

# Part

# 1

## 서론

Introduction

Chapter 01 | 광통신 시스템 개론

Chapter 02 | 빛의 성질과 전송 원리



# 01

## 광통신 시스템 개론

Introduction to Fiber–Optic Communication Systems

광통신이란?	_1.1
광통신의 필요성	_1.2
광통신의 스펙트럼 대역	_1.3
광통신의 주요 구성요소	_1.4
광통신의 진화	_1.5
광통신 네트워크와 응용	_1.6
dB과 dBm	_1.7
컴퓨터 시뮬레이션과 MATLAB	_1.8
연습문제	
MATLAB을 이용한 연습문제	

### 학습목표

- 광통신의 정의, 그 특징과 장점을 이해한다.
- 광통신에서 사용하는 주파수 영역을 다른 통신시스템과 비교하여 이해한다.
- 광통신의 주요 구성요소는 어떤 것들이며, 이들의 주요 역할은 무엇인지 이해한다.
- 어떤 혁신적인 과정을 거쳐 광통신 기술이 ‘정보화 사회’의 길을 열었는지 이해한다.
- dB와 dBm 단위를 다룰 줄 안다.
- MATLAB의 기본 사용법을 익히고, 컴퓨터로 시뮬레이션할 때 고려해야 할 기본적인 문제를 인식한다.



광통신 기술은 반도체 기술과 함께 ‘정보화 사회’를 이끈 주역이라 할 수 있다. 이 장에서는 광통신이 무엇인지 알아보고, 광통신의 장점과 특징을 이해하도록 한다. 광통신 시스템을 구성하고 있는 주요 요소들에 대해서도 간단하게 살펴보고, 이를 통해 우리는 이 책 전체에서 다루고자 하는 내용을 짐작할 수 있을 것이다. 또한, MATLAB의 기본 사용법을 익히고, 광통신을 컴퓨터로 시뮬레이션할 때 고려해야 할 기본적인 사항을 소개하고자 한다.

## 1.1 광통신이란?

광통신은 빛을 이용하여 통신하는 것을 말한다. 이 책을 읽고 있는 독자들도 라디오, 텔레비전, 휴대전화, 인터넷과 같은 다양한 종류의 통신을 경험하며 지내고 있을 것이므로, 통신의 유용성에 대해서는 새삼 강조할 필요가 없을 것이다.

### 1.1.1 통신과 정보

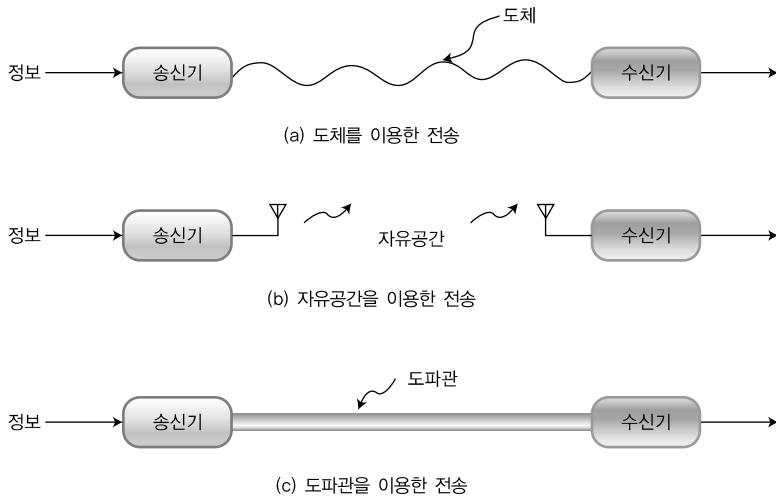
공학적 의미에서의 통신(communication)은 텔레커뮤니케이션(telecommunication)을 의미한다. 전기통신 또는 전자통신으로 번역되기도 하는 텔레커뮤니케이션은 전기 및 전자 장비를 사용하여 공간적으로 서로 떨어진(tele-) 두 지점 간의 정보 교환, 즉 통신(communication)을 말한다. 앞으로 이 책에서 통신은 텔레커뮤니케이션과 같은 의미로 사용될 것이다.

정보(information)는 일반적으로 네 가지 형태, 즉 음성(speech), 음악(music), 영상(video), 데이터(data) 중 하나로 되어 있으며, 최근에는 이들이 서로 융합된 멀티미디어 형태가 증가하는 추세다. 통신시스템을 이용해 이들 정보를 전송하기 위해서는 적절한 전기적 신호(signal), 즉 전압이나 전류로 바꿔 전송한다. 예를 들어, 사람의 음성은 마이크로폰(micro-phone)에 의해 전기적 신호로 변환되며, 스피커에 의해 전기적 신호가 다시 음성으로 변환된다. 이와 같은 변환장치를 트랜스듀서(transducer)라고 하며, 컴퓨터 통신처럼 정보가 이미 전기적 신호 형태일 경우는 트랜스듀서가 필요하지 않다. 다른 많은 책에서와 마찬가지로 이 책에서 정보는 이미 전기 신호로 변환된 것이라고 가정할 것이다.

### 1.1.2 통신 링크

기본적인 통신시스템은 전기 신호로 바뀐 정보를 보내기 위한 송신기(transmitter)와 이를 수신하기 위한 수신기(receiver), 그리고 이 둘 사이를 연결하는 링크(link)<sup>1</sup>로 구성된다. 링크를 구성하는 물리적인 전송매체(transmission medium)의 특성에 따라 통신시스템을 분류하기도 한다. [그림 1-1]은 전송매체에 따른 기본적인 통신시스템을 보여 주고 있다.

<sup>1</sup> 채널(channel)이라고도 한다.



[그림 1-1] 전송매체에 따른 통신시스템

도체를 이용한 전송은 전화선이나 UTP(Unshielded Twisted Pair) 케이블, 또는 동축 케이블과 같이 도체인 구리를 이용하여 전기 신호를 전송하는 방법이다. 1800년대 중반에 발명된 전보 (telegraph)와 1870년대 발명된 전화를 시작으로 개막된 현대적 의미의 통신시스템은 이처럼 금속선을 이용하여 정보를 전송하였으나, 전송 거리와 전송 가능한 정보량에는 한계가 있었다. 예를 들어, 전화선이나 UTP 케이블을 사용할 때 초당 100메가비트(Mbps)의 데이터를 전송할 수 있는 최대 거리는 100m 정도다. 자유공간을 이용한 전송은 정보를 전자파에 실어 자유공간으로 전파하는 방법이다. 이와 같은 무선통신 기술은 제1차 세계대전을 계기로 비약적으로 발전하였다. 통신 공학자들은 자유공간, 즉 공기 중으로 전송되는 전자파의 주파수가 높을수록 더 많은 정보를 실어 나를 수 있음을 알았으며, 마침내는 라디오 방송에 사용하는 전자파보다 주파수가 훨씬 더 높은 마이크로파를 사용하게 되었다. 하지만, 마이크로파는 공기 중에서 감쇠가 심해 전송 거리가 비실용적으로 짧았으며, 이 문제를 해결하기 위해 [그림 1-1(c)]와 같이 도파관(waveguide)을 이용하여 전자파를 도파관 안으로 전송하게 되었다. 마이크로파를 이용하기 위한 도파관은 부피가 크고 딱딱한 금속으로 이루어져 있으므로 전송량과 전송 거리는 늘어나지만, 비용이 증가하고, 설치와 유지 관리하기가 어렵다. 따라서 짧은 시간에 많은 양의 정보를 먼 거리로 전송하기 위해서는 전혀 새로운 통신 방식이 필요하게 되었다. 이로써 많은 과학자와 공학자들이 빛을 이용한 통신시스템에 관심을 돌리게 되었다.

### 1.1.3 광섬유 광통신

빛을 이용한 통신시스템, 즉 정보를 빛에 실어 전송하는 통신을 광통신이라고 한다. 넓은 의미에서 광통신은 자유공간을 전송매체로 하는 무선 광통신(wireless optical communications)도

포함하나, 무선 광통신의 응용은 극히 제한적이며 현재 시장에 존재하는 대부분의 광통신은 송신기와 수신기 사이에 도파관의 일종인 광섬유(optical fiber)를 전송매체로 하여 광섬유 안으로 빛을 전송한다. 그래서 광통신(optical communications)은 대부분 광섬유 광통신(fiber-optic communications)과 같은 의미로 사용되며, 이 책에서 다루고자 하는 광통신 역시 염밀하게는 광섬유 광통신(fiber-optic communications)이다. 광섬유 역시 도파관의 일종이지만 마이크로파 대신 빛을 전송하기 위해 고안된 것으로, 금속 도파관보다 전송 용량은 거의 무한대에 가까우며, 머리카락 정도로 가늘 뿐 아니라 유연하여 설치하고 유지 및 관리하기가 쉽다. 광섬유를 이용한 빛의 전송은 2장과 3장에서 자세히 알아본다.

### 여기서 광섬유!

#### + 편리한 접두어

물리와 공학에서는 아주 작은 수부터 매우 큰 수를 같이 다루어야 하는 경우가 많다. 예를 들어, 빛의 파장은 아주 작은 수이지만 주파수는 아주 큰 수다. 따라서 표준 접두어를 사용하면 매우 작은 수부터 매우 큰 수까지 편리하게 표현할 수 있다. 단위와 함께 흔히 사용하는 접두어를 [표 1-1]에 나타내었다.

[표 1-1] 단위와 함께 쓰는 편리한 접두어

접두어	기호	배율
페타(peta-)	P	$10^{15}$
테라(tera-)	T	$10^{12}$
기가(giga-)	G	$10^9$
메가(mega-)	M	$10^6$
킬로(kilo-)	k	$10^3$
센티(centi-)	c	$10^{-2}$
밀리(milli-)	m	$10^{-3}$
마이크로(micro-)	$\mu$	$10^{-6}$
나노(nano-)	n	$10^{-9}$
피코(picō-)	p	$10^{-12}$
펨토(femto-)	f	$10^{-15}$
아토(atto-)	a	$10^{-18}$

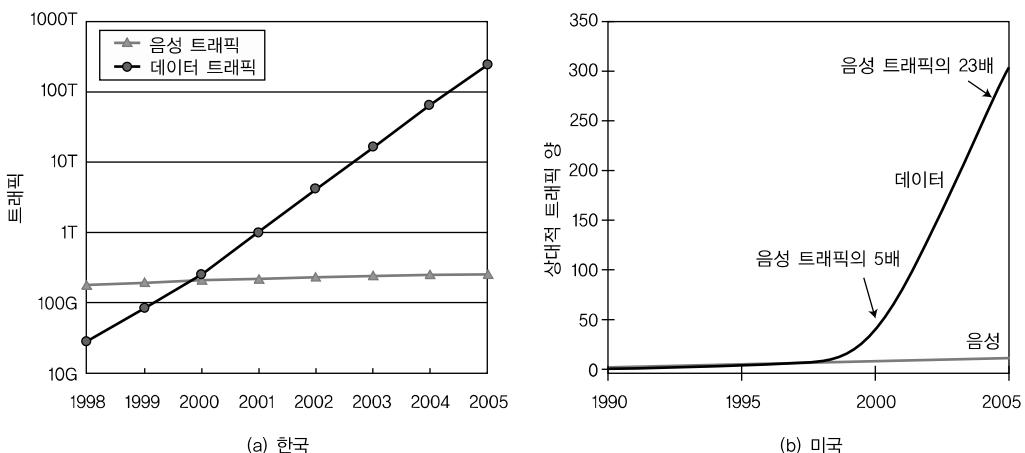
광통신에서 정보를 전달하기 위해 사용하는 빛의 주파수는 대략  $200\text{THz}$ , 즉  $200 \times 10^{12}\text{Hz} = 2 \times 10^{14}\text{Hz}$  고 FM 방송국은 음악을 전달하기 위해 약  $100\text{MHz} = 10^8\text{Hz}$  의 주파수를 사용한다.

## 1.2 광통신의 필요성

인류는 선사시대부터 이윤을 추구하거나 전쟁을 수행하기 위해 통신 수단을 이용해야 했다. 특히 1800년대 중반 전신(telegraph)이 발명된 후 통신 수단이 급격하게 진보하고 있다. 산업 자본주의 시대 이후부터 세계는 정보화 시대로 들어섰으며, 얼마나 많은 정보를 생산해 내느냐가 선진국의 기준 중 하나가 된 지도 오래되었다. 정보를 많이 생산해 낼수록 이들을 적절한 장소에, 적절한 시간 내에, 또 적절한 형태로 전송할 필요성도 따라서 증가하였다. 단위 시간당 얼마나 많은 정보를 전달하느냐, 즉 정보 전송 용량(information-carrying capacity)이 얼마나 큰지가 통신시스템의 우수성을 측정하는 주요 측도가 되었다. 1837년 모스(Morse)의 전신 발명 이후 시작된 현대 통신의 발전은 정보 전송 용량을 증가시킨 역사로도 볼 수 있다.

### 1.2.1 통신량의 급격한 증가

특히 인터넷이 출현하면서 1990년대 중반부터 통신량이 폭발적으로 증가하였으며 2000년대 중반 그 증가세가 다소 감소하였으나, 여전히 매년 50~60%의 지수적인 증가세를 멈추지 않고 있다. [그림 1-2]는 최근 10~20년 동안 한국과 미국에서 통신량이 어떻게 변화되었는지를 보여 주고 있다. 전통적인 전화선을 이용한 음성 통신량은 모두 큰 변화가 없는 반면, 인터넷을 중심으로 하는 데이터 통신량은 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다.

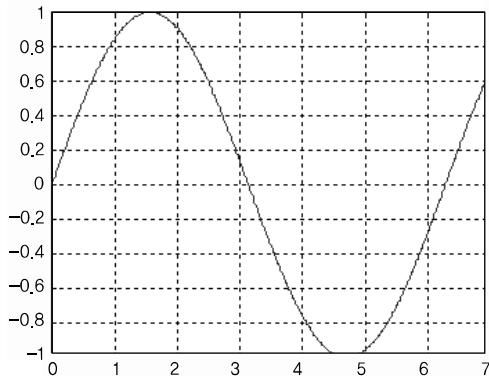


[그림 1-2] 연도별 통신량의 변화

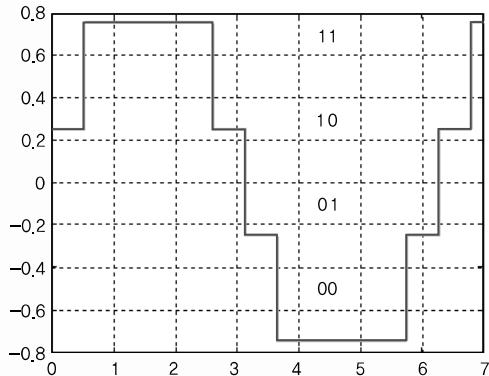
이처럼 급격하게 통신량이 증가할 수 있었던 중요 원인 중 하나는 안정적으로 충분한 정보 전송 용량을 제공할 수 있는 광통신 기술이 발전하였기 때문이다. 광통신에 의한 정보 전송 용량은 25년이 채 되지 않은 기간 동안 약 100,000배 정도로 늘어났다. 2000년 이후 전 세계적인 경기 침체로 기술투자가 부진하여 전송 용량의 증가속도는 둔화되었으나, HDTV(High Definition TV)와 같이 고속화가 요구되는 영상중심의 서비스가 속속 제공되기 시작하였으므로 광통신 기술은 기간망(backbone network)뿐만 아니라 가입자망(access network)까지 필수 기술로 자리 잡을 것이다.

