

# SFF/SFP 광 송수신기용 TO-can 패키지 주파수 응답 향상 연구

준회원 이 상 훈\*, 정 현 도\*, 정회원 구 본 조\*, 한 상 국\*

## A Study of The Frequency Response Improvement of TO-can Package for SFF/SFP Optical Transceiver

Sang-Hoon Lee\*, Hyun-Do Jung\* Associate Members,  
Bon-Jo Koo\*, Sang-Kook Han\* Regular Members

### 요 약

본 논문은 SFF/SFP 광 송수신기에 사용되는 TO-38 패키지의 대역폭 향상을 위해 여러 구조적 변수를 변화시켜 최적화하여 3dB 대역폭의 성능향상을 제안하였다. 먼저 실험을 통해 PIN PD 칩에 인가된 바이어스에 따른 캐패시턴스 값을 구하였으며 TO-can 패키지의 주파수 응답을 측정하여 3.5GHz의 3dB 대역폭을 얻었다. 또한 3차원 시뮬레이션으로 측정치와의 주파수 응답 특성의 일치를 재확인 하였다. 더 나은 주파수 응답을 얻기 위해 TO-can 패키지 여러 물리적 구조 변수를 변화시켜 최적화시킨 TO-38 패키지는 3dB 대역폭 15GHz의 아주 우수한 성능향상을 보였으며 이는 10Gbps대의 bit rate 성능을 만족할 수 있는 SFF/SFP 광 송수신기 모듈에 적용이 가능하다.

Key Words : SFF/SFP optical transceiver; TO-can package; 3dB-bandwidth, Bonding-wire

### ABSTRACT

We propose the optimum TO-can package design in SFF/SFP optical transceiver modules to improve 3dB-bandwidth. The frequency response of TO-38 package is measured and compared to simulation where the 3dB-bandwidth was 3.5GHz. For a higher operating bandwidth (>15GHz), the new optimized physical geometries of TO-can package such as bonding-wire, lead and material was suggested. The optimal result of simulation shows that TO-can package can be used at a higher bit rate optical module of 10Gbps.

### 1. 서 론

최근 들어 광 네트워크를 효율적으로 구축하기 위한 핵심 부품인 광 송수신 모듈의 저가격화, 소형화 그리고 높은 데이터 용량을 만족할 수 있는 SFF(small form-factor)/SFP(small form-factor pluggable) 광 송수신기 모듈의 연구개발이 한창 진행 중이다<sup>[1][2]</sup>. SFF/SFP 광 송수신기의 송신과 수신부분의 광 연결 패키지 방법에 있어서 8-pin mini-DIL (dual-in-line)을 사용한 방식보다 가격 면에서 우수한 특성을 가진 TO-can 패키지 방식이 선호되고 있다.

광 송수신기 모듈의 부피가 점점 작아질수록 내장될 TO-can 패키지 또한 점점 작아지는 경향을 보여 왔다. 특히 지금까지 TO-56, TO-46 등의 TO-can 타입의 패키지가 많이 이용되어 왔으며 최근 들어 직경이 3.8mm의 아주 작은 TO-38 패키지로 교체되는 추세이다.

SFF/SFP 광 송수신기의 데이터 용량이 증가하면서 전광/광전 변환 역할을 하는 LD/PD 칩(chip)의 대역폭뿐만 아니라 패키지의 대역폭 또한 중요하게 대두되고 있다. 동작 주파수가 높아질수록 TO-can 패키지에서는 캐패시턴스(capacitance), 인덕턴스

