

chapter 2

에너지 하베스팅 기반
인터미턴트 컴퓨팅 기술

김진미 || 한국전자통신연구원 책임연구원
 전승협 || 한국전자통신연구원 선임연구원
 차승준 || 한국전자통신연구원 선임연구원
 정연정 || 한국전자통신연구원 책임연구원
 람닉 || 한국전자통신연구원 Post-Doc
 정성인 || 한국전자통신연구원 책임연구원

I. 서론

현대 사회의 기반이 되는 정보처리와 컴퓨팅 기술은 컴퓨터가 수단의 전부였던 일방적인 정보화 사회를 시작으로 발전하여 인터넷을 기반으로 하는 모바일 사회에 이르게 되었다. 모바일 사회에서는 상호작용에 편리한 스마트폰이 주요 수단이 되고 있고 더불어 사물 인터넷, 인공지능, 빅데이터, 클라우드컴퓨팅, 모바일 네트워크 등의 기술 발달로 인해 초연결 사회로 급격하게 진화하고 있다. 초연결 사회의 정보시스템은 사람, 사물, 공간, 데이터 등 모든 것이 네트워크에 연결되어 정보가 공유되고 사회 안전망과 생활 교통망 등 다양한 인프라 및 산업과 결합하여 적극적으로 활용된다[1]. 가속화되고 있는 미래 변화에 대응하기 위해 정보시스템의 컴퓨팅 기술 역시 여러 분야에서 활용되는 시스템에

* 본 내용은 김진미 책임연구원(☎ 042-860-4885, jinmee@etri.re.kr)에게 문의하시기 바랍니다.

** 본 내용은 필자의 주관적인 의견이며 IITP의 공식적인 입장이 아님을 밝힙니다.

***본 고는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2014-3-00035, 매니코어 기반 초고성능 스케일러블 OS 기초연구(차세대 OS 기초연구센터))

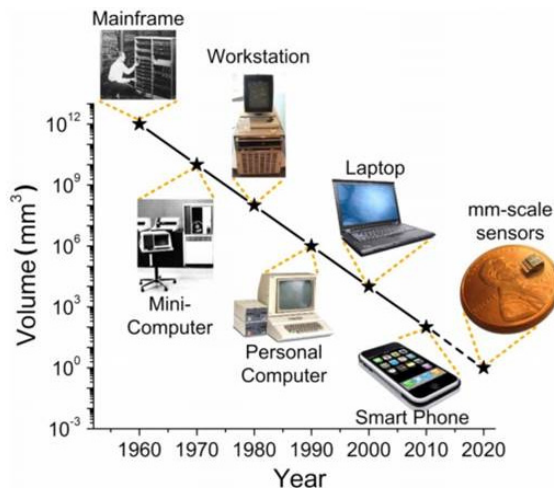
	정보화사회	모바일사회	초연결사회
수단	컴퓨터	스마트폰	초연결 네트워크
패러다임	디지털화, 전산화	온라인화, 소셜화	지능화, 사물정보화
시스템 (유통, 교육, 공공)	오프라인(물리적 공간)	온라인(가상공간)	오프라인과 온라인 융합
통신	유선전화	무선전화(3G, LTE)	무선전화(5G)
커뮤니케이션	우편	E-mail	SNS
교통	내연기관	그린카, 네비게이션	ITS, 자율주행차

〈자료〉 참고문헌 [1]의 그림을 사용했으며 이는 삼성KPMG 경제연구원에서 한국정보화진흥원 자료를 재구성

[그림 1] 사회 변화와 초연결 사회의 도래

따라 적극적으로 다각화되고 있다.

벨의 법칙(Bell's Law)에 따르면 주요 컴퓨터 시스템 구조는 10여 년을 주기로 새롭게 등장하며, 그 크기는 이전의 시스템보다 대략 100배 작아져 더욱 소형화되고 더 값싼 컴퓨터의 탄생을 예고하고 있다([그림 2] 참조)[2],[3]. 즉, 초연결 사회에서는 초저전력의 마이크로프로세서를 장착하는 밀리미터 크기의 완벽한 컴퓨팅 시스템이 활용될 것으로



〈자료〉 참고문헌 [3]의 그림을 사용했으며 이는 참고문헌 [2] Bell's Law 의 예측을 재구성

[그림 2] Bell's Law, 컴퓨팅 시스템의 소형화 예측

예측할 수 있다.

