

논문 2008-45SC-1-4

# 고휘도 백색 LED 및 CCD Array Detector를 사용한 Fourier-Domain 방식의 광 계측 시스템 구현

## (Realization of Optical Measurement using White Source and Fourier-domain)

김 광 유\*, 이 정 렬\*\*, 엄 진 섭\*

(Kwang-Yoo Kim, Jung-Rul Lee, and Jinseob Eom)

## 요 약

본 논문에서는 상용 고휘도 백색광 LED 및 CCD 어레이 검파기를 이용하여 Fourier-domain 방식의 광 계측기를 구현하였다. 제안된 기술의 축 방향 측정 거리 범위는  $125\mu\text{m}$ 이고, 축 방향 분해능은  $1.24\mu\text{m}$ 이다. 기존 시스템이 고가의 광대역 광원을 사용하면서도 분해능이 수  $\mu\text{m}$  이상인 것에 비추어 볼 때, 본 시스템은 저가의 상용 LED와 CCD 어레이 검파기를 사용하여 구현되므로 소형이며 가격적인 면에서 유리하면서도 높은 분해능을 얻을 수 있다.

## Abstract

In this study, the Fourier-Domain optical measurement system, which use a commercial high power white LED as a light source and a CCD linear-array as a detector is realized. The proposed system shows the axial measurement range over  $125\mu\text{m}$  and the axial resolution below  $1.24\mu\text{m}$ . This system has the advantage of the cost effective and compact structure and also the better resolution than the existing technologies, which have a resolution above a few of  $\mu\text{m}$  and use bulky and/or expensive broadband light sources.

**Keywords :** Fourier-Domain, White LED, CCD linear-array, resolution, optical measurement

## I. 서 론

광학 응용산업 중 가장 활발한 분야는 레이저 가공과 광 계측이다. 특히 광을 이용한 계측 기술은 분해능이 우수하여 각종 계측 분야뿐만 아니라 생체조직의 표피 단면 이미지(Optical Coherence Tomography)를 필요로 하는 분야에서도 각광받기 시작하고 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 광 계측 기술은 많은 경우에 간섭계의 원리를 이용하며 간섭신호를 얻는 방법에 따라서 크게 시간-영역(Time-

Domain : TD) 방식과 푸리에-영역(Fourier-Domain : FD) 방식으로 나눌 수 있다. 푸리에-영역 방식은 다시 광대역 광원을 사용하는 스펙트럼-영역(Spectral-Domain : SD) 방식과 고속 파장 가변 레이저를 이용하는 파장가변 광원(Swept-Source : SS) 방식으로 나뉜다<sup>[2]</sup>.

본 논문에서는 저가의 백색광 LED(사용파장대역 497~622nm)와 CCD 어레이 검출기를 이용하여 FD 방식(정확하게는 SD 방식) 광 계측 기술을 구현하였다. 이는 1300nm대역 광원을 사용하는 기존의 FD 방식보다 저가이면서도 광원의 광대역성이 뛰어나 거리 분해능이 더욱 우수한 것으로 확인되었다.

본 논문의 II장에서는 미세 거리 광 계측 방법들에 대하여 설명하고 III장에서는 제안된 시스템의 구성 및

\* 정희원, 강원대학교 전자공학과  
(School of Electronics Eng., Kangwon National Univ.)

\*\* 정희원, 강원대학교 산학협력중심대학 사업단  
(HUNIC, Kangwon National Univ.)

접수일자: 2007년5월28일, 수정완료일: 2008년1월10일

구현 과정을 다루며 또한 제안된 시스템의 성능 분석을 수행한다. IV장에서는 실험 결과를 보여주며 이에 대한 분석을 수행하고 V장에서 결론을 맺는다.

### II. 미세 거리 광 계측 방법

광 계측 기술은 간섭신호를 얻는 방법에 따라서 크게 TD 방식과 FD 방식으로 나뉜다.

#### 1. Time-Domain 방식

TD 방식에서는 그림 1과 같이 마이켈슨 간섭계의 기준팔 거리를 가변시킴으로써 샘플팔 내에 존재하는 반사체들의 거리정보를 얻을 수 있다. 마이켈슨 간섭계의 기준팔 거리와 샘플팔에 존재하는 반사체와의 거리가 서로 일치할 때 간섭신호가 얻어지며 이를 포락선 검파하여 이로부터 피크 발생시간을 추출함으로써 거리 정보를 얻는 방식이다.

