

---

# 광결정 광섬유를 이용한 WDM-RoF 시스템의 채널간 전력변화 편차 분석

김소은\* · 이충규\*\*

Interchannel RF Power Fluctuation in WDM-RoF System Employing Photonic Crystal Fiber

So-Eun Kim\* · Chung Ghiu Lee\*\*

---

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아  
수행된 연구결과임 (KRF-2009-0075271).

---

## 요 약

파장분할다중화-무선광통신(WDM-RoF) 시스템에서 광결정 광섬유를 이용하여 채널 간 고주파신호들의 전력변화의 편차를 분석하여 이들을 조절할 수 있음을 확인하였다. WDM-RoF 시스템의 경우, 원격노드에서의 고주파 신호 특성은 파장 의존성을 갖는 단일모드 광섬유의 분산 특성으로 인해 전송거리 증가에 대한 고주파신호 수신 전력 변화가 채널의 파장에 따른 편차를 나타내게 되며, 이는 전체 시스템 설계시 전송거리에 대한 제한 요소로 작용할 수 있다. 광결정 광섬유의 분산보상 특성을 이용하여 WDM 채널에 따른 고주파 전송특성을 개선할 수 있는 광결정 광섬유를 설계하고, 이를 통해 채널간 고주파 전송특성의 편차를 분석하였다.

## ABSTRACT

In this paper, we report that the differences between RF power levels can be improved in wavelength division multiplexing - radio over fiber (WDM-RoF) system by using a photonic crystal fiber. In a WDM-RoF system, each WDM channel experiences different received RF power level fluctuation in remote node (RN) because of wavelength-dependent dispersion. Since each WDM channel experiences different power fluctuation, the RF power fluctuation acts as a design constraint in viewpoint of network design. We designed a photonic crystal fiber to improve the effect of wavelength-dependent dispersion on RF power fluctuation. Also, we analyzed the wavelength-dependent difference of inter-channel RF power fluctuations.

## 키워드

무선광통신, 파장다중분할, 분산, 전력 손실, 광결정 광섬유

## Key word

Radio-over-fiber, wavelength division multiplexing, dispersion, power penalty, photonic crystal fiber

---

\* 정회원 : 광주과학기술원 고등광기술연구소  
\*\* 정회원 : 조선대학교 전자공학과 (교신저자, clee@chosun.ac.kr)

접수일자 : 2012. 02. 13  
심사완료일자 : 2012. 03. 09

## I. 서 론

최근 광통신 기술의 발전 및 무선이동통신기술의 발전과 더불어, 이동 중에 광대역 대화형 멀티미디어 서비스를 제공하는 기술에 관한 관심이 매우 높아졌고, 이를 수용하기 위해 기존의 무선이동통신에 비해 보다 넓은 대역폭을 필요로 하게 되었다 [1]. 동축 케이블 등을 전송매체로 사용하는 고주파 통신기술에 기반한 무선이동통신기술은 신호의 대역폭이 증가함에 따라 전송능력이 저하되어 이를 극복하기 위한 증폭기 포설에 따른 비용증가를 수반하게 된다. 이러한 문제를 해결하여 보다 넓은 영역에 위치한 가입자들에게 광대역 서비스를 제공하기 위한 방안으로서, 광통신 기술을 활용하여 중앙기지국(central station: CS)에서 광학적인 방법으로 고주파신호를 생성하고, 원거리에 위치한 원격노드(remote node: RN)까지 광신호를 통해 고주파 신호를 전송한 후 원격노드에 위치한 광검출기(photodiode)에서 고주파 신호를 복원하여 안테나를 통해 송신하는 무선광통신(Radio-over-fiber: RoF) 시스템 기술에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다 [2],[3].

한편으로, 광통신 전송기술의 측면에서 장거리 대용량 정보전송 및 다수의 가입자 서비스를 위해 파장분할 다중화(wavelength division multiplexing: WDM) 기술이 사용되고 있는데 [4],[5], 이러한 WDM 기술의 장점을 RoF 시스템에 접목함으로써, 시스템 정보전송 용량 증가, 보안성 향상, 가입자수 증대, 망 확장성 및 망 유연성 확보 등의 장점을 갖는 WDM-RoF 기술에 관한 연구결과들이 보고되고 있다 [6],[7].

