

# 소비 전력 최소화를 위한 IoT 디바이스 플랫폼의 하드웨어 구조 분석

이진\*

평택대학교 정보통신학과 교수

## Analysis of the Hardware Structures of the IoT Device Platforms for the Minimal Power Consumption

Jin Lee\*

Professor, Department of Information and Communication, Pyeongtaek University

**요약** 사물인터넷 (IoT, Internet of Things)의 최종단 장치들은 배터리로 운영되는 제품군이므로 초저전력 (Ultra-low power: ULP)에 대한 세심한 고려가 필요하다. 마이크로 컨트롤러 (Micro Controller Unit: MCU) 업계는 에너지 절약을 위해 매우 효과 적인 기능을 개발해 왔으며, 제조사 별로 서로 다른 에너지 소비를 줄일 수 있는 여러 가지 동작 모드를 적용하고 있기 때문에, 개발자들은 MCU 선택에 어려움을 겪을 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 다양한 벤더 및 기능 세트의 MCU를 비교할 수 있는 표준화 된 벤치마크 방법인 ULPMark 벤치마크에 대해서 소개하고, 이 평가에서 우수한 평가를 받은 2개의 플랫폼이 초저전력 동작을 위해 제공하고 있는 하드웨어 기능에 대해서 분석하였다. 또한, 드라이버 API와 세부 레지스터 제어를 통해 개발자들이 이 기능 들을 활용할 수 있는 방법에 대해 조사하고 분석 하였다.

**주제어** : 사물인터넷, 마이크로컨트롤러, 초저전력, 소비 전력, IoT 플랫폼

**Abstract** Since the end devices of the Internet of Things (IoT) are battery operated products, careful consideration for ultra-low power (ULP) is required. The Micro Controller Unit (MCU) industry has developed very effective functions to save energy, but developers have difficulty in selecting the MCU because various operating modes are applied to reduce energy consumption by manufacturers. Therefore, this paper introduces ULPMark benchmark, a standardized benchmark method that can compare MCUs of various vendors and feature sets, and provides hardware functions for ultra-low-power operation of the two platforms that received the high evaluation scores from ULPMark. In addition, we investigated and analyzed how developers can utilize the functions for ultra low power consumption through driver APIs and detailed register control.

**Key Words** : IoT, Microcontroller, Ultra low-power, Power consumption, IoT Platform

## 1. 서론

사물 인터넷(Internet of Things: IoT)을 위한 스마트 임베디드 솔루션 설계에는 성능, 수명과 비용에 관해 여러 전문 분야의 기술이 필요하다[1]. 실제로, IoT 장치가 주로 배터리로 작동하고 배터리 교체 없이 몇 년 동안 동작할 수 있어야 하기 때문에, IoT 장치의 전력 소비를 최적화하기 위한 연구가 하드웨어 및 네트워킹 영역에서 광범위하게 진행되고 있다 [2].

4차 산업혁명의 핵심 네트워크인 5 세대 셀룰러 네트워크 표준인 3GPP (Third Generation Partnership Project)에서는 사물 인터넷 (5G IoT)을 위한 새로운 기술로 다양한 유형의 IoT에 저전력, 낮은 데이터 전송 속도 및 넓은 범위의 셀룰러 연결을 제공한다[3]. 5G IoT는 일반적으로 배터리로 구동되는 소형, 저비용 장치를 밀도가 높게 연결하여 대규모 기계 유형 통신(mMTC)을 구성하고, 이러한 네트워크는 환경 감시, 건강 관리, 스마트 도시 및 스마트 팜을 비롯한 다양한 IoT 응용분야에서 엄청난 기회를 제공하게 될 것이다[4-7].

이와 같이 스마트 임베디드 무선 IoT 시스템은 점점 더 소형화되고 있으며 종종 코인 셀 또는 특정한 배터리 없이 에너지 하베스터에서 소량의 전력을 공급받아서 동작을 한다. 따라서, IoT용 임베디드 시스템을 구현할 때는 설계 초기부터 최소 허용 공급 전압 및 프로세서 주파수와 같은 기술적 세부 사항을 고려해야 한다.

무선 연결 기술을 포함하는 배터리 구동식 IoT 장치들을 위해 마이크로 컨트롤러(Micro Controller Unit: MCU) 업체는 매우 효과적인 초 저전력(Ultra Low Power: ULP) 기술을 개발해 왔다. 하지만, 제조사 별로 서로 다른 여러 가지 기술을 적용하고 있기 때문에, 개발자들은 MCU 선택에 어려움을 겪을 수 있다[8].

