

---

# 멀티코어 광섬유를 이용한 광에너지 전송에 관한 분석 연구

김성만\*

Analysis of optical energy delivery through multi-core optical fibers

Sung-Man Kim\*

## 요약

현재 전 세계의 많은 과학자들이 지속 가능한 에너지원을 찾기 위하여 많은 노력을 하고 있지만, 태양광 에너지가 궁극적인 해답이 될 것으로 받아들여지고 있다. 이러한 광 에너지는 조명용, 발열용, 통신용 등으로 사용될 수 있으며, 심지어 최근에는 광에너지로 동작하는 광자구동 모터에 대한 연구결과도 나오고 있다. 본 논문에서는 이러한 광에너지를 광섬유를 통해 전송할 수 있는 기술에 대해 이론적인 분석을 수행하였다. 특히, 한 가닥의 광섬유에 여러 개의 코어(core)가 삽입된 멀티코어(multi-core) 광섬유를 이용한 광에너지 전송의 에너지 전송량에 대해 예측해 보았다. 본 논문의 분석 결과에 따르면, 한 가닥의 멀티코어 광섬유로 약 2 kW의 광에너지 전송이 가능할 것으로 예측되었으며, 초고압선처럼 수 cm의 직경으로 광섬유 다발을 묶을 경우에는 10 MW 이상의 광에너지 전송이 가능할 것으로 예측되었다. 이는 도체 전력선과 비교하여 절반수준의 에너지 전송량으로 충분한 경쟁력이 있을 것으로 생각된다.

## ABSTRACT

Many researchers worldwide have been making a lot of effort to find sustainable clean energy source to replace the current fossil fuels. However, solar energy is considered as the ultimate energy solution to supply the world total power consumption. Light can be used for lighting, heating, wired and wireless communications, etc. Moreover, even light-driven motors which can directly convert optical energy into kinetic energy are studied recently. In this paper, we analyze optical energy delivery through multi-core optical fibers. Our estimation shows that an optical power of 2 kW can be transmitted through a multi-core fiber and an optical power of >10 MW can be transmitted through a bundle of optical fibers with a diameter of several centimeters. It seems competitive compared with the electric power delivery through a copper cable.

## 키워드

optical energy delivery, multi-core fiber, optical power, stimulated brillouin scattering, optical power grid  
광에너지 전달, 멀티코어 광섬유, 광파워, 브릴리언 산란, 광에너지 전송로

## 1. 서론

현재 전 세계적으로 많은 과학자들이 에너지 문제에 대한 해결책을 찾기 위해 다방면으로 많은 노력을 기

우고 있다. 고갈되어가는 화석연료를 대체할 지속 가능한 청정 에너지원을 찾는 근본적인 연구를 비롯하여, 효율적인 에너지 저장방법 및 에너지 전송방법 등에 관한 연구도 활발하게 진행되고 있다. 그 중에서도 가

---

\* 경성대학교 전자공학과(sungman@ks.ac.kr)

접수일자 : 2012. 7. 18

심사(수정)일자 : 2012. 09. 05

게재확정일자 : 2012. 10. 05



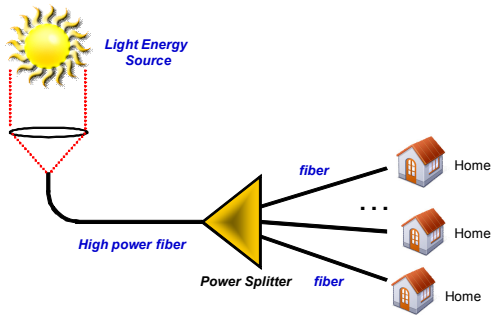


그림 2. 광 에너지 전송망의 개념도  
Fig. 2 Concept of optical power grid

송하는 용도로는 광섬유를 이용한 광 에너지 전송이 미래에 사용될 가능성이 있을 것으로 전망된다.

