

논문 2017-12-10

AM3359 마이크로프로세서 기반 임베디드 시스템 설계 및 제작

(Design and Implementation of Embedded System
based on AM3359 Microprocessor)

김형우, 김세준, 최준영*

(Hyoung-Woo Kim, Se-Jun Kim, Joon-Young Choi)

Abstract : We develop an embedded system to measure various sensor data, control multiple motors, and communicate with mobile devices for system managements. Choosing TI AM3359 microprocessor featuring high processing performance, low power consumption, and various I/O device support, we design and build the embedded system hardware so that it supports multiple global positioning system (GPS) and gyro sensor modules to measure precise position; multiple pulse width modulation (PWM) outputs to control multiple direct current (DC) motors; a Bluetooth module to communicate with mobile devices. Then, we port the boot loader and device drivers to the built circuit board and construct the firmware development environment for the application programming. The performance of the designed and implemented embedded system is demonstrated by real motor control test using GPS and gyro sensor data and control parameters configured by a mobile device.

Keywords : AM3359, Microprocessor, Embedded systems, Porting, Firmware

1. 서 론

최근 산업, 가전, 의료 등 다양한 분야에서 특수 목적 수행을 위한 임베디드 시스템이 보편화됨에 따라 높은 수준의 성능과 안정성이 요구되고 있다. 점차 까다로워지는 요구사항을 해결하기 위해 하드웨어 아키텍처와 임베디드 시스템 설계는 처리속도, 지연시간, 유연성, 비용 등의 균형을 최적화하는 방향으로 변화하고 있다 [1].

임베디드 시스템에서 구동되는 응용프로그램은 사용자의 다양한 목적에 의해 많은 기능들이 포함되어야 한다. 이에 하드웨어 및 소프트웨어의 복잡

* Corresponding Author (jyc@pusan.ac.kr)

Received: Feb. 13 2017, Revised: Feb. 23 2017,

Accepted: Mar. 2 2017.

H.W. Kim, S.J. Kim, J.Y. Choi: Pusan National University

※ 본 논문은 2016년도 정부 (교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임 (No. NRF-2015R1D1A1A01056843)

도는 급격히 증가하고 있다. 또한, 임베디드 디바이스의 경우 저비용으로 고성능과 저전력의 특성을 만족하는 시스템이 매우 중요하므로 그 필요성이 대두되고 있는 추세이다 [2].

저전력, 고효율의 임베디드 시스템 개발을 위해서는 기본적으로 CPU의 선택이 중요한데, 임베디드 CPU로서 ARM 사의 Cortex 시리즈는 최근 이러한 목적성에 부합되어 많이 사용되고 있다.

소모 전력의 경우 Cortex-M 계열은 타 CPU 대기전력 수준의 동작 전력을 나타내며 고성능 Cortex 계열인 Cortex-A의 경우도 코어 당 수백 mW로 범용 CPU를 대표하는 x86이 20~100W 정도 전력소모를 보이는 것에 비하면 저전력의 임베디드 시스템 개발 목적에 매우 부합하는 CPU라고 볼 수 있다.

본 논문에서는 스마트폰, TV 등의 멀티미디어 기기와 같이 많은 양의 리소스를 처리해야 하는 응용분야나 다중 센서 데이터 처리, 다양한 주변장치 제어에 적합한 Cortex-A 기반 AM3359 마이크로프로세서를 사용하여 다양한 센서 데이터를 실시간으로 관리할 수 있고 모바일 기기와 무선통신이 가

능하며, 사용자 정의 매개변수를 기반으로 DC모터 제어를 저전력으로 수행하는 임베디드 시스템을 설계 및 제작하였다 [3-5].

제작한 하드웨어를 위한 부트로더와 각종 디바이스 드라이버를 포팅하였고, Windows 또는 Linux 운영체제 기반 범용 Host PC에서 소프트웨어 제작이 가능하도록 적합한 펌웨어 개발환경을 구축하였다.

