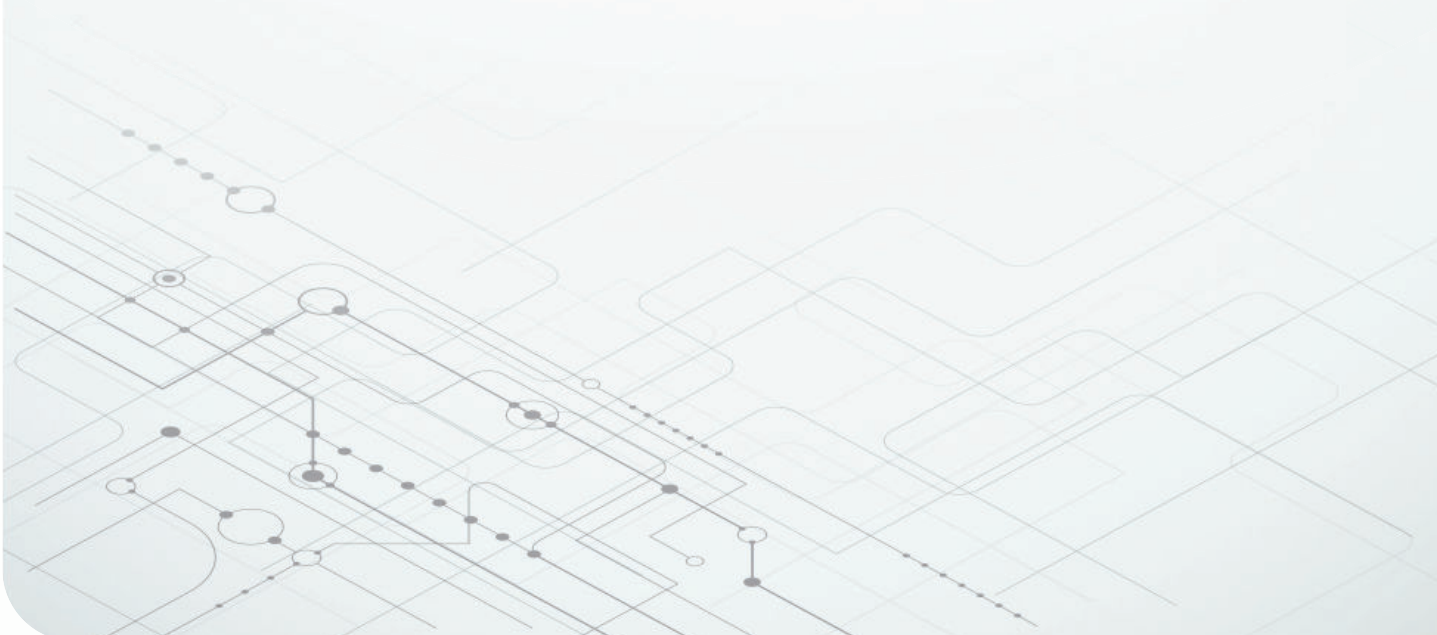


AI 데이터 센터를 위한 열 관리의 진화



David Stout
Systems engineer
Building automation - Data center thermal management





한눈에 보기

- **열 부하 증가:** 인공 지능(AI) 데이터 센터의 랙 전력 밀도는 약 5kW에서 100kW 이상으로 증가했으며 일부 AI 클러스터는 1.5MW에 도달할 것으로 예상됩니다.
- **냉각 아키텍처의 진화:** 랙이 100kW를 초과함에 따라 데이터 센터는 공랭식 냉각에서 액체 냉각 및 액침 냉각으로 전환되고 있습니다.
- **예측 열 관리:** 서버 트레이 수준의 액체 유량 제어 및 엣지 AI 기반 센서 융합은 데이터 센터에서 누출을 더 빠르게 감지하고 고장을 예측할 수 있도록 돕습니다.

소개

데이터 센터 컴퓨팅 랙의 전력 레벨은 지난 몇 년 동안 상승했으며, 이는 거대언어모델과 기타 AI 워크로드에 필요한 고성능 CPU(중앙 처리 장치) 및 GPU(그래픽 처리 장치) 아키텍처에서 비롯됩니다. 그 결과 열 관리의 중요성도 함께 커졌습니다.