### 1.2.2 아날로그에서 디지털로

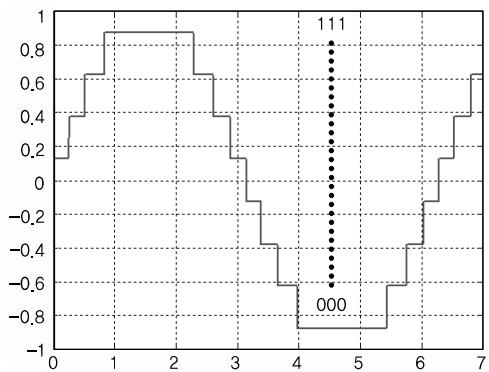
현대인들이 통신시스템에서 요구하는 또 다른 중요한 점은 잡음과 왜곡에서 벗어나 정보를 얼마나 충실하게 전송할 수 있느냐 하는 점이다. 잘 알려진 대로 신호에는 두 가지 형태, 즉 아날로그 신호와 디지털 신호가 있다. 현대의 많은 통신시스템은 아날로그 형태인 정보원 (information source)을 미리 디지털 신호로 바꾸어 전송함으로써 전송 과정에서 발생하는 잡음과 왜곡의 영향을 최소화시키고 있다. 하지만, 디지털 신호를 전송하기 위해서는 필연적으로 훨씬 많은 전송 용량이 요구된다. [그림 1-3]은 이를 개념적으로 알아보기 위한 것으로, 간단한 아날로그 신호인 정현파를 디지털 신호로 변환하기 위해 표본화(sampling)와 양자화 (quantization) 과정을 거친 경우를 보여 주고 있다. 예를 들어, [그림 1-3(b)]는 정현파의 크기를 단지 4 레벨로 양자화한 경우를 나타내고 있다. 4 레벨을 표현하기 위해서는 2비트가 필요하며, 각 비트는 디지털 펄스로 표현되어야 한다. 따라서 정현파가 최솟값에서 최댓값으로 변하는 것을 4 레벨로 표현하기 위해서는 모두 8비트가 필요하며, 따라서 8개의 디지털 펄스를 전송하여야 한다. 디지털 비트 수를 많이 사용할수록 원래의 아날로그 신호에 더 가까워지므로 비트 수가 늘어날수록 원래의 정현파에 비해 훨씬 더 큰 전송 용량이 필요하다. 하지만, 디지털 신호는 잡음의 영향이 누적되지 않고, 비교적 큰 잡음이 수신기에 존재해도 ‘0’과 ‘1’을 쉽게 판별할 수 있으며, 음성과 영상 등과 같이 종류가 다른 신호들도 쉽게 통합하여 전송할 수 있다. 이처럼 아날로그 신호를 전송할 때보다 얻을 수 있는 장점들이 많아 현대의 전기 · 전자 시스템은 디지털 신호를 선호한다.



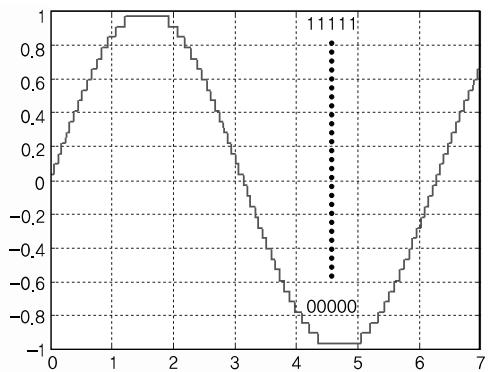
(a) 아날로그 신호



(b) 4 레벨로 양자화한 신호



(c) 8 레벨로 양자화한 신호



(d) 32 레벨로 양자화한 신호

[그림 1-3] 아날로그 정현파 신호와 양자화 과정을 거친 예

흔히 우리가 통신시스템에서 접하는 아날로그 형태의 신호들과 이들이 차지하는 대역폭(bandwidth)을 [표 1-2]에 참고로 나타내었다. 대역폭은 어떤 신호가 차지하는 주파수 범위나 어떤 소자(또는 시스템)가 통과시킬 수 있는 주파수 범위를 말한다. 예를 들어, 상용 전화 시스템에서는 음성 신호의 대역폭을 4kHz로 제한한다. 즉, 상용 전화 시스템은 음성의 4kHz 까지의 주파수만을 전송하는데, 이렇게 하는 이유는 일반인의 대화에서 사용되는 음성의 주파수는 대부분 4kHz 이하이므로 식별하는데 지장이 없기 때문이다. 나이키스트 표본화 정리(Nyquist sampling theorem)에 따르면 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하기 위해서는 아날로그 신호의 최고 주파수보다 최소 2배 이상으로 표본화해야 한다. 따라서 대역폭 4kHz(4,000Hz)의 음성 신호는 최소 초당 8,000번 표본화되어야 한다. 실제 음성 신호는 디지털 신호로 변환하기 위해 8비트를 사용하는데, 이는 8비트  $\times$  8,000/초 = 64,000비트/초의 비트율(bit rate)<sup>2</sup>을 의미한다. 즉, 4kHz의 아날로그 신호를 전송하기 위해 초당 64,000개의 디지털 펄스를 전송해야 한다.

<sup>2</sup> 비트율은 초당 비트수를 나타내는 것으로 단위는 bps(bits per second), bits/s 또는 b/s로 나타낸다.

[표 1-2] 신호의 형태와 대역폭

신호의 형태	대역폭	사용되는 통신시스템
음성	4kHz	전화
음악	10kHz	AM 라디오 방송
음악	200kHz	FM 라디오 방송
영상	6MHz	텔레비전 방송

### 1.2.3 정보 전송 용량

현대 통신시스템에서 요구되는 것은 늘어나는 정보량을 전송해야 할 뿐만 아니라 고품질의 신호 전송을 위해서 디지털 기술을 사용하지 않을 수는 없으므로 정보 전송 용량이 더욱 커야 한다. 하지만, 정보 전송 용량을 무한히 증가시킬 수는 없다. 셰넌(Shannon)의 방정식에 의하면 특정 기술에 상관없이 정보 전송 용량,  $C$ (비트/초)는 다음 식 (1.1)로 제약된다.

$$C = BW \times \log_2 (1 + SNR) \quad (1.1)$$

여기서  $BW$ 는 전송 채널의 대역폭(bandwidth)을 의미하고,  $SNR$ 은 신호 대 잡음의 전력비다. 위 수식은 정보 전송 용량은 전송 채널의 대역폭, 즉 신호가 상당한 감쇠 없이 전송될 수 있는 주파수 범위에 비례한다는 것을 말한다. 광통신을 포함한 모든 유·무선통신은 반송파(carrier)에 정보 신호를 실어(carry) 전송하는데, 전송 채널의 대역폭은 첫 번째로 정보를 실는 반송파의 주파수에 비례해 결정된다. 따라서 반송파 주파수가 높은 통신시스템일수록 정보 전송 용량이 크다고 할 수 있다. 현대의 광통신은 반송파의 주파수가 약 200THz로 다른 어떤 통신시스템보다 높은 주파수의 반송파를 사용하고 있으며, 채널 대역폭은 수십 THz에 이르고 있다. 이처럼 넓은 채널 대역폭은 정보 전송 용량이 따라서 대단히 크다는 것을 의미하므로 바로 이 점이 광통신을 기간통신망의 핵심 기술로 자리 잡게 하였다.

# 1.3 광통신의 스펙트럼 대역

## 1.3.1 반송파 주파수와 변조

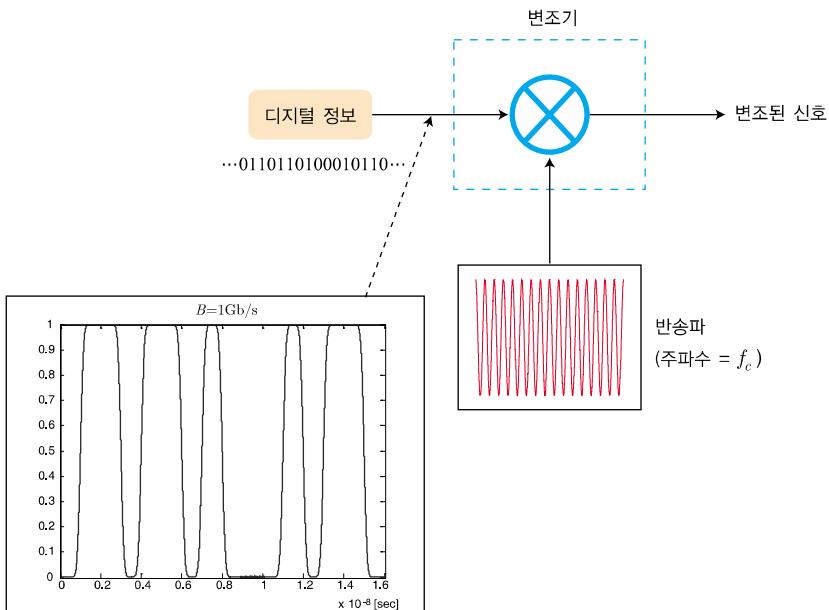
앞에서 언급한 것처럼 모든 유·무선통신은 반송파(carrier)에 정보 신호를 실어 전송하는 형태를 취하며 반송파의 주파수가 높을수록 더 많은 정보를 전송할 수 있다. 이를 좀 더 자세히 살펴보기 위해 [그림 1-4]에 비트율(bit rate)  $B$ 가 1Gb/s인 디지털 신호가 정현파인 반송파에 실린 경우를 나타내었다. 정보 신호를 반송파에 싣는 것을 일반적으로 변조(modulation)라고 하며, 변조에는 여러 가지 방식이 있다. 여기에서는 가장 간단한 디지털 변조 형태인 진폭 천이변조(ASK, Amplitude Shift Keying)를 보여 주고 있다. 이 경우 변조기는 단순히 곱셈기와 같다. [그림 1-4(c)]에서와 같이 반송파의 주파수가 정보 신호의 비트율보다 훨씬 클 때는 변조된 신호의 포락선을 찾아내면 원래의 디지털 신호('0110110100010110')를 쉽게 복구할 수 있다. 반면 [그림 1-4(b)]와 같이 반송파의 주파수가 비트율보다 충분히 높지 않다면 원래의 디지털 신호를 복구할 수 없다.

따라서 전송할 정보량이 늘어남에 따라 짧은 시간에 많은 정보를 전송하기 위해서는 반송파의 주파수가 증가해야 한다. 특히 1980년대 이후 인터넷이 급격히 보급됨에 따라 통신량에 대한 요구가 늘었는데, 이 요구를 충족시키기 위해서는 반송파 주파수가 수백 THz인 광통신 기술이 현대의 기간 통신망으로 자리 잡아야 하는 것은 당연한 결과다.

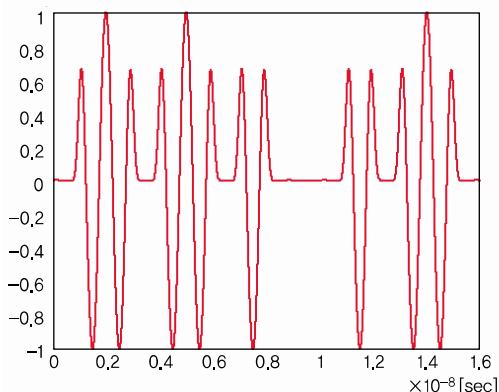
[표 1-3]은 여러 통신시스템에서 사용하는 반송파의 중심 주파수를 나타내고 있다. 광통신에서 이용되고 있는 반송파 주파수가 다른 통신 수단에서 이용되고 있는 반송파의 주파수보다 비교할 수 없을 정도로 큼을 알 수 있다. FM 라디오 방송의 약  $2 \times 10^6$ 배, 위성통신과 비교하면 약  $4 \times 10^4$ 배 정도이므로 광통신의 정보 전송 용량도 대략 이만큼 더 크다.

[표 1-3] 통신시스템에서 사용 중인 반송파 주파수

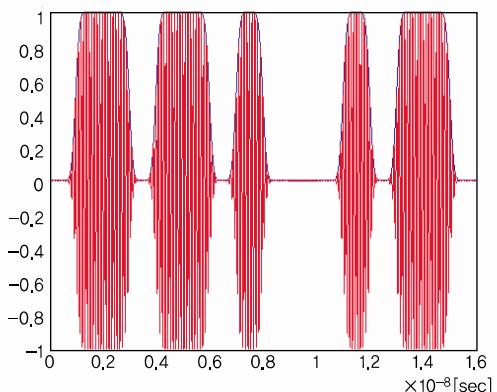
통신시스템	반송파 주파수	통신시스템	반송파 주파수
전화선 모뎀	1600~1800Hz	셀룰러 무선통신	850MHz, 1.8GHz
AM 라디오	530~1600kHz	실내 무선 네트워크	2.4GHz
CB 라디오	27MHz	민수용 위성 하향 링크	3.7~4.2GHz
FM 라디오	88~108MHz	민수용 위성 상향 링크	5.9~6.4GHz
VHF TV	178~216MHz	광통신	185~195THz



(a) 디지털 신호의 변조



(b) 변조된 신호(반송파 주파수  $f_c = 1\text{GHz}$ 로 변조된 경우)

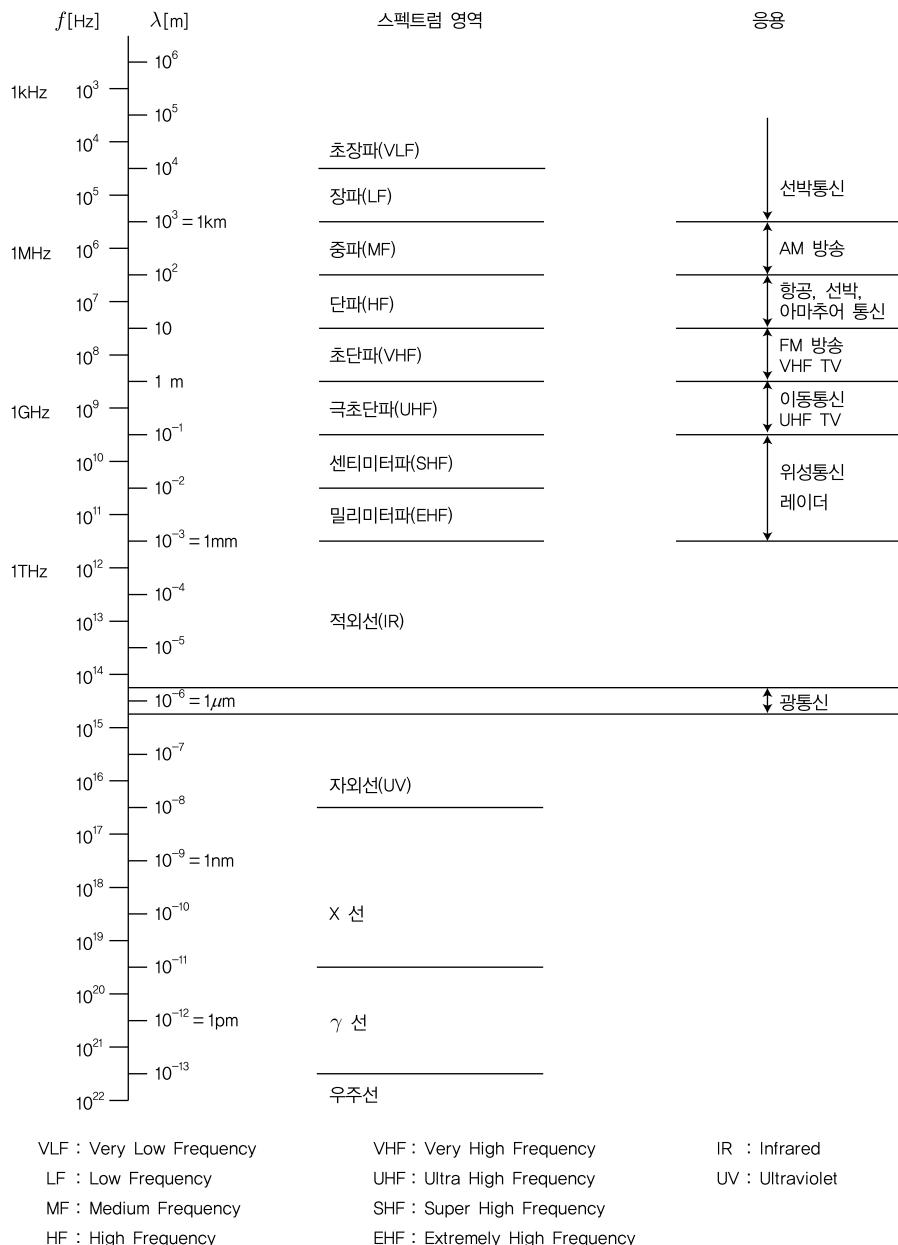


(c) 변조된 신호(반송파 주파수  $f_c = 10\text{GHz}$ 로 변조된 경우)

[그림 1-4] 디지털 신호의 변조 예( $B=1\text{Gb/s}$  인 경우)

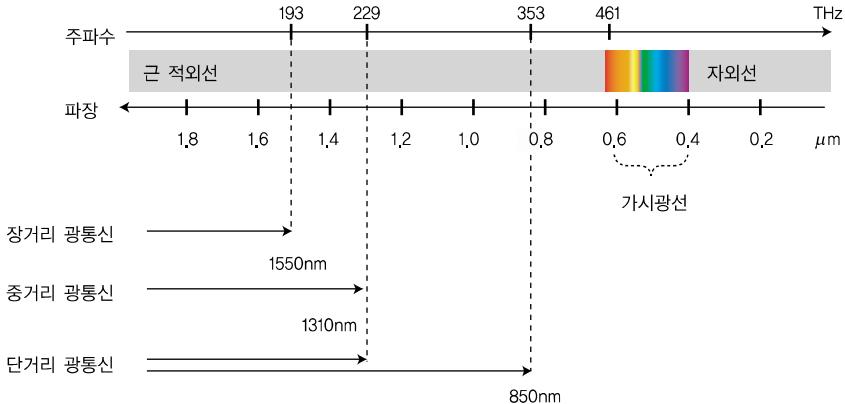
### 1.3.2 광통신의 스펙트럼

[그림 1-5]는 전자기파의 스펙트럼을 나타낸다. 빛, 즉 광파(light wave)도 전자기파의 일종으로, 사람의 눈으로 볼 수 있는 광파의 파장은 대략 400nm~700nm 정도다. 눈으로 볼 수는 없지만, 자외선(ultraviolet light)과 적외선(infrared light)도 광파로 분류된다.



