

중심-동공을 갖는 원통형태 광결정 도파로의 전자장 특성 분석 및 설계 연구

김정일

충남대학교 전기·전자·통신공학교육과 교수

A Study on the Analysis of Electromagnetic Characteristics and Design of a Cylindrical Photonic Crystal Waveguide with a Low-Index Core

Jeong I. Kim

Professor, Department of Electric, Electronic and Communication Engineering Education,
Chungnam National University

요약 본 논문에서는 중심에 동공을 갖는 원통형태 광결정 도파로가 제안되어지고, 이 전송로의 도파 특성에 대한 분석이 수행되어진다. 여기서 동공은 일반적인 공기이거나 임의의 액체나 고체 물질들에 의한 저지수 유전체로써 형성되게 된다. 베셀 함수를 이용한 분석적 방법으로 전자장에 대한 엄밀한 해를 구하기 위하여, 행렬 기법이 고유치 방정식의 유도에 사용되고, 실효 굴절률, 분산, 전자장 분포 등의 기본 모드의 중요한 전송 성질들이 조사된다. 또한 분석 결과 정확도의 검증을 위하여 엄밀한 완전 벡터 유한 차분법을 적용해보고, 광결정 도파로의 설계와 제조 상의 문제를 해결하는데 용이하게 활용하고자 한다. 설계된 중심-동공 광도파관의 실효 모드 면적이 $2.6056 \mu\text{m}^2$ 에서 $5.9673 \mu\text{m}^2$ 까지 동작 파장에 따라 다양하게 변하며, 일반적으로 광도파로의 중심으로부터 바깥쪽으로 원통형의 층수가 적을수록 그리고 굴절률 n_1 이 약간 큰 저지수일수록 실효 면적은 작아지므로, 비선형 소자 응용의 관점에서 훨씬 더 최적화된 결과를 나타낸다.

주제어 : 광금지띠, 중심-동공, 유한차분법, 기본 모드, 광통신

Abstract In this paper, a cylindrical photonic crystal waveguide with a low-index core is first proposed. The core can be filled with air, liquid, or arbitrary dielectric materials. Exact analyses for the electromagnetic field characteristics of guided modes, by using appropriate Bessel functions and applying the boundary conditions, are performed to find out the guiding characteristics of the proposed waveguide. For verification and usage in design and manufacturing process, the computer-calculation of the waveguide transmission characteristics is also performed by applying the rigorous full-vectorial finite difference method. Providing variations of the effective area for the fundamental mode of the designed waveguide with different numbers of cladding layers, ranging from $2.6056 \mu\text{m}^2$ to $5.9673 \mu\text{m}^2$ over the operation wavelength, generally as the core refractive index n_1 is higher, the mode area becomes smaller and the result leads to more optimistic effect for nonlinear device applications.

Key Words : Photonic band-gap, Low-index core, FDM, Fundamental mode, Optical communications

*Corresponding Author : Jeong I. Kim(jikimi@cnu.ac.kr)

Received December 30, 2020

Accepted February 20, 2021

Revised January 26, 2021

Published February 28, 2021

1. 서론

광신호 전송을 원거리를 통해 수행할 목적의 광대역 도파로나 광신호를 이용하여 환경 변수의 변화를 감지하기 위한 센서 등의 응용을 위하여 광도파관 또는 광섬유에 대하여 많은 연구가 이루어져 왔으며 또한 현재 활발히 진행되고 있다. 그 중에서 1980년대 후반부터 제안되기 시작한 광결정 구조에 대한 개념은 광도파관 연구에 획기적인 관심을 촉발시켜 왔으며[1-5], 정보 통신 분야에서 수많은 성능의 향상과 레이저, 반도체 등의 분야에서 난제를 해결하기 위한 소자로서 각광 받으면서 제작과 상용화 관련 기관들이 등장하고 있는 현실이다[6-11]. 여기서 언급된 결정이란 원자나 분자들의 주기적인 배열을 의미한다. 원자나 분자들의 작은 기본 구조체가 공간적으로 반복된다면, 결정 격자가 형성되는 것이다. 만약 한 물질의 유전 상수가 공간에서 주기적으로 변화한다면, 이 물질을 광결정이라고 한다[12].

