

AI 팩토리 시대, AIDC 액체 냉각 기술의 표준화 현황과 국내 적용 과제

조진균 국립한밭대학교 건축설비시스템공학과 교수, 대한설비공학회 데이터센터 TC 위원장,
ASHRAE South Korea Chapter CTTC Chair

1. 머리말

최근 AI 연산 수요 급증과 함께 데이터센터가 고밀도·고효율 연산을 수행하는 'AI 팩토리' 형태로 빠르게 전환되고 있다. 이에 따라 랙당 전력 밀도와 열부하가 크게 증가하고 있으며, 기존 공랭식 냉각 방식은 열제거 성능과 에너지 효율 측면에서 한계를 보이고 있다.

이와 같은 고밀도 환경에서 열전달 성능이 우수한 액체 기반 냉각 기술이 대안으로 부상하고 있는데, DLC(직접액체냉각, Direct Liquid Cooling) 및 액침냉각(Immersion Cooling) 방식이 대표적이다. 액체 냉각 시스템은 칩 수준에서 발생한 열을 랙 및 설비 시스템을 통해 외부로 방출하는 통합 열관리 구조를 요구하며, 이에 따라 냉각유체 온도, 유량, 시스템 구성 등 설계 및 운영 조건에 대한 명확한 기준이 필요하다. 현재 글로벌 수준에서는 ASHRAE(미국공조냉동협회, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)를 중심으로 액체 냉각 설계 및 운영 가이드라인이 제시되고 있으며, 일부 영역에서는 ISO/IEC 기반 성능 지표체계와 함께 적용되고 있다. 그러나 국내의 경우 고밀도 AIDC(AI Data Center)에 적용 가능한 설계 기준과 시험·인증 체계가 충분히 정립되지 않은 상황이며, 글로벌 표준에 대한 의존도가 높은 실정이다.

이에 이번 원고에선 AI 팩토리 환경에서의 액체 냉각 시스템을 대상으로 ASHRAE 기반 설계 기준과 글로벌 표준화 동향을 정리하고, 국내 적용을 위한 기술적 과제와 표준화 방향을 제시하고자 한다.

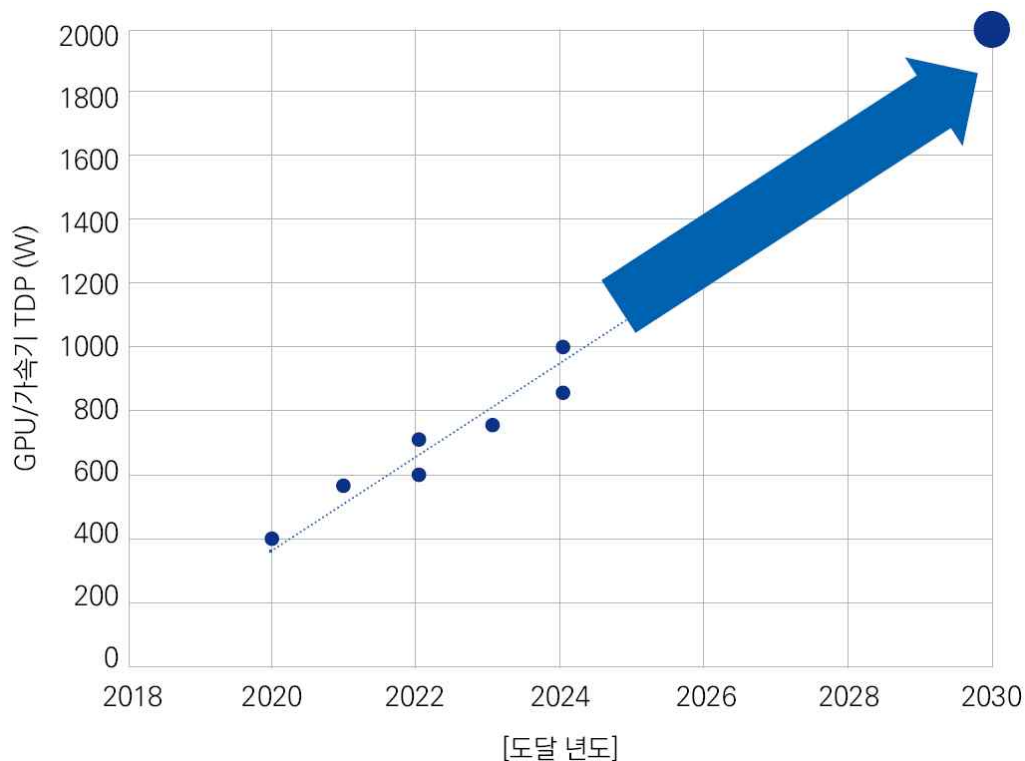


[그림 1] AIDC 냉각의 방향

2. 데이터센터 냉각 조건의 변화

생성형 AI와 머신러닝 기술의 확산은 향후 수년간 데이터센터 인프라 구조에 큰 변화를 초래할 것으로 예상된다. AI 플랫폼을 구성하는 핵심 연산 장치인 GPU, AI 가속기, 그리고 CPU는 학습 및 추론 워크로드 증가에 대응하기 위해 지속적으로 성능이 향상되고 있으며, 이에 따라 데이터센터의 전력 소비와 열 발생 밀도 또한 빠르게 증가하고 있다. 이러한 연산 장치와 이를 수용하는 서버, 랙, 클러스터 및 데이터센터는 기존 시스템 대비 더 높은 기능, 집적도와 전력밀도를 갖는 방향으로 발전하고 있다[1, 2].

