

# Computer Hardware & Industry Perspective

# ARM SoC가 구조적으로 발열에 강한 이유

## 서론

최근 프로세서 설계에서 중요한 화두 중 하나는 발열 관리이다. 특히 모바일 기기와 같이 배터리 효율성과 발열 관리가 중요한 환경에서 ARM 기반의 SoC(System-on-Chip)는 뛰어난 성능을 보여주고 있다. 본 보고서에서는 ARM SoC가 구조적으로 발열에 강한 이유를 명령어 구조, 칩 설계 효율성, 제조 공정, 이기종 컴퓨팅 구조 및 소비전력 관리 기술을 중심으로 분석하고, x86 기반 CISC 구조와의 차이, Apple M1과 인텔 아키텍처의 구조적 차이, TSMC 공정 기술의 영향, big.LITTLE 구조의 특성, 낮은 TDP 전력 설계 기술에 대한 심층 설명을 통해 실제 시스템 설계 관점에서의 발열 억제 메커니즘을 논의하고자 한다.

## 본론

### 1. 명령어 구조의 효율성 (RISC vs. CISC)

RISC(Reduced Instruction Set Computing)는 명령어를 단순하고 짧게 유지하여, 명령어 디코딩과 실행을 빠르게 수행할 수 있도록 설계된 구조이다. 명령어 수가 적고 고정된 포맷을 사용하기 때문에, 프로세서 내부의 제어 회로가 간단해지고, 트랜지스터 사용량과 전력 소모가 감소하게 된다. 반면 CISC(Complex Instruction Set Computing)는 다양한 길이와 복잡한 명령어를 제공하여, 고급 기능을 단일 명령어로 수행할 수 있지만, 명령어 디코딩이 복잡해지고 회로가 방대해지며 발열이 증가하게 된다. 실제로 인텔 x86 아키텍처는 CISC 기반으로, 명령어 디코더가 RISC 마이크로-오퍼레이션으로 분해하는 복잡한 단계를 거치기 때문에 내부 발열과 전력 소모가 큰 구조적 단점을 지닌다.

