

01

들어가기

* 학습목표

- 아날로그 신호와 디지털 신호의 개념을 이해할 수 있다.
- 디지털 정보의 표현 방법을 이해하고 이를 활용할 수 있다.
- 주기적인 패형에서 주파수와 주기의 개념을 이해하고 계산할 수 있다.
 - 디지털 회로의 장점과 단점에 대해 설명할 수 있다.
 - ADC와 DAC의 개념을 이해할 수 있다.

01. 디지털과 아날로그

02. 디지털 정보의 표현

03. 논리 레벨과 펄스파형

04. 디지털 집적회로

05. ADC와 DAC

요약

연습문제

기출문제

디지털과 아날로그

1. 디지털 신호와 아날로그 신호

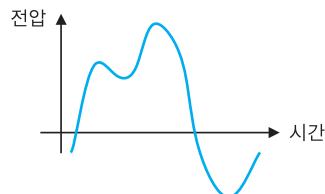
전자 및 통신 산업의 핵심인 디지털 시스템은 반도체 집적회로 기술과 시스템 기술이 눈부시게 발전하면서 방송, 통신, 컴퓨터가 융합되는 정보화 사회로 진전하는 데 커다란 역할을 하고 있다. 디지털 시스템이 아날로그 시스템과 대조되는 점은 이산적인 단위량의 정수배로 표시하고, 이산량을 이용하여 정보를 처리한다는 점이다.

현실 세계의 물리적인 양은 시간에 따라 연속적으로 변화하는 것이 많다. 예를 들어 온도, 습도, 소리, 빛 등은 시간에 따라 연속적인 값을 갖는다. 이러한 물리적인 양을 전기 · 전자적으로 측정하기 위해 트랜스듀서(transducer)를 이용하여 전기 · 전자적 신호로 변환하면 원래의 물리적인 양과 유사한(analog) 연속적인 값을 갖는다. 이러한 전기 · 전자 신호를 아날로그 신호라고 한다. 이에 반해 디지털 신호는 분명히 구별되는 두 레벨의 신호값만을 갖는다.

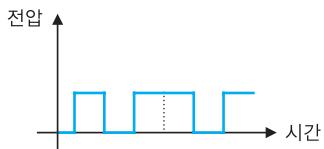
트랜스듀서

빛이나 소리의 에너지 신호를 전기 에너지 신호로 변환하여 출력하는 기기

아날로그 신호와 디지털 신호를 그림으로 표현하면 [그림 1-1]과 같다.



(a) 아날로그 신호



(b) 디지털 신호

[그림 1-1] 아날로그 신호와 디지털 신호

일상생활에서 사용하는 전자기기는 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 사용한다. 시계를 예로 들면, 초침과 분침이 회전하는 형태의 눈금 시계는 아날로그 시계이고 시간이 숫

아날로그 시계



디지털 시계



자로 표시되는 형태의 시계는 디지털 시계이다. 또 다른 예로 아날로그 테스터기와 디지털 테스터기를 [그림 1-2]에서 확인할 수 있다. 이렇듯 우리 생활 주변의 온도계, 습도계, 시계, 회로시험기 등에서 아날로그 형태와 디지털 형태의 기기를 쉽게 발견할 수 있다.



(a) 아날로그 테스터기



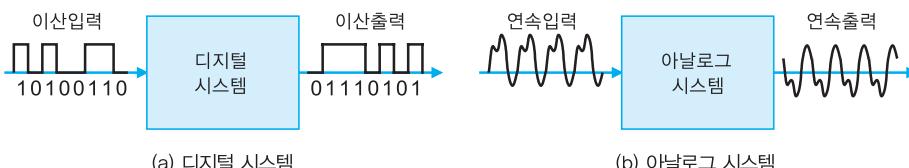
(b) 디지털 테스터기

[그림 1-2] 아날로그 테스터기와 디지털 테스터기

2 디지털 시스템과 아날로그 시스템

전기 · 전자회로는 취급하는 신호의 성격에 따라 아날로그 시스템과 디지털 시스템으로 구분되며, 각각 아날로그 신호와 디지털 신호를 통해 동작한다. [그림 1-3](a)에 나타난 것처럼 이산적인 정보를 가공 · 처리하여 최종적으로 얻으려는 정보를 출력하는 모든 형태의 장치를 디지털 시스템이라고 한다.

원래 시스템이란 임의의 종합된 형태의 작업이나 기능을 수행하는 일정한 체계를 갖춘 기기의 집합체로 정의된다. 디지털 시스템은 간단한 산술연산을 수행하는 장치에서부터 컴퓨터나 방송, 통신 시스템처럼 매우 복잡한 시스템에 이르기까지 다양하게 정의될 수 있다.



[그림 1-3] 디지털 시스템과 아날로그 시스템

이에 비해 아날로그 시스템은 디지털 시스템에 대응하는 것으로 [그림 1-3](b)와 같이 연속적인 정보를 입력받아 처리하여 연속적인 형태의 정보를 출력하는 시스템으로 정의된다. 오늘날에는 대부분의 전자 시스템이 디지털화되었지만, 그 전에는 아날로그 시스템이었다.

연속적으로 변하는 다양한 정보를 이산적인 정보로 변환하기 위해서는 아날로그-디지털 변환기(ADC, analog-to-digital converter)를 사용하는데, 아날로그 시스템에 비해 디지털 시스템은 다음과 같은 장점이 있다.

첫째, 디지털 시스템은 내부와 외부 잡음에 강하다. 일반적으로 아날로그 시스템은 외부 잡음이나 온도 변화, 부품의 사용 기간 등에 민감하게 반응하지만, 디지털 시스템에서의 전기 · 전자 신호는 이산적인 정보를 사용하기 때문에 내 · 외부 잡음의 영향을 줄일 수 있다.

둘째, 디지털 시스템은 설계하기 용이하다. 디지털 시스템에서 사용되는 회로는 off 또는 on 상태만이 중요한 스위칭(switching) 회로다. 따라서 회로의 전압이나 전류의 정확한 값보다 전압이나 전류가 일정한 범위 내에 있으면 off 또는 on 상태를 쉽게 인식할 수 있다. 또 디지털 시스템은 좀 더 규모가 작은 서브시스템으로 분해하는 것이 가능하고, 높은 레벨에서 낮은 레벨에 이르기까지 다양한 시스템 모델로 나타낼 수 있으며 계층 구조를 갖춘 시스템 설계도 가능하다.

셋째, 디지털 시스템은 프로그래밍으로 전체 시스템을 제어할 수 있어서 규격이나 사양 변경에 쉽게 대응할 수 있다. 또 기능 구현의 유연성을 높일 수 있고, 개발 기간을 단축할 수 있다.

넷째, 디지털 시스템에서는 디지털 정보의 이산적인 특징 때문에 정보를 저장하거나 가공하기 쉽다.

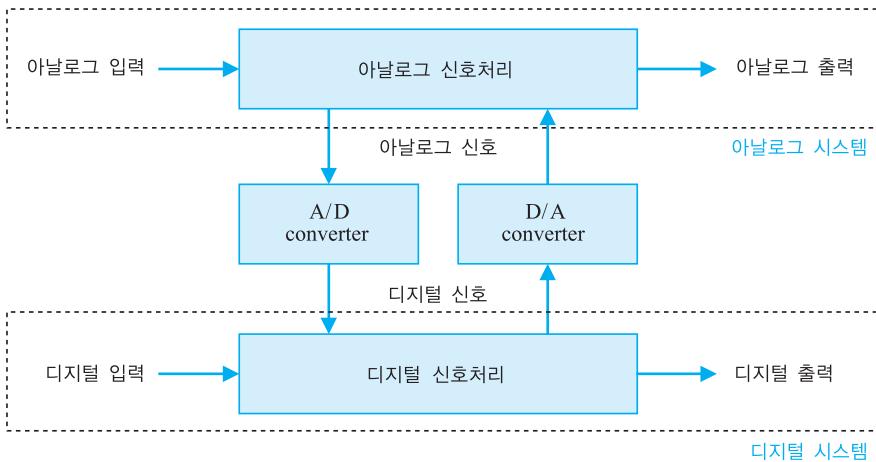
다섯째, 디지털 시스템에서는 정보 처리의 정확성과 정밀도를 높일 수 있으며, 아날로그 시스템으로는 다루기 어려운 비선형 처리나 다중화 처리 등도 가능하다.