특히 AI 가속기는 현재 AI 하드웨어 환경에서 가장 큰 열관리 과제를 야기하는 요소 중 하나로, 최근 개별 칩의 TDP(열설계전력, Thermal Design Power)는 최대 1,000W 수준에 이르고 있다[3]. [그림 2]에서 확인할 수 있듯이 가속기의 TDP는 2020년부터 2024년 사이 약 2.5배 증가했으며, 이러한 추세가 지속될 경우 2030년엔 가속기 TDP가 약 2,000W 수준을 초과할 것으로 예상된다[4].



출처: OCP

[그림 2] 연도별 가속기의 TDP 증가 추이

또한 AI 연산 성능 증가와 함께 메모리 대역폭과 용량 요구도 지속적으로 증가하고 있다. 이는 더 높은 전력소모 특성을 가지는 DRAM(Dynamic Random Access Memory)과 고대역폭 메모리인 HBM(High Bandwidth Memory) 스택을 포함하는 복합 패키징 구조로 이어지며, 결과적으로 서버 시스템의 열밀도를 더욱 증가시키는 요인이 된다. 동시에 반도체 장치의 장기 신뢰성 요구사항은 크게 변하지 않기 때문에, 칩의 온도는 비교적 안정적인 범위 내에서 유지돼야 한다는 제약이 존재한다. 이러한 조건은 AI 서버의 열관리 문제를 더욱 복잡하게 만드는 요소로 작용한다[5].

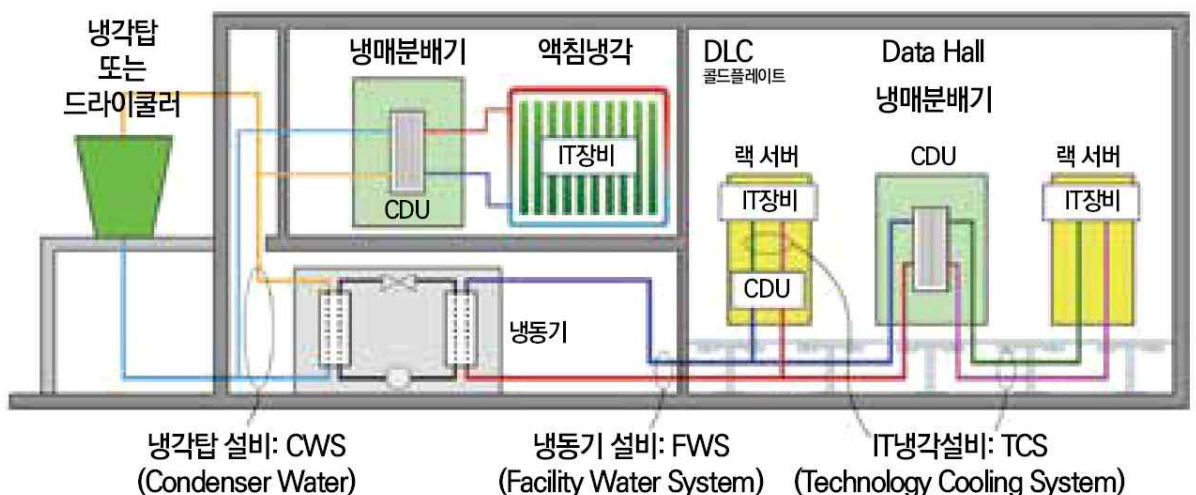
3. 데이터센터 액체 냉각 표준(설계 기준)

3.1 액체 냉각 시스템 구성 및 개념

앞에서 언급한 바와 같이, 현재 고성능 마이크로프로세서의 TDP는 1,000W를 초과하고 있으며, 향후 2,000W 이상 증가할 것으로 예측된다. 이러한 고발열 환경에서는 공기를 냉각 매체로 사용하는 기존 방식이 구조적 한계에 봉착할 수밖에 없다. 실제로, 공기를 통한 열제거 성능은 액체(물)에 비해 약 37% 수준에 불과하다. 따라서 공랭식 냉각에서 액체 냉각으로의 전환은 더 이상 선택이 아니라 필수라 할 수 있다.

액체 냉각 시스템은 IT 장비 냉각 영역과 설비 냉각 영역으로 구 분되며, 일반적으로 TCS(IT냉각 시스템, Technology Cooling System), FWS(냉수설비시스템, Facility Water System) 및 CWS(냉각 수설비시스템, Condenser Water System)으로 구성된다. [그림 3]에서 보이는 바와 같이, DLC 방식은 CPU나 GPU 등 발열 부품에 냉각유체가 직접 접촉하는 Cold Plate 구조를 활용해 열전달 효율, 소음 저감, 에너지 절감 측면에서 탁월한 성능을 보인다. 아울러 액침냉각 기술은 전체 IT 장비를 냉각액에 직접 담그는 방식으로, 차세대 데이터센터 핵심 솔루션으로 주목받고 있다[6, 7]. 액체 냉각이 공랭식보다 높은 냉각 효율을 실현할 수 있는 기술적 이유는 다음과 같다.

