

논문 2009-46SD-7-3

광자결정 광섬유와 단일모드 광섬유 저손실 융착접속

(Low Loss Fusion Splicing of Photonic Crystal Fiber and Single-Mode Fiber)

안진수*, 박광노**, 김길환**, 이상배***, 이경식**

(Jin Soo Ahn, Kwang No Park, Gil Hwan Kim, Sang Bae Lee, and Kyung Shik Lee)

요약

단일모드 광섬유(SMF)와 포토닉 밴드갭 광섬유(PBGF), SMF와 고비선형 광자결정 광섬유(NL-PCF)의 저손실 융착접속을 위한 방법을 제안하였다. SMF와 PBGF를 융착접속할 경우 PBGF의 공기구멍 붕괴현상에 의한 손실이 가장 큰 영향을 미치므로 PBGF의 공기구멍을 유지시키기 위해서 광섬유 융착접속기를 최적화하여 접속손실을 1.22 dB이하로 줄였다. SMF와 NL-PCF의 융착접속시에는 Ultra High Numerical Aperture(UHNA)광섬유를 두 광섬유 사이에 삽입하여 융착접속하는 방법을 적용하여 평균 2.59 dB이하로 접속손실을 줄였다.

Abstract

We proposed a fusion splicing method for low splicing loss between a single-mode fiber(SMF) and two different photonic crystal fibers(PCFs) such as a photonic bandgap fiber(PBGF) and highly nonlinear photonic crystal fiber(NL-PCF). The splicing loss between the SMF and PBGF is affected by air-hole collapse. Therefore, we optimized fusion splicer and reduced a splicing loss below 1.22 dB. We also inserted a Ultra High Numerical Aperture(UHNA) fiber between the SMF and NL-PCF to achieve a splicing loss of below 2.59 dB.

Keywords: 저손실 융착접속, 접속손실, 포토닉 밴드갭 광섬유, 고비선형 광자결정 광섬유

I. 서론

광자결정 광섬유(Photonic Crystal Fiber, PCF)는 기존의 광섬유에서 얻지 못하는 다양한 특성을 지니고 있다. 이러한 이유에서 1990년대 중반부터 연구가 시작된 이후 기존의 광섬유 연구에 많은 변화를 주었다^[1]. PCF

는 클래딩 영역의 공기구멍들이 주기적인 배열로 층을 이루고 있는 구조^[1-4]로써 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 순수 실리카 코어의 PCF로 index guiding에 의한 전반사원리로 코어에 광신호가 도파된다. 두 번째는 공기구멍 코어의 PCF로 포토닉 밴드갭 효과에 의해 특정 파장대역의 광신호가 공기구멍 코어에서 도파된다. 또한, PCF는 클래딩 영역에 위치한 공기구멍의 직경(d)과 간격(Λ) 등에 따라 기존 광섬유와는 다른 도파특성^[2-4] 때문에 기존 광섬유를 이용하여 구현하기 어려웠던 많은 응용분야에 적용할 수 있다^[5]. 하지만 기존의 단일모드 광섬유(Single-Mode Fiber, SMF)기반의 광소자 및 광통신 시스템에 PCF기반의 광소자를 결합시키기 위해서는 PCF와 SMF의 효율적인 접속이 반드시 필요하다. 그러나 두 광섬유는 기본적인 구조 및 광신호의 도파방법이 매우 다르므로 일반

* 학생회원, ** 정회원, 성균관대학교 정보통신공학부 (School of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University)

*** 정회원, 한국과학기술연구원 지능시스템연구본부 광기술연구실

(Photonic Research Laboratory, Intelligent System Research Division, Korea Institute of Science and Technology)

※ 이 논문은 2008년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-313-D00731).

접수일자: 2009년4월9일, 수정완료일: 2009년6월30일

적인 융착접속 방법을 사용할 경우 접속손실이 커지는 문제점을 지니고 있다^[6~8].

