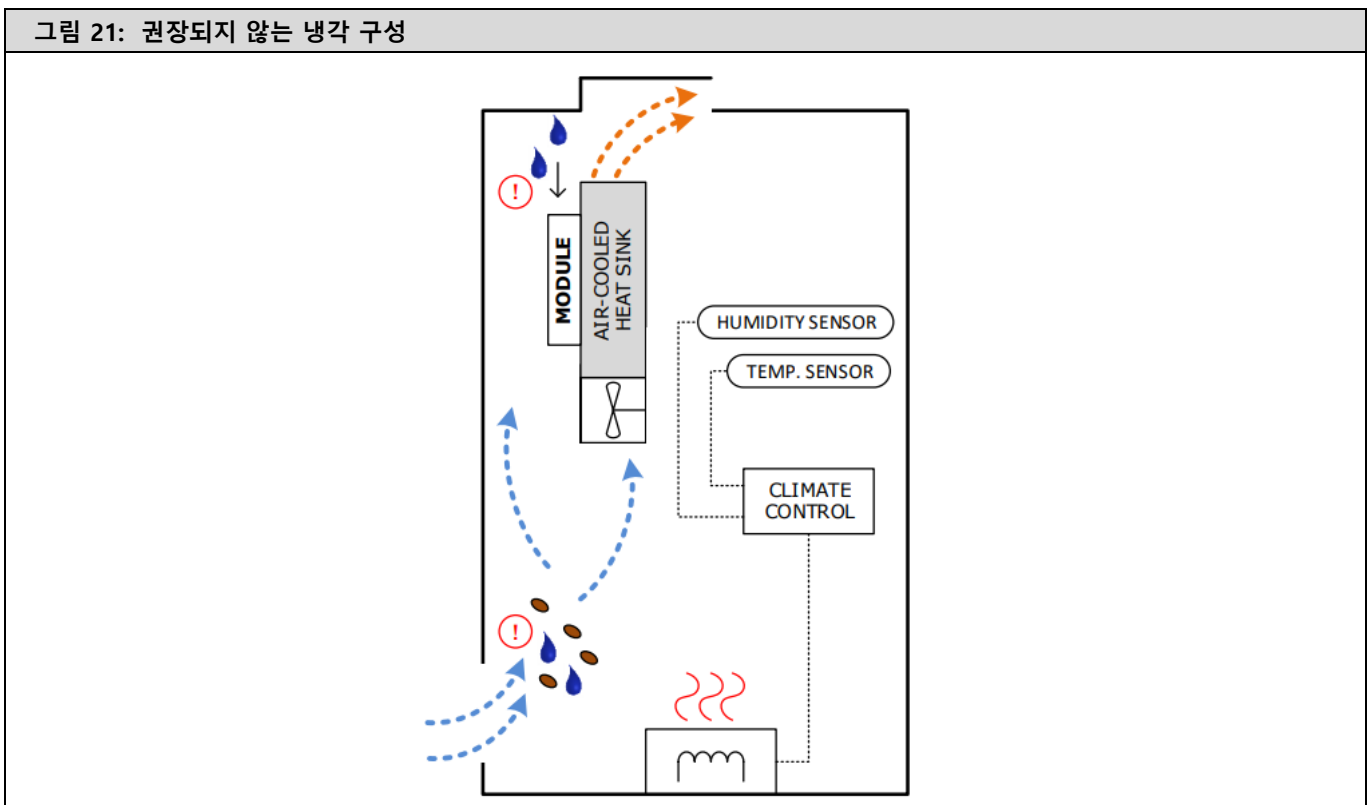


1. **공기 흡입구 및 배출구:** 교차 흐름을 제공하기 위해 배치됩니다. 흡입구 또는 배출구에 팬(필터 포함)이 들어 있을 수 있습니다.
2. **순환 팬:** 공기 이동을 통해 열점 또는 냉점 형성을 최소화합니다.
3. **히터:** 상대 습도를 낮추고 최저 작동 온도를 유지합니다. 일부 부품(예: 방열판)은 열 질량이 크고 평형에 도달하는 시간이 길어 외부 냉각 공기 유입 전에 모든 부품을 최저 온도까지 가열해야 합니다.
4. **기후 제어:** 제어 시스템(예 PLC 또는 시스템 컨트롤러의 일부)를 사용하여 내부 습도, 공기/방열판 온도를 모니터링하고 필요에 따라 히터/팬을 조정합니다.
5. **중요 영역(!):** 외부 캐비닛 벽, 흡기구 및 방열판과 같은 부위는 특히 캐비닛 내부의 공기가 외부 공기에 비해 훨씬 따뜻해지는 경우 응축 위험이 증가할 수 있습니다. 심한 경우, 전기 부품에 응축수가 떨어지는 것을 막기 위해 물방울 가림막이 필요할 수 있습니다. 수냉식 시스템의 경우 방열판에 공기가 갇히는 것을 막기 위해 (냉각) 흡입구는 (따뜻한) 배출구 아래에 위치해야 합니다. 이렇게 하면 응축이 발생하기 쉬운 흡입구에서 응축수가 전력 모듈에 직접 떨어지는 것을 막을 수 있다는 추가적인 장점이 있습니다.

