

TFT-LCD
(Thin Film Transistor-
Liquid Crystal Display)
Part 1

LCD 구조

- LCD (Liquid Crystal Display)는 컬러 및 광량을 조절하는 LCD패널, 전기적인 신호를 공급 및 제어하는 구동부와 광원을 제공하는 BLU (Back Light Unit)으로 구성되어 있다. (그림 2.2)
- BLU는 형광램프에서 나온 백색광이 도광판, 반사판, 확산판 및 프리즘에 의해 액정 패널로 빛을 인도하는 역할을 한다. 램프로는 CCFL (Cold Cathode Fluorescence Light)를 사용하거나, 최근에는 색순도 향상 및 두께 slim화를 위해 LED (Light Emission Diode)를 사용한다. 램프로 부터 나온 빛은 도광판 (Light Guide Plate)을 통해 면광원으로 변환되며, 확산판을 거쳐 균일해지며, 프리즘을 통해 면에 수직인 방향으로 나가게 된다.

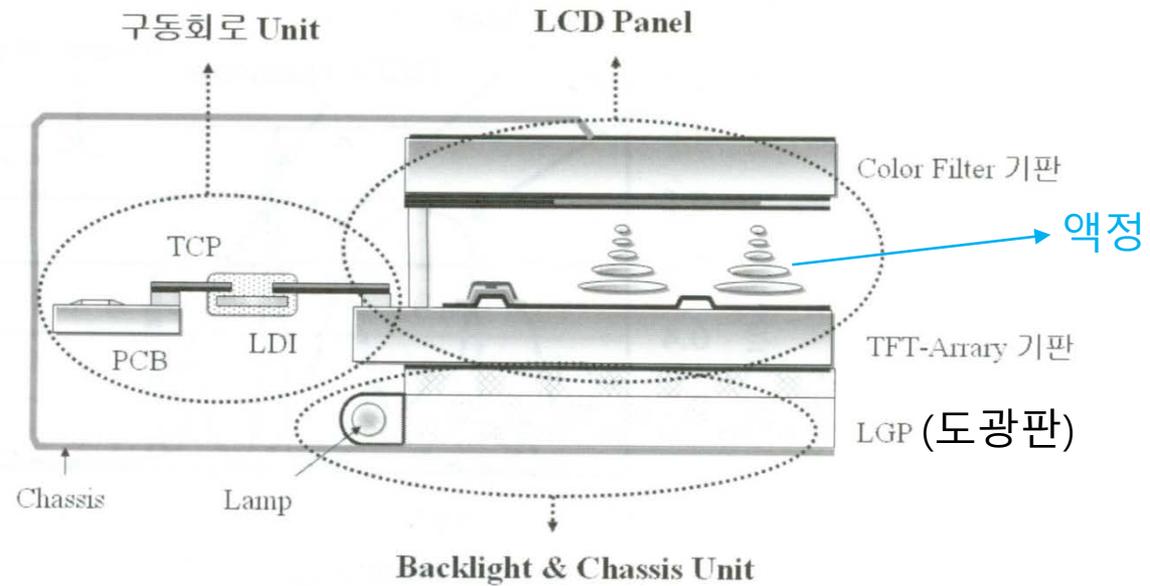


그림 2.2 Color TFT-LCD의 단면 구조

- LCD 패널은 TFT (Thin Film Transistor) array 기판과 CF (Color Filter) 기판 사이에 대략 4~5 μm 의 두께로 액정물질이 채워져 있다. 즉 BLU 바로 위쪽에 위치하여 빛이 입사되는 아래쪽에는 TFT가 형성된 투명전극 화소와 액정배향층이 있고, 대항하는 반대쪽 유리기판 위에는 컬러필터와 액정배향층 및 공통전극이 형성되어 있다.

두 장의 유리기판 외부에는 편광판이 부착되어 있다. 컬러필터는 적색, 녹색, 청색 세 종류를 조합하여 컬러 영상을 구현하는 역할을 한다.

- 구동부는 전기적인 구동신호를 생성하거나 제어해주는 PCB (Printed Circuit Board), PCB와 LCD를 연결해주는 TCP (Tape Carrier Package), 구동신호를 분배하는 LDI (LCD Driver IC)로 구성되어 있다.