여섯째, 디지털 시스템은 전체 시스템 구성을 소형화하고 저렴한 가격에 구성할 수 있다. 여러 가지 디지털 회로나 기능을 하나의 칩에 집적하면 인쇄회로기판(PCB, printed circuit board)의 크기나 사용하는 부품의 수를 줄일 수 있기 때문이다.

이러한 디지털 시스템의 장점을 때문에 기존 아날로그 시스템이나 새로운 시스템을 대부분 디지털 시스템으로 구성한다. 하지만 시스템에서 관측하고 동작, 제어되는 정보의 물리적

인 양은 대부분 원래 아날로그 양이다. 사람들이 아날로그 정보인 물리적인 양에 좀 더 익숙하기 때문에 디지털 시스템으로 처리한 정보라고 해도 궁극적으로는 아날로그 형태의 정보로 다시 변환해야 한다. 이를 위한 장치가 디지털-아날로그 변환기(DAC, digital-to-analog converter)다.

이와 같이 디지털 시스템은 아날로그와의 인터페이스를 필요로 하기 때문에 전체 시스템을 효율적으로 구축하기 위해서는 아날로그 신호의 본질이나 특성을 좀 더 철저하게 이해해야 한다.



[그림 1-4] 아날로그 회로와 디지털 회로의 상호 연결

Section
02

디지털 정보의 표현

1. 디지털 정보의 전압레벨

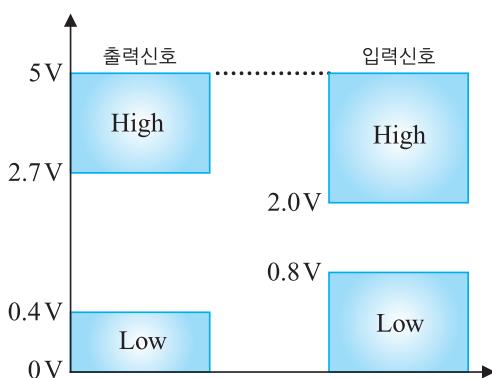
시스템에서 사용하는 정보를 신호라고 하며, 이러한 전기신호는 일반적으로 전압이나 전류로 나타낸다. 디지털 정보를 표현하는 데 사용하는 2진수 체계(binary system)는 0과 1 두 디지트(digit)를 사용하기 때문에 정보를 가장 간단한 형태로 나타낼 수 있다.

디지트

손가락 또는 수를 셀 때는 의미로, 손가락을 이용하여 수를 세는 것에서 유래했다. 디지트는 숫자 자체를 의미하기도 한다.

[그림 1-5]는 디지털 시스템의 입출력에서 전압레벨에 따라 2진 디지털 정보를 나타내는 예이다. 출력신호의 전압이 2.7~5V 범위에 있으면 High 레벨 즉, 2진수의 1을 나타내고, 0~0.4V의 범위에 있으면 Low 레벨 즉, 2진수의 0을 나타낸다.

이와 마찬가지로 입력신호도 그림에 나타난 것처럼 전압레벨의 변화에 따라 Low, High 또는 2진수 0, 1로 표현한다. 이때 입력신호 전압의 변동 범위가 출력신호 전압의 변동 범위보다 큰 이유는 신호 전송 과정 중에 발생하는 잡음에 대해 좀 더 강하도록 하기 위해서다.



[그림 1-5] 디지털 시스템의 전압레벨

2 디지털 정보의 표현 단위

디지털 정보의 단위로는 비트(bit), 바이트(byte) 등이 있는데, 비트는 컴퓨터의 정보를 나타내는 가장 기본적인 단위다. 컴퓨터는 일종의 전자 장치로, 전압이 높고 낮음의 두 가지 상태만을 감지할 수 있으며, 이를 간단히 2진수로 표현한다(예: $0V \rightarrow 0$, $5V \rightarrow 1$). 2진수 한 자리(0과 1)는 두 가지 상태의 정보를 표현할 수 있다.

비트 1개는 단순히 2가지 상태만 저장할 수 있기 때문에 매우 단순한 정보만 표현할 수 있다. 예를 들어, 2자리 비트는 4가지 상태의 정보를 표현할 수 있다. 그런데 컴퓨터에서는 보통 비트 8개를 모은 8비트를 사용하며 이를 1바이트(byte)라고 한다. 한편 1바이트의 반, 즉, 4비트 단위는 니블(nibble)이라고 한다.

$$1\text{byte} = 8\text{bit}$$

$$2\text{byte} = 16\text{bit}$$

$$4\text{byte} = 32\text{bit}$$

$$8\text{byte} = 64\text{bit}$$

참고

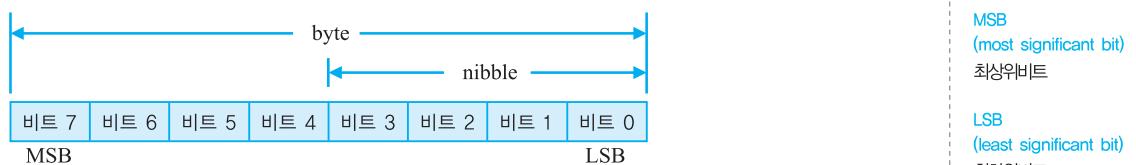
비트 n 개로는 2^n 가지 정보를 표현할 수 있다. 예를 들어, $n = 4$ 면 $2^4 = 16$ 가지 정보를 표현할 수 있다.

n 가지 정보를 코드로 부호화하려면 비트 $\lceil \log_2 n \rceil$ 개가 필요하다. 예를 들어, $n = 100$ 면 $\log_2 100 \approx 6.644$ 이므로 $\lceil \log_2 100 \rceil = 7$ 비트가 필요하다.

1바이트를 1캐릭터(character)라고도 한다. 이는 1바이트로 영어 한 문자를 표현할 수 있기 때문이다. 반면에 한글과 같은 동양권의 문자를 표기하려면 한 문자당 2바이트가 필요하다. 한글 코드를 2바이트 조합형 혹은 완성형이라고 하는 말은 이러한 이유 때문이다.

사실 정확하게 말하면 영어권의 문자는 8비트(1바이트)가 아닌 7비트만으로도 표현이 가능하다. 7비트는 0~127개 정보 표현이 가능하며, 알파벳과 특수문자를 표현하고도 남는다.

1워드(word)는 특정 CPU에서 취급하는 명령이나 데이터의 길이에 해당하는 비트 수다. 즉, 컴퓨터 하드웨어에서 한 단위로 취급하는 비트 벡터다. 워드의 길이는 보통 8의 정수 배로 나타내는데, 일반적으로 사용하는 워드 길이는 기종에 따라 8, 16, 32, 64비트 등이 될 수 있다. [그림 1-6]은 비트, 니블 및 바이트의 관계를 나타낸 것이다.