구축한 개발환경을 기반으로 하여 다중 채널 센서 및 위성항법장치 데이터의 처리를 수행함과 동시에 모바일 기기와의 양방향 무선통신이 가능하고 사용자가 실시간으로 설정 가능한 제어 매개변수를 기반으로 36W급 DC모터를 제어하는 하드웨어 성능 평가용 펌웨어 [6, 7]를 개발하여 시험하였다. 그 결과, 초기 설계시 목표하였던 시스템 동작이 저전력 (5~20W)으로 수행되는 성능을 검증하였다.

II. Cortex-A8 기반 AM3359 마이크로프로세서

2.1 Cortex-A8

ARM Cortex-A8은 2005년 중반기에 발표된 첫 ARMv7-A 기반의 CPU 아키텍처로써 이전 세대 아키텍처와 비교하였을 때 클럭 당 동시 명령어 및 데이터 처리 능력이 향상되어 정수 연산 및 멀티미디어 데이터 처리, 부동 소수점 연산 능력 모두가 향상되었다 [8].

Cortex-A8의 경우 한 사이클 당 2개의 명령어 디코더가 있으며 Issue 명령 분배기에서 3개의 연산 모듈로 분기 가능한데, 3개의 연산 모듈로는 ALU/MUL (정수 연산 모듈, 사칙연산 지원), ALU, LS (로드 스토어 모듈)이 있다.

2.2 AM3359 프로세서

ARM Cortex-A8 프로세서에 기반한 AM335x 계열의 마이크로프로세서는 이미지 및 그래픽 프로세싱과 EtherCAT, PROFIBUS와 같은 산업 자동화 시스템용 부속 임베디드 시스템과 같은 주변 장치 및 인터페이스 옵션 등에 이용된다. 또한, AM335x 기반 임베디드 장치는 높은 레벨의 오피레이팅 시스템 (High Level Operating System)을 지원한다.

그림 1은 AM3359 마이크로프로세서 서브시스템 각각에 대한 구조를 제시한다 [9]. 최대 1GHz의 클럭 성능을 내는 Cortex-A8을 기반으로 디스플레이

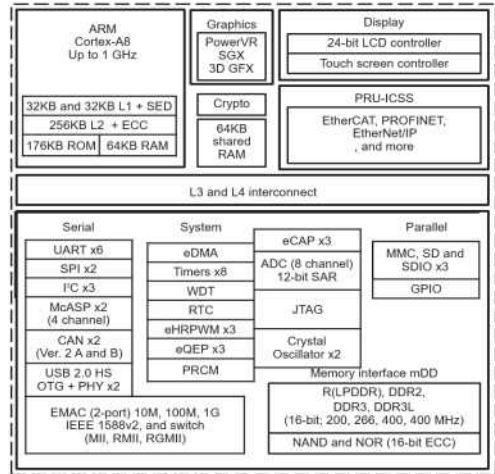


그림 1. AM335x 기능 블록 다이어그램
Fig. 1 AM335x functional block diagram

및 게이밍 효과를 지원하기 위한 3D 그래픽 가속기인 PowerVR SGX 서브시스템이 있으며 주변장치 인터페이스의 확장과 EtherCAT, PROFINET 등의 산업용 통신 프로토콜 운용을 위한 PRU-ICSS (Programmable Real-time Unit and Industrial Communication Subsystem)는 ARM Core와 분리된 클럭 처리를 통해 마이크로프로세서의 효율성과 융통성 증대에 기여한다.

또한 PRU-ICSS의 핀, 이벤트, 모든 SoC 자원에 대한 접근가능성과 함께 프로그램 가능 특성은 신속한 실시간 응답, 특수 데이터 처리 작업, 사용자 정의 주변장치 인터페이스를 구현하거나 SoC의 다른 프로세서 코어의 작업을 오프로딩 할 때 유연성을 제공한다.

2.3 주변장치 인터페이스

AM3359 프로세서는 뛰어난 주변장치 확장 성능을 자랑한다. 확장 가능한 주변장치로는 2채널 USB 2.0, 100/1000Mbps 이더넷, 2채널 CAN 통신 인터페이스, 2개의 다중채널 오디오 직렬 포트, 6개의 UART, 2채널의 SPI 인터페이스, MMC, SD, SDIO 포트, 3채널의 I2C 인터페이스, GPIO 외 SGX530 3D 그래픽 엔진, LCD, 12bit ADC 등이 있다.

