



# 전력전자와 DSP

1991년 대학 3학년 시절 전력전자 연구실 박사과정 선배가 보여준 Texas Instrument(이하 TI)의 32bit DSP(TMS320C30)는 당시 Intel의 16bit 계열 CPU 8088을 이용하여 마이크로마우스 로봇을 만들고 있던 필자에게 생소하면서도 경이로운 모습으로 다가왔다.

이 정도의 고성능 DSP라면 엄청난 로봇을 만들 수 있겠다는 생각에 사전만큼이나 두꺼운 2권의 책(User's Guide)을 도서관에서 한줄 한줄 읽어가면서 겨울방학을 보냈고, 청계천 세운상가에서 사 온 메모리와 ADC, DAC를 인터페이스 한 DSP 보드를 직접 설계해서 납땀하여 성공적으로 동작시켰을 때는 마치 하늘을 나는 것 같이 행복해했던 기억이 아직도 생생히 남아 있다.

이러한 경험이 계기가 되어 전력전자를 전공하게 되었기에, 필자에게 DSP는 인생의 전환점으로 작용했던 것 같다.

본 기고문에서는 전력전자 관련 분야에서 활용되고 있는 DSP에 대하여 소개하고자 한다. 태양광 발전 및 ESS 전력 변환시스템에서 가전용 모터제어용 인버터에 이르기까지 다양한 제품군의 DSP가 출시되고 있는데, 주요 제품의 특징과 개발환경에 대해 살펴보고자 한다.



# 1. 서론

전력전자에서 제어를 담당하는 두뇌로서 핵심 역할을 하는 DSP는 연산 속도 증가 외에도 제어에 필요한 다양한 기능들을 하나의 칩 안에 포함해가면서 발전해왔다. 1990년대에 사용되던 DSP는 주로 연산 기능만을 가지고 있어 전력변환시스템에 이용하기 위해서는 별도로 외부 메모리, ADC, DAC 등을 인터페이스하고 PLD(Programmable Logic Device) 등을 이용하여 PWM 패턴 발생기 등을 구현해야만 했다. 따라서 당시의 전력변환시스템 제어용 DSP 보드는 마치 컴퓨터의 마더보드와 같은 위용(?)을 자랑하곤 했다. 또한 소프트웨어 개발을 위해서는 당시로써는 고가의 에뮬레이터가 필요해서 이를 대체할 목적으로 PC에서 컴파일된 헥사 코드 형식의 실행 파일을 DSP 보드의 메모리에 로딩하여 실행하는 개발 환경을 직접 개발하기도 하였다. 이를 위해서는 C startup 코드를 직접 수정해야 했는데, 전력전자 전공자에게는 다소 생소한 고급(?)의 프로그래밍 기술로 대접받기도 했다. 또한 인텔이 막 보급되던 시대이어서 지금과 같이 DSP에 대한 자료(User's Guide, Application Note 등등)를 쉽게 구할 수 없었다. 청계천 세운상가에서 DSP User's Guide를 하나 받아오면 그날은 운수 좋은 날이던 시절이었다.

2000년대에 들어오면서 TI社의 240x 시리즈와 같이 디지털 제어에 필요한 주요 Peripheral들이 하나의 칩 안에 내장된 DSP가 출시되었고, 산업용에서 가전용에 이르기까지 다양한 제품군에 DSP가 본격적으로 적용되기 시작했다. 또한, DSP 제조사의 홈페이지를 통해 다양한 기술 문서들이 공유되기 시작했고, 특정 애플리케이션에 대한 다양한 예제 코드들이 공개되면서 비교적 쉽게 DSP 응용 영역에 접근할 수 있게 되었다. 국내에서는 DSP의 절대 강자로 TI 제품군이 자리 잡고 있는 듯하다. 태양광 발전 및 ESS용 전력변환 시스템에서 산업용 모터 구동장치에 이르기까지 TI의 C2000 계열 제품군이 널리

활용되고 있다. 그러나 가격적 측면에서는 ARM Cortex-M4 기반의 DSP(또는 MCU)가 경쟁력을 확보하고 있으며, 비교적 시스템 복잡도가 높지 않은 가전용 인버터에 널리 활용되고 있다. 본 기고에서는 전력전자 분야에서 널리 사용되고 있는 TI C2000계열 DSP와 국내 유일의 전력전자 제어용 MCU를 생산하는 ABOV 반도체의 DSP에 대해 그 특징과 개발환경 등에 대하여 정리하였다.

