

# 진폭 변조 절대거리측정을 위한 마이크로컨트롤러 기반의 고안정도 RF-주파수 생성

## High-Stable RF-Frequency Generation Using a Microcontroller for Amplitude Modulation Based Absolute Distance Measurement

유영진<sup>1</sup>, 이주형<sup>1,#</sup>  
Yeongjin Yu<sup>1</sup> and Joohyung Lee<sup>1,#</sup>

1 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System and Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology)  
# Corresponding Author / E-mail: JLee@seoultech.ac.kr TEL: +82-2-970-6343  
ORCID: 0000-0003-3219-878X

KEYWORDS: Distance measurement (거리측정), Amplitude modulation (진폭 변조), Microcontroller (마이크로컨트롤러), Frequency stability (주파수 안정도), RF-frequency generation (RF-주파수 생성)

*In this paper, we describe high-stable RF-frequency generation using a low-cost 8-bit microcontroller for amplitude-modulation based distance measurement, which is one of the indispensable technologies for cost-effective Lidar application. The RF frequency generator using the microcontroller was implemented by externally referencing to an atomic clock and 8-bit timer/pulse width modulation (PWM) functions, which are embedded in a microcontroller. The microcontroller we used was ATmega128 of Microchip with 16 MHz clock and 8-bit timer, which generates the maximum frequency of up to 62.5 kHz, enabling 2.4-kilometer ranging without phase ambiguity. The stability of RF-frequency generated from the implemented system was evaluated in terms of Allan deviation using a commercial frequency counter. The stability indicated  $10^{-11}$  at 1-s averaging time and  $10^{-12}$  at 100 s averaging time, which represents a 1/10 degradation compared to the stability of the commercial function generator. Along with the stability evaluation, we interrogated frequency tunability, which extends a measurable range without phase ambiguity.*

Manuscript received: January 4, 2019 / Revised: February 3, 2019 / Accepted: February 26, 2019

### 1. 서론

레이저 기반의 정밀 거리측정은 연속파 광원(Continuous Wave Laser, CW Laser) 을 이용한 진폭 변조(Amplitude Modulation) 및 주파수 변조(Frequency Modulation) 그리고 펄스레이저를 이용한 비행시간법(Time-of-Flight) 등의 기술로 구현되어왔다.<sup>1-3</sup> 최근 활발히 연구되고 있는 자율주행자동차의 필수 센서기술에 해당하는 라이다(Lidar)는 레이저 기반의 거리측정 기술 중 펄스레이저를 이용한 비행시간법과 연속파 레이저의 진폭 변조 기반 기술을 주로 채택하고 있으며 모두 수십-수백 m의 거리에서 수 mm 수준의 정밀도를 요구하고 있다.<sup>4-8</sup> 특히 레이저 고도계(Laser Altimeter), 측지측량(Geodetic Survey)을 목적으로 하

는 항공용 라이다의 경우 차량용 라이다 보다 긴 수 km-수십 km의 최대 거리측정 영역을 요구한다.<sup>9,10</sup> 이러한 다양한 라이다 기반 기술 중 레이저의 진폭 변조의 경우 Fig. 1과 같이 수백 m의 거리측정 시 위상 모호성(Phase Ambiguity) 없이 측정을 위해서는 수 kHz-수십 kHz의 RF 주파수 생성을 통한 광원의 진폭변조가 필요하다.

또한 여기에 수 mm의 거리측정 분해능 구현을 위해서는 0.001 Deg 수준의 위상측정 분해능뿐만 아니라 생성된 RF-주파수의  $10^{-10}$  이상의 안정도가 확보가 필수적이다. 이러한 거리측정용 고안정도 RF-주파수 생성은 일반적으로 원자시계에 참조된 상용함수발생기를 이용하고 있으나 거리측정 시스템의 실제 응용을 위해서는 RF-주파수 생성 회로에 있어 소형화, 시스템