상호 유기적인 소통이 가능하도록 모든 것이 서로 연결된 환경에서는 전기와 통신 등 사회의 기반이 되는 인프라가 보장되어야 하고, 이를 기반으로 네트워크에 연결된 모든 객체가 끊임 없이 연결되는 것이 필요하다. 사용자가 서비스를 받고자 할 때 대부분의 환경은 인터넷을 통하여 전력망과 네트워크망을 활용하여 서비스를 보장받기 때문이다. 인터넷이 끊기고 전력을 공급 받지 못하면 언제든 서비스를 받지 못하는 정보가 단절된 환경에 맞닥뜨릴 수가 있는 것이다.

특히, 각종 사물에 센서와 통신 기능을 내장하여 인터넷에 연결하는 사물인터넷 환경의 기기에서 전력 공급이 원활하지 못하면 클라우드를 비롯한 주요 인프라에 안전하게 연결할 수 없다. 이러한 상황을 해결하기 위해서는 사람이 개입하지 않더라도 전력을 공급하는 방법이 필요하며, 간헐적인 에너지 공급 환경에서도 신뢰성을 보장할 수 있는 컴퓨팅 기술이 필요하다.

인터미턴트 컴퓨팅(Intermittent Computing)은 전력 공급이 불안정한 환경에서 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)으로 얻어진 전력으로 신뢰성을 보장하며 동작하는 컴퓨팅 기술이다. 에너지 하베스팅이란 태양 에너지 등 외부의 에너지를 수집하여 전기에너지로 활용하는 기술이며 간헐적인 파워의 온/오프 환경에서도 소프트웨어의 데이터 일관성과 신뢰성을 보장해야 한다.

데이터를 수집하고 저장하고 전송할 수 있는 인터미턴트 컴퓨팅 시스템을 위해 에너지 하베스팅 장치 기술과 그 장치에 필요한 소프트웨어를 연동하는 기술이 일차적으로 필요하다. 또한, 간헐적으로 파워를 온/오프 할 때에도 데이터의 일관성을 유지하기 위한 메모리 처리 기술 그리고 바르고 적합한 실행에 필요한 인터미턴트 컴퓨팅 프로그래밍 모델과 실행 제어의 흐름을 관리하는 기술을 확보할 필요가 있다.

본 고의 II장에서는 인터미턴트 컴퓨팅에서 해결해야 할 문제점과 이에 필요한 기술 동향에 관해서 설명한다. III장에서는 IoT 등 임베디드 환경, 통신 장비, 웨어러블 장치 및 데이터센터 컴퓨팅 환경까지 적용이 가능한 인터미턴트 컴퓨팅 기술이 어떻게 초연결 사회에서 환경을 변화할 수 있는지에 대해 논한다. 끝으로 IV장에서는 인터미턴트 컴퓨팅 기술에 관한 시사점을 제시하고 결론을 맺는다.

II. 인터미턴트 컴퓨팅 기술 동향

1. 인터미턴트 컴퓨팅에서 해결해야 할 문제점

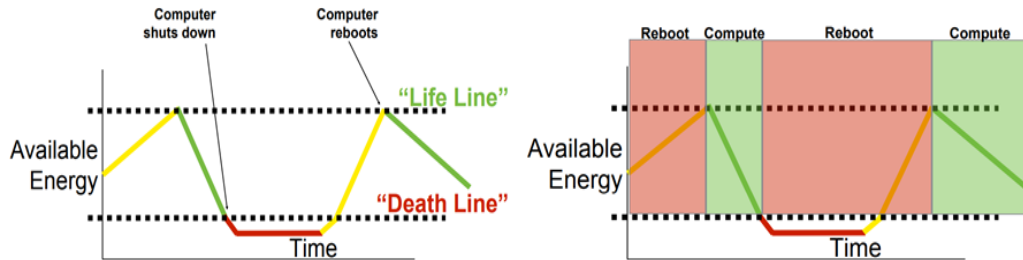
초연결 사회의 컴퓨팅 환경은 더욱더 소형화되는 작은 칩에 더 강력한 계산 능력을 갖춘 컴퓨팅 기기를 얻는 데 중점을 두고 있다. 하지만 이보다 앞서 안정적으로 데이터를 수집하고 저장하고 전송할 수 있는 컴퓨팅 기술이 우선되어야 한다.