\* 연세대학교 전기전자공학과 (kraus@yonsei.ac.kr)  
논문번호 : 030312-0722, 접수일자 : 2003년 7월 22

(inductance) 같은 원치 않은 기생성분(parasitic element)들이 발생되어 신호의 왜곡을 가져오게 된다. 따라서 광 모듈 설계에 있어 이러한 RF 특성에 대한 중요성이 날로 높아지고 있다. 특히 광 송수신기의 수신기에 있어서의 TO-can 패키지에 대한 설계는 수신감도를 결정하는 주요 요소로 자리 잡게 되었다. 수신 단의 RF 특성은 각 소자간의 연결, 패키지의 구조 등에 의해 폭 넓게 영향을 받으므로 고주파용 TO-can 패키지 제작 시에는 그 제작 초기부터 면밀한 해석 및 정확한 설계가 이루어져야 한다. 그러나 지금까지는 이런 TO-can 타입의 패키지 설계에 있어서 너무 경험적 방법에만 의존하였으며, 최근 들어 패키지 설계를 위해 기생성분들을 정량적으로 해석하는 논문이 발표되었다<sup>[3][4][5][6]</sup>. 그러나 이런 논문들은 해석을 위해 정확성이 떨어지는 2차원 회로 시뮬레이션을 이용하여 해석하였으며, 실제 TO-can 패키지를 설계하여 제작한 연구는 TO-56과 TO-46을 설계하였으나 보다 넓은 대역폭을 만족하지는 못하였다.

본 논문은 광 수신기의 PIN PD 칩 TO-38 패키지의 구조적 최적화 설계를 제안했다. 제II장에서는 TO-can 패키지의 3차원 모델링과 등가회로를 제시하여 기생성분들을 해석하였으며 제III장에서는 패키지의 주파수 응답을 실험과 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다. 더 나은 대역폭 확보를 위해 여러 가지 패키지 구조 변수를 변화시켜 최적의 파라미터를 추출, 적용하여 3dB 대역폭 향상을 증명하였으며, 제IV장에서 결론을 맺었다.

## II. 모델링

그림1(a)는 TO-38 패키지의 3차원 모델링을 나타낸 것이다. PD 칩의 양극에서 광전 변환되어 생성된 전기적 신호는 양쪽 본딩 와이어(bonding-wire)와 각 리드선(lead)을 통해 전달된다. 이때 PD 칩은 TO-38 본체(body)의 중앙에 위치한 sub-mount에 놓이게 된다. 이 모델링에서는 광/전 변환된 전류신호를 적당한 전압으로 변환시켜주는 TIA(trans-impedance amplifier)는 생략하였다. 광전 변환된 전기적 신호가 높은 주파수 성분을 가지게 되면 TO-can 패키지 내부에서 원하지 않는 캐패시턴스와 인덕턴스 효과가 발생되어 광 수신기 전체의 수신감도를 떨어지게 하는 등의 치명적인 결과를 초래하게 된다. 이런 기생 성분들을 그림 1(b)와 같이 인덕턴스와 캐패시턴스를 이용한 2차원 등가회로로 나타낼 수 있다.