- (1) 단위 열제거 에너지의 차이: 액체(물)는 공기보다 비열(Specific Heat)이 훨씬 높으므로 같은 열량을 제거하는 데 필요한 에너지가 작다. 예를 들어, 물의 비열은 약 $4,187 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ 로, 공기(약 $1,005 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)에 비해 4배 이상 크다. 이는 냉각을 위한 에너지 소비를 크게 절감시킬 수 있다는 뜻이다.
- (2) 어프로치 온도(Approach Temperature)의 우위: 액체-액체 열교환기는 일반적인 공기-공기 혹은 공기-액체 열교환기에 비해 어프로치 온도가 낮다. 이는 열교환기의 열원과 열배출 측 사이 온도 차이를 작게 유지할 수 있음을 의미하며, 이를 통해 냉동기 없이도 열 방출이 가능한 시간대를 극대화할 수 있어 연중 에너지 소비를 현저히 낮출 수 있다.



[그림 3] 액체 냉각 시스템 종류 및 구성

3.2 TCS 설계기준

액체 냉각 IT 장비에 대응하는 냉각 시스템의 정의와 설계 기준은 ASHRAE에서 2024년 말에 이르러서야 비로소 처음 제시됐다. 이는 액체 냉각 기술이 그동안 기술적 타당성과 시장성 측면에서 아직 초기 단계에 머물러 있었기 때문이며, 보편적인 설계 기준을 마련하기에는 다소 이른 시기였기 때문이다. 그러나 이번 설계 기준 제시를 계기로, 액체 냉각 시스템의 기술적 적용과 실무 도입이 한층 더 가속화될 것으로 기대된다.

액체 냉각 시스템은 1차 측 열원 계통인 FWS/CWS와 2차 측 IT 장비 냉각 계통인 TCS로 나뉘며, 이 둘은 독립된 요구조건과 운전 특성을 갖는 별도의 순환 계통으로 구성된다[그림 3]. 이때, 두 시스템 간의 경계를 명확히 하고 열교환을 효율적으로 수행하기 위해 데이터센터 내에는 CDU(냉매분배장치, Coolant Distribution Unit)가 설치된다. CDU는 TCS와 FWS를 연결하는 매개체이자, 압력 분리 및 유량 조절, 온도제어 기능을 수행하는 핵심 장비다.

액체 냉각 IT 장비는 기존 공랭식 시스템과는 전혀 다른 기술적 요구사항을 기반으로 설계되어야 하며, 초고밀도 IT 부하 환경에서는 이러한 요건이 더욱 정교하게 고려돼야 한다. 주요 설계 요소로는 TCS 냉각유체의 온도 범위를 정의하는 S-class, 유량 및 압력 강하 조건, 최대 운전 압력, 냉각유체의 수질 및 접액 재료 조건 등이 포함된다. 또한 IT 장비 제조사들은 장비의 열적 안정성을 위해 온도 변화율에 대한 기준도 함께 제시하고 있다. 아울러, IT 장비의 총 발열량 대비 TCS를 통해 회수되는 열의 비율인 열 회수율과 장비 내부 공기 온도에 대한 요구조건을 정확히 이해하고 반영하는 것이 중요하다.

<표 1>의 S-class는 TCS에서 공급되는 냉각유체의 서비스 온도 등급을 나타내며, 일반적으로 30°C에서 50°C 사이로 설정된다. 온도가 높을수록 열역학적으로 유리하며, 외기(냉수)냉방(Economizer)을 활용할 수 있는 시간대가 증가해 냉동기 사용을 줄이는데 효과적이다. 이러한 고온 운전의 이점은 에너지 절감 측면에서 매우 크다. 예를 들어, S40 이상의 고온 S-class에서 안정적으로 운전할 수 있는 데이터센터는 CDU를 통해 전달된 열을 냉동기 없이 외기 환경으로 직접 방출할 수 있는 잠재력을 가지게 된다[8].

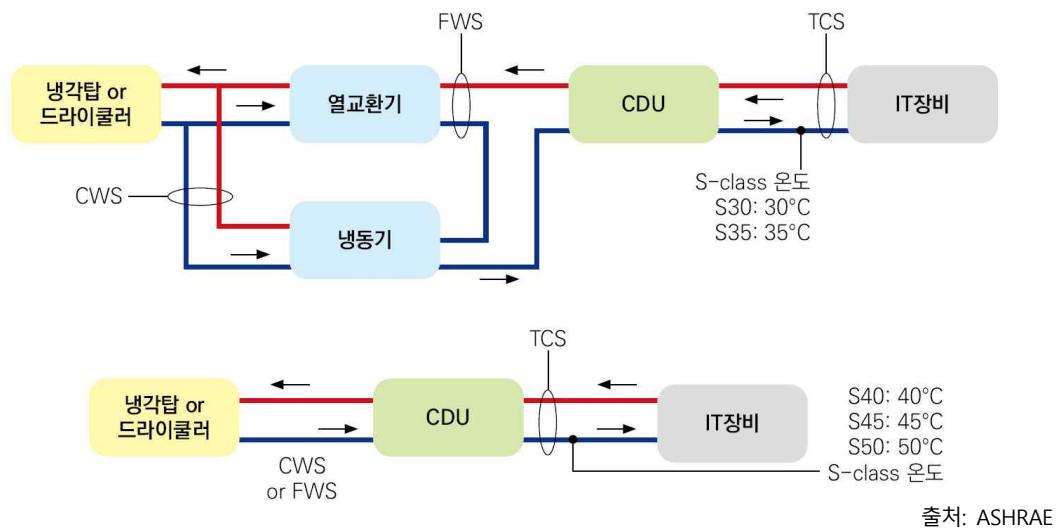
<표 1> TCS 냉각유체 서비스 온도 기준(S-class)

Class	일반적인 FWS 설비	TCS 설비	최대 TCS 공급 온도 (°C)
S30	냉각기 및 냉각탑	CDU	30
S35	냉각탑		35
S40	냉각탑		40
S45	냉각탑 또는 드라이쿨러		45
S50	드라이쿨러		50
모든 등급의 최소 유체 온도는 결로를 방지하기 위해 측정된 데이터센터 주변 공기의 이슬점보다 2°C 이상을 유지해야 한다.			