## 2. TI의 전력전자 제어용 DSP

### 2.1 TI C2000 계열 DSP의 특징

TI에서는 다양한 MCU와 DSP 제품군을 출시하고 있는데, 전력전자 분야에서 많이 사용되고 있는 C2000 계열의 제품은 MCU로 지칭하고 있다. 현재 C2000 계열 제품은 240x 시리즈로 대표되던 1세대를 지나서 각각TMS320F28335와 TMS320F28377로 널리 유명해진 2세대와 3세대 제품군이 시장에 공급되고 있다.

그림 1은 C2000 계열의 2세대 및 3세대 MCU들을 성능과 세대에 따라 분류한 것이다. C2000 계열 MCU는 1세대에서 2세대로 오면서 다양한 Peripheral들이 추가되었고, 각 Peripheral의 기능들 역시 크게 향상되었다. 예를 들면, 2세대로 넘어 오면서 PWM 모듈, Capture 모듈, 그리고 QEP 모듈의 기능이 확장되었는데, TI에서는 기능 확장을 강조하기 위해 각각의 모듈 이름에 영어단어 enhanced를 붙였다. 2세대 C2000 MCU의 ePWM모듈에서는 여러 가지의 PWM 펄스 패턴을 생성할 수 있도록 다양한 제어 레지스터들을 제공하고 있으며, PWM에 사용되는 게이팅 신호들의 상태 변화에 맞추어 A/D 컨버터의 변환 시점을 동기화할 수 있도록 하여 디지털 전류 제어를 용이하게 구현할 수 있게 하였다. 그러나 280x 계열의 경우 FPU를 내장하고 있지 않아서 실시간 디지털 제어를 구현하기 위해서는 정수형 연산만을 이용해서 알고리즘을 구현해야 하는 어려움이 따른다. 이에 대한 대책으로 TI에서는 Q Math라는 명칭의 라이브러리를 제공하고 있으나, floating point 연산을 이용하는 경우에 비하면 여전히 알고리즘 구현 과정이 번거로운 편이다<sup>2)</sup>.

TMS320F28335는 최대 150MHz의 주파수로 동작하고, FPU(Floating-Point Unit)를 내장하고 있어 floating point 연산을 실시간으로 수행할 수 있으며, 변환 시간이 80ns인 고속의 16채널 A/D 컨버터와 256K 워드의 플래시 메모리, 그리고 다기능의 GPIO를 내장하고 있어 하나의 칩으로 3상 3레벨 인버터 제어 시스템을 구축할 수 있다. 이러한 성능 확장에 힘입어 TI의

