



컴퓨터이셔널 스토리지: 하드웨어 아키텍처와 최신 연구

정글 8기-23 정승민

소개 (Introduction)

현대의 데이터 처리 환경에서는 막대한 데이터 이동으로 인한 **병목현상**이 심각한 문제로 대두되고 있습니다. 기존 **폰노이만 구조**에서는 저장장치에 있는 데이터를 모두 **호스트 CPU 메모리**로 불러와 처리해야 하므로, **데이터 전송**과 **I/O**가 전체 시스템의 성능을 제한하게 됩니다. 이러한 한계를 극복하기 위해 데이터가 있는 곳에서 직접 연산을 수행하는 개념이 등장했으며, 그중 하나가 **컴퓨테이션 스토리지**입니다. 컴퓨테이션 스토리지는 말 그대로 스토리지 장치에 연산 능력을 통합한 것으로, 저장장치 내부에서 데이터 처리 작업을 수행함으로써 CPU로의 불필요한 데이터 이동을 줄여주는 기술입니다.

컴퓨테이션 스토리지란 무엇인가?

컴퓨테이션 스토리지는 저장장치 내에 프로세서나 가속기와 같은 연산 자원을 내장하여, 데이터를 호스트로 이동하지 않고 저장장치에서 직접 처리하는 근접 데이터 처리 아키텍처를 의미합니다. 전통적인 스토리지(예: 일반 SSD/HDD)가 데이터의 저장과 전달만 담당하는 반면, 컴퓨테이션 스토리지는 저장과 연산을 병행합니다. 예를 들어, 일반적인 SSD에서는 데이터베이스 질의 시 모든 데이터를 CPU로 전송해야 하지만, 컴퓨테이션 스토리지 드라이브(CSD)에서는 질의에 해당하는 필터링이나 변환을 SSD 내부에서 수행하고 결과만 호스트에 전달할 수 있습니다.

이처럼 데이터를 가져와서 처리 하는 기존 방식 대신 데이터가 있는 곳에서 처리하는 패러다임으로 전환함으로써, 시스템 전반의 성능과 에너지 효율을 크게 향상시킬 수 있습니다.

하드웨어 아키텍처 개요 (Hardware Architecture)

컴퓨테이션 스토리지의 하드웨어 아키텍처는 크게 스토리지 부분(NAND 플래시 메모리 및 스토리지 컨트롤러)과 연산 부분(내장 프로세서/가속기와 메모리)으로 구성됩니다. SNIA(스토리지 네트워크 산업협회)의 정의에 따르면, 컴퓨테이션 스토리지 드라이브(CSD)는 영구적 데이터 저장소와 더불어 하나 이상의 컴퓨테이션 스토리지 기능(CSF)을 실행할 수 있는 연산 자원을 포함하는 저장장치입니다. 즉, CSD 내부에는 기존 SSD 컨트롤러와 플래시 외에 추가적인 프로세싱 엔진, 이를 보조하는 DRAM 등 디바이스 메모리, 그리고 필요한 버스 및 인터페이스 회로가 포함됩니다. 이러한 구조를 통해 CSD는 일반 SSD처럼 블록 장치로 동작하면서도, 호스트의 명령에 따라 자체적으로 데이터 연산 작업을 수행할 수 있습니다.

- **완전 통합형(온-디바이스 처리):** FPGA나 전용 프로세서가 SSD 컨트롤러 내부 또는 SSD와 동일 기판에 탑재된 형태로, 스토리지 미디어와 연산 유닛이 한 장치에 있습니다. 삼성 SmartSSD가 이에 해당하며, 1세대 SmartSSD는 Xilinx FPGA를 SSD에 내장했고 2세대는 AMD Xilinx Versal SoC를 활용하여 성능을 크게 향상시켰습니다.

- **프로세서 카드형(버스 인접):** 연산 유닛(FPGA/CPU 모듈)이 별도의 PCIe 카드로 존재하고, 일반 SSD와 같은 버스에 연결되어 DMA 등으로 데이터를 주고받는 형태입니다. 이는 **컴퓨테이셔널 스토리지 프로세서(CSP)**라 불리기도 하며, 예를 들어 Eideticom사의 NoLoad CSP는 별도 PCIe 카드로 SSD와 Peer-to-Peer DMA를 수행해 연산을 처리합니다.