출처: ASHRAE

[그림 4]는 S30, S35 등 저온 TCS와 S40, S45, S50 등 고온 TCS 각각에 적합한 1차 측 냉각열원(FWS/CWS) 구성을 보여준다. 일부 시스템에서는 TCS 냉각유체를 이용해 먼저 IT 장비의 열을 수집하고, 이후 공기를 통해 외기로 열을 방출하는 2단계 열교환 방식을 사용한다. 그러나 이러한 방식은 액체 냉각에서 직접 외기로 열을 제거하는 방식에 비해 상대적으로 에너지 효율이 낮으

며, 고온 TCS를 활용할 수 있는 데이터센터일수록 냉동기 없이도 효율적인 열 방출이 가능하다는 점에서 더 큰 운영상의 장점을 제공한다.



[그림 4] S-class 기반 냉각 인프라 구성 구분

3.3 FWS/CWS 설계 기준

ASHRAE는 액체 냉각 IT 장비의 상용화 이전인 2013년에 이미, IT 장비에 적용 가능한 냉각 기술로서 액체 냉각과 공랭식 냉각의 정의, FWS 및 CWS의 기본 구조, 그리고 기타 IT 장비에 적용할 수 있는 냉각 방식에 대한 개요를 제시했다. 이 초기 기준은 주로 공랭 위주의 데이터센터 냉각 환경을 바탕으로 구성됐으나, 향후 액체 냉각 기술 발전의 기초가 됐다.

이후 2021년에는 FWS 및 CWS 시스템과 TCS 간의 인터페이스 요구사항과, IT 장비 랙에 직접 연결되는 액체 냉각 시스템의 구성 요건에 대한 좀 더 구체적인 가이드라인이 제시됐다. 이는 수랭식 데이터센터 구현을 위한 중요한 진전이었지만, 당시에는 TCS 측 냉각유체의 공급온도 (S-class) 정의가 아직 정립되지 않았고, 전체 액체 냉각 시스템을 완전하게 통합할 수 있는 기술적 프레임이 부족했다.

<표 2>는 W-class 기준으로, FWS 및 CWS의 냉수와 냉각수의 공급 온도 등급을 정의한다. W-class 기준은 이후 등장한 CDU 및 TCS와 연계돼 FWS/CWS 측 열원 설계와 TCS 측 IT 냉각 설계 간의 정합성 확보를 위한 기반 규격이 됐다[9].

<표 2> FWS/CWS 냉수/냉각수 온도기준(W-class)

Class	FWS/CWS 주요 설비	FWS/CWS 보조 설비(폐열활용)	FWS/CWS 공급 온도 (°C)
W17	냉각기 및 냉각탑	외기 냉수 냉방(냉각탑)	17
W27			27
W32	냉각탑	냉동기 또는 지역난방 시스템	32
W40			40
W45	냉각탑	지역난방 시스템	45
W+			>45
모든 등급의 최소 냉수/냉각수 공급온도: 2°C			

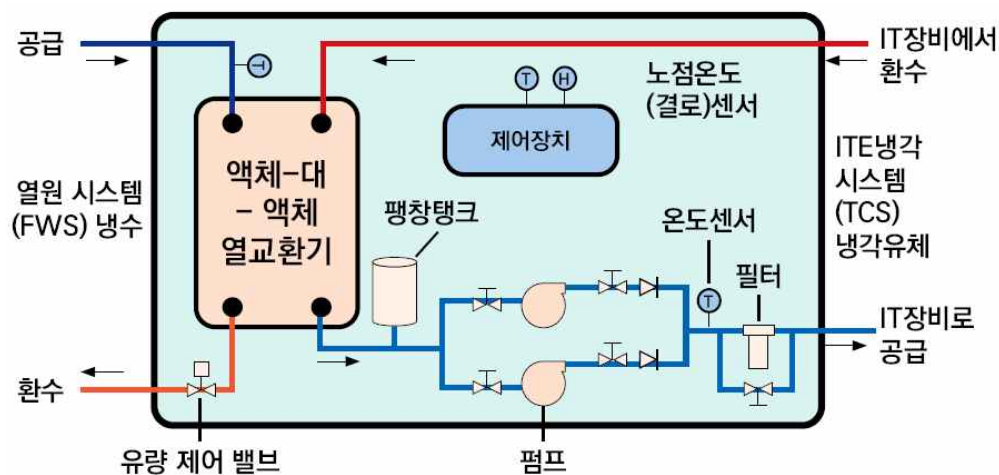
출처: ASHRAE

3.4 CDU 설계 기준

액체 냉각을 적용한 대부분 데이터센터의 핵심 구성요소 중 하나가 '고도로 조절된 IT 장비로 들어가는 냉각유체를 냉동기 등의 냉수 시스템으로부터 분리해 주는 장치'다. 이 장치는 CDU라고 명명된다[10, 11].