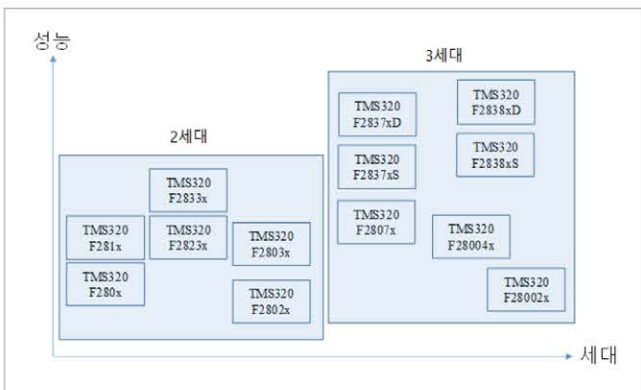


그림 1 TI의 C2000 계열 MCU<sup>1)</sup>

C2000 계열 2세대 MCU의 대표 주자 격인 TMS320F28335는 국내 전력전자 산업계에서 베스트셀러로 자리 잡게 되었다. C2000 계열의 3세대 MCU들은 2세대 대비 연산 속도 및 기능이 더욱 향상되었다. 예를 들면 TMS320F28377D는 Dual CPU 구조로 800MIPS(Million Instruction Per Second)의 연산 능력을 갖추고 있다. C2000 계열 3세대 MCU들은 FPU뿐만 아니라 CLA(Control Law Accelerator), TMU(Trigonometric Math Unit), FINTDIV(Fast Integer Division Unit), 그리고 VCU(Viterbi, Complex Math, and CRC Unit)를 갖추고 있어서 고속의 실시간 디지털 제어 구현에 최적화되어 있다고 볼 수 있다<sup>5)</sup>. 이러한 기능들을 이용하면 전류 제어를 1~2 [us] 이내에 구현할 수 있어 전류 제어 대역폭을 크게 향상할 수 있다. 이러한 특징들로 인하여 최근 C2000 계열 3세대 DSP들이 고성능 모터 제어용 인버터와 ESS 및 태양광 발전용 멀티 레벨 인버터 제어에 활발히 적용되고 있다.

## 2.2 TI C2000 계열 DSP의 개발 환경

전력전자 시스템에서의 디지털 제어를 위해서는 DSP의 성능 못지않게 개발 환경이 중요하다. C2000 계열 DSP의 프로그래밍 언어로는 C언어가 주로 사용되고 있다. C2000 계열 DSP의 IDE(Integrated Development Environment)로는 CCS(Code Composer Studio)가 사용되고 있다. 현재 CCS는 버전 10까지 출시되어 있으며, CCS 버전 7부터는 TSPA(Technology Software Publicly Available) 정책에 의해 별도의 사용권을 구매하지 않고도 무료로 다운로드받아서 사용할 수 있다<sup>6)</sup>.

C2000 계열 MCU들의 기능이 복잡해진 만큼 CCS를 이용한 프로그램 개발 환경 역시 복잡한 편이다. C2000 계열 DSP를 처음 접하는 초보자들이 CCS를 이용하여 C2000 계열의 DSP에 대한 프로젝트를 직접 만들어가는 과정을 익히는 데는 많은 시간이 필요하다. 다행히도 TI에서는 홈페이지를 통해 주요 Peripheral의 설정 등을 포함하는 다양한 예제 프로젝트 파일들과 수학 함수 라이브러리들을 C2000Ware라는 이름(과거에는 controlSuite라는 명칭으로 제공)으로 제공하고 있다<sup>5)</sup>. CCS를 설치한 이후에 C2000Ware를 설치하면 각 DSP에 해당하는 라이브러리 및 예제 프로젝트 코드들이 자동으로 만들어진다. 따라서 C2000Ware에서 제공하는 특정 예제 프로젝트를 CCS에서 로딩하여 사용하면 초보자도 어렵지 않게 C2000 계열 DSP 프로그램을 개발할 수 있다.

CCS를 통해 DSP 프로그램을 완성하면 DSP에 로딩하여 실행할 수 있는 에뮬레이터가 필요하다. 일반적으로 디지털 제품 기반의 DSP 개발자들에게는 XDS560 제품과 같은 JTAG 방식의 에뮬레이터 사용이 권장된다. JTAG 방식의 에뮬레이터를

사용하면 거의 실시간으로 내부 레지스터 및 제어 변수들을 관찰할 수 있고, 추적(trace) 기능을 활용하면 제어 프로그램의 오류도 비교적 쉽게 찾아낼 수 있다. 그러나 전력 변환 시스템에서 JTAG 에뮬레이터를 사용하게 되면 스위칭으로 인한 노이즈가 JTAG 단자를 통해 DSP에 유입되어 DSP와 개발 환경 사이의 통신이 끊어지면서 DSP에서 동작 중인 전력변환 시스템의 제어 프로그램을 사용자가 직접적으로 제어할 수 없는 상황이 발생할 우려가 있다. 절연형 JTAG 에뮬레이터를 사용함으로써 노이즈에 의한 오동작을 줄일 수 있는 것으로 알려져 있으나, 전력전자의 특수성으로 인해 국내 전력전자 산업계에서는 JTAG 에뮬레이터보다는 DSP의 통신 기능을 통해 프로그램을 부트로딩(boot-loading)하고 제어 변수들을 관찰하는 기능을 제공하는 개발 환경을 선호하게 되었다. 이와 관련된 개발 환경으로 그린파워에서 판매하는 easyDSP<sup>6)</sup>와 리얼시스에서 판매하는 RealDSP-UT<sup>7)</sup> 제품이 있는데, DSP의 부트로딩 기능을 통해 프로그램을 메모리에 로딩할 수 있고, 프로그램 내부 변수를 직접 모니터링하고 수정할 수 있어 사용자들의 만족도가 높은 편이다. easyDSP 또는 RealDSP-UT를 사용하기 위해서는 각각의 개발 환경에서 제공하는 헤더 파일과 C 코드를 프로젝트에 추가해 주어야 한다. easyDSP는 DAC를 통해 제어 변수를 스코프로 출력하여 모니터링하는 기능이 편리하고 광 통신을 이용한 절연 기능을 지원하고 있으며, RealDSP-UT는 가격이 저렴한 장점이 있다.

