

## 1. 서론

21세기를 맞아 세계는 부가가치의 원천이며 경제적 가치 창출의 핵심이 되는 지식과 정보, 이른바 지식 기반 경제로 급속하게 변모하고 있다. 이러한 산업 패러다임의 변화는 혁신적인 정보통신의 신기술에 의해 주도되고 있다. 이러한 정보통신 기술 중 넓은 대역폭과 적은 손실, 그리고 EMI(electromagnetic immunity) 등의 특징을 갖는 광통신 기술은 고속 디지털 통신 시스템, 액세스 네트워크, 가입자망 등에 적용되어 왔으며 현재 초고속의 통신 서비스를 핵심으로 하는 정보통신 분야의 핵심으로 자리 잡고 있다. 또한 앞으로 전개될 무선 인터넷 서비스와 같은 초고속 무선 멀티미디어 서비스를 위해서는 이러한 폭발적인 질적, 양적 증가를 이루고 있는 양 분야의 융합

신호를 광신호로 전광(E/O)변환할 경우 위상변조 및 주파수 변조를 하기가 어렵기 때문에 광변환 링크에서는 레이저 다이오드를 이용하는 직접변조기 또는 외부 변조기를 이용하여 크기변조 직접수신(IM-DD: intensity modulation direct detection)방법이 주로 사용되고 있다. 이러한 광 링크에서 정보가 담겨져 있는 무선신호를 부반송파로 사용하여 레이저 다이오드나 외부 광 변조기를 이용하여 광신호로 변조하게 될 경우 레이저 다이오드나 외부 광 변조기의 비선형성으로 인하여 각 기준 반송파의 harmonic 성분과 상호변조왜곡(intermodulation distortion)신호가 발생되고 이 비선형 성분들이 광 변환 링크의 동작영역(SFDR: spurious free dynamic range)을 제한하게 된다.

RoF 기반 광 링크에서의 전송 성능을 저하시키는 또 다

# 특집 ┃ Microwave photonics

## Radio over Fiber 링크 및 시스템 기술

한상국, 김정모 (연세대학교 전기전자공학과)

을 통해 서로의 장점을 극대화할 필요가 있으며 그에 따라 초고속 무선 접속 서비스가 이용될 주파수인 최대 60GHz까지 검도 대상 대역이 되어야 할 것으로 보인다. 무선 신호와 광신호의 융합 기술인 RoF(Radio-over-Fiber)<sup>[1]</sup> 기술은 저손실, 광대역의 특징을 제공하는 광통신 기술과 이동성을 제공하는 무선 통신 기술이 융합하여 언제, 어디서나, 다양한 광대역 멀티미디어 서비스를 제공하는 차세대 광대역 통합망(BcN: broadband convergence network)의 기초가 되는 차세대 기술이다. 이러한 RoF 시스템에서는 부반송파로 사용하는 RF 신호를 다중화하여 광파에 변조한 후 이 전광(E/O: electric-to-optic) 변환된 신호를 광섬유를 통해 전송하고 광 검출기를 통해 다시 광전(O/E: optic-to-electric) 변환되어 가입자에게 정보가 제공되는데 이와 같은 방식을 부반송파 다중화(SCM: subcarrier multiplexing)라고 한다. 무선

른 요인은 색분산 영향이다. 광 크기 변조시 발생하는 DSB(double sideband)가 광 주파수와 함께 광섬유를 통해 전송할 때 색분산(chromatic dispersion)을 겪어 DSB 간에 위상 차이가 발생한다. 이러한 보강 간섭(construction interference) 또는 상쇄 간섭(destruction interference)의 위상 조건에 의해 광 검출기를 통해 광전 변환된 RF 캐리어 전력이 특정 거리나 특정 주파수에서 감소 현상이 발생하는데 이를 DICS (dispersion-induced carrier suppression)라고 한다. 이는 사용 RF 주파수와 링크의 전송 거리가 증가할수록 그 정도는 더욱 악화되고 이날로그 광 링크의 전송 성능을 나타내는 대역폭 주파수와 전송 거리의 곱( $f^2 \cdot L$ )이 감소하게 된다.

따라서 이날로그 광 링크에서 전송 성능을 향상하기 위하여 광원 및 광 변조기의 선형화와 분산효과를 동시에 보상해야 하는 기술이 필요하다. 본 기고문에서는 이와

관련하여 RoF 시스템의 기본 구조와 개념 그리고 최근 발표된 논문과 특히 MWP 2005에서 발표된 논문들을 기반으로 RoF 링크에서 두 가지 성능 열화요소인 비선형성과 분산효과 제어 기술과 RoF 시스템의 경제성을 향상시키는 기술들을 분석하였다.

## 2. RoF 전송 시스템의 구조

일반적인 RoF 전송 시스템은 그림 1처럼 전기 신호인 RF 신호를 광신호로 전광(E/O) 변환시켜주는 중앙 기지국(CO: central office), 전광 변환된 광신호를 기지국(BS: base station)으로 전송시키는 광전송 링크(fiber-optic link), 그리고 광 수신기(optical receiver)를 통해 수신된 광신호에서 본래의 RF 신호를 추출하기 위한 기지국(BS)의 세 부분으로 구성된다.

중앙 기지국(CO)에서는 전광 변환을 위해 레이저 다이오드를 사용하는 직접변조와 외부 광 변조기를 사용하는 간접변조의 두 가지 기술을 일반적으로 이용한다. 직접 변조의 경우, 레이저 다이오드를 구동시키기 위한 바이어스 전류에 RF 신호를 더해준다. 이 변조된 바이어스 전류는 레이저 다이오드의 광 출력 신호를 변조시킨다. 이 변조 기술은 시스템 구성이 간단하고 가격이 저렴하다는 장점이 있다. 하지만, 주파수 chirping과 낮은 주파수 응답(frequency response) 등의 문제로 인해 10GHz 이하의 낮은 주파수 영역으로 사용이 제한된다. 이와 달리, 간접 변조의 경우 광신호의 발생과 변조가 분리되어 있어 광원이 낮은 잡음과 높은 전력을 가지도록 최적화할 수 있다. 이점 때문에 10GHz 이상의 높은 주파수 영역에서는 외부 변조기의 사용이 더 적합하다. 이러한 외부 변조기로

는 Mach-Zehnder 구조의 LiNbO3 광 변조기와 반도체 전계흡수 광 변조기(EAM: electro-absorption modulator)가 일반적으로 많이 사용된다.

광 전송링크에는 단일 모드(SMF: single-mode fiber)와 다중 모드(MMF: multi-mode fiber) 광섬유가 일반적으로 이용된다. 단일 모드 광섬유의 경우 다중 모드에 비해 분산율이 낮기 때문에 장거리 통신에 적합하며 지금까지 많이 이용되었다. 그러나 광통신 시스템의 발달로 광통신이 광범위하게 이용되면 최근 낮은 가격의 다중 모드 광섬유가 건물 내부의 인트라넷이나 소규모 도시의 통신망으로 주목을 받고 있다. 이러한 광섬유는 기존의 구리선 통신망에 비해 매우 낮은 손실(0.2dB/km at 1550nm)과 넓은 대역폭을 제공한다. 하지만, 비선형 매질인 광섬유 자체의 분산과 비선형 특성은 RoF 시스템에서 전체 시스템의 성능을 악화시키는 요인으로 작용할 수 있다. 또한, 반도체 광 증폭기(SOA: semiconductor optical amplifier)나 Er-첨가 광섬유 증폭기(EDFA: erbium-doped fiber amplifier)는 자체의 잡음과 비선형 특성이 있으므로 주의해서 사용해야 한다.

부기지국의 광 수신기는 전송된 광신호로부터 본래의 RF 신호를 복원한다. RoF 시스템에서 사용되는 광 수신기의 경우 고려해야 될 사항이 몇 가지 있는데, 우선 광 검출기의 구조이다. 기존의 수직 pin 구조의 광 검출기(PD: photodiode) 경우, 구조적인 특징 때문에 대역폭과 효율 사이에 트레이드오프가 있다. 이런 제한을 극복하고자 흡수 효율의 손실없이 대역폭을 늘리기 위해 고속 도파로 구조의 광 검출기(waveguide photodiode)나 진행파 광 검출기(traveling-wave photodiode) 등에 대한 많은 연구가 진행되었다. 다음은 광 검출기의 포화 전력이다.

