

논문 2022-2-22 <http://dx.doi.org/10.29056/jsav.2022.12.22>

마이크로컨트롤러 포트의 3개 상태를 이용한 레졸버 기준신호의 생성 방법에 관한 연구

이현창*†

A Study on the Method of Generating a Resolver Reference Signal using Triple state of Microcontroller Port

Hyun-Chang Lee*†

요 약

본 연구에서는 PMSM용 레졸버의 기준신호를 생성할 때 마이크로컨트롤러의 포트 특성을 이용해 3단계의 신호를 구성함에 따라 필터회로의 복잡성을 단순화하고 필터회로의 특성변화에 둔감할 수 있는 하드웨어 및 소프트웨어 구성 방법을 제시하였다. 이를 위해 기존의 레졸버 기준신호 및 이에 필요한 필터회로의 특성을 분석하고, 마이크로컨트롤러의 3가지 상태 특징을 이용해 3단계 전압출력을 형성하는 하드웨어를 제시하였으며, 이를 이용해 정현파를 구성하는 소프트웨어 알고리즘을 제시하였다. 제시한 방법의 성능을 입증하기 위해 실험회로를 구성하여 실험을 진행한 결과 동일한 포트 수를 이용한 기존의 4차 이상의 필터와 높은 정밀도를 요하던 회로를 2차 필터로 간략화하면서도 회로 소자들은 높은 정밀도를 필요로 하지 않음을 확인하였다.

Abstract

In this paper, when generating a reference signal for a PMSM resolver, a hardware and software configuration method that can simplify the complexity of filter circuits and insensitive to changes in filter circuit characteristics is presented by composing triple signals using the port characteristics of the MCU. Accordingly, we analyzed the characteristics of the existing resolver reference signal and the filter circuit required for it, presented hardware that forms a three-level voltage output using the triple state characteristics of the MCU, and presented a software algorithm for constructing a sine wave using this. In order to prove the performance of the proposed method, the experimental circuit was constructed and the experiment was conducted. As a result, it was confirmed that the filter circuit was simplified to the 2nd order, but the circuit elements did not require high precision, although using the same number of MCU ports..

한글키워드 : 레졸버, 기준신호, 레졸버 변환기, 정현파, 마이크로컨트롤러

keywords : resolver, reference signal, resolver-to-digital converter, sine wave, microcontroller

* 공주대학교 정보통신공학과

† 교신저자: 이현창(email: hlee@kongju.ac.kr)

접수일자: 2022.11.05. 심사완료: 2022.12.08.

게재확정: 2022.12.20.

1. 서 론

최근 전기자동차의 보급에 힘입어 배터리 및

구동 모터 기술과 전력효율 향상 등에 관한 관심과 이에 관련된 연구가 크게 증가하고 있다. 전 기자동차의 구동 모터는 전력효율과 정밀제어를 위해 정현파를 이용한 영구자석형 동기식 모터(PMSM; Permanent Magnet Synchronous Motor)를 사용하는데, 이의 회전자 위치를 검출하기 위해 레졸버(resolver)를 사용하며, 레졸버의 구동을 위해 일반적으로 1KHz의 정현파 기준신호(reference)를 사용한다.

한편 전자동차 등과 같은 응용에 있어서는 상당한 잡음과 발열 등의 가혹한 조건에 견뎌야 하므로 이러한 악조건을 극복할 수 있는 다양한 연구가 진행되었다. Kim[1]은 레졸버 신호를 검출하는데 있어서 발생하는 각종 신호지연요소를 소프트웨어에 의해 보상하는 연구를 진행하였고, Ahn[2] 등은 레졸버 신호를 검출하는 과정에서 발생하는 위치 오차를 칼만 필터를 활용해 보상하는 연구를 진행하였다. Fikret[3]등은 레졸버 신호를 이용해 위치신호를 검출하는데 있어 더 정밀한 결과를 얻을 수 있는 방법에 관해 연구하였고, Shin[4] 등은 고밀도로 권선이 구성된 레졸버의 경우에 있어서 이의 구동방법과 신호를 해석하는 방법을 연구하였으며, Hwang[5] 등은 레졸버 신호를 DSP에 DFT 기법을 이용해 위치 정보를 해석하는 방법을 연구하였다. 이와 같이 레졸버에 관한 많은 연구가 진행되었지만, 이들은 모두 레졸버 신호로부터 위치신호를 추출하는 과정에서 발생하는 각종 위상지연의 보상이나 위치신호의 정밀도 등을 향상시키는 연구들이다.

