

-컴퓨터 네트워크- Layer 1 & 2

2022 Spring
Kyungseop Shin

Layer 1 : Physical Layer

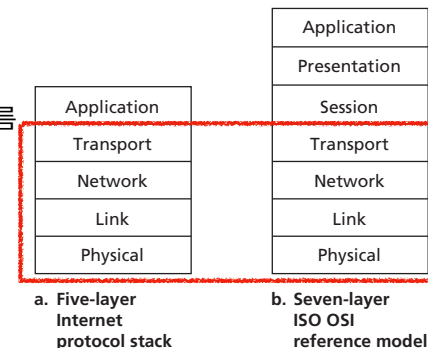
2022 Spring

Course Outline

- OSI layer에서의 Layer 1 protocol 개념 및 역할에 대해 이해
- Physical layer의 기본 개념 및 역할
- Physical layer 사례들

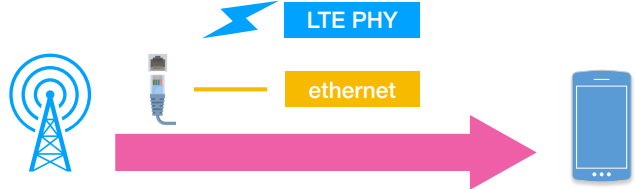
OSI Layer 개념

- 통신 네트워크를 이루는 Protocol layer의 표준형 모델
 - 대부분 통신 네트워크는 이런 형태를 갖추고 있다고 이해하면 됨
 - 7 layer vs. 5 layer model 두가지가 있으며, 아래가 layer 1, 위로 갈수록 숫자가 늘어남
- Layer 1, 2, 3/4는 공통
 - L1-2는 보통 쌍이며 시스템 별로 서로 다름
 - L3는 사실상 Internet Protocol(IP)
 - L4는 사실상 TCP / UDP



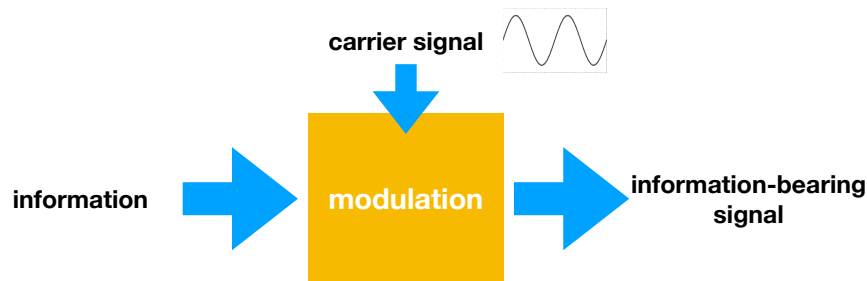
Layer 1 : Physical Layer

- Physical layer (물리계층) 이라고 불림
 - 1:1 상황에서 직접적인 물리 신호를 주고 받아서 정보를 전달하는 역할
 - 물리적으로 1:1 연결 형태에 맞는 실제 물리 신호를 적절하게 생성
 - 1 hop으로 연결된 상대방에게 직접 정보 전달
- 링크의 물리 매체에 따라 실제 동작 등이 상이함
 - Ethernet : twisted-pair copper wire, coaxial cable
 - WiFi, LTE, ... : wireless signal



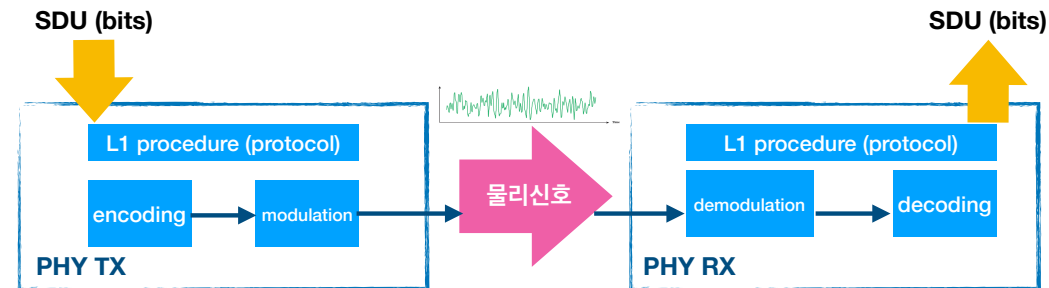
Modulation/Demodulation

- 통신이론 기반의 신호처리 동작
 - 변조 : 송신할 정보를 carrier signal에 담는 처리
 - 복조 : 수신된 변조 신호로부터 원래 송신 정보를 복원

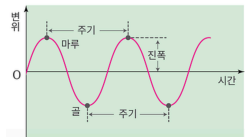


Layer 1 : Physical Layer

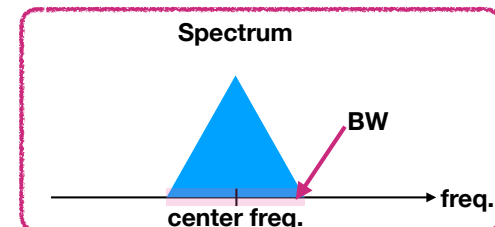
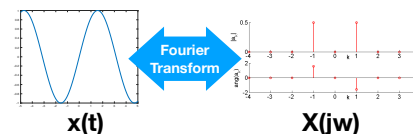
- 입력 SDU : 보내고자 하는 정보
- 출력 : PDU 형태는 아니고, 물리적인 아날로그 신호 (modulation wave)
- signal processing chain 부분과 의사결정/판단을 내리는 procedure(protocol) 부분 존재