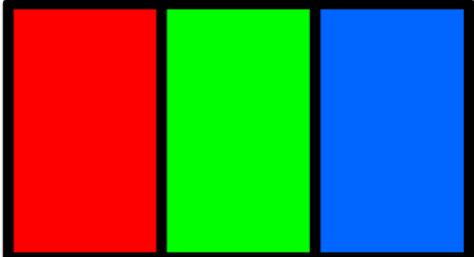
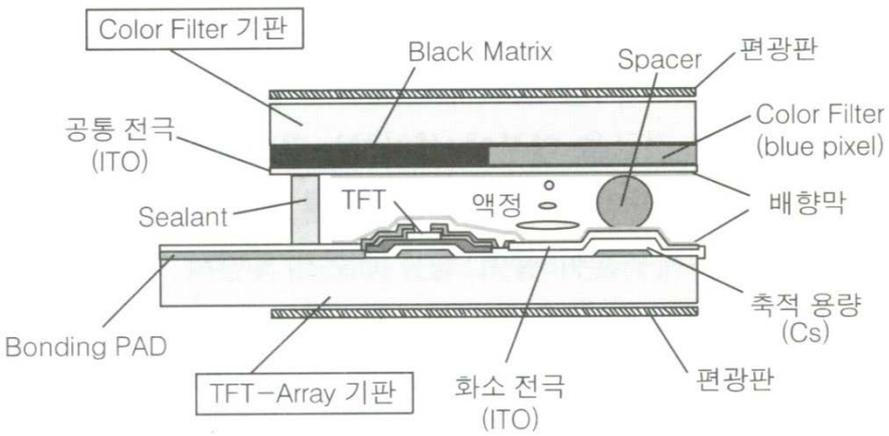
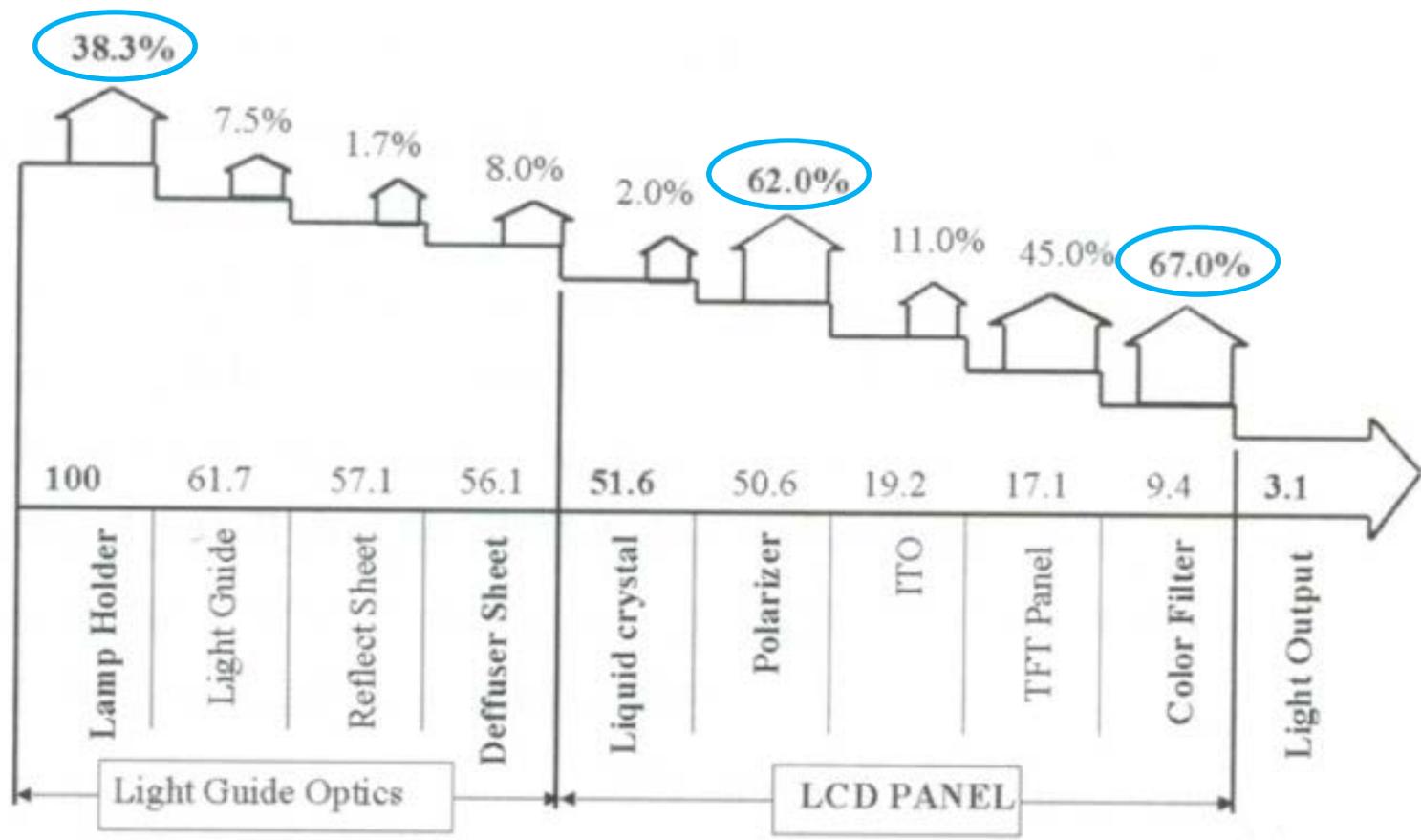