EEMBC® (Embedded Microprocessor Benchmark Consortium) 조직 내의 ULPBench 워킹 그룹은 개발자가 다양한 벤더 및 기능 세트의 MCU를 비교할 수 있는 표준화 된 벤치마크 도구 세트를 정의하고 공개하였다[9]. 2014년 3월에 출시된 ULPBench™ 벤치마크는 MCU 에너지 효율을 안정적이고 공정하게 측정하는 방법론을 제공하고 있다.

본 논문에서는 IoT 디바이스용 플랫폼 중 EEMBC의 ULPBench의 평가가 가능한 2개 플랫폼에서 소비전력 최소화를 위해 제공하는 기능들과 이를 활용할 수 있는 방법을 분석하였다. 이 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 초저전력 MCU 벤치마크인 ULPBench에

대해서 소개하고, 3장에서는 MCU 플랫폼 별로 전력 소비를 최소화를 위해 제공되는 기능 및 구조에 대해서 분석한다. 4장에서는 전력 소비 최소화 기능을 동작시킬 수 있는 방법에 대해서 분석하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## 2. 초저전력 MCU 벤치마크

IoT의 최종단 장치들은 배터리로 운영되는 제품군이므로 초저전력 (Ultra-low power: ULP)에 대한 세심한 고려가 필요하다. 따라서 모든 유명 MCU 제조사들은 초저전력 어플리케이션에 초점을 맞춘 하나 이상의 제품군을 갖고 있고, MCU 제조사마다 각자의 창의적인 설계 기술을 적용하여 에너지 소비를 줄일 수 있는 여러 가지 동작 모드를 적용하고 있기 때문에, 개발자들은 다양한 MCU들 중 자신에게 최고로 적합한 MCU를 선택하는데 많은 어려움을 겪을 수가 있다[8].

따라서, 1997년 설립된 EEMBC는 시스템의 여러 특성을 고려하여 개발자들이 최고의 프로세서를 선택할 수 있도록 다양한 벤치마크를 제공하고 있다. 2012년 이후 EEMBC는 마이크로컨트롤러의 소비전력을 체계적으로 분석하고 비교할 수 있는 ULPMark라는 초저전력 벤치마크 프로그램을 개발하여 제공하고 있다[10,11]. EEMBC 벤치마크 중 초저전력과 IoT (Ultra-Low Power and Internet of Things) 소그룹에서는 3가지 벤치마크 프로그램을 제공하고 있다. MCU의 초저전력에 초점을 맞춘 ULPMark, ULPMark에 Bluetooth Low Energy (BLE) 항목을 추가한 IoTMark, 보안용 디바이스에 특화된 SecureMark가 있다.

ULPMark 벤치마크 프로그램은 성능과 초저전력 측면에서 개발자가 취사선택을 할 수 있도록 3가지 프로파일을 제공한다. ULPMark-CoreMark (CM) 프로파일은 MCU의 active 모드에서의 성능과 에너지 효율성에 초점을 맞춘 평가 방식이고, ULPMark-CoreProfile (CP) 프로파일은 MCU가 초저전력 상태로 운용되는 상황에서 에너지 소비량을 평가할 수 있는 프로파일이다. 마지막으로 ULPMark-PeripheralProfile (PP)는 MCU에 탑재되어 있는 입출력 주변장치들의 에너지 효율성의 측면에서 평가할 수 있는 방식을 제공하고 있다. 2014년 CP 프로파일이 최초로 공개되었고, 2016년 PP 프로파일이 추가되었다. 마지막으로 CM 프로파일이 2019년 추가되었다. 2020년 2월 현재 총 87개의 MCU가 CP와

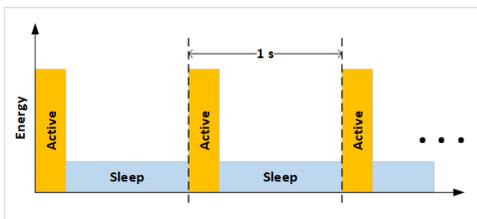
PP 프로파일을 사용하여 평가되었고, 6개의 MCU가 CM 프로파일로 평가 비교되어 있다.

ULPMark 중 CM 프로파일은 성능과 에너지 효율성을 동시에 고려해야 하는 설계자들에게 유익한 정보를 제공하고 있다. ULPMark-CM 점수는 MCU가 milli-Joule 에너지 당 실행할 수 있는 CM 테스트 프로그램의 반복 횟수로 측정된다.

ULPMark-CP 프로파일은 MCU의 코어의 절전 상태 및 절전 상태에서 활성 모드로 전환 될 때의 에너지 비용에 대한 테스트이다. 이 벤치마크는 8 비트, 16 비트 및 32 비트 MCU에서 이식 가능한 공통 워크로드 세트를 활용한다. CP 프로파일은 1초를 기본 시간단위로 하여 활성모드에서 정해진 워크로드를 수행하고 절전모드로 전환되는 동작을 반복하여 측정한다. ULPMark-CP의 동작 개념도는 Fig. 1과 같다.