열 관리 시스템의 주요 역할은 개념상 간단합니다. 열이 불필요한 영역에서 열을 흡수하여 안전하게 방출될 수 있는 곳으로 전송하는 것입니다. 컴퓨팅 랙이 더 많은 열을 발생시킴에 따라, 랙 내부의 프로세서를 허용 가능한 온도 범위 내에서 작동 시켜 성능을 최적화하려면 다양한 열 관리 기술이 필요합니다. 이 백서에서는 전력 레벨이 상승함에 따라 열 관리 시스템이 어떻게 발전해 왔는지 간략하게 설명하고, 그리 멀지 않은 미래의 전력 레벨을 처리하는 데 필요한 열 관리 시스템을 모색합니다.

관련 읽을 내용: "[데이터 센터는 그 어느 때보다 더 많은 열을 발생시키고 있습니다. 냉각 시스템도 이에 발맞춰야 합니다.](#)"

컴퓨팅 랙의 전력 레벨과 이로 인해 발생하는 열의 양을 직관적으로 이해하는 한 가지 방법은 컴퓨팅 랙을 일반 가정의 전통적인 장작 또는 가스 벽난로와 비교하는 것입니다. 이 벽난로는 보통 컴퓨팅 랙과 거의 동일한 면적에서 약 10kW의 열을 방출하며, 이는 일반적인 냉방 시스템이 문제 없이 처리할 수 있는 부하입니다. 그러나 50kW 랙 전력 레벨에서는 해당 면적에 10개의 벽난로가 밀집해 있는 셈이며, 공랭식 방식으로는 더 이상 이러한 열 부하 상황에서 실내 온도를 조절할 수 없습

니다. 이 공간에서 150개의 벽난로에 상응하는 1.5MW 랙은 실제로 데이터 센터 열 관리의 과제를 명확히 보여줍니다. 다행히도 액체 냉각은 동일한 부피 대비 공기보다 3,000배 더 큰 열 흡수 능력을 제공합니다.

그림 1에서는 냉각 문제가 얼마나 빠르게 증가했는지를 보여주며, 이를 처리할 수 있는 아키텍처에 대비하여 과거, 현재 및 미래의 랙 전력 레벨을 그래프로 나타내어 각 아키텍처가 그 한계에 도달한 지점을 보여줍니다. AI 데이터 센터의 랙 전력 밀도는 약 5kW에서 100kW 이상으로 상승했습니다. 일부 AI 클러스터는 이제 랙당 200kW에 접근하고 있으며, 향후 몇 년 내에 1.5MW까지 높은 레벨로 예상됩니다. 이러한 이유로 냉각 아키텍처가 공랭식에서 액체 냉각으로 전환되어 발맞추고 있습니다