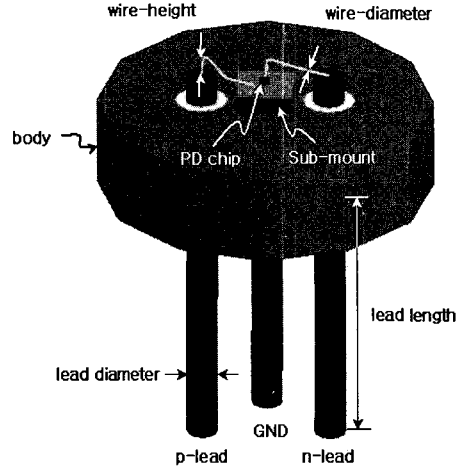


그림 1(a). TO-38 패키지 3차원 모델링  
Fig. 1(a) 3D modeling of TO-38 package

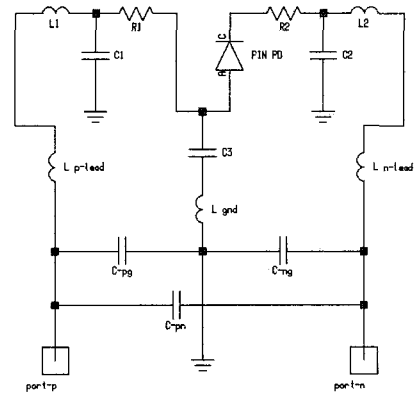


그림 1(b). TO-38 패키지 등가회로  
Fig. 1(b) The equivalent circuit of TO-38 package

보통 본딩 와이어와 리드선과 같은 도파로(waveguide) 역할을 하는 도체는 항상 고유의 임피던스를 가지고 있다. 이것은 낮은 주파수에서 동작할 때는 큰 문제가 되지 않지만, GHz이상의 높은 주파수 범위에서 동작 시 문제가 발생되며 이런 고주파수에서 가지는 저항성분을 유도성 임피던스(inductive impedance)라 한다. 따라서 높은 주파수를 가진 전기 신호가 본딩 와이어와 리드선을 지날 때 그림1(b)에서와 같은 기생성분인  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_{p-lead}$ ,  $L_{n-lead}$ ,  $L_{gnd}$ 가 나타나게 된다. 이런 기생 인덕턴스 성분은 원하지 않는 공진 현상과 발진 현상을 유발하여 전 주파수 범위에서 손실을 크게 하는 원인이 되므로 가능한 한 작게 할 필요가 있다<sup>[3]</sup>. 특히 본딩 와이어에 대한 인덕턴스는 식(1)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[7]</sup>.

$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left[ \ln\left(\frac{4l}{d}\right) + \mu_r \delta - 1 \right] \quad (1)$$

여기서  $\mu_0$ 와  $\mu_r$ 은 자유공간에서의 유전율과 본딩 와이어의 재질과 관련된 비유전율(relative permittivity)을 나타낸다.  $l$ 은 와이어의 길이,  $d$ 는 와이어의 직경,  $\delta$ 는 표피효과(skin depth)를 각각 나타낸다. 특히 표피 효과는 본딩 와이어의 직경과 주파수에 밀접한 관련이 있다. 식(1)에서와 같이 본딩 와이어의 길이가 짧을수록, 직경이 클수록, 그리고 주파수가 낮을수록 인덕턴스 성분은 작아짐을 알 수 있다.

앞에서 설명한 인덕턴스와 마찬가지로 캐패시턴스 성분도 그림1(b)에서  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_{pg}$ ,  $C_{ng}$ ,  $C_{pm}$  등으로 나타낼 수 있다. 낮은 주파수에서는 큰 문제가 없지만 높은 주파수 신호가 인가되면 본딩와이어와 TO-can 본체사이, 리드선들 사이의 상호 캐패시턴스는 간과할 수 없는 성분이므로 정확한 해석이 필요하다. 결국 패키지의 물리적인 구조변수에 의해 발생하는 두기생성분은 원하지 않는 공진현상과 필터링 현상을 유발할 수 있다. 이는 다시 말해 광 수신기 전체의 대역폭의 제한을 받는다는 의미가 되므로 패키지 설계 시 적절한 구조 변수 선택이 선행되어야 한다.

### III. TO-can 패키지의 주파수 응답 실험 및 시뮬레이션

실험에 사용된 TO-can의 내역은 다음과 같다. 직경이 3.8mm인 TO-can 본체는 Ni-Fe 합금에 금도금된 재질을 사용하였고, 두개의 본딩 와이어는 25 $\mu$ m 직경의 금 재질이며 3개의 리드선 또한 길이 7mm의 Ni-Fe 합금에 금도금된 재질을 사용하였다. 그리고 TO-can 본체와 리드선 사이를 절연시켜주는 물질은 유리재질을 사용하였다. 그림1(a)에서 실험과 시뮬레이션에 사용된 TO-38 패키지의 3차원 모델링을 나타냈다.

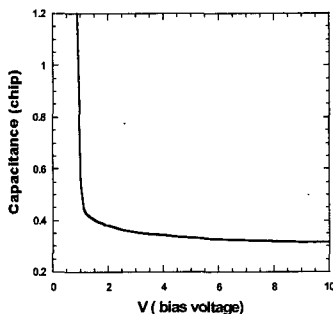


그림 2(a). PIN PD 칩의 바이어스 전압에 따른 캐패시턴스 값의 변화  
Fig. 2(a) Capacitance variation with a bias voltage of PIN PD chip

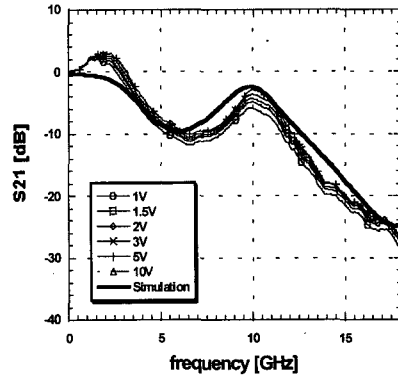


그림 2(b). 측정 결과와 시뮬레이션 결과 비교  
Fig. 2(b) The comparison of measurement and simulation results