III. 하드웨어 설계 및 제작

본 논문에서는 위치 및 가속도 센서 기반 모터

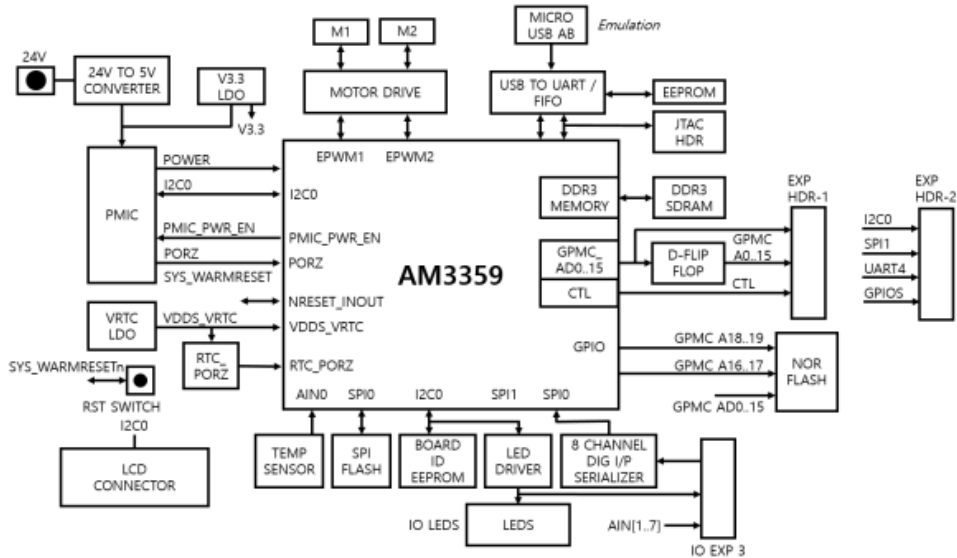


그림 2. 임베디드 시스템 하드웨어 블록 다이어그램
 Fig. 2 Block diagram of embedded system hardware

제어시스템으로 사용될 임베디드 시스템을 개발하는 것이 목표이고 기능 및 성능에 대한 요구사항은 다음과 같다. 최소 1kHz 샘플링 주파수로 데이터를 수집하고 각각의 데이터 샘플링 시 인터럽트 이벤트 발생이 가능한 주변장치를 다중 채널로 확장 가능한 인터페이스가 필요하다. 또한, 사용자가 모바일 기기를 이용하여 실시간으로 시스템을 모니터링하고 수정 및 진단이 가능한 무선통신 확장 인터페이스가 구축되어야 하며 동시에 2채널 이상의 모터 제어 신호 출력이 가능한 모터 드라이브 제어 인터페이스가 요구된다.

이러한 조건을 만족시키기 위해서는 코어 당 높은 클럭을 갖고, 외부메모리 인터페이스 확장이 가능해야 하며 다양한 주변장치 호환이 가능하고 시스템의 동작 시와 대기 시의 효율적인 소모전력 관리가 가능한 프로세서의 선택이 선행되어야 한다. 본 논문에서는 TI 사의 AM3359 Sitara 프로세서를 기반으로 하여 임베디드 하드웨어를 설계 및 제작한다 [10].

3.1 하드웨어 구성

임베디드 시스템 하드웨어의 구성은 그림 2에 도시된 바와 같다. 24V DC 전원을 인가받아 프로세서 및 주변장치, 모터 드라이브 보드 구동에 필요한 전원을 공급할 수 있도록 전원부를 구성하였다.

또한, 효율적으로 각각의 인터페이스 부로 공급되는 전원을 관리할 수 있도록 별도의 전원관리 IC소자를 전원부에 배치하였다.