그림 3.36 고온 다결정 TFT LCD 화소부 단면 구조

- 액정 패널에 입사된 빛은 패널의 각 층을 거치며 손실이 일어나게 되고, 최종적으로는 입사한 빛 세기의 3~10% 이내만 투과하게 된다.
특히, 도광판, 편광판과 컬러필터를 투과할 때 각각 38.3%, 62%, 67% 정도의 많은 양이 손실된다.



■ 그림 2.3 TFT-LCD 배면광원에서 나온 빛이 각 층을 통과할 때의 투과도

LCD 구동 원리

LCD에서 화상 정보를 표시하기 위해서는 각각의 화소에 형성되어 있는 TFT를 이용해 화소별로 전압을 인가하여야 한다. 이를 위해서는 구동회로 unit에 있는 gate IC에서 TFT를 ON시켜주기 위한 문턱 전압 이상의 전압을 순차적으로 발생시키고, 화소에 필요한 전압을 data IC에서 화소로 공급함으로써 액정의 배열 변화를 유도한다.

즉 화소에 인가된 전압은 액정의 배열상태 변화를 유발하여 BLU에서 입사된 백색광의 광량을 조절한다. 그 후 컬러필터 층에서 백색광의 선택 흡수를 통해 각각의 red, blue, green의 컬러가 재현된다.