본 논문에서는 광섬유 융착접속기를 이용하여 SMF와 포토닉 밴드갭 광섬유(PBGF, 한국과학기술연구원 제작: KIST080626), SMF와 고비선형 광자결정 광섬유(NL-PCF, 한국과학기술연구원 제작: KIST060318)를 융착접속할 때 발생하는 접속손실을 측정하였고 저손실 융착접속이 가능한 방법과 접속변수(Parameter)를 제안하고자 한다.

II. SMF와 PCF의 접속손실 원인 및 접속변수

SMF와 PCF를 융착접속할 때 발생하는 접속손실을 결정하는 요소는 두 광섬유 모드필드직경(Mode Field Diameter, MFD) 부정합과 PCF의 공기구멍 붕괴현상으로 인한 손실이다^[6~8]. 두 광섬유의 MFD 부정합에 의한 이론적인 접속손실은 식(1)^[6,8]에서처럼 나타낼 수 있다.

$$\text{Coupling Loss [dB]} = -20 \log \left(\frac{2 \cdot \text{MFD}_{\text{PCF}} \cdot \text{MFD}_{\text{SMF}}}{\text{MFD}_{\text{PCF}}^2 + \text{MFD}_{\text{SMF}}^2} \right) \quad (1)$$

그러나 식(1)은 두 광섬유를 융착접속할 때 코어의 굴절률 차이 및 PCF의 공기구멍 붕괴현상으로 인한 접속손실을 예측할 수 없다. 따라서 광섬유 융착접속기의 접속변수를 조정, 공기구멍 붕괴현상을 최소화하여 접속손실을 줄이는 실험적인 방법 또한 필요하다. 융착접속시 사용된 광섬유 융착접속기는 Ericsson의 FSU-995FA를 사용하였다. 접속손실을 줄이기 위해 조정된 융착접속기의 접속변수는 Set center, Gap, Prefuse time/current, Fusion time/current 등이 있다. Set center는 융착접속하려는 두 광섬유 사이의 가운데 지점을 조정하는 접속변수로서 아크를 방전하는 전극봉(Electrode)의 위치에 영향을 주는 접속변수이다. Gap은 두 광섬유 사이의 거리를 조정하는 접속변수이다. 10 μm 로 조정하였을 경우, Set center에서 설정한 두 광섬유 사이의 가운데 지점에서부터 양방향으로 5 μm 씩 거리를 두고 융착접속하려는 두 광섬유가 위치하게 된다. Prefuse time/current는 일반적으로 융착접속하려는 두 광섬유의 미세 이물질 제거가 목적이므로 짧은 시간동안 순간적인 아크를 방전하도록 설정한다. Fusion time/current는 두 광섬유를 융착접속하기 위한 아크의

방전시간 및 방전량으로 방전횟수에 따른 방전시간 및 방전량이 조정가능하다.

III. SMF와 PCF의 저손실 융착접속을 위한 실험

1. SMF와 PBGF의 저손실 융착접속

그림 1은 본 논문의 실험에서 SMF와의 융착접속에 사용된 PBGF의 절단면을 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM)이 이용하여 촬영한 사진이다. 코어의 직경은 11 μm , 클래딩영역에서 공기구멍 사이의 간격(Λ)은 $4 \pm 0.3 \mu\text{m}$ 이며, 동작파장은 1550 nm대역이다. SMF와 PBGF를 융착접속 후 접속손실 측정을 위한 실험구성은 그림 2와 같다. Tunable Laser Source(TLS)의 파장을 1550 nm로 조정하고 SMF 출력단에서 파워를 측정하였다. 그리고 PBGF와 융착접속 후 PBGF 출력단에서 파워를 측정함으로써 SMF에서 PBGF로의 접속손실을 측정하였다.

SMF와 PBGF의 융착접속시 발생하는 접속손실을 결정하는 요소는 두 광섬유의 MFD 부정합과 PBGF의 공기구멍 붕괴현상으로 인한 손실이다. 그러나 SMF와

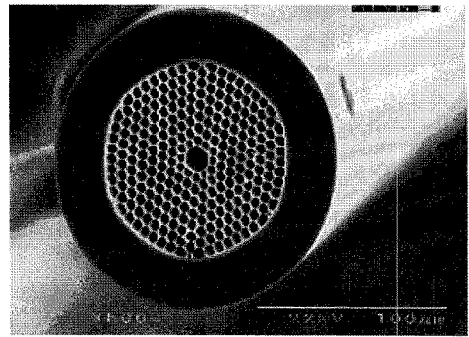


그림 1. 제작한 PBGF(KIST080626) 절단면
Fig. 1. SEM image of fabricated PBGF cross section.