프로세서의 외부 메모리 확장 인터페이스를 이용해 2Gbit (128Mx16) 규격의 DDR3 SDRAM을 탑재하였으며, 범용으로 많이 쓰이는 형태의 케이블을 이용하여 마이크로프로세서의 디버깅 환경을 구축하기 위해 Micro USB-B 규격의 JTAG 인터페이스 입력단을 구성하였다. 별도의 디버깅용 JTAG 케이블의 사용 없이 USB 케이블만으로 제작한 하드웨어와 Host PC 간 디버깅 인터페이스를 구성하기 위해 온 보드 형태의 XDS100v2 USB-JTAG 인터페이스를 설계하였다.

2채널의 DC모터 제어 인터페이스 구성을 위해 4상한 초퍼회로 기반의 모터드라이브 및 ePWM 신호 출력단을 구성하였다. 그 외 다양한 UART, SPI, I2C, GPMC 주변장치의 확장이 용이하도록 외부 확장 핀 커넥터를 배치하였다.

3.2 하드웨어 세부 설계

전원부는 24V to 5V/12V DC-DC Converter, 3.3V 프로세서 I/O 공급전압을 생성하기 위한 LDO, 그 외 프로세서 및 주변장치로 연결되는 전원을 관리하기 위한 TPS65910x Integrated Power Management Unit IC로 구성된다. USB 포트를 통

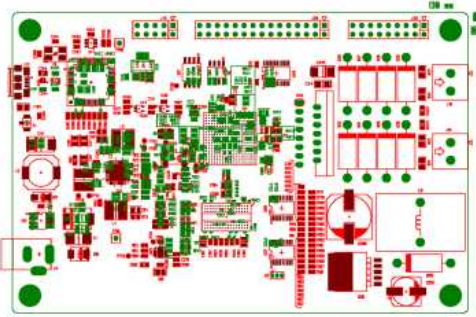


그림 3. PCB 레이아웃
Fig. 3 PCB layout



그림 4. 제작된 임베디드 시스템 하드웨어 보드
Fig. 4 Built embedded system hardware board

한 SPI 플래시가 가능하도록 W25Q64 SPI FLASH 모듈을 사용하였고, 별도의 Boot Configuration 회로와 스위치를 이용하여 부팅모드 선택이 가능하도록 설계하였다.

프로세서는 외부 메모리 확장이 가능한데, 본 논문에서 제작한 보드에서는 외부 메모리 인터페이스를 이용하여 16Mb \times 16x8 크기의 뱅크를 갖는 DDR3 MT41J128M16 SDRAM을 추가 탑재하였다. 또한, DC모터 제어를 위한 모터 드라이브 부의 구성을 위해 L298N 모듈을 이용하였다. 설계한 하드웨어의 PCB 레이아웃은 그림 3에 도시된 바와 같고 최종 제작을 마친 보드의 형태는 그림 4와 같다. 모터 제어를 위한 드라이브 인터페이스 부분을 보드의 우측단에 위치시켰으며, 상단에는 주변장치 확장을 위한 핀 헤더를 배치하였고, USB-JTAG, USB-SCI 인터페이스를 좌측에 배치하였다. 또한, SDRAM은 MCU 하단에 배치하였다. 설계한 임베디드 하드웨어의 설계 사양은 표 1과 같다.

표 1 설계한 임베디드 하드웨어 사양
Table 1 Designed embedded hardware specification

Processor	AM3359 Sitara Processors	
Clocks	Up to 800MHz (32kHz Real-Time)	
External Memory	DDR3 SDRAM (2Gbit)	
JTAG Type	USB micro B type on board XDS100v2	
Flash	SPI, NOR	
Reset Signals	System Reset	SYS_RESETn
	Only Processors	SYS_WARMRESETn
Main Power	24V DC	
UART	4 Channel	
SPI	2 Channel	
Motor Control	2 Channel 36W DC Control	

IV. 펌웨어 개발환경 구축

본 논문에서 제작한 하드웨어에 배치된 테스트 포인트를 이용하여 전원 공급 및 클럭 인가 등에 대한 디버깅 작업이 선행되면 시스템의 응용 목적에 맞도록 활용 가능한 모든 디바이스 자원에 대한 동작 테스트가 필요하다. 이러한 디바이스 동작 테스트를 위해서 우선 실시간 운영체제 기반의 소프트웨어 프로그램에 비해 동작 결과의 직관적인 예측이 가능하며 직접적인 디바이스 레지스터 접근이 용이한 펌웨어 개발환경의 구축이 요구된다.