이 광결정은 전자파의 전파가 금지되는 주파수 영역을 포함하는 속성을 갖게 된다. 이와 같이 광결정은 반복 주기가 기본적으로 약 마이크로미터 정도 범위인 구조라는 점을 제외하면, 원자 배열들이 반복 형태로 배열되는 일반적인 결정과 유사하다. 1987년에 Yablonovitch는 자연 방출을 제어하기 위하여 반도체 레이저에 광결정의 응용을 제안했다[13]. 광금지띠는 광자들이 전파의 어느 방향으로 광결정을 통하여 전송되지 못하는 주파수 범위라고 정의된다. 결정에서 전자들이 에너지 금지띠를 구성시키는 것과 유사하게, 주기적으로 반복되는 유전 상수에 의한 구조에서 전파되는 전자파는 광자띠를 형성시킨다. 유전 상수의 비율들이 적절히 조정되어 설계된 결정 구조체들에 대하여, 전파되는 상태들이 금지되는 부분인 광자띠들은 제어되게 된다[14].

본 논문에서, 중심에 동공을 갖는 원통형으로 굴절률 지수가 주기적으로 변하는 광결정 도파로 (PCW: Photonic Crystal Waveguide)가 최초로 제안되어 지고, 이 전송로의 도파 특성에 대한 분석이 수행되어진다. 여기서 중심의 코어 (core) 영역에 위치한 동공은 일반적인 공기이거나 임의의 액체나 고체 물질들에 의한 유전체로써 형성되게 된다[15]. 이렇게 하여 코어의 동공에 수소나 질소, 벤젠, 규소철 (silicon iron)과 같은 저지수 굴절률을 갖는 PCW에 대한 연구로 발전시키고자 한다.

이를 위해 우선 전송되는 모드의 전자장에 대한 엄밀한 해가 유도된다. 그리고, 여러 모드들의 전파 상수들이

구해될 수 있게 하는 고유치 방정식이 경계 조건들을 적용하여 풀어진다. 행렬 기법이 고유치 방정식의 유도에 사용되고, 실효 굴절률, 색채 분산, 전자장 분포 등의 기본 모드의 중요한 전송 성질들이 다양한 응용을 위한 최적의 특성을 얻기 위해 조사된다. 이와 같이 하여 외부로부터의 횡단면 쪽으로 압력에 반응하여 전자기 특성의 변화를 감지하거나 도파로 안쪽에 침투하는 기체 또는 유체에 의한 물질 변화를 감지하는 센서 또는 통신 소자 등으로 응용이 기대된다. 또한 분석 결과 정확도의 검증을 위하여 정밀한 완전 벡터 유한 차분법 (FDM: Finite Difference Method)을 적용해보고, 광결정 도파로에서 중심 물질의 변화 등의 제조 상의 오차의 허용 범위를 본 연구에 의한 정확한 컴퓨터의 분석하는 방법을 활용하여 전자장 특성을 관리하는 데 유용할 수 있다. 즉 기존의 복잡한 광결정 도파로의 설계를 간단하게 하면서도 광금지띠의 특징점을 활용하는 새로운 설계 방법을 제안한다.