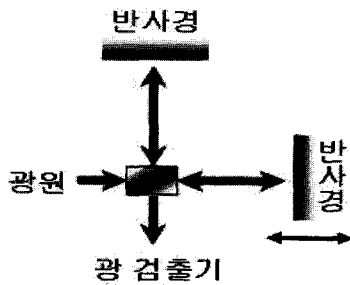


그림 1. TD 방식 구성도  
Fig. 1. A schematic of time domain.

#### 2. Fourier-domain 방식

FD 방식은 그림 2에서 보여지는 것처럼 기준팔이 고정되어 있으며, 샘플팔 내의 반사체와 기준팔간의 거리 차를  $\Delta r$ 이라 할 때 간섭신호로서 전파상수-영역( $k$ -영역,  $k$ -domain) 상에서 주기가  $\frac{\pi}{\Delta r}$ 인 정현파가 얻어진다.

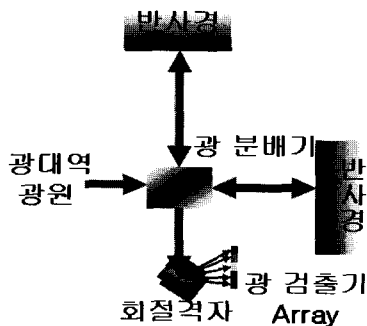


그림 2. FD 방식 구성도  
Fig. 2. A schematic of fourier domain.

역,  $k$ -domain) 상에서 주기가  $\frac{\pi}{\Delta r}$ 인 정현파가 얻어진다. 통신에서 주파수와 시간이 푸리에 변환 쌍 (Fourier Transform pair) 관계에 있는 것처럼 전파상수  $k$ 와 거리  $r$ 도 서로 푸리에 변환 쌍 관계에 있다. 따라서  $k$ -영역에서의 간섭신호에 대하여 푸리에 변환을 수행하면 거리 정보  $\Delta r$ 을 얻을 수 있다. 일반적으로 FD 방식에서는 간섭신호가 스펙트럼 분석기 구성으로 측정되므로 파장-영역( $\lambda$ -domain) 상에서 주파수가 처핑(chirping)된 간섭신호가 얻어진다. 따라서 rescaling 과정을 통하여 이를 다시  $k$ -영역에서의 간섭신호로 바꾸어야 한다. 만일 샘플팔 경로상에 여러 개의 반사체가 존재한다면 각 반사체로부터의 간섭신호들이 파장-영역에서 서로 중첩된 형태로 존재한다. 위에서 설명한 것처럼 이를 상으로 다시 rescaling하면 서로 다른 주파수와 크기를 가지는 정현파 신호들의 중첩된 형태가 얻어진다. 이를 역 푸리에 변환(Inverse Fast Fourier Transform(IFFT)) 하게 되면 각 반사체에 대한 거리 정보를 얻을 수 있다<sup>[3~4]</sup>.

### III. FD 방식 시스템 구현

#### 1. 시스템 구성

실험에서 사용된 고휘도 백색 LED는 발광 파장대역이 420nm~750nm이며, 출력 광파워는 350 [mW]에서 45 [mW]이다. 그림 4는 실험에 사용된 백색광 LED의 스펙트럼이다.

그림 3에서 보여진 마이켈슨 간섭계 광학 셋업은 광 계측에서 가장 많이 사용되는 간섭구조중의 하나이다.

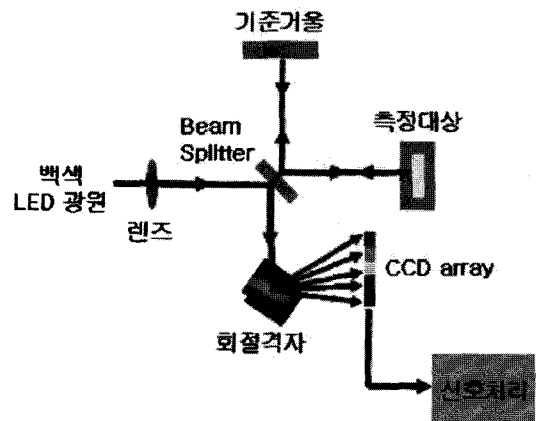


그림 3. 제안된 FD 방식 광 계측기 구성도  
Fig. 3. A schematic of proposed fourier domain optical measurement.