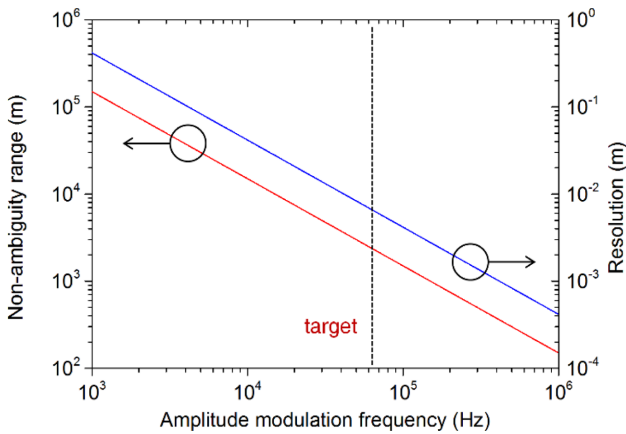


Fig. 1 Measurable range without ambiguity problem and obtainable resolution depending on frequency of amplitude modulation. The target position denotes 62.5 kHz frequency generation which is a scope of this paper

안정화, 가격경쟁력 향상 등이 요구된다.<sup>10-12</sup>

본 논문에서는 이러한 진폭 변조 절대거리측정을 위한 고안정도 RF-주파수 생성을 위해 저가의 8-Bit 마이크로컨트롤러 (Microchip, ATmega128)를 이용한 주파수 생성기를 구축하고 루비듐(Rubidium, Rb) 원자시계 기반의 외부 기준 주파수(External Reference Frequency) 참조를 통해 주파수 안정도의 확보 및 평가를 수행하였다.

## 2. 기본 이론 및 실험장치

고안정도 RF-주파수 생성을 위해 구축된 실험장치는 Fig. 2와 같이 8-Bit 마이크로컨트롤러(MCU)의 펌웨어 프로그래밍을 위한 PC 및 ISP (In-System Programming), 루비듐 원자시계에 참조된 외부 기준 주파수 또는 수정발진기(Crystal Oscillator) 연결 회로 그리고 주파수 안정도 평가를 위한 주파수 측정기(Frequency Counter)로 구성되어 있다. 본 연구에서 사용한 Microchip의 ATmega128은 최대클럭 16 MHz의 기준 주파수를 XTAL1, XTAL2 핀을 통해 인가 받으며 이는 Fig. 2(1)과 같이 수정발진기와 축전지의 조합을 통한 회로 연결이 가장 널리 사용되고 있다.<sup>13,14</sup> 마이크로컨트롤러의 외부 기준 주파수 인가는 Fig. 2(2)와 같이 XTAL2의 연결 없이 XTAL1의 외부 기준 주파수 연결을 통해 가능하며 본 연구에서는 루비듐 원자시계에 참조된 함수 발생기를 이용하여 16 MHz의 정현파 신호를 XTAL1에 인가하였다. 수정발진기 또는 외부 기준 주파수를 참조하여 마이크로컨트롤러에서 생성된 RF-주파수는 ATmega128의 OC0 핀에서 출력되며 이 주파수를 동일한 루비듐 원자시계에 참조된 주파수 측정기를 이용하여 주파수 안정도를 평가할 수 있도록 시스템을 구축하였다.

구축된 마이크로컨트롤러 기반 주파수 생성기에서 RF-주파수는 내장된 8-Bit 타이머(Timer) 및 PWM (Pulse-Width Modulation)

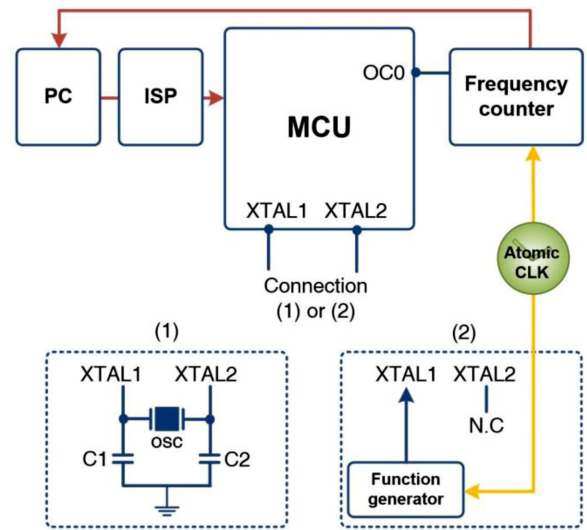


Fig. 2 High-stable RF-frequency generator using an atomic clock referenced microcontroller. (1) Crystal Oscillator connection (2) External reference frequency connection Abbreviations are; MCU: Micro Controller Unit, ISP: In-System Programming, OSC: Crystal oscillator, C1,2: capacitor XTAL: crystal oscillator input/output, OC0: Output Compare Pin 0, N.C: non-connection

