
고정밀 레이저 변위를 위한 레이저 반사 신호 레벨의 변동 최소화 기법에 관한 연구

배영철* · 박종배* · 조의주* · 강기웅* · 강건일** · 김현우*** · 김은주****

The Study on Variation Minimization Method of Reflection Signal Level for High Precision Laser Displacement

Young-chul Bae* · Jong-bae Park* · Eui-joo Cho* · Ki-woong Kang* · Keon-il Kang**
Hyeon-woo Kim*** · Eun-ju Kim****

요 약

본 연구에서는 우리는 레이저 변위 측정에서 보다 정밀한 측정(high precision)을 하기 위한 방법을 제시하였다. 제시한 기법은 측정하고자 하는 물체에서 반사되어 나오는 레이저 반사 신호 레벨의 변동에 의한 오차 원인을 찾아 이를 보상하는 방법이며 이를 레이저 변위 측정기에 적용하여 설계하였다.

ABSTRACT

In this research, we proposed a method for high precision measurement than laser displacement measurement. The proposed method finds the causes of error due to change in reflected laser signal level reflected from an object and compensation, and we designed this by applying laser displacement meter.

키워드

Raser Displacement Meter, Error Correction, Reflection Wave, Frequence Clock

I. 서 론

일반적으로 레이저 변위 측정 기술은 측정하고자 하는 대상 물체에 레이저 다이오드에서 나온 빛을 내보내어 측정 대상 물체에서 닿아 반사되어 되돌아오는 레이저의 파장을 측정하여 거리를 계산하는 기술이다.

레이저 변위 측정 기술은 군사용, 산업용으로 멀리 떨어져 있는 측정하고자하는 대상 물체를 직접 접촉하지 않는 무접촉 측정으로 폭넓게 사용되고 있으며 앞으

로 산업용에서의 사용이 확대될 것으로 전망되고 있다. 현재 레이저 변위 측정 기술은 장거리 측정 기술과 단거리 측정 기술로 나뉜다. 시간-비행 기법(time-of-flight method s)은 장거리 측정을 위한 기법으로 장거리를 측정하기 때문에 오차가 크며, 삼각 측량기법(triangulation)은 단거리 측정에 적용하고 있다[1][2]. 최근에 산업용에 적용하기 위한 기법으로 장거리 측정 기법의 시간-비행 기법과 단거리 측정 기법의 삼각 측량 기법을 동시에 적용한 연구도 있었다[3]. 레이저 변

* 전남대학교 공학대학 전기전자통신컴퓨터공학부

*** 전남대학교 해양토목공학과

접수일자 : 2008. 01. 13

** 전남대학교 전기공학과

**** KISTI

심사완료일자 : 2008. 02. 25

위 측정 기술은 자동화 산업 등에서 요구하는 초고정밀, 소형화, 경량화, 초고속 계측의 요구에 맞추기 위해서는 최대 측정 거리 1km, 최소 측정 거리 10cm 이내, 측정오차도 ± 0 mm 이내를 요구하고 있다[3].

레이저는 높은 반사율과 빛이 직진하는 특성으로 인하여 이를 이용하여 고정밀 거리 계측 및 방위 측정에 적용되고 있으며 주로 군사용 목적으로 사용해왔었으며 최근에는 산업용으로 이용하고자 하는 노력이 진행되고 있다. 레이저의 이와 같은 특성과 폭넓은 응용에도 불구하고 레이저를 이용한 변위 측정 기술은 몇 가지 특성상의 문제점을 가지고 있다. 즉 측정 물체에 닿아 반사되어 돌아오는 빛의 세기는 거리 및 반사물체의 표면 상태에 따라 변화가 심하고, 빛의 세기의 강약에 의한 계측 오차 변동 폭이 너무 크게 나타난다. 이런 경우 변위 측정에서는 측정 횟수를 크게 늘려 평균값을 구하여 거리 오차 폭을 감소시키는 노력을 하고 있으나, 측정 반복 횟수에 비례하여 측정 시간이 길어져 고속 측정을 요구하는 시스템에 적용하는 것이 부적절하다.

이에 본 연구에서는 레이저 변위 측정에서 보다 정밀한 측정을 하기 위한 방법으로 측정하고자 하는 물체에서 반사되어 나오는 레이저 반사 신호 레벨의 변동에 의한 오차 원인을 찾아 이를 보상함으로써 보다 정밀한 변위 측정이 가능한 기법을 제시하고 이를 레이저 변위 측정기에 적용하고자 한다.