## 3. ABOV의 전력전자 제어용 MCU

### 3.1 ABOV MCU의 특징

ABOV 반도체는 국내 유일의 모터 제어 전용 MCU를 설계/생산하는 회사로 그림 2와 같이 ARM 코어 기반의 모터 제어 MCU 라인업을 갖추고 국내 가전 대기업에 오랜 기간 공급하면서 갖춘 신뢰성과 가격 경쟁력을 무기로 가전용 인버터 시장에서 일본(르네사스, 파나소닉, 도시바 등), 미국(TI, 마이크로 칩 등), 그리고 유럽(ST Microelectronics) 업체들과 치열하게 경쟁하고 있다. 특히 ABOV 반도체는 국내 파운드리를 통해 MCU를 제조하고 있어 국제적인 통상 마찰 등의 영향을 적게 받는 것으로 알려져 있다.

가전 모터 제어 인버터에 가장 널리 적용되고 있는 제품군은 Cortex-M3 계열로, 단일 선트를 통해 인버터 상전류를 복원하는데 필요한 주요 기능들(PWM 신호에 동기된 ADC 변환과 PWM Duty 갱신 기능)을 MCU 내부의 Peripheral 레벨에서 구현해 놓았기 때문에 관련 프로그램 개발이 용이하다.

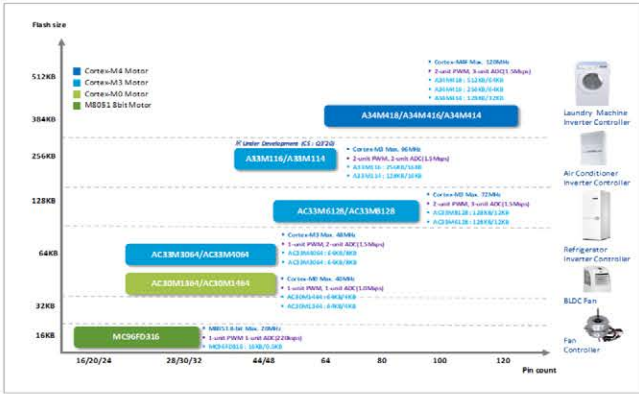


그림 2 ABOV 반도체의 모터제어 MCU 라인업<sup>[8]</sup>

Cortex-M0 또는 Cortex-M3 계열의 MCU를 이용하여 인버터 제어 프로그램을 개발하기 위해서는 정수형 연산만을 이용해 하므로 일반적으로 개발에 많은 시간이 소요되고, 유지 및 보수에 많은 어려움이 따른다. 이로 인해 최근 가전용 인버터 시장에서는 FPU를 내장한 MCU 적용이 시작되고 있다. ABOV 반도체 역시 FPU를 내장한 Cortex-M4 계열의 MCU를 출시하여 시장 변화에 대응하고 있다.

### 3.2 ABOV MCU의 개발환경

ABOV 반도체의 모터 제어 전용 MCU 들은 ARM 코어를 기반으로 하므로 주로 KEIL과 IAR 컴파일러를 이용하여 프로그램을 개발한다. KEIL과 IAR 컴파일러 모두 사용권을 구매해야 하나, KEIL의 경우 프로그램 메모리가 32KB를 초과하지 않는 경우 무료로 컴파일러를 이용할 수 있다. 참고로 KEIL의 개발 환경은 KEIL 홈페이지에서 다운로드할 수 있다<sup>[9]</sup>.