그림 2(a)는 제작된 PIN PD 모듈에 사용된 PD 칩 바이어스 전압(1~10V)에 따른 캐패시턴스 값의 변화를 구한 그림이다. 4V에서 이상에서는 0.33pF로 완만한 변화를 보이는데 이는 undoped-InGaAs층이 완전히 고갈(depletion) 되었음을 나타낸다. 따라서 시뮬레이션 시 PD 칩에 대한 조건은 0.33pF과 내부저항 5 $\Omega$ 으로 설정하였다. 그림2(b)는 PIN PD 칩의 인가전압에 따른 주파수 응답의 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교한 그림이다. 그림에서 보면 알 수 있듯이 측정된 3dB 대역폭은 약 3.5GHz이며 3GHz에서 6GHz 사이에서는 서로 근사한 값을 가짐을 알 수 있다. 또한 15GHz이상의 넓은 주파수 대역에서 측정치와 시뮬레이션 치는 대략 일치하는 경향을 보인다.

보다 향상된 3dB 대역폭(>15GHz)을 얻기 위해 3차원 시뮬레이션을 이용하여 조작 가능한 5가지 구조적 변수를 변화시키면서 최적의 구조 변수를 찾아냈다. 제일 먼저 그림1(a)에서 도시한 본딩 와이어의 직경을 변화시키면서 그에 따른 S 파라미터 S21을 그림3에서 나타냈다. 3dB 대역폭은 약 4GHz의 낮은 주파수에서는 본딩 와이어의 직경에 관계없이 일정하나, 4GHz 이상의 높은 주파수에서는 직경이 짧으면 더 높은 이득을 가지면서 또한, 낮은 주파수대로 약간 이동(shift)하는 경향을 보인다. 그림 3과 같은 경우 높은 주파수로 이동하는 특성보다 이득(gain) 특성이 더 우수하므로 본딩 와이어의 직경은 가능한 한 작게 설계하여야 한다. 그림 4는 본딩 와이어의 높이에 따른 S21을 나타냈다. 본딩 와이어의 높이가 낮을수록 더 높은 주파수대로 이동되는 좋은 특성을 보이지만 이득은 크게 감소함을 알 수 있다. 이는 본딩 와이어의 높이가 낮아짐에 따라 길이 또한 짧아져 인덕턴스 성

분은 줄어들지만, 그에 반해 낮은 와이어의 높이 때문에 본딩 와이어와 리드선간, 또는 TO-can 본체간의 상호 캐패시턴스 성분이 증가하기 때문이다. 그림4와 5에서는 주파수 이동(shift) 특성과 이득 특성 간에 trade-off 관계가 있다는 것을 알 수 있다.

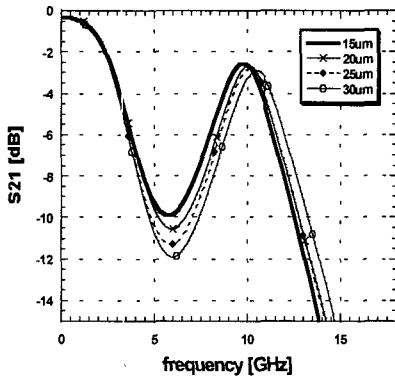


그림 3. 본딩 와이어의 직경 변화에 의한 S21  
Fig.3 S-parameter for a variation of bonding-wire diameter

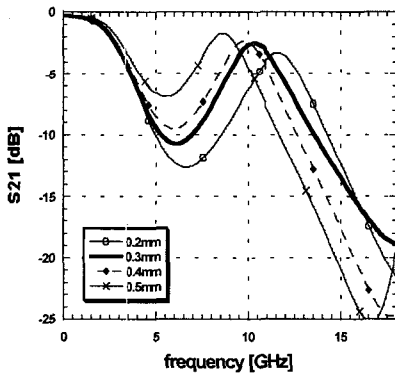


그림 4. 본딩 와이어의 높이 변화에 의한 S21  
Fig.4 S-parameter for a variation of bonding-wire height

그림5와 그림6은 리드선의 직경과 길이 변화에 따라 S21을 구한 그림이다. 리드선의 직경이 작을수록 높은 주파수로 이동되는 동시에 이득 또한 증가한다. 이는 작은 리드선의 직경은 리드선 상호간의 캐패시턴스 성분을 줄어줄게 하는 효과가 있기 때문이다. 그림 6에서의 결과는 리드선의 길이가 짧아야 이득이 증가됨을 알 수 있다. 이때는 S-파라미터 특성이 높은 주파수로 이동 되지 않는 특징을 가지는데 그 이유는 단순히 길이만 변화되어 인덕턴스 성분은 줄어드는 반면에 캐패시턴스 성분은 항상 고정되기 때문이다.