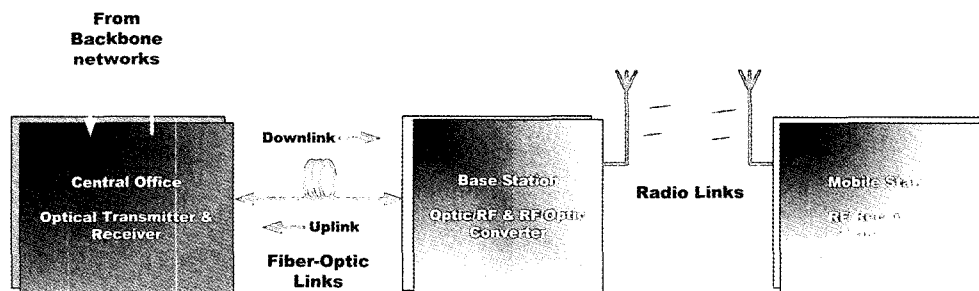


그림 1. RoF 시스템의 기본적인 구조

광 검출기의 포화 전력이 높을수록 높은 전력의 광신호를 수신할 수 있다. 이는 높은 광전류(photo-current)를 생성으로 이어지기 때문에, 비싼 가격의 전기 후방 증폭기(electric post-amplifier)의 사용을 줄일 수 있는 이점이 있다. 또한, 높은 효율과 저 가격의 광 수신기를 위해서는 다른 전기 소자와의 단일 칩 집적이 필수적이다.

### 3. RoF Access 시스템

유무선 통신망이 융합된 RoF 기술 또는 Microwave Photonics 기술에서 더 많은 대역폭을 가입자에게 전달하기 위해 광전/전광 변환 및 무선 링크 분야에서 밀리미터 파 대역, 특히 60GHz의 주파수 대역에 관심이 집중되고 있다. 이 대역의 주파수는 광대역 특성과 대기 중 산소 분자에 의한 전파의 흡수현상 때문에 동일 채널 간섭현상이 작아 주파수 재사용 효율이 높으므로 경제적인 시스템 구성이 가능하고, 파장이 밀리미터 단위로 아주 작기 때문에 안테나 및 RF 송수신기의 소형 경량화가 가능하다. 하지만, 안테나 셀(cell) 반경이 좁아 많은 수의 기지국이 요구되기 때문에, 기지국의 구조를 단순화하여 가격을 줄이는 것이 필수적이다. 또한 밀리미터 대역 무선 신호는 직진성으로 말미암아 LoS (Line-of-Sight) 환경이 확보되어야 하며 표면 감쇄 현상이나 산란의 문제점이 있다. 하지만, 이러한 문제점들은 RoF 시스템을 이용하면 극복 가능하여 실내 무선랜 등 단거리 대용량 멀티미디어 송수신에 응용이 가능하다.

이러한 RoF 액세스 시스템을 구조적인 측면에서 살펴보면 중앙 기지국(CS)과 기지국(BS) 사이의 신호처리 및 전달 방식에 따라 다음과 같이 RF-over-Fiber, IF-over-Fiber 및 Baseband-over-Fiber 등 3가지로 나눌 수 있다.

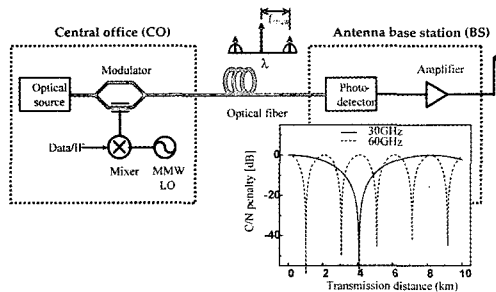


그림 2. RF-over-Fiber 전송방식

### 가. RF-over-Fiber 전송 방식

$\mu$ -mm-주파수 대역 RoF 액세스 시스템에서 원격지의 기지국과 가장 간단하게 접속할 수 있는 방법으로써  $\mu$ -mm-주파수 대역의 RF 신호를 상향/하향 주파수 변환 없이 고속 광 변조기(optical modulator)를 사용해 전광 변환한다. 변조된 광 신호는 광 링크를 통해 전송된 후 기지국(BS)에서 검출된다. 이러한 방식을 '크기 변조/직접 수신(Intensity-modulation/direct-detection)' 이라고도 불린다. 아래 그림 2는 RF-over-Fiber 전송 방식을 나타낸 것이다.

위 그림 2에서 볼 수 있듯이 RF-over-Fiber 전송 방식에서는 기지국(BS)에서 검출된 RF 신호들이 전기적으로 증폭된 뒤 바로 무선 안테나 링크를 통해 전송되기 때문에 기지국(BS)을 간단하고 저렴하게 구성할 수 있다. 또한  $\mu$ -mm-주파수 대역의 고속 광 변조기(optical modulator), 국부 발진기(local oscillator(LO)), 전기적 믹서 등과 같이 복잡하고 고가의 소자들을 중앙 기지국에 집중하고 다수의 기지국(BS)들이 공유하게 함으로써 기지국(BS) 증설에 따르는 가격적 부담을 줄일 수 있다.

그러나 이 방식은 광섬유 색분산의 영향에 민감하여 수신되는 RF 신호가 전송거리나 변조 주파수에 따라 주기적으로 감소하는 DICS 현상이 문제점으로 작용한다. 그러므로 이 같은 분산의 영향을 줄일 수 있는 효과적인  $\mu$ -mm-주파수 대역의 변조 방식을 위해 광학적 SSB 변조(optical single sideband modulation) 또는 chirped fiber Bragg grating 기반의 분산에 대한 영향이 적은 RF-over-Fiber 전송 방식에 대한 연구가 진행되고 있다.

### 나. IF(or Baseband)-over-Fiber 전송 방식

광섬유를 통해 밀리미터파 대역의 RF 신호를 전송하는 것에 비해 IF 신호를 전송하는 것이 광신호의 분산에 대한 영향이 훨씬 적다. 예로써 표준 단일모드 광섬유 상에서 2GHz의 신호를 7km 전송할 경우 수신단에서 CNR(Carrier-to-Noise Ratio)은 0.1dB 이하 감소하지만 동일한 전송거리에 대해 30GHz의 밀리미터파 신호를 전송할 경우 수신단에서 CNR이 10dB 이상 감소된다.

IF-over-Fiber 전송 방식에서는 RF-over-Fiber 전송 방식처럼  $\mu$ -mm-주파수 대역에서 동작하는 고속의 광소

자가 필요 없기 때문에 저가의 광소자를 사용할 수 있는 이점이 있다. 또한 RF 신호에 비해 상대적으로 낮은 IF 주파수를 사용하기 때문에 링크의 효율이 높다. 그러나, IF-over-Fiber 전송방식은 아래 그림 3에서 볼 수 있듯이 기지국(BS)에서 검출한 IF 신호의 상향 주파수 변환을 위해 밀리미터파 주파수 영역에서 동작하는 국부 발진기(LO)와 믹서가 요구되므로, 기지국(BS)의 구조가 복잡해지고 결과적으로 전체 시스템의 가격 증가의 원인이 된다. 이 때문에 RF 주파수의 변환이나 밀리미터파 대역의 무선 채널 추가와 같은 무선 네트워크 재구성 및 개선은 용이하지 않다.

IF-over-Fiber 전송 방식의 RoF 시스템에서 기지국(BS)의 국부 발진기(LO)에 대한 요구는 중앙 기지국(CO)에서 국부 발진기(LO) 신호를 원격 공급함으로써 해결할 수 있으며 중앙 기지국(CS)에 집중 제어되어 원격으로 공급되는 국부 발진기(LO) 신호의 복원에 관해서는 광이나 전기적인 필터링 기술에 의한 여러 가지 방안들이 연구되고 있다.