대부분의 가전용 인버터에 사용되는 MCU들과 마찬가지로 ABOV 반도체의 인버터용 MCU도 KEIL 개발환경(uVision)에서 JTAG 에뮬레이터를 사용하여 프로그램을 로딩하고, 주요 내부 변수들을 모니터링할 수 있다.

그리고 ABOV에서는 그림 3과 같이 전용 모터제어 GUI를 제공

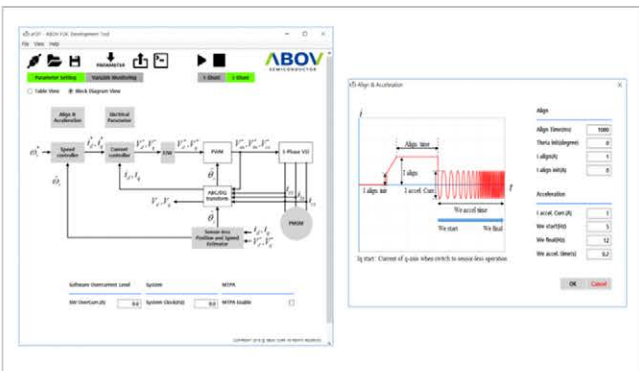


그림 3 ABOV 반도체의 모터제어 GUI(Graphic User Interface)

하고 있다. 이를 이용하면 개발 및 유지 보수가 어려운 Fixed Point Algorithm 환경에서도 모터 제어 소프트웨어를 쉽게 개발할 수 있다.

## 4. 결론

전력전자 시스템에서 디지털 제어가 일반화되면서 전력전자 분야의 연구원들에게 DSP 응용 기술은 필수로 갖추어야 하는 핵심 역량으로 자리 잡고 있다. 과거보다 DSP 응용과 관련된 다양한 자료들이 인터넷에 무료로 공개되고 있어 DSP에 대한 접근 장벽이 많이 낮춰진 셈이다. 그러나 DSP 제품군의 기능과 성능이 향상되면서 복잡도 역시 증가하여 전력전자 분야에 발을 막 내딛는 연구원들에게는 여전히 어렵고 난해한 대상이기도 하다. 국내의 경우 싱크웍스<sup>[10]</sup>에서 TI의 C2000 계열 MCU에 대한 교육 프로그램을 운영하고 있어 이를 활용하면 DSP 초보자들에게 큰 도움이 될 것으로 보인다.

## 참고/문헌

- [1] TI website, 2020. [Online] Available: <http://www.ti.com/ko-kr/microcontrollers/c2000-real-time-control-mcus/overview.html>.
- [2] TI website, 2020. [Online] Available: [https://e2e.ti.com/cfs-file/\\_\\_key/communityserver-discussions-components-files/171/C28x-IQmath-Library.pdf?Q-math](https://e2e.ti.com/cfs-file/__key/communityserver-discussions-components-files/171/C28x-IQmath-Library.pdf?Q-math).
- [3] TI website, 2020. [Online] Available: <http://www.ti.com/product/TMS320F28377D>.
- [4] TI website, 2020. [Online] Available: [https://software-dl.ti.com/ccs/esd/documents/ccs\\_downloads.html](https://software-dl.ti.com/ccs/esd/documents/ccs_downloads.html).
- [5] TI website, 2020. [Online] Available: <http://www.ti.com/tool/C2000WARE>.
- [6] easyDSP website, 2020. [Online] Available: <http://easysdp.com/>.
- [7] 리얼시스 website, 2020. [Online] Available: <http://www.realsys.co.kr/goods/submain.asp?cate=173>.
- [8] ABOV반도체 website, 2020. [Online] Available: [https://www.abov.co.kr/sub02/sub01.php?ca\\_id=103010](https://www.abov.co.kr/sub02/sub01.php?ca_id=103010).
- [9] KEIL website, 2020. [Online] Available: <https://www.keil.com/download/>.
- [10] 싱크웍스 website, 2020. [Online] Available: <https://www.tms320f28x.co.kr/>.