더욱이 유지 보수가 필요하지 않고 손이 닿지 않는 곳에서 정보를 얻기 위한 센서를 배치하기 위해서는 지속적이고 안정적인 전력 공급이 필요하며 기기에 동작하는 소프트웨어가 오류 없이 실행되어야 한다. 이를 위해서는 물리적으로 배터리에서 지속적인 전원 공급이 이루어져야 하며 신뢰성 있는 값을 얻을 수 있도록 소프트웨어의 신뢰성 문제를 해결해야 한다.

기본적으로 인터미턴트 컴퓨팅에서는 컴퓨팅에 필요한 안정적인 전력 공급 방안에 대해 연구해야 한다. 일반적인 배터리의 경우에는 물리적으로 무게와 크기가 너무 커서 칩을 전원에 연결할 수 있는 곳이 제한된다. 이를 해결하기 위해 배터리 없이도 작은 태양 전지판 등으로 에너지를 수확할 수 있지만, 이 또한 제공하는 전력이 일정하지 않은 문제가 있다.

다음으로 해결해야 할 문제는 소프트웨어의 신뢰성을 보장하는 방법이다. 소프트웨어는 일반적으로 순차적인 실행을 하게 되는데 전원이 차단되면 프로그램이 다시 시작되거나 중간에 체크포인트 되는 단계에서 시작할 수 있다. 이러한 횟수가 많아지게 되면 컴퓨터 메모리의 데이터가 엉망이 될 수 있고 프로그램의 신뢰성을 잃게 된다. 소프트웨어는 이러한 가용성을 고려하여 설계되고 실행되지만, 이 또한 연결망과 실행 환경을 고려하여 안전하게 처리되어야 한다. [그림 3]에서는 간헐적인 에너지 공급 환경에서 고려해야 할 컴퓨팅 실행 시점을 볼 수 있다[4].

따라서 인터미턴트 컴퓨팅 기술은 간헐적인 환경에서 안정적인 데이터 수집에 필요한 에너지 하베스팅 장치와 에너지 저장 기술, 신뢰성 있는 데이터 저장 및 전송에 필요한 메모리 시스템 기술과 실행 흐름을 제어할 수 있는 실행모델 그리고 이를 돕는 프로그래밍 언어가 필요하다.



〈자료〉 참고문헌 [4]의 CMU Brandon Lucia 교수 발표 자료인 참고문헌 [5]의 그림 인용

[그림 3] 간헐적인 에너지 공급 환경에서 컴퓨팅 실행 시점

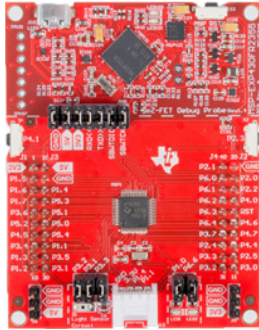
2. 에너지 하베스팅 장치와 에너지 저장 기술

인터미턴트 컴퓨팅에서는 에너지 하베스팅 장치와 에너지 저장 기술이 우선되어야 한다. 에너지 하베스팅이란 태양 에너지 등 외부의 에너지를 수집하여 전기 에너지로 재활용하는 전형적인 전력 활용 기술이다. 이는 간헐적인 파워 온/오프에서 소프트웨어 실행의 신뢰성을 보장하고자 하는 인터미턴트 컴퓨팅의 기반 핵심 기술로 에너지 하베스팅 장치에 소프트웨어 기술이 발전되어 적용된다.

최근 새로운 저전력 방식을 적용한 IoT 및 웨어러블 장치, 이식하거나 섭취 가능한 의료 센서, 인프라 모니터, 소형 위성 등 지속적인 전력 공급이 필요한 사회 인프라 분야에 새롭게 진화된 장치들에 관한 연구가 진행 중이다. 특히, 기존에 수명 제한이 있는 전력선이나 배터리 기반의 장치 대신에 반영구적으로 동작할 수 있도록 에너지를 수집하고 저장하는 에너지 하베스팅 기반의 장치에 관한 연구가 활발하다.