본 연구에서는 동일한 마이크로컨트롤러 포트 수를 이용해 레졸버 구동 기준신호의 발생방법을 다르게 함으로서 필터회로의 복잡성과 소자 안정성에 의한 가격상승 문제를 개선할 수 있는 방법에 관해 고찰하였다.

2. 레졸버에 의한 각도 검출

2.1 레졸버(Resolver)

그림 1에 레졸버의 원리를 간단히 나타내었다.

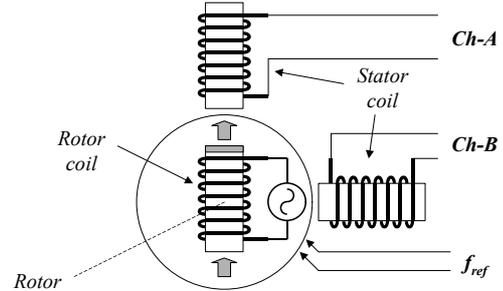


그림 1. 레졸버의 원리
Fig. 1. Principle of resolver

레졸버의 회전자(Rotor)는 PMSM, 즉 모터의 회전축과 연결되며, 회전자 코일에 기준신호(f_{ref})를 인가하면 2개의 레졸버 출력코일에는 회전자의 각도 θ 에 따라 식 (1), (2)와 같이 각각 변조된 신호가 나타난다.

$$A = \sin \theta \cdot f_{ref} \quad (1)$$

$$B = \cos \theta \cdot f_{ref} \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)로 나누면 식 (3)과 같고, 따라서 식 (4)와 같이 두 채널의 출력 비율과 위상에 의해 각도 θ 를 검출할 수 있다.

$$\frac{A}{B} = \frac{\sin \theta \cdot f_{ref}}{\cos \theta \cdot f_{ref}} = \tan \theta \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{A}{B} \quad (4)$$

그러나 이는 잡음 등에 의해 검출값이 변화하면 식 (4)에 의해 각도의 오차로 즉시 나타나므로 실용상 문제가 발생한다. 따라서 잡음과 기계적 진동 등에 의한 오차에 더 강인한 ATO (Angle Tracking Observer)[6] 등을 주로 사용한다. 이는 레졸버 출력신호가 잡음이나 기계적 진

동 등에 의한 순간적인 변화에도 각도 변화 추세에 따라 지속적으로 안정적인 값을 추출할 수 있고, 특히 회로를 디지털화 하기 용이하여 각도에 해당하는 정밀한 디지털 값을 쉽게 얻을 수 있는 장점을 지닌다.

2.2 레졸버 기준신호(Reference)

레졸버 신호를 추출하는 과정에서 동기식 검파를 위해 기준신호와 곱셈, 뺄셈 등의 연산과정을 거치므로 레졸버에 인가되는 기준신호는 고조파 성분이 없는 완전한 정현파일 때 오차가 없는 우수한 검출 성능을 가질 수 있다. 특히 검출되는 정현파와 기준신호 사이에 주파수 차이가 발생하면 연산과정 자체가 무의미해지므로 개별적인 발진회로를 사용하지 않고 그림 2에 나타낸 바와 같이 회전각 검출 회로에서 기준신호를 직접 발생시켜 주파수 차이가 없도록 구성한다.

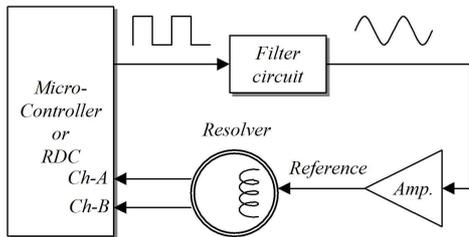


그림 2. 기준신호 발생 계통도
Fig. 2. Diagram of generating reference signal

회전각 검출을 위한 마이크로컨트롤러나 RDC (Resolver-to-Digital Converter) 회로에서는 구형파 펄스를 발생시키고 이를 필터회로를 거쳐 정현파로 변환한 후 레졸버에 인가한다. 이 때 필터회로를 거친 신호는 고조파가 함유되지 않은 완전한 정현파이어야 하므로 최소 4단 이상의 필터가 사용되며, 양호한 필터 특성을 유지하기 위해 온도 변화 등에 영향을 받지 않는 높은 가격의 소자를 이용한다. 그림 3에 구형파 신호의 주파수 스펙트럼을 나타내었다.