## 4. RoF 링크 및 시스템의 기술적 이슈

### 가. 경제성 확보를 위한 기술

기본적으로 RoF 시스템이 적용되기 위해서는 타 경쟁 시스템과 비교하여 경제성을 확보해야 한다. 그러나 기존의 RoF 기술은 광대역성, 저손실등의 장점을 갖고 있지만 상대적으로 비싼 광소자와 광섬유 때문에 경제성을 확보하는데 어려움이 있다. 특히 링크의 길이가 증가할수록 일반적인 SMF를 사용하면 실제 시스템의 구축에 있어 고비용의 문제가 심각해진다. 최근 이러한 문제점을 해결하기 위해 저가의 MMF를 이용하여 RoF 링크 및 시스템을 구축하기 위한 연구가 진행되고 있다. 특히 영국의 케

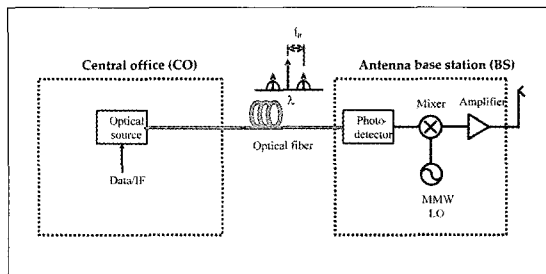


그림 3. IF-over-Fiber 전송 방식

임브리지 대학에서는 MMF를 이용한 RoF 기술의 가능성을 제시하고 이를 실험적으로 증명하였다<sup>[2]</sup>.

주파수에 대한 응답특성이 단조 감소하는 일반적인 SMF와는 달리 MMF의 주파수 응답 특성은 그림 4 (a)와 같이 반복적인 특성을 보이기 때문에 특정 고주파대의 RF 신호를 전송하는 것이 가능하다. 시스템에 사용된 광원은 1.3um 대역의 파장을 갖는 시스템에 사용된 광원은 1.3um 대역의 파장을 갖는 DFB-LD를 이용하였으며 시스템의 실험도는 그림 4 (b)와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 최대 25GHz의 RF 신호를 이용하여 10Gb/s DFB-LD를 직접 구동하였으며 이 신호를 MMF를 이용해 전송하여 특성을 분석하였다. 54Mb/s OFDM 신호를 이용한 경우 20GHz까지의 영역에서 최대 EVM이 4.66% 미만으로 IEEE 802.11a/g WLAN 규격에 적합하다. 따라서 가격이 저렴한 MMF를 이용해도 20GHz 이상의 주파수 범위 내에서 효율적인 링크 구성이 가능하다.

또한 미국의 코닝사에서는 MMF를 이용한 RoF 링크의 특성을 분석한 논문을 발표하였다<sup>[3]</sup>. 이 구조에서는 경제성을 고려하여 저가의 MMF와 저가의 광원으로 850nm 대역의 VCSEL(vertical-cavity surface emitting laser)이 사용되었으며 실제 그림 5 (a)와 같은 구조를 가정하여 MMF를 이용한 RoF 링크의 성능을 모의실험 하였다. 그림 5 (b)는 공간의 각 위치에 대하여 수신된 전력의 크기를 보여준다.

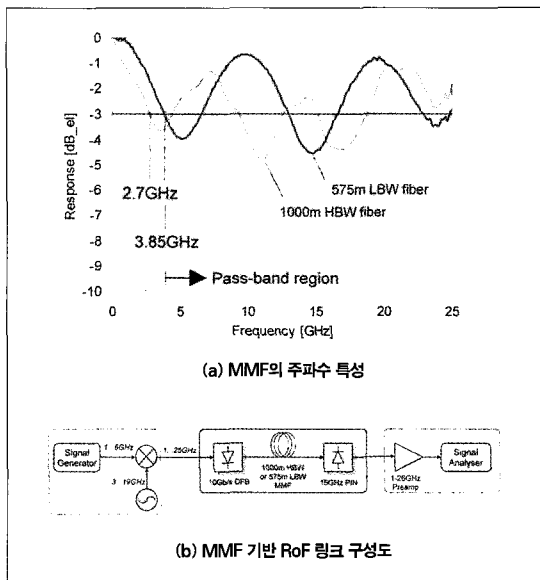


그림 4. MMF를 이용한 RoF 링크

# Radio over Fiber 링크 및 시스템 기술

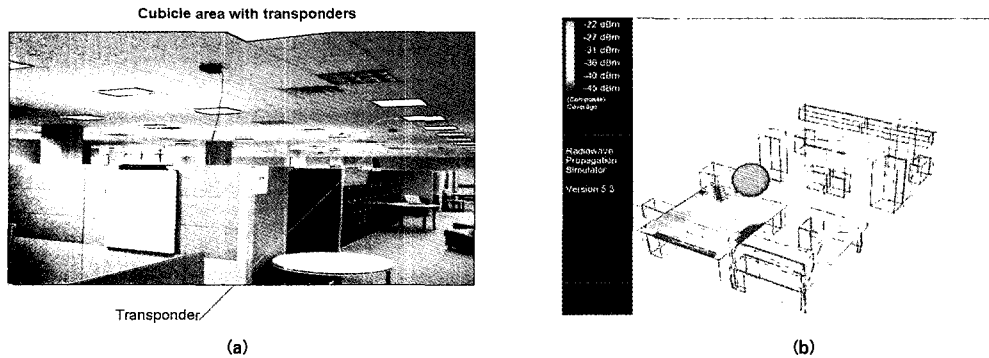


그림 5. (a) 실험에 사용된 가상 공간, (b) 각 위치에서의 수신된 전력 모의실험 결과

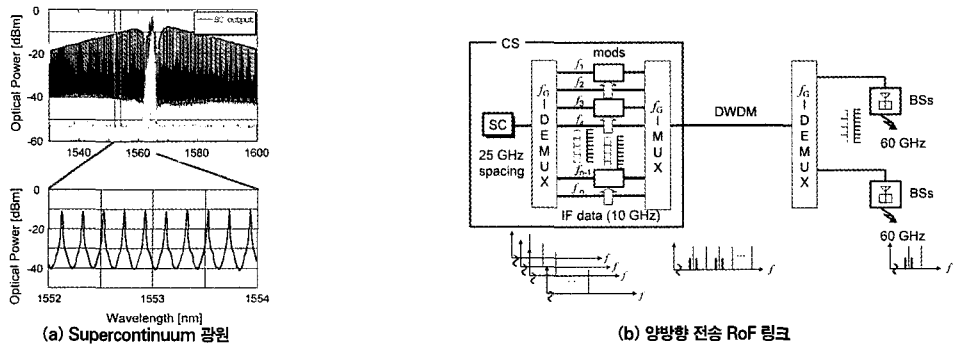


그림 6. Supercontinuum 광원을 이용한 양방향 RoF 링크

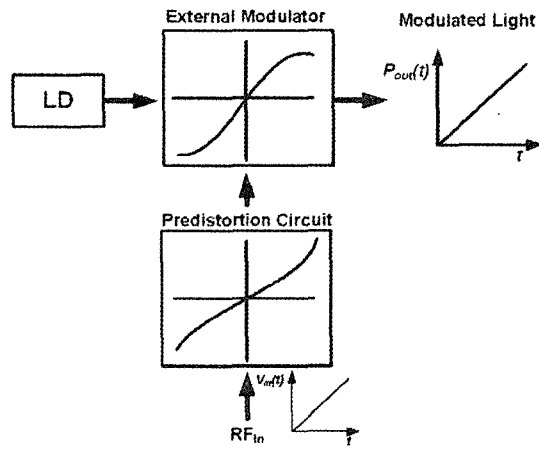
위의 두 연구가 주로 RoF 링크 구성요소 중 광섬유의 경제성 제고를 위한 것이다. 그러나 실제 시스템의 구축에 있어서는 다수의 광원이 필요하므로 이들 광원의 비용 또한 중요한 변수가 된다. 이와 관련하여 Doshisha 대학과 오사카 대학 그리고 NICT에서는 공동으로 그림 6(a)와 같이 supercontinuum 광원을 이용하여 그림 6(b)의 양방향 RoF 링크를 구현하였다<sup>(4)</sup>. 기존의 RoF 링크에서 여러 개의 광원을 이용하는 것과 달리 본 논문에서는 supercontinuum 광원을 이용하여 그림 6(a)와 같이 하나의 supercontinuum에서 일정 간격을 갖는 여러 개의 파장을 얻을 수 있어 가격 경쟁력을 크게 향상시킬 수 있다.