2. 광도파관 설계 및 분석

2.1 저지수 코어를 갖는 광결정 도파로 설계

중심에 동공을 갖는 PCW는 원통의 방사상 방향으로 주기적인 굴절률 변화를 나타낸다. 이와 같은 도파로는 번갈아 가며 굴절률 지수가 변하고 같은 두께의 고리 형태로 층을 형성하며 구성된 클래딩에 의하여 둘러 싸여진 구조이다. 기본적으로 중심은 공기와 같은 저지수 코어로 형성되고, Fig. 1에 보여진 바와 같은 굴절률 지수 반면상의 설계가 제안된다. 여기서 r_1 는 중심-동공의 반경에 해당하고, r_2 는 중심 코어 영역의 반경에 해당한다. 그리고 d_a 와 d_b 는 각각 주기적으로 반복되는 공기와 굴절률 n_1 을 갖는 유리 영역을 나타내고 있으며, 해당하는 층의 두께를 반면상 그림에서 알 수 있다. 또한, r_1 의 부분은 저지수 굴절률을 갖는 공기 또는 임의의 유전체로 채워진다. Fig. 1의 지수 반면상에 의해 특징되어 지는 중심-동공 PCW의 장점은 복잡하기는 하나 엄밀한 해가 존재한다는 것이다. 그러므로 제안된 광도파로의 전송 성질들의 보다 정확한 분석이 가능할 수 있다. 게다가, Fig. 1의 측면 반면상은 많은 가느다란 유리관들의 집합체에 의하여 클래딩이 형성된 홀광섬유에 응용을 위한 기반으로 작용될 수 있다.

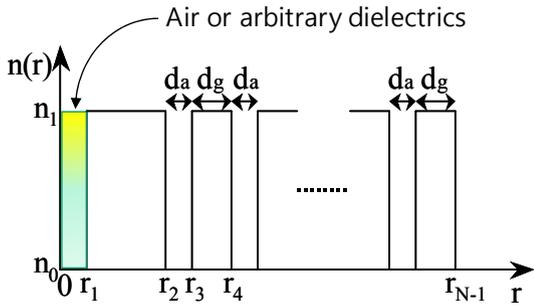


Fig. 1. Refractive index profile of a proposed PCW with a low-index core

이와 같이 제안된 저지수 코어를 갖는 광결정 도파로의 광전송 특성을 분석하기 위해, 우선 중심 코어에 공기로 채워져 있는 경우에 대하여 베셀 (Bessel) 함수를 이용한 분석적 방법으로 엄밀한 해석을 수행한다[16]. 또한 정확한 컴퓨터 분석 기법들 중의 하나인 FDM 알고리즘을 적용하여 교차검증과 전자장 분포, 실효 굴절률, 실효 면적 등의 유용한 여러 가지 전자장 해들을 산출하고자 한다[2,17].

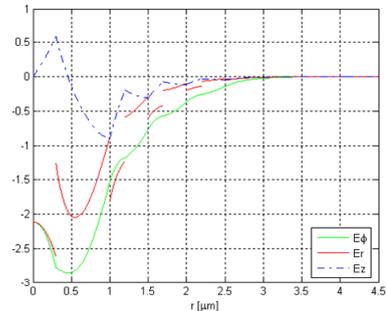
2.2 PCW의 전송 특성 분석 및 전자장의 해

제안된 중심-동공 PCW의 경우 기본적으로 굴절률의 변화가 급격하므로, 전송 모드의 전자장에 대하여 스칼라 근사화 대신 벡터에 의한 정확한 해를 유도해야만 한다. 원통형 도파관 형태이므로 2계 미분의 파동 방정식에 베셀 함수들을 이용하여 해를 구하는 과정을 거치게 된다.

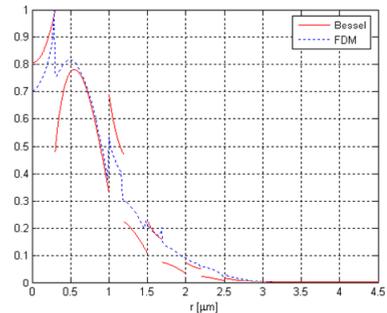
이때, 횡단 전자장 성분들 (E_r , E_ϕ , H_r , 그리고 H_ϕ)에 대한 해는 축방향 성분들과의 관계식들을 이용하여 구해진다. Fig. 2(a)는 설계 파라미터로 $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 1.0 \mu\text{m}$, $d_a = 0.2 \mu\text{m}$, $d_g = 0.3 \mu\text{m}$ 와 $N=9$ 층을 갖는 중심-동공 PCW의 기본 모드에 대하여, $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 의 동작 파장 (wavelength)에서 방사방향 좌표 r 에 따른 전장 성분들 E_r (불연속 실선), E_ϕ (연속 실선)와 E_z (파란색 실점선)의 반면상 변화 결과를 보여준다. 합리적으로 예상되는 바와 같이, 초록색 실선으로 표시된 횡단 E_ϕ 전장 성분은 방사상의 위치 r 에 대하여 연속이지만, 다른 실선인 E_r 전장 성분은 굴절률의 주기적인 경계면에서 불연속임이 주목된다.