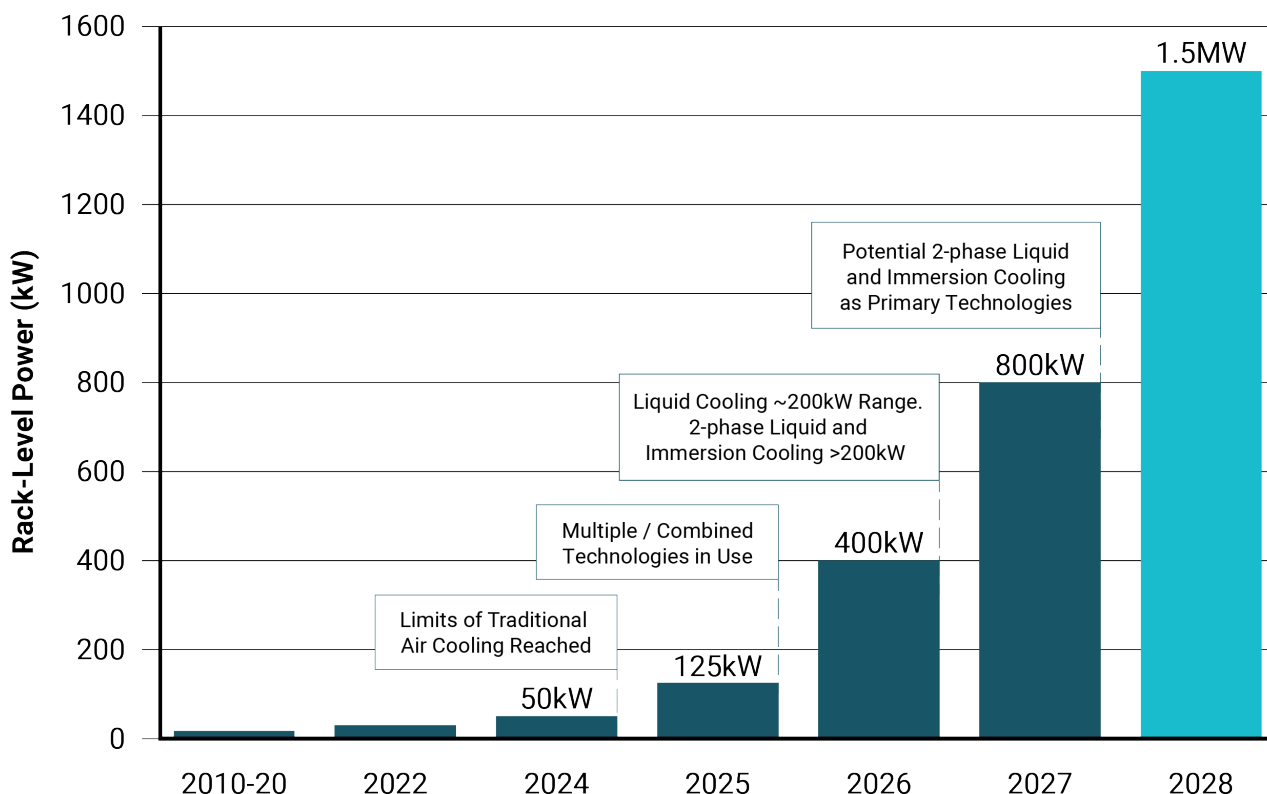


그림1. 랙 레벨 전력 전망 및 냉각 기술

오늘날의 열 관리 아키텍처 비교

액체 냉각이 열 관리의 미래이기는 하지만, 혼합 기술 방식 역시 향후 수년간 계속 활용될 것입니다. 엔지니어들은 일반적으로 가장 고도화된 액체 냉각 시스템을 AI 컴퓨팅 전용 랙에 할당하고, 일반적인 워크로드에는 기타 아키텍처를 적용합니다.

데이터 센터에는 랙 전력 밀도 대응 역량이 낮은 것부터 높은 순서대로 다음과 같이 세 가지 주요 공기 기반 냉각 아키텍처가 있습니다. 각 아키텍처는 컴퓨팅 랙에서 발생하는 열을 흡수하는 데 사용되는 매체와, 이어서 데이터 센터 외부로 열을 전달하는 데 사용되는 매체를 설명합니다.

공기-공기

공기-공기 냉각 아키텍처는 데이터 센터에서 차가운 공기가 컴퓨팅 랙을 통해 순환하며 발생된 열을 흡수한다는 점을 제외하면 가정의 중앙 냉방 시스템과 매우 비슷하게 작동합니다. 그런 다음 뜨거운 공기가 차가운 냉매가 들어 있는 코일을 지나면서 냉매가 열을 흡수하고, 공기는 다시 순환할 수 있도록 냉각됩니다. 냉매는 흡수된 열을 실외로 전달하며, 실외에서 열이 외부로 방출되고 압축, 응축, 증발 과정을 거쳐 냉매가 다시 냉각됩니다. 이 프로세스는 열 흡수, 열 전달, 열 방출 및 냉각의 사이클로 요약할 수 있습니다. 공기 흐름을 제어하기 위해 랙은 일반적으로 이중바닥 위에 설치되고 서로 등을 맞댄 열로 배치되어 차가운 통로와 뜨거운 통로를 형성합니다.