이 supercontinuum 광원을 이용하여 광원을 생성하고 그림 6(b)와 같이 10GHz의 IF를 인가하여 변조하면 비선형에 의해 60GHz의 밀리미터파를 base-station에서 얻을 수 있다. 이러한 시스템은 필요한 광원의 수를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 up/down conversion에도 별도의 소

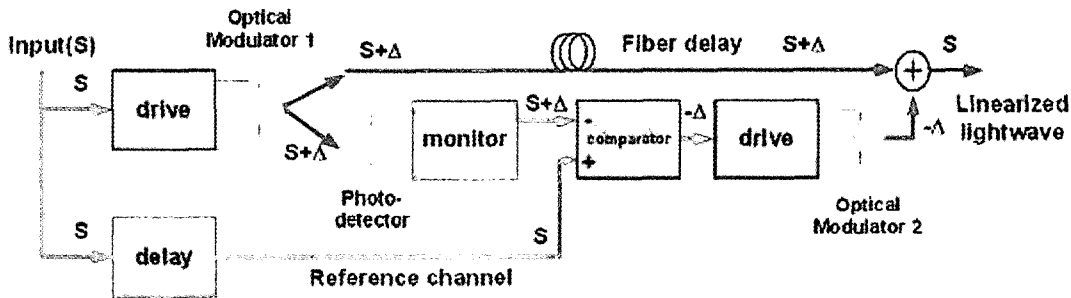
자가 필요 없어 실제 시스템의 구축에 있어 여러 가지 장점을 지닌다. 제안된 구조와 기술을 이용하여 60GHz의 밀리미터파 신호를 25km까지 성공적으로 에러 없이 전송하였다.

## 나. 광원 및 광변조기의 선형화 기술

RoF 시스템은 디지털 광통신 시스템과 달리 그 특성상 아날로그 신호인 RF 신호를 다루기 때문에 신호의 선형적인 전광(E/O), 광전(O/E) 변환이 무엇보다 중요하다. 하지만, 레이저 다이오드와 광 변조기와 같은 일반적인 광 송신기는 비선형 소자이다. 즉, 전광(E/O) 변환을 위해 RF 신호를 인가할 경우 소자 자체의 비선형 특성으로 인해 원치 않는 비선형 신호가 생성된다. 이러한 비선형 신호들은 전송 RF 신호에 대해 잡음으로 작용하여 전체 RoF 시스템의 성능을 악화시키는 요인으로 작용한다. 지금까지 비선형적인 광 송신기를 선형화하기 위해 많은 연



(a) Pre-distortion circuit 기술



(b) Feed forward compensation 기술

그림 7. 대표적인 선형화 기술

구가 진행되어 왔으며 이 중에서 선 왜곡 회로(pre-distortion circuit)와 전방 유도 상쇄(feed-forward compensation) 기법이 가장 대표적이다.

선 왜곡 기법의 경우 아래 그림 7(a)처럼 광 송신기의 비선형성과 역함수 관계를 가지는 전기 회로를 이용해 미리 왜곡된 RF 신호를 광 변조기에 인가시킨다<sup>6)</sup>. 이 경우 전기 회로와 광 송신기는 서로 역함수의 관계를 가지기 때문에 두 비선형 특성이 서로 상쇄되어 광 변조기가 선형화 되는 원리이다. 하지만, 선 왜곡 기법을 적용한 시스템의 주파수 응답은 전기 회로에 종속되는 문제점을 가지게 된다. 그러므로, 전기회로의 주파수 응답이 따라가지 못하는 고주파 영역에서는 RoF 시스템의 동작에 제약이 따르게 된다. 그림 7(b)는 전방 유도 상쇄 기법을 나타낸 것이다. 전방 유도 상쇄 기법은 본래의 왜곡된 광 신호를 전달하는

위쪽 부분과 왜곡된 광 신호에서 비선형 왜곡 성분을 추출하는 아래쪽 부분으로 구성된다<sup>6)</sup>. RF 신호에 의해 변조된 광 신호는 두 부분으로 분기되어, 비선형 왜곡 성분만이 광전(O/E) 변환을 거쳐 추출된다. 이 추출된 왜곡 성분은 다시 전광(E/O) 변환되어 본래의 왜곡된 광 신호와 합쳐진다. 이 과정에서 원래의 광 신호의 왜곡 성분과 새로이 합쳐진 광 신호의 왜곡 성분이 서로 180°의 반대되는 위상 조건을 가지게 되면 비선형 왜곡 성분은 상쇄 간섭을 일으켜 없어지면서 선형화가 이루어지게 된다. 그러나, 왜곡 신호를 추출하는 과정에서 생기는 시간 지연 때문에 위쪽 링크와 아래쪽 링크의 동기를 맞추는 것이 어려움에 따른다. 앞서 소개한 두 기술의 경우 전기 회로와 관련된 부분 때문에 고속 동작에 어려움이 따른다. 이런 문제를 해결하고자 이중 병렬 구조와 같은 전광 선형화 기법

이 제안되고 연구되고 있다.

위의 선형화 방법 중 UCL(University College London)에서는 RoF 링크에서 광원으로 사용되는 DFB-LD의 선형성을 높이기 위해 feed-forward 기법을 적용하여 논문에서는 5.8GHz에서 DFB-LD를 선형화 하였다<sup>7)</sup>. 그림 8은 feed-forward 기법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 수신된 rf 파워를 측정 한 것이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 feed-forward 기법을 사용하여 DFB-LD를 선형화 한 경우에 인접 잡음이 약 20dB, IMD가 12dB 억제되었다. 16QAM 신호를 이용하여 전송한 경우 feed-forward 기법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우를 비교하면 feed-forward 기법을 사용한 경우 EVM이 약 15%이상 향상되었다. Feed-forward 기법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 비교에서 알 수 있듯이 feed-forward 기법을 사용한 경우 전송성능이나 선형성 향상 비선형성 억제와 같은 여러 가지 장점을 얻을 수 있으며 이러한 효과들은 실제 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

## 다. RoF 광전송 및 광섬유의 색분산 (chromatic dispersion) 제어 기술

광 신호를 RF 신호를 이용해 크기 변조할 경우 변조된 광 신호는  $\lambda_c$ 의 파장을 가지는 광 반송파를 중심으로 변조 주파수  $f_{LO}$ 만큼 떨어진 위치에 두 개의 사이드 밴드가 존재하는 DSB(double sideband) 스펙트럼을 가지게 된다. 이 DSB 스펙트럼의 광 신호가 분산 매질인 광섬유를 통해 전송할 경우, 광섬유 색분산의 영향으로 두 사이드 밴드는 광섬유 진행과정에서 서로 다른 위상변화를 겪게 된다. 두 사이드 밴드의 상대적인 위상차에 따라, 광 검출기에서 검출된  $f_{LO}$  주파수의 RF 신호는 그림 9와 같이 전송 거리나 변조 주파수에 따라 주기적으로 감소하는 현상을 보이게 된다.