[그림 1-5] 전자기파의 스펙트럼

[그림 1-6]은 광통신에서 이용하고 있는 스펙트럼 부위를 좀 더 자세하게 나타낸 것이다. 초창기의 광통신은 850nm의 파장대를 사용하다가 1310nm를 사용하게 되었으며, 현재 장거리 광통신에서는 1550nm 부근의 파장을 반송파로 사용하고 있다. 이처럼 다른 파장대를 사용하는 것은 전송매체인 광섬유의 손실 특성과 깊은 관련이 있으며, 이에 대해서는 3장에서 좀 더 자세히 다룰 것이다.



[그림 1-6] 광통신 스펙트럼과 응용 분야

### 1.3.3 파장과 주파수의 관계

전자기파는 진공에서 모두 같은 속도, 즉 빛의 속도( $c = 2.99793 \times 10^8 \text{ m/s} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ )로 진행한다. 전자기파의 진행 속도  $c$ 는 한 파장( $\lambda$ )을 주기( $T$ )로 나눈 것과 같으므로, 다음과 같은 중요한 결과를 얻을 수 있다.<sup>3</sup>

$$c = f \cdot \lambda \quad (1.2)$$

여기서  $f = \frac{1}{T} [\text{Hz}]$ 는 주파수를 나타낸다.  $c$ 는 상수이므로 주파수 또는 파장 중 하나를 알면 나머지도 위의 관계식으로 쉽게 구할 수 있다. 전통적으로 광통신 공학자는 주파수보다는 파장을 사용하는 경향이 있으며, 광통신에서 사용되고 있는 스펙트럼 파장의 범위는 800nm~1675nm다.

### 1.3.4 대역폭

일반적으로 대역폭(bandwidth)은 주파수의 범위( $\Delta f$ )로 나타낸다. 하지만, 광통신에서는 파장으로 나타낸 대역폭( $\Delta\lambda$ )도 흔히 사용된다.  $\Delta f$ 와  $\Delta\lambda$  사이의 관계는 식 (1.2)에 의해 다음과 같다.

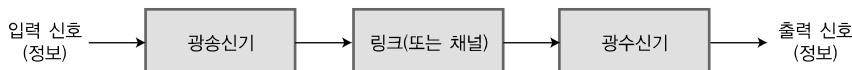
$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{c}{\lambda_2} - \frac{c}{\lambda_1} = \frac{c(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \approx \frac{c}{\lambda_0^2} \Delta\lambda \quad (1.3)$$

<sup>3</sup> 2장 1절 참조

여기서  $c$ 는 빛의 속도(m/s),  $\lambda_0$ 는 중심 파장,  $f_2 > f_1$ ,  $\lambda_1 > \lambda_2$ 이다. 만약 중심 파장  $\lambda_0 = 1550\text{nm}$ 이고  $\Delta\lambda = 35\text{nm}$ 라면, 주파수로는 대역폭이  $\Delta f = 4.4\text{THz}$ 에 해당한다. 무선통신에서 대역폭 4.4THz는 실현 불가능한 어마어마하게 넓은 대역폭에 해당하지만 현대의 광통신 시스템은 4.4THz의 대역폭을 이용하여 수백 km 이상의 장거리로 광신호를 전송하는 것이 어렵지 않을 뿐 아니라 지속적인 기술 개발이 이루어져 이용 가능한 대역폭이 수십 THz로 더욱 넓어지는 추세다.

## 1.4 광통신의 주요 구성요소

일반적인 통신시스템과 마찬가지로 광통신도 송신기와 수신기, 그리고 이 둘 사이의 링크(또는 채널)로 구성된다. [그림 1-7]은 광통신 링크의 기본 구성을 보여 주고 있다. 광통신은 링크를 구성하는 전송매체가 광섬유라는 특징이 있다. 송신기가 전기적 신호인 입력을 빛으로 바꾸고, 수신기는 광섬유를 통해 전달된 빛을 다시 전기적 신호로 바꾸는 것도 광통신의 뚜렷한 특징 중 하나다.



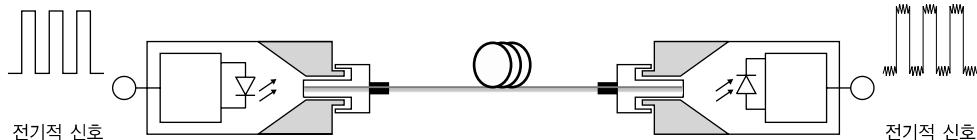
(a) 일반적인 개념도



광송신기

광섬유

광수신기



(b) 실제 모습과 내부 구조

[그림 1-7] 광통신 링크

주요 구성요소를 간단히 살펴보면 아래와 같다.

### 광송신기

광송신기(optical transmitter)의 주요 기능은 전기적 형태의 정보 신호를 광신호로 바꾼 후 채널(광섬유)로 내보내는 것이다. 광송신기에서는 광원(optical source)이 핵심 소자라고 할 수 있다. 현대 광통신에서는 반도체 소자인 LED(Light-Emitting Diode)나 레이저다이오드

를 광원으로 사용하는데, 크기가 작고 전력 소모가 적으며, 광섬유에 쉽게 광신호를 입력할 수 있기 때문이다. 중·장거리 광통신에서는 대부분 변조기가 따로 필요하지만 이 모두가 하나의 패키지 안에 포함되는 경우가 많다. 광원과 광송신기에 대해서는 4장에서 좀 더 자세히 알아본다.

## 광섬유

광통신에서 채널 역할을 담당하는 광섬유의 주요 기능은 광신호를 송신기에서 수신기까지 가능한 한 정보의 손실이 없도록 전달하는 것이다. 광섬유(optical fiber)는 실리카(silica)라 불리는 일종의 유리 성분으로 만들어지며, 굵기는 머리카락 정도로 가늘다. 다른 통신 시스템의 채널과 달리 광섬유의 최대 장점 중 하나는 수십 THz의 넓은 주파수 범위에서 손실이 0.2dB/km 정도로 아주 적다는 것이다. 광섬유의 특성에 대해서는 3장에서 좀 더 자세히 알아본다.

## 광수신기

광수신기(optical receiver)의 역할은 광섬유에서 출력된 광신호를 원래의 전기적 신호로 바꾸는 것이다. 광수신기의 핵심 소자는 광검출기(photodetector)며, 광통신에서는 반도체로 된 광다이오드(photodiode)가 주로 사용된다. 그 외 복조기 같은 전기적 회로가 필요하며, 모두 하나의 패키지로 구성되는 경우가 많다. 광검출기와 광수신기에 대해서는 5장에서 좀 더 자세히 알아본다.

실제 광통신 시스템에서는 그 외 광증폭기, 광필터 등 다양한 소자들로 구성되지만, 이를 주요 요소들만 살펴보더라도 다른 통신시스템과는 차별되는 광통신의 특징과 장점을 살펴볼 수 있다. 특징과 장점을 몇 가지 정리하면 아래와 같다.

- 전송 용량이 큼 : 앞 절에서 언급한 것처럼 광통신의 전송 용량은 다른 어떤 통신시스템 보다 월등히 크다. 짧은 시간에 많은 정보를 전송할 수 있으며, 같은 양의 정보를 보내는데 필요한 물리적 전송 선로의 수가 훨씬 줄었다.
- 낮은 손실 : 광통신에서 전송매체로 사용되는 광섬유의 손실이 다른 통신시스템의 전송 매체 손실보다 훨씬 낮다. 현재 상업용으로 이용되고 있는 광섬유의 손실은 약 0.2dB/km이며, 마이크로파 도파관의 손실은 약 1dB/km, 꼬임선(twisted pair wire)의 손실은 약 10dB/km 정도로 알려졌다. 따라서 단순히 손실만 고려해 보더라도 광통신이 마이크로파 도파관보다 약 5배, 꼬임선에 비해서는 약 50배 정도 더 멀리 신호를 전송할 수 있다. 상업적인 측면에서는 훨씬 적은 비용으로 장거리 통신망을 설치할 수 있다는 의미로, 실제 전 세계적으로 운용되고 있는 대부분의 장거리 통신은 광통신이 담당하고 있다.

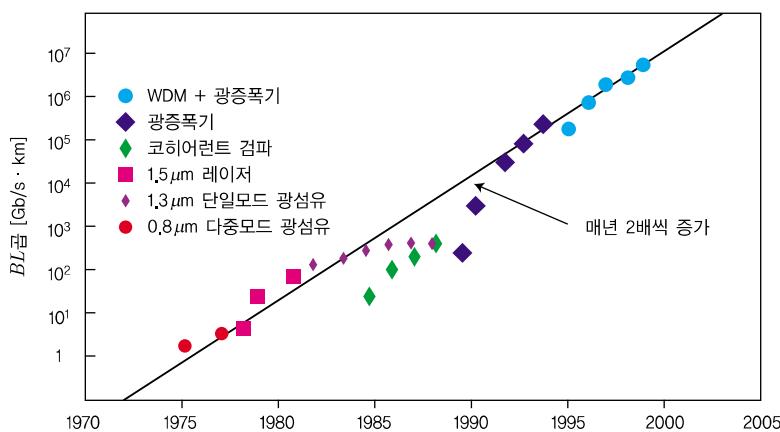
- 전자파 간섭이 없음 : 광섬유는 부도체이므로 전류가 흐르지 않는다. 따라서 전기 신호를 전송하는 유선통신이나 무선통신에서와 같이 전자파 간섭 때문에 다른 통신 채널이나 장비에 서로 영향을 주는 일은 발생하지 않는다.
- 신호의 보안이 우수함 : 광신호는 광섬유 내에서만 존재하므로 전기 신호를 전송하는 유선통신이나 무선통신에서와 같이 도청의 위험이 없다.
- 고속 상호 연결이 가능 : 임피던스 매칭과 같이 주의가 필요한 전기 신호와 달리 광신호는 광섬유를 이용해 손쉽게 상호 연결이 가능하다.
- 중량과 크기가 작음 : 광섬유의 직경은 사람의 머리카락 정도로 가늘고, 중량도 가볍다. 구리로 된 동축 케이블은 1km당 약 10톤 정도지만, 광섬유로 된 케이블은 약 670kg 정도다. 따라서 장거리 통신에 더욱 유리하다.

그 외에도 광섬유는 금속과 달리 모래로부터 추출된 유리 성분(silica)으로 만들어지므로 가격이 싸고, 부식이 일어나지 않아 수명이 길다. 또한, 안전성이 뛰어나며, 온도나 독성가스 등에 대해서도 내성이 뛰어나다.

## 1.5 광통신의 진화

역사를 돌아봄으로써 현재의 위치를 이해하고 미래의 나아갈 방향에 대해 좀 더 주의 깊게 성찰할 수 있다는 말이 광통신만큼 설득력 있게 들리는 분야도 많지 않으리라 생각된다. 넓은 의미에서의 광통신은 거울을 사용한 고대 사회까지 거슬러 올라가지만, 현대적 의미의 광통신에 대한 연구는 불과 30여 년 전, 1970대부터 시작되어 혁신적인 발전을 거듭해 왔다.

어떤 통신시스템의 성능을 비교하기 위해 비트율-거리곱( $BL$ 곱, bit rate-distance product)이 성능 지수(figure of merit)로 흔히 사용된다. 여기서  $L$ 은 신호를 재생하는 중계기(repeater) 사이의 거리를 말한다. 따라서  $BL$ 곱이 높을수록 중계기 없이 멀리, 빠른 속도로 전송할 수 있다는 의미다. [그림 1-8]은 지난 약 30여 년간 광통신이 이루어온  $BL$ 곱을 보여주고 있으며, 직선은  $BL$ 곱이 매년 2배씩 증가한 것을 보여 준다. 광통신은 기술적 혁신에 따라 뚜렷이 구별되는 몇 세대로 나누어 볼 수 있는데, [그림 1-8]에서 볼 수 있듯이 새로운 세대의 초기  $BL$ 곱은 빠르게 증가하다가 기술적 혁신이 성숙함에 따라 증가 속도가 느려지고 다시 새로운 기술적 혁신에 의한 새 세대에 의해 성장하는 모습을 볼 수 있다.  $BL$ 곱을 결정하는 각 세대의 특징을 알아보자.



[그림 1-8] 연도별  $BL$ 곱

### 1.5.1 광통신 이전 : 암흑시대

1830년대 전신(telegraphy)이 발명된 이래 현대 통신시스템은 전기 통신시스템이 주도하게 되었다. 1980년대 초기까지는 대부분의 신호 전송이 금속 케이블에 의해 이루어졌으나, 손실이 크고, 대역폭이 충분하지 못해 용량을 향상하는 데는 한계가 있었다. 1975년 미국에서 가장 앞선 통신시스템의 비트율은 동축 케이블을 이용한 274Mb/s였다. 이 무렵 신호의 질을 높이기 위해 아날로그에서 디지털로 전환할 필요성이 대두하였으며, 따라서 넓은 대역폭에 대한 요구가 더욱 증대되었다. 1960년대와 1970년대에 동축 케이블의 단점을 극복하고자 많은 노력이 이루어졌다. 통신 공학자들은 고주파의 반송파를 사용하여 신호를 전송함으로써 정보 전송 용량을 늘리고자 노력하였으며, 마침내는 마이크로파를 사용하기에 이르렀다. 하지만, 마이크로파는 부피가 크고 금속으로 된 도파관이 필요하여 비용이 증가하고 설치와 유지 관리도 어려웠다.