[그림 1-6] 비트, 니블 및 바이트의 관계

IEC
International
Electrotechnical
Commission

SI
International System of
Units

IEC 60027-2 규정은
2000년 11월에 발표
(http://www.iec.ch/zone/si/si_bytes.htm)

대용량인 경우 IEC 단위인 Ki, Mi, Gi, Ti 등을 사용하여 나타내며, bit는 소문자 b, byte는 대문자 B를 용량 단위 뒤에 붙여서 사용한다. 4Mib는 4Mebibit, 4MiB는 4Mebibyte다. 초기에는 컴퓨터 용량의 단위로 SI 단위인 K, M 등을 사용하였지만, 컴퓨터 산업이 발달하고 용량 단위가 커짐에 따라 SI 단위를 그대로 사용하면 큰 오차가 발생할 수밖에 없다. 예를 들어, RAM 용량이 512MB라면 실제로는 536,870,912B이므로, 정확하게 512MiB 또는 536MB로 표시해야 한다. 또 다른 예로 Mbit/s를 나타낼 때 네트워크 설계자는 일반적으로 1,048,576bit/s로, 통신공학자는 SI 단위인 1,000,000bit/s로 사용했다. 또한, PCI 버스의 대역폭인 133.3MB/s는 4바이트 데이터를 33.3MHz의 빠르기로 전송한다는 의미다. 여기서 MHz의 M은 1,000,000을, MB의 M은 1,048,576을 의미하므로 부정확한 표시다. 데이터 용량과 전송률이 계속 증가하고 있는 현재 SI 단위를 혼용하거나 부정확하게 사용하면 심각한 문제가 될 것이다. 따라서 IT 산업에서는 IEC 60027-2에 정의된 정확한 단위를 사용해야 한다. [표 1-1]에 SI 단위와 IEC 단위를 비교하여 나타내었다.

[표 1-1] SI 단위와 IEC 단위 비교

kibi—
kilobinary
mebi—
megabinary
gibi—
gigabinary
tebi—
terabinary
pebi—
petabinary
exbi—
exabinary
zebi—
zettabinary
yobi—
yottabinary

SI(10진 단위)			IEC(2진 단위)			
값	기호	이름	값	기호	이름	10진 변환 크기
$(10^3)^1=10^3$	k, K	kilo-	$(2^{10})^1=2^{10}\cong10^{3.01}$	Ki	kibi-	1,024
$(10^3)^2=10^6$	M	mega-	$(2^{10})^2=2^{20}\cong10^{6.02}$	Mi	mebi-	1,048,576
$(10^3)^3=10^9$	G	giga-	$(2^{10})^3=2^{30}\cong10^{9.03}$	Gi	gibi-	1,073,741,824
$(10^3)^4=10^{12}$	T	tera-	$(2^{10})^4=2^{40}\cong10^{12.04}$	Ti	tebi-	1,099,511,627,776
$(10^3)^5=10^{15}$	P	peta-	$(2^{10})^5=2^{50}\cong10^{15.05}$	Pi	pebi-	1,125,899,906,842,624
$(10^3)^6=10^{18}$	E	exa-	$(2^{10})^6=2^{60}\cong10^{18.06}$	Ei	exbi-	1,152,921,504,606,846,976
$(10^3)^7=10^{21}$	Z	zetta-	$(2^{10})^7=2^{70}\cong10^{21.07}$	Zi	zebi-	1,180,591,620,717,411,303,424
$(10^3)^8=10^{24}$	Y	yotta-	$(2^{10})^8=2^{80}\cong10^{24.08}$	Yi	yobi-	1,208,925,819,614,629,174,706,176

예제 1-1

일반 DVD-ROM은 9.6GiB의 디지털 데이터를 저장한다. DVD-ROM에는 얼마나 많은 데이터비트가 저장되는가? 단, 1G= 2^{30} 이다.

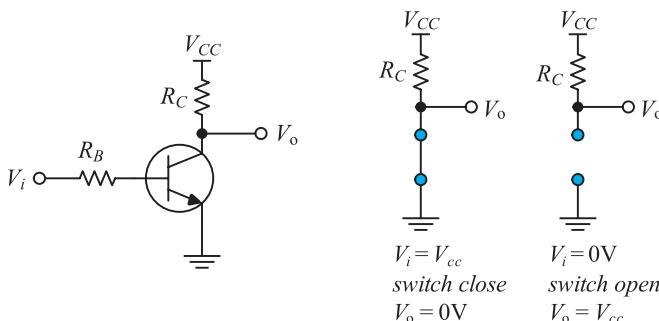
풀이

1바이트는 8비트이므로 9.6GiB는 $9.6 \times 2^{30} \times 8 = 82,463,372,083$ 비트가 된다.

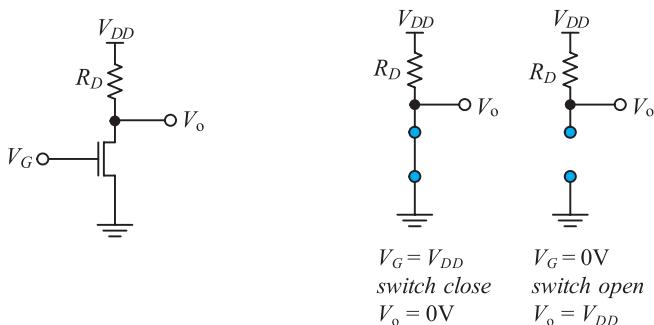
③ 전자소자를 이용한 논리 표현

디지털 정보를 0, 1 또는 Low, High로 표현하는 방법 외에도 다이오드(diode)나 트랜지스터(transistor)의 off/on, 전기 스위치의 open/close, 논리학의 false/true 등 여러 가지 표현이 같은 의미로 사용되고 있다.

디지털 시스템에서 0과 1의 2진 상태를 전자회로를 사용하여 표현할 때 쌍극성(bipolar) 트랜지스터나 MOS(metal oxide semiconductor) 트랜지스터를 주로 이용한다. [그림 1-7](a)는 쌍극성 트랜지스터를 이용해 2진 상태를 표현한 예로, 입력전압 V_i 의 값에 따라 출력전압 V_o 의 레벨이 결정된다. $V_i = V_{CC}$ 면 트랜지스터 스위치가 on 상태가 되어 $V_o = 0V$ 가 된다. 반면 $V_i = 0V$ 면 트랜지스터 스위치가 off 상태가 되어 $V_o = V_{CC}$ 가 되는 과정으로 2진 상태를 표현할 수 있다. [그림 1-7](b)는 NMOS에 의한 2진 상태의 스위칭 논리를 나타낸 예로, 쌍극성 트랜지스터와 마찬가지로 입력 V_G 에 따라 2진 상태를 표현할 수 있다.



(a) 쌍극성 트랜지스터를 이용한 스위칭



(b) NMOS 트랜지스터를 이용한 스위칭

[그림 1-7] 스위칭 소자를 이용한 2진 상태 표현

트랜지스터(transistor)

디지털 회로에서 전자스위치로 사용되는 반도체 소자. 베이스에 적절한 전압을 인가하여 컬렉터-에미터 접합이 개방 또는 단락된 스위치처럼 동작한다.

NMOS

N-채널 MOSFET로 만들어진 IC의 계열

논리 레벨과 펄스파형

1. 정논리와 부논리

디지털 시스템에서 두 전압레벨은 두 2진 숫자(binary digit)인 0과 1을 나타낸다. 예를 들어, 논리 레벨 전압으로 0V와 +5V가 있다고 가정하자. 두 전압레벨에서, 0V인 Low 레벨을 0으로 나타내고 +5V인 High 레벨을 1로 나타내는 것을 양논리 또는 정논리(positive logic)라고 한다.

반대로 Low 레벨인 0V를 1로 나타내고, High 레벨인 +5V를 0으로 나타내는 것을 음논리 또는 부논리(negative logic)라고 한다.