이러한 현상을 DICS 효과라고 하며, RoF 시스템의 전송 성능을 악화시키는 요인으로 작용한다<sup>8)</sup>. 이러한 DICS 현상은 식 1과 같이 표현할 수 있으며  $I_r$ 는 수신된

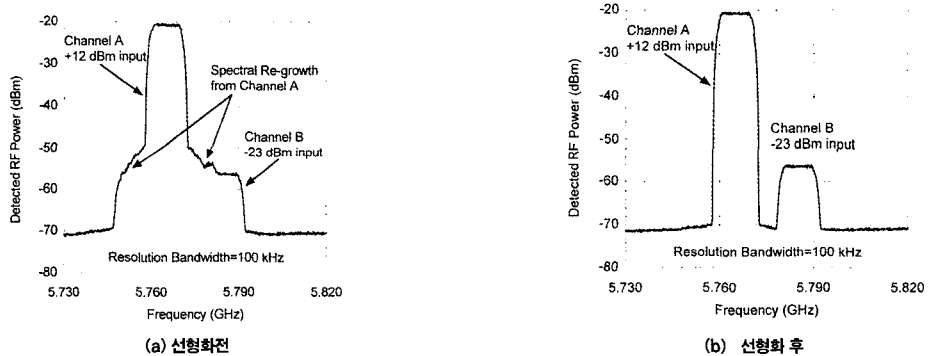


그림 8. Feed-forward 기법을 이용한 DFB-LD 선형화 측정

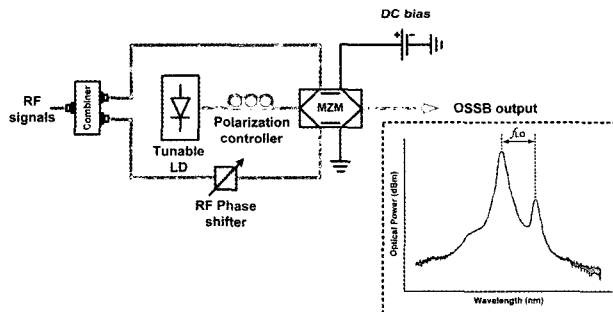


그림 9. RoF 링크에서 분산 효과의 영향

RF 신호의 전력을 의미한다. 식 1에서 알 수 있듯이 DICS 현상은 전송거리와 RF 신호 주파수의 함수이다.

$$I_f = I_0 m \sqrt{1+a^2} \left| \cos \left[ \frac{\pi \lambda^2 D L f^2}{c} + \arctan(a) \right] \right| \quad (1)$$

지금까지 DICS 현상을 해결하기 위해 여러 연구가 진행되었고 가장 대표적인 기술이 광학적 SSB 변조 기법이다. 광학적 SSB 신호의 광 스펙트럼은 RF 변조 신호에 의한 두 개의 사이드 밴드 중 하나가 존재하지 않는다. 그러므로, 광학적 SSB 스펙트럼을 가지는 광 신호를 광 전송 링크를 통해 전송할 경우 광 검출기에서 RF 신호 검출과정에서 상쇄간섭을 일으킬 사이드 밴드의 대상이 없기 때문에 DICS 현상이 발생하지 않는다. 이러한, 광학적 SSB 스펙트럼을 가지는 광 신호를 생성하기 위해 광학적 필터를 사용해 한 쪽 사이드 밴드를 잘라 내거나 그림 10처럼 이중 전극 MZM 광 변조기의 변조 특성을 사용해 SSB 신호를 생성시키는 것이 일반적이다. 하지만, 광학적 필터

를 사용할 경우 협대역의 필터를 제작하는데 어려움이 따르기 때문에 일반적으로 이중 전극 MZM 광 변조기를 사용해 광학적 SSB 신호를 만들어 낸다. 하지만, 이중 전극 MZM 광 변조기라는 특별한 소자가 필요하고 두 개의 전극에 서로 180°의 위상차를 가지는 RF 신호를 인가할 때 위상 변화에 민감하다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위하여 최근 반도체 광증폭기를 이용한 광학적 SSB 생성기법도 연구되었다<sup>9)</sup>.

또한 최근의 또한 최근의 RoF 시스템의 경우 시스템의 다양화 및 대용량 데이터 전송을 위해 밀리미터파 대역의 고주파 carrier 신호의 사용이 연구되고 있다. 차세대 무선 멀티미디어 서비스는 최소 100Mbps 이상의 초고속 데이터 전송을 요구하고 있으며, 이 같은 가입자의 요구에 맞추어 RoF 기술에서는 다양한 정보가 담긴 대용량 RF 신호를 30GHz 이상의 밀리미터파로 변조하여 직접 광으로 전송함으로써 각 기지국의 설비 및 기지국간의 통신망을 보다 간단하게 할 수 있다. 이러한 RoF 시스템 구현에 있어서 반드시 극복되어야 할 기술이 소형화된 광 변조기다. 광 변조기는 밀리미터파 대역에서 변조된 광신

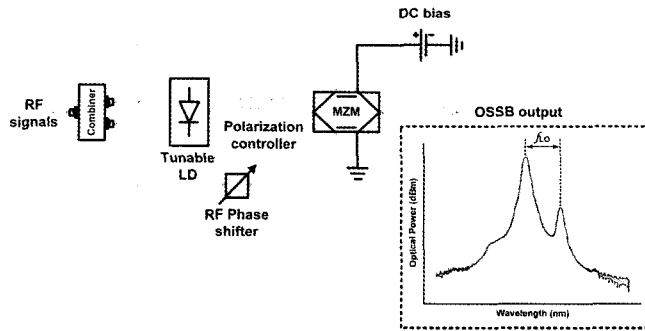
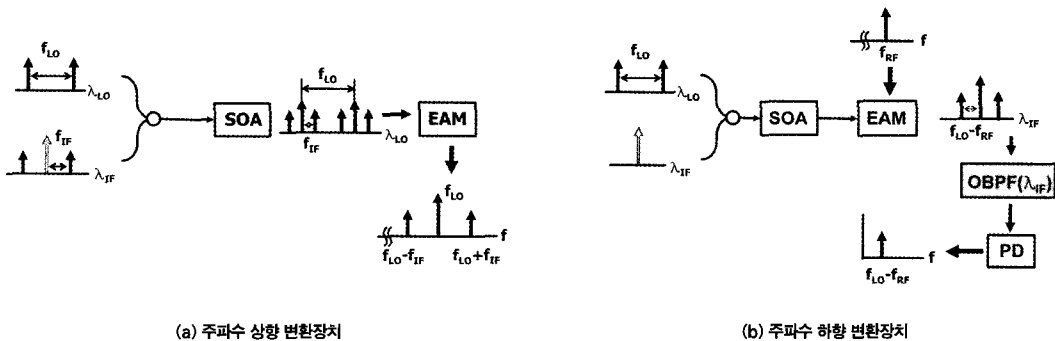


그림 10. Dual-drive MZM을 이용한 OSSB 생성



(a) 주파수 상향 변환장치

(b) 주파수 하향 변환장치

그림 11. SOA와 EAM을 이용한 주파수 상향 및 하향 변환장치



호의 안정성과 전광변환의 선형성이 보장되어야 하며, 전광(E/O), 광전(O/E) 변환이 간결한 단일 직접소자 내에서 이루어져야 한다. 이는 안테나 셀(cell) 환경이 줄어들면 다수의 기지국(BS) 수요가 예상되므로 간단한 구조로 경제성을 확보하여야 하기 때문이다. 이러한 밀리미터파 대역의 전송에 있어 DICS 현상을 해결하고 주파수를 상향 및 하향으로 변환하기 위하여 중요한 요소 중의 하나가 광학적 주파수 상향 및 하향 변환장치이다. Base-station에서 밀리미터파로 up conversion 하고 상향 전송 시에는 base-station에서 IF 단으로 신호를 down conversion 하는 과정이 필요하다. 또한 이러한 주파수 변환장치는 실제 시스템의 적용을 위해서는 그 구조가 간단하고 변환효율이 우수해야 한다. MWP 2005 에서도 이와 관련하여 다수의 논문이 발표되었다. 연세대학교와 ETRI에서는 공동으로 그림 11과 같은 SOA와 EAM을 이용한 60GHz급 주파수 상향 및 하향 변환장치를 적용한 RoF 시스템을 제안하였다<sup>[10]</sup>. 이 방법은 SOA의 비선형 현상중의 하나인 상호이득변조(XPM: cross-gain modulation)를 이용하여 별도의 소자 없이 주파수 변환장치를 구성한 것이다. 제안된 시스템의 경우 SOA와 EAM만으로 간단하게 BS를 구성할 수 있고 DICS 문제도 해결하였으며 SOA 자체의 이득으로 상대적으로 큰 변환효율을 얻을 수 있다는 장점이 있다.