우리는 이미 이러한 필요성을 인식하고 광섬유를 이용한 광 에너지의 전송 가능성을 제시한 바가 있다 [9]. 한편, 최근에는 광섬유 기술의 발전에 따라 하나의 광섬유에 여러 개의 코어(core)를 삽입하는 멀티코어(multi-core) 광섬유 기술이 눈부신 발전을 하고 있다 [10, 11]. 이러한 멀티코어 광섬유를 이용하면 광 에너지 전송에 많은 개선을 가져올 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 멀티코어 광섬유를 이용한 광 에너지 전송기술에 대해 분석하고, 멀티코어 광섬유를 이용하여 전송할 수 있는 광 에너지의 전송량에 대해 이론적인 분석을 수행하였다. 또한, 이 결과를 기존의 도체선을 이용한 전력전송 기술과 비교 분석하였다.

## II. 멀티코어 광섬유의 구조

지금까지의 사용된 광섬유는 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 하나의 클래딩(cladding)에 하나의 코어가 들어가 있는 구조였다. 이러한 구조에서 빛은 굴절률이 상대적으로 높은 코어부분을 따라 전반사의 원리로 진행하게 된다. 하지만, 최근에 그림 3(b)와 같이 하나의 광섬유에 최대 19 개까지의 코어를 삽입한 멀티코어 광섬유가 개발되었다 [11].

이 멀티코어 광섬유의 클래딩의 직경은 200  $\mu\text{m}$ 로 일반적인 단일모드 광섬유의 직경에 비해 조금 크고, 코어의 유효면적은 72  $\mu\text{m}^2$ 으로 일반적인 단일모드 광섬유의 코어 유효면적과 유사하다. 또한, 감쇄량(attenuation)은 0.23 dB/km의 값으로 기존의 단일

모드 광섬유의 값과 비슷한 값을 가지고 있다. 또한, 반지름 5 mm의 둘레로 광섬유를 구부렸을 때에도 한 바퀴당 0.5 dB/turn의 감쇄를 보이는 등 구부림 감쇄(bending loss) 성능도 우수하여 상용으로 사용하기에 아무런 문제가 없는 성능을 보여주었다.

이러한 멀티코어 광섬유를 사용하면 기존의 광섬유보다 더 많은 빛을 보낼 수 있게 된다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 멀티코어 광섬유를 이용한 광 에너지 전송에 대해 분석하고자 한다.

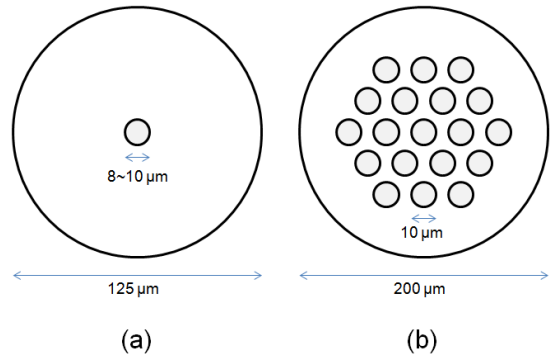


그림 3. (a) 일반적인 광섬유의 구조 (b) 19 개의 코어를 가진 멀티코어 광섬유의 구조

Fig. 3 Structure of (a) typical single-mode fiber and (b) multi-core fiber with 19 cores

## III. 멀티코어 광섬유를 이용한 광에너지 전송량 분석

광 에너지를 전송하기 위해 입력 광세기를 증가시킬 때에 첫 번째로 겪게 되는 장애요인은 브릴리언 산란(stimulated Brillouin scattering, SBS)으로 생각된다 [12]. 브릴리언 산란이란, 광양자가 관여를 하는 라만 산란(stimulated Raman scattering, SRS)과는 달리 음향양자(acoustic phonon)가 관여를 하는 비탄성 산란으로, 단일모드 광섬유에서는 광신호의 진행방향과 반대방향으로만 작용하는 특성이 있다. 이러한 브릴리언 산란의 효과로 인하여 높은 광에너지를 광섬유에 인가하였을 때에 그 에너지가 진행방향으로 전달되지 못하고 산란되는 효과를 가져와 높은 파워의 광에너지를 광섬유에 입력하였을 때에 에너지의 감쇄요인이 된다.

