

나노 구조 광섬유의 응용

1. 서론

광섬유 기술은 20세기 정보통신혁명의 근간을 이룬 핵심기술로서, 광신호 전송 속도, 용량, 및 전송 거리를 획기적으로 발전시켰다. 광섬유 기술의 핵심은 빛이 전달되는 통로, 즉 광도파로의 설계와 제조, 도파 특성을 응용한 소자 기술이며, 특히 광섬유소자는 광통신 응용을 넘어 최근에는 디스플레이, 레이저가공, 그리고 나노-바이오 센서로 그 응용범위를 확산하고 있다.

그림 1과 같이 종래 일반광섬유는 마이크로 단위의 solid core와 clad로 이루어진 도파로 구조로서 전송가능 파장 대역, 색분산, 편광, 및 고출력 수용 능력 등 여러 한계를 보이고 있다. 최근 연구는 광섬유 및 광섬유소자를 기반으로 한 선도적 광자공학 (photonics) 기술로서 일반

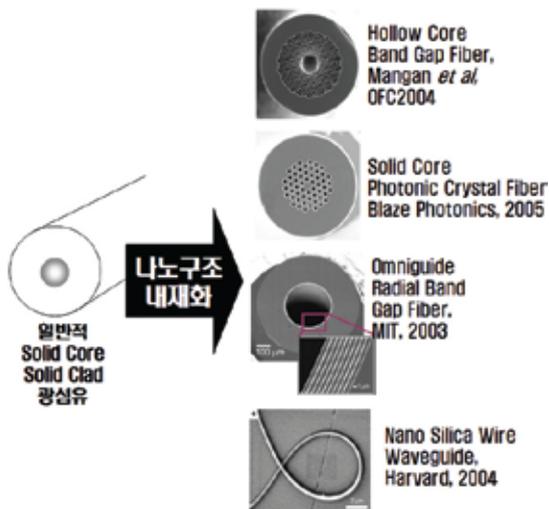


그림 1. "나노구조 광섬유"의 기술개요-나노구조의 내재화

특집 1 ■ 2017 OFS-25 국내유치 기념

나노 구조 광섬유의 응용

오경환*

적 광섬유의 기능적 한계를 극복하기 위해 나노 단위의 기하구조를 내재한 차세대 광섬유를 개발하고 있다.[1-4] 이러한 나노 구조 광섬유를 기반으로 하여 최근에는 빛의 생성, 전송, 증폭, 그리고 배분의 기능을 통합적으로 갖는 혁신적 광소자 원천기술을 개발하고 있으며, 관련 광자공학 산업인 차세대광통신, 초소형디스플레이, 초정밀레이저가공, 초민감나노바이오센서에 응용이 활발하게 이루어지고 있다. 본 논문에서는 나노구조 광섬유의 최근 연구 동향에 대해 Review를 하고 기술적 의미를 고찰하고 또한 본 연구실에서의 연구를 소개하고자 한다.

가. 관련 기술

나노 구조 광섬유 및 도파로는 그림 2와 같이 광통신, Display, 레이저가공, 및 광센서 기술과 밀접한 관련을 갖고 있다.