이러한 에너지 하베스팅 장치들의 특징인 간헐적으로 에너지를 제공한다는 측면에서는 기존 컴퓨팅 환경이 제공하지 못하는 신뢰성 있는 실행 환경을 제공하기 위한 새로운 패러다임이 필요하다.

현재 인터미턴트 컴퓨팅 연구 및 개발에는 텍사스 인스트루먼트사의 MSP430 계열의 초저전력 마이크로 컨트롤러가 개발 도구를 포함하여 에너지 하베스팅 시스템에 널리 활용되고 있다([그림 4] 참조)[6]. 또한, CMU(Carnegie Mellon University)의 Abstract Research Group에서는 프로세서 및 에너지 하베스팅 보드의 하드웨어 설계도를 github (<https://github.com/CMUAbstract/releases>)에 공개하는 등 인터미턴트 컴퓨팅에 관



[MSP430FR2355 LaunchPad™ development kit]



[EVM430-FR6047 ultrasonic metering EVM for MSP430FR604x MCUs]

〈자료〉 Texas Instruments, “User’s Guide, MSP430FR2355 LaunchPad™ Development Kit (MSP-EXP430FR2355),” 2018.

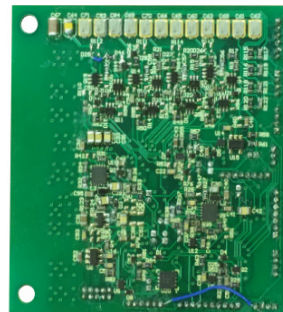
[그림 4] MSP430 MCU 기반의 에너지 하베스팅 개발 보드

한 연구가 활발히 진행 중이다.

에너지 저장 장치 또한 실제 기기의 물리적인 크기를 좌우하므로 매우 중요한 요소이다. 소비하는 동안에도 끊임없이 에너지를 축적해야 하며 비용면에서도 우수해야 한다. CMU는 하드웨어와 소프트웨어의 동시 설계를 통해 애플리케이션이 필요할 때 적절한 양의 에너지를 제공할 수 있는 전력 시스템 연구를 진행하고 있다. CMU가 최근 발표한 Capybara는 동적으로 재구성 가능한 에너지 저장장치로, 런타임 시스템은 소프트웨어 인터페이스를 통해 프로그램이 가능하고 애플리케이션 요구에 맞게 하드웨어 에너지 용량을 재구성할



[앞면: solar panels, microcontroller, radio와 5개 센서 장착]



[뒷면: 5개 에너지 저장 장치, 4개 스위치 장착]

〈자료〉 Alexei Colin, Emily Ruppel, Brandon Lucia, “A Reconfigurable Energy Storage Architecture for Energy-harvesting Devices,” ASPLOS, 2018.

[그림 5] CMU Capybara 하드웨어 프로토타입

수 있게 한다([그림 5] 참조)[7].

기존의 배터리 기반 시스템은 보드 내 모든 부품이 하나의 에너지 소스를 공유하고 있으나 인터미턴트 컴퓨팅에서 에너지 하베스팅 시스템은 하나의 부품이 많은 에너지를 사용하게 되면 다른 부품이 동작하지 못할 경우도 발생하므로 부품별로 에너지 저장장치를 두어 부품 간의 에너지 간섭을 제거하는 등 시스템 구조를 고려하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

3. 인터미턴트 컴퓨팅 메모리 시스템

일반적인 컴퓨터 시스템은 SRAM, DRAM과 같은 휘발성(volatile) 메모리와 플래시, FRAM과 같은 비휘발성(non-volatile) 메모리가 동시에 내장되어 있다. 인터미턴트 컴퓨팅 시스템 구조를 설계하면서 휘발성 메모리를 비휘발성 메모리로 변환하게 되면 메모리 불일치 문제가 많이 해소될 수 있어 메모리 시스템을 모두 비휘발성으로 대체하는 구조 연구가 많이 이루어지고 있다.