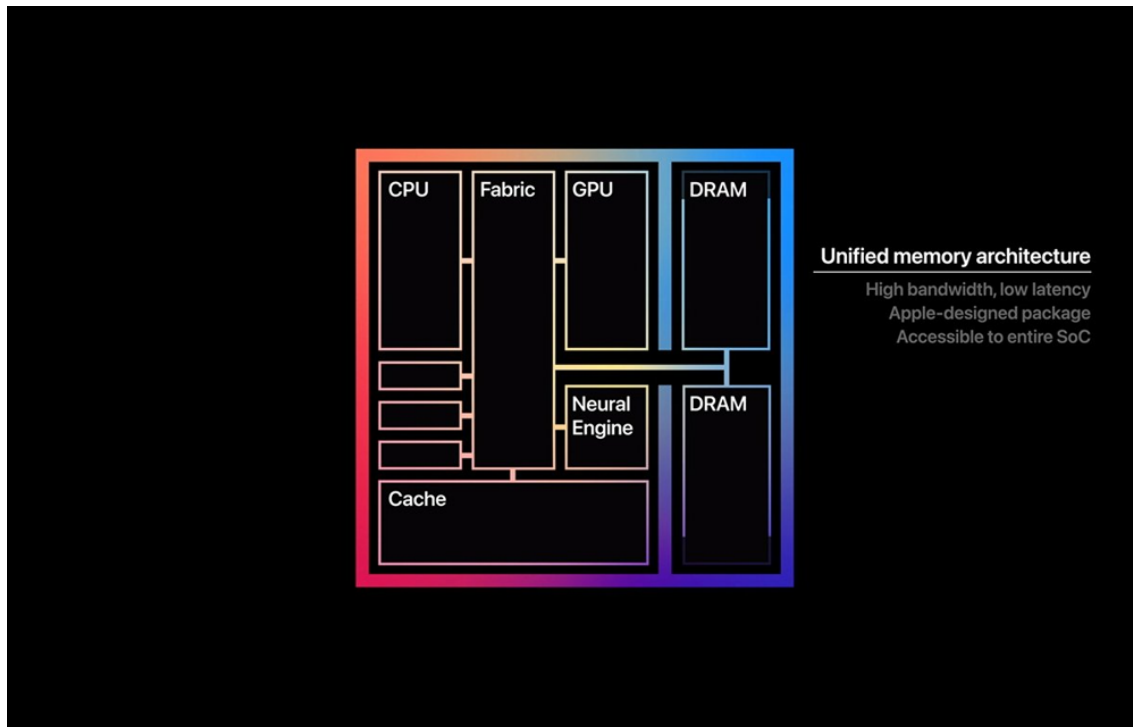
### 2. Apple M1과 인텔 아키텍처의 구조적 차이

Apple의 M1 칩은 ARMv8 기반 RISC 구조를 채택하여 높은 전력 효율을 구현하고 있다. M1 칩은 CPU, GPU, Neural Engine, 메모리 컨트롤러 등을 단일 패키지에 통합한 SoC이며, 통합 메모리 아키텍처를 통해 모든 연산 장치가 단일 DRAM 공간을 공유함으로써 데이터 복사 및 이동 비용을 줄이고 있다. 반면, 인텔의 전통적인 설계는 CPU, GPU, 메모리 등이 서로 분리되어 있으며, 칩 간 버스를 통한 통신에 많은 전력과 시간이 소모된다. 또한 M1은 big.LITTLE 구조를 적용해 고성능과 저전력 코어를 조합하여 작업 부하에 따라 효율적으로 스케줄링할 수 있도록 설계되어 있다. 이와 달리 인텔 아키텍처는 대부분 동질적인 고성능 코어로 구성되어 있어 전체적으로 높은 전력을 요구하게 된다.

### 3. SoC(System-on-Chip)의 통합적 설계

SoC 설계는 다양한 기능을 단일 칩에 통합하여 데이터 이동 거리와 버스 병목을 줄이고 전력 소모를 최소화할 수 있다. Apple의 M1 칩은 통합 메모리 아키텍처를 채택하여 CPU와 GPU, NPU 등이 동일한 물리 메모리 공간을 공유하도록 하였으며, 이는 내부 데이터 전송을 간소화

하여 열 발생을 억제할 수 있도록 한다.



#### 4. 최신 미세 공정 기술 활용: TSMC의 5nm 공정

TSMC는 Apple M1 칩을 포함한 최신 ARM SoC에 5nm 공정을 적용하였다. 이 공정은 트랜지스터의 게이트 길이를 단축시켜 소자의 집적도를 향상시키고, 문턱 전압(threshold voltage)을 낮추어 동일 클럭 속도에서 더 낮은 전력으로 동작하게 만든다. 또한 전기 저항과 누설 전류를 줄임으로써, 전체적인 발열량을 감소시키는 효과를 가진다. 5nm 공정 기반 SoC는 7nm 대비 약 30% 낮은 전력을 소비하면서도 동일한 성능을 유지할 수 있어, 고성능 연산과 전력 효율 간의 균형을 효과적으로 달성하고 있다.

#### 5. 이기종 컴퓨팅 구조(big.LITTLE)

big.LITTLE 구조는 ARM이 개발한 전력 효율 최적화 구조로, 고성능 작업에 적합한 big 코어와 저전력 환경에 적합한 LITTLE 코어를 하나의 프로세서에 통합하여, 부하 상황에 따라 적절한 코어에 작업을 분배하는 방식이다. 예를 들어, 백그라운드 앱 실행이나 음악 재생 등의 작업은 LITTLE 코어에서 수행하고, 영상 편집이나 컴파일처럼 고성능을 요구하는 작업은 big 코어가 맡는다. 이러한 구조는 과도한 발열과 에너지 낭비를 방지하고, 사용자의 체감 성능을 유지하면서도 전반적인 전력 소비와 발열량을 최소화할 수 있다. Apple M1은 Firestorm과 Icestorm이라는 두 종류의 코어를 활용하여 이러한 이기종 컴퓨팅 구조를 구현하고 있다.

#### 6. 낮은 TDP와 전력 관리 기술

TDP(Thermal Design Power)는 프로세서가 안정적으로 동작할 수 있도록 요구되는 최대 열 설계 전력이다. ARM SoC는 설계 초기부터 낮은 TDP를 목표로 하여, 5W에서 15W 수준의 전력 소모만으로도 고성능을 제공할 수 있도록 최적화되어 있다. 이러한 전력 설계는 고효율

코어 설계, 동적 전압 조절(DVFS), 클럭 게이팅(clock gating), 파워 게이팅(power gating)과 같은 기법을 통해 구현되며, 필요할 때만 회로에 전력을 공급하여 불필요한 전력 낭비를 줄인다. Ampere Altra와 같은 서버용 ARM SoC는 80코어 이상의 구성임에도 불구하고 TDP를 200W 내외로 유지하며, 이는 동급 인텔 서버 CPU보다 훨씬 낮은 수치이다. 그 결과, ARM SoC는 고성능 서버 환경에서도 냉각 효율을 높이고 발열을 억제할 수 있는 구조적 이점을 갖는다.