나. 차세대광통신

광통신의 Backbone 역할을 하는 광섬유의 기술적 bottleneck은 광섬유 내의 색분산과 편광모드분산이며

* 연세대학교 이과대학 물리학과 광소자물리연구실

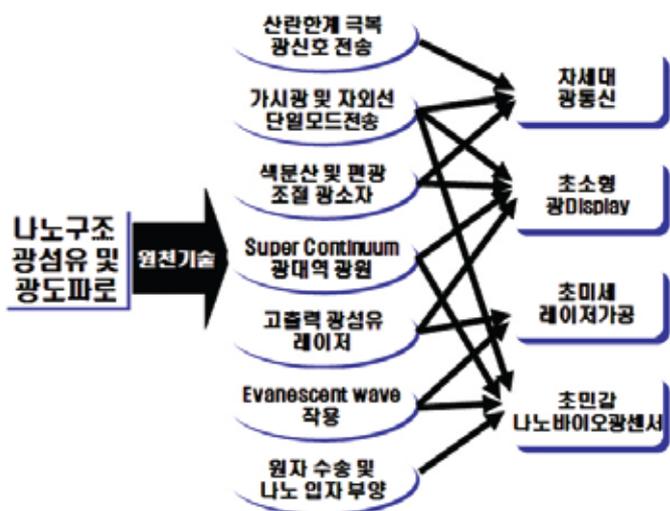
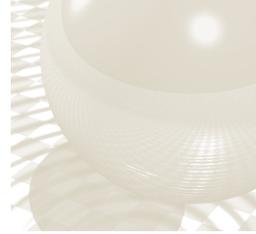


그림 2. 나노 구조 광섬유 및 광도파로 기술은 차세대 산업의 원천기술임

전자(electron)적인 방법과 병행하여 속도제한을 넘어설 수 있는 광학(photon) 적인 해결책, 특히 광섬유기반 해결책이 활발히 연구되고 있다. 일반 광섬유의 경우 도파로 구조적으로 색분산과 편광모드 제어의 원천적인 한계가 존재한다.[5] 나노구조 광섬유는 혁신적인 air-silica 로 구성된 격자구조로 빛을 전송하며, 이러한 air-silica 배열의 재구성을 통해 기존의 광섬유에서는 불가능하였던 색분산과 편광모드분산을 동시에 효과적으로 제어할 수 있는 원천 기술을 제시할 수 있다.[6]

또한 일반광섬유는 모드간 간섭 없이 단일 모드로 전송할 수 있는 파장대역이 제한적이거나 나노구조 광섬유는 단일모드 전송대역을 적외선 및 가시광 전역역과 자외선으로 확장하여 광신호 전파의 window를 획기적으로 확장할 수 있는 혁신적 solution을 제공하고 있다.

다. 초소형디스플레이

디스플레이는 유비쿼터스통신과 휴대용통신기기의 발달로 최근 매우 활발한 연구, 개발이 이루어지고 있으며 기존의 렌즈 및 거울 위주의 마이크로광학계가 갖는 부피의 한계를 극복하기 위한 광학엔진계의 초집적화가 매우 시급한 상황이다. 초집적화 디스플레이 광학계를 구현하기 위한 원천적 기술로서 가시광대역의 빛을 전송, 분배할 수 있는 광도파로기술의 개발이 필수적이며 나노구조 광섬유는 가시광 대역에서 탁월한 전송 특성

을 보이고 있다.[7] 나노구조광섬유의 비선형광특성을 이용하여 “super-continuum” 을 발생하는 연구가 활발히 보고되고 있으며, 여기레이저의 광특성과 나노구조광섬유의 설계에 따라 가시광선에서부터 적외선에 이르는 고출력 광대역 연속광원을 생성할 수 있다.[8] 이와 같은 “super-continuum”은 고출력 High brightness 백색광원으로 직접 활용 가능하며 초소형 projection광원의 원천기술이다.

라. 초정밀레이저가공

정밀 레이저 기술은 반도체메모리, LED, LCD 등 정보통신소재산업과 자동차, 비행기, 우주선등의 정밀 기계 가공 산업의 근간을 이루는 원천기술로서 최근 다양한 레이저의 개발이 이루어지고 있다. 특히 레이저의 spot size, brightness, numerical aperture, beam profile등 핵심적 특성에서 우위를 보이고 있는 광섬유 레이저에 대한 연구, 개발이 매우 활발하다.[9] 특히 “나노구조광섬유”와 희토류 첨가 유리 레이저를 융합하여 광섬유형태로 발전하는 레이저에 대한 연구가 추진되고 있으며, 이는 궁극적으로 초미세 레이저 가공분야에서 기존의 대형 고체레이저, 기체레이저를 나노구조 광섬유레이저로 전면적으로 대체할 수 있는 원천 기술로 인식되고 있으며 유럽, 미국, 일본에서 활발한 연구를 진행하고 있다.