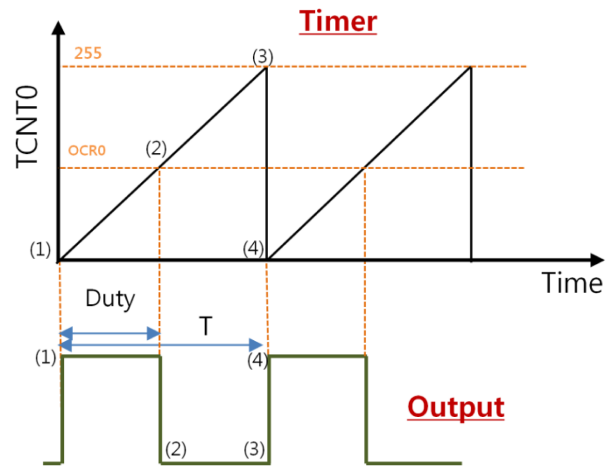


Fig. 3 Basic principle of frequency generation using timer and PWM (pulse-width modulation) functions in microcontroller. OCR0: Output Compare Register 0

기능을 이용하여 Fig. 3와 같은 원리로 생성된다. Fig. 3에 표현된 톱니파와 구형파는 각각 타이머의 신호와 마이크로컨트롤러에서 생성되는 RF-주파수를 의미한다. ATmega128에서 제공하는 8-Bit 타이머는 Figs. 3(1)과 3(3) 지점에 해당하는 0에서 255까지 값을 증가시키며 그 값을 TCNT0 레지스터에 저장한다. 이때 내장된 PWM 기능을 동시에 사용하면 Figs. 3(1)과 3(4) 지점과 같이 TCNT0에 저장된 값이 0이 되었을 때 RF-주파수의 출력이 1로 SET이 되고 0부터 증가된 TCNT0 값이 펌웨어를 통해 미리 입력된 OCR0 값에 도달 하였을 경우 다시 0으로 CLEAR 된다. 즉, 입력된 OCR0 값을 통해 생성되는 RF-주파수

의 듀티(Duty) 를 결정할 수 있으며 본 연구에서는 이를 127로 입력하여 50% 의 듀티로 RF-주파수가 생성될 수 있도록 하였다. 이때 타이머를 통해 생성되는 신호의 주기는 다음 식(1)과 같다.

$$T = P \times \frac{256}{f_{CLK}} \quad (1)$$

여기서  $T$ 는 생성되는 RF-주파수의 주기,  $P$ 는 프리스케일 (Prescale),  $f_{CLK}$ 는 마이크로컨트롤러 내부 최대 클럭을 의미한다.<sup>13</sup> 본 연구에서는  $f_{CLK}$ 는 16 MHz 그리고 최대한 높은 주파수를 생성하기 위해  $P=1$ 로 설정하였으며 이를 통해 62.5 kHz의 RF-주파수 생성이 가능하다.

### 3. 실험결과

구축된 마이크로컨트롤러 기반 RF-주파수 생성기에서 출력된 주파수의 성능평가를 위해 기존의 수정발진기를 이용하여 출력된 RF-주파수 그리고 상용 함수발생기에서 출력된 기준주파수를 주파수 측정기를 통해 측정하였으며 그 결과는 Fig. 4 와 같다. 이때 상용 함수 발생기와 주파수 측정기는 모두 루비돔 원자시계에 참조되었으며 모든 RF-주파수는 약 1시간 30분 동안 1초간격으로 4096개의 데이터를 샘플링 하였다. 기존의 수정발진기를 기준으로 생성된 주파수의 경우 펄웨어를 통해 62.500 kHz를 출력하도록 프로그래밍되어 있으나 그 결과는 62.502 kHz 수준으로 2 Hz의 오차가 발생과 함께 10 mHz 수준의 주파수 편차가 측정시간 동안 지속적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. 반면에 본 연구를 통해 구축된 주파수 생성기의 출력신호는 정확히 62.5 kHz를 기준으로 Sub-mHz 수준의 편차를 보이며 상용함수발생기와 유사한 이상적인 주파수 특성을 보이고 있는 것을 확인할 수 있다.