CDU는 액체 냉각 시스템에서 핵심적인 매개 장치로 기능한다. 앞서 언급했듯이, CDU는 TCS와 FWS 또는 CWS 간의 연결 지점으로서, 열교환 기능을 수행한다. 현재 TCS와 FWS/CWS에 대한 설계 기준이 점차 정립되고 있으며, 이를 통합해 실제 액체 냉각 시스템을 구현하기 위해선 CDU에 대한 명확한 설계 기준 정립이 마지막 퍼즐 조각이라 할 수 있다.

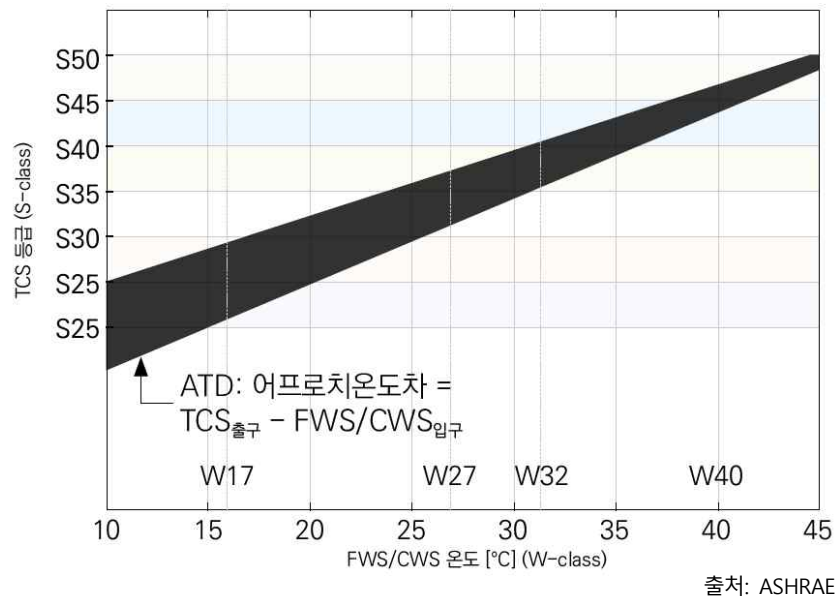
[그림 5]는 가장 일반적인 액체-대-액체 CDU를 보여준다. 액체-대-액체 열교환기를 사용하는 CDU는 일반적으로 판형 열교환기, 펌프(이중화 예비 장비 포함), 팽창 탱크, 설비 측 유량 제어 밸브, 미세 입자 필터, 그리고 제어 시스템을 포함한다. 이러한 구성요소들은 모듈화해 설치를 쉽게 하기 위해 캐비닛 내부에 설치된다. 액체-대-액체 CDU는 FWS와 IT 측 TCS라는 두 개의 독립된 냉각유체 순환을 갖도록 설계된다. TCS 순환을 FWS 순환과 분리함으로써 FWS의 오염물질, 온도 및 압력 이상 등으로부터 민감한 IT 장비를 효과적으로 보호할 수 있다. 이처럼 독립적인 냉각순환 경로를 구성함으로써 TCS 순환 경로는 CDU에서 IT 장비인 서버 랙까지 연결하는 경로로 국한된다.



[그림 5] 액체-대-액체 열교환 CDU 구성

CDU의 에너지 효율성 확보를 위한 핵심 설계 요소는 크게 두 가지로 나뉜다. 첫째는 펌프 동력 소비이며, 둘째는 TCS의 S-class, FWS/CWS의 W-class, 그리고 CDU 내 ATD(열교환 어프로치 온도차, Approach Temperature Difference)다. 펌프 동력은 CDU 내부 순환수의 압력 손실, 즉 IT 장비, 열교환기, 필터, 배관, 밸브 등을 통과하는 압력강하에 의해 결정된다. 이때 유량이 증가하면 ATD는 감소해 열교환 효율이 높아지지만, 동시에 펌프 전력 소비가 증가하게 되므로 설계 단계에서 적절한 절충이 필요하다. 또한, FWS 또는 CWS 측의 공급 온도는 TCS의 냉각유체 요구 온도에 따라 역으로 결정되며, 이로 인해 CDU가 담당하는 열교환 성능과 조건이 설계의 핵심이 된다.

[그림 6]은 CDU에서 FWS 측과 TCS 측 간의 온도 등급(S-class/W-class) 관계를 도식화한 예시다. 일반적으로 CDU에서 이뤄지는 열교환의 ATD는 4.4°C에서 8.3°C 수준이지만, S-class와 W-class 등급이 높아지는 경우 ATD는 2°C 수준까지 감소할 수 있다. 이는 고온 냉각수를 사용하는 시스템에서, 프로세서의 허용온도 한계와 직결되는 설계 변수이기도 하다[10].