전력 레벨이 상승함에 따라, 뜨거운 통로 차단은 뜨거운 공기가 차가운 통로로 유입되어, CRAC(전산실 공조 장치)가 제어하는 차가운 통로의 온도를 높이는 것을 방지합니다. CRAH(전산실 공기 처리 장치)는 공기 흐름 및 증발기 코일의 냉매로의 열 전송을 관리합니다. 열 부하가 증가하면 더 큰 송풍기 팬과 증발기 코일이 필요하며, 서버 팬 공기 흐름도 늘어납니다. 20kW~50kW 랙 전력 범위(컴퓨터실의 모든 랙이 유사하다고 가정)에서는 효율성과 운용상의 요구로 인해 다른 열 전송 방식이 필요합니다.

공기-액체

공기-액체 냉각 아키텍처는 **그림 2**에 나와 있는 것처럼 공기-공기 냉각 아키텍처와 동일한 방식을 사용하지만, 후반 도어 열교환기(RDHX)를 추가합니다. RDHX의 목적은 컴퓨팅 랙을 통과한 공기에서 차가운 액체로 열을 전달하는 동시에, 공기가 통과할 때 이를 냉각하는 것입니다. RDHX는 패시브(수동형) 또는 액티브(능동형)일 수 있으며, 이는 교환기를 통한 공기 흐름을 돕는 추가 팬의 부재 또는 존재를 의미합니다.

냉각수 분배 장치(CDU)는 RDHX에서 열을 흡수한 액체를 순환시키고 펌프를 사용하여 실외로 이동시키며, 이곳에서 냉각탑, 건식 냉각기 또는 기타 수단을 통해 환경으로 열을 방출하고 재순환을 위해 액체를 냉각합니다. CDU에는 일반적으로 컴퓨터실을 통해 흐르는 액체를 실외로 흐르는 액체(일반적으로 시설의 급수)로부터 격리하는 열 교환기가 포함됩니다. 이러한 격리를 통해 컴퓨팅 룸에서 사용되는 액체와 실외에서 사용되는 액체 종류를 서로 다르게 사용할 수 있습니다.

전력 수준이 계속 증가함에 따라, 열 흡수 매체로 공기를 사용하는 것이 병목 요인이 되어 열을 생성하는 부품에서 직접 열을 흡수할 수 있는 콜드 플레이트로의 전환을 유도합니다.