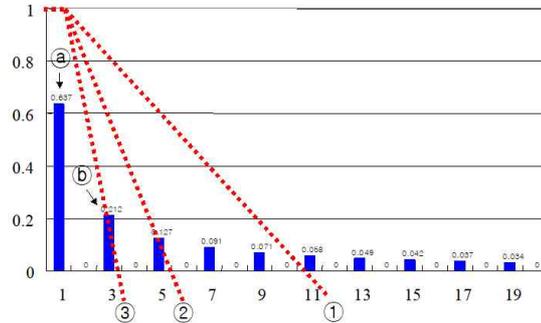


그림 3. 구형파 신호의 주파수 스펙트럼
Fig. 3. Frequency spectrum of a square wave

그림 3에서 필터 특성곡선 ①은 1차 필터를 사용한 경우로서 기본과의 10배(1 decade) 주파수에서 $-20dB(1/10)$ 배로 감소한다. 이 때 기본 주파수 (a)에 가장 근접한 3차 고조파 (b)는 본래 크기의 약 80% 정도로 줄어들고, 동일한 필터를 1단계 더 거치면 특성곡선 ②와 같이 경사가 2배로 증가해 3차 고조파 (b)는 60%로 감소하며, 필터가 1단계 더 추가되면 특성곡선 ③과 같이 경사가 3배로 증가해 고조파 (b)는 20%로 줄어든다. 이와 같은 방법으로 거의 4차 필터를 사용해야 완전한 정현파 신호를 얻을 수 있다.

구형파에서 발생하는 고조파를 줄이기 위해 여러 비트의 마이크로컨트롤러 출력포트를 사용해 D/A C(Digital-to-Analog Converter)를 경유하는 방법을 고려할 수 있으나[7], 이는 마이크로컨트롤러의 포트가 많이 소요되므로 소자의 크기는 물론 비용 또한 상승하는 문제점이 발생한다.

3. 3단계 신호에 의한 기준신호

3.1 마이크로컨트롤러 포트 상태

마이크로컨트롤러의 포트는 다양한 응용에 대응할 수 있도록 표 1과 같이 3가지의 상태를 프로그래밍해 사용할 수 있다[8].

표 1. 마이크로컨트롤러 포트의 상태들
Table 1. The states of the microcontroller port

Port Status	Current	Control	
		DDR	Data
Logic-H	Source	Out	1
Logic-L	Sink	Out	0
Input	$\cong 0$	In	x

표 1에서 각 상태들을 전압관점이 아닌 전류관점에서 살펴보면 전류를 공급(+)하고 흡수(-)하며 또한 흐르지 않는(0) 3가지 상태가 존재하므로 이를 이용하면 3단계 출력이 가능하다.

3.2 3단계 전압 변환회로

그림 4에 표 1의 3가지 전류상태를 3단계 전압으로 변환하는 회로를 나타내었다.

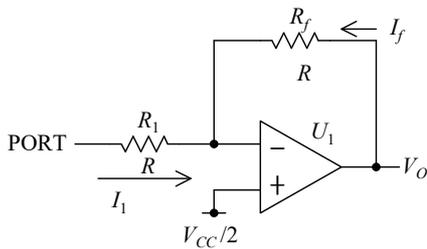


그림 4. 3단계 전압변환 회로
Fig. 4. 3-level voltage conversion circuit

연산증폭기의 입출력은 식 (5)와 같이 표현되고[9], 회로의 $V(+)$ 에 $V_{CC}/2$ 의 전압이 인가되어 있으므로 식 (5)에 이를 대입하고 정리하면 식 (6)과 같다.

$$V_O = (V_{(+)} - V_{(-)}) \cdot A_v \quad (5)$$

$$V_{(-)} = \frac{V_{CC}}{2} - \frac{V_O}{A_v} \quad (6)$$

$$V_{(-)} = \frac{V_{CC}}{2} \quad (7)$$

연산증폭기의 전압증폭도 A_v 는 매우 크므로, 식 (6)은 식 (7)과 같으며, 따라서 회로는 R_f 에 의해 부귀환(Negative Feed-back)되어 $V_{(-)}$ 는 항상 $V_{CC}/2$ 가 되도록 제어된다. 회로의 각 전류는 식 (8), (9)와 같이 표현된다.