프로세서 내부의 IRAM (Internal Random Access Memory)을 이용한 실시간 디버깅 환경 및 부트로더를 이용한 플래쉬 메모리 내 소프트웨어 부팅 동작, 각종 주변장치에 대한 디바이스 드라이버의 포팅을 통해 개발한 임베디드 하드웨어에 대한 펌웨어 개발환경은 그림 5와 같다.

4.1 부트로더 포팅

부트로더를 포팅하기 위해서는 Host PC에서 타겟 시스템의 IRAM에 접근하기 위한 별도의 하드웨어 설정이 필요하다. 본 논문에서 제작한 임베디드 보드의 경우 FT2232HL USB-JTAG 모듈을 사용하고 있어, FT2232HL 모듈 내부에 위치한 EEPROM에 USB-JTAG 사용에 필요한 주소 및

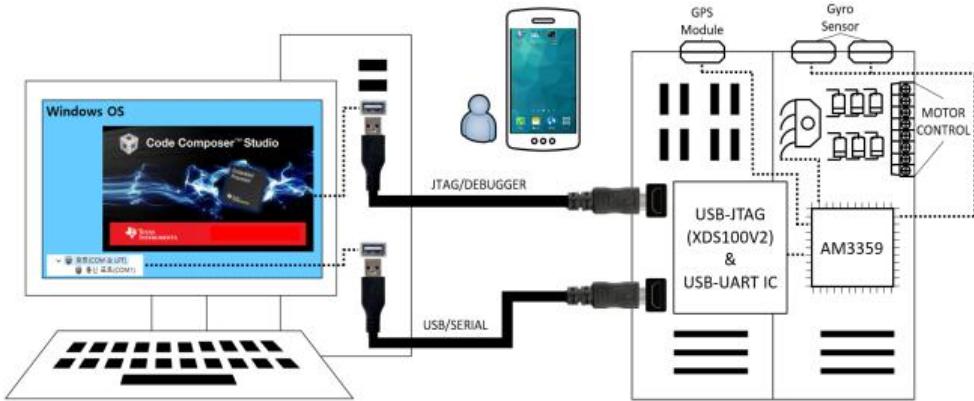


그림 5. 펌웨어 개발환경 블록도

Fig. 5 Firmware development environment block diagram

프로파일 설정을 수행한다.

USB 모듈의 프로파일 설정이 끝나면 부트코드를 작성한다. 부트로더 동작의 첫 번째 단계는 메모리 관리 유닛 (MMU, Memory Management Unit)의 DDR, OCMC, Device Memory 섹터에 대한 주소 및 초기화 설정이다. 이때, 하드웨어의 외부 메모리 및 사용 중인 디바이스의 메모리 등에 대한 설정이 완료된다.

다음으로 보드 내 별도로 부착된 SPI Flash 메모리에서 프로세서 내 RAM으로 응용프로그램을 로드할 수 있도록 코드를 작성한다. 로드할 대상 응용프로그램에 대한 이미지파일 타입 및 크기 설정을 완료하고 불러올 응용프로그램이 위치한 메모리의 주소 및 응용프로그램을 복사할 메모리 주소에 대한 설정을 함으로써 부트코드의 작성이 완료된다.

작성된 부트코드를 컴파일하여 생성된 부트로더를 USB-JTAG와 SPI 플래쉬 프로그램을 이용하여 보드 내 프로세서의 부트로더 메모리 섹터에 다운로드한다.

4.2 디바이스 드라이버 포팅

프로세서의 주변장치에 대한 디바이스 드라이버 포팅을 위해 각각의 디바이스 메모리 주소를 설정하고 각각의 디바이스 드라이버를 펌웨어의 라이브러리로 위치시킨다.