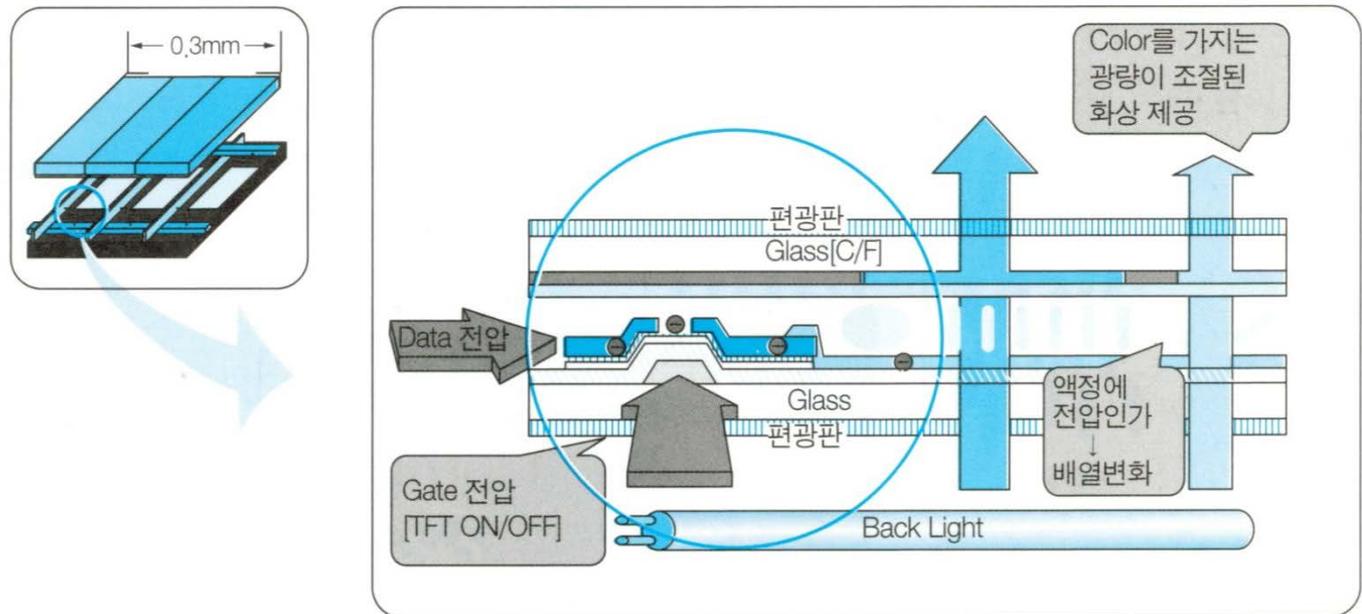
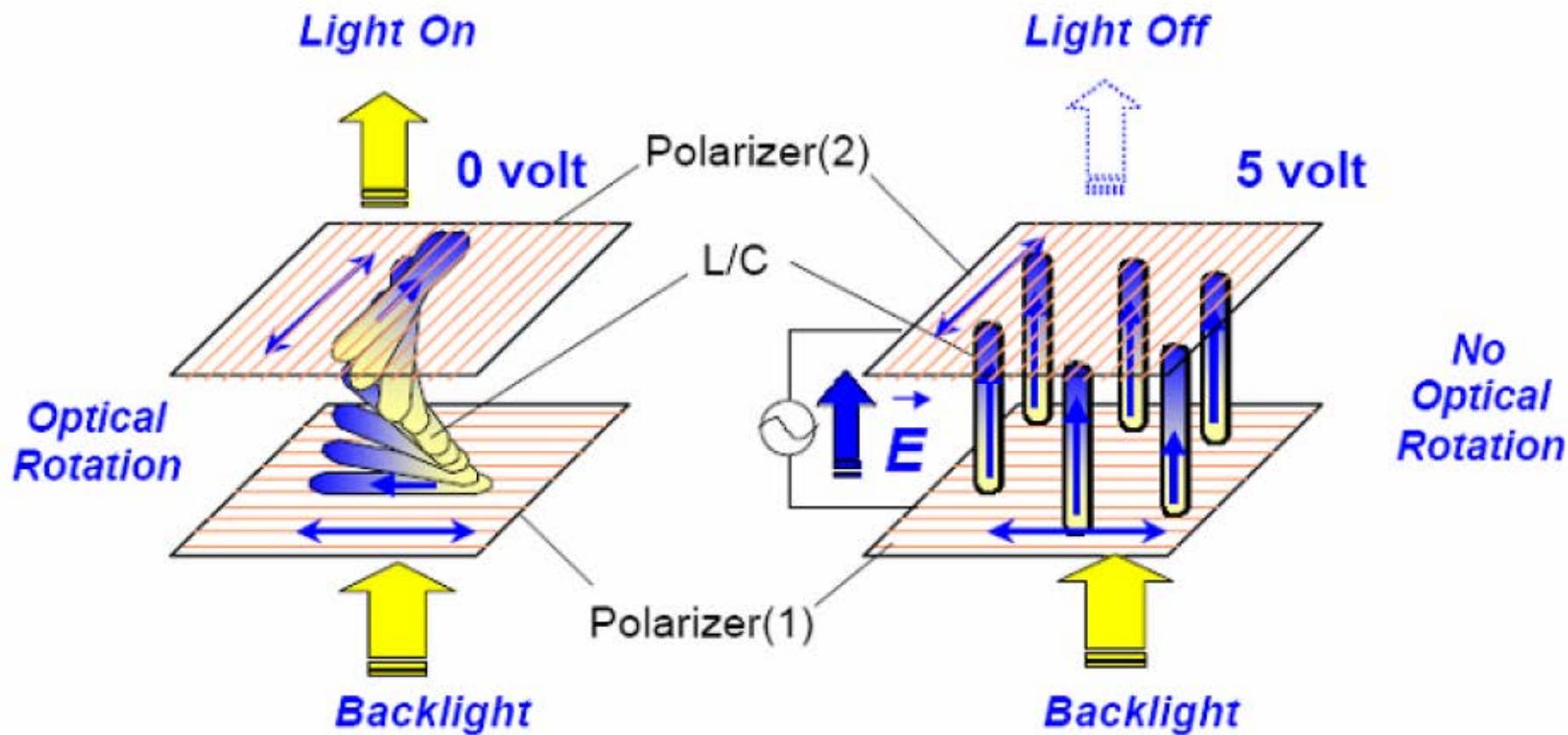