위와 같이 1초 간격으로 측정된 데이터의 안정도 평가를 위해 Fig. 5와 같이 알란편차(ALLAN Deviation)를 이용하여 평균 시간(Averaging Time)에 따른 주파수 편차 특성을 평가하였다.<sup>15</sup> 기존의 수정발진기를 기준으로 생성된 주파수의 경우 1초 평균 시간에서  $10^{-8}$  수준의 편차가 발생하였으나 본 연구를 통해 개발된 주파수 생성기는  $10^{-11}$  수준으로 루비돔 원자시계에 참조된 상용 함수발생기의  $10^{-12}$ 에 거의 유사한 수준으로 평가되었다. 또한 기존의 수정발진기를 기준으로 하는 주파수는 평균시간이 100초 이상에서 주파수 천이(Drift)가 발생하는 것으로 확인되었으며 이는 장시간 주파수 생성 특성이 단시간 대비 10배 수준으로 안정도가 저하되는 것으로 판단된다.

반면에 본 연구에서 개발된 주파수 생성기는 100초 이상의 평균시간에서도 안정도가 지속적으로 향상되는 것을 확인할 수 있고 평균시간 100배 증가할 때 알란편차는 거의 10배 수준으로 감소하는 것으로 보아 생성된 주파수에는 주파수 천이 또는

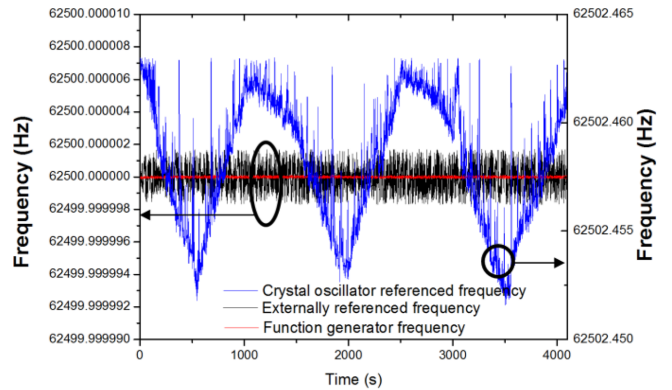


Fig. 4 Frequency measurement results depending on reference frequency of the microcontroller. Blue line: crystal oscillator referenced frequency generation, Black line: Externally referenced frequency generation, Red line: External reference frequency by commercial function generator

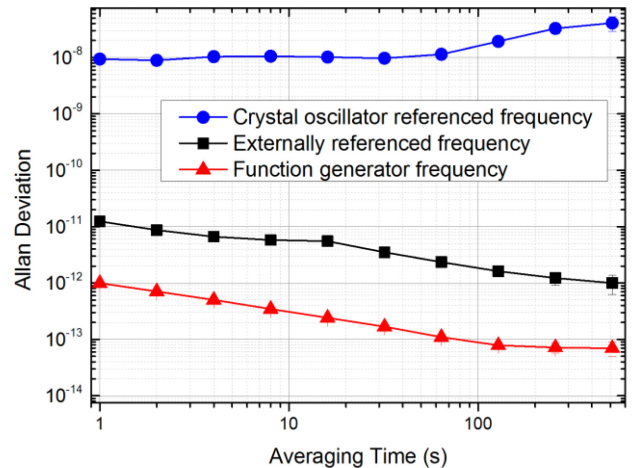


Fig. 5 Allan deviation of frequencies generated from various methods

오차가 없이 마이크로컨트롤러 및 회로에서 발생하는 랜덤 노이즈(Random Noise) 만 존재하며 1시간 이상의 장시간 운용에서도 이상적인 주파수 생성이 가능할 것으로 판단된다.

다음은 마이크로컨트롤러 내부 타이머의 프리스케일 값을 조정하여 RF-주파수 생성기의 주파수 가변(Tunability) 특성을 평가하였다. 프리스케일 값을  $2^n$  ( $n=0-10$ )으로 변화시킴에 따라 생성되는 주파수는  $62.5 \text{ kHz}/2^n$ 으로 변화하게 되며 가장 낮은 주파수는  $n=10$ 일 때 61 Hz 수준이다.<sup>14,16</sup> 측정결과 Fig. 6과 같이 10초 간격으로 프리스케일 값을 변화시킴에 따라 생성된 주파수 값이 성공적으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 위상 모호성 없이 측정할 수 있는 거리가  $n=2$ 와 3일 경우 각각 4.8 km 그리고 약 10 km까지 확장 가능할 것으로 판단된다. 또한  $n=1$ 에 해당하는 62.5 kHz가 측정 가능한 최대 2.4 km 이상의 거리를 측정할 경우  $n=2$  이상의 주파수를 이용하여 위상 모호성문제를 해결할 수 있을 것으로 판단된다.