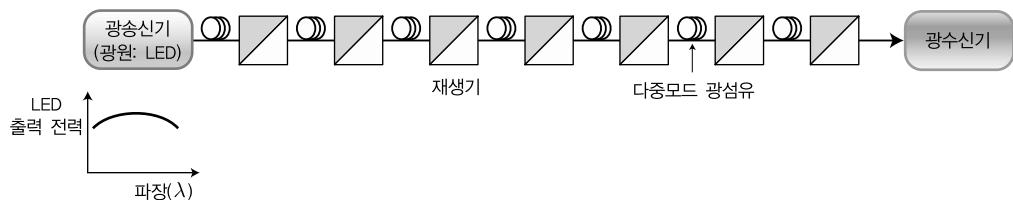
1960년대 레이저(laser)의 발명으로 빛을 이용한 통신 수단이 주목을 받았지만, 성공하지 못하여 빛을 전송할 매체 개발이 필요하게 되었다. 새로운 매체는 마이크로파 도파관과는 달리 부피가 작고 유연해야 함이 자명하였다. 이런 새로운 매체에 대한 이론적 가능성은 1621년 네덜란드의 수학자 스넬(Snell)에 의해 마련되었으며, 200여 년 뒤인 1870년에는 영국의 물리학자 틴들(Tyndall)이 빛은 직진만 한다는 고정관념을 깨고 전반사(total reflection)라는 현상에 의해 포물선 형태로 흐르는 물줄기를 따라 진행할 수 있음을 보였다.

1953년 인도 태생의 영국의 물리학자 캐퍼니(Kapany)는 오늘날과 같이 클래딩(cladding)이라는 구조를 갖춘 광전송 매체, 즉 광섬유를 개발했으며 광섬유 광학(fiber optics)이라는 말을 처음으로 사용하였다. 하지만, 그 당시는 빛이 전송되면서 전력(power)이 급격히 감소하여 전혀 실용성이 없었다.

현대적 의미의 광섬유에 대한 획기적인 논문은 중국계 영국의 물리학자 카오(Kao)에 의해 1966년에 발표되었다. 당시는 광섬유의 손실이 1,000dB/km 이상으로 통신시스템의 전송매체로는 적합하지 않았으나, 카오(Kao)와 그의 동료 호кам(Hockham)의 제안에 고무된 연구가들은 유리의 정제 문제에 집중하기 시작하였으며, 마침내 4년 후 코닝(Corning)사가 손실이 약 20dB/km인 광섬유를 제작하게 되었다. 또한, 실온에서 동작하는 반도체 레이저(semiconductor laser)의 제작이 거의 동시에 성공을 거둠으로써 서서히 빛을 사용하지 않는 암흑시대를 벗어나고 있었다. 이때 이후 전송 용량은 10년마다 약 100배씩 증가하는 비약적인 발전을 이루었으며, 통신 역사상 가장 짧은 기간에 가장 널리 사용되고 있는 기술로 자리 잡게 되었다. 카오(Kao)는 그 공로를 인정받아 2009년 노벨 물리학상을 받았다.

## 1.5.2 제 1세대 광통신

제1세대 광통신은 1970년대 후반에서 1980년대까지의 광통신을 말한다. 이 시기의 기술적 특징은 다중모드 광섬유(multi-mode fibers)<sup>4</sup>를 사용한 것과 갈륨비소(GaAs)로 제작된 LED(Light Emitting Diode)를 광원으로 사용한 것이다. 이 당시 LED의 출력 파장은  $0.8\mu\text{m}$ 에서  $0.9\mu\text{m}$  사이였으며, 광통신의 비트율은  $50\text{Mb/s}$ 에서  $100\text{Mb/s}$ 로 동축 케이블 통신시스템보다 높지 않았다. 하지만, 동축 케이블 통신시스템의 중계기(repeater)<sup>5</sup> 사이의 거리가 약  $1\text{km}$ 였고, 제1세대 광통신은 약  $10\text{km}$ 였다. 결국, 제1세대 광통신을 활용하게 된 동기는 중계기 간격이 길어 설치비용을 절감할 수 있었기 때문이다. [그림 1-9]는 LED와 다중모드 광섬유로 대표되는 제1세대 광통신 시스템의 개략도다.



[그림 1-9] 제1세대 광통신 시스템의 개략도

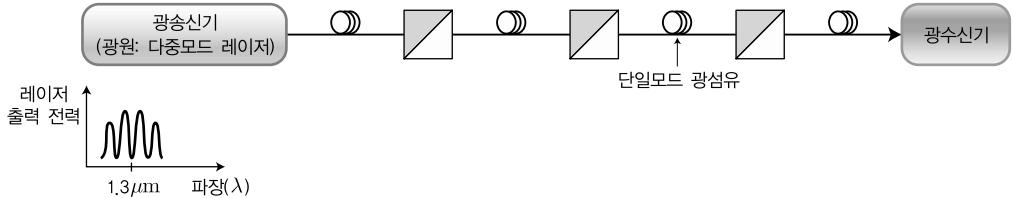
## 1.5.3 제 2세대 광통신

제2세대 광통신은 단일모드 광섬유(single-mode fibers)와  $1.3\mu\text{m}$  파장대의 다중모드(MM, Multi-longitudinal Mode) 레이저다이오드가 주로 사용되었으며, 1987년에는 비트율  $B = 1.7\text{Gb/s}$ , 중계기 간격  $L = 50\text{km}$ 인 제2세대 광통신 시스템이 상용화되었다. 제1세대에서 사용된 다중모드 광섬유는 모드 분산(modal dispersion)<sup>6</sup>이라는 현상에 의해 펄스가 퍼짐으로써 비트율을 향상하는 데 한계가 있었다. 하지만, 제2세대에서는 모드 분산이 존재하지 않는 단일모드 광섬유를 사용하고 또 광섬유의 손실이  $1\text{dB/km}$  이하로 낮은  $1.3\mu\text{m}$  파장대를 출력하는 반도체 레이저다이오드를 사용함으로써 제1세대에 비해 전송 속도 및 중계기 간격을 크게 향상할 수 있었다. [그림 1-10]은 단일모드 광섬유를 사용하지만  $1.3\mu\text{m}$  파장대의 다중모드 광원을 사용하는 제2세대 광통신 시스템의 개략도다.

4 모드 개념 및 다중모드 광섬유와 단일모드 광섬유에 대해서는 2장과 3장에서 자세히 설명한다.

5 광통신에서 중계기는 재생기(regenerator)를 의미한다. 재생기는 광수신기와 광송신기를 직렬로 연결한 것이다. 광수신기는 광신호를 수신하여 잡음과 왜곡을 제거한 전기적 신호로 바꾸고, 광송신기는 이 전기적 신호를 다시 광신호로 바꾼 다음 전송하는 장치다. 즉, 재생기를 거치면 잡음과 왜곡이 제거된 광신호가 된다. 광증폭기가 출현하면서 중계기는 광증폭기를 의미하기도 한다.

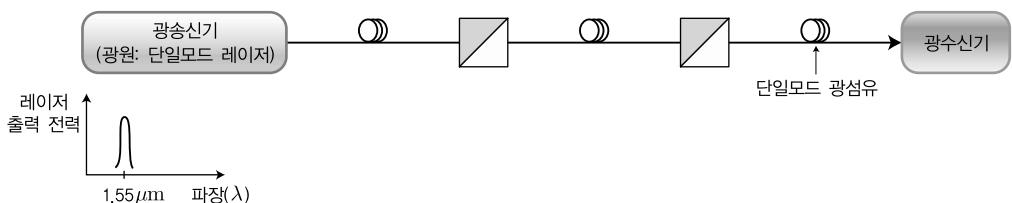
6 모드 분산은 광섬유로 전송되는 모드의 전송 속도 차에 의해 발생하며 다중모드 광섬유에서 입력 펄스보다 출력 펄스가 퍼지는 주요 원인이 된다. 3장에서 좀 더 자세히 다룬다.



[그림 1-10] 제2세대 광통신 시스템의 개략도

### 1.5.4 제 3세대 광통신

제3세대 광통신은 광섬유의 손실이 약  $0.2\text{dB/km}$ 로 가장 적은  $1.55\mu\text{m}$  파장을 사용하는 시스템을 말한다. 광섬유의 손실이  $1.55\mu\text{m}$  부근에서 가장 작다는 사실은 이미 오래 전에 알려졌다. 하지만, 단일모드 광섬유에서도 다중모드 광섬유에서 발생하는 모드 분산보다는 훨씬 작은 값이지만 군속도 분산(group-velocity dispersion)이라고 부르는 분산이 존재한다 (자세한 내용은 3장 참조). 이 분산값은  $1.3\mu\text{m}$ 에서는 최소가 되지만  $1.55\mu\text{m}$ 에서는 비교적 큰 값을 가진다. 따라서 제3세대 광통신은  $1.55\mu\text{m}$ 에서 발생하는 분산에 의한 성능 저하를 해결함으로써 가능하게 되었다. 분산에 의해 최대 전송 속도가 제한되는 것을 막기 위해  $1.55\mu\text{m}$ 에서 분산이 최소화되는 분산천이 광섬유(dispersion shifted fiber)가 제안되었으며, 단일 종모드(SLM: Single-Longitudinal Mode) 레이저처럼 레이저의 출력 스펙트럼 폭을 제한하여 분산 효과를 최소화하는 방법도 개발되었다. 1990년에는  $2.5\text{Gb/s}$ 에서 동작하며 종계기 사이의 거리가  $60\sim70\text{km}$ 인 제3세대 광통신이 상용화되었으며, 추후 성능이 개선된 반도체 레이저와 광수신기를 사용함으로써  $10\text{Gb/s}$ 까지 성능을 향상할 수 있었다. [그림 1-11]은 이와 같은 제3세대 광통신 시스템의 개략도다.



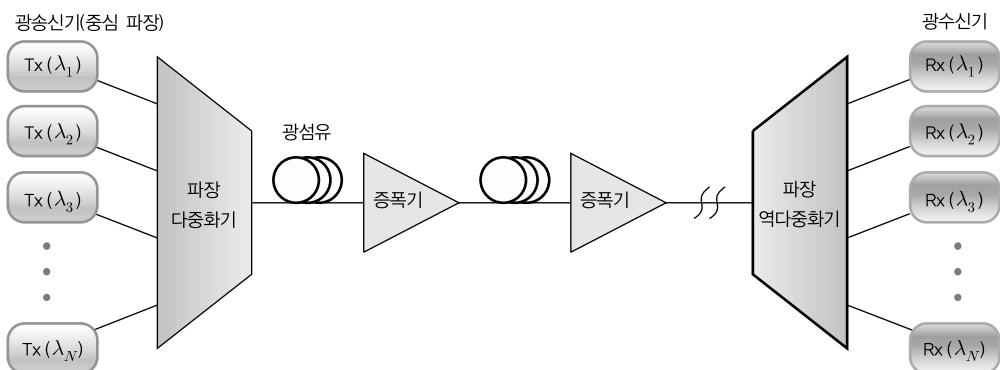
[그림 1-11] 제3세대 광통신 시스템의 개략도

### 1.5.5 제 4세대 광통신

제4세대 광통신의 핵심은 파장분할 다중화(WDM, Wavelength Division Multiplexing)와 광증폭기 기술이라 할 수 있다(WDM 시스템과 광증폭기에 대해서는 7장에서 좀 더 자세히 알아

본다). 이전 세대에서는 하나의 광섬유로 전송할 수 있는 채널이 하나였지만, WDM 기술을 사용하면 중심 파장이 다른 여러 채널을 묶어 하나의 광섬유로 동시에 전송할 수 있게 되므로 전송 용량이 획기적으로 증가하게 된다. 또한, 제3세대까지 광통신은 수십 km마다 주기적으로 재생기(regenerator)를 설치해야 했다. 재생기는 수신된 광신호를 전기적 신호로 바꾼 후 디지털 신호로 재생한 다음 다시 광신호로 변환하여 출력하는 역할을 한다. 따라서 각 재생기는 광송신기, 광수신기 및 그에 따른 전자 장치가 모두 필요하며 전송 속도를 향상하고자 한다면 모든 재생기를 교체해야 하므로 막대한 경제적 비용이 든다.

따라서 재생기를 사용하지 않는 WDM 시스템의 필요성이 증가하였다. 즉, 전기적 신호로 변환 없이 광신호 자체를 증폭할 수 있는 광증폭기가 개발됨에 따라 WDM 기술을 바탕으로 하는 제4세대 광통신 시대가 열렸다고 할 수 있다. [그림 1-12]는 광증폭기를 이용한 WDM 시스템의 개략도다.



[그림 1-12] 제4세대 광통신 시스템(WDM 시스템)의 개략도

제4세대 광통신 기술은 가히 혁명적이라 할 수 있다. 제4세대 광통신 기술은 6개월마다 전송 용량을 2배 정도 증가시켜 2001년에는 가능한 전송 용량이 10Tb/s에 이르게 되었다. 1996년 11,300km를 5Gb/s로 전송하는 데 성공하여 전 세계적으로 해저 광통신 시스템이 활발하게 구축되었으며, 인터넷으로 촉발된 ‘정보 혁명’을 제4세대 광통신 기술이 이끌었다고 하여도 과언이 아니다. 2000년대 이후에도 WDM 기술은 더욱더 발전하여 시스템 전송 용량을 더욱 증가시키고 있다. 2003년에는 각각 10Gb/s로 동작하는 373채널을 11,000km 이상 성공적으로 전송하여  $BL$ 곱이  $41,000[(\text{Tb/s}) \cdot \text{km}]$  이상이 된 경우도 보고되었다. 1980년 제1세대 광통신이 45Mb/s로 약 10km의 재생기 거리로 동작하였다는 사실을 상기한다면, 불과 30년 이 채 되지 않는 동안 광통신 공학자들이 이루어낸 업적은 놀라울 따름이다.

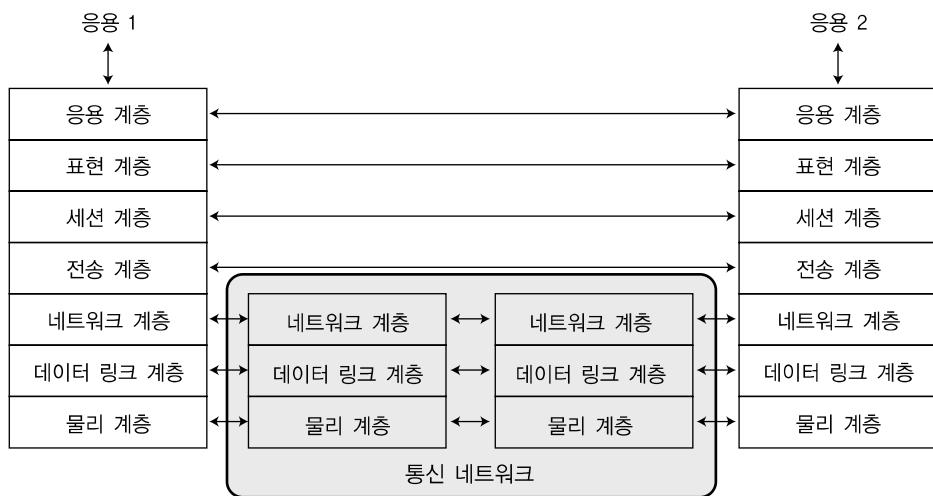
## 1.5.6 제4세대 광통신 이후

제5세대 광통신이라 불릴 특징적인 기술이 명확히 구체화되지는 않고 있다. 2000년부터 IT 업계를 중심으로 시작된 경기 침체의 여파로 새로운 기술을 적용한 광통신 시스템의 상용화는 거의 이루어지지 않았지만, 제5세대를 결정지을 새로운 연구 및 기술 개발은 끊임없이 이어져 오고 있다. 한 가지 뚜렷한 기술 방향은 WDM 시스템의 대역폭을 더욱 넓히기 위한 증폭기 기술이며, 이와 발맞추어 넓은 대역폭에 걸쳐 손실이 낮은 새로운 광섬유도 개발되었다. 한편, 광결정 섬유(photon crystal fiber)는 새로운 가능성, 즉 손실 및 비선형 왜곡이 거의 발생하지 않을 가능성을 열었다. 또한, 스펙트럼의 효율성을 높이기 위한 새로운 변조 방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있어, 제5세대 광통신은 이들 새로운 기술들이 결합한 형태일 가능성이 높다.