CP 프로파일의 활성 모드에서 동작하는 워크로드는 다음과 같다.

1. GPIO 포트 하나를 20번 빠르게 토글한다.
2. 정해진 수학 함수를 24회 반복 수행한다.
3. LCD변환 기능을 수행한다.
4. 문자열 검색 함수를 수행한다.
5. 문자열 복사를 수행한다.
6. 버블소트 함수를 수행한다.
7. 16개 순열에 대한 순열 함수를 수행한다.
8. 워크로드 수행 완료를 GPIO로 표시한다.



[Fig. 1] Operation for ULPMark-CP

ULPMark-PP는 MCU에서 가장 일반적으로 사용되는 주변장치들이 동작하는 경우에 특화하여 테스트를 수행한다. IoT 최종단 디바이스의 특성에 맞도록 PWM (Pulse-width Modulation), ADC (Analog-to-Digital Conversion), SPI (Serial Peripheral Interface) 및 RTC (Real-Time Clock)가 정해진 시나리오에 따라 동작할 때의 소비전력을 벤치마킹한다. 벤치마크는 1초를 하나의 슬롯(slot)으로 정의하고 10개의 슬롯동안 해결

해야 하는 주변장치의 동작이 정해진다. 한 슬롯에서 ADC, SPI, PWM, RTC를 가변적으로 동작 시키고, 장치가 해당 슬롯에 대한 주변 장치 작동을 마치면 절전 모드로 전환하게 한다.

### 3. 전력 소비 최소화 하드웨어 구조

이번 장에서는 ULPMark 벤치마크로 평가된 MCU 플랫폼 중에 시장 점유율 10% 이상인 업체의 제품이면서, CP와 PP 프로파일에서 우수한 평가를 받고 있는 2개 플랫폼의 창의적인 전력 소비 최소화 방법들에 대해서 분석한다.

대기 모드의 전력 소비를 최소화 하는 것이 배터리 수명에 가장 중요한 요소이기 때문에, Active 동작 중의 성능과 에너지 효율성에 대한 지표인 CM프로파일은 제외하고, CP와 PP프로파일에 대한 평가를 기준으로 분석할 플랫폼을 선정하였다.

CP와 PP벤치마크에서 고르게 높은 점수를 평가받은 플랫폼은 STMicroelectronics사의 STM32L4 계열과 Microchip사의 SAL10/11계열 제품이다.

#### 3.1 STM32L 저전력 IoT 디바이스 플랫폼

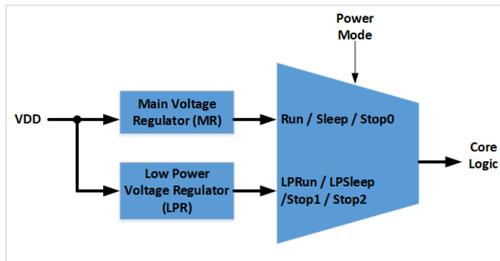
STMicroelectronics사의 32비트 MCU 플랫폼은 다양한 애플리케이션에 사용할 수 있도록 여러 시리즈가 있다. 높은 연산 처리 성능이 필요한 경우에는 STM32H 또는 F4~7 시리즈를 사용하고, 가장 일반적인 애플리케이션에는 STM32G 또는 STM32F0~3시리즈를 선택한다. 저전력 애플리케이션용으로는 STM32L 시리즈를 제공하고 있는데, 본 논문에서는 ULPMark CP와 PP 평가가 제일 높은 STM32L4 시리즈에 대해서 분석해 보았다.

<Table 1> Low power modes in STM32L4

Mode	Features
Sleep	CPU clock stops.
Low-power run	CPU runs at under 2MHz and low voltage.
Low-power sleep	CPU clock stops in Low-power run mode.
Stop0	The Lowest power mode with SRAM retention. Separated by operation voltage and alive peripherals.
Stop1	
Stop2	
Standby	Power for CPU and every memories is turned off. Separated by wakeup source types.
Shutdown	

STM32L4 시리즈는 FlexPowerControl이라는 초저전력 platform으로 Table 1과 같이 8개의 저전력 모드를 구분하여 상황에 맞는 최적의 소비전력 성능을 제공할 수가 있다[12].