$$I_1 = \frac{V_{PORT} - V_{(-)}}{R_1} \quad (8)$$

$$I_f = \frac{V_O - V_{(-)}}{R_f} \quad (9)$$

연산증폭기의 정의에 의하면 입력단자들의 임피던스는 무한대이므로 $V_{(-)}$ 의 전류는 0이며, 따라서 R_1 을 경유해 유입되는 전류 I_1 과 R_f 를 경유해 유입되는 전류 I_f 는 키르히호프 전류법칙에 의해 식 (10)과 같이 합이 0이다. 식 (10)에 식 (7), (8), (9)를 대입하고 정리하면 식 (11)과 같다.

$$I_1 + I_f = 0 \quad (10)$$

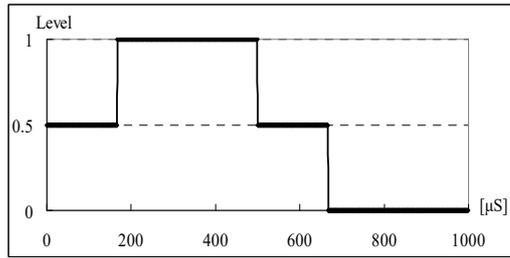
$$V_O = V_{CC} - V_{PORT} \quad (11)$$

마이크로컨트롤러의 포트가 입력상태라면 전류의 흐름이 없으므로 회로의 출력 V_O 는 식(7)에 의해 $V_{(-)}$ 와 동일하게 $V_{CC}/2$ 를 유지한다. 또한 포트의 출력이 각각 0V와 V_{CC} 의 출력일 때는 식 (11)에 의해 출력전압이 결정되며, 이를 종합하면 표 2와 같이 3단계 전압이 출력된다.

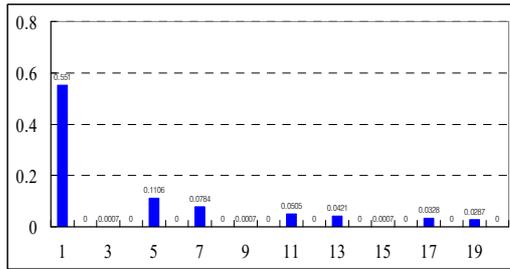
표 2. 포트 상태에 따른 출력전압
Table 2. Output voltage according to port state

Port Status	Output
Logic-H	0V
Logic-L	V_{CC}
Input	$V_{CC} / 2$

그림 5(a)에 표 2의 3가지 상태를 이용한 파형 발생 예를, 그림 5(b)에 이의 주파수 스펙트럼을 나타내었다.



(a) 전압 출력



(b) 주파수 스펙트럼

그림 5 3단계 전압 출력 및 주파수 스펙트럼
Fig. 5. 3-level output and frequency spectrum

그림 5(b)의 주파수 스펙트럼을 살펴보면 3단계로 구성된 파형의 경우 3차 고조파가 거의 0에 가까우므로 필터의 차단주파수 특성 범위가 5차 고조파 영역까지 확대되어 필터의 설계 및 특성 변화 폭에 여유가 있음을 알 수 있다.

3.3 신호 구성 소프트웨어

그림 5(a)에 나타난 파형을 발생하기 위한 각 신호의 타이밍을 표 3에 나타내었다. 단, 이는 1KHz 신호를 기준으로 하였다.

표 3. 신호변화 타이밍과 출력전압
Table 3. Signal change timing and output voltage

State	Time[μS]	Duration[μS]	Output [V]
①	0 - 84	84	2.5
②	84 - 417	333	5
③	417 - 584	167	2.5
④	584 - 917	333	0
⑤	917 - 1,000	83	2.5

표 3에서 각 신호구간에 대해 상태번호를 부여

하고, 마이크로컨트롤러에서는 설정된 각 상태 시간마다 타이머 인터럽트에 의해 그림 6과 같은 순서에 의해 메인 프로그램의 흐름과 관계없이 자동으로 파형이 발생하도록 구성하였다.