기존의 표준 단일모드 광섬유(single-mode fiber)를 전송매체로 하고 단일 파장의 레이저 다이오드 (laser diode: LD)를 사용하여 광양측파대 (optical double sideband) 변조를 수행하는 RoF 시스템에서, 광섬유의 분산(dispersion)에 의해 고주파 신호의 수신전력이 전송거리에 따라 주기적으로 사라져 극소점들이 나타나는 현상이 생기게 되며 [8], 이렇게 여러 파장의 LD들을 사용하는 WDM-RoF 시스템에서는 특정 파장(채널)을 통해 전송되는 고주파 신호의 수신전력 변화 뿐 아니라, 여러 WDM 파장(채널) 간 고주파 신호 수신전력의 편차가 발생하게 되어 WDM-RoF 시스템의 전송거리 설계의 제한요건이 되므로, 이에 관한 분석연구가 필요하다.

이를 위해 설계된 광결정 광섬유(photonic crystal fiber; PCF)의 분산특성을 기술하고, 이를 WDM-RoF 시스템에 적용했을 경우 개선된 고주파 신호 전송특성을 분석을 통해, 제안된 방식이 WDM-RoF 시스템의 고주파 전송특성 개선에 기여하였음을 확인할 수 있었다 [9]. 본 논문에서는 이러한 WDM-RoF시스템에서 파장에 따른 고주파 신호의 전력 변화 특성을 분석하고, 이를 개선하기 위한 방법으로서 광결정 광섬유 (photonic crystal fiber: PCF)를 삽입하였다. WDM 채널에 따른 분산 특성을 이용하여 고주파 전송특성 편차를 조절할 수 있도록 광결정 광섬유를 설계하고, 이를 통해 채널 간 고주파 전송특성의 편차를 분석하였다.

## II. WDM-RoF 시스템 구조

WDM 구조에 기반한 RoF시스템은 각 가입자에 해당하는 원격노드로 하나의 WDM 채널을 할당하여 데이터를 전송하므로 시스템의 전송 데이터량 증가 뿐만 아니라, 수용가능한 WDM 채널의 수 만큼 중앙기지국에 연결가능한 원격노드의 수를 증가시킴으로써 수용가능한 가입자 수를 증가시킬 수 있게 된다. 그림 1은 n개의 WDM 채널을 사용한 WDM-RoF시스템의 구조를 나타낸다. 그림에서 WDM-RoF OLT는 중앙기지국을 나타내며, WDM-RoF ONU는 가입자 측의 원격노드를 나타내며, 각각의 ONU는 OLT의 WDM 채널의 파장이 할당되는 구조이다. WDM 파장,  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 는 OLT로부터 ONU로 송신되는 하향신호에 할당된 n개의 파장을 나타내고, 하향신호들은 MZM 변조기를 통해  $f_{LO}/2$ 의 주파수로 변조되어 송신된다. 이렇게 변조된 신호는 ONU의 광수신기에서 중심주파수  $f_{LO}$ 의 고주파 신호로 변환된다.  $\lambda_{U1}, \lambda_{U2}, \dots, \lambda_{Un}$ 는 ONU로부터의 상향신호에 할당된 파장을 나타낸다. WDM Mux는 하향신호에 대해 파장다중화 역할을 수행하며, 상향신호에 대해 파장역다중화 역할을 수행하게 된다.