마. 초민감광센서

광섬유는 광센서로서 다양한 응용 분야에서 사용되고 있으며 최근에는 나노-바이오 또는 나노-바이오-메디칼 분야에서 생체와 외부환경과의 상호작용을 미시적 단위에서 계측하고 분석하기 위한 기술로 발전되고 있다. 나노구조로 공기층이 내부에 형성된 “나노구조광섬유”는 이 공기층을 통해 기체 및 액상 물질과 광신호와의 상호작용을 기존광센서에 비해 수백배에서 수천배까지 증가시킬 수 있으며 또한 외부의 기계적 변화에 대해서도 선택적 민감성을 획기적으로 증대시킬 수 있는 원천기술이다. “나노구조광섬유”를 기반으로 한 초민감 광센서에 대

나노 구조 광섬유의 응용

한 연구, 개발이 세계적으로 활발히 이루어지고 있으며 특히 bio-chemical, medical 분야로의 응용 연구가 경쟁적으로 이루어지고 있다.[10] 또한 공기층을 활용하여 원자와 빛, 나노입자와 빛 간의 상호작용을 극대화하여 빛으로 원자 및 나노입자를 전파하는 원천기술 연구가 진행되고 있으며 이를 통해 광학적으로 원자, 입자를 제어하는 시스템을 개발하는 것을 목표로 기초과학연구 또한 이루어지고 있다.

20세기말에 들어서 본격적으로 시작된 광자공학의 산업응용은 광통신, 광디스플레이, 광기록장치, 등 정보통신 분야와 레이저가공, 광센서 등의 기계산업분야에서 주로 이루어져 왔으며 광자공학은 21세기에 들어서면서 Nano-Bio-Photonics가 서로 연관되어 발전하는 융합기술로 전환을 주도 하고 있다. 이와 같은 융합 과학 기술로의 변화의 핵심을 이루는 광자공학의 핵심적 기능은 광신호 및 에너지 생성, 전달, 분배, 그리고 검출로 나눌 수 있다.

그림 3과 같이 본 나노구조 광섬유 기술은 광신호 및 에너지의 생성, 전달, 분기를 포괄하는 핵심기술로서, 기

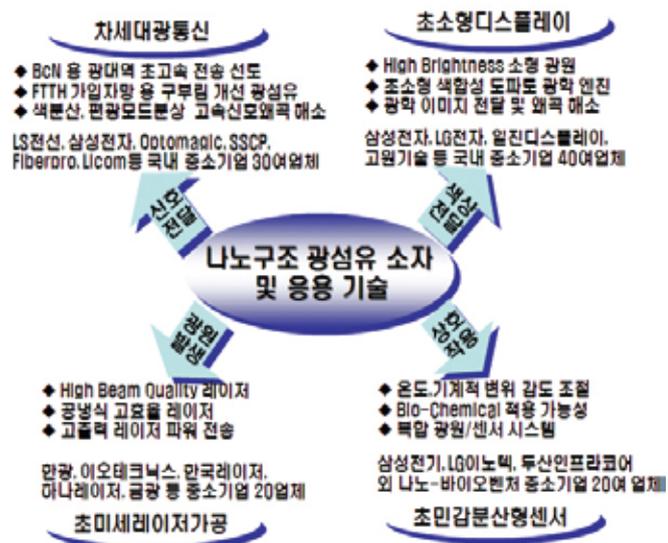


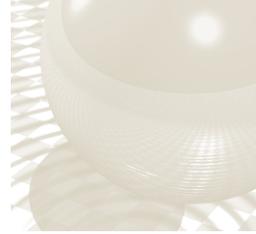
그림 3. 나노구조 광섬유 연구의 기술 수요와 관련 산업체

존의 광섬유 기술이 갖는 도파로 특성의 한계를 뛰어 넘어 있다는 차별적 장점을 가지고 Display, 정보저장, 통신 등 IT기술과 기계산업기술, 그리고 21세기를 주도할 Nano-Bio Photonics 융합기술의 핵심적 역할을 수행할 것으로 예측한다.