II. 레이저 변위계의 원리 및 기본 구성

2.1 고전적인 마이켈슨 간섭계

1871년 Albert Abraham Michelson에 의해 마이켈슨 간섭계가 고안되었다[4][5]. 이는 광파장의 단위에서 기본적인 계측기를 결정하는데 사용되었다. 마이켈슨의 기본적인 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 보듯이 빛이 간섭계에 진입하면 빔 분리기 평판(BS)에서 2개의 묶음으로 분리된다. 하나의 묶음은 거울(M1)을 때리고 다른 하나의 묶음은 거울(M2)을 때린다. 이 묶음들은 거울에서 반사되게 될 것이고 빔 분리기 평판(BS)로 다시 되돌아온다. 빔 분리기 평판의 특성으로 인하여 하나의 묶음은 출구 1로 진행하고 다른 하나의 묶음은 출구 2로 진행된다. 출구 2가 광

원에 직접 연결되기 때문에 출구 1은 빛의 간섭 줄무늬를 검출하는데 사용한다.

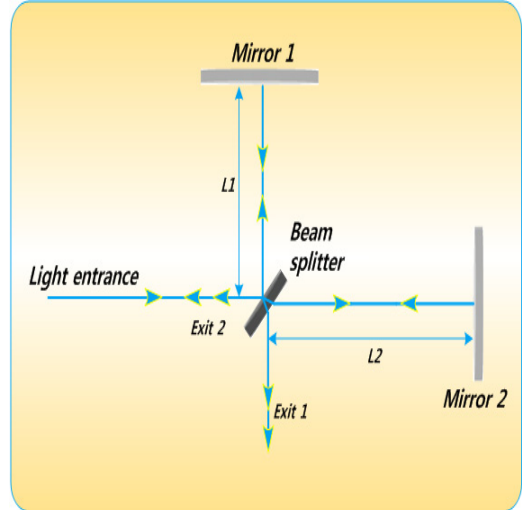


그림 1. 고전적인 마이켈슨 간섭계의 기본 원리
Fig. 1 The Basic principle of classical Michelson interferometer

그림 1에서와 같이 레이저 변위계에서 측정하고자 하는 대상 물체를 반사하여 나온 빛은 2개의 파형은 손실이 없다고 가정하면 진폭은 하나의 방향(X, 또는 Y)에서 식(1),(2)와 같은 값을 갖는다고 가정할 수 있다.

$$E_1 = E_{01} \sin(\omega t + kL_1) \quad (1)$$

$$E_2 = E_{02} \sin(\omega t + kL_2) \quad (2)$$

여기서 ω 는 빛의 각주파수, k 는 파형 수($k = 2\pi\omega/c$)이다. E_1 , E_2 모두가 원래의 입력 파형의 대칭 분리 후에 형성되기 때문에 이들 각각 사이에는 위상 변화가 존재하지 않는다. E_1 , E_2 파형은 조합기를 통하면 식(3)과 같이 합성된다.

$$\begin{aligned} E_3 &= E_1 + E_2 \\ &= E_{01} \sin(\omega t + kL_1) + E_{02} \sin(\omega t + kL_2) \end{aligned} \quad (3)$$

광다이오드는 출구 1에 존재하며 여기서 전류는 광전력에 비례하여 식(4)와 같이 흐른다.

$$I = |E_3|^2 \tag{4}$$

대수적인 승산 후에 광전류 I 는 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned} I = & E_{01}^2 \sin^2(\omega t + kL_1) \\ & + E_{02}^2 \sin^2(\omega t + kL_2) \\ & + E_{01}E_{02} \cos [2\omega t + k(L_1 + L_2)] \\ & + E_{01}E_{02} \cos [k(L_1 - L_2)] \end{aligned} \tag{5}$$

식(5)의 광전류의 표현으로부터 오직 마지막 항이 시간 t 와 관계없음을 알 수 있다. 처음 3개 항의 발진은 평균으로 식(6)과 같이 구해지게 된다.

$$I = \frac{E_{01}^2}{2} + \frac{E_{02}^2}{2} + E_{01}E_{02} \cos(k\Delta L) \tag{6}$$

여기서 $\Delta L = L_1 - L_2$ 이다.