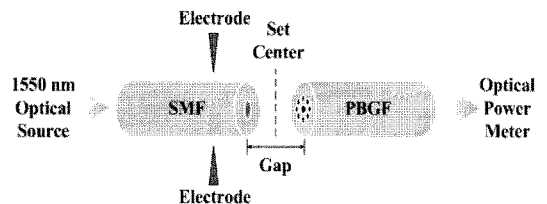


그림 2. SMF와 PBGF의 저손실 융착접속을 위한 실험 구성
Fig. 2. Experiment setup for low loss fusion splicing of SMF and PBGF.

표 1. SMF와 PBGF 융착접속시 사용된 광섬유 융착 접속기 접속변수 및 평균 접속손실

Table 1. Splicing parameters and average splicing loss with fusion splicing SMF and PBGF.

접속변수	1	2	3	4
Set center	+ 280			
Gap	10 μ m			
Overlap	10 μ m			
Prefuse time	0.2 s			
Prefuse current	10 mA			
Fusion time 1	0.2 s			
Fusion current 1	10 mA			
Fusion time 2	8 s			
Fusion current 2	7 mA	8 mA	9 mA	10 mA
Fusion time 3	3 s			
Fusion current 3	3 mA			
평균 접속손실	1.22 dB	1.24 dB	1.86 dB	2.14 dB

* Set center default : + 255

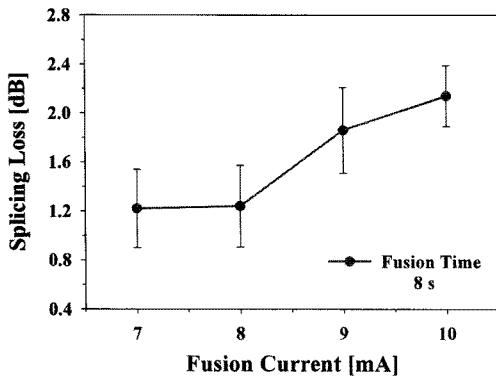
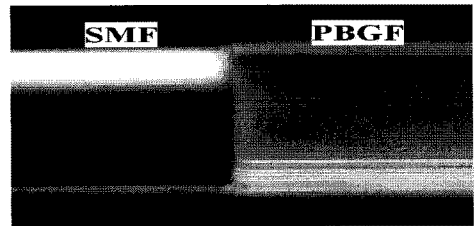


그림 3. 방전량(Fusion current) 증가에 따른 SMF와 PBGF사이의 접속손실

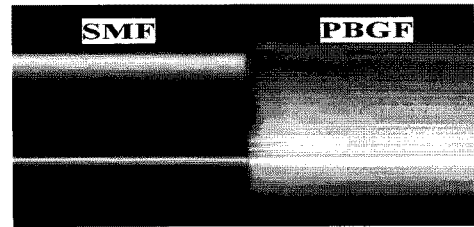
Fig. 3. Splicing loss between SMF and PBGF with an increase of fusion current.

PBGF의 MFD는 큰 차이가 없으므로 접속손실은 아크 방전에 의한 PBGF의 공기구멍 붕괴^[8~9]에 의해서 결정된다. 따라서 접속손실을 줄이기 위한 방법으로 PBGF의 공기구멍 붕괴현상을 최소화 하기위해 아크를 방전하는 전극봉의 위치조정과 아크의 방전시간 및 방전량 조정이 필요하다.