GIST에서는 그림 12와 같이 semiconductor optical amplifier-Mach-Zehnder interferometer(SOA-MZI)를 이용한 optical mixing 방법을 적용한 RoF 시스템을 제안하였다<sup>[11]</sup>. 이 방법은 SOA-MZI의 비선형 현상중의 하나인 상호위상변조(XPM: cross-phase modulation)를 이용한 것으로 제안된 SOA-MZI는 단일 구조로 주파수 상

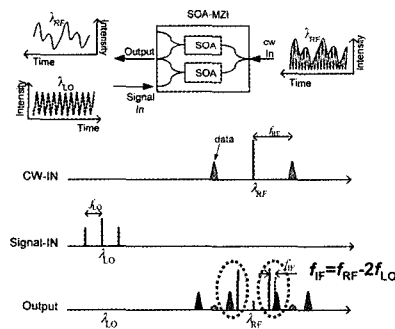


그림 12. SOA-MZI를 이용한 주파수 하향 변환 장치

향 변환 및 주파수 하향 변환을 동시에 수행할 수 있으며 SOA의 이득으로 변환효율 또한 상당히 커서 실제 시스템의 적용에 큰 장점을 가지고 있다.

프랑스의 Institut de Microelectronique에서는 주파수 상향 변환을 위해 그림 13와 같은 위상변조기(phase modulator)를 이용하여 IF와 LO를 mixing한 후 single mode fiber의 분산(dispersion)으로 인한 PM(phase modulation)-to-IM(intensity modulation) conversion을 이용한 논문을 발표하였다<sup>[12]</sup>. 이러한 접근방법은 기존에 송신의 문제점으로 여겨졌던 분산을 역으로 이용하여 분산으로 생기는 위상변화를 크기변화로 변환하여 주파수 변환에 이용하는 장점이 있다. 실험에서는 100 Mb/s, 500 Mb/s, 그리고 1 Gb/s으로 변조된 BPSK 신호가 이러한 방법을 통하여 25 km의 fiber link에서 성공적으로 up-conversion 하였다. 제안된 방법은 위상변조기만을 사용하기 때문에 별도의 소자가 필요없다는 장점과 상향변환되는 주파수를 단지 SMF의 길이만 바꾸어서 조절할 수 있다는 장점이 있다.

## 5. RoF 기술 응용

최근 광대역 가입자망의 중요성과 필요성이 대두되면서 RoF 기술이 각광을 받고 있다. 하지만, 앞서 언급한 기존의 RoF 시스템의 구조로는 중앙 기지국(CO)과 기지국(BS) 사이에 각각 광원과 광 검출기가 요구되기 때문에 전체 RoF 시스템의 규모가 커질 경우 기지국을 증가로 인한 비용(Cost) 증가가 문제점으로 작용한다. 때문에 간단한 기지국(BS) 구성이 RoF 기술을 이용한 광대역 가입자망 구축에서는 중요한 문제이다.

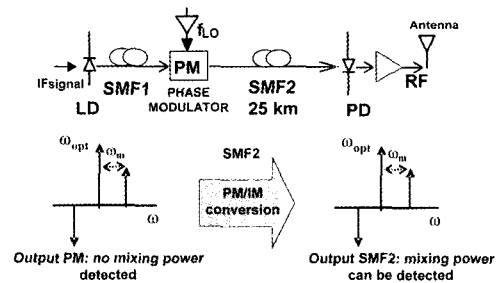


그림 13. 위상변조기와 SMF를 이용한 주파수 상향 변환

지금까지 이와 관련된 여러 연구가 진행되었으며, 중앙 기지국(CO)의 광 파장을 기지국(BS)에서 공유하여 필요한 광원의 수를 줄이는 형태의 RoF 액세스 시스템에 관해 최근 많은 연구결과가 발표되었다. 하지만, 기지국(BS)에서 하향 통신의 광원을 공유할 경우 상향 통신 과정에서 전송과정의 손실 때문에 링크 버짓(link budget)의 문제점이 발생한다. 또한, 중앙 기지국에서 전송한 광신호를 기지국(BS)에서 공유하기 위해서는 양방향 방향 광소자(bi-directional optical device)의 사용이 필수적이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 RoF 기술을 적용한 양방향 액세스 시스템에 관한 연구가 진행되었으며, 여기에서는 본 연구전에서 수행한 연구내용을 소개한다.

### 가. Dual-function EAM을 이용한 무선 액세스 망(Wireless access network)용 기지국(Base station) 구조

제한한 양방향 기지국 구조는 그림 14와 같이 SOA와 EAM이 직렬로 연결된 구조를 가진다. 기지국의 EAM은

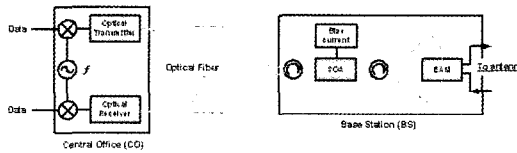


그림 14. 제한한 SOA와 EAM을 이용한 기지국(BS) 구조

광 변조(modulation)과 광 검출(photo-detection)을 동시에 수행할 수 있는 광소자로서 앞서 설명했듯이 현재 RoF 시스템에서 널리 사용되고 있는 고속 변조기이다. EAM의 이러한 기능을 이용한 양방향 시스템은 이미 많은 연구가 진행 되었다. 하지만, EAM만을 사용한 구조의 경우 EAM이 PD로 동작하도록 설계되지 않았기 때문에 광 검출 효율(photo-detection efficiency)이 좋지 않아 하향 링크에서 RF 신호의 검출 효율이 좋지 않으며, 하향 링크의 광신호를 공유하기 때문에 광신호 손실로 인해 상향 링크에서 링크 버짓의 문제점이 발생한다. 또한, 고주파의 RF 신호를 바로 전송하기 때문에 상향 링크에서 광섬유 색분산에 의한 DICS 현상이 발생할 수 있다.

제한한 기지국(BS)의 경우 이러한 문제를 해결하고자 SOA를 이용하였다. 중앙 기지국(CO)에서 전송된 신호는 기지국(BS)의 SOA를 먼저 거치게 된다. 이때 SOA에서 제공하는 광 이득(gain)에 의해 EAM의 광 검출 효율을 향상시킬 수 있다. EAM에서 검출된 RF 신호는 안테나에서 무선 링크(wireless) 링크를 통해 각 가입자에게

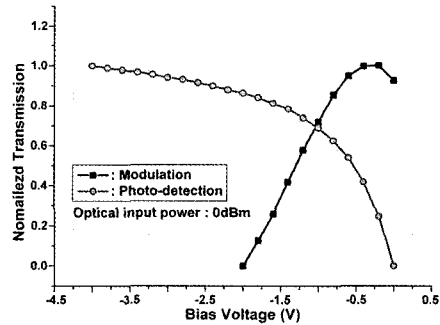
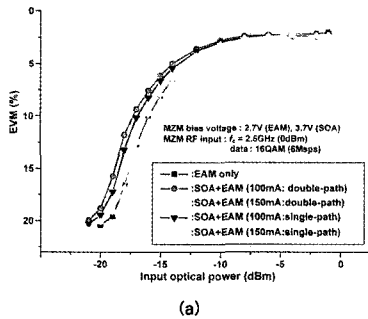
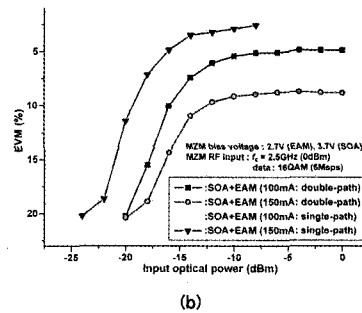


그림 15. Bias voltage에 대한 EAM의 광 변조/검출 특성



(a)



(b)

그림 16. 광신호 전력 변화에 대한 16QAM 신호 수신결과 (a) 하향 링크, (b) 상향 링크

전송된다. 한편 상향 링크의 경우, 안테나에서 수신된 RF 신호가 EAM을 통해 전광 변환된다. 이때 하향 링크의 광 신호를 공유하기 때문에 전체 링크에서 필요한 광원을 2N에서 N개로 줄일 수 있다. EAM에서 출력된 상향 신호는 SOA를 다시 거치게 된다. 이때 SOA는 상향 신호와 하향 신호가 동시에 공존하기 때문에 이득 포화(gain saturation)된 상태로 동작하게 된다. SOA가 이득 포화될 경우 SOA의 chirp이 음(negative)의 값을 가지게 된다. 이 음(negative)의 chirp 특성을 이용하여 DICS 현상을 완화시킬 수 있다<sup>20)</sup>. 또한, SOA를 다시 통과하기 때문에 상향 링크에서도 광 이득(gain)을 얻게 되어 상향 링크에서 링크 버짓의 문제점을 해결할 수 있다.