## 1.6 광통신 네트워크와 응용

광통신 공학을 포함한 현대 통신시스템은 아주 복잡하여 어떤 공학자도 그 시스템의 모든 분야에서 전문적인 지식을 갖추기란 불가능하다. 따라서 현대 통신시스템은 서로 다른 전문 분야를 따로 구분하고 이들 다수의 전문 분야들을 상호 연결하기 위해 흔히 계층(layer)으로 나누어 설계한다. 현대 통신시스템은 상위 수준에서의 네트워크 구조에 대한 규격을 갖추고 있으며, 흔히 계층들로 나뉘어 구현된다. 계층 구조를 설계하는 데 있어 장점은 어떤 특정 계층에서 시스템을 설계할 때 다음 하위 계층은 추상적인 양으로 취급할 수 있으며, 차상위 계층의 기능이 설계에 영향을 미치지 않는다는 것이다. 계층별 설계의 또 다른 장점은 각 계층이 재사용될 수 있다는 것이다. 이처럼 필요할 때 이전 설계에서 사용하였던 계층을 재사용함으로써 서비스와 시스템을 훨씬 빨리 개발할 수 있게 되었다.

계층별 구조의 예로는 개방 시스템 상호접속(OSI, Open Systems Interconnection)이 있다. OSI 모델은 국제 표준화 기구(ISO, International Organization for Standardization)에 의해 개발되었으며, 실제 널리 이용되고 있다. [그림 1-13]은 OSI의 기준 모델을 나타내고 있다. 각 계층은 표준 프로토콜(protocol)을 사용하여 특정 기능을 수행하며, 하위 계층에서 제공하는 서비스를 이용하여 다음 상위 계층에 서비스를 제공한다. OSI 모델을 사용함으로써 나머



[그림 1-13] OSI의 기준 모델

지 시스템의 성능에 영향을 미치지 않으면서도 각 계층의 어디에나 새로운 기술을 적용할 수 있을 뿐만 아니라, 같은 기본 구조를 사용하여 다른 응용 기능을 개발할 수도 있다. 계층 구조의 개념을 도입하여 이전에 이루어진 주요 기술성과를 이용할 수 있게 됨으로써 비약적으로 기술 진보가 이루어졌다.

이 책은 전적으로 물리 계층(physical layer)의 통신에 초점을 맞추고자 한다. 물리 계층의 통신이란 물리적인 신호(아날로그 파형 또는 디지털 데이터 비트)를 통신 채널을 통해 직접 전송하는 것을 의미한다. 물리 계층을 다루는 통신 공학자<sup>7</sup>의 목표는 가능한 한 왜곡이 발생하지 않도록 정보를 전송하는 것이다. 따라서 전송매체의 특성은 물론 신호를 전송하는 데 사용 가능한 에너지 및 대역폭과 비용 등을 고려하여 최적의 통신시스템을 설계해야 한다.

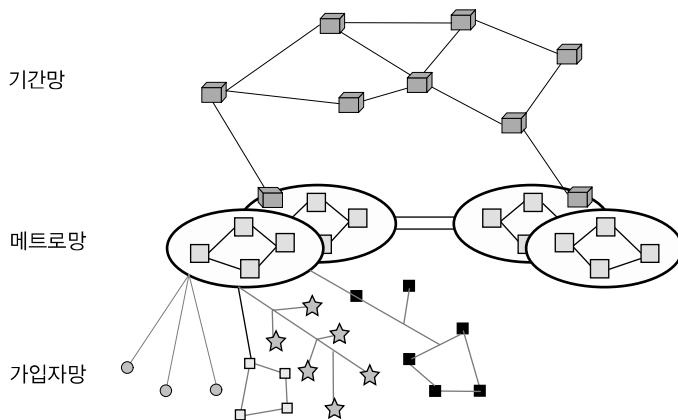
물리 계층에서 사용하는 공학적 도구와 기술, 그리고 설계 방법론은 그 상위 계층과 상당히 차이가 난다. 물리 계층이 컴퓨터의 하드웨어에 해당한다면, 상위 수준(higher level)들은 여러 종류의 소프트웨어에 해당한다고 할 수 있다. 상위 수준을 다루는 공학자는 스위칭 구조, 다중 사용자 지원, 네트워크의 유연성, 내고장성(고장이 잘 나지 않는 성질), 지원하는 응용 기능 등에 관심을 집중하는 반면, 물리 계층을 다루는 공학자는 [그림 1-7]과 같은 두 지점 간의 통신(point-to-point communication)에 초점을 맞춘다. 교과 과정 역시 물리 계층과 그 이상의 상위 계층들을 다루는 교과목들이 뚜렷이 분류되는 경향이 있으며, 상위 계층에 관심이 있는 독자들은 이 부분에 초점을 맞춘 참고 문헌을 참조하면 될 것이다.

### 1.6.1 광통신 네트워크

광통신 네트워크(또는 광통신망)는 [그림 1-7]과 같은 광통신 링크들이 상호 연결된 결합체라고 할 수 있다. 이를 기능별로 분류하여 전송망과 가입자망으로 나눌 수도 있고, 규모에 따라 분류하여 기간망, 메트로망, 그리고 가입자망으로 나눌 수도 있다. [그림 1-14]는 규모에 따른 광통신 네트워크의 개념을 보여 준다.

---

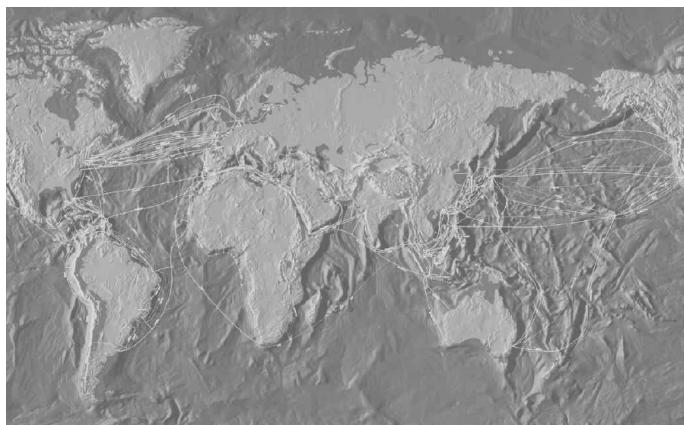
<sup>7</sup> 일반적으로 통신 공학자란 물리 계층을 다루는 학자를 의미한다.



[그림 1-14] 규모에 따른 광통신 네트워크

## 기간망

기간망(backbone network)은 전체 통신망의 뼈대를 이루는 것으로 국가와 국가, 또는 도시와 도시를 잇는 네트워크를 말하며, 반경이 수백 km에서 수천 km에 이른다. 메트로망에서 올라온 데이터를 다중화(multiplex)하여 송수신하므로 오늘날에는 비트율이 수 Tb/s에 이른다. 최초의 도시 간(뉴욕과 워싱턴 D.C.) 광통신 연결망이 1983년 초에 설치되었고, 1988년에는 최초의 대서양 횡단 광통신 연결망이 구축되었다. 이후 1996년에 설치된 대서양 간 광섬유 케이블(TAT-12와 TAT-13)은 파장분할 다중화 방식을 사용하여 30만 음성 신호를 동시에 전송할 수 있게 되었다. 1999년 말에는 전 세계적으로 약 1억 2천만 km의 광섬유가 설치되었다(참고로 지구의 둘레는 약 4만km다). 광섬유 없이는 현대적 통신 네트워크가 존재할 수 없다고 해도 과언이 아니다. [그림 1-15]는 해저에 깔린 전 세계의 광통신 기간망을 보여 준다.



[그림 1-15] 해저 광통신 네트워크

## **메트로망**

메트로망(metro network)은 도시 내에서 각 전화국 사이를 연결하는 통신망을 의미한다. 가입자망(access network)에서 올라온 데이터를 다중화하여 통신하므로 송수신율은 수 Gb/s에서 수십 Gb/s에 이른다. 가입자망과 기간망을 상호 접속시키는 역할을 하며, 이동통신, 위성 통신의 스위칭 센터로서의 역할도 한다.

## **가입자망**

가입자망은 지역 교환기(주로 전화국)와 지역 내의 가입자들 단말기를 연결하는 네트워크를 말한다. 기간망과 메트로망은 매우 큰 정보 전송 용량이 필요하지만, 네트워크의 형태 (topology)는 비교적 단순한 편이어서 광통신을 적용하는 것이 경제적으로 유리했다. 반면 가입자망은 네트워크 형태는 복잡하지만 필요한 정보 전송 용량은 상대적으로 낮아 광통신 기술을 적용하는 것이 그다지 경제적이지 못했다. 하지만, 최근 디지털 TV, 홈 네트워킹 등과 같은 영상 중심의 멀티미디어 서비스가 속속 제공됨에 따라 점점 더 빠른 데이터 전송 속도가 필요해졌다. 그에 따라 구리선이나 동축 케이블로 전송할 수 있는 한계를 넘어서서 광통신 기술을 적용하여야 하는 영역이 가입자망에서도 점점 늘어가고 있다. 단일모드 광섬유를 직접 가입자 집까지 설치하여 이를 통해서 정보를 주고받는 방식을 FTTH(Fiber-To-The-Home)라고 한다. 최근 광소자의 가격 하락과 광섬유를 다루는 기술 등의 발전으로 수동형 광가입자망(PON, Passive Optical Network)이 FTTH 기술로 주목받고 있다. PON은 광 분배기(optical splitter)를 통해 여러 가입자가 광가입자망을 공유하는 방식으로 동선 전화망 구축 비용 수준의 저렴한 광가입자 기술이다.

# 1.7 dB과 dBm

중학교 수준의 수학을 이해하는 사람이라면 로그(log)의 유용성을 기억하고 있을 것이다. 아주 작은 수부터 큰 수까지를 압축하여 표현할 수 있고, 곱셈이 덧셈으로, 나눗셈이 뺄셈으로 전환되어 연산을 간편하게 할 수 있다. [표 1-4]에 상용 로그의 성질을 정리하였다.

[표 1-4] 로그의 성질

번호	성질
1	$\log_{10}(XY) = \log_{10}(X) + \log_{10}(Y)$
2	$\log_{10}(X/Y) = \log_{10}(X) - \log_{10}(Y)$
3	$\log_{10}(X^N) = N\log_{10}(X)$
4	$\log_{10}(\sqrt[N]{X}) = (1/N)\log_{10}X$
5	$\log_{10}(10) = 1$
6	$\log_{10}(1) = 0$
7	$\log_{10}(A) > 0 \text{ if } A > 1$
8	$\log_{10}(A) < 0 \text{ if } 0 < A < 1$

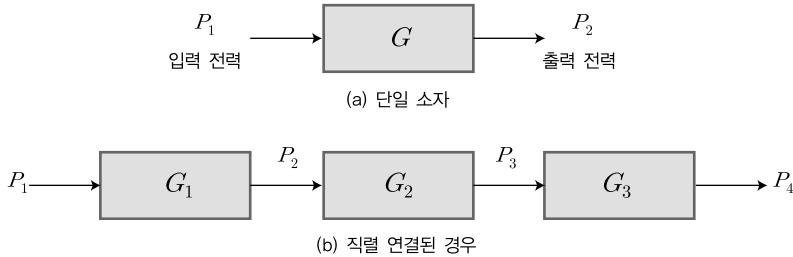
## 1.7.1 dB의 정의와 활용

공학자들이 실무에서 흔히 사용하는 데시벨(dB, decibel)은 로그의 성질을 이용한 것이다. 데시벨은 단위가 같은 두 물리량을 비교할 때만 의미가 있으며, 상대적인 양을 측정하기 위한 것이다. 통신 공학자들은 두 신호의 전력을 비교하기 위해 흔히 데시벨을 사용한다(식 (1.4)).

$$G[\text{dB}] = 10\log_{10}\left(\frac{P_2}{P_1}\right) \quad (1.4)$$

여기서  $G$ 는 dB로 표현된 전력비다.  $P_1$ 을 어떤 광소자(또는 시스템)에 인가된 광신호의 전력이라고 하고,  $P_2$ 를 출력 전력이라고 하자([그림 1-16(a)] 참조). 만약  $G > 0$ 이면  $P_2$ 가  $P_1$ 보다 큰 것을 의미하고, 이 광소자는 입력 광신호의 전력을 증폭하여 출력한 것이다. 특별히 이런 역할을 하는 광소자를 광증폭기(optical amplifier)라고 하고,  $G$ 를 이 광증폭기의 이득(gain)이라고 부른다(광증폭기에 대해서는 7장에서 좀 더 자세히 알아본다). 만약  $P_2 = 10P_1$ 일

경우, 공학자들은 ‘ $P_2$ 가  $P_1$ 보다 10배 크다.’라고 하는 대신 흔히 ‘ $P_2$ 가  $P_1$ 보다 10dB 높다.’라고 말한다.  $G[\text{dB}]$ 를 알면 선형 이득, 즉  $g = \frac{P_2}{P_1}$ 는 식 (1.4)에서  $g = 10^{G/10}$ 와 같이 구할 수 있다.



[그림 1-16] dB의 적용

광증폭기를 제외하면 대부분의 광소자는 입력되는 광신호의 전력이 일부 손실된 채로 출력되므로  $G < 0$ 이 된다. 식 (1.5)은 손실  $L$ 을 dB로 표현한 것이다.

$$L[\text{dB}] = -10\log_{10}\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = -G[\text{dB}] \quad (1.5)$$

즉, 어떤 광소자의 이득이  $-3\text{dB}$ 이라면, 손실이  $+3\text{dB}$ 과 같은 의미며, 손실이  $-3\text{dB}$ 이라면 이득이  $+3\text{dB}$ 이라는 의미다.

광통신 시스템은 전자공학의 다른 모든 분야처럼 여러 소자나 서브시스템(subsystem)들이 서로 직렬 연결되어 구성되는 경우가 많다. 이제 [그림 1-16(b)]처럼 세 개의 광소자들이 직렬 연결되어 구성된 경우를 생각해 보자. 첫 번째 소자의 출력이 두 번째 소자의 입력이 되고, 두 번째 소자의 출력이 마지막 소자의 입력이 되므로, 전체 시스템의 이득은 식 (1.6)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_{total} &= 10\log_{10}\frac{P_4}{P_1} = 10\log_{10}\left(\frac{P_2}{P_1} \times \frac{P_3}{P_2} \times \frac{P_4}{P_3}\right) \\ &= 10\log_{10}\frac{P_2}{P_1} + 10\log_{10}\frac{P_3}{P_2} + 10\log_{10}\frac{P_4}{P_3} = G_1 + G_2 + G_3 \end{aligned} \quad (1.6)$$

데시벨로 표현하면 개별 소자들의 이득 또는 손실을 각각 더하면 되므로 계산이 간편할 뿐 아니라, 각 소자가 전체 시스템의 이득(또는 손실)에 얼마만큼 이바지하는지 쉽게 알 수 있다. 참고로 [표 1-5]는 전력비와 이에 해당하는 데시벨을 함께 나타내었다. 전력비가 2배인 경우

정확히는 3.0103dB에 가까우나, 흔히 3dB이라고 한다. 즉, 출력이 입력보다 3dB 높다는 것은 입력이 2배로 증폭되었다는 의미와 같다.

[표 1-5] 전력비와 데시벨

$\frac{P_2}{P_1}$	$G[\text{dB}]$
0.00001	-50
0.0001	-40
0.001	-30
0.01	-20
0.1	-10
0.5	-3
1	0
2	3
10	10
20	13
100	20
1000	30
10000	40
100000	50

### 1.7.2 dBm의 정의와 활용

이제까지는 데시벨을 상대적인 양을 측정하는 데 사용하였는데, 절대적인 양을 표현하는 데도 데시벨을 사용할 수 있다. 물론 그 동기는 역시 로그의 편리함을 이용하기 위해서다. dBm은 광통신 공학에서 자주 사용되는데, 전력 1mW를 기준으로 데시벨로 나타낸 것이다. 즉, 어떤 전력  $P_1$ 을 dBm 단위로 표현하면 식 (1.7)과 같이 된다.

$$X[\text{dBm}] = 10\log_{10}\left(\frac{P_1[\text{mW}]}{1\text{mW}}\right) \quad (1.7)$$

여기서  $X$ 는  $P_1$ 을 dBm으로 나타낸 것이다. 주의할 것은  $P_1$ 의 단위가 기준 전력의 단위, 즉 [mW]와 같아야 한다. 예를 들어, 1W는 1000mW와 같으므로 dBm으로 나타내면  $10\log_{10}\left(\frac{1000\text{mW}}{1\text{mW}}\right) = 10\log_{10}1000 = 30\text{dBm}$ 과 같다. 즉, 입력 전력이 1mW라는 것은 입력 전력이 0dBm이라고 말하는 것과 같다.