이와 같이 광에너지 전송에 있어 주된 장애요소인 브릴리언 산란으로 인해 입력 광파위의 절반을 잃게 되는 입력 광파위를 문턱 광파위  $P_{th}$  로 정의할 수 있으며, 이는 광섬유의 길이가 충분히 길어 광섬유의 유효길이  $L_{eff}$  를  $1/\alpha$  로 근사할 때에 아래의 식으로 표현될 수 있다 [13].

$$P_{th} \approx 2\alpha A_{eff} / g_B * (1 + \Delta v_p / \Delta v_B) \quad (1)$$

여기에서  $\alpha$  는 광섬유의 손실을 나타내는 계수이고,  $A_{eff}$  는 광섬유 코어의 유효면적,  $g_B$  는 브릴리언 이득계수,  $\Delta v_p$  는 광원의 스펙트럼 대역폭,  $\Delta v_B$  는 브릴리언 이득의 스펙트럼 대역폭을 나타낸다. 실제로 distributed feedback (DFB) 레이저 다이오드를 사용하여 60 km 의 단일모드 광섬유에 인가하여 이러한 문턱 광파위를 측정된 결과를 그림 4에 나타내었다 [9]. 실험결과에서 알 수 있듯이 약 9 dBm 의 광파위를 넘어서면 브릴리언 산란이 급격히 증가하여 더 이상 정방향으로의 출력 광파위가 증가하지 않는 것을 알 수 있다. 다른 연구자들의 결과를 살펴보아도 일반적인 광섬유에서 비슷한 광원을 이용할 경우에 약 10 mW 의 문턱 광파위를 보였다 [12, 14].

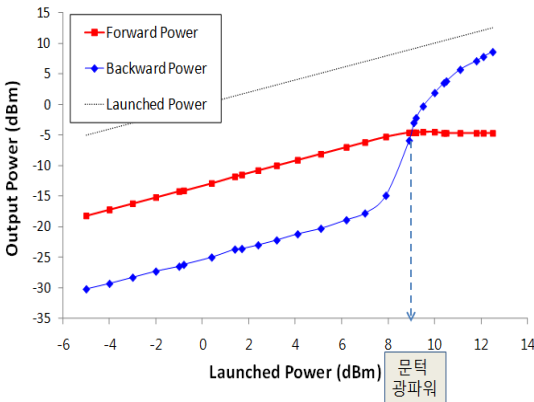


그림 4. 브릴리언 산란 문턱 광파위 실험결과  
Fig. 4 Experimental result of SBS threshold power

멀티코어 광섬유에서도 하나의 코어에 동일한 조건으로 실험을 하면 그림 4와 유사한 결과가 발생될 것으로 예측된다. 다만 그림 3에서 나타낸 멀티코어 광

섬유의 경우에 코어의 유효면적이 조금 더 높으므로 약간의 문턱 광파위의 상승이 있을 것으로 예측된다.