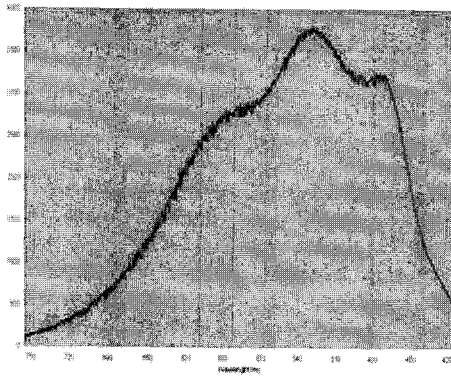


그림 4. 측정된 백색광 LED 스펙트럼  
Fig. 4. A spectrum of white source

마이켈슨 간섭계로 입사된 백색 LED 광은 50:50 광 분배기(Beam Splitter)에서 두 방향으로 분배된다. 그 중 하나는 기준팔 경로로 입사되어 종단에 있는 거울에서 반사되어 광 분배기로 되돌아온다. 이는 광 분배기에서 다시 분배되어 그의 절반이 회절격자에 도달한다. 처음에 광 분배기에서 분배된 나머지 광은 샘플팔 경로로 입사되어 경로상의 반사체에서 반사된 후에 광 분배기로 되돌아온다. 이는 다시 둘로 분배되어 절반이 회절격자에 도달한다. 이처럼 간섭계의 두 팔 경로를 거친 광들은 두 팔간의 경로차에 의해 위상차가 발생하며 이로 말미암아 회절격자를 거친 후 광 검출기인 CCD 어레이 상에서 간섭패턴이 검출된다. 검출된 간섭패턴은 거리정보를 얻기 위한 신호처리 과정을 거치게 된다. 회절격자는 2400 grooves(lines/mm)를 가지는 제품을 사용하였다. CCD 어레이는 2048 픽셀이며 CCD 어레이와 연결된 스펙트로미터 모듈내의 A/D 변환기는 12비트로 구성되어 있다. 따라서 A/D 변환기로 입력되는 -5V ~ +5V의 입력신호를 -2047부터 2047까지의 레벨로 나타낼 수 있다<sup>[5-6]</sup>.

기존의 광 계측 시스템에서는 광원으로서 레이저 다이오드 또는 1300nm 대역의 Super-luminescence LED와 같은 고가의 부품이 사용되어왔다. 그러나 본 연구에서는 저가의 고회도 백색 LED를 사용하여 기존의 방식보다 저가이면서도 광원의 광대역성으로 인하여 거리 분해능이 더욱 우수한 시스템을 구현하였다.

## 2. 신호처리 과정

CCD 어레이에서 검출된 간섭패턴은 측정대상의 거리정보를 가지고 있다. 이를 도출하기 위해서는 그림 5와 같은 신호처리 과정을 필요로 한다.

CCD 어레이에서 검출된 간섭신호는 전치 증폭기를

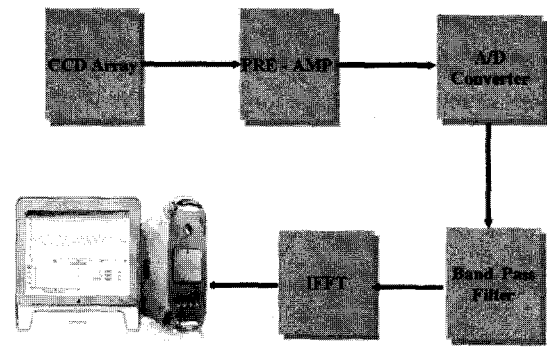


그림 5. 간섭신호 신호처리 과정  
Fig. 5. A block diagram of processing for interference signals.

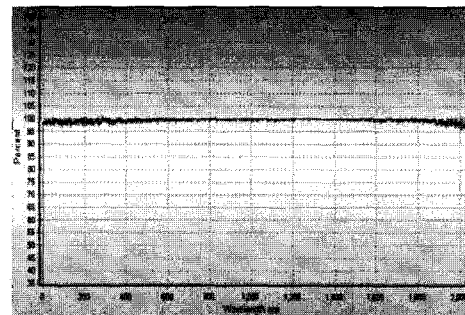


그림 6. 두 팔간의 경로차가 없을 때의 CCD 어레이 간섭패턴  
Fig. 6. A interference pattern on CCD array under no displacement between the reference and sample arm.