## 예제 1-1

어떤 광증폭기의 입력 신호 전력이  $-20\text{dBm}$ 이고 출력 신호의 전력은  $+3\text{dBm}$ 이었다. 이 광증폭기의 이득은 몇 dB인가? 그리고 광신호는 몇 배 증폭되었나?

## 풀이

광증폭기의 입력 전력을  $P_1[\text{mW}]$ , 출력 전력을  $P_2[\text{mW}]$ 라고 하면, 식 (1.4)를 이용하여 얻은 이득은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G[\text{dB}] &= 10\log_{10}\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{P_2/1\text{mW}}{P_1/1\text{mW}}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{P_2}{1\text{mW}}\right) - 10\log_{10}\left(\frac{P_1}{1\text{mW}}\right) \\ &= +3\text{dBm} - (-20\text{dBm}) = 23\text{dB} \end{aligned}$$

$\text{dBm}$  단위에서  $\text{dBm}$  단위를 빼는 것은  $\text{dB}$  단위와 같아짐에 주목하라. 두  $\text{dBm}$  단위가 더해지는 것은 의미가 없다. 즉, 이득  $G[\text{dB}]$ 는  $\text{dBm}$  단위의 출력 전력에서  $\text{dBm}$  단위의 입력 전력을 빼면 된다.

$G = 23\text{dB}$ 을 환산하여 선형 스케일에서의 이득  $g$ 를 계산하면,  $g = 10^{G[\text{dB}]/10} = 10^{2.3} = 200$ 이 된다. 또는 입력 신호 전력이  $-20\text{dBm} = 0.01\text{mW}$ 고 출력 신호 전력은  $3\text{dBm} = 2\text{mW}$ 이므로  $g = 2\text{mW}/0.01\text{mW} = 200$ 이 된다. 즉, 이 광증폭기의 이득은  $23\text{dB}$ 이며, 이는 광신호가 200배 증폭되어 출력되는 것을 의미한다.

## 예제 1-2

[그림 1-16(b)]와 같이 세 개의 광소자가 직렬로 연결되어 있다. 이득이 각각  $G_1 = -3\text{dB}$ ,  $G_2 = -10\text{dB}$ , 그리고  $G_3 = 20\text{dB}$ 이고 입력 신호의 전력이  $P_1 = 0.5\text{mW}$ 라고 한다. 출력 신호의 전력  $P_4$ 를 구하라.

## 풀이

우선 데시벨을 사용하지 않고 출력 신호의 전력  $P_4$ 을 구해보자.

$$P_1 = 0.5\text{mW} \xrightarrow{G_1 = -3\text{dB}} P_2 \xrightarrow{G_2 = -10\text{dB}} P_3 \xrightarrow{G_3 = +20\text{dB}} P_4$$

$$\frac{P_2}{P_1} = 10^{\frac{G_1}{10}}, \quad \frac{P_3}{P_2} = 10^{\frac{G_2}{10}}, \quad \frac{P_4}{P_3} = 10^{\frac{G_3}{10}} \quad \text{이므로} \quad P_4 = P_1 \times \frac{P_2}{P_1} \times \frac{P_3}{P_2} \times \frac{P_4}{P_3} = P_1 \times 10^{\frac{G_1}{10}} \times 10^{\frac{G_2}{10}} \times$$

$$10^{\frac{G_3}{10}} = 0.5[\text{mW}] \times 0.5 \times 0.1 \times 100 = 2.5[\text{mW}] = 4\text{dBm} \quad \text{이 된다. 이제 데시벨을 사용하여 구해}$$

$$\text{보면 } P_4[\text{dBm}] = 10\log_{10}\left(\frac{P_1}{1\text{mW}} \times \frac{P_2}{P_1} \times \frac{P_3}{P_2} \times \frac{P_4}{P_3}\right) \quad \text{이므로} \quad P_4[\text{dBm}] = P_1[\text{dBm}] + G_1[\text{dB}] +$$

$G_2[\text{dB}] + G_3[\text{dB}] = -3 + (-3) + 20 = 4\text{dBm}$ 과 같이 간단한 덧셈으로 구할 수 있다 ( $\text{dBm}$  단위에  $\text{dB}$ 을 더하면 그 결과는  $\text{dBm}$  단위가 됨에 주목하자).

광소자 제조업체들이 제공하는 규격에는 이득 혹은 손실을 dB로, 전력은 dBm 단위로 표시하는 경우가 많으므로 데시벨을 사용하는 것이 여러모로 편리하다.

### 결장 어드바이스

#### + 손실

손실이  $-3\text{dB}$ 이라는 것은 이득이  $+3\text{dB}$ 과 같은 의미임을 이미 설명하였다. 하지만, 광소자나 부품 제조회사에서 제공하는 기술 자료나 데이터시트(datasheet) 등에는 손실이  $+3\text{dB}$ 임을 나타낼 때 음의 부호를 사용하여  $-3\text{dB}$ 로 사용하는 때도 종종 있다. 염밀하게는 잘못 표기된 것으로 혼동을 줄 수 있지만, 대부분은 공학적 지식으로 쉽게 판단할 수 있다. 예를 들어, 어떤 수동소자의 삽입 손실(insertion loss)이  $-3\text{dB}$ 이라고 데이터시트에 기재되어 있다면 그 소자가 실제 이득을 제공할 수는 없으므로 삽입 손실이  $+3\text{dB}$ 이라는 의미다.

#### + dB과 dBm의 계산

dB 단위를 제대로 다루지 못하면 엉뚱한 결과를 얻을 수 있으므로 주의해야 한다. 실제 업무에서 흔히 나타나는 dB과 dBm의 계산을 정리하면 다음과 같다.

- dB에 dB을 더하면 결과는 역시 dB이 된다. 즉,  $A[\text{dB}] + B[\text{dB}] = (A + B)[\text{dB}]$ 이다. 어떤 두 시스템(혹은 소자)이 직렬로 연결되어 있으면 전체 이득(혹은 손실)을 계산할 때 흔히 나타난다.
- dBm에서 dBm을 빼면 dB이 된다. 즉,  $A[\text{dBm}] - B[\text{dBm}] = (A - B)[\text{dB}]$ 이 된다([예제 1-1] 참조).
- dB에 dBm을 더하면 결과는 역시 dBm이 된다. 즉,  $A[\text{dBm}] + B[\text{dB}] = (A + B)[\text{dBm}]$ 이 된다([예제 1-2] 참조).
- 참고로 dBm에 dBm을 더하는 경우는 두 전력량을 곱하는 것에 해당하므로 의미가 없다.

### 여기서 주의!

#### + dBW와 $\text{dB}\mu$ 그리고 전압(또는 전류)비의 dB

데시벨은 주로 전력비를 계산할 때 사용되지만, 전압비 혹은 전류비를 계산할 때도 사용된다.

어떤 부하저항  $R$ 에서 소모되는 전력  $P = \frac{V^2}{R} = I^2 R$ 이므로 같은 저항에 소모되는 전력비를 데시

벨로 나타내면  $G[\text{dB}] = 10\log_{10}\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{V_2^2/R}{V_1^2/R}\right) = 10\log_{10}\left(\frac{V_2^2}{V_1^2}\right) = 20\log_{10}\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$  가 되며

전류에 대해서도 비슷하게 표현할 수 있다. 차이는 로그 앞의 인자가 10이 아니라 20이 된다는 점이다. 따라서 전압 또는 전류비를 데시벨로 나타내면 3dB은 [표 1-5]에서 나타낸 것처럼 2배

가 아니라  $\sqrt{2}$  배가 되며,  $-3\text{dB}$ 은  $\frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$ 이 된다.

일반적으로 통신시스템에서 사용하는 신호는 전력이 작은 값이므로 1mW를 기준으로 하는 dBm 이 자주 쓰인다. 하지만, 1W를 기준으로 하는 dBW, 1μW를 기준으로 하는 dB $\mu$  등도 사용한다. 즉, 아래와 같다.

$$X[\text{dBW}] = 10\log_{10}\left(\frac{P_1[\text{W}]}{1\text{W}}\right), \quad X[\text{dB}\mu] = 10\log_{10}\left(\frac{P_1[\mu\text{W}]}{1\mu\text{W}}\right)$$

# 1.8 컴퓨터 시뮬레이션과 MATLAB

컴퓨터 시뮬레이션은 전자공학뿐만 아니라 자연과학 및 공학의 전 분야에 걸쳐 폭넓게 사용되어왔다. 이제 컴퓨터 시뮬레이션은 공학자를 도와주는(computer-aided design) 수준을 넘어 소자 또는 시스템 설계 과정에서 필수 요소가 되었다. 현대의 전자시스템이 너무 복잡하여 아무리 훌륭한 공학자라 하더라도 설계 과정에서 컴퓨터의 도움 없이는 성능을 예측하기가 어려우며, 성능을 최적화하기는 더더욱 불가능해졌기 때문이다. 하지만, 공학자의 역할은 더욱 늘어났다. 시뮬레이션의 목적에 따라 적절한 시뮬레이션 방법(methodology)과 모델(model)을 선택하거나 개발하여야 한다. 또한, 시뮬레이션 결과에 대한 판단은 전적으로 공학자의 몫이다.

이미 광통신 시스템의 설계를 전용으로 개발된 상업용 소프트웨어 패키지가 시중에 나와 있지만, 이 책은 MATLAB을 이용하여 광통신에 사용되는 소자를 모델링하고 주요 개념을 소개하며, 설계 과정을 보여 주고자 한다. MATLAB이 선택된 이유는 다음과 같은 뚜렷한 장점들이 있기 때문이다. 첫째, MATLAB은 신호 처리, 제어, 통신시스템 등 공학 전 분야에 걸쳐 널리 사용되고 있다. 둘째, 사용하기 쉽고 그래픽 처리 기능이 뛰어나며 계산 기능 또한 아주 우수하다. 셋째, MATLAB은 내장 함수 및 라이브러리가 풍부하며, 특정 목적을 위한 새로운 함수를 작성하기도 아주 쉽다. MATLAB을 처음 접하는 학생들도 부록 B를 참조하여 예제를 따라하면 쉽게 MATLAB의 여러 기능을 배울 수 있을 것이다.

여기에서는 광통신뿐만 아니라 신호 처리 및 통신 시스템을 컴퓨터로 시뮬레이션할 때 고려해야 할 기본적인 문제를 MATLAB으로 어떻게 처리하는지 보여 주고자 한다.

## 1.8.1 MATLAB을 이용한 가우시안 펄스의 표현

우선 광전송기(optical transmitter)에서 발생하는 디지털 펄스가 가우시안(Gaussian) 함수 모양이라고 가정하자. 빛의 진행 방향이  $z$ 축이라고 한다면, 고정된 위치(편의상  $z = 0$ )에서 관찰한 광펄스  $p(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>8</sup>

<sup>8</sup> 일반적으로 펄스(pulse)는 전류 또는 전압이 시간에 따라 변하면서 펄스 모양을 이루는 것을 말한다. 광펄스는 빛의 전력(power)이 시간에 따라 변하면서 펄스 모양을 이루는 것을 말하므로 단위는 [mW]가 주로 사용된다.

$$p(t) = P_o \exp\left(-\frac{t^2}{t_o^2}\right) \quad (1.8)$$

여기서  $P_o$ 는 광전송기에서 출력되는 광펄스(optical pulse)의 최고치를 나타내며, 흔히 [mW] 단위로 표현된다.  $t_o$ 는 광펄스의 폭을 나타내는 파라미터로  $t = t_o$ 이면 광전력이  $1/e$ 로 감소 함을 의미한다. 광펄스를 구성하는 전기장(electric field)의 포락선을  $a(t)$ 라고 한다면 광펄스  $p(t)$ 와는 다음과 같은 관계에 있다.

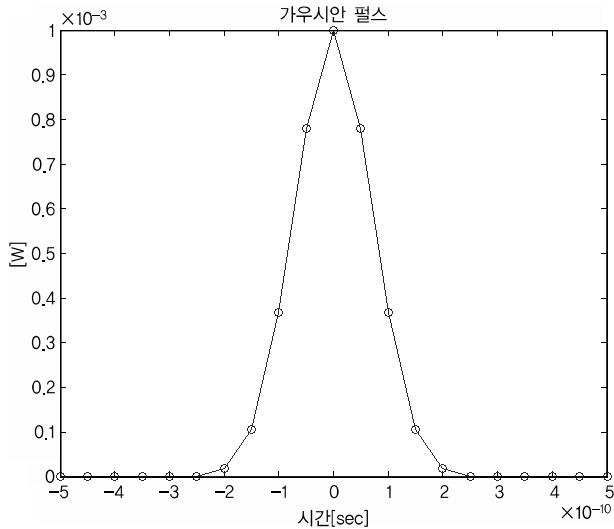
$$a(t) = \sqrt{p(t)} = \sqrt{P_o} \exp\left(-\frac{t^2}{2t_o^2}\right) \quad (1.9)$$

예를 들어,  $P_o = 1\text{mW}$ ,  $t_o = 100\text{ps}$ 와 같이 결정되면 우리는 식 (1.8) 또는 식 (1.9)를 완벽하게 이해할 수 있다.  $P_o$ 와  $t_o$ 는 MATLAB 명령어 창(command window)에서 다음과 같이 정의한다(>>는 MATLAB 명령어 창의 커서며, % 이후는 주석(comment)이다).

```
>> Po = 1e-3; %[W]
>> to = 100e-12; %[sec]
```

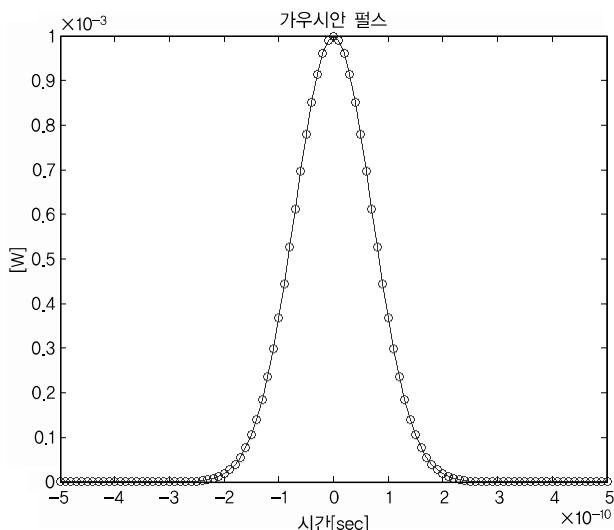
하지만, 컴퓨터로 식 (1.8)을 표현하기 위해서는 다음 두 가지 사항을 더 고려해야 한다. 첫 번째는 식 (1.8)을 표현할 시간의 범위, 즉  $t$  값을 결정해야 한다. 두 번째는 좀 더 주의 깊게 고려해야 할 사항인데, 시간  $t$ 의 간격을 결정해야 한다. 즉, 식 (1.8)은 연속 시간 함수지만 컴퓨터로는 표현할 수 없으며, 이산 시간 함수로 표현해야 한다. 시간  $t$ 의 간격이 충분할수록 식 (1.8)에 더 가깝겠지만, 그 대신 데이터의 양이 늘어나서 컴퓨터 메모리를 더 많이 차지하게 된다. 시간 범위를  $[-500\text{ps}, +500\text{ps}]$ 로 하고 시간 간격  $\Delta t = 50\text{ps}$ 로 하여 식 (1.8)을 그려보기 위해서는 다음과 같은 MATLAB 코드를 순서대로 실행시키면 된다.

```
>> Po = 1e-3; %[W]
>> to = 100e-12; %[sec]
>> t=(-5:0.5:5)*to; % t의 범위 및 간격 결정
>> e_pulse_gaussian = sqrt(Po)*exp(-t.^2/(2*t_o^2)); % 식 (1.9) 표현
>> optical_pulse_gaussian = e_pulse_gaussian.*e_pulse_gaussian; % 식 (1.8) 표현
>> plot(t,optical_pulse_gaussian,'-o') ; % 광펄스를 t에 대해 그림
```



[그림 1-17]  $\Delta t = 50\text{ps}$  일 때의 가우시안 광펄스

MATLAB은 계산 결과 발생한  $[1 \times 21]$ 개의 데이터로 [그림 1-17]과 같은 결과를 나타내었다. 그림에서 (o) 표시된 지점이 실제 MATLAB 계산 결과를 나타낸다((o) 표시 사이의 실선은 `plot` 명령문에 의해 발생된 것이다). [그림 1-17]은 데이터 개수가 너무 적어 부드러운 가우시안 곡선을 제대로 표현하지 못하고 있다. 같은 시간 범위에서 시간 간격을  $\Delta t = 10\text{ps}$ 로 줄이면( $t=(-5:0.1:5)*t_0;$ ) 데이터 개수를  $[1 \times 101]$ 개로 증가시킬 수 있다. 이제 그림을 다시 그려 보면 [그림 1-18]과 같은 부드러운 가우시안 곡선을 얻을 수 있다.