하지만, 이러한 수치의 문턱 광파위로는 전송할 수 있는 광에너지의 양이 너무 작으므로, 식 (1) 을 이용하여 멀티코어 광섬유에서 문턱 광파위를 높이기 위한 방안을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 광원의 스펙트럼을 넓히는 것이다. 실제로 광 에너지를 전송하기 위해서는 하나의 파장에 에너지를 몰아서 보내는 것보다 전체 광 스펙트럼을 이용해서 보내는 편이 여러 가지 비선형 효과를 줄일 수 있는 방법이다. 그림 4의 실험에서 사용한 DFB 레이저 광원의 3 dB 대역폭은 0.05 nm 정도였다. 이는 1550 nm 대역에서 6 GHz 정도에 해당하는 대역폭이다. 이전 연구자들의 결과에 따르면 브릴리언 이득의 대역폭  $\Delta v_B$  는 주로 수십 MHz 의 값을 가지므로 [13], 광원의 대역폭에 비해 작은 값을 가진다. 따라서, 식 (1)을 이용하면, 광원의 대역폭이 증가할수록 그대로 비례적으로 증가하게 된다. 따라서, 만약에 100 nm 의 광대역 광원을 이용한다면,  $100 \text{ nm} / 0.05 \text{ nm} = 2000$  배 만큼 문턱 광파위  $P_{th}$  가 증가하게 된다. 즉, 100 nm 의 광대역 광원을 이용하면 문턱 광파위가 2000 배 증가되어 약  $10 \text{ mW} * 2000 \text{ 배} = 20 \text{ W}$  정도의 광 에너지를 전달할 수 있을 것이다.

둘째, 브릴리언 이득계수  $g_B$  를 낮추는 방법이 있다. 이는 광섬유의 굴절률 프로파일 (refractive index profile) 을 변화시키거나 광섬유의 도핑 (doping) 을 변화하여 얻을 수 있는 방법이다. 이전의 결과들을 살펴보면 이러한 방법을 이용하여 문턱 광파위를 수 배 정도는 높일 수 있는 것으로 파악되고 있다 [13]. 따라서, 이 방법을 이용하여 5 배 정도로 문턱 광파위를 높일 수 있다고 가정하면, 문턱 광파위의 최종 값은  $20 \text{ W} * 5 = 100 \text{ W}$  정도가 될 것이다.

마지막으로 멀티코어 광섬유를 이용하여 이러한 광 에너지를 19 개의 코어를 이용하여 전송할 수 있으므로 최종적으로  $100 \text{ W} * 19 \approx 2 \text{ kW}$  의 광 에너지를 멀티코어 광섬유를 이용하여 보낼 수 있게 된다. 이러한 수치적 분석값을 표 1에 정리하였다.

표 1. 멀티코어 광섬유를 이용한 광 에너지 전송량  
Table 1. Transmittable optical power using a multi-core optical fiber

방법	개선량	최종 광 에너지 전송량
기존	-	10 mW
광대역 광원 사용	2000 배 (100 nm 대역폭)	20 W
브릴리언 이득계수 조절	5 배	100 W
멀티코어 광섬유	19 배 (19 코어)	≈ 2 kW

#### IV. 기타 고려사항

표 1에서 정리했듯이 최종적으로 하나의 멀티코어 광섬유를 통해 약 2 kW의 광 에너지를 전송할 수 있을 것으로 분석된다. 하지만, 이러한 높은 광에너지를 전송할 때 광섬유의 손상이 발생할 수 있으므로 광에너지 전송량의 밀도를 계산해보면, 코어당  $100 \text{ W} / (\pi * (5 * 10^{-4} \text{ cm})^2) = 1.3 * 10^8 \text{ W/cm}^2$ 에 해당한다. 이전 연구 결과에 의하면, 광섬유가 손상없이 견딜 수 있는 광 에너지의 밀도는  $1 \text{ GW/cm}^2$ 에 달하므로 [15], <표 1>에서 분석된 광 에너지를 전송하는데 광섬유의 손상은 발생되지 않을 것으로 예측된다.