사용할 디바이스에 대한 드라이버는 TI사에서 제공하는 AM3359 Software Development Kit에서 얻을 수 있으며, 장치 주소와 드라이버만을 이용하여 펌웨어를 통해 디바이스 드라이버를 포팅한다.

본 논문에서는 제작한 하드웨어의 펌웨어를 설계

하기 위해 Windows 10 운영체제의 Host PC를 사용하였으며, CCS (Code Composer Studio) v6 통합 개발 환경 소프트웨어를 이용하였다.

V. 성능 시험

5.1 성능 시험 환경 구축

본 논문에서 개발한 임베디드 시스템의 성능시험을 위해 2기의 자이로센서, 위성항법장치, 모바일 기기와의 무선통신을 위한 블루투스 모듈을 하드웨어의 디바이스 인터페이스를 이용하여 연결하였다. 또한, 36W 급 모터 2기를 2ch DC모터 제어 인터페이스에 확장하여 자이로센서 및 위성항법장치, 모바일 기기를 이용하여 그림 6과 같이 임베디드 시스템 시험 환경을 구축하였다.

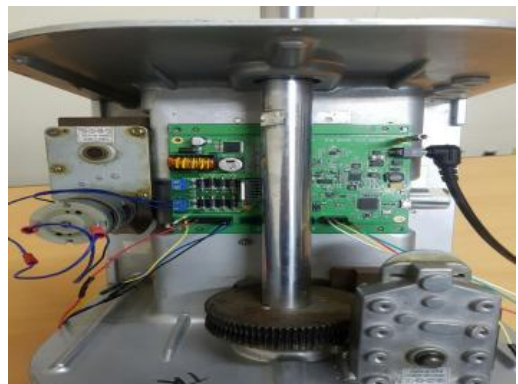


그림 6. 임베디드 시스템 시험 환경

Fig. 6 Embedded system test environment

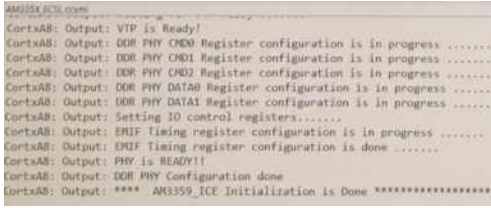


그림 7. 하드웨어 초기화 콘솔 메시지 화면
Fig. 7 Console message window of hardware initialization

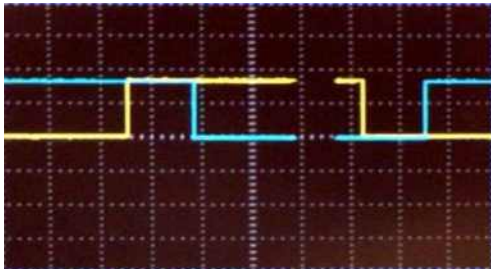


그림 8. 스코프를 이용한 GPIO 출력 측정
Fig. 8 GPIO output measurement using scope

위 시험을 통해 설계한 보드의 UART 및 통신부 동작 테스트, 모바일 기기와의 실시간 통신을 위한 인터럽트 동작 진단, DC모터 제어를 위한 ePWM 모듈 및 GPIO 테스트가 가능하다.

5.2 시험 결과

TI사에서 제공하는 통합 개발 환경인 Code Composer Studio 6 버전을 이용하여 제작한 하드웨어의 초기화 테스트를 한 결과는 그림 7과 같다. 메모리를 포함한 모든 하드웨어 초기화가 완료되었음을 Console 메시지를 통해 확인할 수 있다.

스코프를 이용하여 GPIO 동작 테스트를 하였다. 2개의 GPIO 신호를 출력하여 측정한 결과 그림 8과 같이 프로세서의 Logic Level 전압이 출력되어 동작함을 확인할 수 있다.

프로세서의 ADC 모듈 동작 테스트를 위해 온도 센서를 부착하여 콘솔창으로 수신된 전압 값을 출력한 결과는 그림 9와 같다.

ePWM 모듈의 동작 테스트를 위해 듀티비 90%의 PWM 신호를 출력하여 스코프로 측정한 결과는 그림 10과 같다.