광전류는 간섭계에 대하여 반과장 구간을 가진 줄무늬임을 검증하고 있다. 2개의 거울 들 ΔL 사이의 변위는 줄무늬 계수 또는 광전류 I 의 위상 복조에 의해 추출할 수 있다.

기본적으로 마이켈슨 간섭계는 고정된 거울에 하나의 빔이 치거나 다른 이동 가능한 거울이 되도록 단색성 광의 빔 분리에 의해 간섭 줄무늬를 생성한다. 간섭 패턴들은 2개의 빔이 조합될 때 생성할 수 있다.

2.2 레이저 변위계 원리

레이저 변위계는 외부 간섭계로 표현되는 광학 트랜스듀서인 렌즈, 프리즘, 거울로 구성되며, 이들은 레이저 광을 이용하여 광주파수에서 레이저 빔의 위상 변위차인 주파수 변화를 측정함에 의해 측정 물체와의 거리를 측정하는데 사용한다[6][7].

일반적으로 레이저 변위계의 원리는 크게 두 가지로 즉 호모다인(homodyne) 또는 헤테로다인(heterodyne) 기법으로 나뉜다. 이들 기법은 측정된 주파수의 변화가 원래의 레이저 주파수와 동일하거나 또는 거의 근접한 상수 주파수의 빛을 가진 산란된 빛의 혼합을 이용하여

측정한다. 공통의 호모다인 시스템은 마이켈슨 간섭기(Michelson interferometer) 또는 마하젠더 간섭기(Mach-Zehnder interferometers)에 기초한다[4].

레이저 변위계는 레이저 다이오드(LD)에서 발생한 레이저 빛을 측정하고자 하는 대상 물체를 향해 보내면 빛은 빔 분리기(beam splitter)에 의해 2방향으로 분리되어 진행한다. 한 방향은 빛의 일부분(보통 전체 빛의 3~5% 미만)은 빔 분리기를 통하여 반사거울(mirror)로 진행한 후 반사 거울을 닿은 후 반사되어 다시 빔 분리를 통하여 광검출기로 되돌아온다. 이때 되돌아온 신호는 다른 한 방향의 빛을 측정하기 위한 기준으로 사용하기 때문에 기준신호라고 부른다. 다른 한 방향은 빛의 대부분(95~97%)이 빔 분리기를 통하여 측정 대상 물체를 향해 비행한 후 대상 물체에 닿으면 반사되어 다시 빔 분리기로 되돌아와 빔 분리기를 통하여 광검출기에 도착하게 된다. 광 검출기에서는 반사 거울을 통하여 되돌아 온 기준 신호와 측정 대상 물체를 통하여 반사되어 온 빛의 위상차를 계산하여 거리를 구하게 된다. 레이저 변위계의 원리를 그림 2에 나타내었다.

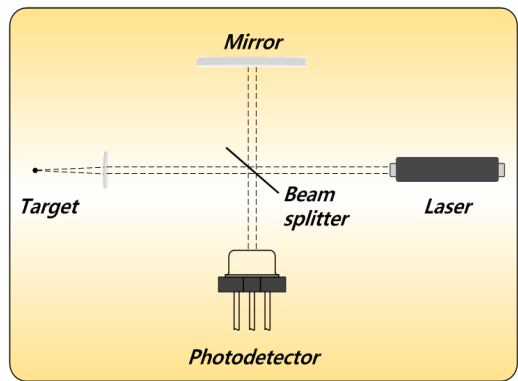


그림 2. 레이저 변위계의 기본 원리
Fig. 2 The Basic principle of laser displacement meter

그림 2에서 보듯이 레이저 광은 반사경과 표적을 통하여 반사될 때 빛이 산란되어 광량이 감소하게 되어 광검출기 도착한 빛의 세기는 목표물의 거리에 따라 달라져 거리 측정의 오차 원인이 된다.

2.3 고정밀 산업용 레이저 변위계의 기본 구성

고정밀 산업용 레이저 변위계의 기본적인 구성을 그

림 2에 나타내었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 변위계 구성은 디지털 혼합기를 포함한 FPGA, 레이저 구동부, APD(avalanch photo diode), LD(laser diode)와 전치 증폭부, 위상 출력부, 레이저 송수신부 구동부, 제어부와 이를 연결하여 전체 레이저 변위를 제어하는 MCU 구성된다[5].