이와 같은 특성은 FDM 기법을 이용한 분석을 통하여도 정확하게 일치하는 결과가 구해지는 것을 알 수 있다. 광도파로 특성의 정확한 해를 구하기 위하여 선호되는 완전-벡터 유한 차분법을 적용한 결과를 Fig. 2(b)에 나

타내고 있다. 베셀 함수를 이용하지 않더라도, 결합된 Maxwell 방정식에 기반하여 정확한 컴퓨터 수치 계산을 $N=9$ 층을 갖는 제안된 중심-동공 PCW에 대하여 수행하고, 반면상에 대하여 구한 정규화된 E_r 전계를 나타내는 파란색 점선과 비교하면 전체적인 크기 변화와 각각의 유전체 물질들 (d_a 와 d_g)의 경계면에서 뚜렷한 불연속이 상당히 일치함을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 2. Plots of (a) electric field components E_r , E_ϕ and E_z and (b) normalized electric field E_r at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ for the fundamental mode of a PCW designed with a low-index core

2.3 전자파 전송 모드 분석

기본 모드에 대하여 구한 전자장 분포의 해와 함께, 실효 굴절률 또는 정규화 전파 상수 (NPC: Normalized Propagation Constant)는 광도파관 분석에 있어서 중요한 인자이다. 베셀 함수를 이용한 해석적 방법과 FDM 분석 기법에 의하여 바람직한 전자파 전송 특성을 보이는 제안된 광도파관의 층수를 변화시키며 구한 NPC 결과를 Fig. 3에 보이고 있다. 여기서, 재료 분산도 고려하여 분석을 진행하였으며[15,18], 전반적으로 주기적으로

반복되는 층수를 증가시킬수록 NPC는 큰 값으로 산출된다. 일반적으로 NPC는 매우 중요한 전송 특성이므로, Fig. 2(b)에서와 같이 전자장에 관하여 약간의 차이는 크게 문제되지 않으며, 2가지 분석 방법들에 의한 결과들이 서로 잘 일치함을 더욱 확연하게 확인할 수 있다. 추가로 재료 분산이 없을 경우에도 유한차분 시간영역 (FDTD: Finite-Difference Time-Domain) 방법과의 재검증을 수행하였으며[2], Fig. 4에서 보는 바와 같이 FDM 기법에 의한 결과와 상당히 서로 부합하는 사실을 확인할 수 있다.

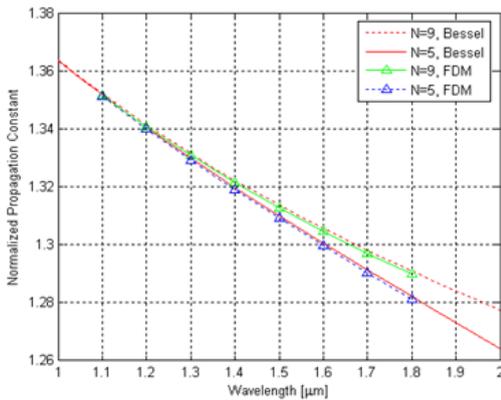


Fig. 3. Plot of NPC versus λ for the fundamental mode of an air-core PCW designed with $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 1.0 \mu\text{m}$, $d_a = 0.2 \mu\text{m}$, and $d_b = 0.3 \mu\text{m}$