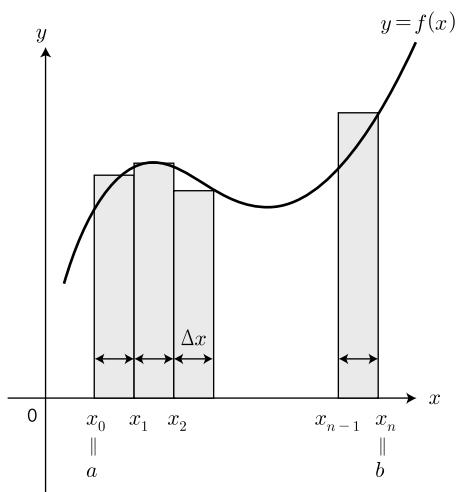
[그림 1-18]  $\Delta t = 10\text{ps}$  일 때의 가우시안 광펄스

MATLAB에 좀 더 익숙해지면 명령어 창에서 명령어를 한 문장씩 입력한 후 Enter 키를 눌러 실행시키는 쌍방향(interactive) 방식 대신 명령어를 모두 모아 하나의 파일로 저장한 다음 한꺼번에 실행시킬 수도 있다. 이때 목적으로 사용되는 파일을 스크립트(script) 파일이라고 하며, 저장할 때 확장자가 .m으로 흔히 M 파일이라고 부른다. M 파일은 MATLAB 자체의 편집기를 사용하여 편집할 수도 있지만, 다른 문서 편집기를 사용해도 무방하다. 스크립트 파일을 사용하면 명령어를 쉽게 수정하여 다시 실행시킬 수 있으므로 여러모로 편리하다.

## 1.8.2 적분

연속 시간으로 표현되는 신호의 많은 특성이 적분으로 정의된다. 예를 들어, 신호의 에너지는 신호의 전력을 시간에 대해 적분하여 얻을 수 있다. 즉, 식 (1.8)과 같은 광펄스의 에너지는 식 (1.8)을 시간에 대해 적분하면 구할 수 있다. 적분으로 정의되는 또 다른 예는 푸리에 변환(Fourier transform), 컨볼루션(convolution) 등이 있다. MATLAB은 이산 데이터만 가질 수 있으므로 적분을 할 수 없지만, 원하는 정확도로 근사적인 적분값을 계산할 수는 있다. 여기서는 MATLAB으로 적분값을 구하는 방법을 예시하고자 한다.

미분적분학에서 정적분을 배운 것을 기억할 것이다. 구간  $[a, b]$ 에서 어떤 곡선  $f(x)$ 와  $x$ 축 사이의 면적을 구하는 것을 예로 들어 보자. 구간  $[a, b]$ 에서  $f(x)$ 로 둘러싸인 면적은 [그림 1-19]와 같이 구간  $[a, b]$ 를  $n$  등분한 사각형의 합으로 근사할 수 있고, 극한의 개념을 도입하여 등분 수를 무한대로 하면 정확한 넓이를 계산할 수 있다.



[그림 1-19] 정적분의 개념

MATLAB은 무한한 데이터를 가질 수 없으므로, 적분값은 식 (1.10)과 같은 합으로 근사적으로 구한다.

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=0}^{n-1} f(x_k)\Delta x \simeq \Delta x \sum_{k=0}^{n-1} f(x_k) \quad (1.10)$$

여기서  $\Delta x = \frac{b-a}{n}$ ,  $x_k = a + k\Delta x$ 이다. 예를 들어,  $f(x)=x^2$ 를  $[0,1]$  구간에서 적분하면  $\int_0^1 x^2 dx = \frac{1}{3} = 0.3333\dots$ 이 된다. MATLAB에서는 sum 함수를 사용하여 식 (1.10)의 근사식을 다음과 같이 구할 수 있다.

```
>>x_min = 0; x_max = 1;
>>data_length = 100;
>>dx = (x_max-x_min)/data_length; % x의 증분, Δx

>>x = x_min:dx:x_max;

>>f_x = x.^2; % 함수 f(x)=x^2를 정의9

>>s1 = dx*sum(f_x); % 식 (1.10) 근사식
>>s2 = dx*trapz(f_x); % 사다리꼴 방법(trapezoidal method)을 이용한 경우
>> s1

s1 =
0.3383

>> s2

s2 =
0.3333
```

식 (1.10)의 근사식을 sum 함수를 사용하여 표현한 s1은 이론값인  $\frac{1}{3}$ 과 약간의 오차를 보이고 있는데  $x$ 의 증분  $\Delta x$ 를 감소시키면 이 오차는 줄일 수 있다. 참고로 s2는 좀 더 세련된 수치해석 계산인 사다리꼴 방법(trapezoidal method)을 이용하는 MATLAB의 내장 함수 trapz에 의한 계산 결과다. 같은 증분  $\Delta x$ 에서도 s1보다 훨씬 이론 값에 가까운 결과를 나타내고 있다.

---

<sup>9</sup> MATLAB에서 연산은 행렬과 행렬 사이에서 이루어지는 것을 기본으로 하고 있다. 따라서 같은 크기의 두 행렬에서 각 행렬을 이루는 원소들끼리 연산을 수행하기 위해서는 다른 연산자가 필요하다. 예를 들어, 각 원소끼리 곱셈을 하기 위해서는 (\*)이 아니라 (.\*)와 같이 마침표를 붙여 구분한다. 나눗셈(./)과 지수계산(^)도 마찬가지다.

### 1.8.3 표본화와 푸리에 변환

컴퓨터 시뮬레이션에서는 필연적으로 한정된 양의 불연속적인 데이터로 신호를 표현하여 사용해야 하지만, 우리가 알고 있는 많은 이론은 연속 신호를 가정하고 있다. 디지털 신호처리(DSP)와 같은 교과목에서 이산신호의 처리에 대해 자세히 다루므로, 여기에서는 연속 시간 함수의 푸리에 변환을 MATLAB으로 어떻게 처리해야 하는지를 중점적으로 알아보자 한다.

#### 표본화

연속 시간 신호(continuous-time signal)  $x(t)$ 를 이산 시간 신호(discrete-time signal)  $x(k)$ 로 바꾸는 가장 쉬운 방법은 연속 시간 신호를 표본화(sampling)하는 것이다. 즉,  $x(k) = x(kT_s)$ ( $k = \text{정수}$ )와 같이  $x(t)$ 를  $T_s$  간격으로 표본화한다([그림 1-17]과 [그림 1-18]에서 (o)으로 나타낸 점들이 가우시안 펄스가 각각 50ps 및 10ps로 표본화되어 이산 시간 신호가 된 예다).  $f_s = 1/T_s$ 은 표본화율(sampling rate) 또는 표본화 주파수(sampling frequency)라고 부른다. 표본화는 아날로그-디지털 변환(ADC, Analog-to-Digital Conversion)의 중요한 부분이며, 실제 디지털 통신시스템을 구현할 때 필요한 동작 중 하나다. 만약 표본화 주파수가 아주 높다면, 이산 시간으로 표현한 신호는 연속 시간 신호를 충실히 표현할 수 있게 된다. 표본화 정리(sampling theorem)는 신호 및 시스템 해석에서 아주 중요하게 취급되고 있으며, 연속 시간 신호와 이산 시간 신호 사이의 관계를 이해하는 데 기본이 된다. 표본화 정리에 따르면,  $x(t)$ 가  $W$ 로 대역제한(bandlimited)된<sup>10</sup> 신호라면 연속 신호를 표본화 주파수  $f_s \geq 2W$  ( $T_s \leq 1/2W$ )로 표본화하여도  $x(kT_s)$ 로부터  $x(t)$ 를 복원할 수 있다.  $f_s = 2W$ 를 나이키스트 표본화율(Nyquist's sampling rate)이라고 하며,  $f_s < 2W$ 일 경우는 표본화 주파수가 충분치 못해 에일리어싱 오차(aliasing error) 혹은 에일리어싱 왜곡(aliasing distortion)이 발생한다.<sup>11</sup> 따라서 에일리어싱 문제를 해결하기 위해 표본화하기 전에 미리 신호의 대역폭을 제한시키는 경우가 많다.

컴퓨터 시뮬레이션에서는 연속 신호를 표현하기 위해 필연적으로 [그림 1-17]과 [그림 1-18]과 같이  $\Delta t$  간격으로 표본화 과정을 거치게 되는데(즉,  $\Delta t = T_s$ ), 이때 에일리어싱 오차가 발생하지 않도록 주의해야 한다. 일반적으로  $\Delta t$ 가 작을수록 시뮬레이션 결과의 정확도는 증가하지만, 메모리 소모 역시 증가한다. 광통신 시스템을 시뮬레이션하면서 결정해야 할 적절한  $\Delta t (= 1/f_s)$  값에 대해서는 8장에서 좀 더 자세히 알아본다.

10  $x(t)$ 의 푸리에 변환인  $X(f)$ 가  $|f| > W$ 에서는 0이라면  $x(t)$ 를  $W$ 로 대역제한된 신호라고 한다.

11 연속 신호  $x(t)$ 를 표본화한 신호의 푸리에 변환은  $x(t)$ 의 푸리에 변환  $X(f)$ 가  $f_s$ 마다 복제되어 나타나므로  $f_s < 2W$ 일 경우는 복제된 스펙트럼이 서로 겹쳐 원래 신호를 복원하는 것이 불가능하다. 따라서 필연적으로 오차 혹은 왜곡이 발생하게 되는데, 이를 에일리어싱 오차(aliasing error) 혹은 에일리어싱 왜곡이라고 한다.

## MATLAB을 이용한 푸리에 변환

이제 신호의 주파수 특성을 알아보기 위해 푸리에 변환을 해야 할 경우를 생각해 보자. 연속 시간에서의 푸리에 변환 식 (1.11a)과 이산 시간에서의 푸리에 변환 식 (1.11b)는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$X(f) = \mathcal{J}[x(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (1.11a)$$

$$X(e^{j\omega}) = \mathcal{J}[x(k)] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x(k) e^{-j\omega k} \quad (1.11b)$$

여기서  $\omega = 2\pi f T_s = 2\pi(f/f_s)$ 이다.

그런데 연속 시간 푸리에 변환과 이산 시간 푸리에 변환과의 관계는 다음과 같다고 알려졌다.

$$X(e^{j\omega}) = \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X\left(f - \frac{k}{T_s}\right) \quad (1.12)$$

따라서  $x(t)$ 가  $W$ 로 대역제한(bandlimited)된 신호라면, 연속 시간 푸리에 변환은 다음과 같이 이산 시간 푸리에 변환에서  $T_s$ 를 곱함으로써 구할 수 있다.

$$X(f) = T_s X(e^{j\omega}), \quad |f| < W \quad (1.13)$$

이산 푸리에 변환의 수치 계산은 이미 잘 알려진 고속 푸리에 변환(FFT, Fast Fourier Transform) 알고리즘이 이용되며, MATLAB에서는 `fft` 함수가 이를 수행한다. 이 알고리즘에서는, 신호  $x(t)$ 를  $T_s$  간격으로 표본화한  $N$ 개의 표본을 사용한다. 그 결과 주파수 범위  $[0, f_s]$ 에서 데이터 길이가  $N$ 개인  $X(e^{j\omega})$ 가 발생한다. 따라서  $X(e^{j\omega})$ 의 표본들은  $\Delta f = f_s/N$  간격을 이루고 있으며,  $\Delta f$ 는 FFT의 주파수 분해능(frequency resolution)과 같다. 주파수 분해능을 향상하려면 데이터의 개수  $N$ 을 증가시켜야 한다. 또한, `fft` 함수는  $N$ 이  $2^n$  형태일 때 계산 속도가 가장 빠르며,  $2^n$  형태가 아닐 때는 영(0)을 덧붙이는 제로 패딩(zero-padding)이라는 방법을 사용하여  $2^n$  형태로 만들어 주기도 한다.

이제 식 (1.9)로 표현된 신호를 MATLAB의 `fft` 함수를 사용하여 푸리에 변환을 계산해 보자. 다행히도 식 (1.9)는 다음과 같이 이론적으로 푸리에 변환을 구할 수 있다. 가우시안 펄스의 푸리에 변환은 역시 가우시안 모양임을 알 수 있다.

$$A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} a(t) e^{-j2\pi f t} dt = t_o \sqrt{2\pi P_o} e^{-2(\pi f t_o)^2} \quad (1.14)$$

식 (1.14)에서 푸리에 변환은 적분 공식  $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(-ax^2 + bx)dx = \sqrt{\frac{\pi}{a}} \exp\left(-\frac{b^2}{4a}\right)$ 이 사용되었다.

위 결과는 `fft` 함수를 사용한 MATLAB의 계산 결과를 확인하는 데 사용할 수 있다. 앞에서와 같이  $P_o = 1\text{mW}$ ,  $t_o = 100\text{ps}$ 로 결정하고, 가우시안 펄스의 시간 범위와 주파수 범위를 다음과 같이 지정한다.

```
>> Po = 1e-3; % [W]
>> to = 100e-12; % [sec]

>> Ts = 0.02*to; % 표본화 간격 결정
>> t = (-5*to):Ts:(5*to-Ts); % 시간 범위 결정
>> fs = 1/Ts; % 표본화 주파수, 표본화 간격의 역수로 정의되어야 함
>> df = fs/length(t); % Δf = f_s/N, N은 t의 데이터 개수
>> f = (-fs/2):df:(fs/2-df); % 주파수 범위 결정
```

마지막 줄에서 주파수  $f$ 는 푸리에 변환을  $[0, f_s]$  범위가 아니라 원점을 중심으로 하는  $[-f_s/2, f_s/2]$  범위에서 계산하기 위함이다. 이제  $a(t)$ 와  $A(f)$ 를 정의한다.

```
>> e_pulse_gaussian = sqrt(Po)*exp(-t.^2/(2*to*to)); % a(t), 식(1-9)
>> f_pulse_gaussian1 = sqrt(2*pi*Po)*to*exp(-2*(pi*f*to).^2); % A(f), 식(1-14)
```

이제 마지막으로 `fft` 함수를 사용하여 식 (1.13)을 계산해 보자.

```
>> f_pulse_gaussian2 = Ts*fftshift(fft(e_pulse_gaussian));
```

`fft` 함수는  $[0, f_s]$  범위에서 이산 푸리에 변환을 계산하므로 주파수 범위  $[-f_s/2, f_s/2]$ 에서 결과를 그리기 위해서는 계산 결과를 재배치해야 한다. `fftshift` 함수가 이와 같은 역할을 한다.