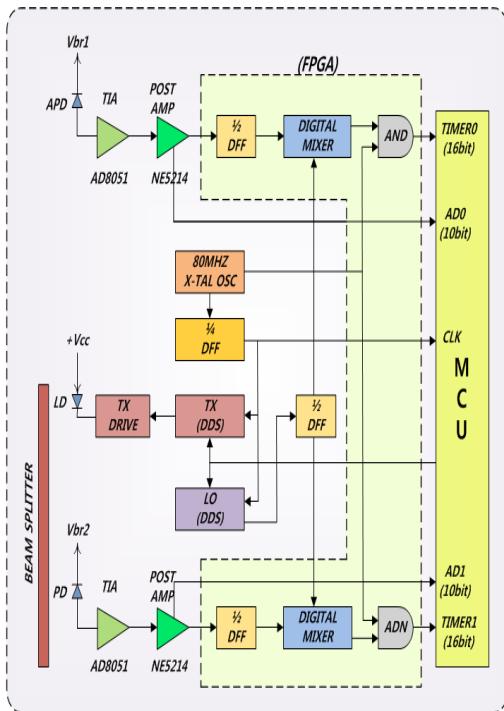


그림 3. 고정밀 산업용 레이저 변위계의 기본 구조
Fig. 3 The Basic structure of high precision of laser displacement meter for industrial

III. 레이저 반사 신호 레벨 변동에 의한 오차 보정 기법

3.1 레이저 반사 신호 레벨 변동

그림 4에 산업용 레이저 변위계의 빛 수신 구조를 나타내고 있다. 그림 4에서 보는 바와 같이 측정하고자 하는 대상 물체에 레이저 빛을 내보내면 대상 물체에 닿고 난 후에 빛을 반사시켜 다시 빔 분리기 쪽으로 보낸다.

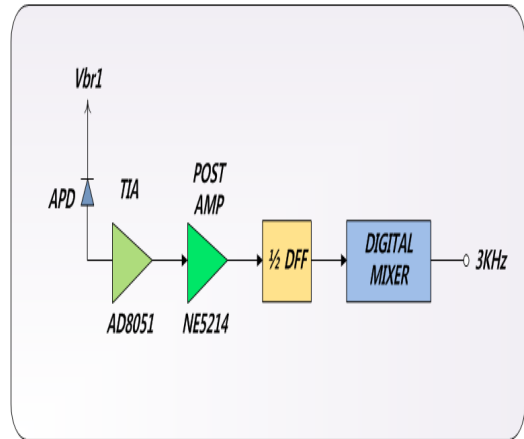


그림 4. 산업용 레이저 변위계의 빛 수신 구조
Fig. 4 The light receive structure of laser displacement meter for industrial

그림 4의 디지털 혼합기를 통하여 들어오는 신호는 왼쪽의 1/2 DFF를 통하여 식(7)과 같은 신호가 들어오며 레이저 다이오드로부터 식(8)과 같은 신호가 들어오게 된다.

$$A \sin(\omega t_1) \tag{7}$$

$$B \sin(\omega t_2) \tag{8}$$

식(7)과 (8)의 두 신호는 각각 디지털 혼합기를 통하여 식(9)와 같이 정리된다.

$$A \sin(\omega t_1) \cdot B \sin(\omega t_2) = \frac{AB}{2} [\cos(\omega t_1 - \omega t_2)] - \cos(\omega t_1 + \omega t_2)] \tag{9}$$

식(9)에서 진폭 계수 AB를 조정하여 3KHz의 주파수를 얻게 된다. 이 경우 A는 가변, B는 고정 값이므로 식(9)에서 진폭에 영향을 주는 것은 식(8)의 신호에서 진폭 계수인 B임을 알 수 있다. 이 진폭을 제어함으로써 레이저 변위계에서 필요한 반사 신호를 얻게 된다.

그러나, 이 경우에 측정 대상 물체에서 반사되는 신호 레벨과 위상차는 보내준 빛의 세기에 일정하게 반사되는 것이 아니라 빛의 세기와 빛의 양에 따라 레이저 반사 신호 레벨의 변동요인이 발생하게 된다. 이 변동

에 따라 레이저 변위계의 측정 결과의 오차 원인이 되어 정밀한 측정을 저해하는 결과를 가져와 레이저 변위계의 성능에 문제점으로 나타나게 된다.