그림 15는 실험에 사용한 EAM의 광 변조(modulation)/검출(photo-detection) 특성을 나타낸다. 두 가지 특성은 그림에서 볼 수 있듯이 서로 반대되는 경향을 가지게 된다. 때문에 EAM을 변조와 검출의 두 기능을 동시에 사용할 경우 트레이드오프(trade-off) 특성에 의해 바이어스 지점을 두 특성의 중간 지점으로 설정하여야 한다. 실험에서는 EAM을 -1.5V로 잡아 변조기와 검출기로 동시에 사용하였다.

그림 16은 16QAM 신호 전송에 대한 EVM 측정 결과이다. 결과에서 볼 수 있듯이 SOA를 두 번 통과하는 이중 경로(double-path)와 SOA를 한번 통과하는 단일 경로(single-path)의 EVM 결과가 SOA ASE(amplified spontaneous emission) 잡음에 의해 서로 다른 경향을 가진다. 하향 링크에서는 케환 구조를 사용하여 SOA를 왕복 통과한 경우가 더 나은 결과를 보이는데 이것은 상향 광신호가 SOA를 다시 통과하면서 ASE 잡음을 줄여주기 때문이다. 그러나 상향 링크에서는 하향 링크의 광 신호를 공유하기 때문에 SOA를 두 번 통과하게 되어

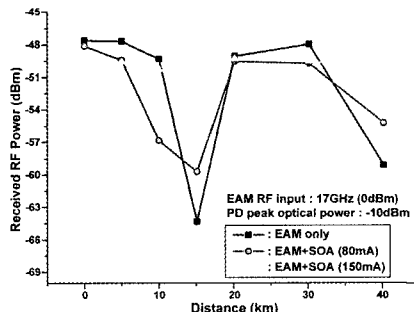


그림 17. 상향 링크에서 전송 거리 변화에 대한 17GHz CW RF 신호 수신 변화

ASE 잡음의 영향이 심해져 단일 경로의 경우가 더 좋은 결과를 보여준다. 그림 17은 상향 링크에서 SOA 음의 chirp 특성에 의한 DICS 완화 결과를 보여준다.

실험 결과에서 볼 수 있듯이 SOA를 사용함으로써 양방향 링크에서 생길 수 있는 여러 문제점을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 또한, 제안한 구조에서는 SOA와 EAM을 따로 사용한 hybrid 구조의 기지국(BS)를 사용했으나 SOA와 EAM 모두 반도체 소자로서 단일 chip으로 집적화 할 수 있다는 장점을 가진다.

## 나. RSOA를 이용한 hybrid형태 양방향 WDM/SCM-PON 광링크 구조

제안한 WDM/SCM-PON 광링크의 동작 원리는 다음과 같다. 우선 중앙 기지국(CO)에서 ONU로의 하향 통신 과정은 다음과 같다. 그림 18에 보이듯이 중앙 기지국(CO) 내에 가입자만큼의 광원이 존재하며 이들 각각의 광원을 직접 혹은 외부 변조기를 이용하여 변조시킨다. 생성된 변조신호는 AWG(arrayed waveguide grating)를 통해 역 다중화(demultiplexing)되고 역 다중화된 신호는 광섬유를 통해 RN(remote node)로 전송된다. RN은 AWG로 구성되어 있으며 이 RN에서 각각의 가입자 단으로 파장을 할당하는 다중화(multiplexing) 기능을 수행하여 신호에 알맞은 ONU로 전송하게 된다.

ONU에서 중앙 기지국(CO)으로의 상향 신호는 일반적인 WDM-PON 구조와 달리 상향과 하향 통신에서 동일 파장을 공유하여 일반적인 구조에서 필요한 광원의 수를 N개로 줄였으며, 기존의 디지털 변조방식 대신 RoF 기술에 이용되는 SCM(sub-carrier multiplexing) 기법을 사용하여 상향 신호를 변조하였다. 이를 위해 디지털 변조

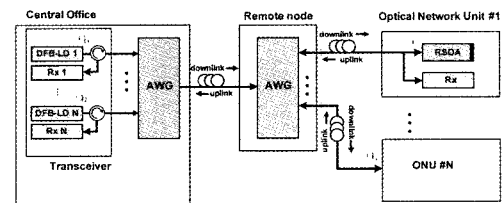


그림 18. 제안한 hybrid WDM/SCM-PON 구조도

된 하향 통신의 RF 스펙트럼의 주엽 부분(main lobe)을 지역 통과 필터로 제거한 후 하향 통신의 광 신호를 상향 신호의 변조에 다시 이용한다. 이때 하향 통신 신호의 열화를 막기 위해 일정 주파수 간격 뒤에 SCM 변조방식을 이용해 상향 데이터가 실린 RF 신호를 변조시킨다<sup>[13]</sup>. ONU의 상향 신호 변조에는 RSOA(reflective SOA)를 사용하였다. RSOA는 SOA의 활성층의 한쪽 면을 HR(high reflective) 코팅하여 입사된 빛이 다시 되돌아나가는 구조를 가지며, 일반 SOA와 달리 RF 신호의 변조가 가능하여 외부 입사광원에 대하여 직접변조가 가능

하다. 또한, SOA 자체의 증폭 기능도 수행하여 RF 이득을 향상시킨다. 즉, RSOA를 ONU의 광원으로 이용하여 WDM-PON 시스템에서 요구되는 광원의 수를 줄일 수 있었다.

아래 그림 19는 RSOA를 ONU에 적용한 양방향 WDM-PON 시스템의 실험 setup이다. 중앙 기지국(CO)에서 하향 신호의 변조에는 DFB-LD를 사용하였으며 622Mbps의 디지털 PRBS 신호가 실려있다. 이 하향 통신의 광 신호를 RSOA를 이용하여 100Mbps의 디지털 신호가 mixing된 900MHz의 RF 신호로 다시 변조하였