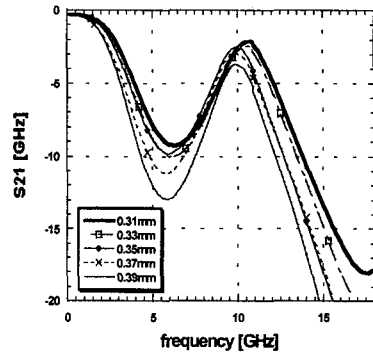


그림 5. 리드선의 직경 변화에 의한 S21  
Fig.5 S-parameter for a variation of lead diameter

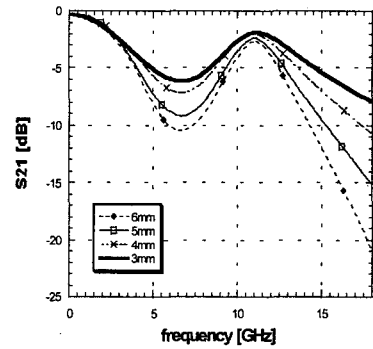


그림 6. 리드선의 길이 변화에 의한 S21  
Fig.6 S-parameter for a variation of lead length

마지막 구조변수인 리드선과 TO-38 본체 사이의 절연체에 대한 비유전율(relative permittivity) 변화에 의한 주파수 응답 특성을 그림 7에 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 이 절연체가 가지고 있는 비유전율이 작을수록 높은 주파수로 이동되면서 이득 또한 증가함을 알 수 있다.

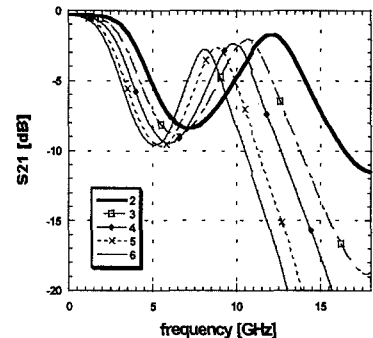


그림7. 절연물질의 비유전율 변화에 의한 S21  
Fig.7 S-parameter for a variation of insulator material

지금까지 TO-38 패키지의 5가지 구조변수의 변화에 따른 주파수 응답특성을 살펴보았다. 이를 토대로 최적의 변수를 선정하여 시뮬레이션을 하였다. 본딩 와이어의 직경과 높이는 각각 15 $\mu$ m와 0.3mm로 설정하였으며 리드선의 직경과 길이는 0.31mm, 3mm로 설정하였고, 유전체의 비유전율을 2로 설정하였다. 이 결과를 그림 8에서 S-파라미터 S21과 S11을 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 최적의 구조 파라미터를 선택할 경우 15GHz 이상의 3dB 대역폭을 얻을 수 있었다. 이는 10Gbps 이상의 bit rate를 만족시킬 수 있는 대역폭임을 알 수 있다.

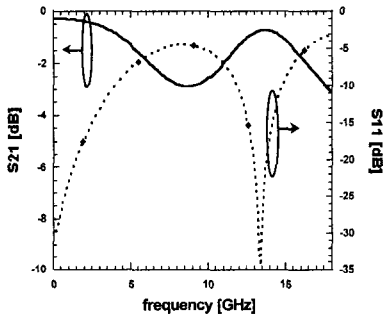


그림 8. 최적화된 구조에서의 S21과 S11  
Fig. 8 S-parameter for the optimized TO-can package design