먼저 Fig. 3에서 베셀 함수를 이용하여 층수 $N=9$ (점선)와 $N=5$ (실선)일 때, 해석적 방법에 의한 NPC 결과는 FDM 분석 기법에 의한 $N=9$ (삼각형 점선)와 $N=5$ (삼각형 실선)일 때의 결과들보다 전반적으로 약간 크게 나타나고 있으나, 그 크기는 거의 미미하다고 할 수 있다. 예를 들어 동작 파장 $\lambda = 1.3 \mu\text{m}$ 이고 $N=9$ 일 때, 베셀 함수를 이용한 해석적 결과는 약 1.3317이고, FDM 기법에 의한 삼각형을 갖는 초록색 실선으로 나타내어진 결과는 1.3309이므로, 그 차이는 0.0008에 불과하다. 또한 같은 파장에서 $N=5$ 일 때, NPC 차이는 약 0.0007으로 서로 극미하므로, 매우 일치하여 교차검증이 된다. 전반적으로 동작 파장이 $1.8 \mu\text{m}$ 에서 $1.1 \mu\text{m}$ 로 짧아질수록, 층수 N 을 9이상으로 증가시켜도 NPC 결과는 거의 변화가 없는 현상도 잘 관측된다. 즉, PCW의 중심으로부터 바깥쪽으로 원통형의 층을 일정 숫자 이상 증가시켜도 광전파 특성은 거의 같아진다는 것이다.

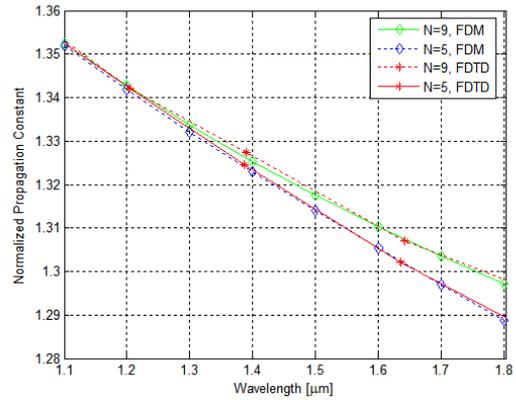


Fig. 4. Plot of NPC versus λ by the FDM and FDTD method for the fundamental mode of an air-core PCW designed with $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 1.0 \mu\text{m}$, $d_a = 0.2 \mu\text{m}$, and $d_b = 0.3 \mu\text{m}$

이와 같은 결과는 중심-동공 원통형 광도파관을 보다 짧은 파장에서 동작시킬수록, 전자장은 더욱 커어 영역에 한정되어 분포되기 때문이고, 코어 영역이 광전파 특성에 더욱 중요한 역할을 하게 된다는 합리적인 원리로 도출된다. 중심에 $n_1=1.2$ 의 저지수 유전체 재료로 채워진 PCW에 대하여도 앞서 구한 원리가 비슷하게 적용되는 결과를 Fig. 5에 나타내고 있다. 일반적으로 코어 영역의 중심에 n_1 이 약간 큰 값일수록, NPC 결과 값은 공기일 때보다 크다는 현상이 주목된다.

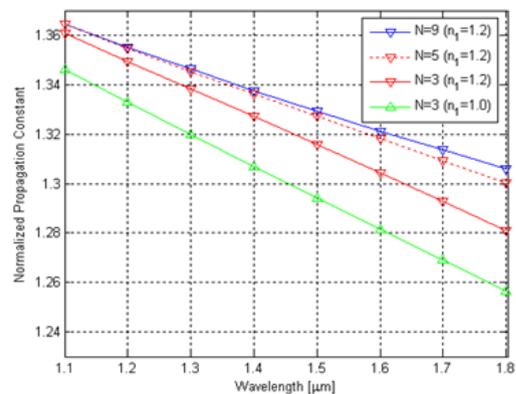


Fig. 5. Comparison of NPCs for the fundamental mode of the PCWs designed with $n_1 = 1.2$, $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 1.0 \mu\text{m}$, $d_a = 0.2 \mu\text{m}$, and $d_b = 0.3 \mu\text{m}$