표 1. 국외 Nano 구조 광섬유 및 응용소자 연구 현황, [Electronicast 2005]

구분	연구기관	주요 연구 내용	연구 단계	재료	응용분야
대학	Bath대학 (영국)	PCF, BGF, SCG	실험실/상업화	SiO ₂ , 다성분유리	광통신, 광원, 센서
	Fredrich Schiller대학 (독일)	PCF, CPFL	실험실	SiO ₂	광원
	Harvard 대학 (미국)	NSW	실험실	SiO ₂	센서, 집적광회로
	MIT (미국)	BGF, 광파워전송	실험실/상업화	중금속 유리	광원, 레이저파워전송
	Sydney대학 (호주)	PCF, BGF, SCG	실험실	SiO ₂ , Polymer	광통신, 센서
기업	OFS Labs (미국)	PCF, BGF, CPFL	상업화	SiO ₂	광통신, 광원, 센서
	Corning (미국)	PCF, BGF, CPFL	상업화	SiO ₂	광통신, 광원, 센서
	Crystal Fiber (덴마크)	PCF, BGF, CPFL	상업화	SiO ₂	광통신
	Sumitomo (일본)	PCF	상업화	SiO ₂	광통신
	Furukawa (일본)	PCF	상업화	SiO ₂	광통신
	NTT (일본)	PCF	상업화	SiO ₂	광통신
연구소	IPHT 연구소 (독일)	PCF, CPFL	실험실	SiO ₂ , Polymer	광원, 센서
	Max Plank 연구소 (독일)	PCF, CPFL	실험실	SiO ₂	광통신, 광원, 센서

(PCF : Photonic Crystal Fiber, BGF : Band Gap Fiber, CPFL : Clad Pumped Fiber Laser, NSW : Nano Silica Wire, SCG : Super Continuum Generation)



2. 국내외 기술동향 및 수준

가. 국외의 기술동향 및 수준

나노구조 광섬유에 대한 연구 선두그룹은 표1과 같다. 독일의 Max Plank Institute (Erlangen)과 영국의 Bath 대학이 광결정 광섬유 첨단연구를 주도해 오고 있으며, Harvard 대학은 실리카 나노와이어연구의 중심이며 MIT는 중금속유리를 재료로 한 BGF 연구의 선두이다. 덴마크의 Crystal Fiber가 가장 앞선 상용 기술을 보유하고 있고 일본의 NTT, Sumitomo, Furukawa를 중심으로 꺾임손실이 적은 PCF를 상용화하였다. OFS Labs, Corning, IPHT 연구소의 경우 PCF구조를 기반으로 kWatt이상의 레이저를 개발하고 있다.

현재까지 통신/디스플레이/레이저가공/초민감센서 등 통합적 연구는 초기 단계로 판단되며, 특히 taper, coupler 등 광연결, 분배와 관련된 나노구조 광섬유 소자의 연구는 매우 미흡한 수준이고 초소형디스플레이 응용, 광정보저장 및 광센서로서의 응용연구는 초기로 판단된다.

나. 국내외 기술동향 및 수준

국내연구수준은 세계수준에 비해 매우 낙후되어 있는 상황으로 연세대학교, KIST, 광주과학기술원에서 실험실 차원으로 진행되고 있고 간단한 구조에 한해서 Optomag (대한전선)이 시제품을 제작한 바 있다. 국내의 경우 나노광섬유응용기술을 직접적으로 활용할 수 있는 LS 전선, 삼성전자, SKC, 등 대기업 군 외에도 일진전기, SSCP,와 같은 중견기업, 누비텍, 가온전선과 같은 중소기업등 다양한 회사가 존재하고 있으나 체계적 연구를 시작하고 있지 못하다.