[그림 6] TCS와 FWS/CWS에 기반한 CDU의 ATD

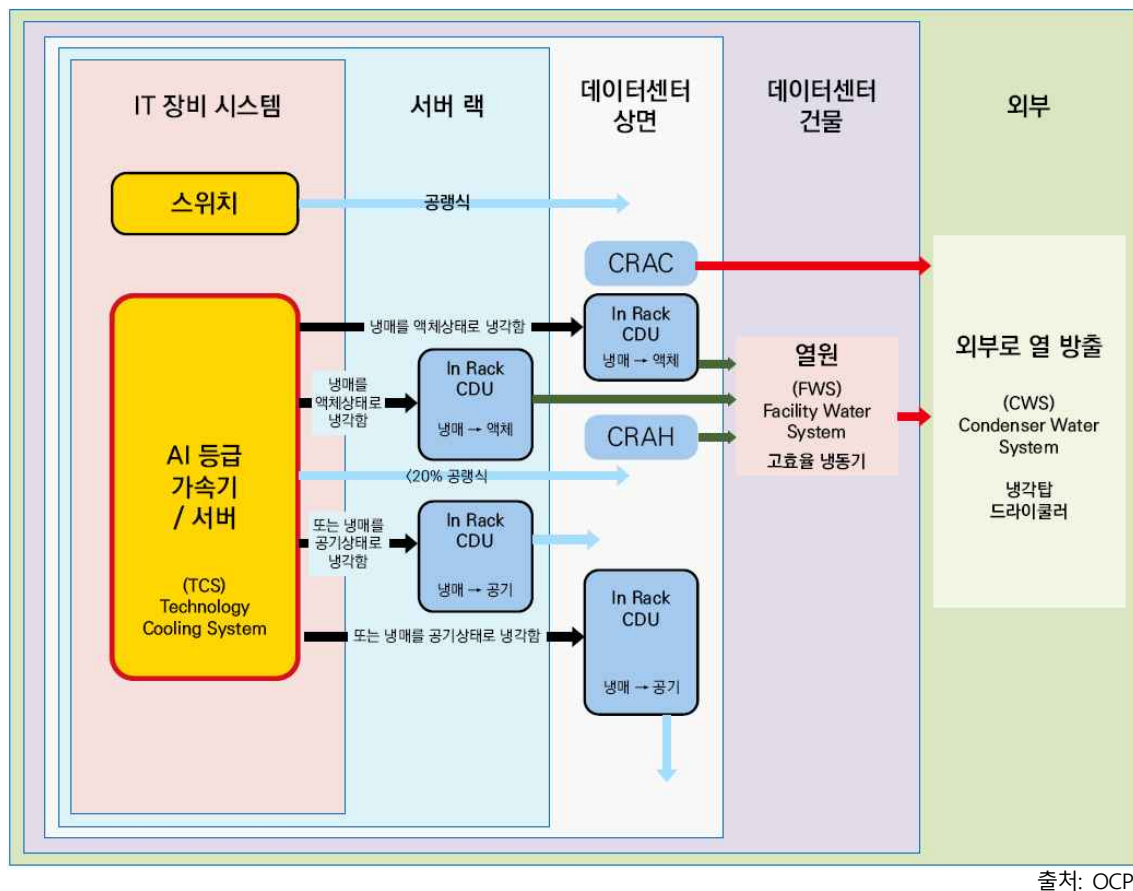
결론적으로, CDU는 단순한 열교환 장비를 넘어 수랭식 데이터센터의 설계 적합성과 운전 효율을 결정짓는 중심축이며, 이에 대한 정량적 설계 기준 확립은 향후 액체 냉각 시스템 확산의 전제 조건이다.

3.5 AIDC 액체 냉각 적용 개념

전체 범위인 [그림 7]은 AI 고밀도 데이터센터에서 DLC가 적용될 때의 열제거 경로와 시스템 경계를 계층적으로 나타낸 예시 개념도다. IT 장비 내부에서 시작해 서버 랙, 데이터센터 상면(서버룸), 건물 설비 영역, 그리고 외기에 이르기까지 단계적으로 확장되는 구조로 구성된다. 이는 열이 칩 수준에서 발생해 TCS, CDU, FWS, CWS를 거쳐 최종적으로 외부로 방출되는 전체 열전달 체계를 나타낸다.

- ① ITE Systems 영역: AI 가속기/서버가 배치되고, 이들은 고도의 TDP를 갖는 고성능 가속기를 의미한다. 해당 영역은 TCS로 표시돼 있으며, 칩 또는 서버 내부에서 발생한 열을 직접 제거하는 1차 냉각 루프에 해당한다. 한편 네트워크 스위치는 공랭식으로 냉각해, 모든 IT 장비가 액체 냉각을 적용받는 것은 아니다.
- ② 서버 랙 영역: TCS에서 제거된 열이 냉매 루프로 전달된다. 열을 흡수한 냉각유체가 응축 과정을 거쳐 다시 액체 상태로 냉각돼 순환된다. 랙 내부에는 In Rack CDU 또는 In Row CDU가 구성되고, 이는 냉매와 액체 간 또는 냉매와 공기 간 열교환을 수행하는 랙 단위 CDU 배치를 나타낸다. 또한 일부 20% 정도의 부하는 고밀도 환경에서도 공랭식을 병행한다.

- ③ 데이터센터 상면: 내부설치(In Rack) CDU와 공랭식 공조장비가 함께 배치된다. In Row CDU는 냉매와 액체 간 열교환을 수행하며 설비 측 냉수 시스템과 연결되고, 2상의 경우, In Row CDU는 냉매와 공기 간 열교환을 수행한다. 동시에 CRAC(Computer Room Air Conditioner) 및 CRAH(Computer Room Air Handler) 장비가 존재해, 액체 냉각과 공랭 기반 설비가 혼재하는 하이브리드 구조를 형성한다.
- ④ 건물 설비 영역: 냉열원이 위치하며, 냉동기가 포함될 수 있다. CDU에서 응축된 냉매 또는 전달된 열은 열교환기를 통해 냉수설비 시스템으로 전달된다. 이때 TCS와 FWS는 직접 혼합되지 않고 열교환기를 통해 분리돼 운전된다. 이는 압력 조건, 수질 관리, 운전 안정성 확보 측면에서 중요한 설계 원칙이다.
- ⑤ 건물 외부 영역: 최종적으로 열은 CWS를 통해 외부로 방출된다. 응축수 시스템은 냉각탑 또는 드라이쿨러와 연결돼 건물 외부 환경으로 열을 배출한다. 결과적으로 열전달 경로는 TCS → 냉매 루프 → CDU → FWS → CWS → 외기 순으로 이어지는 다단계 구조를 형성한다.