Modulation Wave의 Spectrum



- 변조신호를 Fourier transform한 것 ($X(f) = F\{x(t)\}$)
- 시간축이 아닌 주파수축 관점에서 변조 신호를 볼 때 그 energy 혹은 power
 - 주파수(frequency) : 특정 주기의 정현파 요소
 - 각 주파수 요소가 얼마나 섞여있는지를 한눈에 보여줌
- center frequency(중심주파수) + bandwidth(대역폭)로 요약될 수 있음
 - 대략적으로는 c.freq 값과 BW값으로 spectrum을 표현

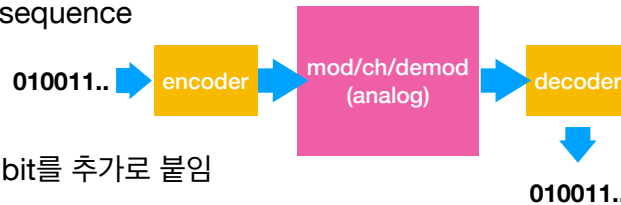


Encoding/Decoding

- 보내고자 하는 원래 bit열을 보내기 쉽게 가공하거나 복원 처리하는 과정

- 입출력 모두 결국 bit sequence

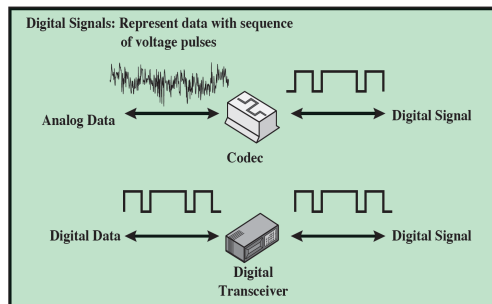
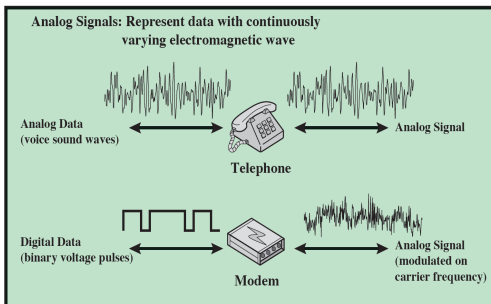
- 예시



- error detection : N bit를 추가로 붙임
- error correction : bit수가 n배가 됨
- capacity의 개선 : scrambling, multiplexing, repetition/puncturing 등

Physical Layer 특성 Analog vs. Digital

- Analog / digital 통신은 변조 직전 data가 무엇이나에 대한 기준
- analog 신호를 그대로 변조하면 analog 통신
- digital bit를 변조하면 digital 통신
- 양쪽 방식 모두 궁극적으로 변조된 신호는 analog signal임



Network 공학 관점에서의 L1

- Network engineer란 보통 end-to-end 통신을 위한 network 전체 구성이 주된 역할

- L1은 network에서는 작은 부분에 불과

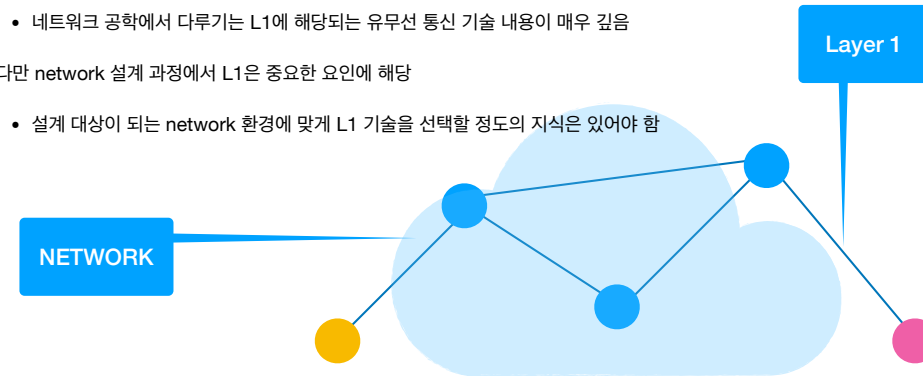
- Network engineer들은 일반적으로 L1에 대해 black box로 간주