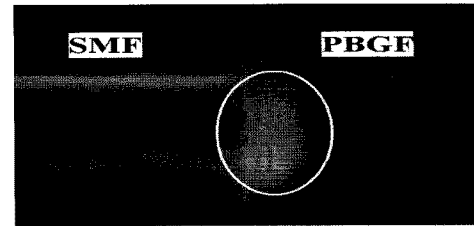
표 1은 SMF와 PBGF의 융착접속 실험에서 사용된 융착접속기의 접속변수이다. PBGF의 공기구멍은 고온에서 쉽게 붕괴되므로 전극봉의 위치를 SMF와 PBGF의 가운데 지점이 아닌 SMF 방향으로 이동하였다. 그



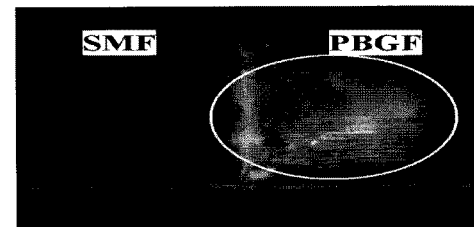
(a)



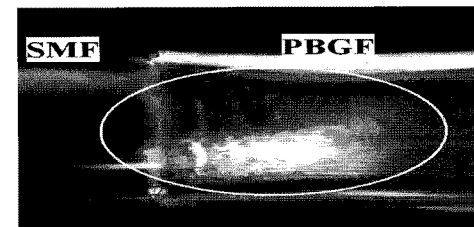
(b)



(c)



(d)



(e)

그림 4. 방전량(Fusion current) 증가에 따른 SMF와 PBGF 접속부

(a) 7 mA, (b) 8 mA, (c) 9 mA, (d) 10 mA, (e) 11 mA

Fig. 4. Connection part between SMF and PBGF with an increase of fusion current.

(a) 7 mA, (b) 8 mA, (c) 9 mA, (d) 10 mA, (e) 11 mA

리고 네 가지 경우의 접속변수로 각각 7회씩 융착접속한 후 접속손실에 대한 평균값을 그림 3에서 나타내었다. 그 결과, 아크의 방전량(Fusion current)을 7 mA로 인가하였을 경우의 접속손실은 0.9 dB ~ 1.6 dB로 측정되어 평균 1.22 dB이었으며, 8 mA, 9 mA, 10 mA로 방전량을 증가시키기에 따라서 측정된 각각의 평균 접속손실은 1.24 dB, 1.86 dB, 2.14 dB로 증가하였다. 즉, 적은 방전량을 인가하여 PBGF의 공기구멍이 붕괴되지 않으면서 바깥쪽 실리카 영역이 융착접속되는 방법을 사용할 경우 작은 접속손실을 얻을 수 있었다. 그림 4는 아크의 방전량을 증가시키면서 융착접속하였을 때의 SMF와 PBGF 접속부 측면 사진이다. 그림 4.(a)와 (b)에서는 PBGF의 공기구멍 붕괴현상이 일어나지 않았고 접속손실 또한 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 그림 4.(c)와 (d)는 아크의 방전량이 증가함에 따라 PBGF의 공기구멍 붕괴현상이 커지고 이에 따라 접속손실이 증가한다는 것을 그림 3에서 확인하였다. 또한 그림 4.(e)는 표 1에서 제시한 아크의 방전량보다 높은 11 mA를 인가한 경우로써 융착접속한 결과 공기구멍의 붕괴된 영역이 급증하는 현상을 나타내었다.

PBGF에서 SMF로의 접속손실 역시 PBGF의 공기구멍 붕괴현상이 접속손실과 직접적인 관계가 있다. 따라서 접속손실이 가장 작았던 경우의 방전량으로 융착접속하였다. 7회 융착접속한 결과 접속손실은 1.9 dB ~ 2.7 dB로 평균 2.23 dB로 측정되었다. 최소 손실을 나타내는 아크의 방전량으로 융착접속한 결과 PBGF에서 SMF로의 접속손실이 SMF에서 PBGF로의 접속손실보다 평균 1 dB정도 더 크게 측정되었다. 이는 코어가 공기구멍인 PBGF는 실리카 코어에 Ge이 첨가되어있는 SMF보다 굴절률이 낮기 때문에 두 광섬유 사이의 굴절률 차에 의해서 추가적으로 발생한 접속손실에 해당된다.