UART 인터페이스를 통해 전달받은 자이로 센서의 데이터 값과 GPS로부터 전달받은 시간 데이터를 처리하여 프로세서로부터 모바일 기기로 전송

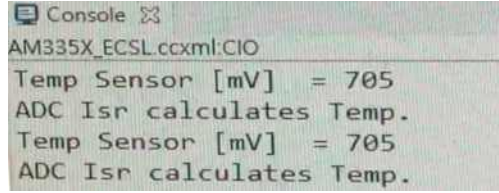


그림 9. ADC 모듈 테스트 콘솔 화면
Fig. 9 ADC module test console window

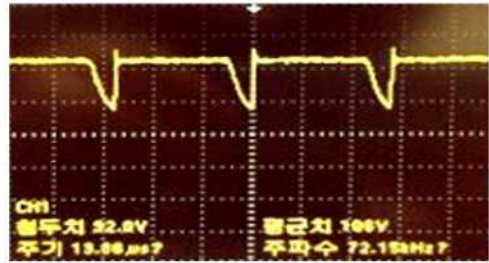


그림 10. 듀티 90%의 ePWM 출력 신호
Fig. 10 90% duty ePWM output signal

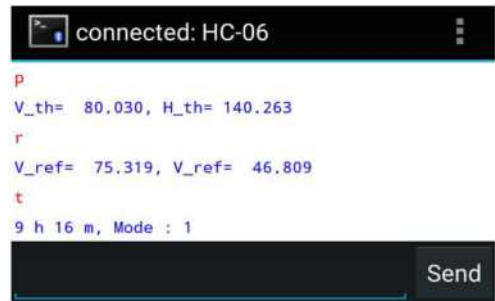


그림 11. 모바일 기기 통신 화면
Fig. 11 Mobile device communication window

한 시험결과는 그림 11의 모바일 기기 화면으로 확인할 가능하다.

모바일 기기를 통해 명령어를 보드로 전송하게 되면 인터럽트를 발생시키게 되고 이때, 버퍼에 저장된 가장 최근의 정보를 보드는 모바일 기기로 전송하게 된다. 그림 11의 'p'는 현재 DC모터에 부착된 자이로 센서의 오일러 각 정보, 'r'은 DC모터 지령 오일러 각 정보, 't'는 GPS로부터 수신된 시간 정보를 받아오기 위한 별도의 명령어 프로토콜이다.

위 결과를 통해 제작한 임베디드 하드웨어의 무선 통신 인터페이스 및 직렬 통신 인터페이스, 인터럽트 모듈이 정상적으로 작동하고 있다는 것을 확인하였다.



그림 12. 하드웨어 보드 최소 전류 소모량
Fig. 12 Minimum current consumption of hardware board



그림 13. 하드웨어 보드 최대 전류 소모량
Fig. 13 Maximum current consumption of hardware board

전류 소모량을 확인하기 위해 측정한 결과는 그림 12 및 그림 13과 같다. DC모터의 비동작 시 소비전류량은 220mA, 동작 시 950mA로 측정되어 저전력으로 제어시스템 운용이 가능하다는 결과를 도출했다.

보드가 최소한의 구동을 위해 동작할 때를 ‘저전력모드’, 모터 및 주변 장치 인터페이스가 모두 동작할 때를 ‘활성화모드’ 라고 정의할 경우 각각의 동작 모드에 대한 전류 및 전력 소모량은 표 2에 도시된 바와 같다.

범용 CPU의 대표 격인 x86 계열의 CPU의 전력 소모량이 20W~100W로 나타나는 것과 비교하였을 때 제작한 임베디드 시스템에서 채택한 Cortex-A 계열은 저전력 고성능의 임베디드 시스템 개발 목적에 부합하는 CPU라 할 수 있다.