정논리와 부논리는 모두 디지털 논리 시스템에서 이용되고 있으며, 일반적으로 정논리를 많이 사용한다. 정논리와 부논리를 정리하면 [표 1-2]와 같다.

[표 1-2] 정논리와 부논리

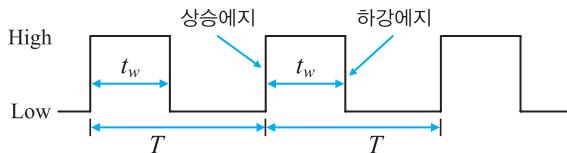
전압레벨	정논리	부논리
+5V	High=1	High=0
0V	Low=0	Low=1

2. 펄스파형

일반적으로 펄스파형은 Low 상태와 High 상태를 반복하는 전압레벨로 구성된다. 즉 펄스는 상승에지와 하강에지로 구성된다.

펄스(pulse)는 전압레벨이 일반적으로 Low 상태와 High 상태를 반복하기 때문에 디지털 시스템에서 매우 중요하다. 디지털 시스템에서 사용하는 대부분의 파형은 일련의 펄스로 구성되고, 주기 펄스(periodic pulse)와 비주기 펄스(non-periodic pulse)로 나뉜다. 주기 펄스는 일정한 구간마다 파형이 반복되며, 비주기 펄스는 주기가 없는 파형이다.

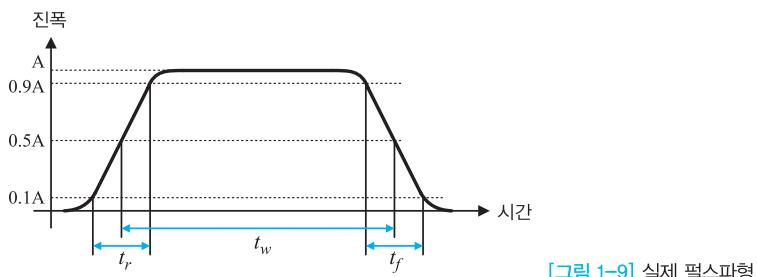
[그림 1-8]은 이상적인 주기 펄스의 모양을 나타낸 것이다. 그림에서 펄스는 두 개의 에지(edge), 즉 상승에지(rising edge)와 하강에지(falling edge)로 구성되어 있다. 상승에지는 리딩 에지(leading edge)라고 부르며, 하강에지는 트레일링 에지(trailing edge)라고도 한다.



[그림 1-8] 이상적인 펄스파형

실제적인 펄스의 모양은 [그림 1-8]에서 보는 것처럼 Low에서 High로, 또는 High에서 Low로 순간적으로 변하지 않으며 [그림 1-9]와 같은 형태를 띤다. 여기서 t_r 과 t_f 는 각각 상승 시간과 하강 시간을 나타낸다. 상승 시간(rise time, t_r)은 Low 레벨에서 High 레벨로 증가하는 데 걸리는 시간, 하강 시간(fall time, t_f)은 High 레벨에서 Low 레벨로 감소하는 데 걸리는 시간을 의미한다.

실제로는 펄스 진폭(A)이 10%에서 90%까지 증가하는 시간을 상승 시간으로 정의하고, 펄스 진폭이 90%에서 10%까지 떨어지는 시간을 하강 시간으로 정의한다. 펄스 폭(pulse width, t_w)은 펄스가 존속하는 시간으로, 상승 구간과 하강 구간의 50%인 두 지점 사이의 시간 간격으로 정의한다.

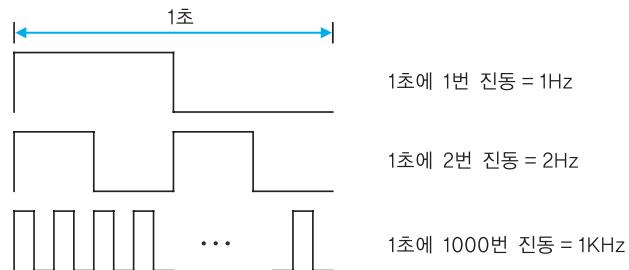


[그림 1-9] 실제 펄스파형

③ 주기, 주파수 및 듀티 사이클

주파수(frequency)란 주기적인 파형이 1초 동안에 진동한 횟수를 의미하는데, 1초 동안에 주기가 몇 번 반복되는지에 따라 결정된다. 주파수 단위는 전파를 처음 발견한 독일의 헤르

츠의 이름을 따서 헤르츠(Hz)를 쓴다. 또 주기(period)는 주기적인 파형이 1회 반복되는 데 걸리는 시간을 의미한다. 예를 들어, [그림 1-10]에 나타난 것처럼 1초 동안 주기적인 파형이 1회 반복하면 1Hz가 되고, 주기는 1초가 된다. 1초 동안 2회 반복하면 주파수는 2Hz가 되고, 주기는 0.5초가 된다. 1000회 반복하면 주파수는 1000Hz(=1KHz)가 되며, 주기는 1ms가 된다.



[그림 1-10] 주파수와 주기

따라서 펄스파형의 주파수 f 와 주기 T 는 서로 역수 관계에 있으며, 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = \frac{1}{f}, \quad f = \frac{1}{T}$$

듀티 사이클을 충격 계수라고도 한다.

주기적인 펄스파형의 주요한 특성은 듀티 사이클(duty cycle)이다. [그림 1-8]을 참조로 듀티 사이클은 아래와 같이 정의되며, 주기 T 에 대한 펄스 폭(t_w)의 비를 백분율로 정의한다.

$$\text{duty cycle} = \frac{t_w}{T} \times 100\%$$

예제 1-2

펄스 폭이 $50\mu\text{s}$ 이고 주기가 $250\mu\text{s}$ 인 주기 파형이 있다. 주파수와 듀티 사이클을 구하여라.

풀이

$$\text{주파수} : f = \frac{1}{T} = \frac{1}{250\mu\text{s}} = \frac{1}{250 \times 10^{-6}} \text{Hz} = 4\text{KHz}$$

$$\text{듀티 사이클} : \text{duty cycle} = \frac{t_w}{T} \times 100\% = \frac{50\mu\text{s}}{250\mu\text{s}} \times 100\% = 20\%$$

디지털 정보를 처리하는 디지털 시스템의 하드웨어(hardware)를 디지털 회로라고 한다. 즉, 디지털 회로는 2진 상태와 회로를 구성하는 논리에 따라 반응하여 2진 상태의 출력신호를 발생시키는 것이다. 이와 같이 디지털 회로가 입력신호에 반응하는 형태는 내부 회로 구성의 논리에 의존하기 때문에 디지털 회로를 논리회로라고도 한다. 이에 따라 디지털 하드웨어, 디지털 회로, 논리회로 등을 특별히 구별하지 않고 사용할 것이다.

논리회로는 입력, 출력 정보를 일시적으로 기억하여 입력신호의 일부분으로 사용하는 메모리의 사용 유무에 따라 조합논리회로(combational logic circuit)와 순서논리회로(sequential logic circuit)로 분류한다.

먼저, 조합논리회로는 기본 게이트(gate)의 조합으로 구성되는 논리회로다. 이때 게이트는 저항(resister), 다이오드(diode), 트랜지스터(transistor) 등의 소자로 구성되어 기본적인 연산을 수행하는 논리소자다.

순서논리회로는 조합논리회로에 입력과 출력의 신호를 기억하는 플립플롭(flip-flop) 또는 메모리(memory)를 부가한 논리회로로, 논리신호가 순차적으로 발생한다. 예컨대 TV 리모콘으로 채널을 선택할 때 사용할 수 있는 버튼으로 CHANNEL 선택 버튼과 UP/DOWN 버튼이 있다. CHANNEL 선택 버튼은 원하는 채널번호를 누르면 해당 채널이 선택되므로 조합논리회로에 해당한다. 반면에 UP/DOWN 버튼은 채널 선택이 이전에 누른 버튼과 관계되기 때문에 순서논리회로에 해당한다.