2. SMF와 NL-PCF의 저손실 융착접속

그림 5는 본 논문의 실험에서 SMF와의 융착접속에 사용된 NL-PCF의 절단면을 SEM을 이용하여 촬영한 사진이다. 코어의 직경은 $2.5 \mu\text{m}$, 클래딩영역에서 공기구멍 사이의 간격(Δ)은 $3 \pm 0.5 \mu\text{m}$ 이며, 동작파장은 1550 nm대역이다. SMF와 NL-PCF를 융착접속할 때 발생하는 접속손실을 결정하는 요소는 두 광섬유의 MFD 부정합과 NL-PCF의 공기구멍 붕괴현상으로 인한 손실이다^[10]. 식(1)을 이용한 SMF와 NL-PCF의 MFD 부정합

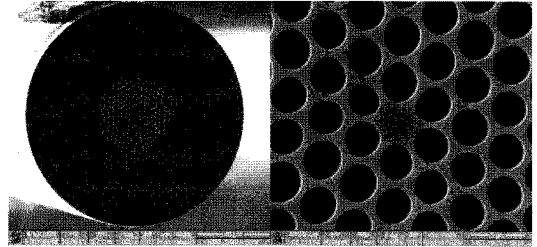


그림 5. 제작한 NL-PCF(KIST060318) 절단면

Fig. 5. SEM image of fabricated NL-PCF cross section.

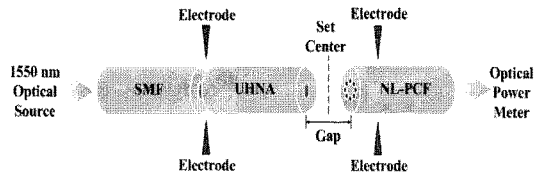


그림 6. SMF와 NL-PCF의 저손실 융착접속을 위한 실험구성

Fig. 6. Experiment setup for low loss fusion splicing of SMF and NL-PCF.

에 의한 이론적인 접속손실은 최소 8 dB이상으로 상당히 큰 편이었으며, 실제로 두 광섬유를 융착접속한 결과 10 dB이상의 매우 큰 접속손실이 측정되었다. 따라서 두 광섬유의 MFD 차이를 줄여 접속손실을 낮추는 방법으로 그림 6에서처럼 SMF와 NL-PCF사이에 Ultra High Numerical Aperture(UHNA)광섬유를 삽입 후 융착접속하였다. 사용된 UHNA 광섬유는 MFD가 $4 \pm 0.3 \mu\text{m}$ 이고 큰 NA값(0.35)을 가지고 있다.

SMF와 UHNA 광섬유의 MFD 부정합을 줄이기 위하여, UHNA 광섬유 코어가 열에 의해 확장되는 특성을 이용하여 융착접속하였다. 7회 융착접속한 후 접속손실을 구한 결과, 두 광섬유의 MFD 부정합이 감소하여 접속손실은 0.4 dB ~ 0.7 dB로 평균 0.54 dB로 측정되었다. 다음으로 UHNA 광섬유와 NL-PCF의 융착접속은 NL-PCF의 공기구멍 붕괴를 최소화하는 방법으로 SMF와 PBGF의 융착접속 실험과 같다. 그러나 UHNA 광섬유의 코어가 열에 의해서 확장되는 특성을 지니고 있기 때문에 전극봉의 위치를 UHNA 광섬유 방향으로 이동하여 융착접속하는 방법을 사용할 경우 NL-PCF와의 MFD 차이가 커지게 될 수 있다. 따라서 두 광섬유의 MFD 차이가 커지는 것을 방지하기 위해서 표 2의 접속변수를 사용하여 전극봉을 NL-PCF 방향으로 이동한 후 공기구멍이 붕괴되지 않을 정도의 방전시간과 방전량을 사용하여 융착접속하였다. 그 결과, 그림 7에서

표 2. UHNA광섬유와 NL-PCF 융착접속시 사용된 광섬유 융착접속기 접속변수 및 평균 접속손실
Table 2. Splicing parameters and average splicing loss with fusion splicing UHNA and NL-PCF.