#### IV. 결론

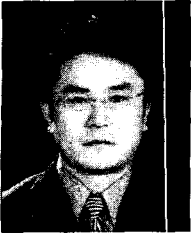
SFF/SFP 광 송수신기에 장착되는 TO-38 패키지의 향상된 3dB 대역폭을 얻기 위해 실험과 시뮬레이션을 통해 패키지 구조변화에 따른 최적의 구조변수를 제시했다. 실험 측정을 통해 각 바이어스 전압의 변화에 따른 PIN PD 칩의 캐패시턴스 값을 구하였으며 3.5GHz의 3dB 대역폭 주파수 응답을 구하였다. 같은 조건으로 시뮬레이션 하여 비교한 결과는 측정치와 전 주파수 범위에서 정확한 일치치를 보였다. 보다 나은 주파수 응답을 얻기 위해 여러 구조적 변수 즉, 본딩 와이어, 리드선, 재질 등을 변화시켜 가면서 최적화 시뮬레이션을 하였다. 제시한 최적의 구조적 변수를 선택하여 TO-can을 설계할 경우 15GHz이상의 3dB 대역폭을 얻을 수 있었다. 이는 날로 증가하고 있는 10Gbps 이상의 데이터 용량을 수용할 수 있는 우수한 성능의 TO-can 패키지 설계라고 예측되며 이 결과를 바탕으로 기존의 경험적인 방법에 의한 패키지 설계를 표준화시킴으로써 성능 향상에 큰 도움이 될 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] Y. Sunaga, R. Takahashi, T. Tokoro, and M. Kobayashi, "2 Gbit/s small form factor fiber-optic transceiver for single mode optical fiber", *IEEE Trans. Advanced Packaging*, Vol.23, pp.176-181, May, 2000
- [2] S. Abe, K. Tobita, T. Shinozaki, K. Arai, K. Takeshita, K. Tanaka, and Y. Isono, "Short wave SFF small form factor transceivers", *Electronic components and technology conference*, 2001
- [3] S. H. Hall, W. L. Walters, L. F. Mattson, G. J. Fokken and B. K. Gilbert, "VCSEL electrical packaging analysis and design guidelines for multi-GHz applications", *IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology*, Vol.20, pp.191-201, 1997
- [4] J. Rue, M. Itzler, N. Agrawal, S. Bay and W. Sherry, "High performance 10G/s PIN and APD optical receivers", *Electronic components and Technology Conference*, 1999
- [5] 장우익, 권진우, 심종인, 이창민, "PIN PD의 TO-can package 등가회로 설계 및 회로소자 값 추출" 광자기술 학술회의, T4D5, 2001
- [6] X. Qi, C. P. Yue, T. Arnborg, H. T. Soh, H. Sakai, Z. Yu and R. W. Dutton, "A fast 3-D modeling approach to electrical parameters extraction of bonding wires for RF circuits", *IEEE Trans. Advanced Packaging*, Vol.23, pp.480-488, 2000
- [7] S. L. March, "Simple equations characterize bond wires", *Microwaves and RF*, pp 105-110, 1991

이 상 훈(Sang-Hoon Lee)

준회원



1997년 2월 : 삼척대학교 전자공학과 공학사  
2001년 8월 : 연세대학교 전파공학 공학석사  
2002년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<주관심분야> 유무선 통합망, Microwave photonics, Optoelectronics packaging

한 상 국(Sang-Kook Han)

정회원



1986년 2월 : 연세대학교 전자공학과 공학사  
1988년 12월 : Electronic Engineering, University of Florida (M. S)  
1994년 8월 : Electronic Engineering, University of Florida (Ph. D)

1994년~1996년 : 현대전자 시스템 IC 연구소 선임연구원

1996년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 부교수

<주관심분야> WDM optical transmission, Optoelectronics devices, Microwave-photonics, Optical cross connection for optical network

정 현 도(Hyun-Do Jung)

준회원



1999년 2월 : 경희대학교 전파공학과 공학사  
2001년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 공학석사  
2001년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학 박사과정

<주관심분야> 유무선 통합망, RF photonics, 광통신 시스템

구 본 조(Bon-Jo Koo)

정회원



1990년 2월 : 연세대학교 물리학과 학사  
1992년 2월 : 연세대학교 물리학과 석사  
1992년 3월~2000년 12월 : LG전선 연구소 선임연구원  
2001년 1월~2001년 8월 : (주) 네오텍 연구소 책임연구원

2001년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 박사과정

<주관심분야> Optoelectronics devices, RF photonics, 광통신시스템