1960년대의 논리회로는 저항, 다이오드, 트랜지스터 등과 같은 부피가 큰 개별 부품으로 구성되었으나 집적회로(IC, integrated circuit) 기술의 발전으로 여러 트랜지스터를 한 칩(chip)에 통합할 수 있게 되었다. 집적회로는 작은 실리콘(silicon) 칩 위에 저항, 커패시터, 다이오드, 트랜지스터 등의 전자부품을 여러 단계의 공정을 거쳐서 내부적으로 상호 연결한 것을 의미하고, 칩은 실리콘 반도체를 의미한다. 이 칩을 세라믹 또는 플라스틱 기판에

플립플롭(flip-flop)

0 또는 1과 같이 하나의 입력에 대하여 항상 그에 대응하는 출력을 발생하게 하고, 다음에 새로운 입력이 주어질 때까지 그 상태를 인장적으로 유지하는 회로. 컴퓨터의 집적회로 속에서 기억소자로 쓴다.

칩(chip)

집적회로를 일컫는 말. 각 집적회로는 실리콘 단결정의 한 개의 칩으로 이루어져 있음을 나타낸다.

부착하여 필요한 외부 핀(pin)에 연결한다. 핀의 수는 내부회로에 따라 적게는 14, 많게는 100개 이상이 되기도 한다.

1. IC 패키지

PCB

PCB는 그 위에 칩이나 기타 다른 전자부품들이 설치되어 있는 얇은 판이다. 이 보드는 강화 섬유유리나 플라스틱으로 만들어지며, 구리로 된 회로를 통해 부품들이 서로 연결된다. 시스템 내에 주요 PCB를 시스템보드 또는 마더보드(mother board)라고 부르며, 메인보드의 슬롯에 꽂는 작은 것들은 보드 또는 카드라고 부른다. 1960년대의 PCB는 분리된 부품들을 함께 연결하였지만 요즘의 PCB는 여러 개의 칩들을 서로 연결하며, 각 칩들은 수십 수백 만개의 기본 전자소자를 담고 있다.

DIP

진저회로에 가장 널리 사용되는 핀 배열 접적회로 양쪽 면에 두 개의 직선으로 정렬되어 있다.

SMD

기판에 직접 납땜하는 새로운 형태의 접적회로, 통등한 논리의 DIP보다 훨씬 작고 가볍다.

IC 패키지는 [그림 1-11]과 같이 PCB(printed circuit board)에 장착하는 방법에 따라 삽입 장착(through-hole mounted)형과 표면 실장(surface-mounted device, SMD)형으로 구분한다. 삽입 장착형 IC는 PCB 보드의 구멍에 끼우는 핀을 가지고 있어 뒷면의 도체에 납땜으로 연결할 수 있다. 대부분의 삽입 장착형 IC는 [그림 1-11](a)와 같은 DIP(dual-in-line package) 형태다. 또한 표면 실장형 IC로는 SOIC(small outline integrated circuit), QFP(quad flat package), PLCC(plastic leaded chip carrier) 등이 있다.

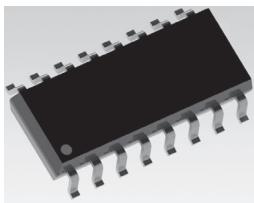
DIP는 1965년에 개발되어 IC 실장에 적용한 후부터 1980년대까지 IC 패키지의 주류였다. 그 후, 표면 실장형 패키지로 PLCC 및 SOIC가 개발되어 자리를 양보하게 되었지만 지금도 범용 로직, EEPROM 등 많은 IC에 사용되고 있다. 세라믹 DIP는 CerDIP(서립)이라고 하고, 플라스틱 DIP는 PDIP(피딥)이라고도 표시한다.

SOP(small outline package)는 DIP의 리드 간격을 절반으로 하고 리드는 표면 실장을 위해 다리가 바깥쪽으로 구부리져 있다. 미국에서는 SOP를 SOIC라고 부른다. 그리고 패키지의 4방향에서 리드 핀을 낸 것을 QFP라고 한다. PLCC는 QFP와 같이 패키지 4변의 측면에 리드가 나와 있으며, 리드의 끝 부분은 J자형으로 안쪽으로 구부리져 있다.

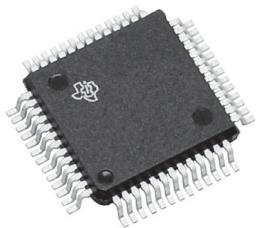
현대 전자공학의 미래는 더 작고 조밀한 부품과 시스템을 제조하는 능력에 달려있다. SMD는 이러한 요구를 충족한다. SMD는 DIP 형태의 논리회로 크기를 70%, 무게를 90%가량 줄였다. 또한 PCB의 제조 가격을 크게 떨어뜨렸다. SMD는 PCB 기판 표면의 금속 처리된 곳에 직접 납땜 처리를 하기 때문에 비용을 절감할 수 있다. DIP는 각 핀에 해당하는 구멍을 뚫어야 하지만, SMD는 크기가 작아 특별한 도구와 기술이 필요하기 때문에 제거하는 데 어려움이 있다.



(a) DIP



(b) SOIC



(c) QFP



(d) PLCC

[그림 1-11] 제작 형태에 따른 IC 패키지의 종류

집적회로 기술이 개발된 이래 IC 제조 기술은 눈부시게 발전했다. 칩 소요 면적의 소형화 뿐만 아니라 1990년대에는 트랜지스터가 수백만 개 집적된 마이크로프로세서(microprocessor)가 등장했으며, 현재는 수천만 개의 트랜지스터를 집적할 수 있게 되었다. 집적 회로 기술의 발전으로 아래와 같은 장점을 갖는 다양한 디지털 시스템을 구축할 수 있게 되었다.

- 디지털 시스템의 소형화 및 경량화
- 생산 가격의 저렴화
- 소비 전력의 감소
- 동작 속도의 고속화
- 디지털 시스템의 신뢰도 향상

마이크로프로세서

디지털 컴퓨터의 기본적인 요소가 되는 초대규모 집적회로(VLSI). 소프트웨어 프로그램에 의해 제어되고, 모든 디지털 연산 논리, I/O 동작을 수행할 수 있다.

2. 집적회로의 분류

집적회로는 집적되는 트랜지스터의 수에 따라 [표 1-3]과 같이 5가지로 분류한다.

[표 1-3] 소자 수에 따른 집적회로의 분류

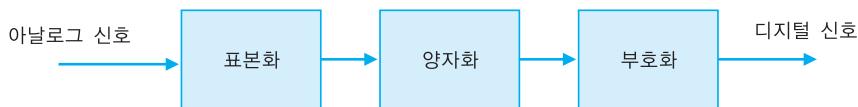
종류	소자 수
소규모 집적회로(SSI, Small Scale IC)	100개 이하
중규모 집적회로(MSI, Medium Scale IC)	100 ~ 1,000개
대규모 집적회로(LSI, Large Scale IC)	1,000 ~ 10,000개
초대규모 집적회로(VLSI, Very Large Scale IC)	10,000 ~ 1,000,000개
극초대규모 집적회로(ULSI, Ultra Large Scale IC)	1,000,000개 이상

SSI는 복잡하지 않은 디지털 IC 부류로, 기본적인 게이트 기능과 플립플롭이 이 부류에 해당한다. MSI는 좀 더 복잡한 기능을 수행하는 디코더(decoder), 인코더(encoder), 멀티플렉서(multiplexer), 디멀티플렉서(demultiplexer), 카운터(counter), 레지스터(register), 소형 기억장치 등의 기능을 포함하는 부류다. LSI는 반도체 기억장치 칩, 휴대용 계산기 등과 같이 한 개의 칩에 1,000개~10,000개에 이르는 등가 게이트를 갖는 부류다. 한 칩에 10,000개~1,000,000개에 이르는 등가 게이트를 포함하는 복잡한 집적회로는 일반적으로 VLSI 부류에 속한다. 이 부류에는 대용량 반도체 메모리, 1만 게이트 이상의 논리회로, 단일 칩 마이크로프로세서(single-chip microprocessor) 등이 있다. ULSI는 대개 한 칩에 회로소자들이 약 1,000,000개 이상 들어 있는 집적회로를 가리킨다. 예를 들면, 인텔의 486이나 펜티엄 등이 ULSI 정도의 집적도를 가진 프로세서들이다. 그러나 VLSI와 ULSI 사이의 정확한 구분은 사실 모호하다.