ONU로부터 상향전송되는 광신호는 WDM filter와 coupler를 통해 하향 광신호와 분리된다. 하향 광신호는 광수신기(optical receiver)에서 전기신호로 변환되어 diplexer와 안테나를 통해 전파된다. 안테나에서 수신된 상향 전기신호는 diplexer를 통해 상향 광신호 레이저 다

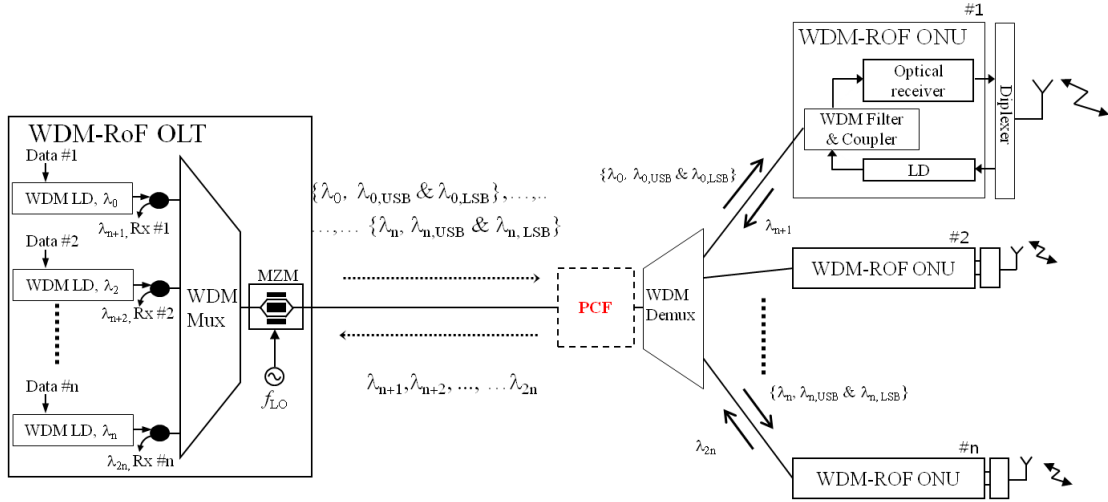


그림 1. WDM-RoF 시스템의 구조.  
 OLT: optical line termination. ONU: optical network unit. LD: laser diode. Rx: receiver.  
 MZM: Mach-Zehnder modulator, LO: local oscillator.  
 Fig. 1 Architecture of a WDM-RoF system.

이오드를 변조하고, 이렇게 생성된 상향 광신호는 WDM filter와 coupler를 통해 가입자측 선로를 통해 송신된다.

### III. WDM-RoF 시스템 구조

각각의 WDM채널에 해당되는 레이저 다이오드들에서 생성된 빛은 각 채널에 할당된 기저대역 데이터 (baseband data)와 함께 중앙기지국에서 외부변조기를 통해 변조되며, 원격노드에서 데이터를 무선전송하기 위한 반송파용 고주파신호의 1/2에 해당하는 국부 발진 (local oscillator) 고주파신호로 변조할 수 있다. 이렇게 RoF시스템이 WDM기술을 도입함에 따라 다수의 레이저 다이오드들은 ITU-T에서 제시하는 WDM 파장 기준에 적합하도록 파장이 선택되어 WDM광원을 구성하게 된다 [4]. 이렇게 RoF신호로 변조된 WDM-RoF 광신호는 광섬유의 장거리 전송특성을 활용하여 수십 km 이상 광증폭기 없이 전송될 수 있으며, 전송된 WDM-RoF 광신호는 원격노드 측에 위치한 WDM DEMUX에서 WDM 파장할당에 따라 미리 정의된 원격노드(RN)로 전

송된 후, 광검출기에서 광혼합(optical mixing)에 의해 반송파용 고주파신호와 기저대역 데이터를 복원하게 된다. 이후, 적절한 중심주파수와 대역폭을 갖는 전기 필터를 통해 두 신호를 분리하여 사용하게 된다.

중앙기지국 측의 WDM 레이저 다이오드로 상향 광신호가 수신되면 안 되므로, WDM MUX 앞단에 광회전기(optical circulator)를 사용하거나 송신용 레이저다이오드 다음 단계 광커플러와 광아이솔레이터를 사용하여 하향 신호를 광학적으로 분리한 후, WDM DEMUX를 통해 수신 데이터를 복원하게 된다.