또한, 광에너지 전송용 광원의 스펙트럼 파장이 광통신 용도의 파장보다 짧을 수도 있고, 광에너지를 전송할 때에는 굳이 단일모드로 보낼 필요가 없으므로 광섬유의 개구수(numerical aperture)를 높이기 위해 코어와 클래딩의 굴절률 차이를 많이 주어 멀티모드(multi mode)로 광에너지를 전송할 수 있는데, 이렇게 멀티모드로 광에너지가 전송되는 경우에는 펌프(pump) 광원과 스톱스파(Stokes wave)간의 결합이 줄어들어 브릴리언 이득 계수는 줄어들 수 있다 [16]. 이로 인해 문턱 광파워는 표 1에서 분석한 값보다 더 커질 수 있으며, 이는 더 많은 양의 광에너지를 전송할 수 있다는 뜻이다. 하지만, 본 논문에서는 보수적

인 관점에서 수치값을 예측하기 위해 이러한 영향은 수치 계산에서 고려하지 않았다.

한편, 멀티코어 광섬유가 아니라 코어의 직경이 큰 특수 광섬유를 이용하여 전송하는 방법도 있다 [9]. 이러한 광섬유의 경우에 코어의 직경이 수 mm에 달하므로 [17, 18], 이러한 광섬유를 이용하면 광에너지의 전송량을 크게 개선할 수 있다. 하지만, 본 논문에서는 멀티코어 광섬유를 이용한 광에너지 전송방법을 분석하는데 그 범위를 제한하고자 한다.

마지막으로 태양광 에너지를 그대로 광원으로 사용한다고 가정한다면, 태양광 에너지의 지표면 수직 복사량은 적외선, 가시광선, 자외선 등을 모두 포함하여 약  $1 \text{ kW/m}^2$  정도이므로 [19],  $32 \text{ cm} \times 32 \text{ cm}$ 의 태양광만 모으면 하나의 코어에 전송할 수 있는 양인 100 W를 모을 수 있다. 또한,  $1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$ 의 태양광을 모으면 19개의 코어를 가진 하나의 멀티코어 광섬유에 전송할 수 있는 에너지의 양이 된다. 따라서, 태양광 에너지를 그대로 모아서 전송하는 방안도 그렇게 현실성이 떨어지는 방안은 아니다. 참고로,  $32 \text{ m} \times 32 \text{ m}$ 의 태양광 에너지를 모으면 1 MW의 광 에너지를 만들 수 있다.

#### V. 도체 전력선과의 에너지 전송량 비교 분석

도체로 만들어진 초고압선의 경우에 수십~수백 MW까지의 전력을 전달할 수 있어 [20], 위에서 멀티코어 광섬유를 이용한 광 에너지 전달량에 비해서 월등히 높은 수치를 보이고 있다. 하지만, 이는 중심 도체의 지름만 수 cm에 달하는 초고압선의 경우이다. 위에서 분석한 멀티코어 광섬유의 경우에 클래딩까지의 지름이 0.2 mm에 불과하므로 동일하게 비교할 수 없으며, 위에서 제시한 멀티코어 광섬유를 여러 겹 쌓아 광 에너지 전력선을 구성할 수 있으므로 동일한 단면적에서 도체선과 광섬유의 성능을 비교해야 할 것이다.

동등한 비교를 위해서 도체선의 경우에는 중심 도체 부분만의 단면적을 고려하고, 광섬유의 경우에는 클래딩까지의 단면적을 고려하도록 하겠다. 초고압선의 상용제품을 하나 예를 들어보면 [20], 중심 도체

부분만 240 mm<sup>2</sup> 인 단면적을 가지는 초고압선 케이블이 약 30 MW 의 전력을 전달할 수 있다. 위에서 분석한 멀티코어 광섬유의 경우 단면적이  $\pi * (0.1 \text{ mm})^2 \approx 0.03 \text{ mm}^2$  에 불과하므로 만약, 위의 초고압선과 동일한 단면적에 멀티코어 광섬유를 다발로 묶는다면,  $240 \text{ mm}^2 / 0.03 \text{ mm}^2 = 8000$  개가 가능하므로, 240 mm<sup>2</sup> 의 단면적에 보낼 수 있는 광 에너지의 양은 2 kW \* 8000 개 = 16 MW 가 될 것이다.