모든 집적회로는 2가지 형태의 트랜지스터, 즉 바이폴라 접합 트랜지스터(bipolar junction transistor)와 MOSFET(metal-oxide semiconductor field-effect transistor)에 의해 구현된다. 바이폴라 트랜지스터를 사용하는 디지털 회로 기술로는 TTL(transistor-transistor logic)과 ECL(emitter-coupled logic)이 있으나 이중에서 TTL이 더 많이 사용된다. MOSFET를 사용하는 기술로는 CMOS(complementary MOS)와 NMOS(N-channel MOS)가 있으며, 마이크로프로세서에는 MOS 기술이 사용된다.

SSI와 MSI 회로에는 일반적으로 TTL과 CMOS가 모두 사용되며, LSI, VLSI, ULSI는 작은 공간을 차지하고 전력소모가 적은 CMOS나 NMOS를 사용하여 구현한다.

디지털 회로를 이용한 신호처리는 아날로그 회로에 비하여 잡음의 영향을 덜 받고 더 정확하다. 또 정보를 저장할 수 있고 대규모 IC화가 용이하다. 그러므로 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하여 처리하는 것이 유리하다. 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 장치를 아날로그-디지털 변환기(ADC, analog-to-digital converter)라고 하고, 변환은 [그림 1-12]와 같이 3가지 과정으로 이루어진다.



[그림 1-12] 아날로그-디지털 변환 과정의 블록도

1 표본화

사람의 음성과 같은 아날로그 신호를 디지털화하려면 일정한 간격으로 표본화(sampling) 해야 한다. 샤논(Shannon)의 표본화 정리(sampling theorem)에 따르면 신호의 최고 주파수의 2배 이상의 빈도로 샘플링하면 샘플링된 데이터로부터 본래의 데이터를 재현할 수 있다고 한다. 예를 들어, 우리가 흔히 음성 전송에 이용하는 주파수 대역은 30~3,400Hz로, 음성 대역폭은 3KHz가 된다.

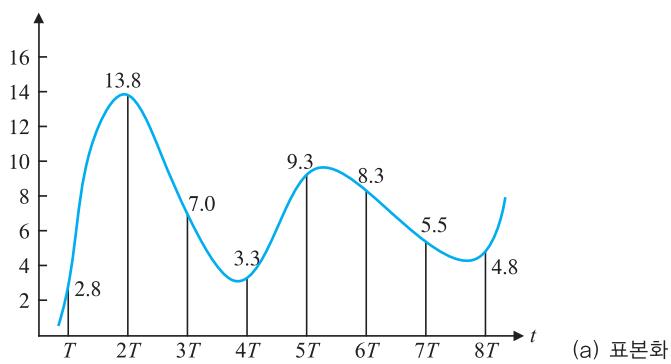
음성 대역은 이웃하는 채널끼리의 간섭을 피하기 위한 보호 밴드(guard band)까지 포함하여 4KHz가 되는 것이 보통이다. 따라서 음성 신호를 재현할 수 있게 하려면 4KHz의 2배인 8KHz, 즉, 1초 동안 8,000번 표본화해야 한다. 이 결과 표본화 순간 아날로그 신호의 진폭과 같은 크기의 진폭을 가지는 펄스를 얻는다. [그림 1-13](a)는 아날로그 신호를 표본화하여 얻은 펄스를 표시한 것이다.

2. 양자화

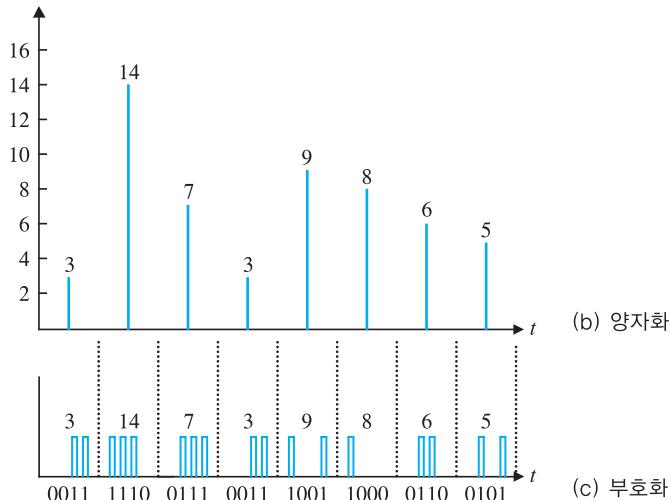
[그림 1-13](b)에 표시되어 있는 것처럼 펄스의 진폭 크기를 디지털 양으로 변환하는 것을 양자화(quantization)라 한다. 즉, 최대 아날로그 신호의 진폭을 양자화 레벨의 숫자로 나누어 각 간격에서 뽑아낸 표본값을 미리 정해진 값에서 가장 가까운 값으로 변환하는 것이다. 이 과정에서 불가피하게 양자화 잡음(quantization noise)이 발생한다. 예를 들어, [그림 1-13](b)에서 첫 번째 표본점의 원 신호 2.8과 양자화 파형 3.0 사이에는 0.2 차이가 존재하게 되고 이것을 양자화 잡음이라 한다. 신호레벨의 수(분해능, resolution)를 늘리면 양자화 잡음을 줄일 수 있으나, 데이터의 양이 많아지는 단점이 있다.

분해능

전체 진폭을 얼마나 잘 계산할 수 있는지를 나타낸다. 그림 1-13과 같은 4비트 변환기인 경우 $1/(2^4-1)=0.067$ 의 분해능을 갖는다.



(a) 표본화



(b) 양자화

(c) 부호화

[그림 1-13] 아날로그-디지털 변환과정

3. 부호화

부호화(encoding)는 양자화한 값을 2진 디지털 부호로 변환하는 과정이다. [그림 1-13](c)에서는 4비트로 부호화하는 경우를 나타냈는데 일반적으로 전화 음성에서는 8비트로 부호화한다.

4. ADC와 DAC 과정의 예

ADC와는 반대 기능을 수행하는 장치, 즉 디지털 신호를 아날로그 신호로 변환하는 장치를 디지털-아날로그 변환기(DAC, digital-to-analog converter)라고 한다. [그림 1-14]는 ADC와 DAC 변환 과정의 예로, CD(compact disk) 오디오 시스템의 신호처리 과정을 표시한 것이다.