- **스토리지 어레이형:** 한 개의 프로세서 모듈이 다수의 SSD 드라이브를 연결하여 어레이 컨트롤러처럼 동작하는 구조입니다. Dell EMC의 DFC (데이터 페이트 컴퓨팅) 아키텍처가 이런 방식으로, 멀티코어 ARM 프로세서와 가속기를 탑재한 모듈이 여러 SSD를 관리하며 데이터 연산을 수행합니다.

이러한 다양한 형태에도 불구하고 공통적으로, 컴퓨테이셔널 스토리지의 데이터 경로는 스토리지 내부 연산을 우선하도록 설계됩니다. 예를 들어 NAND플래시에서 읽혀진 데이터는 우선 장치 내의 FPGA/프로세서로 전달되어 필터링, 집계, 압축 등의 처리를 거치고, 최종 결과만 호스트로 전송됩니다. 이는 전통적인 경로(플래시 -> SSD 컨트롤러 -> 호스트 메모리 -> CPU처리)를 우회하여 불필요한 데이터 이동과 복사를 최소화합니다. 예를 들어 SmartSSD와 GPU를 PCIe P2P (Peer-to-Peer) DMA로 연결하여, SSD에서 추출된 결과를 CPU 개입 없이 GPU 메모리로 곧바로 전달하는 시스템도 연구되고 있습니다.

해당 활용 사례는 데이터센터 및 빅데이터 분석, 인공지능/기계학습 파이프라인, 엣지 컴퓨팅 및 IOT 등 고성능 컴퓨팅 분야나 시뮬레이션 결과의 실시간 분석 같은 분야에서 다양하게 사용되고 있습니다.

결론

컴퓨테이셔널 스토리지는 데이터가 있는 곳에 연산을 붙인다는 직관적이면서도 강력한 아이디어로서, 데이터 폭증 시대의 새로운 해법으로 주목받고 있습니다. 하드웨어적으로는 SSD 내부에 프로세싱 엔진과 메모리를 통합하는 형태로 구현되며, 이를 통해 전통적인 스토리지-메모리-CPU 구조를 일부 재구성합니다. 최근 학술 연구들은 컴퓨테이셔널 스토리지의 가능성을 다양한 각도에서 탐색하여, 데이터센터의 성능 향상, AI 워크로드 최적화, 분산시스템의 전력 효율 개선 등 긍정적인 결과들을 보여주고 있습니다. 산업계 또한 실제 제품(Samsung SmartSSD, ScaleFlux CSD 등)

을 출시하고 표준화에 나섬으로써 생태계 조성에 기여하고 있습니다.

물론 해결해야 할 과제들도 남아 있습니다. 소프트웨어 스택의 성숙, 활용 사례별 최적화 기법, 안전성 확보등은 앞으로의 연구 개발 방향을 결정짓는 중요한 요소입니다. 특히 스토리지와 컴퓨팅의 경계가 허물어지면서 생기는 새로운 문제들은 학제간 협력을 통해 풀어야 할 것입니다. 예를 들어, 운영체제와 파일시스템은 컴퓨테이션 스토리지를 인지하고 자원을 할당하는 방식으로 진화해야 하고, 데이터베이스나 빅데이터 프레임워크도 NDP-aware한 쿼리 최적화 기능을 가져야 할 것입니다.

종합하면, 컴퓨테이션 스토리지는 기존 아키텍처의 한계를 뛰어넘어 데이터 중심 시대의 요구를 충족시키고자 하는 노력의 산물이며, 앞으로도 스토리지 하드웨어의 지능화라는 큰 흐름 속에서 발전해나갈 것으로 보입니다. AI, 엣지, 클라우드로 대표되는 미래 컴퓨팅 환경에서, 컴퓨테이션 스토리지는 보다 효율적이고 응답성 높은 시스템을 구축하는 핵심 퍼즐 조각 중 하나로 자리매김할 것입니다.