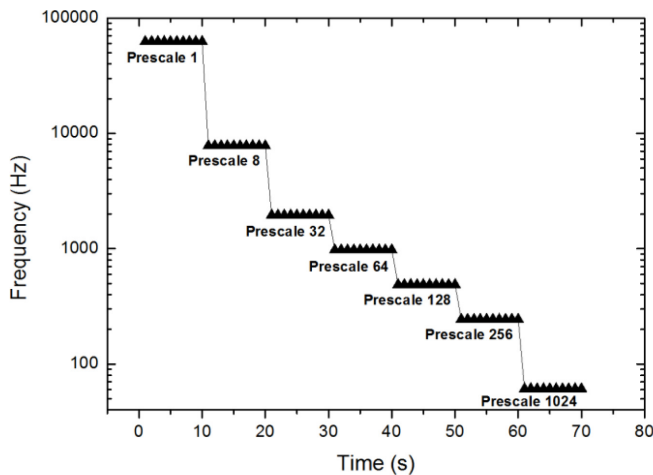


Fig. 6 Frequency tunability by prescale variation in timer function

#### 4. 결론

진폭 변조 기반의 거리 측정시 연속파 광원의 진폭 변조를 위해 요구되는 고안정도 RF-주파수 생성을 저가형 8-Bit 마이크로컨트롤러를 이용하여 구축하였다. Microchip 사의 ATmega128에 외부 기준 주파수를 인가하고 내부 타이머, PWM 기능을 이용하여 듀티 50%의 62.5 kHz의 고안정도 RF-주파수를 성공적으로 생성시켰다. 생성된 RF-주파수의 안정도를 기존의 수정발진기를 이용한 주파수 안정도 결과와 비교 평가하였다. 16 MHz의 최대 클럭에서 62.5 kHz의 RF-주파수를 생성시킬 수 있었으며 기존의 수정발진기를 이용한 주파수 생성기의 경우  $10^{-8}$  수준의 편차와 함께 1시간 이상의 장시간 운용시 10 배 이상 안정도 저하가 발생하는 것을 확인하였다. 본 연구를 통해 개발된 외부 기준 주파수를 참조로 하는 주파수 생성기의 경우  $10^{-11}$  수준의 편차와 장시간 운용에도 주파수 천이 없이 안정도가 유지되는 것을 확인하였다. 이러한 고안정도 RF-주파수를 진폭가변 절대거리측정기에 적용할 경우 2.4 km의 거리를 위상 모호성 없이 측정이 가능하며 0.001 Deg 수준의 분해능을 가지는 위상 측정기를 적용할 경우 6.7 mm 수준의 거리측정분해능 구현이 가능할 것으로 보인다. 또한 펌웨어 내 프리스케일 값 조절을 통해 주파수 가변이 가능하고 이를 절대거리측정기에 적용할 경우 위상 모호성 없이 측정할 수 있는 거리 확장이 가능하다.

본 연구의 하드웨어 구현에 사용되었던 원자시계에 참조된 함수발생기는 마이크로컨트롤러의 기준 주파수 16 MHz를 공급하기 위해 사용되었다. 이러한 함수발생기를 이용한 기준 주파수 인가는 기존의 연구에서 시도되었던 OCXO (Oven Controlled Crystal Oscillator) 등의 소형기준시계 또는 GPS 신호를 이용한 기준 주파수 획득을 통해 대체 가능할 것으로 판단된다.<sup>17,18</sup>

진폭 변조기반 거리측정기의 분해능은 위상측정기의 분해능 이외에도 생성되는 진폭 변조신호의 파장이 짧아질수록 향상될 수 있으며 높은 주파수의 내부 클럭 적용이 가능한 마이크로컨트롤러를 적용할 경우 짧은 파장의 고안정도 주파수 생성이 가

능하므로 향상된 분해능 구현이 가능하다. 본 연구에서 적용한 ATmega128은 ISP, 전원단, 메모리 등의 추가 회로를 추가하여도 소형화 개발이 가능하므로 이를 기반으로 하는 진폭 변조 거리측정기는 가격경쟁력을 목적으로 하는 소형 라이다 시스템에 효과적으로 적용이 가능할 것으로 보인다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 일반과제 연구비 지원으로 수행되었습니다.