고주파 신호의 전송에 따른 수신 전력은 광신호의 파장 및 해당 파장에서의 분산값에 영향을 받으며, 이는 다음의 식(1)으로 표현되며, cos 함수의 제곱에 비례한다 [8].

$$P_{RF} \propto \cos^2 \left( \frac{\pi LD}{c} \lambda_0^2 f_{RF}^2 \right) \quad (1)$$

여기서  $L$ 은 전송 광섬유의 길이,  $\lambda_0$ 는 신호를 포함하여 전송하는 광신호의 파장,  $D$ 는  $\lambda_0$ 에 해당하는 광섬유의 분산 파라미터값,  $f_{RF}$ 는 광신호를 변조한 고

주파 신호의 주파수를 의미하며,  $c$ 는 빛의 속도를 나타낸다. 다음의 식(2)는 정해진 파장에 대해서, 수신 고주파 신호의 전력이 사라지는 극소점의 위치를 나타내는 식이며,  $N$  값에 따라 첫 번째, 두 번째, ..., 극소점의 위치가 된다.

$$L = \frac{Nc}{2D\lambda_0^2 f_{RF}^2}, \quad N = 1, 3, 5, \dots \quad (2)$$

식(2)로부터 WDM-RoF시스템의 고주파 신호 수신 전력은 각 WDM 채널의 사용 파장( $\lambda_0$ )에 따라 달라질 수 있으므로, 파장에 따른 고주파 신호의 수신전력을 계산하기 위해 16개의 WDM 채널 파장에 해당하는 SMF-28 광섬유의 분산값을 다음 식을 이용하여 구한다 [10].

$$D(\lambda) \approx \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right) \quad (3)$$

식(3)을 이용하여 단일모드 광섬유의 분산을 계산하여 표1에 정리하였고, 이 값들을 본 논문의 분석에 사용하였다.

표 1. 단일모드 광섬유의 파장에 따른 분산.  
Table. 1 Dispersion values of standard single mode fiber at different wavelengths

채널번호	파장 (nm)	분산(ps/(nm,km))
1	1542.94	16.68
2	1543.73	16.72
3	1544.53	16.76
4	1545.32	16.81
5	1546.12	16.86
6	1546.92	16.91
7	1547.72	16.95
8	1548.51	17.00
9	1549.32	17.04
10	1550.12	17.09
11	1550.92	17.13
12	1551.72	17.18
13	1552.52	17.22
14	1553.33	17.27
15	1554.13	17.32
16	1554.94	17.36

여기서  $\lambda_0$ 는 zero dispersion wavelength를 의미하며, SMF-28의 경우 1302 nm 에서 1322 nm 사이의 값을 가지며,  $S_0$ 는 zero dispersion slope을 의미하고 0.092 ps/(nm<sup>2</sup>·km) 이하의 값을 갖는 것으로 나타나 있다 [10]. 위의 계산에서,  $\lambda_0$ 는 1310 nm로 가정하였고,  $S_0$ 는 0.09 ps/(nm<sup>2</sup>·km) 로 가정하였다. 본 논문에서 분석하고자 하는 고주파 신호 수신전력은 최소 변화와 최대 변화의 차이가 전체 시스템 성능에 큰 영향을 미치므로, 위의 표에서 채널 1 (1542.94 nm), 채널 4 (1545.32 nm), 채널 8 (1548.51 nm), 채널 12 (1551.72 nm)와 채널 16 (1554.94 nm)을 선택하여 원격노드에서 광혼합(optical mixing)을 통해 생성되는 고주파 신호의 전력을 계산하였다.

그림 2는  $f_{RF}$ 가 12 GHz일 때 신호 전송거리에 따른 고주파 신호의 전력 변화를 서로 다른 5개의 파장을 선택하여 나타낸 그림이다. 채널 1, 채널 4, 채널 8, 채널 12와 채널 16에 대한 그림으로써, 고주파 신호의 변화가 일치하지 않음을 확인할 수 있으며, 거리가 증가함에 따라 편차가 점점 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 이러한 특성은 광섬유의 분산에 따라 달라지며, WDM채널에 해당되는 파장이 길어질 수록, 즉 채널 16에 가까울 수록, 분산값(D)이 커지므로, 식(2)로부터 수신 고주파 신호 전력의 극소점이 위치가 전송시작지점에 가까워지고, WDM채널에 해당되는 파장이 짧아질 수록, 수신 고주파 신호 전력의 극소점이 멀어짐을 확인할 수 있다. 수신 고주파 신호 전력의 극소점은 전송거리가 멀어짐에 따라 채널의 영향을 크게 받게 됨을 알 수 있다.