- 내부 원리 및 동작 mechanism과 같은 L1의 깊은 내용은 모르는 것이 일반적

- 네트워크 공학에서 다루기는 L1에 해당되는 유무선 통신 기술 내용이 매우 깊음

- 다만 network 설계 과정에서 L1은 중요한 요인에 해당

- 설계 대상이 되는 network 환경에 맞게 L1 기술을 선택할 정도의 지식은 있어야 함



Physical Layer 특성 Analog vs. Digital

- 오늘날은 일반적으로 digital 통신을 대부분 사용

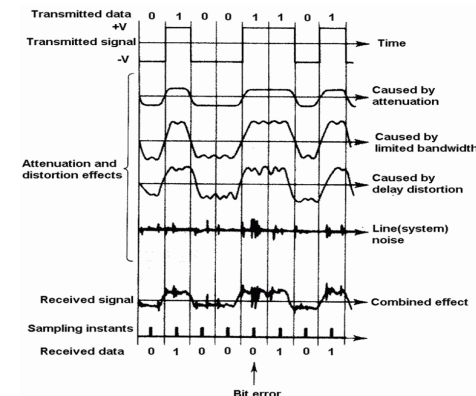
- Noise에 대해 강함

- 디지털 기술의 발전

- 압축 기술의 발달

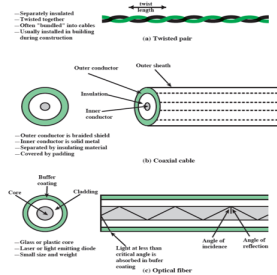
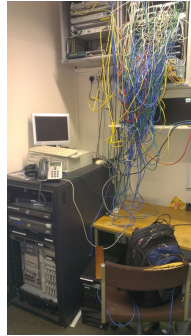
- 시스템 구현의 용이성

- 강력한 보안 기술의 손쉬운 적용



Physical Layer 특성 Wired vs. Wireless

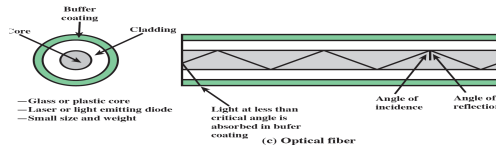
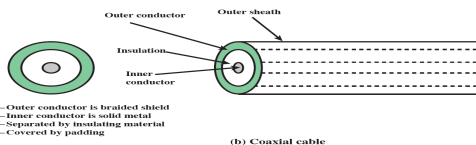
- Guided media (Twisted pair, coaxial cable, optical fiber 등)에 의한 변조 신호 전달
- 유선 연결이 필요하므로, 송수신 간 물리적 제약 존재
- 보통 대역폭이 작은 대신 감쇄가 적고 noise대비 수신 신호 크기가 큼



	Frequency Range	Typical Attenuation	Typical Delay	Repeater Spacing
Twisted pair (with loading)	0 to 3.5 kHz	0.2 dB/km @ 1 kHz	50 μ s/km	2 km
Twisted pairs (multipair cables)	0 to 1 MHz	0.7 dB/km @ 1 kHz	5 μ s/km	2 km
Coaxial cable	0 to 500 MHz	7 dB/km @ 10 MHz	4 μ s/km	1 to 9 km
Optical fiber	186 to 370 THz	0.2 to 0.5 dB/km	5 μ s/km	40 km

Physical Layer 특성 Wired vs. Wireless

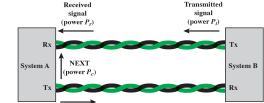
- Coaxial cable : 동축
- twisted pair보다 도달거리가 길고 비쌈
- Optical fiber : 고성능의 고급 통신선
- Gbps급 속도, 가볍고 작은 size
- 상용 용도의 통신 인프라로 활용



Physical Layer 특성 Wired vs. Wireless

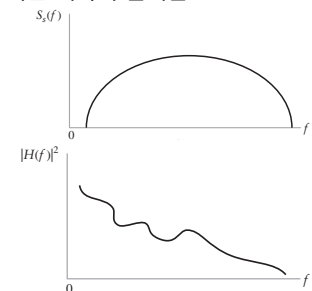
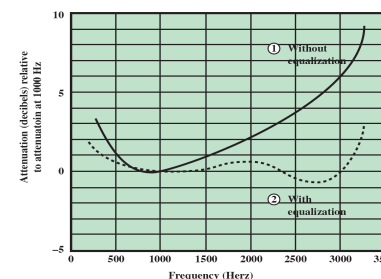
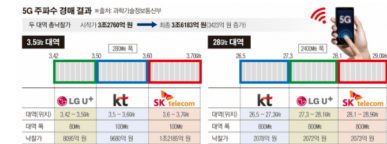
- Twisted pair : 가장 대중적인 통신선
- 2가닥이 꼬여있는 구조로 케이블 안에 존재
- Unshielded Twisted Pair (UTP) 혹은 Shielded Twisted Pair (STP) 사용
- 성능 특성에 따라 여러 category로 나뉨

	Category 5e Class D	Category 6 Class E	Category 6A Class E _A	Category 7 Class F	Category 7A Class F _A
Bandwidth	100 MHz	250 MHz	500 MHz	600 MHz	1,000 MHz
Cable Type	UTP	UTP/FTP	UTP/FTP	S/FTP	S/FTP
Insertion loss (dB)	24	21.3	20.9	20.8	20.3
NEXT loss (dB)	30.1	39.9	39.9	62.9	65
ACR (dB)	6.1	18.6	19	42.1	44.1