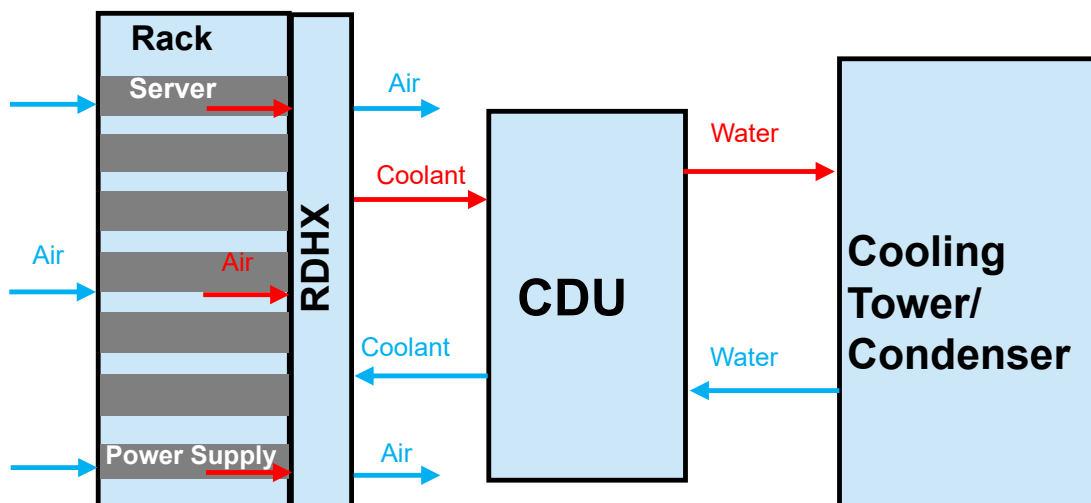


그림 2. 공기-액체 냉각 아키텍처

액체-공기

콜드 플레이트가 열 흡수를 크게 개선하므로 열을 전달하는 데 필요한 공기 흐름이 감소하여, 기존 CRAC/CRAH 설비가 공기를 통해 열을 계속 전달할 수 있습니다. **그림 3**에 나와 있는 액체-공기 아키텍처에는 CDU와 능동형 RDHX의 조합인 HDU(방열 장치)가 사용됩니다. HDU에서 CDU는 콜드 플레이트를 통해 액체를 순환시키며, 이 플레이트는 열이 발생하는 위치에 최대한 가깝게 열을 흡수하기 위해 랙 전체의 소스에 장착됩니다. 액체는 능동형 RDHX를 통해 흐르며, 팬은 코일을 가로질러 차가운 전산실 공기를 흡입하여 열을 뜨거운 통로로 흐르는 공기로 전달합니다. HDU는 전력 레벨에 따라 랙 내, 열 내부 또는 사이드카 형태로 배치될 수 있습니다.

전력 레벨이 150kW~200kW 범위로 상승함에 따라 공기를 열 전달 방법으로 사용하는 것이 다시 병목 현상이 되어, 오늘날 액체-액체 아키텍처가 보편화되고 있습니다.

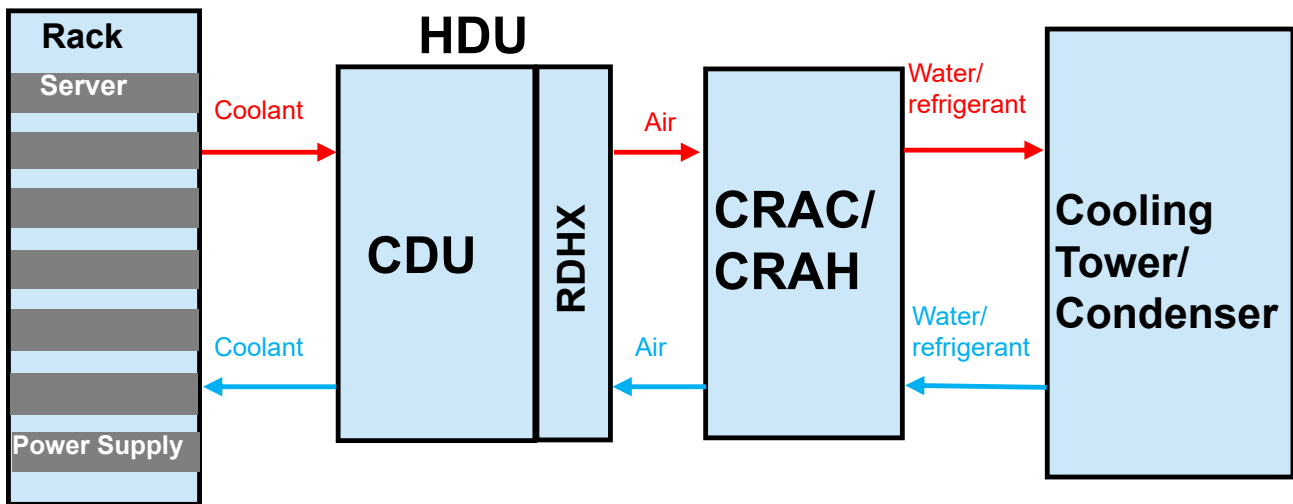


그림 3. 액체-공기 냉각 아키텍처

열 성능 외에도 엔지니어는 시설 요구 사항도 고려해야 합니다. 공기-액체 아키텍처에는 시설 용수 인프라와 화이트 스페이스 전체에 걸쳐 상당한 배관이 필요하며, 액체-공기 아키텍처는 기존 용수 시스템이 없는 시설에서 작동하므로 오래된 데이터 센터를 개조하기에 매력적인 옵션입니다. 공기-액체, 액체-공기 및 액체-액체 아키텍처는 오늘날 사용되는 대부분의 열 관리 시스템을 차지합니다.

액체 냉각 기술의 발전

그림 4에 나와 있는 액체-액체 아키텍처는 직접 칩 방식의 콜드 플레이트를 사용하여 소스의 열을 흡수하고, CDU(냉각수 분배 장치)로 유체를 순환시켜 열을 한 액체에서 다른 액체로, 백색 공간에서 실외로 전달하여 방출합니다.