[그림 7] 액체 냉각 열전달 경로 및 시스템 구성 사례

3.6 설계 관점의 주요 고려사항

액체 냉각 시스템의 설계는 단순한 열제거 성능뿐 아니라 시스템 안정성과 운영 조건을 동시에 고려해야 한다. 특히 냉각유체, 냉(각)수 공급 온도, 유량, 압력 손실 및 열교환 효율은 시스템 성능에 중요한 영향을 미치는 주요 변수다. 또한 액체 냉각은 누수, 유체오염, 유지관리처럼 공랭 시스템과 다른 위험 요소를 포함하고 있어, 이에 대한 신뢰성 확보가 필수적이다. 이러한 설계 및 운영 기준은 ASHRAE에서 제시하는 액체 냉각 가이드라인을 통해 체계적으로 정의되고 있다.

4. 글로벌 액체 냉각 표준화 동향

AIDC의 액체 냉각 기술 확산과 함께 관련 표준화도 빠르게 진행되고 있으며, 현재는 설계 기준, 성능 지표, 장비 인터페이스를 중심으로 다층적인 표준체계가 형성되고 있다. 특히, 글로벌 표준화는 ASHRAE, ISO/IEC, 그리고 OCP(Open Compute Project)를 중심으로 진행되고 있다[그림 8].



출처: ASHRAE, OCP, ISO

[그림 8] 액체 냉각 글로벌 기준(표준) 관련 기관 예시

4.1 ASHRAE 중심 설계 기준 표준화ASHRAE TC 9.9는 데이터센터 냉각 분야에서 가장 핵심적인 기술 기준 위원회로, 액체 냉각 시스템의 설계 및 운영 기준을 지속적으로 제시하고 있다. 초기에는 공랭식 환경을 중심으로 가이드라인이 구성됐으나, 최근에는 액체 냉각 기술 확산에 따라 TCS, CDU, FWS/CWS 구조를 포함한 통합 설계 기준이 제시되고 있다. 특히 S-class와 W-class 개념은 액체냉각 시스템 설계의 핵심 기준으로 자리 잡고 있으며, CDU 설계 기준 또한 별도의 기

술 문서로 구체화되고 있다. 이와 같은 ASHRAE 기준은 현재 글로벌 데이터센터 설계에서 사실 표준(De Facto Standard)으로 활용되고 있다.

4.2 ISO/IEC 기반 성능 지표 표준

ISO/IEC에서는 데이터센터 에너지 성능을 평가하기 위한 KPI(Key Performance Indicator) 중심 표준을 제시하고 있으며, 대표적으로 ISO/IEC 30134 시리즈가 있다. 이 표준은 PUE(Power Usage Effectiveness)를 포함한 다양한 성능 지표를 정의하고 있으며, 데이터센터 운영 성능을 정량적으로 평가하는 기준으로 활용된다. 다만, ISO/IEC 표준은 주로 성능 평가에 초점을 두고 있어 액체 냉각 시스템의 구체적인 설계 기준은 포함하지 않는다[3].

4.3 OCP 및 산업 주도 표준화

OCP는 대규모 클라우드 사업자를 중심으로 형성된 산업 협의체로, 액체 냉각 기술의 실질적인 적용 기준을 제시하고 있다. 특히 고밀도 AIDC 환경에서 요구되는 냉각 성능과 시스템 인터페이스를 반영한 설계 가이드 및 기술 백서를 통해 산업 적용성을 높이고 있으며, 최근에는 2상 냉각 및 고온수 운전 조건에 대한 논의도 활발히 진행되고 있다. OCP는 표준화 기구라기보다는 산업 주도의 기술 가이드라인 성격을 가지지만, 실제 적용 측면에서는 중요한 영향력을 가지는 것으로 평가된다.

5. 국내 AIDC 액체 냉각 적용 현황 및 한계

AIDC의 고밀도화와 함께 액체 냉각 기술은 글로벌 시장에서 빠르게 확산되고 있으며, 국내에서도 일부 대규모 데이터센터를 중심으로 도입이 시작되고 있다. 그러나 현재 국내 데이터센터 대부분은 여전히 공랭 기반 냉각 시스템을 중심으로 운영되고 있으며, 액체 냉각 기술은 초기 적용 단계에 머물러 있는 상황이다.

특히 국내 데이터센터는 기존 공랭식 인프라를 기반으로 설계·운영돼 왔기 때문에, 액체 냉각 시스템 도입 시 기존 설비와의 연계, 운영 안정성 확보, 유지 관리체계 구축 등에서 다양한 기술적 과제가 존재한다. 또한 고밀도 AI 서버 환경에서 요구되는 냉각 성능을 충족하기 위해서는 기존 설계 기준을 넘어서는 새로운 접근이 필요하다.