따라서, 초고압선과 동일한 굵기의 광섬유 다발을 사용한다면 현재 도체 전력선으로 보낼 수 있는 양의 절반 정도는 충분히 보낼 수 있다는 결론이 나온다. 만약에 멀티코어 광섬유의 기술이 향후에 더 발전하여 이보다 개선이 발생된다면 도체선과 거의 동등한 수준의 에너지를 전달할 수 있을 것으로 전망된다. 이러한 수치적 분석값을 <표 2>에 정리하였다.

표 2. 도체 전력선과 멀티코어 광섬유의 에너지 전송량 비교

Table 2. Comparison of energy transmission in a copper electric power cable and a multi-core optical fiber

항목	도체 전력선	멀티코어 광섬유
단면적	240 mm <sup>2</sup> (중심 도체부)	0.03 mm <sup>2</sup> (클래딩 포함)
전송 에너지량	30 MW	2 kW
에너지 전송밀도	12.5 MW/cm <sup>2</sup>	6.7 MW/cm <sup>2</sup>
비고	-	도체 전력선의 절반 수준. (향후 개선시 도체선과 동등한 수준이 예상됨)

## VI. 결 론

본 논문에서는 멀티코어 광섬유를 이용한 광에너지 전송에 대해 이론적인 분석을 수행하였다. 광섬유를 이용한 광에너지 전송은 향후 광에너지의 생산이 늘고 광에너지의 소비가 늘어난다면, 고려해볼 수 있는

에너지 전송방법이라고 생각된다. 또는, 전자기유도 공해가 발생되어서는 안 되거나 도체가 사용될 수 없는 특수한 영역에서 사용할 수 있을 것으로 사용된다.

한 가닥의 멀티코어 광섬유를 사용할 경우에 현재의 기술로 전송할 수 있는 광에너지의 양은 약 2 kW 정도로 분석된다. 하지만, 단위 면적당 전송할 수 있는 에너지의 양은 초고압 전력선의 절반 정도의 수준으로 에너지를 전송하는데 충분한 수준으로 파악된다. 만약, 현재의 초고압 송전선처럼 지름이 수 cm 에 달하는 광섬유 다발을 사용할 경우에는 10 MW 이상의 에너지 전송이 가능할 것으로 분석되었다. 또한, 멀티코어 광섬유 기술의 발전에 따라 향후 에너지 전송량에 개선 가능성이 있으며 그 경우에는 도체 전력선과 거의 동등한 수준의 에너지를 전송할 수 있을 것으로 판단된다.

결론적으로, 광섬유를 이용한 광에너지 전송은 현재의 도체 전력선과 비교하여 에너지 전송량에서 뒤지지 않고, 전자기 유도 공해가 없어 친환경적이며, 단위 길이당 가격이 훨씬 경제적이어서 향후 에너지 전송용으로 광섬유가 사용될 가능성이 충분히 있다고 할 수 있겠다.

### 감사의 글

이 논문은 2012학년도 경성대학교 학술연구비지원에 의하여 연구되었음.

### 참고 문헌

- [1] Derek Abbott, "Keeping the energy debate clean: how do we supply the world's energy needs?", Proceedings of IEEE, Vol. 98, No. 1, pp. 42-66, Jan. 2010.
- [2] 유재덕, 박홍태, 신현식, 김천석, 신윤희, "장거리 해저 광전송망 분산보상 설계 및 구현", 한국전자통신학회논문지, 1권, 1호, pp. 56-62, 2006.
- [3] Ke Wang, Ampalavanapillai Nirmalathas, Christina Lim, and Efstratios Skafidas, "Indoor WDM Optical Wireless Communication System with Single Channel Imaging Receiver", Proc. Opto-Electronics and Communications