하지만 주메모리를 비휘발성 메모리로 할 경우에는 해결해야 할 문제점이 반드시 존재한다. 비휘발성 메모리는 휘발성 메모리보다 상대적으로 접근 면에서 응답 시간이 오래 걸리며 비용 측면에서도 에너지를 많이 소비하므로 효율성이 저하된다. 또한, 전원 장애가 일어났을 경우에도 비휘발성 메모리의 일부는 잠금이 가능하지 않아 코드를 다시 초기화하여 실행해야 하는 경우도 발생하게 된다.

따라서 인터미턴트 컴퓨팅을 위한 메모리 시스템은 비휘발성 메모리 특성과 휘발성 메모리 특성을 결합하여 단계적으로 진행되어야 한다. 이에 따라 간헐적으로 동작하는 특성을 반영한 캐시 계층과 비휘발성 특성이 혼합된 복합적인 메모리 계층이 연구되고 있고, 휘발성 메모리의 장점을 살린 새로운 비휘발성 메모리 관련 기술이 진행되고 있다.

유휴 시간(idle time) 동안 대기 전력이 없어 다른 저전력 시스템에 비해 전력 소비가 상당히 줄어들며 요청 시에는 즉각적으로 동작하는 Noc(Normally-Off Computing) 시스템은 전원공급이 불안정할 때도 신뢰성 있는 동작을 보장하기 위해 비휘발성 마이크로프로세서 모델과 더불어 연구되고 있다[8].

더욱이 비휘발성 메모리를 장착한 비휘발성 프로세서(Nonvolatile Processor: NVP)의 출현은 간헐적인 전원 공급 장치를 사용하여 지속적으로 계산할 수 있는 가능성을 열었

으며 차세대 IoT 장치의 핵심 구성 요소로 진화하고 있다[9]. 이와 같이 에너지, 시간, 메모리의 제한된 간헐적 환경에서도 오류 없이 동작할 수 있도록 비휘발적인 관리 기술을 적용하는 등 메모리 설계가 중요할 것으로 예상된다[4].

4. 인터미턴트 컴퓨팅 실행모델

인터미턴트 컴퓨팅에서는 간헐적인 에너지 공급 환경에서 전력공급 등 문제 상황이 발생할 경우에도 실행 절차를 관리하고 제어하여 애플리케이션이 지속해서 정상 동작하는 방법이 필요하다. 결함이 발생할 때 주로 사용하는 방법인 체크포인팅 기법으로 소프트웨어, 하드웨어를 대상에 따라 효과적인 방법으로 활용하여 실행 복구를 가능하게 한다.

간헐적 작동을 지원하지 않는 일반적인 베어메탈 임베디드 시스템의 실행환경을 살펴보면 전력 공급에 문제가 발생했을 때 휘발성 값은 지우고 비휘발성 값만 유지하게 된다. 일반적인 체크포인팅 모델에서는 이런 경우 프로그램 카운터를 포함하여 레지스터, 스택 및 전역 변수값은 유지하고 정전 후에는 이를 복원하게 된다.

하지만 인터미턴트 컴퓨팅에서는 체크포인트 자체만으로는 메모리 일관성을 보장하기 어려우므로 비휘발성 메모리의 일부를 사용하여 보존하고 복원하는 다중 버전 모델(multi-versioning models)의 연구가 이루어지고 있다[10].

또한, 기존의 인터미턴트 환경에서의 체크포인팅 기법은 대부분 소프트웨어적인 방법으로 개발되어 하드웨어의 정보를 알지 못하는 단점이 있고, 빈번한 체크포인팅 프로세스로 인해 성능 오버헤드가 크기 때문에 이를 제어할 수 있는 기술이 필요하다. 즉, 하드웨어의 에너지 모니터링 정보에 따른 체크포인팅 프로세스의 빈도를 동적으로 조절할 수 있는 환경을 연구하고 이러한 하드웨어와 소프트웨어가 효율적으로 통신할 수 있는 인터페이스 연구가 필요하다.