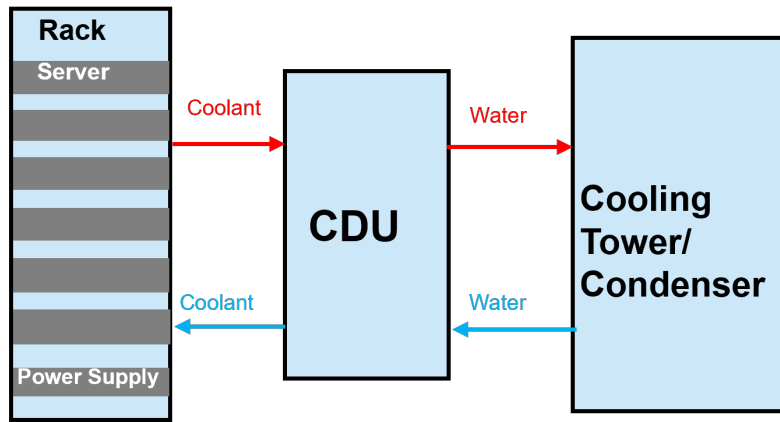


그림 4. 액체-액체 냉각 아키텍처

CDU는 액체-액체 아키텍처에서 가장 중요한 부품으로, 유체가 흐르게 하여 열이 효과적으로 흡수되고 부품이 의도한 온도 범위 내에 머물도록 합니다. CDU 내부의 열 교환기는 마찬가지로 매우 중요하며, 콜드 플레이트의 열을 흡수하는 불순물이 적고 비열이 높은 액체를 실외 냉각 시스템에 사용되는 설비 용수와 분리합니다.

누수 감지의 필요성

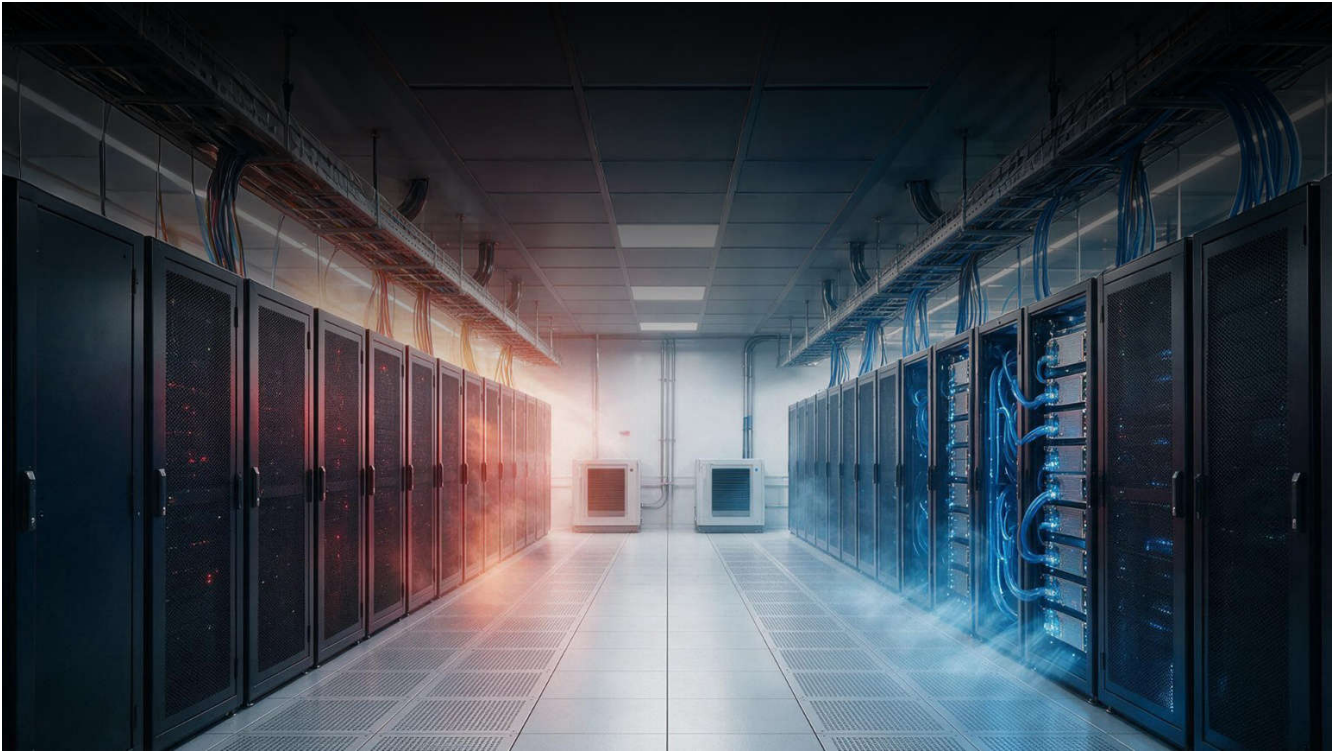
전자 부품과 매우 인접한 곳에 액체를 적용하는 만큼, 누수 감지의 중요성이 더욱 커집니다. 서버 가동 시간이 여기에 달려 있는 만큼, 오작동 없이 누수를 안정적으로 감지하는 것은 누수를 감지하는 것 자체만큼이나 중요합니다. 오늘날의 랙 설비는 센서가 누출을 감지하면 액체 흐름을 차단하는 온-오프 밸브를 사용해 엔지니어가 원인을 찾아 수리할 때까지 전체 랙을 차단합니다. 수분에 민감한 저항식 로프는 가장 일반적인 유형의 누출 센서이지만, 정확도 문제로 유명하며, 설치 시 찢힘이나 날카로운 꺾임을 방지하도록 주의해야 합니다. 엔지니어들은 미세 누출을 감지하는 습도 센서와 정전 용량식 누출 센서를 포함한 대안을 연구하고 있습니다.