MCU의 소비 전력을 최적화하기 위해서는 전압과 주파수를 동적으로 제어 할 수 있어야 한다. STM32L4 시리즈 디바이스는 2개의 전압 레귤레이터를 내장하고 있다. Fig. 2와 같이 메인 레귤레이터 (MR)는 활성 모드일 때 전압을 공급하고, 저전력 레귤레이터 (LPR)는 저전력 모드일 때 MR을 off하고 전력을 공급하게 된다. STM32L4는 클럭도 다양하게 제어할 수가 있다. 클럭 소스인 오실레이터를 5개 지원하는데, 2개는 외부 소스이고 3개는 내장 오실레이터이다.



[Fig. 2] STM32L4 power distribution architecture

STM32L4는 동적인 전압, 주파수를 3가지 영역으로 구분하여 관리할 수 있게 한다. Range 1은 고성능 영역으로 (High-performance range) MR에서 1.2V 코어 전원이 공급되고, 클럭 주파수는 80MHz까지 사용할 수 있다. Range2는 MR로 제어되는 저전력 동작 영역 (Low-power range)으로 1.0V 코어전원이 공급되고 26MHz까지만 주파수를 올릴 수가 있다. 마지막 LPRun (Low-power run) 모드 일 때는 코어 전원을 LPR에서 공급하고, MR은 off된다. 동작 주파수는 2MHz까지로 제한된다.

<Table 2> Current consumption and wakeup time of STM32L4

Mode	Current Consumption	Wakeup time
LPRun	102 uA/MHz	4 ~ 64us
Sleep	26 ~ 28 uA/MHz	6 cycle
LPSleep	36 uA/MHz	6 cycle
Stop0	100uA	0.7 ~ 4.5us
Stop1	4.6 uA	4 ~ 6us
Stop2	1.3 uA	5 ~ 7us
Standby	0.28 ~ 0.45uA	14 us
Shutdown	260 nA	256 us

파워모드가 Run / Sleep / Stop0인 경우에는 MR에서 강화된 전압을 코어에 전달하고, LPRun / LPSleep / Stop1 / Stop2 모드일 때는 LPR에서 강화된 전압을 코어에 공급한다. Standby와 Shutdown 모드일 때는 두 개의 레귤레이터가 다 꺼진다.

모드에 따라 MCU 플랫폼 내부의 상태가 다르기 때문에 소비 전력이 다르고, 저전력 모드에서 탈출하는데 필요한 시간도 달라지게 된다. Table 2에서는 모드별로 소비 전류와 탈출 시간이 정리되어 있다.

### 3.2 SAM L 저전력 IoT 디바이스 플랫폼

Microchip사의 SAM L 시리즈 MCU는 초저전력 모드 외 SleepWaking이라는 CPU의 제어 없이도 저전력 상태에서 주변 장치를 구동할 수 있는 방법을 제공하는 플랫폼이다.

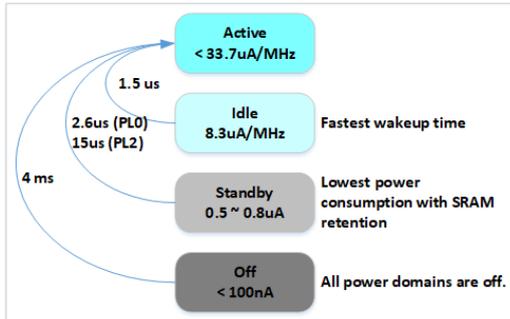
SAM L 시리즈의 저전력모드는 Idle과 Standby와 Off 모드로 나누어지는데, Idle 모드에서는 CPU 클럭이 정지하고, Standby 모드에서는 CPU 포함 주요 클럭이 정지하며 필요한 주변장치에만 클럭이 공급된다. 레귤레이터가 저전력 모드로 전환된다. Off 모드에서는 장치의 전원이 전부 꺼지게 되고 리셋으로만 시스템을 재가동시킬 수 있다[13].

SAM L 시리즈의 클럭 구조는 저전력 모드에서 사용하지 않는 클럭을 비활성화할 수 있도록 설계되어 있다.

STM32L4 보다는 상대적으로 간단한 저전력 파워 모드를 제공하지만, 저전력 상태에서 필요한 주변장치만을 개별 활성화할 수 있어서 효율적인 제어를 할 수 있게 된다. SAM L 시리즈는 칩셋에 따라 2 ~ 5개의 파워 도메인으로 기능별 전원을 관리할 수가 있다. 내부 파워 관리자 (PM, Power Manager)가 장치의 절전 모드 및 전원 도메인을 제어한다. 전력 소비 요구 사항에 따라 PM은 전력 절약을 위해 사용하지 않는 모듈의 전원 공급을 중지할 수 있다. 활성 모드에서 응용프로그램을 실행 중이던 CPU가 절전 모드로 전환되면 프로그램 실행이 중지되고 절전 모드에 따라 PM에 의해 일부 모듈과 클럭 도메인이 자동으로 꺼진다.