참고로 권장하는 공냉식 캐비닛 설계에서 방열판의 공기 채널은 캐비닛의 나머지 부분과 분리되어 있습니다(그림 19b, 그림 20b). 그림 21 에 제시된 구성을 사용하는 경우가 많습니다. 이 구성에서는 공냉식 어셈블리 전체가 캐비닛 내부에 위치해 있고 모든 구성 요소가 방열판 냉각에 사용되는 것과 동일한 공기의 영향을 받습니다. 이 경우 다음과 같은 단점이 있습니다.

1. 공기가 다량으로 회로 기판과 전기 연결부에 쌓인 미립자 오염(먼지, 오물)을 유발하여 전압내력을 위한 공간거리와 연면거리를 줄입니다. 흡입구 필터를 추가하면 도움이 될 수 있지만, 이러한 필터들은 효과적인 공기 유량을 감소시키고 빠르게 오염이 됩니다(정기적으로 서비스를 받지 않거나 유지보수 담당자가 완전히 제거하지 않았을 경우).
2. 방열판 및 공기 흡입구/배출구에 응축이 발생하면 이제 방열판과 동일한 구획에 있기 때문에 물에 민감한 구성 요소(회로 기판, 도체)와 직접 상호 작용할 위험이 있습니다.
3. 그림 20b 에 비교하면, 공기의 양이 많아질수록 비례하여 캐비닛 내부에 더 많은 수분이 유입되어 흡입구/배출구에서 응축 위험이 증폭됩니다. 또한 유량이 높으면 온도 차이도 커지므로 특정 영역이 이슬점 아래로 떨어지는 결과가 발생할 수 있습니다.
4. 히터와 같은 실내 온도 조절 조치들은 높은 공기 유량으로 인해 조절하려는 공기량이 훨씬 더 역동적이기 때문에 그 효과가 떨어집니다.

그림 21: 권장되지 않는 냉각 구성



7. 요약

전기 장치는 액체(응축) 상태 및 기체(습도) 상태에서 물로 인한 위험에 노출될 수 있습니다. 단기적으로(전압 플래시오버) 또는 장기적으로(부식) 고장이 발생할 수 있습니다. 저감은 전력 전자 장치 주변의 절대 습도, 상대 습도 및 온도(매크로 환경) 사이의 관계를 이해하고 전력 반도체 모듈 내부의 환경 조건(마이크로 환경)을 유추하는 것에서 시작됩니다. 이어서 시스템 설계(예: 공기 흐름, 온도 제어) 또는 작동 지점(예: 냉각수 제어)을 통해 조치를 취하여 전력 반도체 모듈 근처 또는 내부에서 높은 상대 습도나 응축이 발생할 수 있는 조건을 해소할 수 있습니다.