Physical Layer 특성 Wired vs. Wireless

- Unguided media (air, vacuum, seawater 등)에 의한 변조 신호 전달
- 활용 가능한 주파수의 확보 필요
- wireless channel의 특성
- Center frequency가 높아질수록 거리 및 장애물(벽 등)에 의한 감쇄가 심해짐
- Bandwidth가 커질수록 frequency selectivity에 의한 왜곡이 심해짐



Physical Layer 특성 Duplex

- Duplex : 송수신 방향에 대한 환경
- Simplex : 단방향 통신만 가능
 - 한쪽은 송신, 다른 한쪽은 수신만 함
 - 방송과 같은 일방적 정보 전달 시스템에서 주로 활용
- Half duplex : 양방향 통신, 한 순간에 한방향만 이루어짐
 - 워키토키
 - Time Division Duplex (TDD)
- Full duplex : 양방향 통신, 한 순간에 동시에 양방향 통신 가능

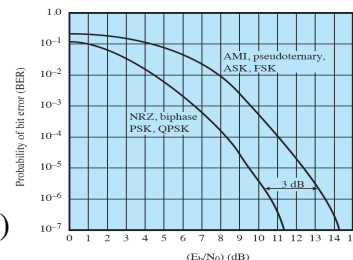
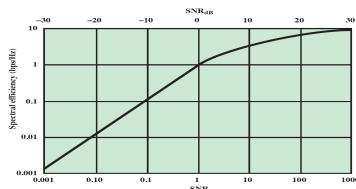


Physical Layer 성능 지표

- Data rate : 시간당 bit 전송률 (bit/s, bps)
 - 변조 방식에 따라 결정 -> (symbol당 bit수)/(1 symbol의 시간 길이)
 - Bandwidth와 밀접한 관계
- Throughput : 평균적인 전송률
 - 비교적 긴 시간동안 data를 전송했을 때 초당 전송된 bit 수의 평균
- Spectral efficiency : Hz당 전송률
 - data rate / throughput에서 bandwidth를 나눈 값 (bit/s/Hz)

Physical Layer 성능 지표

- Bit Error Rate (BER)
 - bit 오류율
 - 보통 X축은 Signal to Noise Ratio (SNR)로, 수신 채널 환경
- Channel Capacity (Shannon limit)
 - error가 일정 수준 이하로 유지하면서 낼 수 있는 이론 상의 최대 전송률



Layer 2 : Link Control

2022 Spring

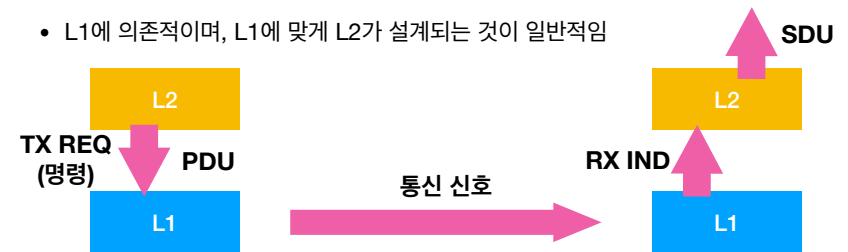
$$C = BW \log_2(1 + SNR) \quad \frac{C}{BW} = \log_2(1 + SNR)$$

Course Outline

- OSI layer에서의 Layer 2 protocol 개념 및 역할에 대해 이해
 - Media Access Control의 개념
 - Data Link Control의 개념

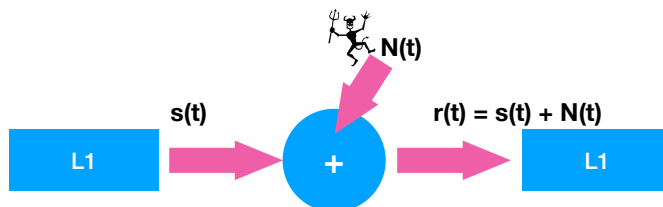
Layer 2 : Data Link Layer

- L1 물리 계층에서의 정보 전송 흐름을 제어하는 역할
 - 송신 : 보낼까 말까 -> 얼마나 보낼까 / 어떻게 보낼까
 - 수신 : 상위 계층으로 수신 PDU를 올릴까 말까
 - 기타 등등.
- 보통 L1 과 pair 관계임
 - L1에 의존적이며, L1에 맞게 L2가 설계되는 것이 일반적임



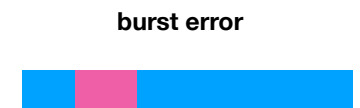
Packet Error

- 통신 시스템에서 error는 피할수 없는 숙명임
 - 어느 환경이나 random process인 noise $N(t)$ 존재
 - 수신신호에 더해져 demodulation/decoding에 영향을 줌
 - 결과적으로 bit error가 확률적으로 발생할수 밖에 없음
- Packet error
 - 원래 보낸 packet과 비교할 때 1bit라도 다른 경우의 이벤트