SAM L 시리즈는 성능 수준 (PL, Performance Level)을 두 단계로 나누어 애플리케이션이 전력 소비를 최적화 할 수 있도록 레귤레이터 출력 전압을 조절할 수 있다. PL0는 최고의 에너지 효율을 위한 설정이고, PL2는 최고의 성능을 위한 설정이다.

Fig. 3은 SAM L 시리즈의 모드별 소비 전류와 저전력 모드에서 탈출 시간을 정리하였다.



[Fig. 3] Current consumption and wakeup time of SAM L series

STM32L4의 최고 동작 속도가 SAM L 시리즈보다 높기 때문에 활성화 모드에서의 소비 전력의 비교는 공정하지 않다. 저전력 모드 중 장치가 완전히 꺼지는 모드인 STM32L4의 Shutdown모드와 SAM L의 Off 모드를 비교하면 SAM L 시리즈의 소비 전력이 약 2.6배 효율적이지만 재기동 시간이 약 15배 이상 차이가 난다. 그 외 저전력 모드인 경우 일대일 비교는 어렵지만, 소비전류와 탈출시간의 큰 차이가 없음을 알 수가 있다.

### 4. 저전력 모드 활용 방법

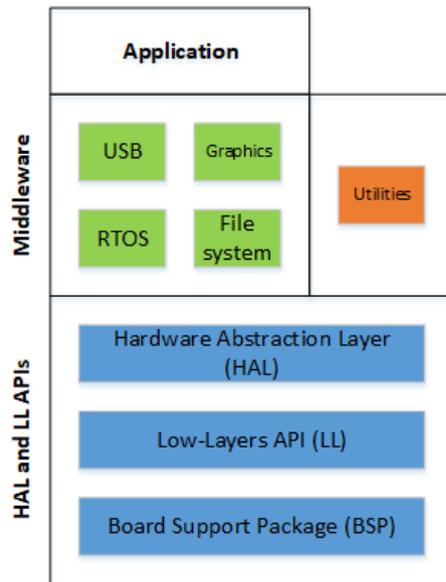
3장에서는 STM32L4 시리즈 MCU와 SAM L 시리즈 MCU가 저전력 모드에서 소비 전력을 최소화하기 위해 적용되어 있는 기술들에 대해서 알아보았다. 이번 장에서는 프로그램 개발자가 이 기능들을 활용하는 방법에 대해서 정리하고, 이 두 플랫폼에 대해서 비교 분석한다.

#### 4.1 STM32L4 저전력 모드 활용 방법

STM32L4는 Cortex-M4 코어를 기반으로 코어의 전원 관리 설정 방법을 파악할 필요가 있다. Cortex-M4의 전원 관리는 시스템 제어 블록 (System Control Block)에 있는 SCR (System Control Register)을 사용하여 제어할 수 있다. SCR의 SLEEPDEEP 비트를 사용해서 코어의 휴면 상태를 결정할 수가 있다. Sleep 모드로 설정하면 프로세서 클럭만 중지하고 다른 주변장치의 클럭은 제공되도록 동작한다. Deep sleep 모드로 설정하면 대부분의 STM32 시스템의 클럭이 정지한다. 저전력 모

드를 활용하기 위해서는 코어의 SCR 뿐만 아니라 19개의 파워 제어 레지스터들과 31개의 리셋/클럭 제어 레지스터들을 포함한 저전력 동작에 관련된 레지스터들을 면밀하게 검토하여 설정해야 한다. 하지만, 이 모든 세부 레지스터들을 전부 분석하여 저전력 모드를 활용하기는 쉽지 않다.

다행히 STM32Cube라는 STM32 MCU의 개발 환경에서 다양한 드라이버를 제공하고 있다. STM32Cube에는 그래픽 마법사를 사용하여 C 초기화 코드를 생성 할 수 있는 그래픽 소프트웨어 구성 도구 인 STM32CubeMX가 포함되어 있다. 또한 STM32Cube 하드웨어 추상화 계층 (HAL)과 하위 계층 (LL)으로 구성된 STM32CubeL4 MCU 패키지로 구성된다. 드라이버 API 뿐만 아니라 Fig. 4와 같이 일관된 미들웨어 구성 요소 세트 (RTOS, USB, FAT 파일 시스템, 그래픽 등)를 같이 포함하고 있다[14].



[Fig. 4] STM32L4 software architecture

저전력 모드를 활용할 수 있는 드라이버는 stm32l4xx\_hal\_pwr.h 파일을 통해서 제공되며 클럭 제어에 대한 드라이버는 stm32l4xx\_hal\_rcc.h를 통해 제공된다. 개발자는 다음의 드라이버 함수를 통해서 간단하게 저전력 모드에 진입할 수가 있다.