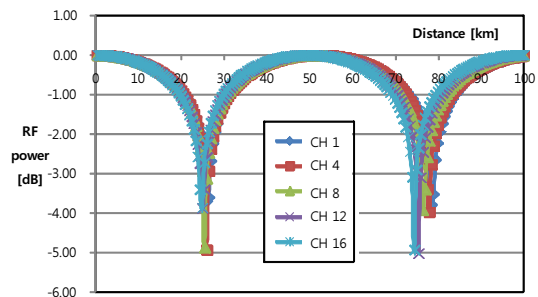


그림 2. 전송거리에 따른 고주파 신호의 전력 변화. (CH 1 : 1542.94 nm, CH 4 : 1545.32 nm, CH 8 : 1548.51 nm, CH 12 : 1551.72 nm, CH 16 : 1554.94 nm).  
Fig. 2 Power fluctuation of RF signal over transmission distance.

#### IV. 광결정 광섬유를 사용한 WDM-RoF 링크

순수 실리카로 이루어진 코어와 공기구멍이 주기적으로 배열된 클래딩 구조를 갖는 광결정 광섬유가 갖는 독특한 광학적 특성, 예를 들면, 광대역 단일모드 전송 특성, 구조 자유도에 의한 분산 및 편광 조절능력, 높은 비선형성 등에 대한 연구가 활발히 이루어져 오고 있다. [11],[12] 그 중에서도 특히 기존의 계단형 광섬유(step index fiber)가 갖지 못하는 분산 특성은 광결정 광섬유가 가지는 가장 매력적인 요소 중의 하나이다. 이러한 광결정 광섬유의 독특한 분산 특성 중에서도 통신용 파장대역인 1550 nm에서 큰 음의 분산값을 가짐으로서 단일 모드 광섬유의 누적 분산 값을 보상시킬 수 있다는 점이 광결정 광섬유의 중요한 특징 중 하나이며, 분산 보상 광섬유를 개발하기 위해 광결정 광섬유에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다 [13],[14].

본 논문에서 사용한 광결정 분산보상 광섬유(그림 3)는 분산 보상 광섬유의 일반적인 구조인 이중 코어 광섬유를 서로 다른 크기의 공기구멍을 이용해 내부 코어와 외부 코어의 이중 코어를 구성하였다. 일반적으로 광결정 광섬유에서의 이중 코어 구조는 실리카 내부 코어와 두 번 째 또는 세 번 째 공기구멍 겹에서 클래딩의 공기구멍 크기보다 작은 공기구멍을 갖는 외부코어를 갖는다. 이러한 구조를 이용하여 광섬유의 분산 값이 음의 기울기와 음의 값을 갖는 원리는 내부 코어에서 전송되는 광섬유의 모드가 외부 코어의 전송모드로 결합되는 특정 파장에서 광섬유의 유효굴절률(effective index)의 기울기가 꺾임으로부터 광섬유의 분산 값이 음의 기울기와 음의 분산값을 갖게 된다. 그러나 일반적인 이중코어 광결정 광섬유는 서로 다른 공기구멍의 크기를 변화하여 원하는 파장에서 최고의 음의 분산값을 가져야 하므로 구조변수를 최적화 하는 과정이 복잡하다. 본 논문에서 제안한 이중코어 광결정 광섬유는 내부코어에 가장 작은 공기구멍을 이용한 코어 결점을 이용하여 코어 결점의 크기 변화만을 통하여 최적화 파장을 조절할 수 있도록 설계하였다. 이러한 이중코어 광결정 광섬유의 분산 특성은 Beam Propagation Method (BPM) 과 Plane Wave Expansion Method를 이용하여 계산 및 검증하였다.