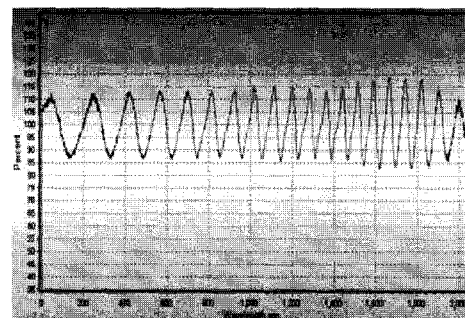


그림 7. 두 팔간의 경로차가 발생했을 때의 CCD 어레이 간섭패턴  
Fig. 7. A interference pattern on CCD array under a little displacement between the sample and reference arm.

통하여 증폭된 후 A/D 변환을 거치게 된다. 아래의 그림 6과 그림 7에 A/D 변환된 스펙트럼 데이터를 두 경우에 대하여 각각 보였다. 그림 6은 두 팔간의 경로차가 없을 때의 간섭패턴이다. 두 팔간의 경로차가 없기 때문에 위상차가 발생하지 않으며 따라서 간섭패턴이 존재하지 않는다. 여기서 샘플팔을 조절하여 기준팔과의 경로차를 발생시키면 그림 7과 같이 처핑된 간섭패

턴이 얻어진다. 이는 간섭패턴이 파장-영역 상에서 표시되었기 때문이다.

A/D 변환을 거친 후에 스펙트럼 데이터는 불필요한 신호를 걸러내기 위하여 대역 통과 필터(Band Pass Filter)를 거치게 된다. 필터링 된 데이터는 IFFT를 위하여 파장-영역에서  $k$ -영역으로 바꾸는 rescaling 과정을 거치게 된다. Rescaling 방법은 다음과 같은 순서로 수행된다. 먼저 CCD의 각 픽셀에 해당하는 파장을 각각 전파상수  $k$ 로 변환한다. 이로부터 각 픽셀별 검출된 광 세기와 전파상수  $k$ 가 얻어진다. 다음에  $k$ -영역을 IFFT를 위하여  $2^n$ 으로 균등분할하고 균등 분할된 각 전파상수  $k$ 에서의 검출 광세기를 보간법(interpolation)을 적용하여 구한다. 그림 7의 간섭신호를  $k$ -영역으로 rescaling 한 후에 얻어진 간섭신호 파형을 그림 8에 보였다. 그림에서 보여지는 것처럼 파장-영역에서 처핑되었던 간섭신호가  $k$ -영역에서는 일정한 주파수의 정현파로 표시됨을 알 수 있다.

전파상수  $k$ 와 거리  $z$ 는 서로 푸리에 변환 쌍 관계에

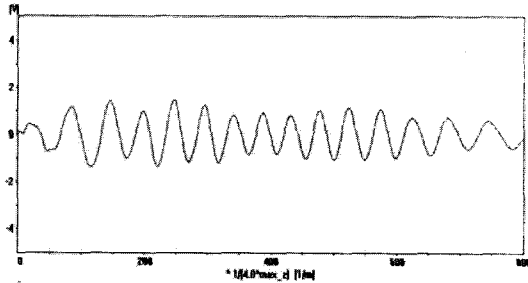


그림 8. Rescaling 한 후에  $k$ -영역에서 표시된 정현파 간섭신호

Fig. 8. After rescaling, interference signals displayed on wave-number domain.

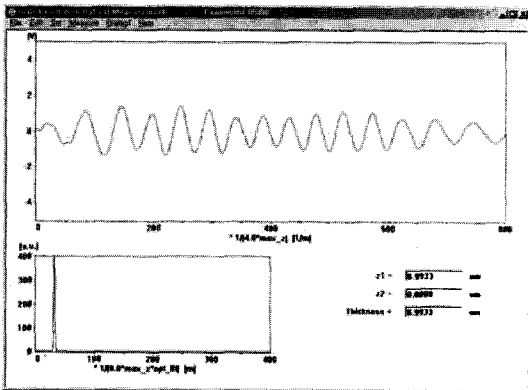


그림 9. 윈도우 프로그래밍을 수행하여 자체 제작한 화면. Rescaling 결과 파형, IFFT 결과, 그리고 이로부터 얻어진 거리정보를 표시함

Fig. 9. Self-fabricated display including the rescaling results, IFFT and displacement information.