측정 대상 물체에서의 레이저 반사 신호 레벨의 변동 요인은 크게 두 가지로 나누어진다. 하나는 동일 거리에서의 측정하고자 하는 대상 물체의 표면 반사율에 의한 변동이며 다른 하나는 측정 대상 물체의 표면 반사율이 동일하지만 거리 차에 의한 변동으로 볼 수 있다.

본 연구에서는 이러한 오차 요인을 제거하기 위한 방법으로 레이저 반사 신호 레벨 변동에 의한 오차 보정 기법을 제시하였다.

3.2 정현파를 구형파로 변환 할 때 비교기의 트리거 레벨과 정현파 최대 레벨의 관계

레이저 반사 신호 레벨의 변동에 의한 오차 보정을 위해서는 먼저 정현파를 구형파로 변환 할 때 식(9)에서 보는바와 같이 빛의 세기(진폭)에 따라 그림 5와 같이 지연 요소가 발생하며 이 지연요소로 인하여 정확한 구형파로의 변환이 어려워 오차를 발생시키는 원인이 됨을 알 수 있다.

그림 5에서 보는 바와 같이 신호 1의 V_{p1} (Peak Level)과 사인파의 영교점(Zero Crossing Point)간에는 t_1 의 시간 지연이 발생하며, 신호 2의 V_{p2} 에서는 t_2 의 시간지연이 발생한다. 동일거리에서 레이저의 반사 신호가 변동요인에 의하여 최대 레벨(Peak Level)이 변했을 때 거리 오차로 나타나게 됨을 알 수 있다.

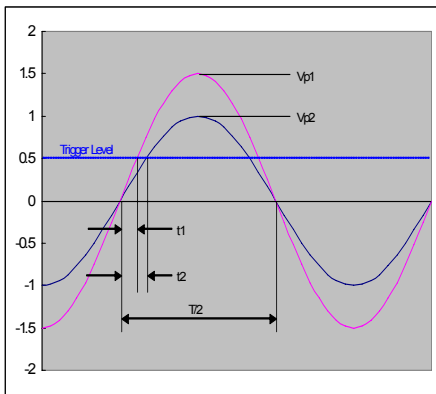


그림 5. 정현파의 진폭크기에 따른 지연 요소
Fig. 5 Delay element according to amplitude of sine wave

본 연구에서는 정현파의 최대 레벨 측정은 최대 유지(Peak-Hold) 회로를 이용하여 쉽게 측정할 수 있으며 비교기의 트리거(trigger) 시작점으로부터 최대 유지 회로를 동작시키는 방법을 적용하였다. 기준신호와 반사 신호에 모두 이 방법을 적용하면, 반사 신호의 변동에 의한 측정오차를 최소화 할 수 있다. 트리거(trigger level)로부터 영교점까지의 지연시간은 식(10)과 같이 정의할 수 있다.

$$t_d = A \sin(v_{th}/V_p) * 2/\pi * T/4 \quad (10)$$

여기서 v_{th} 는 트리거 레벨, v_p 는 신호의 최대 레벨, T 는 신호의 주기이다.

3.3 기준신호와 반사 신호의 위상차 측정 기법

기준신호와 반사 신호의 위상차를 측정하기 위한 방법은 그림 6와 같으며 다음과 같은 순서로 진행된다.

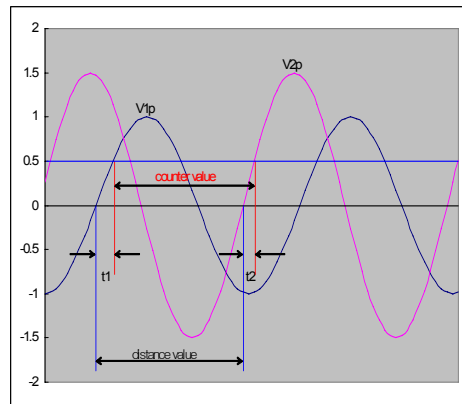


그림 6. 기준 신호와 반사 신호의 위상 측정 기법
Fig. 6 Phase measurement technique of reference signal and reflection signal

먼저 카운터 값으로서 기준신호(V_{p1})의 트리거 점에서 반사 신호(V_{p2})의 트리거점까지를 카운터로서 측정한다. 그런 후 지연 시간 t_1 과 t_2 를 식 (10)에 의하여 구한 후 거리 값은 식(11)에 의해 계산한다.

$$DV = CV + t_1 - t_2 \quad (11)$$

여기서 DV 는 거리 값이며 CV 는 카운터에서 구해진 값이다. 식(11)로부터 실제 거리 D 는 식 (11)에서 구한 값을 평균으로 식(12)와 같이 구한다.