- HAL\_PWR\_EnterSleepMode()
- HAL\_PWREx\_EnterSTOP0Mode()
- HAL\_PWREx\_EnterSTOP1Mode()

- HAL\_PWREx\_EnterSTOP2Mode()
- HAL\_PWR\_EnterSTANDBYMode()
- HAL\_PWREx\_EnterSHUTDOWNMode()

SLEEP과 STOP0모드에 진입하는 함수는 입력 파라미터로 레귤레이터를 선택할 수 있게 하여 총 8가지의 저전력 모드를 설정할 수가 있다.

클럭은 다음 두 개의 함수를 사용하여 오실레이터와 클럭 속도를 제어할 수가 있다.

- HAL\_RCC\_OscConfig()
- HAL\_RCC\_ClockConfig()

#### 4.2 SAM L 시리즈의 저전력 모드 활용 방법

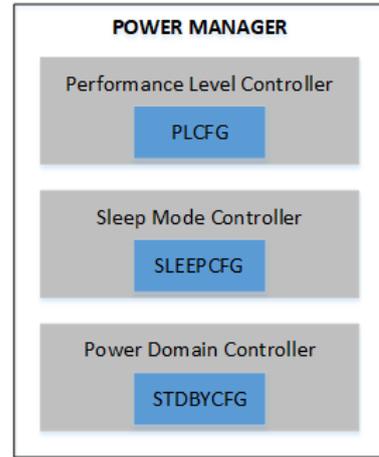
Microchip사도 STMicroelectronics와 마찬가지로 MCU를 개발할 수 있는 환경을 제공하고 있다. 특히 Advanced Software Framework(ASF)라고 하는 무료 오픈 소스 HAL과 미들웨어를 제공하고 있다. 하지만 아직 저전력 모드 제어를 위한 드라이버가 사용하기 쉽게 제공되지는 못하고 있다. 따라서 SAM L 시리즈의 저전력 모드 활용 방법은 레지스터 수준의 접근이 필요하다. 다행히 Microchip의 소프트웨어 개발 환경에서는 저전력 모드 제어에 필요한 하드웨어 모듈의 레지스터 관리가 용이하도록 구조체 형태로 정리가 되어 있다.

저전력 모드를 위해 가장 필요한 하드웨어 모듈은 파워관리자 (Power Manager) 모듈로 소프트웨어 개발자는 PM 구조체를 통해 제어가 가능하다[15].

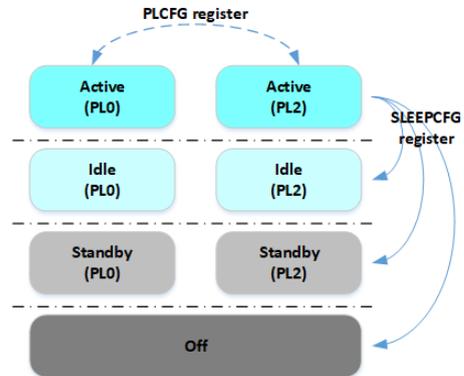
PM은 장치의 절전 모드 및 전원 도메인 게이팅을 제어한다. PM은 전력 절약을 위해 사용하지 않는 모듈을 중지 할 수 있다. 활성 모드에서 CPU가 응용 프로그램 코드를 실행 중에 저전력 모드로 전환되면 프로그램 실행이 중지되고 절전 모드에 따라 PM에 의해 일부 모듈과 클럭 도메인이 자동으로 꺼진다. 활성화 된 주변 장치의 인터럽트 및 재기동 소스에서 발생된 이벤트로 절전 모드에서 활성 모드로 복원 할 수 있다.

PM은 Fig. 5와 같이 성능 수준 제어, 휴면 모드 제어와 파워 도메인 제어를 할 수 있는 모듈이다. STDBYCFG 레지스터를 통해 파워도메인을 제어할 수 있고, SLEEPCFG를 통해 저전력 모드를 제어할 수 있다.

Fig. 6은 PLCFG와 SLEEPCFG를 사용하여 SAM L 시리즈의 저전력 상태를 변화하는 과정을 보여준다.



[Fig. 5] Power manager of SAM L series



[Fig. 6] Sleep mode control of SAM L series

PLCFG 레지스터로 성능 수준을 조절할 수 있다. 성능 수준을 제어하는 방식은 다음과 같다.

- PM->PLCFG.bit.PLSEL = 0
- PM->PLCFG.bit.PLSEL = 2

저전력 모드 진입을 제어하는 방식은 다음과 같다. 등호 오른쪽 편의 모드이름을 바꾸면 Idle과 Off 모드로도 진입할 수가 있다.