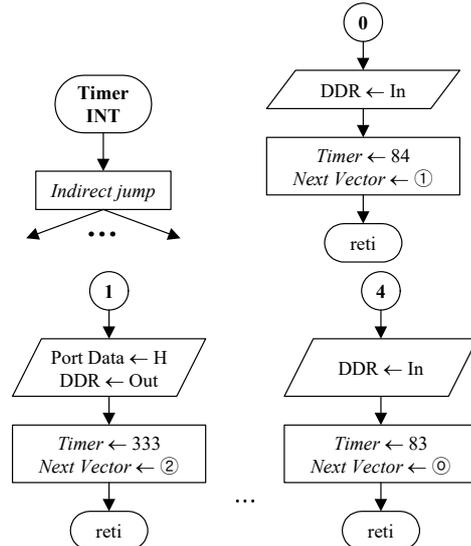
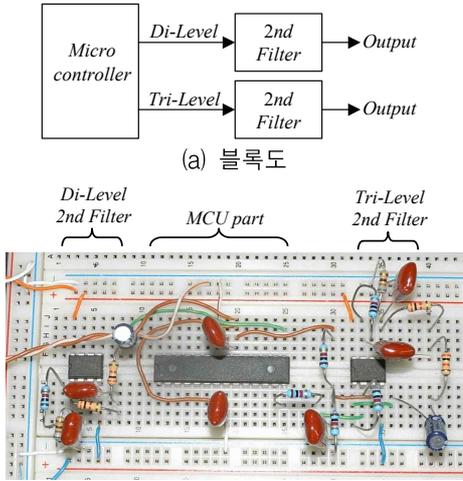


그림 6. 타이머 인터럽트에 의한 파형의 발생
Fig. 6. Waveform generation by timer interrupt

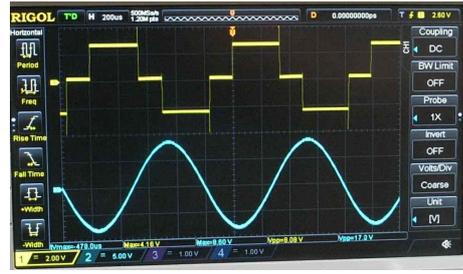
4. 실험 및 결과

제시한 방법의 효과를 확인하기 위해 그림 7(a)에 나타난 바와 같이 마이크로컨트롤러에서 2단계 파형과 3단계 파형을 함께 발생해 이를 동일한 2차 필터를 통과한 결과를 비교분석하였다. 그림 7(b)는 그림 7(a)의 회로를 구성한 것으로서, 마이크로컨트롤러는 ATmega168A를 사용하고, 연산 증폭기가 2개 내장된 LM358을 사용하였다. 그림 8에 실험회로의 각부 측정파형을 나타내었다. 그림 8(b)에 따르면 그림 8(a)의 2단계 파형에 비해 3차 고조파가 사라졌음을 확인할 수 있으며, 이에 따라 그림 9(a), (b)에 나타난 바와 같이 2차 필터만을 적용해도 완전한 정현파를 생성할 수 있음을 알 수 있다.

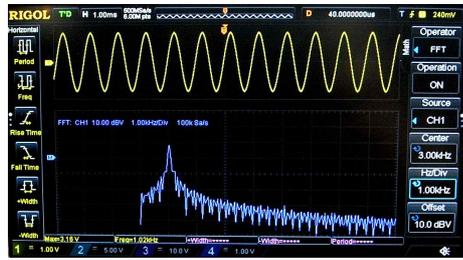


(a) 블록도
 (b) 구성된 회로
 그림 7. 실험용 회로
 Fig. 7. Experimental circuit

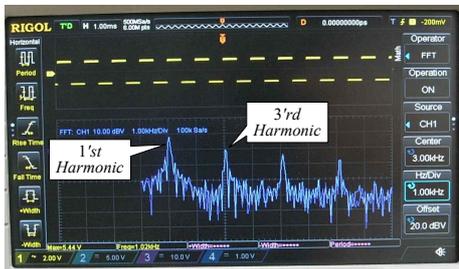
기 위해 앞서 고찰한 바와 같이 4차 필터가 사용되어야 한다.



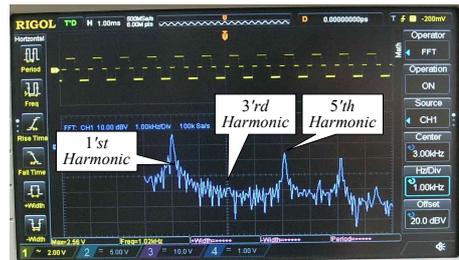
(a) 발생 파형과 2차 필터 통과 후 파형



(b) 2차 필터 통과 후의 주파수 스펙트럼
 그림 9. 3단계 파형의 결과
 Fig. 9. Result of 3-level waveform



(a) 2단계 파형



(b) 3단계 파형
 그림 8. 실험 결과
 Fig. 8. Result of experiments



그림 10. 2단계 파형의 결과
 Fig. 10. Result of 2-level waveform

5. 결론

참고로, 그림 10에 2단계 파형의 2차 필터 통과 후 주파수 스펙트럼을 나타내었으며, 발생하는 출력이 육안으로는 정상적인 정현파로 보이나 주파수 스펙트럼 상에는 여전히 3차 고조파가 존재하므로 오차의 원인이 된다. 따라서 이를 제거하