- Conference 2012 (OECC 2012), Busan, Korea, paper 6A3-3, pp. 733-734, July 2012.
- [4] 정재진, 이영선, 신현식, "장거리 해저 광통신시스템의 순방향에러정정 기술 연구", 한국전자통신학회논문지, 3권, 3호, pp. 170-176, 2008.
- [5] 김성만, "비선형 광통신 시스템에서 최대 전송거리 및 최적 광신호 세기 도출에 관한 연구", 한국전자통신학회논문지, 7권, 3호, pp. 567-571, 2012.
- [6] Norihiko Nishizawa, "Ultrahigh resolution optical coherence tomography", Proc. Opto-Electronics and Communications Conference 2012 (OECC 2012), Busan, Korea, paper 5F3-2, pp. 584-585, July 2012.
- [7] Ming Liu, Thomas Zentgraf, Yongmin Liu, Guy Bartal and Xiang Zhang, "Light-driven nanoscale plasmonic motors", Nature Nanotechnology, Vol. 5, pp. 570-573, doi : 10.1038/nnano.2010.128, July 2010.
- [8] Vincenzo Balzani, Miguel Clemente-Leo, Alberto Credi, Belén Ferrer, Margherita Venturi, Amar H. Flood, and J. Fraser Stoddart, "Autonomous artificial nanomotor powered by sunlight", Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 103 No. 5 pp. 1178-1183, Jan. 2006.
- [9] Sung-Man Kim, "Possibility of Optical Energy Transmission through Optical Fibers", Far East Journal of Electronics and Communications, Vol. 5, No.2, pp. 105-112, Dec. 2010.
- [10] Masanori Koshihara, Kunimasa Saitoh, Katsuhiro Takenaga, and Shoichiro Matsuo, "Recent Progress in Multi-core Fiber Design and Analysis", Proc. Opto-Electronics and Communications Conference 2012 (OECC 2012), Busan, Korea, paper 5E3-1, pp. 557-558, July 2012.
- [11] Katsunori Imamura and Ryuichi Sugizaki, "Recent Advances in Multi-core Transmission Fibers", Proc. Opto-Electronics and Communications Conference 2012 (OECC 2012), Busan, Korea, paper 5E3-2, pp. 559-560, July 2012.
- [12] Yasuhiro Aoki, Kazuhito Tajima, and Ikuo Mito, "Input power limits of single-mode optical fibers due to stimulated Brillouin scattering in optical communication systems", Journal of Lightwave Technology, Vol. 6, No. 5, pp. 710-719, May 1988.
- [13] Govind P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics (4th edition, Academic Press, New York, USA), Chapter 9, 2007.
- [14] Daniel A. Fishman and Jonathan A. Nagel, "Degradations Due to Stimulated Brillouin Scattering in Multigigabit Intensity-Modulated Fiber-Optic Systems", Journal of Lightwave Technology, Vol. 11, No. 11, pp. 1721-1728, Nov. 1993.
- [15] H.J. Eichler, A. Mocofanescu, Th. Riesbecka, E. Rissea, and D. Bedau, "Stimulated Brillouin scattering in multimode fibers for optical phase conjugation", Optics Communications, Vol. 208, pp. 427-431, July 2002.
- [16] Steven M. Massey and Timothy H. Russell, "The Effect of Phase Conjugation Fidelity on Stimulated Brillouin Scattering Threshold", IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron., Vol. 15, No. 2, pp. 399-405, Mar. 2009.
- [17] <http://www.fiberoptix.com>
- [18] <http://www.fujikura.com>
- [19] <http://en.wikipedia.org/wiki/Sunlight>
- [20] <http://www.lscns.co.kr>

## 저자 소개



### 김성만(Sung-Man Kim)

1999년 KAIST 전기및전자공학과  
공학사

2001년 KAIST 전기및전자공학과  
공학석사

2006년 KAIST 전기 및 전자공학과 공학박사

2006년~2009년 삼성전자 정보통신총괄 책임연구원

2009년~현재 경성대학교 전자공학과 교수

※ 관심분야 : 광에너지 전송, 광통신, 이동통신,  
LED 무선 광통신