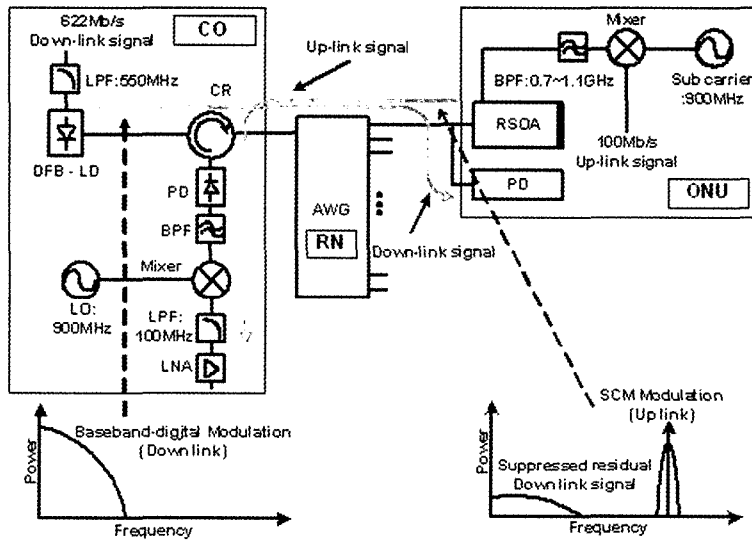


그림 19. 제안된 제안한 hybrid WDM/SCM-PON 실험도

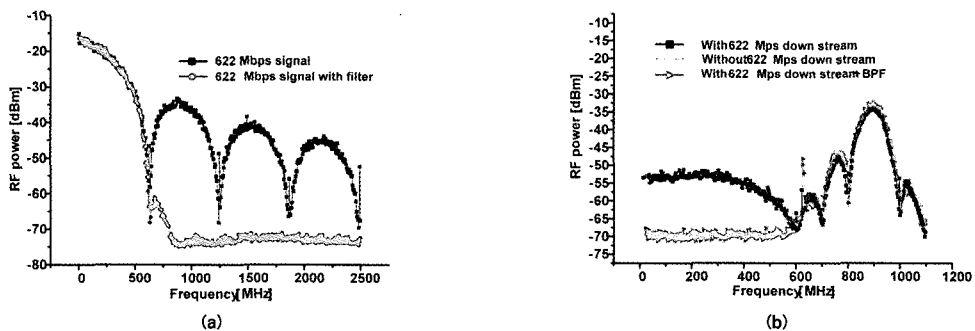


그림 20. (a) 하향 통신용 data의 RF spectrum, (b) 상향 통신용 data의 RF spectrum

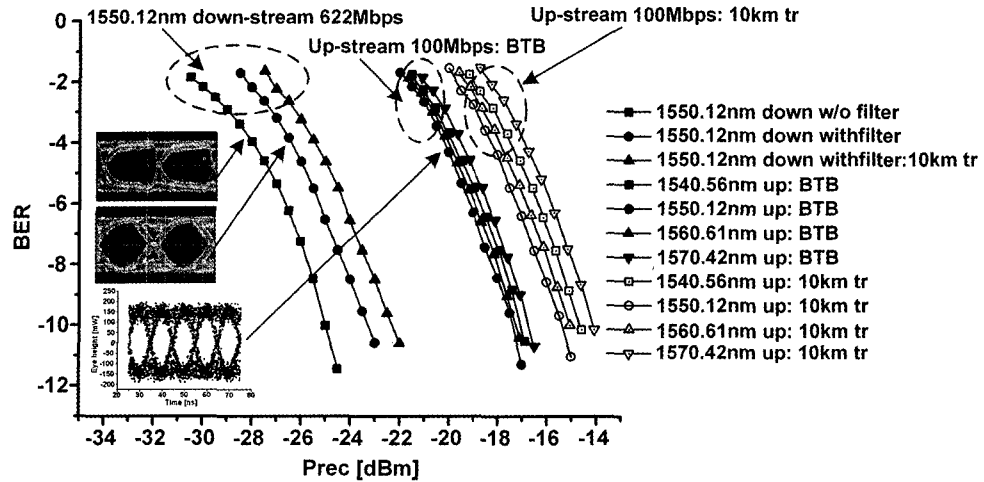


그림 21. 상향/하향 검출 신호에 대한 BER

다. 그림 20은 각각 하향과 상향 통신에서 검출된 RF 신호의 스펙트럼을 보여준다. 이 검출된 신호에 대하여 BER 측정을 수행하였고 측정 결과는 그림 21에서 알 수 있듯이 상향과 하향 통신에서 모두 error-free 한 결과를 얻을 수 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 RSOA를 사용하면 RSOA 자체의 이득 때문에 상향 링크에서 문제시되는 링크 버짓의 문제를 해결할 수 있다.

## 6. 결론

RoF 기술은 저손실, 광대역의 특징을 제공하는 광통신 기술의 장점과 이동성을 제공하는 무선 통신 기술이 융합하여 언제, 어디서나, 다양한 광대역 멀티미디어 서비스를 제공하는 차세대 광대역 통합망(Broadband Convergence Network)의 기초가 되는 차세대 기술이다. 이 기술을 통해 초고속 무선 멀티미디어 서비스와 광대역 소형 휴대 단말, 초고속 휴대 인터넷의 활성화에 기여할 수 있으며, 가까운 장래에 도입될 것으로 예상되는 유비쿼터스 네트워크에서는 장소나 단말기의 제약 없이 초고속 광대역 서비스 제공이 가능한 무선 통신 기술로서 RoF 기술이 활용될 것으로 예상된다. 그러나 실제 시스템 적용시에는 시스템의 경제성은 물론 광원과 광변조기의 비선형성, 광섬유에 의한 분산효과 등의 제약점을 가지고 있다. 본 기고문에서는 이러한 단점들을 해결하기 위해 최근 발표된 논문들과 특히 MWP 2005에서 발표된

논문을 소개하였다. 이러한 단점들을 극복함으로써 RoF 기술이 가지는 장점을 더욱 활용하고 실제 RoF 시스템의 도입 또한 앞당겨질 것이다. 또한 현 단계에서 적용가능한 RoF 기반 응용 기술들을 본 연구실에 의해 수행된 연구들을 바탕으로 소개하였다. RoF 기술은 마이크로파 기술과 광통신기술이 결합된 기술로서 향후, 여러분야에 응용성은 더욱 증가할 것으로 예상되는바 적극적인 기술개발 대처가 절실히 요구되고 있다.

## 참고 문헌

- (1) A. J. Seeds, "Microwave photonics," IEEE Trans. Microwave Theory and Technique, vol. 50, no. 3, pp. 877-887, 2002.
- (2) P. Hartmann, X. Qian, A. Wonfor, R. V. Penty and I. H. White, "1-20GHz directly modulation radio over MMF link", Proc. of MWP 2005 pp. 95-98, 2005.
- (3) M. Sauer, A. Kobayakov, J. E. Hurley and J. George, "Experimental study of radio frequency transmission over standard and high-bandwidth multimode optical fibers", Proc. of MWP 2005 pp. 99-102, 2005.
- (4) H. Toda, T. Nakasyotani, T. Kuri and K. Kitayama, "A full-duplex WDM millimeter-wave-band radio-on-fiber system using a supercontinuum light source", Proc. of MWP 2005 pp. 111-114, 2005.
- (5) T. Iwai and K. sato, "Dispersion-induced distortion in AM-SCM transmission systems employing linearized MQW-EA modulator," Electron. Lett., vol. 31, no. 15, pp. 1272-1273, 1995.
- (6) T. Iwai, K. Sato, and K. Suto, "Signal distortion and noise in AM-SCM transmission systems employing the feedforward linearized MQW-EA modulator," J. Lightwave Technol., vol. 13, no. 8, pp. 1606-1612, 1995.
- (7) T. Ismail, C. P. Liu, J. E. Mitchell and A. J. Seeds, "Feed-forward linearised

uncooled DFB laser in a multi-channel broadband wireless over fibre transmission at 5.8 GHz", Proc. of MWP 2005 pp. 115-118, 2005.

- (8) D.-H. Jeon, H.-D. Jung, and S.-K. Han, "Mitigation of dispersion-induced effects using SOA in analog optical transmission", IEEE Photon. Technol. Lett., vol.14, no.8, pp. 1166-1168, 2002.
- (9) U.-S. Lee, H.-D. Jung, and S.-K. Han, "Optical single sideband signal generation using phase modulation of semiconductor optical amplifier", IEEE Photon. Technol. Lett., vol.16, no.5, pp. 1373-1375, 2004.
- (10) J. H. Seo, C. S. Choi, Y. S. Kang, Y. D. Chung, J. Kim and W. Y. Choi, "Conversion efficiency characteristics of cascaded SOA-EAM frequency up/down-converters", Proc. of MWP 2005 pp. 107-110, 2005.
- (11) H. J. Song, M. Park, H. J. Kim, J. S. Lee and J. I. Song, "All-optical frequency down-conversion for full-duplex WDM RoF systems utilizing an SOA-MZI", Proc. of MWP 2005 pp. 321-324, 2005.
- (12) Y. L. Guennec, J. Yao, H. Nasrallah, G. Maury and B. Cabon, "Optical up-conversion of a BPSK modulated sub-carrier employing a phase modulator and a dispersive fiber", Proc. of MWP 2005 pp. 313-316, 2005.
- (13) J. M. Kang and S. K. Han, "A novel hybrid WDM/SCM-PON sharing wavelength for up and down link using reflective semiconductor optical amplifier", IEEE Photon. Technol. Lett., to be published.