이제 이 두 결과, `f_pulse_gaussian1`(식 (1.14)로 주어진 이론 값)과 `f_pulse_gaussian2`(`fft` 함수를 사용한 계산 값)를 서로 비교해 보기 위해 다음과 같은 명령문들을 수행해 보자. `fft` 함수에 의해 계산된 푸리에 변환은 복소수로 주어지므로 절대값을 비교해야 한다.

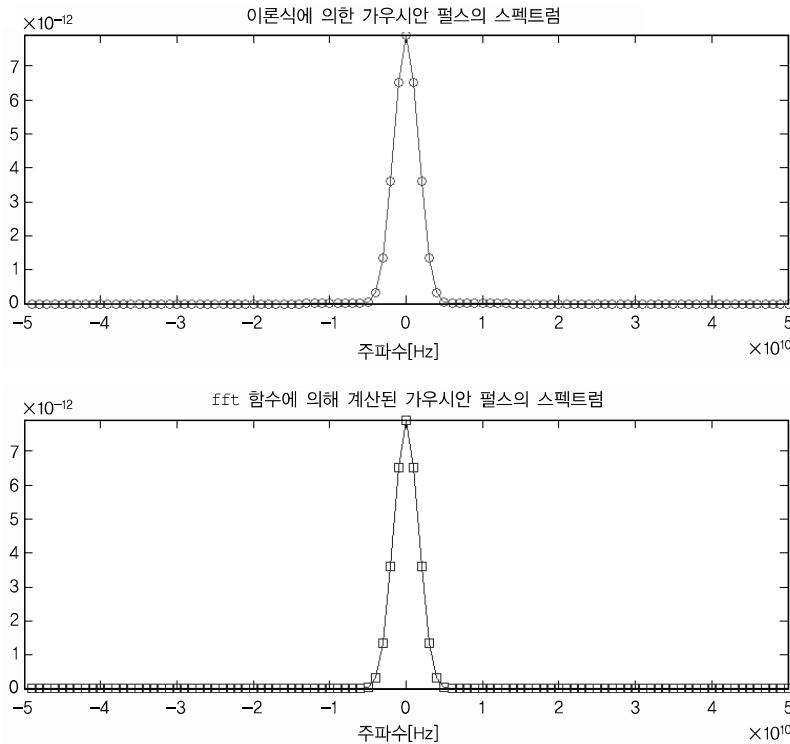
```
>> subplot(211)
>> plot(f,abs(f_pulse_gaussian1),'ro-')
>> axis([-fs/10 fs/10 0 max(f_pulse_gaussian1)])
>> xlabel('주파수[Hz]', 'FontSize', 16);
>> title('이론식에 의한 가우시안 펄스의 스펙트럼', 'FontSize', 16)
>>
>> subplot(212)
```

```

>> plot(f,abs(f_pulse_gaussian2),'bs-')
>> axis([-fs/10 fs/10 0 max(f_pulse_gaussian1)])
>> xlabel('주파수[Hz]', 'FontSize', 16);
>> title('fft 함수에 의해 계산된 가우시안 펄스의 스펙트럼', 'FontSize', 16)

```

위의 MATLAB 명령문을 실행하면 두 가지 방법에 의한 푸리에 변환 결과를 비교해 볼 수 있다. [그림 1-20]에서 첫 번째 그림은 이론적인 계산에 의한 가우시안 펄스의 푸리에 변환 결과며, 두 번째 그림은 MATLAB의 fft 함수에 의한 푸리에 변환 결과다.



[그림 1-20] 이론적인 계산에 의한 푸리에 변환 결과와 fft 함수에 의한 푸리에 변환 결과

위 두 그림을 아래와 같이 하나의 그림에 그리면 서로 겹쳐 전혀 구분되지 않는다.

```

>> plot(f,abs(f_pulse_gaussian1),'r',f,abs(f_pulse_gaussian2),'-o')

```

따라서 가우시안 펄스는 MATLAB에서 fft 함수를 사용하여 연속 푸리에 변환을 매우 근사적으로 계산할 수 있음을 알았다. 이제 MATLAB을 처음 접하는 독자들도 어느 정도 익숙해졌기를 기대해 본다. 앞으로 MATALB 예시는 주로 스크립트 파일(M 파일)을 이용할 것 이므로 커서(>)는 생략할 것이다.

## ⇒ Chapter\_01 연습문제

- 1.1 광섬유를 사용하는 광통신의 장점을 설명하라.
- 1.2 광통신 링크의 주요 구성 요소들은 어떤 것이 있으며, 그 역할은 무엇인지 간략하게 설명하라.
- 1.3 광통신 시스템이 왜 현대의 기간 통신망이 되었는지를 설명하라.
- 1.4 중심 파장이  $1550\text{nm}$ , 대역폭이  $35\text{nm}$ 인 광증폭기가 있다고 한다. 이 광증폭기의 중심 주파수는 몇 Hz이며, 대역폭을 주파수로 나타내면 얼마인가?
- 1.5 하나의 TV 채널은 약  $6\text{MHz}$ 의 대역폭을 차지한다. 이론적으로  $1.15\mu\text{m} \sim 1.35\mu\text{m}$ 의 파장 범위에 는 얼마나 많은 TV 채널이 들어갈 수 있는가?
- 1.6 세 개의 광소자가 각각  $10$ ,  $5$ ,  $3\text{dB}$  손실이 있다고 가정하자. 이 소자들이 직렬 연결되어 있을 때 전체 손실은 얼마인가? 또 입력 전력이  $5\text{mW}$ 일 경우 이들 소자를 거친 출력 전력은 몇  $\text{dBm}$ 이 되는가?
- 1.7 어떤 광통신 시스템이 제대로 동작하려면 수신기에 최소한  $-25\text{dBm}$ 의 전력이 입력되어야 한다고 가정하자. 송신기의 출력 전력이  $1\text{mW}$ , 송신기와 수신기 사이 광섬유의 손실이  $0.2\text{dB/km}$ 라고 하면 광섬유 길이는 최대 얼마가 될 수 있는가? 그 외 다른 영향은 없다고 가정하라.

## → Chapter\_01 MATLAB을 이용한 연습문제

**M1.1** 다음 적분을 MATLAB의 sum 함수를 사용하여 구하고 이론적인 계산 결과와 비교하라. 시뮬레이션에서 사용하는  $x$ 의  $\Delta x$ 을 변화시켰을 때 MATLAB 계산값은 어떻게 바뀌는지 관찰하고, 그 이유를 생각해 보자.

(a)  $\int_{-\pi}^{\pi} \cos x dx$  (계산값  $\int_{-\pi}^{\pi} \cos x dx = \sin x \Big|_{-\pi}^{\pi} = 0$ )

(b)  $\int_0^2 \frac{1}{4+x^2} dx$  (계산값  $\int_0^2 \frac{1}{4+x^2} dx = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{x}{2} \Big|_0^2 = \frac{1}{2} \tan^{-1} 1 = \frac{\pi}{8}$ )

(c)  $\int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx$  (계산값  $\int_0^{\infty} e^{-\frac{x^2}{2}} dx = \frac{1}{2} \sqrt{2\pi} = \sqrt{\frac{\pi}{2}}$ )

**참고** 적분의 상한이 무한대이므로,  $x$ 를 비교적 큰 값으로 잡아 근사적으로 계산한다. 예를 들어,  $x=5$ 이면  $e^{-\frac{x^2}{2}} \simeq 3.73 \times 10^{-6}$ 로 최고 값 1보다 훨씬 작은 값이므로 적분 상한을 5 이상으로 하면 훌륭한 근사 값을 얻을 수 있다.)

**M1.2** 어떤 신호  $a(t)$ 의 에너지  $E$ 는 다음과 같이 정의되며, 단위는 [J]=[W·sec]이다.

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |a(t)|^2 dt$$

식 (1.9)와 같은 평균 에너지를 sum 함수를 사용하여 구하라.  $P_o = 1 \text{ mW}$ 이고,  $t_o = 150 \text{ ps}$ 이다.

**참고** 컴퓨터 시뮬레이션에서 적분 영역은 무한대로 할 수가 없지만, 적분 영역을 폴스 폭  $t_o$ 보다 충분히 크게 잡으면 근사적으로 계산할 수 있다.  $a(t)$ 의 이론적인 에너지는  $E = \int_{-\infty}^{\infty} |a(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} P_o \exp\left(-\frac{t^2}{t_o^2}\right) dt = \sqrt{\pi} P_o t_o \simeq 2.6587 \times 10^{-13} [\text{J}]$ 이다.)

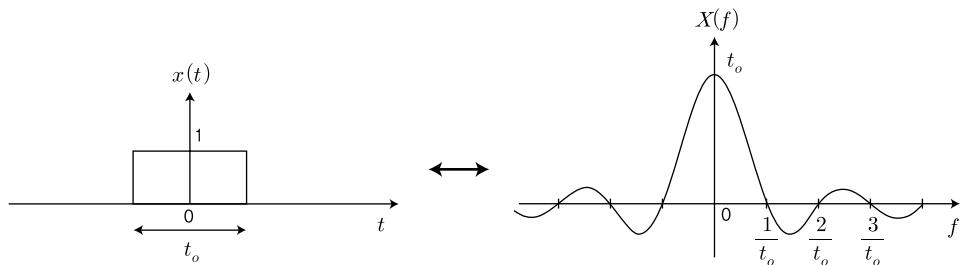
**M1.3** 다음과 같이 정의되는 사각파(rectangular) 신호  $x(t)$ 의 푸리에 변환을 MATLAB을 이용하여 구해보자.

$$x(t) = \Pi\left(\frac{t}{t_o}\right) = \begin{cases} 1 & |t| \leq t_o/2 \\ 0 & 그 외 \end{cases}$$

신호 및 시스템 또는 통신공학과 같은 교과목을 통해 위와 같은 사각파 신호의 푸리에 변환은 다음과 같음을 알고 있을 것이다.

$$X(f) = \mathcal{F}[x(t)] = \frac{\sin(\pi t_o f)}{\pi f} = t_o \frac{\sin(\pi t_o f)}{\pi t_o f} = t_o \text{sinc}(t_o f)$$

여기서  $\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x}$  와 같이 정의되며, MATLAB에서 sinc 함수도 이와 같이 정의된다.

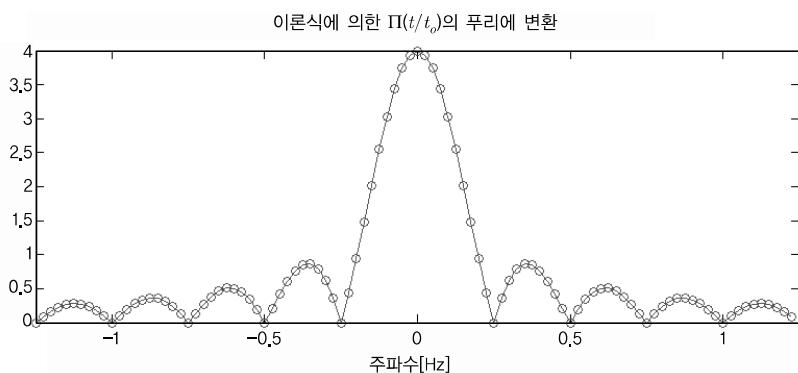


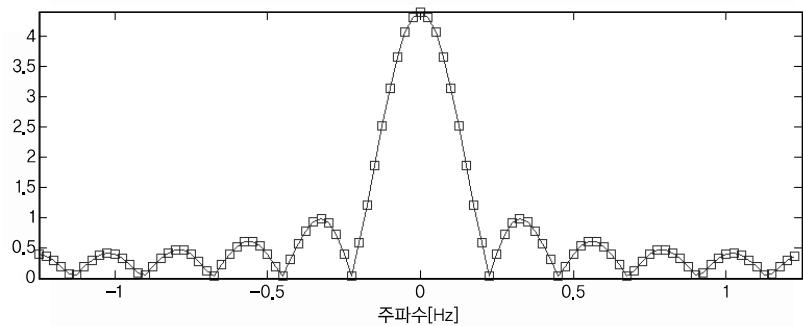
MATLAB의 fft 함수를 사용한 푸리에 변환 결과와 위의 이론적 계산식을 비교하라.

- (a)  $t_o = 1$  일 때,  $T_s$ 를  $0.1t_o$ ,  $0.05t_o$ ,  $0.02t_o$ 로 변화시키면서 계산한 결과를 비교하라.
- (b)  $t_o = 4$  일 때,  $T_s$ 를  $0.1t_o$ ,  $0.05t_o$ ,  $0.02t_o$ 로 변화시키면서 계산한 결과를 비교하라.

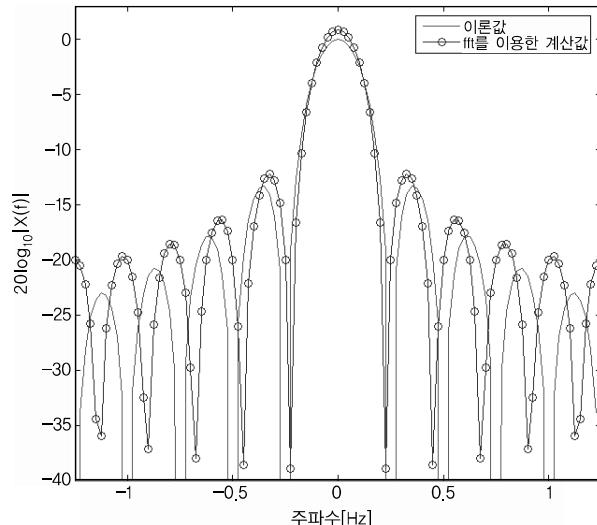
**참고** M 파일(M1\_3.m)을 실행하여 다음과 같은 결과를 확인하라.

**예**  $t_o = 4$ ,  $T_s = 0.1t_o$  일 때의 푸리에 변환 결과 비교



fft 함수를 이용한  $\Pi(t/t_o)$ 의 푸리에 변환 계산 결과

예)  $t_o = 4$ ,  $T_s = 0.1t_o$  일 때의 푸리에 변환 결과 비교(dB 스케일)



```
% Chap 1. Exercise M1-3
% Fourier Transform of Rectangular Signal

clear all
close all

to = 4; %[sec] Pulse width

Ts = 0.1*to; % Sampling period
t = (-5*to):Ts:(5*to-Ts); % Define the simulation time
```

```
fs = 1/Ts; % Sampling frequency
df = fs/length(t); % frequency resolution
f = (-fs/2):df:(fs/2-df); % Simulation frequency range

e_pulse = abs(t)<=(to/2); % Define the rectangular signal with to

%f_pulse1 = to*(sin(pi*t/to)+(f==0))./(pi*t/to+(f==0));
f_pulse1 = to*sinc(to*f); % Theoretical Fourier Transform of e_pulse
f_pulse2 = Ts*fftshift(fft(e_pulse)); % Calculation of Spectrum using fft

figure(1)
subplot(211)
plot(f,abs(f_pulse1),'ro-')
axis([-5/to 5/to 0 max(f_pulse1)])
xlabel('주파수[Hz]', 'FontSize',16);
title('이론식에 의한 \Pi(t/t_o)의 푸리에 변환', 'FontSize',16)

subplot(212)
plot(f,abs(f_pulse2),'bs-')
axis([-5/to 5/to 0 max(f_pulse2)])
xlabel('주파수[Hz]', 'FontSize',16);
title('fft 함수를 이용한 \Pi(t/t_o)의 푸리에 변환 계산 결과', 'FontSize',16)

figure(2)
plot(f,20*log10(abs(f_pulse1)/to), 'r', f,20*log10(abs(f_pulse2)/to), '-o')
axis([-5/to 5/to -40 3])
xlabel('주파수[Hz]', 'FontSize',16);
ylabel('20log_10|X(f)|', 'FontSize',16);
legend('이론값', 'fft를 이용한 계산값')
```