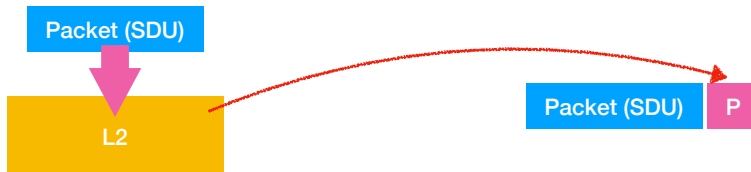
Packet Error

- packet error는 Signal to Noise Ratio (SNR)에 따라 발생 빈도가 달라짐
 - 수신된 신호 크기 ($|s(t)|$)가 $N(t)$ 대비 충분히 크면 packet error는 안일어남
 - $|s(t)|$ 가 $N(t)$ 대비 작으면 packet error가 자주 일어남
- 수신 신호 환경에 따라 error bit 패턴이 달라짐
 - single-bit errors : 간헐적인 noise 증가로 분산된 bit가 각각 오류가 난 경우
 - burst errors : 수신 신호 감도가 낮아지면서 연속적으로 bit error 발생



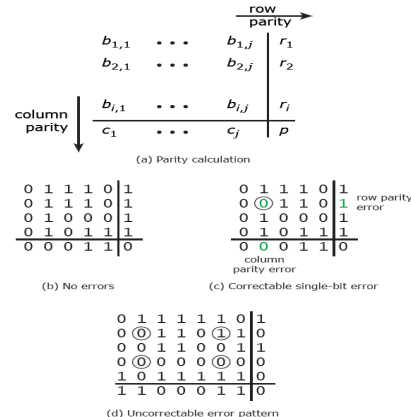
Error Detection

- 수신 Layer 2는 일반적으로 packet error를 스스로 알지 못함
 - 원래 송신된 packet의 bit pattern을 알지 못함
 - $N(t)$ 는 random process이므로 error는 random으로 발생
- 따라서 L2가 packet error를 파악하려면 별도의 장치가 필요함
 - 원래 보내는 packet에 추가적으로 bit를 붙여서 packet error를 찾아내는데 활용
 - 추가적으로 붙이는 bit를 **parity bit**라고 함



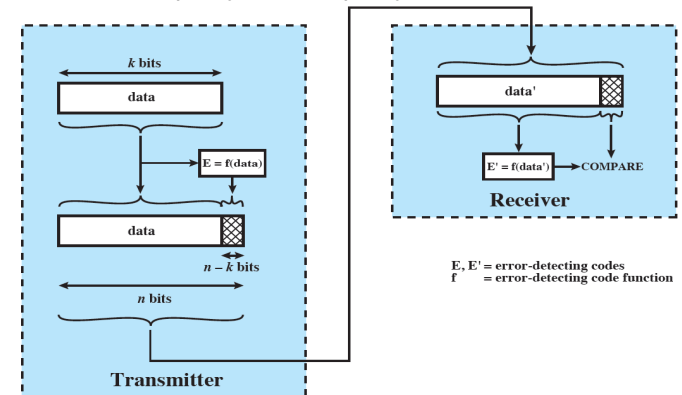
Parity 생성 방법

- odd/even parity
 - 1bit를 붙여서 전체 data+parity bit들의 1의 개수가 홀수 혹은 짝수가 되도록 함
- 2-dimensional parity check
 - 더 많은 parity bit 활용



Error Detection

- Parity를 활용한 error detection 과정
 - TX에서는 parity를 붙이고
 - RX에서는 내가 만든 parity와 수신된 parity를 비교해서 error여부 판정



Parity 생성 방법

- checksum : Internet에서 주로 활용하는 방식
 - 16bit 단위로 끊어서 1's complement 누적 덧셈 수행
 - 최종 결과를 1's complement operation을 해서 parity에 붙임
 - 수신 측은 동일한 방식으로 누적덧셈을 해서, 결과를 parity와 더했을 때 FFFF가 나오면 error-free로 판단

Partial sum	0001 F203 F204
Partial sum	F204 F4F5 1E6F9
Carry	E6F9 1 E6FA
Partial sum	E6FA F6F7 1DDF1
Carry	DDF1 1 DDF2
Ones complement of the result	220D

(a) Checksum calculation by sender

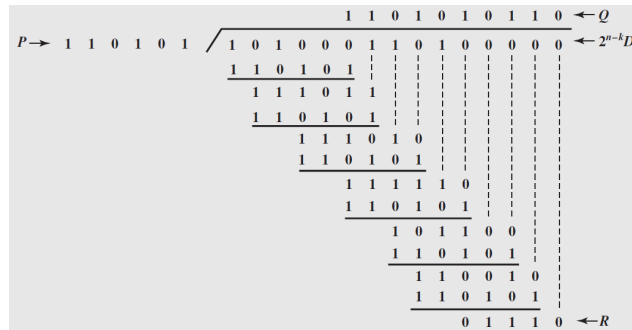
Partial sum	0001 F203 F204
Partial sum	F204 F4F5 1E6F9
Carry	E6F9 1 E6FA
Partial sum	E6FA F6F7 1DDF1
Carry	DDF1 1 DDF2
Partial sum	DDF2 220D FFFF

(b) Checksum verification by receiver

Parity 생성 방법

- Cyclic Redundancy Check (CRC)