[그림 1-14] CD 오디오 시스템의 신호처리 과정

- 1 아날로그(analog)는 물리적인 양이나 신호가 일정한 범위 내에서 연속적인 값으로 표현되는 형태이고, 디지털(digital)은 물리적인 양이나 신호가 이산적인 값으로 표현되는 형태다.
- 2 아날로그 형태로 표시되는 양을 디지털 회로에 사용하려면 디지털 형태로 변환해야 한다.
- 3 디지털 시스템은 아날로그 시스템에 비해 잡음의 영향을 덜 받고, 설계하기가 용이하며, 정확성을 꾀할 수 있다. 또 정보를 저장할 수 있고 대규모 IC화가 용이하다.
- 4 디지털 시스템에서는 2진법을 사용한다. 왜냐하면 0과 1은 트랜ジ스터가 off 또는 on인 상태로 쉽게 표현할 수 있기 때문이다. 즉, 정논리인 경우 0V이면 논리 0, 5V이면 논리 1에 해당한다.
- 5 다이오드는 한 방향으로만 전류가 흐르는 성질이 있어서 디지털 회로에 사용된다.
- 6 최근의 디지털 집적회로의 기본 핵심 소자인 트랜ジ스터는 베이스 단자에 인가하는 전압에 따라 off 또는 on 상태가 된다.
- 7 주기적인 파형의 주파수(f)와 주기(T)는 역수 관계에 있다.

$$T = \frac{1}{f}, \quad f = \frac{1}{T}$$

- 8 듀티 사이클은 주기(T)에 대한 펄스 폭(t_w)의 비를 백분율로 정의한다.
- 9 SMD 형태의 집적회로는 작은 크기, 제조 비용의 절감 효과 등으로 인해 DIP 형태의 집적회로보다 널리 사용되고 있다.
- 10 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 ADC는 표본화 → 양자화 → 부호화의 과정으로 이루어지며, 양자화 과정에서는 불가피하게 양자화 잡음이 발생한다.

1 아날로그 신호와 디지털 신호의 차이점을 설명하여라.

2 아날로그 양의 세 가지 예를 제시하여라.

3 다음에서 아날로그 양과 디지털 양을 말해보아라.

- ① 전선에 흐르는 전류
- ② 실내 온도
- ③ 해변의 모래알
- ④ 비행기 고도
- ⑤ 어떤 물질의 원자 수

4 아날로그 시스템 대비 디지털 시스템의 장점에 대해 설명하여라.

5 디지털 컴퓨터에서 아날로그 양 대신에 디지털 양을 다루는 이유는 무엇인가?

6 디지털 정보의 단위에 대한 다음 물음에 답하여라.

- ① 64비트는 몇 바이트와 같은가?
- ② 1024비트는 몇 바이트와 같은가?
- ③ 8바이트는 몇 비트와 같은가?
- ④ 1킬로바이트(1Kbyte)는 몇 비트와 같은가?
- ⑤ 32킬로바이트(32Kbyte)는 몇 바이트와 같은가?
- ⑥ 64메가바이트(64Mbyte)는 몇 바이트와 같은가?
- ⑦ 6.4기가바이트(6.4Gbyte)는 몇 바이트와 같은가?

7 컴퓨터 메모리에서 한 워드(word)의 길이가 4바이트일 때 다음 물음에 답하여라.

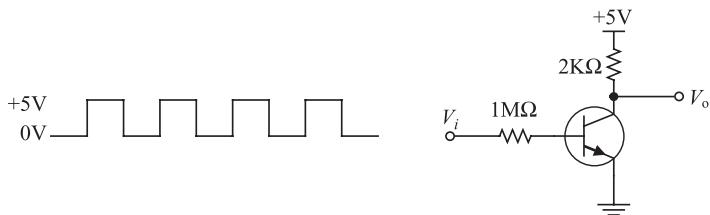
- ① 64워드에는 몇 비트가 있는가?
- ② 1024워드에는 몇 비트가 있는가?

8 흑백 디지털 카메라는 이미지상에 대해 세밀한 격자(grid)를 놓고 격자의 각 셀에서 보이는 명암 정도를 2진 수로 나타내어 측정하고 기록한다. 예를 들어, 4비트를 사용하면 검은색을 0000, 흰색을 1111로 주어지고 명암에 따라 값은 0000과 1111 사이의 값을 갖는다. 격자의 각 셀에서 254가지의 명암 정도를 구분하기 위해서는 몇 비트가 필요한가?

연습문제

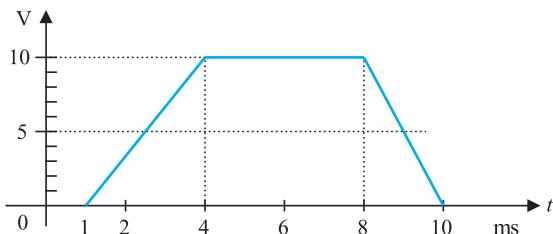
9 3백만 화소(pixel, 픽셀)의 디지털 카메라는 각 화소마다 빛의 3원색인 R, G, B 각각의 명암을 8비트로 저장한다. 모든 비트가 압축 없이 저장된다면 128MiB 메모리 카드에 몇 장의 화면이 저장될 수 있을까? 단, $1M = 2^{20}$ 이다.

10 그림과 같은 트랜지스터 회로에 입력신호 V_i 가 인가되었을 때, 출력 파형 V_o 를 그려보아라.

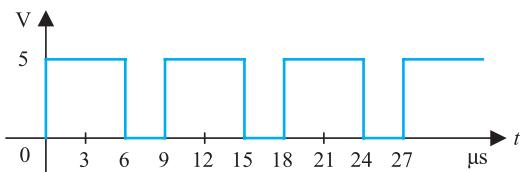


11 아래 그림에 나타낸 펄스에 대해 다음을 결정하여라.

- ① 상승시간(t_r)
- ② 하강시간(t_f)
- ③ 펄스 폭(t_w)
- ④ 진폭



12 아래 그림과 같은 펄스파형에서 주기, 주파수, 둑티 사이클을 결정하여라.



13 주파수가 4MHz, 전압레벨이 0.2V, 4.0V인 펄스파형을 그려보아라.

14 펄스 폭이 $25\mu s$ 이고 주기가 $250\mu s$ 인 주기 파형이 있다. 주파수와 둑티 사이클을 구하여라.

15 다음과 같은 일을 하는 회로는 조합논리회로와 순서논리회로 중에서 어느 회로에 속하는가?

- ① 50원, 100원, 500원짜리 동전을 입력으로 하고, 150원짜리 커피와 거스름돈을 내어주는 커피 자판기
- ② 2비트 수 2개를 곱하는 회로
- ③ 세 입력 중에서 적어도 두 입력이 1이면 출력이 1이 되는 회로
- ④ 설정된 시간이 되면 알람(alarm)을 울리는 디지털 시계
- ⑤ 건물에 출입할 때 자성 카드를 검사 기계에 넣었을 때, 기억된 코드가 맞으면 문이 열리고 맞지 않으면 열리지 않는 시스템

16 양자화 잡음에 대해 설명하여라.

17 $0\sim100^{\circ}C$ 온도값을 $0\sim10V$ 로 표현하는 온도센서가 있다. 이 온도센서의 값을 1초에 100번, 10비트 디지털 신호로 변환하는 경우 다음 값들을 구하여라.

- ① 입력 범위(temperature input range)
- ② 샘플링 레이트(sampling rate)
- ③ 양자화 레벨(quantization level)
- ④ 전압 분해능(voltage resolution)
- ⑤ 온도 분해능(temperature resolution)
- ⑥ 최대 양자화 잡음(max. quantization noise)

기출문제

01 비트(bit)에 대한 설명 중 옳지 않은 것은?

- Ⓐ 정보를 나타내는 최소 단위이다.
- Ⓑ binary digit의 약자이다.
- Ⓒ 2진수로 표시된 정보를 나타내기 알맞다.
- Ⓓ 10진수로 표시된 정보를 나타내기 알맞다.