다른 접근 방식은 CDU 차원에서 누출 문제를 해결합니다. 한 가지 방법은 CDU를 재구성하여 유체를 밀어내는 대신 음압으로 시스템 전체에 끌어당기는 것입니다. 이는 천공이나 느슨한 연결 부위를 통해 유체가 새어나가게 하는 대신, 공기를 유입시키는 효과가 있습니다. 또 다른 접근법은 비전도성 액체를 사용하여 누출이 발생해도 값비싼 장비의 전도성 단락 대신 단순 오염에 그치도록 합니다.

액침 냉각

액침 냉각은 냉각 프로세스를 더욱 단순화하고 전문가가 예측하는 더 높은 랙 전력 레벨의 요구를 충족합니다. 이 아키텍처는 기존 랙을 수평으로 배치하고 비전도성 유체 통에 담가(금속 프레임 제외), 누출로 인한 다운타임을 완전히 제거합니다. 액침 탱크는 일반적으로 열 교환기와 소형 펌프를 통합하여 유체 순환을 유지하며, 기존 랙 측면에 있던 매니폴드와 배관을 제거하므로 이 아키텍처는 면적 효율성이 매우 높습니다.

펌프와 열 교환기가 내장되어 있어 CDU 기능이 독립적으로 작동합니다. 액침 냉각은 직접 칩 냉각에 비해 열을 약 2~3배 더 효과적으로 흡수하므로, 시설 용수가 본질적으로 차갑게 유지되는 추운 기후의 데이터 센터에서는 중간 정도의 랙 전력 레벨에서 외부 냉각탑을 제거할 수도 있습니다.



미래의 AI 데이터 센터 냉각 트렌드

최대 1.5MW의 전력 레벨을 위해 구축된 냉각 시스템은 거의 확실히 액체-액체 및 액침 냉각 아키텍처에 의존할 것입니다. 두 기술 모두 냉매와 같은 불화탄소 유전체의 저온 증발이 열 흡수 및 전송 효율을 개선하여 이러한 아키텍처의 유효 수명을 미래까지 확장하는 2상 냉각으로 변환할 수 있습니다.