- 가장 강력하고 두루 활용되는 parity check 방식
- 2진수의 n차 다항식 나눗셈 원리를 통해 n bit CRC 도출
 - 송수신측에서는 서로 약속된 polynomial (P) 로 나누기를 함
 - 수신 data bit를 대상으로 P로 나누었을 때 나머지를 CRC parity bit로 뒤에 붙임



Parity 생성 방법

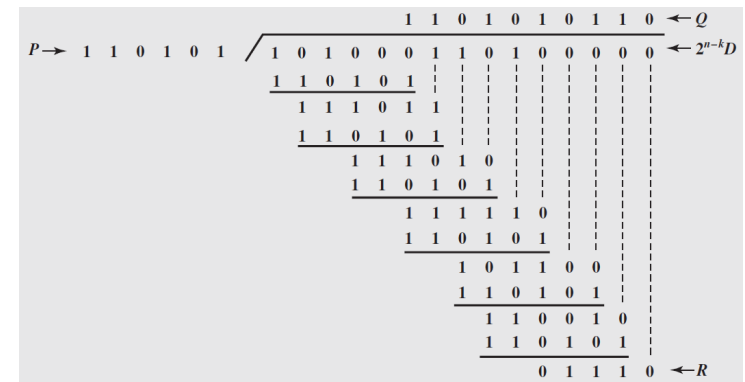
- 보통 polynomial을 bit 열이 아닌, 다항식으로 나타내기도 함

$$\begin{array}{r}
 P(X) \rightarrow X^5 + X^4 + X^2 + 1 \quad \leftarrow Q(X) \\
 \hline
 X^9 + X^8 + X^6 + X^4 + X^2 + X \\
 \hline
 X^{14} \quad X^{12} \quad X^8 + X^7 + \quad X^5 \\
 \hline
 X^{14} + X^{13} + \quad X^{11} + \quad X^9 \\
 \hline
 X^{13} + X^{12} + \quad X^{10} + \quad X^8 \\
 \hline
 X^{11} + X^{10} + X^9 + \quad X^7 \\
 \hline
 X^{11} + X^{10} + \quad X^8 + \quad X^6 \\
 \hline
 X^9 + X^8 + X^7 + X^6 + X^5 \\
 \hline
 X^9 + X^8 + \quad X^6 + \quad X^4 \\
 \hline
 X^7 + \quad X^5 + X^4 \\
 \hline
 X^7 + X^6 + \quad X^4 + \quad X^2 \\
 \hline
 X^6 + X^5 + \quad X^2 \\
 \hline
 X^6 + X^5 + \quad X^3 + \quad X \\
 \hline
 X^3 + X^2 + X \quad \leftarrow R(X)
 \end{array}$$

Parity 생성 방법

- 수신 측 검사

- 약속된 polynomial로 나누어보고 나머지가 0인지 여부 확인



Parity 생성 방법

- 자주 활용되는 CRC polynomial

Four versions of $P(X)$ are widely used:

$$\begin{aligned}
 \text{CRC-12} &= X^{12} + X^{11} + X^3 + X^2 + X + 1 = (X + 1)(X^{11} + X^2 + 1) \\
 \text{CRC-ANSI} &= X^{16} + X^{15} + X^2 + 1 = (X + 1)(X^{15} + X + 1) \\
 \text{CRC-CCITT} &= X^{16} + X^{12} + X^5 + 1 = (X + 1)(X^{15} + X^{14} + X^{13} + X^{12} \\
 &\quad + X^4 + X^3 + X^2 + X + 1) \\
 \text{IEEE-802} &= X^{32} + X^{26} + X^{23} + X^{22} + X^{16} + X^{12} + X^{11} + X^{10} + X^8 \\
 &\quad + X^7 + X^5 + X^4 + X^2 + X + 1
 \end{aligned}$$

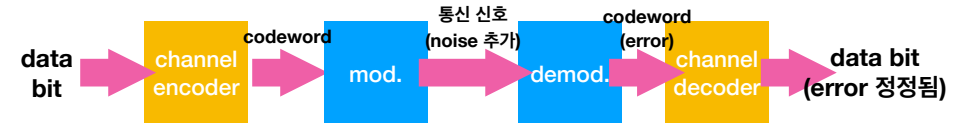
Error Correction

- 예전 (2G정도) 통신 시스템은 L1에서 보내는 기본 packet 단위 크기가 크지 않았음
 - 음성 서비스 중심의 GSM의 경우 약 200bit 정도 수준
- 하지만 최근 통신 시스템은 L1에서 보내는 기본 packet 단위가 매우 큼
 - 수천 ~ 수십만bit까지 가능
- packet error는 packet 내 bit가 많아질수록 빈번하게 일어남
 - packet size가 커진 최근 통신 시스템은 동일 SNR 환경에서 더 packet error 가 빈번하게 일어나기 마련임
- Error detection뿐 아니라 error correction기능까지 필요로 함