02 논리회로의 논리 상태를 표현한 것 중 옳지 않은 것은?

- Ⓐ 1, 0
- Ⓑ high, low
- Ⓒ on, off
- Ⓓ input, output

03 정보의 단위로 가장 적은 것은?

- Ⓐ byte
- Ⓑ word
- Ⓒ bit
- Ⓓ record

04 컴퓨터의 메모리 크기 단위 중에서 가장 큰 것은?

- Ⓐ KB
- Ⓑ MB
- Ⓒ GB
- Ⓓ TB

05 4비트로 나타낼 수 있는 정보 단위는?

- Ⓐ nibble
- Ⓑ character
- Ⓒ full-word
- Ⓓ double-word

06 데이터의 길이가 2byte이면 몇 니블(nibble)에 해당되는가?

- Ⓐ 2니블
- Ⓑ 4니블
- Ⓒ 6니블
- Ⓓ 8니블

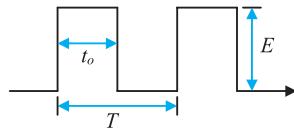
07 정보의 표현 단위 중 문자를 표현하기 위한 것은 무엇인가?

- Ⓐ 비트(bit)
- Ⓑ 바이트(byte)
- Ⓒ 워드(word)
- Ⓓ 레코드(record)

08 컴퓨터에서 4KiB는 정확히 얼마인가?

- Ⓐ 2048byte
- Ⓑ 4000byte
- Ⓒ 4052byte
- Ⓓ 4096byte

09 그림은 이상적인 펄스이다. 이 펄스의 점유율 D 는?



$$\textcircled{A} D = \frac{t_0}{T}$$

$$\textcircled{B} D = \frac{T}{t_0}$$

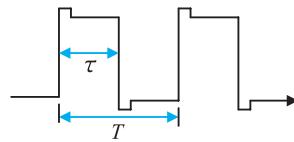
$$\textcircled{C} D = \frac{E}{T}$$

$$\textcircled{D} D = \frac{E}{t_0}$$

10 듀티 사이클(duty cycle)이 0.1이고, 주기가 40μs인 펄스의 폭은?

- Ⓐ 10μs
- Ⓑ 0.2μs
- Ⓒ 2μs
- Ⓓ 4μs

11 다음 펄스파형에서 펄스의 duty cycle은 몇 %인가?
(단, $\tau = 0.5\mu\text{s}$, $T = 10\mu\text{s}$)



$$\textcircled{A} 5\%$$

$$\textcircled{B} 10\%$$

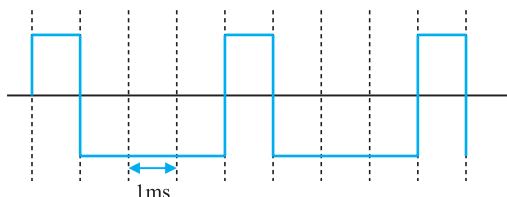
$$\textcircled{C} 20\%$$

$$\textcircled{D} 25\%$$

12 펄스 반복주파수 600Hz, 펄스폭 1.5μs인 펄스의 총 격계수 D 는?

- Ⓐ 1×10^{-4}
- Ⓑ 3×10^{-4}
- Ⓒ 6×10^{-4}
- Ⓓ 9×10^{-4}

13 그림과 같은 출력 파형에서 주파수는 몇 Hz인가?



- Ⓛ 200Hz Ⓝ 250Hz
 Ⓜ 300Hz Ⓞ 350Hz

14 다음 중 집적회로와 가장 관계가 깊은 것은?

- Ⓛ 외부와의 연결회로가 복잡하고 비경제적이다.
 Ⓝ 제작한 시스템의 크기가 작아진다.
 Ⓜ 수명이 짧고, 고장률이 높아 신뢰성이 낮다.
 Ⓞ 동작 속도는 빠르지만 전력 소비가 많다.

15 다음 입출력 기능 중 아날로그 입력데이터를 디지털 신호로 바꾸어 주는 기능은?

- Ⓛ 전송 기능 Ⓝ 변환 기능
 Ⓜ A/D 변환 기능 Ⓞ D/A 변환 기능

16 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 과정에서 샘플링 된 값을 대표값으로 변환하는 단계는?

- Ⓛ 표본화 Ⓝ 양자화
 Ⓜ 부호화 Ⓞ 복호화

17 아날로그 신호를 표본화하여 얻어지는 신호와 관계 깊은 것은?

- Ⓛ PAM Ⓝ PWM
 Ⓜ PPM Ⓞ PDM

18 표본화 정리(sampling theorem)에 의하면 주파수 대역이 300~3400[Hz]인 전화의 경우 다음 어느 시 간마다 표본화하면 완전히 정보를 전송할 수 있는가?

- Ⓛ $\frac{1}{300}$ 초 Ⓝ $\frac{1}{3400}$ 초
 Ⓜ $\frac{1}{6800}$ 초 Ⓞ $\frac{1}{2000}$ 초

19 신호의 최고 주파수를 f_m , 표본화 주파수를 f_s 라 할 때, 표본화 정리에서 원 신호를 정확히 복원할 수 있 는 조건으로 옳은 것은?

- Ⓛ $f_s = f_m$ Ⓝ $f_s \geq 2f_m$
 Ⓜ $f_s \leq f_m$ Ⓞ $2f_s = f_m$

20 12비트 2진 입력 D/A 변환기의 분해능은?

- Ⓛ $\frac{1}{2^{12}}$ Ⓝ $\frac{1}{2^6}$ Ⓜ $\frac{1}{2^3}$ Ⓞ $\frac{1}{2}$

21 다음 중 n 의 비트로 표시할 수 있는 데이터의 수는?

- Ⓛ n 개 Ⓝ n^2 개 Ⓜ 2^n 개 Ⓞ 2^2 개

22 8개의 bit로 표현 가능한 정보의 최대 가지 수는?

- Ⓛ 8가지 Ⓝ 64가지
 Ⓜ 255가지 Ⓞ 256가지

23 서로 다른 17개의 정보가 있다. 이 중에서 하나를 선 택하려면 최소 몇 개의 비트가 필요한가?

- Ⓛ 3비트 Ⓝ 4비트
 Ⓜ 5비트 Ⓞ 17비트

24 64가지의 각기 다른 자료를 나타내려고 하면 최소한 몇 개의 비트(bit)가 필요한가?

- Ⓛ 1개 Ⓝ 3개
 Ⓜ 5개 Ⓞ 6개

25 500가지의 색상을 나타낼 정보를 저장하고자 한다.
몇 비트가 필요한가?

- ① 6비트 ② 7비트
 ③ 8비트 ④ 9비트

26 2바이트로 나타낼 수 있는 수의 표현 범위는?

- ① $2^8 - 1$ ② 64K
 ③ 128K ④ 1M

27 화소(pixel)의 색상을 나타내기 위하여 RGB(Red, Green, Blue)로 표현하고 있다. 한 화소의 각 색상 (R, G, B)마다 256가지로 분류한다면 한 화소에 대한 저장장소는 얼마가 필요하며, 나타낼 수 있는 색상은 몇 가지인가?

- ① 저장장소: 8비트, 색상 수: 2^8 가지
 ② 저장장소: 16비트, 색상 수: 2^{16} 가지
 ③ 저장장소: 24비트, 색상 수: 2^{24} 가지
 ④ 저장장소: 32비트, 색상 수: 2^{32} 가지

01	④	02	④	03	④	04	④	05	③	06	④	07	④	08	④	09	③	10	④
11	③	12	④	13	④	14	④	15	④	16	④	17	③	18	④	19	④	20	③
21	④	22	④	23	④	24	④	25	④	26	④	27	④						