본 연구에서는 전기자동차 등에서 사용되는 PMSM용 레졸버의 기준신호를 생성할 때 구형파를 발생한 후 이를 4차 이상의 필터를 이용해 정현파로 변환하는 것을 마이크로컨트롤러의 포트 특성에 의한 3단계 신호를 이용해 필터회로를 단순화하고 구성 소자의 특성변화에 둔감할 수

있는 하드웨어 및 소프트웨어 구성 방법을 제시하였다. 이를 위해 기존의 레졸버 기준신호 및 이에 필요한 필터회로의 특성을 분석하고, 마이크로컨트롤러의 3가지 상태 특징을 이용해 3단계 전압출력을 형성하는 하드웨어를 제시하였으며, 이를 이용해 정현파를 구성하는 소프트웨어 알고리즘을 제시하고 실험을 진행하였다. 그 결과 4차 이상의 필터와 매우 높은 정밀도를 요하던 회로를 추가적인 마이크로컨트롤러 포트 없이 2차 필터로 간략화하면서도 회로 소자들에 큰 정밀도를 요하지 않으며, 특히 필터회로의 지연성분이 줄어들어 인체 위치신호 검출 시 오차를 줄일 수 있는 효과도 발생함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] Youn-Hyun Kim, "Software-Based Resolver-to-Digital Converter by Synchronous Demodulation Method including Lag Compensator", Transactions of KIEE, Vol. 62, No.6, pp.756-761, 2013. DOI: 10.5370/KIEE.2013.62.6.7.56
- [2] Ji-Hae Ahn, Hyung-Jin Ahn, Joon-Yeol Park, "Position Error Compensation Method for Resolvers using Kalman Filter", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.29, No.5, pp.50-56, 2015. DOI: 10.5207/JIEIE.2015.29.5.050
- [3] Fikret Anil Karabeyli, Ali Ziya Alkar, "Enhancing the Accuracy for the Open-loop Resolver to Digital Converters", J Electr Eng. Technol., Vol.13, No.1, 2018. DOI : 10.5370/JEET.2018.13.1.192
- [4] Young-Chul Shin, Ki-Chan Kim, "A Study on Multi-Physics Analysis of High-Resolution Winding Type Resolver and Rotary Transformer", Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol.17, No.5, pp.146-152, 2016. DOI : 10.5762/KAIS.2016.17.5.146
- [5] Lark-Hoon Hwang, Sung-Kwon Nam Gi-Ho Choi, "A Study on the Resolver Interface using a Rotor Position Detector Method with DFT", Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol.12, No.10, pp.4550-4560, 2011. DOI : 10.5762/KAIS.2011.12.10.4550
- [6] Tamakawa Seiki, "AU6802 - High-speed, Digital-Tracking, Complete 10/12-Bit Resolver-to-Digital Converter" <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/126982/ETC1/AU6802.html>
- [7] Engineers Garage, "DIY - Waveform Generator using AVR Microcontroller", 2022. <https://www.engineersgarage.com/diy-waveform-generator-using-avr-microcontroller>
- [8] Pinout, "ATtiny20 Datasheet - 8-Bit AVR Microcontroller", DatasheetCafe, May, 2022. <http://www.datasheetcafe.com/attiny20-datasheet-avr-microcontroller/>
- [9] Albert Malvino, David J. Bates, Patrick E. Hoppe, "Electronic Principles - Ninth Edition", Mc Graw- Hill Education, 2020. ISBN : 9781260570564, 1260570568

저 자 소 개



이현창(Hyun-Chang Lee)

1986.2 단국대 전자공학과 학사
 1989.8 단국대 전자공학과 석사
 1996.2 단국대 전자공학과 박사
 1996.3~2004 국립 천안공업대학
 정보통신과 부교수.
 2005.3~현재 국립 공주대학교
 천안공과대학 정보통신공학과 교수.
 <주관심분야> 멀티미디어 회로, 모터제어,
 마이크로프로세서