있다. 따라서 그림 8에서 보여진  $k$ -영역에서의 간섭신호를 역 푸리에 변환하면 거리 정보  $\Delta r$ 을 얻을 수 있다. 그림 9는 IFFT 결과를 보여주고 있으며 또한 이를 통하여 얻어진 거리정보를 나타내고 있다. 그림 9의 화면은 윈도우 프로그래밍을 수행하여 자체 제작하였다.

### 3. 계측 성능 분석

FD 시스템의 분해능은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$(\Delta_r)_{resolution} = \frac{1}{2 \times \left(\frac{1}{\lambda}\right)_{span}} \quad (1)$$

여기서  $\left(\frac{1}{\lambda}\right)_{span}$ 은 CCD 어레이에서 검출되는 광의 파장 범위로부터 계산될 수 있다. 본 시스템의 CCD 어레이에서 검출된 광의 시작파장은 497nm이고 마지막 파장은 622nm으로서 사용된 총 파장대역은 125nm이었다. 이로부터 식(1)을 계산하면 1.24 $\mu$ m의 축방향(axial) 분해능을 얻을 수 있으며 실험을 통하여 이를 확인하였다. 만일 사용된 백색광 LED의 허용 대역폭 규격인 330nm(420~750nm)를 모두 사용할 수 있도록 시스템 구성을 개선시킨다면 축방향 분해능을 0.48 $\mu$ m까지 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

한편 측정 가능한 축 방향 최대 거리 차는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\Delta L_{max} = (\Delta_r)_{resolution} \times \frac{CCD \text{ array size}}{2} \quad (2)$$

앞에서 계산된 축방향 분해능 1.24 $\mu$ m와 사용된 CCD 어레이 크기 2048을 식(2)에 적용하면 측정 가능 축 방향 거리 차는 1.27mm로 주어진다.

측정된 축 방향 거리 차는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta L = (\Delta_r)_{resolution} \times n_{peak} \quad (3)$$

여기서  $n_{peak}$ 는 IFFT 결과에서 최대 피크가 얻어지는 정수이다.

## IV. 실험 및 결과

그림 10에서는 기준팔과 샘플팔 간의 거리차를 변경시켰을 때 CCD 어레이에 검출된 간섭신호들을 보여준다. 실험을 통한 측정에서 기준팔과 샘플팔 반사체 간

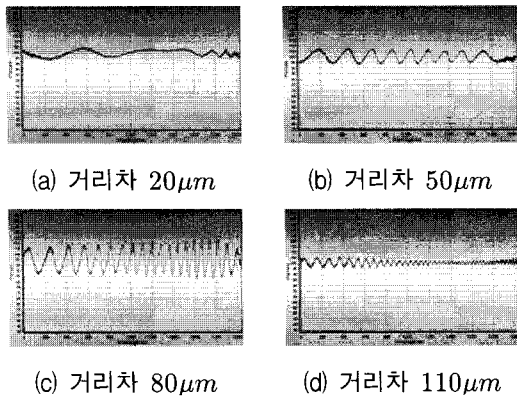


그림 10. 기준팔과 샘플팔 간의 거리차에 따른 간섭신호 변화  
 Fig. 10. Interference signals depending on the path-length difference between the reference and sample arm.

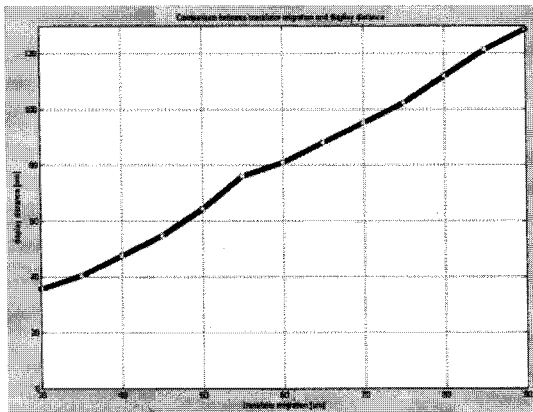


그림 11. 실제 거리차와 측정된 거리차의 비교  
 Fig. 11. A comparison between real and measured path-length difference.

의 측정 가능한 거리 차는 약  $120\mu\text{m}$ 이었다. 이 수치는 앞에서 계산된  $1.27\text{mm}$ 와 큰 차이가 있음을 나타낸다. 이는 측정된 간섭신호에 대한 자동이득제어 기능을 수행하여 아주 작은 간섭신호에 대한 측정도 가능하게 함으로서 측정 가능한 거리차를 개선시킬 수 있을 것으로 사료된다.