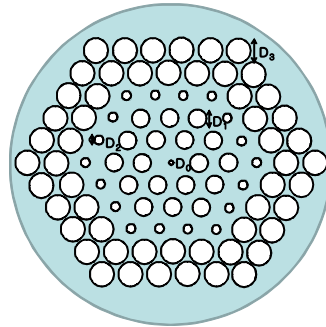


그림 3. 이중 코어 구조를 이용한 분산보상 광결정 광섬유의 단면도.  
Fig. 3. Power fluctuation of RF signal over transmission distance.

광결정 광섬유를 WDM-RoF에 사용하여 고주파 신호 전송특성이 개선됨을 확인하기 위하여, 표1에서 제시된 16개의 WDM 채널 파장과 광결정 광섬유를 사용했을 경우, 해당 채널의 파장에 해당하는 분산값을 표2에 정리하였다.

표 2. 광결정 광섬유의 파장에 따른 분산.  
Table. 2 Dispersion values of photonic crystal fiber at different wavelengths

채널번호	파장 (nm)	분산(ps/(nm,km))
1	1542.94	-120.16
2	1543.73	-120.19
3	1544.53	-120.22
4	1545.32	-120.25
5	1546.12	-120.29
6	1546.92	-120.32
7	1547.72	-120.35
8	1548.51	-120.38
9	1549.32	-120.41
10	1550.12	-120.44
11	1550.92	-120.48
12	1551.72	-120.52
13	1552.52	-120.55
14	1553.33	-120.58
15	1554.13	-120.61
16	1554.94	-120.64

그림 4는 설계한 광결정 광섬유를 포함한 WDM-RoF 링크에 대하여 5개의 샘플 채널에 대해 계산한 수신 고주파 신호의 전력변화를 보여주고 있다. 그림 4(a)는 0.5 km의 광결정 광섬유를 포함하여 전송한 경우이고, 그림 4(b)는 1 km의 광결정 광섬유를 포함하여 전송한 경우이다. 전송거리에 따른 단일모드 광섬유에 의한 누적 분산값이 감소되는 효과에 의해, 광결정 광섬유의 길이가 1 km로 증가되면 (그림 4(b)), 수신 고주파 전력의 극소점이 전송시작점에서 멀어지게 됨을 확인할 수 있다. 이러한 효과는 광결정 광섬유의 분산값이 증가할수록, 광결정 광섬유의 길이가 길어질수록 증가한다.

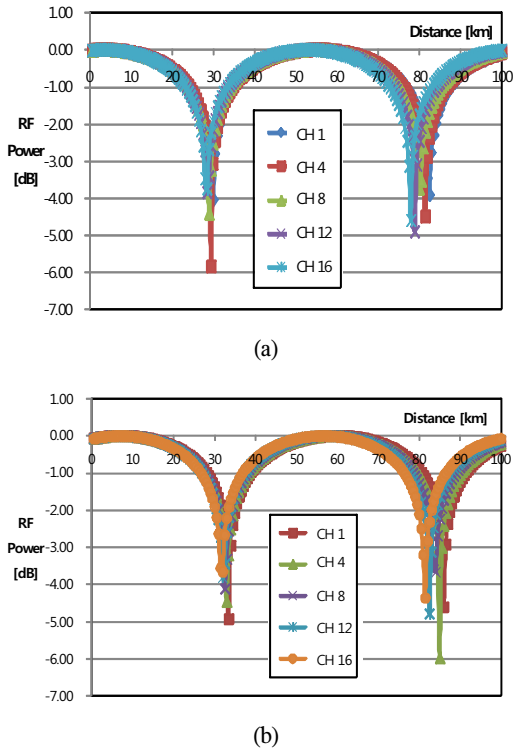


그림 4. 광결정 광섬유를 사용한 WDM-RoF시스템의 전송거리에 따른 고주파 신호 수신전력의 변화.  
 CH 1 (1542.94 nm), CH 4 (1545.32 nm), CH 8 (1548.51 nm), CH 12 (1551.72 nm), CH 16 (1554.94 nm).  
 Fig. 4 Power fluctuation of RF signal over transmission distance in WDM-RoF system employing photonic crystal fiber.