국내의 경우 나노구조광섬유의 설계, 제조, 및 제조 설비기술이 외국선진국의 80%수준이며 소자응용기술은 60%수준으로 판단된다.[11]

그러나 나노 구조 광섬유의 경우 재질과 구조 그리고 제조공법에서 특허의 가능성이 충분히 많이 남아 있으며 특히 가시광영역의 응용으로 Display, 광정보저장, 광센서에 대한 연구는 세계적으로도 진입기로 판단되어 국내의 산업과 연결 시 매우 큰 시너지효과를 낼 수 있다고

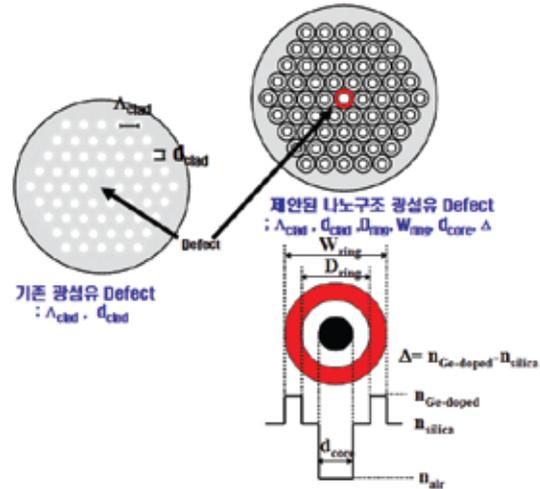


그림 4. Defect 제어 가능한 나노구조 광섬유 제안

판단된다. 한 레이저, 증폭기 등 응용소자 분야는 국내의 기존 레이저 가공 기술력이 접목될 경우 경쟁력을 갖출 수 있다고 판단된다.

다. 본연구실에서의 연구 실적

본 연구실 (연세대학교 이과대학 물리학과 광소자물리 연구실, <http://allwise.yonsei.ac.kr>)에서는 최근 나노구조광섬유의 핵심적 설계요소인 Defect에 대해 새로운 구조를 제안하여 현재까지 시도되지 않았던 Defect Engineering 분야를 개척하였고, Fused taper 기술을 새롭게 접목하여 가시광영역에서 다중화 및 역다중화 원천기술을 개발하였으며, 광섬유레이저와 센서가 복합된 smart nano-bio sensor 분야를 새롭게 정립하는 연구를 추진 중이다.

(1) 광자결정 광섬유에서 Defect Engineering 제안

나노구조 광섬유는 광자결정구조를 기반으로 하며 결정구조상의 defect가 빛의 도파특성에 매우 중요한 역할을 한다. 그러나 기존의 defect는 단순히 air-hole 자리를 SiO_2 , 또는 Doped SiO_2 가 hole을 대체하여 막고 있는 경우로서, 복잡한 기능을 추가할 수 없는 근본적인 한계 갖는다.

본 연구실에서는 나노구조광섬유의 defect가 Ring 형태인 새로운 구조를 제안하여 air hole의 크기, 굴절률 ring의 두께, 그리고 굴절률 차, 등 다양한 설계

나노 구조 광섬유의 응용

parameter의 조합을 통해 지금까지 불가능하였던 Defect Engineering을 시도하였다. [11]

본 연구실은 제안된 나노구조 광섬유를 활용하여 색분산, 편광 조절에 대한 연구결과를 발표하였으며 나노구조 광자결정 광섬유의 defect 구조에 대한 원천기술을 확보하였다.

(2) Fused Taper 기술 응용 기시광대역 광소자

일반 광섬유와는 달리, 나노구조 광섬유는 가시광 영역에서 단일모드 전송이 가능한 고유 특성이 있다. 본 연구실은 다수의 input, output을 갖는 용융테이퍼결합기를 제조하는 원천기술을 보유하고 있으며 최근 나노구조 광섬유를 기반으로 커플러 실험결과를 성공하여 저널에 발표하였다.[13] 향후 mobile display에서 높은 점유율을 나타낼 micro-projection display에서 삼원색결합기는 핵심광부품이며, 나노구조광섬유와 fused taper coupler 기술을 융합하면 새로운 형태의 삼원색결합기를 개발할 수 있으며, 차세대 projection display 소자에 응용이 가능하다.