$$D = DV/2 \quad (12)$$

IV. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 레이저 변위 측정에서 측정하고자 하는 물체에 반사되어 나온 빛의 세기(진폭)가 달라 발생하는 오차를 줄여 보다 정밀한 측정을 하기 위한 방법을 제시하였다. 제시된 방법은 측정하고자하는 하는 물체에서 반사되어 나오는 레이저 반사 신호 레벨의 변동에 의한 오차 원인을 찾아 이를 보상하는 기법으로 오차 원인을 찾아서 계산함으로써 보다 정밀한 변위 측정이 가능한 수학적 계산식을 유도하였다. 이를 실제 레이저 변위 측정기에 적용하여 개선된 성능을 확인하는 것이 과제로 남는다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] S. Donati, Electro-Optical Instrumentation, Upper Saddle River, NJ: Prentice-hall, 2004.
- [2] M. C. Amann, T. Bosch, M. Lescure, R. Myllyla, and M. Rioux, "Laser ranging: A critical review of usual techniques for distance measurement", Opt. Eng., Vol. 40, No. 1, pp.10-19, 2001.
- [3] 배영철, 김이곤, 박종배, 김천석, 조의주, 서종주, 이지모프, 구영덕, "고정밀 레이저 거리 계측기 개발에 관한 연구", 한국해양정보통신학회논문지, Vol. 10, No. 12, pp.2296-2302, 2006.
- [4] Introduction of Michelson Interferometer, www.en.wikipedia/wiki/Albert_Abraham_Michelson.
- [5] Yuffeng Han, "Design and validation of laser-interferometry-based displacement sensor with nanometer resolution", Ph. D Thesis, Illinois

Institute of Technology, 2005.

- [6] 배영철 외, "고정밀 레이저 거리 계측기용 디지털 복조 회로 개발에 관한 연구", 한국해양정보통신학회논문지, Vol. 13, No. 3, June 2008.
- [7] J. W. Foreman, E. W. George and R. D. Lewis, "Measurement of localized flow velocities in gases with a laser Doppler flowmeter", Appl. Phys. Lett., Vol. 7, pp.77-78, 1965.

저자 소개



배영철(Young-chul Bae)

1984년 2월 광운대학교 전기공학과 졸업

1986년 2월 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사)

1997년 2월 광운대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사)

1986~1991 한국전력공사

1991~1997 산업기술정보원 책임연구원

1997~2006.3 여수대학교 전자통신전기공학부 부교수

2006.3 - 현재 전남대학교 전자통신전기공학부 교수

※관심분야: 퍼지 및 신경망, 카오스 동기화 및 암호화, 카오스 로봇 설계 및 제어, Small World

박종배(Jong-bae Park)

한국전자통신학회 논문지 제2권 4호 참조



조의주(Eui-joo Cho)

1999년 2월 : 여수대학교 전자통신공학과 (공학사)

2002년 2월 : 여수대학교 전자통신공학과 대학원(공학석사)

2004년 8월 : 여수대학교 전자통신공학과 대학원 박사과정 수료

※관심분야 : 무선이동통신, 인터넷통신, 의료 정보통신



강기웅(Ki-woong Kang)

2005년 여수대학교 컴퓨터공학과
졸업(공학사)

2008년 전남대학교 대학원 컴퓨터
공학과 졸업(공학석사)

※관심분야 : ATM망, 실시간 데이터 통신, 모바일 계
임, TCP/ IP 혼잡제어, 이동 통신 등

강건일(Keon-il Kang)

전남대학교 컴퓨터공학과 석사과정 재학



김현우(Hyeon-woo Kim)

2006년 여수대학교 해양토목공학전
공 (공학사)

2008년 8월 전남대학교 건설·환경
공학과 (공학석사)

2008년 9월 전남대학교 건설·환경공학과 (박사과정)

※관심분야 : Optical Fiber Sensor, FBG Sensor,
structure health monitoring, 유한요소해석, 구조물
수치해석 등



김은주(Eun-jun Kim)

전남대학교 전기공학과 (공학사)

전남대학교 전기공학과 대학원(공
학석사)

한국과학기술정보연구원 선임연구원

2008년 9월 전남대학교 건설·환경공학과 (박사과정)

※관심분야 : 신호처리, FFT, 고장 진단