다른 두 가지 트렌드는 전력 밀도 상승을 따라가고 제어 시스템의 응답성을 높이는 것을 목표로 합니다:

- 서버 트레이 레벨에서 액체 흐름을 제어하면 GPU 및 CPU 다이 온도를 보다 세밀하게 제어할 수 있으며, 누수가 발생할 경우 랙의 다른 위치에서 서버 가동 시간을 극대화할 수 있습니다.
- 에지 AI 컴퓨팅은 센서 융합을 통해 모든 시스템 센서를 모니터링하고 처리하여 개별 센서 또는 매개 변수의 모니터링이 놓치게 되는 미묘한 변화를 포착하여 더 빠른 응답 시간과 낮은 지연 시간을 제공합니다. 에지 AI 컴퓨팅은 누출 감지 신뢰성과 속도를 개선하는 것, 그리고 중요한 기계 부품에 대한 예측형 유지 보수를 개선하는 등 다양한 가능성의 문을 엽니다.

이러한 트렌드는 데이터 센터 오퍼레이터가 고장이 발생하기 훨씬 전에 새로운 문제를 명확하게 파악할 수 있도록 지원하며, 상황을 감지하고 문제를 예측하며 자동으로 조정하는 냉각 시스템의 방향성을 제시합니다. 열 관리는 사후에 처리하는 요소가 아니라 데이터 센터가 구동되는 방식의 능동적인 일환이 됩니다.

결론

냉각 아키텍처는 동일한 핵심 부품 다수를 공유합니다. 온도 센서는 온도 제어에 중요한 역할을 합니다. 이러한 시스템 전체에 걸쳐 사용되는 팬, 펌프, 컴프레서 및 전자 밸브에 전원을 공급하는 등 모터 컨트롤도 마찬가지로 중요합니다. 마이크로컨트롤러와 마이크로프로세서는 모든 것이 함께 작동하도록 합니다. 이는 냉각 시스템에 필요한 반도체의 몇 가지 예에 불과하며, TI는 아키텍처에 관계없이 냉각 시스템의 모든 계층을 지원하는 아날로그 기술과 임베디드 프로세싱 제품을 제

공하기에 매우 유리한 입지를 확보하고 있습니다. 이러한 냉각 아키텍처에 사용되는 특정 제품 영역에 대한 자세한 내용은 추가 리소스 섹션을 참조하십시오.

작성자 소개

데이비드 스타우트는 텍사스 인스트루먼트에서 데이터 센터 열 관리를 포함한 빌딩 자동화 시스템에 중점을 둔 시스템 엔지니어입니다. 그는 산업용 반도체 시장을 위한 아날로그, 혼합 신호 및 무선 주파수(RF) 회로 및 시스템을 설계한 30년 이상의 경험을 가지고 있습니다. 데이비드는 루이지애나 주립 대학교에서 전기공학 학사 학위를, 텍사스 대학교 댈러스 캠퍼스에서 전기공학 석사 학위를 취득했습니다.

추가 리소스

데이터 센터 열 관리 시스템과 관련된 TI 제품 카테고리를 알아보세요:

- **인버터 및 가변 주파수 드라이브용 GaN 전력 스테이지**와 팬, 펌프, 컴프레서 및 전자 밸브용 **모터 드라이버**를 확인해 보세요.
- 누출 감지 및 열 모니터링을 위한 **온도 센서**, **기타 센서** 및 **정밀 아날로그-디지털 컨버터**를 확인해 보세요.
- 냉각 하위 시스템을 조정하고 응답성을 유지하는 **마이크로컨트롤러 및 마이크로프로세서**에 대해 자세히 알아보세요.

중요 알림: 이 문서에 기술된 텍사스 인스트루먼트의 제품과 서비스는 TI의 판매 표준 약관에 의거하여 판매됩니다. TI 제품과 서비스에 대한 최신 정보를 완전히 숙지하신 후 제품을 주문해 주시기 바랍니다. TI는 애플리케이션 지원, 고객의 애플리케이션 또는 제품 설계, 소프트웨어 성능 또는 특허권 침해에 대해 책임을 지지 않습니다. 다른 모든 회사의 제품 또는 서비스에 관한 정보 공개는 TI가 승인, 보증 또는 동의한 것으로 간주되지 않습니다.

모든 상표는 해당 소유권자의 자산입니다.

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you fully indemnify TI and its representatives against any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [ti.com](#) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may propose.

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025