#### REFERENCES

- Berkovic, G and Shafir, E., "Optical Methods for Distance and Displacement Measurements," *Journal of Advances in Optics and Photonics*, Vol. 4, No. 4, pp. 441-471, 2012.
- Amann, M. C., Bosch, T. M., Lescure, M., Myllylae, R. A., and Rioux, M., "Laser Ranging: A Critical Review of Usual Techniques for Distance Measurement," *Journal of Optical Engineering*, Vol. 40, No. 1, pp. 10-20, 2001.
- Girao, P. S., Postolache, O. A., Faria, J. B., and Pereira, J. D. "An Overview and a Contribution to the Optical Measurement of Linear Displacement," *Journal of IEEE Sensors*, Vol. 1, No. 4, pp. 322-331, 2001.
- Guan, H., Li, J., Cao, S., and Yu, Y., "Use of Mobile LiDAR in Road Information Inventory: A Review," *Journal of Image and Data Fusion*, Vol. 7, No. 3, pp. 219-242, 2016.
- Fersch, T., Weigel, R., and Koelpin, A., "A CDMA Modulation Technique for Automotive Time-of-Flight LiDAR Systems," *Journal of IEEE Sensors*, Vol. 17, No. 11, pp. 3507-3516, 2017.
- Fleming, W. J., "New Automotive Sensors-A Review," *Journal of IEEE Sensors*, Vol. 8, No. 11, pp. 1900-1921, 2008.
- D'Orazio, L., Visintainer, F., and Darin, M., "Sensor Networks on the Car: State of the Art and Future Challenges," *Proc. of Design, Automation and Test in Europe*, pp. 1-6, 2011.
- Ai, X., Nock, R., Rarity, J. G., and Dahnoun, N., "High-Resolution Random-Modulation Cw Lidar," *Journal of Applied Optics*, Vol. 50, No. 22, pp. 4478-4488, 2011.
- Schwarz, B., "LIDAR: Mapping the World in 3D," *Journal of Nature Photonics*, Vol. 4, No. 7, pp. 429-430, 2010.
- Yan, W. Y., Shaker, A., and El-Ashrawy, N., "Urban Land Cover Classification Using Airborne LiDAR Data: A Review," *Remote Sensing of Environment*, Vol. 158, pp. 295-310, 2015.
- Jang, Y. S., Kim, W., Jang, H., and Kim, S. W., "Absolute Distance Meter Operating on a Free-Running Mode-Locked Laser for Space Mission," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 19, No. 7, pp. 975-981, 2018.

12. Lee, J., Lee, K., Jang, Y. S., Jang, H., Han, S., et al., "Testing of a Femtosecond Pulse Laser in Outer Space," Journal of Scientific Reports, Vol. 4, Article No. 5134, 2014.
13. Deno, S., Hahnen, C., Landis, D., and Aurand, R., "A Low Cost Microcontroller Compensated Crystal Oscillator," Proc. of International Frequency Control Symposium, pp. 954-960, 1997.
14. Karlquist, R. K., Cutler, L. S., Ingman, E. M., Johnson, J. L., and Parisek, T., "A Low-Profile High-Performance Crystal Oscillator for Timekeeping Applications," Proc. of International Frequency Control Symposium, pp. 873-884, 1997.
15. Allan, D. W., "Statistics of Atomic Frequency Standards," Proceeding of the IEEE, Vol. 54, No 2, pp. 221-230, 1966.
16. Microhip, "ATmega128 Manual Book," <https://www.microchip.com/wwwproducts/en/ATmega128> (Accessed 16 JUN 2019)
17. Lim, J., Kim, H., Jackson, T. N., Choi, K., and Kenny, D., "An Ultra-Compact and Low-Power Oven-Controlled Crystal Oscillator Design for Precision Timing Applications," Journal of IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, Vol. 57, No. 9, pp. 1906-1914, 2010.
18. Habib, A., Bang, K. I., Kersting, A. P., and Chow, J., "Alternative Methodologies for LiDAR System Calibration," Journal of Remote Sensing, Vol. 2, No. 3, pp. 874-907, 2010.

**Yeongjin Yu**

B.Sc. candidate in the  
Department of Mechanical System Design  
Engineering, Seoul National University of  
Science and Technology (SeoulTech).  
E-mail: qldudlp@gmail.com

**Joohyung Lee, Ph.D**

Assistant Professor in the Department of  
Mechanical System Design Engineering,  
Seoul National University of Science and  
Technology (SeoulTech).  
E-mail: JLee@seoultech.ac.kr