- PM->SLEEPCFG.bit.SLEEPMODE =  
PM\_SLEEPCFG\_SLEEPMODE\_STANDBY\_Val

SAM L 시리즈는 파워도메인 관리를 통해서 효율적인 전력관리를 가능하게 한다. L10/L11 칩셋에는 PDSW와 PDAO라는 2개의 파워도메인으로 나누어져있다. PDSW는 교환 가능한 파워 도메인으로, 대기 절전 모드에서는 사용자 구성에 따라 전력 누수를 피하기 위해 끌 수 있

다. PDAO는 Always-On Power Domain이며 Active, Idle 또는 Standby 모드 일 때 항상 전원이 공급되는 모든 컨트롤러를 포함한다.

활동 모니터링을 기반으로 다이내믹 파워 도메인 게이팅은 소프트웨어 개입 없이 하드웨어에 의해 자동으로 관리할 수 있어, 어떤 전원 도메인을 켜고 끌지를 수동으로 제어하는 정적 파워 도메인 게이팅 보다 효율적인 에너지 관리를 할 수가 있다.

Power Domain에 대해 다이내믹 파워 도메인 게이팅을 활성화하려면 PM의 대기 구성 레지스터 (STDBYCFG.DPGPDSW)의 DPGPDSW 비트를 다음과 같이 '1'로 설정해야 한다.

$$- PM \rightarrow STDBYCFG.bit.DPGPDSW = 1$$

### 4.3 초저전력 IoT 플랫폼 비교 분석

이 장에서는 3장과 4장에서 분석한 초저전력 IoT 플랫폼 2 종에 대해서 비교 분석한다. Table 3에 다양한 기준으로 STM32L4와 SAM L 시리즈를 비교하여 정리하였다.

ULPMark 홈페이지에서 확인할 수 있듯이, STM32L4와 SAM L 시리즈는 2020년 5월 기준으로 모든 벤치마크 프로그램을 평가하고 그 결과를 EEMBC에서 인증한 IoT 플랫폼 중에서 최고 점수를 받고 있다.

STM32L4는 Core를 ARM Cortex-M4를 사용하면서 높은 프로세싱 파워를 갖는 초저전력 플랫폼을 구성하였고, SAM L은 가장 최신 저전력 기술을 포함한 Cortex-M23 코어를 채택하여 저전력 동작에 더 초점을 맞추고 있다.

ULPMark-CP와 PP 점수는 테스트를 통해 얻어진 소비전력의 평균을 역수를 취하여 계산되는 값이므로, 값이 클수록 초저전력에 적합하다는 의미가 된다.

두 개의 플랫폼의 비슷한 점수를 얻고 있지만, 3.0V 전압 동작에서는 SAM L 시리즈가, 1.8V 전압에서는 STM32L4 시리즈가 약간 우세한 점수를 받았다.

저전력 모드에서 메모리의 내용을 유지시킬 수 있는 Retention SRAM의 용량은 STM32L4가 8KB로 SAM L 보다 2배 더 크다.

저전력 모드에서의 소비 전력은 SAM L 시리즈가 STM32L4의 절반 수준이지만, 저전력 모드에서 활성화 모드로 전환되는 시간 (Wakeup time)은 STM32L4가 약 3~4배 빠른 장점이 있다.

STM32L4는 C 코드의 드라이버 library를 제공하기 때문에 함수의 형태로 코드를 작성할 수 있지만, SAM L

시리즈는 레지스터를 직접 접근하는 방식으로 코드를 작성해야 하므로 저전력 모드를 활용하는 사용성 관점에서는 STM32L4 시리즈가 다소 우세하다고 할 수 있다.

<Table 3> Comparison of ultra low power IoT Platforms

	STM32L4	SAM L
Manufacturer	STMicroelectronics	Microchip
Core	Cortex-M4	Cortex-M23
Max. Core Clock (MHz)	80	32
ULPMark-CP	247 (3.0V) 447 (1.8V)	280 (3.0V) 410 (1.8V)
ULPMark-PP	94 (3.0V) 167 (1.8V)	118 (3.0V) 167 (1.8V)
Low Power Mode	7	5 (including PL)
Retention SRAM	8KB	4KB
Minimum Power Consumption with Retention	1.3uA (Wakeup 5 ~ 7us)	0.5uA (Wakeup 15us)
Minimum Power Consumption without Retention	260nA (Wakeup 256us)	100nA (Wakeup 4ms)
Usability	High (C library)	Medium (register handling)

## 5. 결론

사물 인터넷을 위한 스마트 임베디드 장치는 주로 배터리로 작동하고 배터리 교체 없이 몇 년 동안 동작할 수 있어야 하기 때문에, 휴면 모드에서의 초저전력 구동이 중요하다. 초저전력을 위해 가장 중요한 하드웨어 기능은 구동 전압과 클럭 속도를 상황에 맞게 제어해서 저전력 모드를 구성하는 것이고, 이는 칩 제조사별로 차이가 있다.