대부분의 간헐적 시스템은 불필요한 시간이나 에너지 비용을 피하고자 운영체제의 지원을 받지 않고 하드웨어 상에 베어메탈(bare-metal) 프로그램을 바로 실행하는 모델이 많은데 에너지 흐름에 따라 애플리케이션과 하드웨어 전력 사용을 관리하는 운영체제 연구도 진행되어야 할 것으로 보인다.

5. 프로그래밍 언어와 런타임시스템

인터미턴트 환경에서 프로그램 실행의 지속성을 보장하기 위해서는 효과적인 프로그래밍 모델이 필요하다. 하지만 새로운 프로그래밍 모델은 기존 환경보다 복잡도가 증가하고 개발 방식이 변경되는 부담이 있으며, 안전하게 실행될지를 검증하기에도 어려움이 있다. 코드에 자동으로 체크포인팅을 추가하는 것은 성능 손실을 극복하기가 어렵고 체크포인팅 주기를 결정하기에 어려움이 있으며, 효율성을 높이기가 쉽지 않으므로 새로운 프로그래밍 모델의 제안으로 CMU의 Chain과 Alpaca 프로그래밍 모델이 있다.

Chain의 경우에는 인터미턴트 환경에서 안전성을 보장하기 위한 프로그래밍 모델이다. C 런타임의 확장 형태로 다수의 태스크를 관리하는 Modules, 태스크 기반의 제어 흐름을 정의하는 Tasks, 데이터 일관성을 갖는 메모리 모델인 Channels에 관한 구문과 의미를 정의하였다. 프로그래머가 정의한 태스크 기반의 실행을 보장하고 태스크의 데이터는 채널을 통해서만 통신하게 한다. 태스크는 재실행이 가능하며 입력과 출력 채널이 분리되어 일관성 없는 상태를 예방한다. 일반적인 체크포인팅 접근 방식과는 달리 오버헤드 없이 안전성을 보장하는 프로그래밍 환경을 제공한다[11].

Alpaca 역시 오버헤드 없이 실행 안전성을 보장하는 인터미턴트 환경을 위한 프로그래밍 모델이다. 기존 체크포인팅 기반 기법들은 성능상 오버헤드를 동반하고, Chain과 같은 프로그래밍 모델은 메모리 사용량이 클 수 있어 프로그램 실행 시간과 공간 오버헤드가 매우 적은 확장된 기법을 제안하였다. 새로운 메모리 모델을 연구하여 태스크 기반에서 데이터를 공유하는 실행 동일성 분석 등을 통해 비휘발성 메모리 사용량을 감소하는 기법이다[12].

이외에도 초기 에너지 하베스팅 기반의 임베디드 시스템을 위한 에너지 어웨어 런타임 시스템으로는 에너지 상황을 모니터링하여 사전에 정의한 규칙에 따라 프로그램의 실행 흐름을 결정하고 실행 속도를 제어하여 서비스 품질을 최대화하기 위한 Eon이 있다[13].

인터미턴트 컴퓨팅을 위한 효과적인 프로그래밍 관련 여러 연구가 진행되고 있으나 이러한 프로그래밍 언어를 활용한 인터미턴트 소프트웨어가 안전하게 실행될지 여부를 검증해 주는 기술이 필요하다.

III. 인터미턴트 컴퓨팅 기술의 도전 및 기회

인터미턴트 컴퓨팅이 다양한 산업들과 결합하게 되면 새로운 형태의 서비스를 만들어 낼 수 있다. 환경 관측용 모니터링 시스템으로 거북이를 통해 해양 생태계를 연구할 수 있고 신체를 모니터링하여 의료 서비스를 제공받을 수 있다. 또한, 무인 기기의 제어 시스템에 탑재하여 지능형 교통 시스템 구축에도 활용할 수 있다. 군사 지역을 감시하고 재난 안전망을 구축하는 등 안전한 사회 구현에 핵심 역할을 기대할 수 있다.

간헐적 에너지 공급 환경에서 서비스의 신뢰성을 보장해야 하는 인터미턴트 컴퓨팅은 초연결 사회에 부합하기 위한 새로운 패러다임의 일환으로 변화하고 있으며 기기부터 소프트웨어에 이르기까지 기반 연구가 진행되고 있다.