그림 11은 화면에 표시된 측정 거리차와 실제 거리차를 비교한 그래프이다. 그림으로부터 두 거리차간에는 비교적 우수한 선형관계가 성립함을 알 수 있다. 두 거리차간에 offset값이 존재하는 이유는 회절격자로부터 CCD 어레이까지의 set-up 실제 수치와 계산상의 수치간의 오차로 인하여 CCD 어레이의 각 픽셀에서의 파장값이 정확히 계산되지 않았기 때문이다. 이는 정확한 set-up 수치를 계산에 사용함으로써 offset을 줄일 수 있을 것이다.

## V. 결 론

본 연구에서는 광 계측기기의 광원으로서 저가의 고휘도 백색광 LED를 사용하고 이를 위한 광 수신부로서 상용 CCD 이미지 센서를 사용하였다. 따라서  $125\text{nm}$  이상인 백색광 LED의 넓은 스펙트럼 대역폭으로 인하여 분해능이 더욱 우수하면서도 저가인 시스템을 구현할 수 있었다. 본 연구에서 구현된 측방향 측정 가능 거리차는  $123\mu\text{m}$ 이었으며, 측방향 분해능은  $1.24\mu\text{m}$ 이었다. 기존의 분해능이 수  $\mu\text{m}$  이상이었던 것에 비하여 우수한 분해능을 얻을 수 있었으며 시스템 구조의 개선을 통하여 더 큰 거리차를 측정할 수 있을 것으로 예상된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 김철중, "레이저 가공 및 광 계측의 산업적 활용," 한국광학회 학계학술발표회논문집 제12회, pp. 96-103, 1995
- [2] Y. Yasuno, V. D. Madjarova, S. Makita, M. Akiba, A. Morosawa, C. Chong, T. Sakai, Kin-pin Chan, M. Itoh, and T. Yatagai, "Three-dimensional and high-speed swept-source optical coherence tomography for in vivo investigation of human anterior eye segments," *Optics Express* vol. 13, no. 26, pp10652-10664, Dec. 2005.
- [3] J. T. Oh & B. M. Kim. "Artifact removal in complex frequency domain optical coherence tomography with iterative least-square phase-shifting algorithm," *OSA*, pp. 4157-4164, 2005.
- [4] W. G. Jeon and Y. S. Cho, "An equalization technique for OFDM and MC-CDMA in a multipath fading channels," in *Proc. of IEEE Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, pp. 2529-2532, Munich, Germany, May 1997.
- [5] M. Wojtkowski, T. Bajraszewski, P. Targowski and A. Kowalczyk, "Real-time in vivo imaging by high-speed spectral optical coherence tomography," *Optics Letters* vol. 28, pp1745-1747, 2003.
- [6] N. A. Nassif, B. Cense, B. H. Park, M. C. Pierce, S. H. Yun, B. E. Bouma, G. J. Tearney, T. C. Chen and J. F. de Boer, "In vivo high-resolution video-rate spectral-domain optical coherence tomography of the human retina and optic nerve," *Optics Express* vol. 12, pp367-376, 2004.

저 자 소 개



김 광 유(정회원)  
 2007년 2월 강원대학교  
 전자공학과 (공학사)  
 2007년 2월 강원대학교  
 전자공학과 (공학석사)  
 <주관심분야 : 광통신, 광교환, 광  
 소자, 광센싱>



엄 진 섭(정회원)  
 1982년 2월 서울대학교  
 전자공학과 (공학사)  
 1984년 2월 서울대학교  
 대학원 전자공학과  
 (공학석사)  
 1990년 12월 미국 Texas A&M  
 University 전기공학과  
 (공학박사)

1991년~1992년 한국통신 선임연구원  
 1992년~현재 강원대학교 IT특성화학부대학  
 전기전자공학부 정교수  
 <주관심분야 : 광통신, 광교환, 광소자, 광센싱>



이 정 렬(정회원)  
 2007년 2월 강원대학교  
 전자공학과 (공학사)  
 2007년 2월 강원대학교 대학원  
 전자공학과 (공학석사)  
 2004년 8월 강원대학교 대학원  
 전자공학과 (공학박사)

2005년~현재 강원대학교 산학협력중심대학  
 사업단 전담교수  
 <주관심분야 : 광통신, 광교환, 광소자, 광센싱>