따라서, 본 논문에서는 초저전력 마이크로컨트롤러 플랫폼을 평가할 수 있는 ULPMark 벤치마크에 대해서 소개하였고, 이 평가에서 고르게 높은 점수를 받은 2개의 플랫폼을 선택하여 초저전력 동작을 위해 제공하고 있는 하드웨어 기능에 대해서 분석하였다. 또한, 드라이버 API와 세부 레지스터 제어를 통해 개발자들이 이 기능 들을 활용할 수 있는 방법에 대해 조사하고 분석 하였다.

## ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2018학년도 평택대학교 학술연구비의 지원에 의하여 연구되었음.

## REFERENCES

- [1] K.J.Singh, and D.S.Kapoor, "Create Your Own Internet of Things: A Survey of IoT Platforms," IEEE Consumer Electronics Magazine, Vol.6, No.2, pp.57-63, 2017.
- [2] A.Potsch, A.Berger, and A.Springer, "Efficient Analysis of Power Consumption Behaviour of Embedded Wireless IoT Systems," Proc. of 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2017.
- [3] S.M.R.Islam, D.Kwak, M.D.H.Kabir, M.Hossain, and K. Kwak, "The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey," IEEE Access, Vol.3, pp.278-708, 2015.
- [4] L.Chettri, and R.Bera, "A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems," IEEE Internet of Things Journal, Vol.7, No.1, pp.16-32, 2020.
- [5] D.W.Lee, K.Cho, and S.H.Lee, "Analysis on Smart Factory in IoT Environment," Journal of The Korea Internet of Things Society, Vol. 5, No. 2, pp.1-5, 2019.
- [6] J.G.Baek, H.W.Lee, "Design and Implementation of Self-installing Agricultural Automation System for Remote Monitoring and Control Based on LPWA Technology," Vol. 3, No. 1, pp. 13-19, 2017.
- [7] S.Dokko, "Design of Smart Feeding System based on the LPWA Network for Inland Fish Farms," Vol.2, No.3, pp. 31-35, 2016.
- [8] M.Redon, "Strategies for Choosing the Appropriate Microcontroller when Developing Ultra Low Power Systems," Analog Dialogue, Vol.51, No.12, pp.1-4, 2017.
- [9] S.Schauer, and P.Parakash, "IoT Provokes Change in Ultra-Low-Power MCUs," Texas Instruments, [Online], Available: <http://www.ti.com/lit/wp/sway005/sway005.pdf>
- [10] <https://www.eembc.org/ulpmark/>
- [11] White Paper, "Beyond the Data Sheets of Ultra-Low-Power MCUs: What Does Energy Efficiency Really Mean?" [Online], Available: [https://www.eembc.org/techlit/articles/elektroniknet\\_article\\_2015\\_07\\_21/index.html](https://www.eembc.org/techlit/articles/elektroniknet_article_2015_07_21/index.html)
- [12] AN4621 Application Note, "STM32L4 and STM32L4+ ultra-low-power features overview, [Online], Available: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application\\_note/9e/9b/ca/a3/92/5d/44/ff/DM00148033.pdf/files/DM00148033.pdf/jcr:content/translations/en.DM00148033.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/9e/9b/ca/a3/92/5d/44/ff/DM00148033.pdf/files/DM00148033.pdf/jcr:content/translations/en.DM00148033.pdf)
- [13] AN2909, Application Note, "Low-Power Features of SAM L Series Devices," [Online], Available: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/Appnotes/Low-Power-Features-SAML-00002709A.pdf>
- [14] UM1884, User Manual, "Description of STM32L4/L4+ HAL and low-layer drivers," [Online], Available: [https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user\\_manual/63/a8/8f/e3/ca/a1/4c/84/DM00173145.pdf/files/DM00173145.pdf/jcr:content/translations/en.DM00173145.pdf](https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/user_manual/63/a8/8f/e3/ca/a1/4c/84/DM00173145.pdf/files/DM00173145.pdf/jcr:content/translations/en.DM00173145.pdf)
- [15] Microchip Developer Help, [Online], Available: <https://microchipdeveloper.com/32arm:saml10-sleep-modes>

이진(Jin Lee)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
- 2008년 8월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
- 2009년 8월 ~ 2018년 2월 : 삼성전자 책임/수석연구원
- 2018년 3월 ~ 현재 : 평택대학교 정보통신학과 조교수

〈관심분야〉

사물인터넷, 무선통신반도체, 임베디드시스템