사람, 사물, 공간, 데이터와 정보통신 인프라 환경이 연결된 초연결 사회에서는 이러한 컴퓨팅 기기들이 네트워크를 구성하여 능동적으로 환경을 모니터링하고 상황에 대응하여 서비스를 제공할 수 있어야 한다.

우선적으로 고신뢰성, 고효율 체크포인팅을 위한 새로운 비휘발성 메모리 기반의 IoT 비휘발성 프로세서 구조 연구가 필요하다. 비휘발성 프로세서를 기반으로 에너지 하베스팅을 고려한 인터미턴트 컴퓨팅을 위해 네트워크 프로토콜과 그 서비스에 맞게 동적으로 재구성할 수 있는 초경량의 운영체제 연구도 기대할 수 있다. 그리고 무엇보다 안전성 검증이 가능한 개발 도구가 필요하다.

더욱이 나아가서는 하나의 인터미턴트 컴퓨팅 시스템에서 뿐만 아니라 분산된 시스템이 필요한 환경에서 동작하는 서비스가 고려되어야 한다. 서비스 도메인에서 에너지 상황에 따라 기기의 서비스 참여 여부를 결정하고, 전력 부족으로 인한 특정 기기의 부재에도 안정적인 서비스를 제공하는 분산 서비스 플랫폼의 연구가 필요하다. 여러 센서를 감지하고 작동하는 시스템과 컴퓨터 비전 서비스, 그리고 흩어져 있는 작은 위성에서 동작하는 응용 등을 고려하여 분산 시스템에서 적합한 서비스의 실행을 돕기 위해 흩어져 있는 간헐적 장치 간의 분산 인터미턴트 컴퓨팅 시스템을 고려할 수 있다[4]. 분산 플랫폼은 상호 작용하는 기기의 효율적인 데이터 공유를 위해 메모리 시스템 분야에서 인터미턴트 분산 공유 메모리 시스템 연구를 필요로 한다.

기존의 인터미턴트 서비스 네트워크 분야의 최근 연구는 개별 노드의 수집 및 가공된

데이터를 취합하는 단계이며 개별 기기의 서비스 안정성만 고려되고 있다. 앞으로는 전체 네트워크가 개별 기기의 에너지 수급 상황 등을 파악하고, 이를 토대로 복합적인 작업을 분배하여 실행 가능한 분산 플랫폼은 초연결 사회에서 고도의 작업을 실행할 수 있도록 할 것이다.

인터미턴트 컴퓨팅 분야에서 도전적이고 실용적인 기회를 얻기 위해서는 아키텍처, 네트워크 및 플랫폼에 대한 통합적인 접근을 통해 기존의 인터미턴트 컴퓨팅 기술의 문제점을 극복해야 한다.

IV. 결론 및 시사점

초연결 시대의 정보통신 인프라인 인공지능, 빅데이터, 클라우드를 비롯하여 사물인터넷에는 네트워크에 연결된 모든 객체가 끊임 없이 연결되는 것이 필요하다. 인프라의 옛지에는 에너지 하베스팅을 기반으로 반영구적으로 동작하는 새로운 기기의 출현으로 의료, 통신, 군사 분야 등에서 다양한 미래의 제품 및 서비스의 창출을 기대할 수 있게 되었다.

미래 기상이변까지 예측하는 인공지능에서부터 자연재해 및 환경 관측을 위해서 끊임 없는 모니터링 시스템이 필요하며 사람이 개입하기 어려운 군사지역에서도 정보를 전달받고 처리하는 시스템이 필요하다. 빠르게 발전하고 있는 헬스케어 산업과 스마트팩토리, 스마트 홈, 스마트 빌딩을 구현하는 사물인터넷 환경에서는 더더욱 에너지 공급이 어려운 환경에서도 신뢰성을 보장하며 정보를 수집·저장·전달하는 컴퓨팅 시스템 환경이 필요해졌다. 인터미턴트 컴퓨팅 기술은 안전, 재해방지, 재난구호 등의 정보 수집과 의사 결정 지원의 핵심 역할을 제공할 수 있으므로 안전한 사회 구축에 큰 역할을 할 수 있다.