## 7. 하드웨어와 소프트웨어의 통합 최적화

ARM SoC는 하드웨어와 소프트웨어가 긴밀하게 통합되어 최적화되어 있다. 특히 Apple은 macOS 운영체제를 자사의 M1 칩에 맞춰 직접 설계함으로써 스케줄링, 메모리 접근, 전력 관리 등에서 운영체제가 칩의 특성을 최대한 활용할 수 있도록 최적화하였다. AWS Graviton3와 같은 서버용 ARM SoC도 하이퍼바이저 및 클라우드 네이티브 소프트웨어와 함께 공동 개발되어, 불필요한 연산 자원을 줄이고 특화된 연산 가속기를 활용해 발열과 에너지 소모를 최소화하고 있다.

## 결론

ARM SoC가 발열 관리에 강한 이유는 아키텍처 단순성, 통합 설계, 최신 공정 기술 활용, 이기종 코어 구조, 낮은 TDP 설계 및 하드웨어-소프트웨어 통합 최적화 등 다양한 요소가 복합적으로 작용하기 때문이다. RISC 기반 설계를 통해 명령어 처리의 효율을 극대화하고, SoC 구조를 통해 내부 통신 에너지를 줄이며, 미세 공정 기술과 전력 관리 기법을 결합하여 발열을 효과적으로 제어할 수 있다. 이러한 특성은 모바일 및 팬리스 환경뿐만 아니라 데이터센터와 같은 고밀도 서버 환경에서도 ARM SoC의 전력 효율성과 냉각 관리 측면에서의 경쟁력을 강화하고 있다. 결국, 물리적 한계를 극복하기 위해서 소프트웨어적인 측면의 발전 뿐만 아니라 열 관리를 효율적으로 하기위해서 전력이나, 쿨링 방식등 구조적으로나, 설계적으로 더 효율적일 수 있는 방식을 찾기 위해 여러번의 시도를 하는 것으로 보인다.

---

## 참고문헌 및 출처 (한 줄 요약)

### AnandTech - Apple M1 Deep Dive

Apple M1의 SoC 구조, 성능, 전력 효율을 상세 분석한 기술 리뷰

<https://www.anandtech.com/show/16226/apple-silicon-m1-a14-deep-dive>

### Apple 공식 개발자 문서 - M1 아키텍처 개요

Apple Silicon의 설계 철학 및 RISC 기반 구조 소개

<https://developer.apple.com/documentation/apple-silicon>

### ARM - big.LITTLE Technology Overview

ARM 이기종 컴퓨팅 구조의 원리와 전력 절감 효과 소개

<https://www.arm.com/technology/big-little>

### TSMC - 5nm Process Technology Brief

TSMC의 5nm 공정이 전력 소비 및 발열에 미치는 영향 설명

<https://www.tsmc.com/english/dedicatedFoundry/technology/5nm>

### AWS Graviton3 소개 페이지

Graviton3 ARM 서버 프로세서의 전력 효율성과 서버 적용 사례 소개

<https://aws.amazon.com/ec2/graviton/>

### Ampere Computing - Altra 프로세서 백서

ARM 기반 서버용 SoC의 고성능 저전력 구조 분석

<https://amperecomputing.com/products>

### NotebookCheck - Apple M1 구조 설명 이미지

Apple M1의 SoC 내부 통합 구조 시각 자료 제공

<https://www.notebookcheck.net>

### ResearchGate - big.LITTLE 구조 도식

ARM big.LITTLE 구조를 설명하는 학술 이미지

<https://www.researchgate.net>

### EEWorld Online - RISC vs. CISC 비교 도식

명령어 구조의 차이를 시각적으로 설명하는 기술 블로그

<https://www.eeworldonline.com>

### Ars Technica - Apple Silicon 효율성 분석 기사

Apple M1의 에너지 효율과 발열 성능에 대한 외부 분석

<https://arstechnica.com>

---