접속변수	UHNA to NL-PCF
Set center	+ 230
Gap	10 μm
Overlap	10 μm
Prefuse time	0.2 s
Prefuse current	10 mA
Fusion time 1	-
Fusion current 1	-
Fusion time 2	4 s
Fusion current 2	9 mA
Fusion time 3	-
Fusion current 3	-
평균 접속손실	2.59 dB

* Set center default : + 255

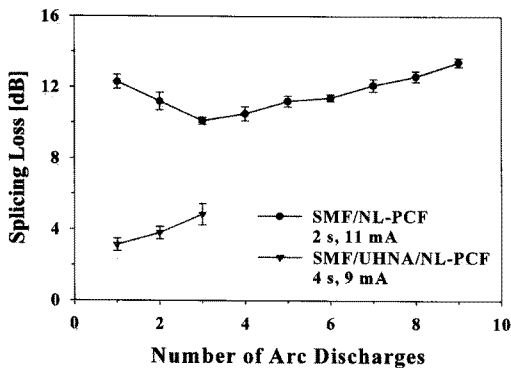


그림 7. SMF/NL-PCF와 SMF/UHNA/NL-PCF의 아크 방전횟수에 따른 접속손실 비교

Fig. 7. Compare splicing loss between SMF/NL-PCF and SMF/UHNA/NL-PCF with the number of arc discharges.

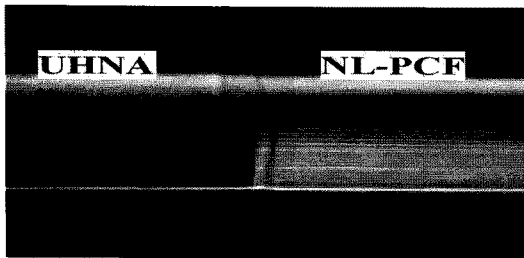


그림 8. 표 2의 접속변수를 사용하여 융착접속한 UHNA 광섬유와 NL-PCF 접속부

Fig. 8. Connection part between UHNA and NL-PCF used parameters of table 2.

처럼 SMF와 NL-PCF 사이에 UHNA광섬유를 삽입 후 융착접속하였을 때의 접속손실은 2.84 dB ~ 3.54 dB로 측정되어 평균 3.13 dB이었다. 그림 8은 UHNA광섬유와 NL-PCF의 접속부 측면 사진이다. 그림에서처럼 NL-PCF의 공기구멍 붕괴현상이 일어나지 않았을 때 가장 작은 접속손실을 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

SMF와 PBGF의 융착접속은 두 광섬유의 MFD가 유사하여 MFD 부정합에 의한 접속손실은 크지 않았다. 따라서 아크를 방전하는 전극봉의 위치를 SMF 방향으로 위치시켜 PBGF의 공기구멍이 붕괴되지 않을 정도의 방전량으로 융착접속하였다. 그 결과, SMF에서 PBGF로의 평균 접속손실은 1.22 dB이었고 반대로 PBGF에서 SMF로의 평균 접속손실은 2.23 dB로 측정되었다. SMF와 NL-PCF의 융착접속은 두 광섬유의 MFD 차이를 줄이기 위해서 SMF와 NL-PCF 사이에 MFD가 $4\pm 0.3 \mu\text{m}$ 이고 큰 NA값(0.35)을 가지는 UHNA 광섬유를 삽입시킨 후 융착접속하였다. 그 결과, SMF에서 UHNA광섬유로의 평균 접속손실은 0.54 dB이었고 UHNA광섬유에서 NL-PCF로의 평균 접속손실은 2.59 dB로 측정되었다. 이는 SMF와 NL-PCF를 융착접속하여 측정한 접속손실보다 6 dB이상 감소한 결과였다. 공기구멍구조의 클래딩영역이 붕괴되지 않을 정도의 방전량과 SMF와의 MFD 차이를 줄이고 융착접속하였을 때 접속손실이 크게 줄어드는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] T. A. Birks, J. C. Knight, P. St. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Optics Letters*, Vol. 22, no. 13, pp. 961-963, July 1997.
- [2] J. C. Knight, "Photonic crystal fibres," *Nature*, Vol. 424, no. 6950, pp. 847-851, August 2003.
- [3] P. St. J. Russell, "Photonic crystal fibers," *Science*, Vol. 299, no. 5605, pp. 358-362, January 2003.
- [4] P. St. J. Russell, "Photonic-crystal fibers," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 24, no. 12, pp. 4729-4749, December 2006.
- [5] K. N. Park, K. S. Lee, "Improved effective-index method for analysis of photonic crystal fiber,"