2.4 전송 모드 실패 면적 분석

대부분의 에너지는 제한된 중심-동공 원통형태 PCW

의 코어 영역에 집중되어 전파된다는 결과를 정확한 컴퓨터 FDM 분석을 통하여 도출하고 전자장의 해가 구해졌으므로, 기본 전송 모드에 대한 실효 면적 (A_{Mode})은 다음의 관계식을 이용하여 계산된다[19]:

$$A_{Mode} = \frac{\left(\iint |\vec{E}_t|^2 dx dy \right)^2}{\iint |\vec{E}_t|^4 dx dy} \quad (1)$$

여기서 아래 첨자 t 는 전계의 횡단 (transverse) 성분이 사용됨을 의미한다. Fig. 6는 중심에 공기 ($n_1=1.0$)와 $n_1=1.2$ 의 저지수 물질로 채워져 있을 때, 설계된 중심-동공 PCW의 기본 모드 실효 면적이 $2.6056 \mu\text{m}^2$ 에서 $5.9673 \mu\text{m}^2$ 까지 동작 파장에 따라 다양하게 변하는 것을 보이고 있다. 일반적으로 광도파로의 중심으로부터 바깥쪽으로 원통형의 층수가 적을수록 전체적인 실효 모드 면적이 작아지는 점이 주목된다. 그리고 굴절률 n_1 이 약간 큰 저지수일수록 실효 면적은 작아지므로, 비선형 소자 응용의 관점에서 훨씬 더 최적화된 결과를 나타낸다.

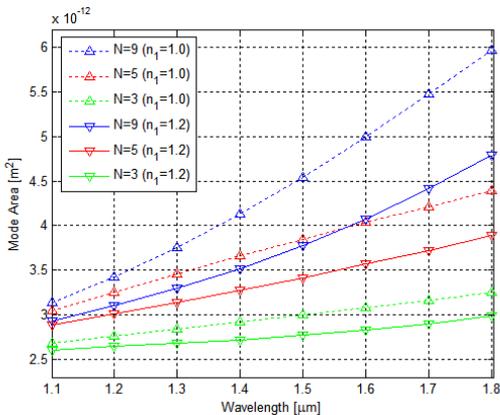


Fig. 6. Comparison of effective mode areas for the fundamental mode of the low-index core PCWs designed with $r_1 = 0.3 \mu\text{m}$, $r_2 = 1.0 \mu\text{m}$, $d_a = 0.2 \mu\text{m}$, and $d_b = 0.3 \mu\text{m}$

3. 결론 및 제언

광통신에 주로 쓰이는 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 파장 대역에서, 제안되고 설계된 중심-동공 PCW로부터 주목할 만한 광 신호 전송 특성을 얻을 수 있다. 여기서 전자장의 세기는 클래딩으로 멀어질수록 기하급수적으로 감소하므로, 클

래딩쪽에 $N=9$ 의 층수보다 광결정의 주기적인 반복을 증가시켜도 광전송 특성의 영향은 미미하다는 것을 확인할 수 있다. 즉, 코어 영역이 광전파 특성에 더욱 중요한 역할을 하게 된다는 합리적인 원리가 도출되고, 일반적으로 코어 영역의 중심에 n_1 이 약간 큰 값일수록, NPC 결과 값은 공기일 때보다 크다는 현상이 주목된다.

설계된 중심-동공 PCW의 기본 모드 실효 면적이 $2.6056 \mu\text{m}^2$ 에서 $5.9673 \mu\text{m}^2$ 까지 동작 파장에 따라 다양하게 변하는 것을 보이고 있다. 일반적으로 광도파로의 중심으로부터 바깥쪽으로 원통형의 층수가 적을수록 그리고 굴절률 n_1 이 약간 큰 저지수일수록 실효 면적은 작아지므로, 비선형 소자 응용의 관점에서 훨씬 더 최적화된 결과를 나타낸다. 또한 제안된 형태의 중심-동공을 갖는 원통형 광결정 도파로는 고온과 같은 극한 상황에서도 외력이나 도파로 안쪽의 물질 변화에 따라 광전송 특성을 쉽게 변화시킬 수 있으므로 센서 등의 응용에 바람직하게 적용할 수 있을 것으로 합리적으로 예상된다.