정보를 전송하거나 처리하는 기기의 전력 수급이 원활하지 못하면 클라우드를 비롯한 주요 인프라에 안전하게 연결할 수 없기 때문이다. 이러한 상황을 해결하기 위해서는 전력 수급이 불안정한 환경에서도 전력을 공급하는 방법이 필요하며 간헐적인 에너지 공급 환경에서도 신뢰성을 보장할 수 있는 인터미턴트 컴퓨팅 기술이 필요하다.

국외에서는 연구 내용을 github에 공개하는 등 하드웨어에서부터 소프트웨어에 이르기까지 대학과 연구소에서 활발한 움직임을 보인다. 국내에서는 시스템 및 네트워크 분야에서 분야별로 초기적인 독립 연구가 수행되고 있으나, 통합 시스템을 구축하는 수준의 연구

는 이루어지지 않고 있다.

인터미턴트 컴퓨팅 분야는 국내외적으로 시작 초기 단계이다. 에너지 하베스팅을 기반으로 하는 여러 장치가 출현하는 시점에서 에너지 단절에 따른 피해나 계산 결과의 부정확성 문제는 방해 요인이 되고 있다. 초연결사회로 진입하고 변화할 미래 산업에서 신성장 동력산업으로의 진출을 모색하기 위해 이를 극복할 원천기술이 필요한 시점이다.

[참고문헌]

- [1] 김광석, 권보람, 최연경, “4차 산업혁명과 초연결사회, 변화할 미래 산업,” 삼성KPMG 경제연구원, KPMG Issue Monitor, 2017, pp.4-5.
- [2] G. Bell, “Bell’s Law for the birth and death of computer classes,” Communications of the ACM, Vol.51, No.1, Jan. 2008, pp.86-94.
- [3] Yoonmyung Lee, Gyouho Kim, Suyoung Bang, Yejoong Kim, Inhee Lee, Prabal Dutta, Dennis Sylvester, and David Blaauw, “A modular 1mm³ die-stacked sensing platform with optical communications and multi-modal energy harvesting,” IEEE International Solid-State Circuits Conference(ISSCC), Feb. 2012, pp.402-403.
- [4] Brandon Lucia, Vignesh Balaji, Alexei Colin, Kiwan Maeng, and Emily Ruppel, “Intermittent Computing: Challenges and Opportunities,” The 2nd Summit on Advances in Programming Languages(SNAPL), 2017.
- [5] Brandon Lucia, “Programming Challenges of Intermittent Energy-harvesting Devices,” Carnegie Mellon University, 2017, slides pp.14-15.
- [6] Texas Instruments, “User’s Guide, MSP430FR2355 LaunchPad™ Development Kit (MSP-EXP430FR2355),” Texas Instruments, 2018.
- [7] Alexei Colin, Emily Ruppel, Brandon Lucia, “A Reconfigurable Energy Storage Architecture for Energy-harvesting Devices,” ACM International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems(ASPLOS), 2018.
- [8] Chien, T.K. et al. “An energy-efficient nonvolatile microprocessor considering software-hardware interaction for energy harvesting applications,” Proceedings of the International Symposium on VLSI Design Automation and Test(VLSI-DAT), 2016, pp.1-4.
- [9] Fang Su, Kaisheng Ma, Xueqing Li, Tongda Wu, Yongpan Liu, Vijaykrishnan Narayanan, “Nonvolatile processors: why is it trending?,” Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition(DATE), 2017,
- [10] Brandon Lucia and Benjamin Ransford. “A simpler, safer programming and execution model for intermittent systems,” ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation(PLDI), June 2015, pp.575-585.
- [11] Colin, Alexei, and Brandon Lucia, “Chain: Tasks and channels for reliable intermittent

programs.” ACM SIGPLAN Notices 51.10, 2016, pp.514-530.

- [12] Maeng, Kiwan, Alexei Colin, and Brandon Lucia. “Alpaca: Intermittent execution without checkpoints,” Proceedings of the ACM on Programming Languages(OOPSLA), 2017.
- [13] Sorber, Jacob, et al., “Eon: A language and runtime system for perpetual systems,” Proceedings of the 5th international conference on Embedded networked sensor systems of ACM, 2007.