(3) Fiber Laser Sensor 복합 smart nano bio sensor

최근 광섬유레이저에서 고출력을 얻기 위해 나노구조

가 clad에 내재된 광섬유 레이저가 활발히 연구되고 있다. 이러한 광섬유 구조는 여기광원의 조사효율과 신호 광과의 결합효율을 높일 수 있으며 중심에 있는 희토류 이온첨가코어와의 오버랩을 조절 가능한 장점을 가지고 있다. 본 연구실에서는 나노구조를 clad에 내재한 상태에서 다수의 air hole과 희토류이온 첨가코어를 분포시켜 복합 광원/센서 구조를 가진 smart nano-bio sensor를 제안하여 연구를 추진 중이다. 향후 nano-bio-medical 분야에서는 단순한 레이저 출력의 세기 보다는 레어저와 센싱 매질이 결합된 복합구조가 필요하며 이와 관련하여 학제적 연구가 이루어 질 경우 원천기술을 확보할 수 있다.

3. 결론

2009년 노벨 물리학상을 수상한 Charles Kao 박사를 비롯한 여러 과학자의 선구적인 노력으로 시작된 광섬유 연구는 20세기 말 광통신 시대를 열게 하였고 이로 인해 시작된 정보통신 혁명은 21세기에 들어서도 지속되고 있다. 광섬유에 나노구조를 내재화하여 광섬유에 다양한 기능을 갖도록한 나노구조광섬유의 연구는 21세기의 융합과학을 이끌 수 있는 새로운 광학 platform으로 자리 매김하고 있다. 특히 광통신에서 색분산 및 편광조절 소자에서 실질적인 가능성을 보인 바 있으며, 광디스플레이의 경우 가시광의 전송 및 분배가 가능하다는 점에서 매우 높은 실용성을 보이고 있다. 광섬유레이저의 경우 출력파워가 지속적으로 증가되면서 레이저 효율 향상을 위한 노력으로 나노구조 광섬유가 활용되고 있다. 최근 나노바이오 광학센서의 다양한 수요에 따라 나노구조 광섬유가 갖는 evanescent wave와 매질간의 상호작용을 기반으로 한 초민감센서가 개발 중이다. 나노구조 광섬유와 유,무기 물질이 복합된 새로운 광학매질의 경우 향후 융합과학의 중요한 tool로서 자리 매김할 것으로 예측된다.