그림 1: 애플리케이션의 4가지 다른 환경 2

그림 2: 전력 전자 장치에 선호되는 매크로 환경 3

그림 3: Magnus 공식을 이용한 이슬점 결정 4

그림 4: 전력 반도체 모듈의 상대 습도 변동성 5

그림 5: IEC 60721-3-3 등급 3K22(빨강)에 따른 전기 장비의 허용 매크로 환경 및 확장 온도 범위(파랑) 6

그림 6: 실리콘 겔로 확산되는 물분자 7

그림 7: 에지 종단의 전압 구배 파열 8

그림 8: DC 링크 어셈블리의 절연체에 액체가 존재했다는 증거 8

그림 9: 시스템 작동으로 인해 발생할 수 있는 온도 차이 10

그림 10: 높은 습도에서의 펄스 작동 11

그림 11: 다른 3가지 전류 펄스(25°C)에서 습도-온도 반응 12

그림 12: 가열 후 수분 보유 13

그림 13: 다른 3가지 전류 펄스(40°C)에서 습도-온도 반응 14

그림 14: 습도 저감 방법 15

그림 15: 바이패스 및 히터를 포함하는 냉각수 루프 16

그림 16: 습도 저감을 위한 냉각수 가열 관련 실험 결과 17

그림 17: 2000mm x 800mm x 600mm 캐비닛 하단에 설치된 800W 히터 2개 18

그림 18: 통풍구 플러그 작동 19

그림 19: 이상적인 밀봉 캐비닛 설계를 위한 요소 제안 20

그림 20: 이상적인 개방형 캐비닛 설계를 위한 요소 제안 21

그림 21: 권장되지 않는 냉각 구성 22

기호 및 용어

문자 기호	용어
AH	절대 습도
RH	상대 습도
T	온도
p	압력
V	부피
n	기체의 양(몰)
R	보편 기체 상수

용어 및 기호에 대한 자세한 설명은 "Application Manual Power Semiconductors"[2] 참조하시기 바랍니다.

참고자료

- [1] www.SEMİKRON-DANFOSS.com
- [2] A. Wintrich, U. Nicolai, W. Tursky, T. Reimann, "Application Manual Power Semiconductors", 2nd edition, ISLE Verlag 2015, ISBN 978-3-938843-83-3
- [3] Part 3-3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Stationary use at weather protected locations, IEC Standard 60721-3-3 ed 2.2, 2002
- [4] A. L. Buck, "New Equations for Computing Vapor Pressure and Enhancement Factor", J. App Meteorology, vol. 20, pp. 1527-1532, Dec. 1981
- [5] Venting, W.L Gore & Associates, Inc. www.gore.com
- [6] Degrees of protection provided by enclosures (IP Code), IEC Standard 60529:1989+A1:1999+A2:2013, 2013
- [7] C. Zorn, N. Kaminski, "Temperature Humidity Bias (THB) Testing on IGBT Modules at High Bias Levels", CIPS 2014, ISBN 978-3-8007-3578-5
- [8] Guide to Meteorological instruments and Methods of Observation, WMO Standard WMO-No. 8, Seventh edition, 2008

중요 정보 및 주의 사항

이 문서의 정보는 제품 특성에 대한 보증 또는 보장으로 간주되지 않을 수 있습니다("품질 보증"). 이 문서는 특정 애플리케이션에 따라 달라질 수 있는 일반적인 애플리케이션에서 예상되는 제품의 통상적인 특성만을 설명합니다. 따라서 사전에 각 애플리케이션에 대해 제품을 테스트해야 합니다. 애플리케이션 조정이 필요할 수 있습니다. SEMİKRON DANFOSS 제품의 사용자는 SEMİKRON DANFOSS 제품을 포함하는 애플리케이션의 안전에 대한 책임을 지며 특정 SEMİKRON DANFOSS 제품의 결함으로 인해 애플리케이션이 신체적 상해, 화재 또는 기타 문제를 초래하지 않도록 적절한 안전 조치를 취해야 합니다. 사용자는 애플리케이션 설계가 모든 관련 법률, 규정, 규범 및 표준을 준수하는지 확인할 책임이 있습니다. SEMİKRON DANFOSS의 공인 대리인이 서명한 서면 문서를 통해 SEMİKRON DANFOSS 이 달리 명시적으로 승인한 경우를 제외하고, SEMİKRON DANFOSS 제품은 당해 제품의 고장 또는 그 제품 사용의 결과로 인해 인명 피해가 초래될 수 있음을 합리적으로 예상할 수 있는 애플리케이션에 사용할 수 없습니다. 제 3자의 지적 재산권 미침해에 대한 보증을 포함하되 이에 국한되지 않는 이 문서에 제공된 정보의 정확성, 완전성 및/또는 그 이용과 관련하여 어떠한 확약이나 보증도 제공되지 않으며 어떠한 책임도 지지 않습니다. SEMİKRON DANFOSS은 애플리케이션 또는 제품의 사용으로 인해 발생하는 어떠한 책임도 지지 않으며 특허권, 저작권, 영업 비밀 또는 기타 지적 재산권이나 타인의 권리에 따른 라이선스를 양도하지 않습니다. SEMİKRON DANFOSS은 애플리케이션으로 인해 발생할 수 있는 제 3자의 지적 재산권 미침해 또는 주장된 미침해에 대해 어떠한 확약이나 보증도 하지 않습니다. 이 문서는 이전에 제공된 모든 정보를 대체 및 대신하며 업데이트로 대체될 수 있습니다. SEMİKRON DANFOSS은 변경할 권리가 있습니다.

SEMİKRON-DANFOSS KOR

경기도 광명시 새빛공원로 67 광명역자이타워 A 동 1207~1212 호

• Tel: +82-2-6370-4799 • Fax: +49 911-65 59-262

sales.skcor@semikron-danfoss.com