- Optics Letters*, Vol. 30, no. 9, pp. 958-960, May 2005.
- [6] L. Xiao, M. S. Demokan, W. Jin, Y. Wang, "Fusion splicing photonic crystal fibers and conventional single-mode fibers: microhole collapse effect," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 25, no. 11, pp. 3563-3574, November 2007.
- [7] L. Xiao, W. Jin, M. S. Demokan, "Fusion splicing small-core photonic crystal fibers and single-mode fibers by repeated arc discharges," *Optics Letters*, Vol. 32, no. 2, pp. 115-117, January 2007.
- [8] R. Thapa, K. Knabe, K. L. Corwin, B. R. Washburn, "Arc fusion splicing of hollow-core photonic bandgap fibers for gas-filled fiber cells," *Optics Express*, Vol. 14, no. 21, pp. 9576-9583, October 2006.
- [9] L. Xiao, W. Jin, M. S. Demokan, H. L. Ho, Y. L. Hoo, C. Zhao, "Fabrication of selective injection microstructured optical fibers with a conventional fusion splicer," *Optics Express*, Vol. 13, no. 22, pp. 9014-9022, October 2005.
- [10] O. Frazao, J. P. Carvalho, H. M. Salgado, "Low-loss splice in a microstructured fibre using a conventional fusion splicer," *Microwave and Optical Technology Letters*, Vol. 46, no. 2, pp. 172-174, July 2005.

저 자 소 개



안 진 수(학생회원)
 2007년 명지대학교 통신공학과 학사 졸업.
 2009년 현재 성균관대학교 정보통신공학부 석사과정.
 <주관심분야 : 광통신, 광전자, 광센서, 특수광섬유>



박 광 노(정회원)
 1996년 성균관대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1998년 성균관대학교 전자공학과 석사 졸업.
 2007년 성균관대학교 정보통신공학부 박사 졸업.
 2009년 현재 성균관대학교 정보통신공학부 연구교수.
 <주관심분야 : 광통신용 소자 설계, 광통신 네트워크 시스템 설계, 특수광섬유 등>



김 길 환(정회원)
 2002년 공주대학교 정보통신공학과 학사 졸업.
 2004년 성균관대학교 정보통신공학부 석사 졸업.
 2009년 현재 성균관대학교 정보통신공학부 박사과정.
 <주관심분야 : 광통신, 광전자, 광센서, 특수광섬유>



이 상 배(정회원)
 1983년 서강대학교 물리학과 학사 졸업.
 1985년 서강대학교 물리학과 석사 졸업.
 1993년 서강대학교 물리학과 박사 졸업.
 1985년 7월~2007년 12월 한국과학기술연구원(KIST) 광기술연구센터 센터장(책임연구원).
 2009년 현재 한국과학기술연구원(KIST) 지능시스템연구본부 광기술연구실 책임연구원.
 <주관심분야 : 특수광섬유, 광섬유 레이저, 광섬유 격자 소자 등>



이 경 식(정회원)
 1979년 성균관대학교 전자공학과 학사 졸업.
 1978년 12월~1980년 8월 한국통신기술연구소(현 한국전자통신연구원) 근무.
 1982년 University of Colorado, Boulder 전기전자공학과 석사 졸업.

1985년 University of Colorado, Boulder 전기전자공학과 박사 졸업.
 1986년 9월~1988년 7월 미국표준기술연구소(NIST) 근무.
 1988년 7월~1990년 2월 美 TACAN Corp 근무.
 1998년 9월~1999년 8월 University of Rochester, The Institute of Optics 방문교수.
 2005년 9월~2006년 8월 University of Arizona, Optical Science Center 방문교수.
 1990년 3월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수.
 <주관심분야 : 광통신소자 및 시스템, 광섬유소자, 광섬유센서, Photonic Devices 등>