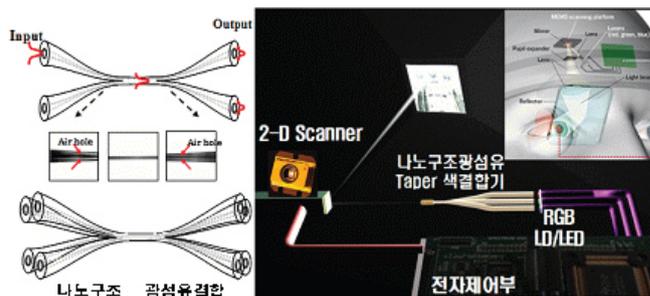


그림 5. 나노구조광섬유 색상결합기와 소형집적디스플레이 응용 제안

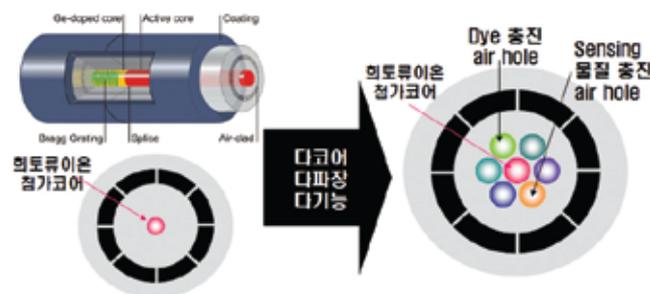


그림 6. 나노구조 clad와 다중 코어가 포함된 광섬유 소자 제안

참고문헌

- [1] Mangan, B. J., Lance Farr, Allen Langford, P. John Roberts, David P. Williams, Francois Couny, Matthew Lawman et al. "Low loss (1.7 dB/km) hollow core photonic bandgap fiber." In Optical Fiber Communication Conference, 2004. OFC 2004, vol. 2, pp. 3-pp. IEEE, (2004).
- [2] Photonic crystal fiber, NKT Photonics (Blaze Photonics) <http://www.nktphotonics.com/nonlinearfibers?cid=5215>
- [3] Omniguide, a photonic bandgap fiber, MIT, <http://math.mit.edu/~stevenj/papers/Johnsonlb02-SPIE.pdf>
- [4] Silica nanowires, Harvard, <http://mazur.harvard.edu/research/detailspage.php?rowid=11>
- [5] Corning, Optical fiber tutorial, <http://www.corning.com/opticalfiber/library/tutorials.aspx?linkidentifier=id&itemid=7405>
- [6] Knight, J. C., J. Arriaga, T. A. Birks, A. Ortigosa-Blanch, W. J. Wadsworth, and P. St J. Russell. "Anomalous dispersion in photonic crystal fiber." *Photonics Technology Letters*, IEEE 12, no. 7, 807-809 (2000).
- [7] Birks, Timothy A., Jonathan C. Knight, Brian J. Mangan, and Philip St J. Russell. "Photonic crystal fibres: An endless variety." *IEICE Transactions on Communications* 84, no. 5, 1211-1218 (2001).
- [8] Dudley, John M., Goery Genty, and Stephane Coen. "Supercontinuum generation in photonic crystal fiber." *Reviews of modern physics* 78, no. 4, 1135 (2006).
- [9] O. G. Okhotnikov (Ed.), "Fiber lasers," Wiley-VCH, (2012).
- [10] E. Udd, and W. B. Spillman Jr., "Optical fiber sensors" 2nd Ed., Wiley, (2011).
- [11] 과학기술부, 차세대광섬유기술 보고서, KIST, 2007.1
- [12] Park, Jiyoung, Sejin Lee, Sungrae Lee, So Eun Kim, and Kyunghwan Oh. "Dispersion control in square lattice photonic crystal fiber using hollow ring defects." *Optics Express* 20, no. 5, 5281-5290 (2012).
- [13] Arabi, Hesam Edin, Sohee An, and Kyunghwan Oh. "Fiber optic engine for micro projection display." *Optics express* 18, no. 5, 4655-4663 (2010).

약력



오경환

Education

- Ph. D. Physics: Fiber Optics, Brown University, 1994, USA
Thesis "Spectroscopic studies of rare earth doped fibers and their applications in optical amplifiers, fiber lasers, and gas sensors" under the supervision of Prof. Theodore. F. Morse, Brown University, USA.
- MS. Engineering, Brown University, 1991, USA.
- MS. Physics-Solid State Physics, Seoul National University, 1988, South Korea.
- BS. Physics, Seoul National University, 1986, South Korea

Work Experiences

- Sept.2006-Present
Professor,
Department of Physics, Institute of Physics and Applied Physics,
Yonsei University, Seoul, South Korea
- Mar. 1996- Aug.2006.
Professor, Associate Professor, Assistant Professor
Department of Information and Communications,
Gwangju Institute of Science and Technology (GIST), Gwangju, South Korea.
- Sept. 2000-Feb. 2002
Visiting Scientist and Consultant
Optical Fiber Research Department,
Bell Labs, Lucent Technologies, Murray Hill, NJ, USA.
- Oct. 1994-Feb. 1996

Professor,
Institute of Physics and Applied Physics, Department of Physics,
College of Science, Yonsei University

Director,
Photonic Device Physics Laboratory, a National Research Laboratory
50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, 120-749, Seoul, South Korea
tel: +82-2-2123-5608, fax: +82-2 392 1592,
koh@yonsei.ac.kr, <http://allwise.yonsei.ac.kr/>