표 3. 수신 고주파 신호전력의 극소점 변화. (a) 단일모드 광섬유 링크, (b) 단일모드 광섬유 + 500 m PCF, (c) 단일모드 광섬유 + 1 km PCF.  
 Table. 3 Change in minimum points of RF signal over transmission distance.

채널번호	CH 1	CH 4	CH 8	CH 12	CH 16	
과장(nm)	1542.94	1545.32	1548.51	1551.72	1554.94	
(a)	1	26	26	25.5	25	25
	2	78.5	78	76.5	75.5	74.5
(b)	1	30	29.5	29	28.5	28.5
	2	82.5	81.5	80	79	78
(c)	1	33.5	33	32.5	32	32
	2	86	85	84	82.5	81.5

표 3은 수신 고주파신호 전력의 극소점을 표로 정리한 것이다. 표 3의 (a)열은 단일모드 광섬유 전송에 대해 계산한 첫 번째와 두 번째 극소지점을 의미하고, 표 3의 (b)열은 단일모드 광섬유와 0.5 km 광결정 광섬유, 표 3의 (c)열은 단일모드 광섬유와 1 km 광결정 광섬유에 대한 결과이다.

단일모드 광섬유 전송의 경우, CH 1으로부터 CH 16까지의 1차 극소점들의 차이가 1 km, 2차 극소점들의 차이가 4 km 이었으나, 0.5 km의 광결정 광섬유를 사용한 경우, 1.5 km, 4.5 km, 1 km의 광결정 광섬유를 사용한 경우, 1.5 km, 4.5 km의 극소점 편차를 나타내었다. 또한, CH 1에 대해 26 km에서 나타나던 설계된 광결정 광섬유 0.5 km를 사용함으로써 첫 번째 극소점을 30 km, 광결정 광섬유 1 km를 사용함으로써 33.5 km로 이동시킬 수 있었으며, 마찬가지로 CH 16에 대해 74.5 km에서 나타나던 두 번째 극소점을 78 km, 81.5 km로 이동시킬 수 있었다. 본 연구로부터 채널 간 고주파수신 전력 극소점의 편차는 증가되었으나, 광결정 광섬유를 사용함으로써 극소점의 위치조절이 가능함을 분석하였다. 이를 통해, WDM-RoF 신호를 이루는 여러 채널의 전송특성을 동시에 조절할 수 있다.

본 논문은 광결정 광섬유를 사용함으로써 WDM-RoF 시스템의 WDM 채널들의 고주파 신호 전력변화를 분석하여 보다 자유로운 WDM-RoF 시스템 설계가 가능함을 보이는데 초점을 두었다. 향후 각 채널에서의 전송 성능을 개선하기 위해 광결정 광섬유의 분산 특성을 최적화하는 것은 WDM-RoF시스템의 다채널 전송성능을 개선

하기 위한 필요한 연구가 될 것이다.

## V. 결 론

광통신 기술을 이용하여 무선통신신호를 전송하기 위한 파장분할다중화-무선광통신 (WDM-RoF) 시스템에서, 광결정 광섬유를 이용하여 채널 간 고주파신호들의 전력변화를 개선할 수 있음을 확인하였다. 기존의 단일모드 광섬유를 사용한 WDM-RoF 시스템의 광링크에 대해, 각 WDM 채널의 파장에 해당하는 분산값을 광결정 광섬유를 이용하여 조절함으로써 채널간 수신 고주파신호의 전력변화 특성 및 각 채널에 대한 수신 고주파신호 전력의 극소점 위치를 조절할 수 있음을 확인하였다. 이러한 채널 간 전력변화의 편차를 이해하기 위해, 광결정 광섬유의 분산보상 특성을 이용하여 WDM 채널에 따른 고주파 전송특성을 개선할 수 있는 광결정 광섬유를 설계하고, 이를 통해 채널간 고주파 전송특성의 편차를 분석하였다.

이를 통해, 전송거리 증가에 따른 채널간 고주파신호 수신 전력변화의 편차를 조절할 수 있으며, 이는 전체 WDM-RoF 시스템 설계시 WDM채널간 고주파신호 전력변화의 편차를 완화시키는데 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

## 감사의 글

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구결과(KRF-2009-0075271)로서, 관계부처에 감사드립니다.