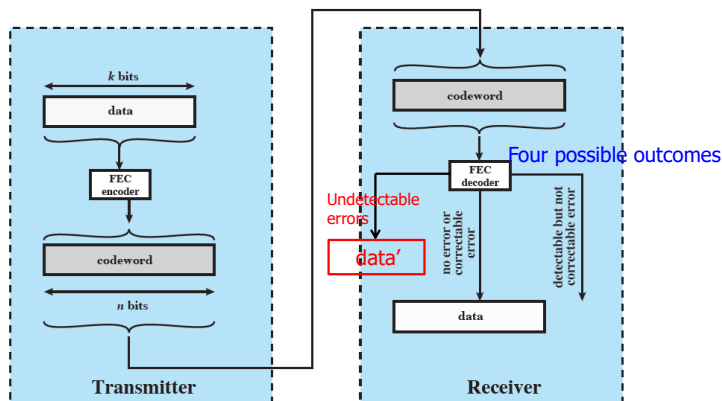
Forward Error Correction (FEC)

- 보통 앞에서의 parity를 통해 packet error가 검출되면 packet 재전송이 이루어짐
 - 하지만 이런 재전송이 성능 관점에서 바람직한 방향은 아님
 - 따라서 스스로 error를 고칠 수 있으면 고치는 것이 바람직함
- channel coding scheme
 - channel encoding : data bit를 재가공해서 고칠수 있는 형태 (codeword)로 만들
 - channel decoding : encoding된 bit를 decoding하여 원래 bit 복원 (이과정에서 error 정정이 일어남)



Forward Error Correction (FEC)

- FEC의 과정
 - Code rate : k/n (원래 data bit 크기 / codeword 크기)
 - 보통 1보다 작음

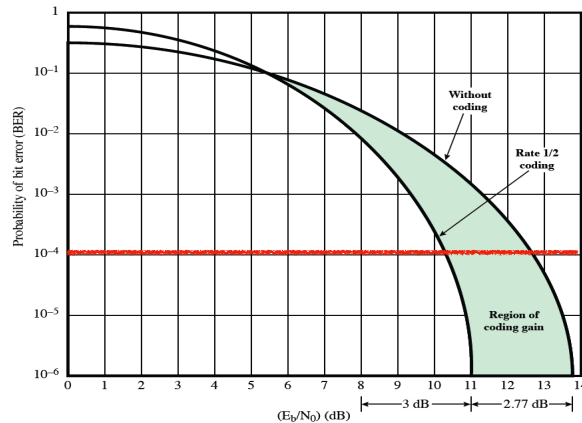


FEC 종류

- Block code : bit를 block (2차원 배열)로 배치하여 codeword 생성
- Convolutional code & Turbo code : convolution원리를 활용
 - 앞뒤 bit를 누적 더하기 하여 codeword 생성
- 3G, LTE에서 주로 활용
- LDPC : 가장 최근 기술로, 이론상의 한계치에 가장 근접
 - packet size가 클때 유리하며, WiFi, 5G에서 활용됨
- Polar code : 5G에서 활용

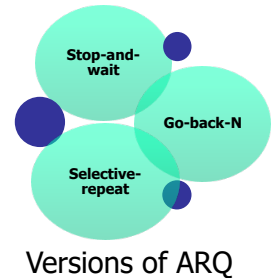
FEC의 효과

- target BER를 만족하는 SNR을 낮출수 있는 효과
- 전계가 약한 환경에서 수신 성능 개선
- coverage가 넓어짐



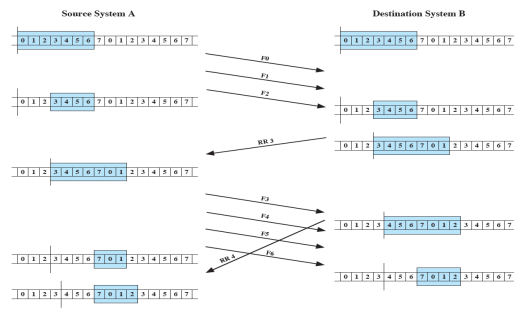
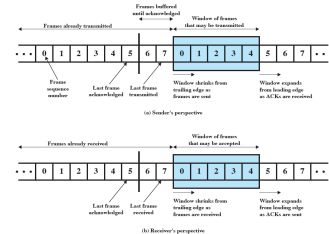
Error Control

- Layer 2은 error detection/correction 기능을 활용해서 아래 protocol function 동작을 할 수 있음
- FEC를 통해 error 수정 시도
- error detection을 통해 error 여부 판단
- 필요 시 송신에게 재전송 요청 => ARQ
- ARQ는 궁극적으로 unreliable data link를 reliable하게 만들어주는 역할



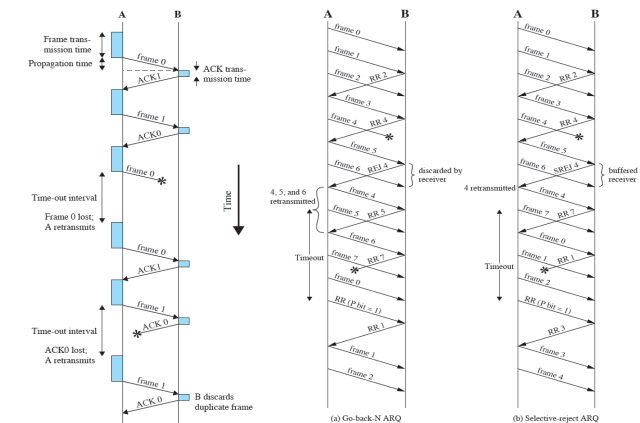
Flow Control

- Stop-and-Wait : 하나씩 전달
 - ACK이 오면 다음 packet 전송
 - link utilization이 좋지 않음
- slide-window : 일정 범위(window)에 대해 몰아서 전달
 - 몰아서 ACK를 받아 처리
 - 다양한 복잡한 상황이 연출될 수 있음