REFERENCES

- [1] P. Russell. (2003). Photonic Crystal Fibers. *Science*, 299, 358-362.
- [2] J. I. Kim. (2009). Investigation of Cladding Effects on Optical Guidance of Microstructured Holey Fibres Based on FDM and FDTD Methods. *Journal of Modern Optics*, 56(9), 1091-1095.
- [3] A. Lavanya & G. Geetha. (2020). A Novel Hybrid Hexagonal Photonic Crystal Fibre for Optical Fibre Communication. *Optical Fiber Technology*, 59, 102321.
- [4] D. K. Sharma & S. M. Tripathi. (2019). Analysis of the Beam Divergence for One-Rod Core Microstructured Optical Fibres. *Opto-Electronics Review*, 27(2), 224-231.
- [5] A. Cucinotta, S. Selleri, L. Vincetti & M. Zoboli. (2002). Holey Fiber Analysis through the Finite-Element Method. *IEEE Photonics Technology Letters*, 14(11), 1530-1532.
- [6] D. K. Hwang, B. Lee & D. H. Kim. (2009). Efficiency Enhancement in Solid Dye-Sensitized Solar Cell by Three-Dimensional Photonic Crystal. *RSC Advances*, 3(9), 3017-3023.
- [7] J. Ouellette. (2002). Seeing the Future in Photonic Crystals. *The Industrial Physicist*, 7(6), 14-17.
- [8] Centre for Photonics and Photonic Materials. (2020). [Online]. <http://www.bath.ac.uk/research/centres/cppm/>.

- [9] G. Pickrell et al. (2004). Microstructural Analysis of Random Hole Optical Fibers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 16(2), 491-493.
- [10] J. Liao & T. Huang. (2015). Highly Nonlinear Photonic Crystal Fiber with Ultrahigh Birefringence Using a Nano-Scale Slot Core. *Optical Fiber Technology*, 22, 107-112.
- [11] H. Y. Fu et al. (2008). Pressure Sensor Realized with Polarization Maintaining Photonic Crystal Fiber-Based Sagnac Interferometer. *Applied Optics*, 47(15), 2835-2839.
- [12] J. D. Joannopoulos, R. D. Meade, J. N. Winn. (1995). *Photonic Crystals: Molding the flow of light*, New Jersey : Princeton University Press.
- [13] E. Yablonovitch. (1987). Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. *Physical Review Letters*, 58(20), 2059-2062.
- [14] S. John. (1987). Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, 58(23), 2486-2489.
- [15] N. Blaunstein, S. Engelberg, E. Krouk & M. Sergeev. (2020). *Fiber Optic and Atmospheric Optical Communication*, New York : Wiley-IEEE Press.
- [16] J. I. Kim. (2019). Analyses of Cylindrically-Varying Photonic Crystal Waveguides. *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, 9(2), 795-802.
- [17] L. Zhang et al. (2015). Tunable Soliton Generation in a Birefringent Tellurite Microstructured Optical Fiber. *IEEE Photonics Technology Letters*, 27(14), 1547-1549.
- [18] A. K. Amoah, E. K. Akowuah, G. Nukpezah, S. Haxha & H. Ademgil. (2019). A Theoretical Investigation of a Photonic Crystal Fibre with Ultra-Flattened Chromatic Dispersion with Three Zero Crossing Dispersion Wavelengths. *Optical Fiber Technology*, 53, 102032.
- [19] G. P. Agrawal. (1997). *Fiber-Optic Communication Systems*, New York : Wiley.

김 정 일(Jeong I. Kim)

[정회원]



- 1996년 2월 : 충남대학교 전자공학과 (공학학사)
- 1999년 8월 : Virginia Tech 대학교 ECpE(MS)
- 2003년 12월 : Virginia Polytechnic Institute and State University ECpE(Ph.D.)
- 2010년 2월 ~ 현재 : 충남대학교 전기·전자·통신공학교육과 교수
- 관심분야 : 광대역통신, 무선통신, 컴퓨터전자파분석, 광센서, 교육통계
- E-Mail : jikimi@cnu.ac.kr