표 2. 동작 모드 별 전류 및 전력 소모량
Table 2. Power and Current consumption of each operation mode

Operating Mode	Current Consumption	Power Consumption
Low Power	220mA	5.28W
Activation	950mA	21.6W

VI. 결 론

본 논문에서는 다양한 센서 데이터의 처리가 가능하고 모바일 기기와 무선통신이 가능하며 다중 채널로 연결된 모터의 제어가 가능한 임베디드 시스템을 저전력 동작이 가능하도록 설계 및 제작하였다. 시스템 프로세서로서 저전력, 고효율 성능을 보이는 Cortex-A8 기반 AM3359를 사용하였고 펌웨어 개발환경 구축을 통해 시스템의 주변장치 인터페이스 및 저전력 동작 테스트를 수행하였다.

시험 결과를 통하여 설계한 보드의 UART 및 모바일 기기와의 블루투스 통신 모듈, DC모터 제어를 위한 ePWM 모듈 등 다양한 주변장치 인터페이스의 정상적인 동작을 확인하였고 이러한 주변장치를 이용하여 수집한 센서 데이터 및 제어 매개변수를 기반으로 동작하는 DC모터 제어 시험을 통해 임베디드 디바이스에 필수로 요구되는 저전력, 고효율 특성 또한 만족하는 것을 확인하였다.

References

- [1] G.S. Lim, C.W. Min, Y.G. Eom, "Load-balancing for Improving User Responsiveness on Multicore Embedded Systems," Proceedings of Linux Symposium, pp. 25-33, 2012.
- [2] Y.J. Choi, "Load Unbalancing Scheduling Method for Energy-Efficient Multi-core Embedded Systems," IEMEK J. Embed. Syst. Appl., Vol. 11, No. 1, pp. 1-8, 2016 (in Korean).
- [3] S. Gurrapu, "Connected Sensors are the Heartbeat of Industrial Automation," Texas Instruments Inc., <http://www.ti.com/lit/wp/spry229a/spry229a.pdf>.
- [4] P. Prakash, "Building Automation for Enhanced Energy and Operational Efficiency," Texas Instruments Inc., <http://www.ti.com/lit/wp/spry247a/spry247a.pdf>.
- [5] P. Prakash, T. Mauer, "Optimizing the Industrial Design Cycle With Programmable Multiprotocol Industrial Communication," Texas Instruments Inc., <https://www.ti.com/seclit/wp/spry291a/spry291a.pdf>.
- [6] H.W. Kim, J.Y. Choi, "Development of

- Low-Cost Solar Embedded Systems for Sun Light Systems,” Journal of KIIT, Vol. 14, No. 1, pp. 19-26, 2016.
- [7] S.J. Kim, H.W. Kim, K.G. Nam, J.Y. Choi, “Development of Bluetooth Based Control System for Performance Improvement of Sunlight Tracker,” Journal of KIIT, Vol. 14, No. 9, pp. 19-26, 2016.
- [8] AM335x Device Evaluation, Texas Instruments Inc., http://processors.wiki.ti.com/index.php/Device:AM335x:Device_Evaluation.
- [9] AM335x Sitara™ Processors, Texas Instruments Inc., <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/am3359.pdf>.
- [10] AM335x Hardware Design Guide, Texas Instruments Inc., http://processors.wiki.ti.com/index.php/AM335x_Hardware_Design_Guide.

Hyung-Woo Kim (김형우)



He received the M.S. degree in Electronics Engineering from Pusan National University in 2015. He is currently a Ph.D. candidate in Electronics Engineering at Pusan National University. His research interests include embedded system and control system.
Email: hwkim0314@pusan.ac.kr

Joon-Young Choi (최준영)



He received the Ph.D. degree in Electronics and Electric Engineering from Pohang University of Science and Technology in 2002. He is currently a professor of Electronics Engineering at Pusan National University, Busan, Korea. His research interests include embedded system and control system.
Email: jyc@pusan.ac.kr

Se-Jun Kim (김세준)



He received the B.S. degree in Electronics Engineering from Pusan National University in 2016. He is currently a M.S. student in Electronics Engineering at Pusan National University. His research interests include embedded system and control system.
Email: sjk@pusan.ac.kr