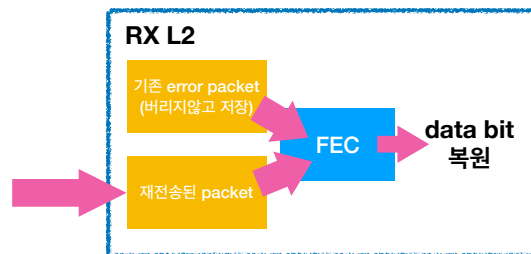
ARQ의 종류

- Stop and Wait
- 하나씩 전송
- Go-Back-N
 - N부터 재전송
 - slide-window 활용
- Selective-Reject
 - 특정 seq만 재전송



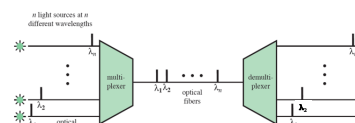
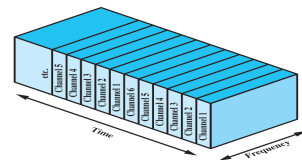
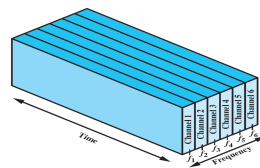
Hybrid ARQ

- 일반적인 ARQ는 error packet은 버림
- HARQ는 error packet을 재활용하는것이 키포인트
 - error packet과 이후 재전송된 packet을 잘 결합해서 Forward Error Correction을 함
- FEC 동작과 ARQ 재전송 개념을 잘 합친 기법
- LTE, 5G 등에서 활용



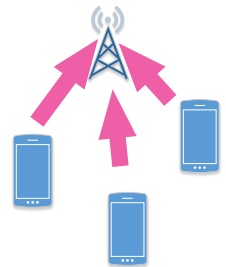
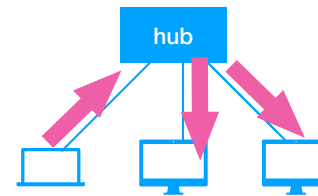
non-Contention 기반 MAC

- link의 자원을 나눠서 사이좋게 사용하는 방식
 - L1 전송이 충돌하는 일이 없음
- link 자원을 어떻게 나누냐에 따라 기법이 달라짐
 - Frequency Division Multiplexing
 - Time Division Multiplexing
 - Wavelength Division Multiplexing
 - Code Division Multiplexing



Media Access Control (MAC)

- 실제로 L1에서의 link란 여러 entity들이 공용으로 사용하는 경우가 많음
 - 한 L1 entity가 송신한 통신 신호를 동시에 받는 L1 entity들은 그 link를 공용으로 쓴다고 봐야 함
 - 유선 : hub를 통해 연결된 단말들
 - 무선 : 신호가 도달하는 영역 내의 단말들
 - 두 entity가 동시에 공용 link를 사용하면 충돌로 인해 packet error 발생
- 이 L1 entity들 간 송수신을 제어하여 충돌을 막는 것이 MAC의 역할



Scheduling

- Non-contention 방식은 궁극적으로 중앙집권적 L2 entity가 모든 media access를 제어하는 방식
 - 특정 L1이 특정 자원을 통해 전송하는 것을 결정하는 과정을 scheduling이라고 함
- 대표적인 예시 : LTE/5G 기지국
 - 1ms 단위로 scheduling 수행
 - 수신 단말과 단말에게 보낼 data, 자원 결정
 - 송신 단말 및 자원 결정



Contention 기반 MAC

- 경쟁 기반으로 L1/L2들이 link 자원을 점유해서 사용

- 중앙집권적 node가 불필요하나 충돌의 여지가 있음

- ALOHA -> Slotted ALOHA

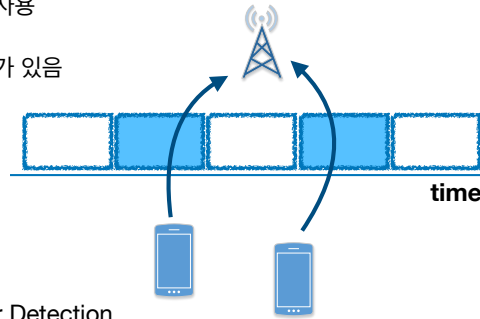
- Random Access Channel (LTE/5G)

- IEEE 계열 MAC (ethernet, WiFi)

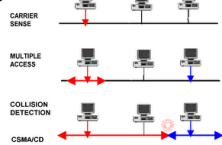
- Carrier Sensing Multiple Access/Carrier Detection

- Carrier Sensing Multiple Access/Carrier Avoidance

Slotted ALOHA



CSMA/CD



CSMA/CA