현재 글로벌 수준에서는 ASHRAE를 중심으로 S-class, W-class, CDU 설계 기준이 체계적으로 정립되고 있으나, 국내에서는 이러한 기준을 반영한 설계 및 운영 지침이 충분히 마련되지 않은 상태다. 이로 인해 동일한 액체 냉각 시스템이라 하더라도 프로젝트별로 상이한 설계 기준이 적용되며, 표준화된 설계체계가 부재한 상황이다.

또한 액체 냉각 시스템의 핵심 요소인 CDU 설계 기준과 성능 평가 방법, 그리고 시스템 단위의 시험·검증체계가 국내에선 아직 명확히 정의되지 않고 있다. 이는 액체 냉각 시스템의 신뢰성 확보와 상용화 확대에 있어 중요한 제약 요인으로 작용하고 있다.

결과적으로, 국내 AIDC 액체 냉각 기술은 글로벌 기술 수준과 비교할 때 적용 경험과 표준화 측면에서 격차가 존재하며, 이를 해소하기 위한 체계적인 표준개발과 인증 기반 구축이 필요한 상황이다.

6. 맺음말

AIDC가 고밀도·고발열 환경으로 빠르게 전환되면서 기존 공랭식 냉각 방식의 한계를 극복하기 위한 액체 냉각 기술의 도입이 필수적인 요소로 자리 잡고 있다. 특히 DLC 및 액침냉각 기술은 칩 수준에서의 열제거와 시스템 에너지 효율 향상 측면에서 핵심적인 대안으로 부상하고 있다.

글로벌 수준에서는 ASHRAE를 중심으로 TCS, CDU, FWS/CWS로 구성되는 액체 냉각 시스템 구조와 함께 S-class 및 W-class 기반 설계 기준이 체계적으로 정립되고 있으며, ISO/IEC 및 OCP를 통한 성능 지표와 산업 적용 가이드가 병행돼 다층적인 표준체계가 형성되고 있다.

반면 국내의 경우 액체 냉각 기술 적용은 초기 단계에 머물러 있으며, 설계 기준, 성능 평가, 시험·인증체계 측면에서 표준화 기반이 충분히 구축되지 않은 상황이다. 특히 S-class 및 W-class 기반 설계 기준과 CDU 설계·성능 평가 방법의 부재는 시스템 적용 확산의 주요 제약 요인으로 작용하고 있다.

향후 국내 AIDC 인프라 경쟁력 확보를 위해서는 글로벌 표준과의 정합성을 기반으로 한 한국형 액체 냉각 설계 기준 정립이 필요하며, 이를 지원하기 위한 시험·검증 및 인증체계 구축이 병행돼야 한다. 또한 표준화 활동을 통해 설계, 운영, 성능 평가 전반을 포괄하는 통합 기준을 마련하고, 국제표준화 기구와의 연계를 통해 기술 주도권 확보가 요구된다. 결론적으로, 액체 냉각 기술은 AI 팩토리 시대 데이터센터 인프라의 핵심 요소이며, 이를 뒷받침하는 표준화와 인증체계 구축이 향후 산업 경쟁력을 결정짓는 중요한 기반이 될 것이다.

[참고문헌]

- [1] Cho, J., & Moon, J. H. (2025). Numerical coupling of energy efficiency and thermal performance for cold plate cooling optimization in high-density compute AI data centers, *Energy and Buildings*, 348, 116441.
- [2] Gheni, M., Kerskes, H., & Stergiaropoulos, K. (2026). Operational analysis of the cooling system in a direct liquidcooled data center: A measurement and simulation study on the impact of supply water temperature, *Applied Energy*, 403(A), 127061.
- [3] Patel, A., Yogi, K., Sahu, G., & Wei, T. (2025). Multi-chip jet impingement cooling for heat dissipation in 2.5D integrated system with 1 kW+ thermal design power, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 244, 126978.
- [4] Kulkarni, D., Tipton, R., Leka, E., Bankston, J., Wang, Q., & King, J. (2025). White paper: Pumped 2P refrigerantbased direct liquid cooling (DLC) technology for next generation AI clusters with high TDP accelerators, Open Compute Project.
- [5] Alipanah, M., & Moghaddam, S. (2020). Ultra-low pressure drop membrane-based heat sink with 1000 W/cm² cooling capacity and 100% exit vapor quality, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 161, 120312.
- [6] Cho, J. (2024). Assessing design and energy efficiency of liquid-based cooling systems for data centers, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 40(5), 145-156.
- [7] Demetriou, D., Quirk, D., & Davidson, T. (2025). Energy efficiency of liquid-cooled data

centers, ASHRAE Journal, 67(3), 18-22.

- [8] Davidson, T., Quirk, D., Seter, J., & Demetriou, D. (2024). New TC 9.9 Technical Bulletin Liquid Cooling: Resiliency guidance for cold plate deployments, ASHRAE Journal, 66(12), 22-25.
- [9] ASHRAE. TC 9.9. (2013). Liquid Cooling Guidelines for Datacom Equipment Centers (2nd ed.), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- [10] Quirk, D., Demetriou, D., Davidson, T., & Deal, J. (2025). Coolant distribution units Part 1: Design, ASHRAE Journal, 67(6), 20-24.
- [11] ASHRAE. (2024). Liquid cooling guidelines for datacom equipment centers, 4 coolant distribution unit, ASHRAE TC 9.9 Datacom Encyclopedia, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.

※ 출처: TTA 저널 제224호