## 참고문헌

[ 1 ] A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, T. Thomas, "LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology," *IEEE Wireless Communications*, vol. 17, no. 3, pp. 10 - 22, 2010.

[ 2 ] R.A. Griffin, H.M. Salgado, P.M. Lane, J.J. O'Reilly, "System capacity for millimeter-wave radio-over-fiber distribution employing an optically supported PLL," *J. Lightwave Technology*, vol. 17, no. 12, pp. 2480-2487, 1999.

[ 3 ] B. Wilson, Z. Ghassemlooy, I. Darwazeh, *Analogue optical fibre communications*, London, U.K.: IEE, 1995.

[ 4 ] A. K. Dutta, N. K. Dutta, M. Fukiwara, *WDM Technologies: Passive Optical Components*, San Diego, USA:Academic Press, 2003.

[ 5 ] I. Kaminow, T. Li, A. E. Willner, *Optical Fiber Telecommunications V*, Burlington, USA:Academic Press, 2008.

[ 6 ] H. Toda, T. Nakasyotani, T. Kuri, K.-I. Kitayama, "WDM mm-wave-band radio-on-fiber system using single supercontinuum light source in cooperation with photonic up-conversion," *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP 2004)*, pp. 161-164, Oct 2004.

[ 7 ] Z. Cao, J. Yu, H. Zhou, W. Wang, M. Xia, J. Wang, Q. Tang, L. Chen, "WDM-RoF-PON Architecture for Flexible Wireless and Wireline Layout," *J. Opt. Commun. Netw.* vol. 2, pp. 117-121, 2010.

[ 8 ] G. H. Smith, D. Novak, Z. Ahmed, "Overcoming Chromatic-Dispersion Effects in Fiber-Wireless Systems Incorporating External Modulators," *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. 45, no. 8, pp. 1410-1415, 1997.

[ 9 ] 김소은, 박철수, 이충규, "광결정 광섬유를 갖는 WDM-ROF 시스템의 고주파 신호전송특성 분석," *한국해양정보통신학회 논문지*, 제15권 1호, pp. 188-194, 2011.

[10] Corning, "Corining SMF-28 Optical Fiber: Product Information," PI1036, April 2002.

[11] J. C. Knight, T. A. Birks, P. St. Russell, and D. M. Atkin, "All-silica single-mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Opt. Lett.*, vol. 21, no. 19, pp. 1547-1549, 2006.

[12] T. A. Birks, J. C. Knight, and P. St. J. Russell, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt.*

Lett., vol. 22, no. 13, pp. 961-963, 1997.

- [13] F. Gerome, J. Auguste, and J. Blondy, "Design of dispersion-compensating fibers based on a dual-concentric-core photonic crystal fiber," Opt. Lett., vol. 29, no. 23, pp. 2725-2727, 2004.
- [14] Soan Kim, Chul-Sik Kee, "Dispersion properties of dual-core photonic quasicrystal fiber," Opt. Express, vol. 17, no. 18, pp. 15885-15890, 2009.

### 저자소개



**김소은(So Eun Kim)**

1997년 전남대학교 물리학과  
(이학사)  
2001년 광주과학기술원(GIST)  
정보통신공학과 (공학석사)

2006년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과  
(공학박사)  
2006년~현재 광주과학기술원 고등광기술연구소  
(APRI) 박사후연구원, 선임연구원  
※ 관심분야: 광섬유소자, 광통신시스템



**이충규(Chung Ghiu Lee)**

1997년 한국과학기술원(KAIST)  
전기 및 전자공학과  
(공학사)  
1999년 광주과학기술원(GIST)  
정보통신공학과 (공학석사)

2003년 광주과학기술원(GIST) 정보통신공학과  
(공학박사)  
2004년~2006년 한국광기술원(KOPTI) 연구원,  
선임연구원  
2006년~현재 조선대학교 전자공학과 전임강사,  
조교수, 부교수  
※ 관심분야: 광통신시스템, 광통신소자