그림 1.2 LCD 구동 원리

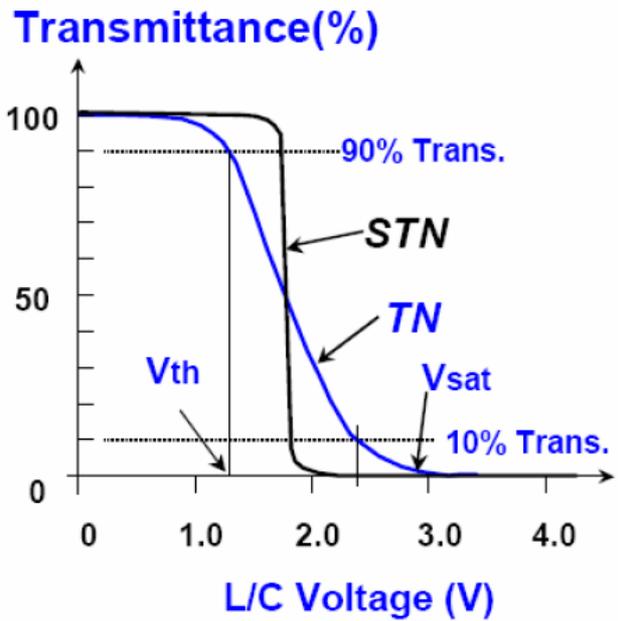
TFT-LCD의 구동 기술

TN (twisted nematic) 액정의 정상 화이트 모드에서의 동작



- 대부분의 TFT-LCD에서 사용하는 TN mode 액정 cell에서 V_{th} 이하의 전압이 인가되면 앞장의 왼쪽 그림과 같이 액정 분자는 액정이 주입된 초기 상태인 나선 형태로 90도 비틀려서 배열된다. 이러한 액정 cell의 상하에 편광판을 배치하면 선형 편광된 입사광은 액정 분자의 나선상 배열을 따라서 진행하면서 편광축이 90도 회전하여 반대측 편광판에서 빛이 투과된다.
- V_{th} 이상의 전압으로 인가 전압을 점점 증가시키면 액정 분자는 전계의 방향으로 재배열되기 시작하며 선편광된 입사광은 액정층을 통과하면서 90도 보다 작게 회전하여 반대쪽 편광판을 통해 투과되어 나오는 빛의 양이 감소되기 시작한다. 충분한 전압이 인가되어 액정 분자 배열이 전계 방향과 일치하면 선 편광된 빛은 편광축이 회전하지 않아 투과될 수 없다.
- 이처럼 빛의 통과 여부를 외부에서 인가한 전압에 의해 제어할 수 있기 때문에, 화소 행렬을 만들고, 개개의 화소에 전기적 신호를 전달하여 빛의 통과 여부를 독립적으로 제어함으로써 원하는 영상을 표시할 수 있다.
- 앞장의 그림의 예는, 전압을 인가하지 않을 때 액정이 ON 상태가 되는 정상 화이트 모드 (Normally White Mode)이다. 반대로, 상하 편광판을 평행하게 배치함으로써 전압을 인가하지 않을때, OFF 상태가 되는 정상 블랙 모드 (Normally Black Mode)도 가능하다.

- NW mode TN cell과 STN cell에 인가된 전압과 광 투과율과의 관계는 다음의 V-T 특성을 갖는다.
- TN cell의 V-T 곡선에서 알 수 있듯이 최대의 광투과율 (white)에서 점차 인가 전압을 증가하면 투과율은 서서히 감소하며 중간 정도의 전압에서는 투과율은 비례적으로 다소 크게 변화하고 다시 높은 전압이 인가되어 최저의 투과율 (black 상태) 부근에 도달하면 전압이 변화해도 투과율의 변화는 거의 없는 특징을 가진다. 따라서 white와 black 시 뿐만 아니라 중간 밝기 표시도 인가해주는 전압의 크기로 표현이 가능하다.
- TN cell에서 전압을 인가하여 완전한 black 표시가 되는 전압을 dynamic voltage라고 정의한다. 이 전압이 크면 결국 driver IC를 포함한 구동 회로 부분의 소비 전력이 증가하기 때문에 TFT-LCD의 저 소비 전력을 위해서는 dynamic voltage가 낮은 액정이 요구된다.



- 여러 레벨의 전압을 인가하여 각각의 전압에 해당하는 빛의 투과량을 여러 중간 단계로 조절하는 것을 **계조 (gray scale) 표시**라고 한다.

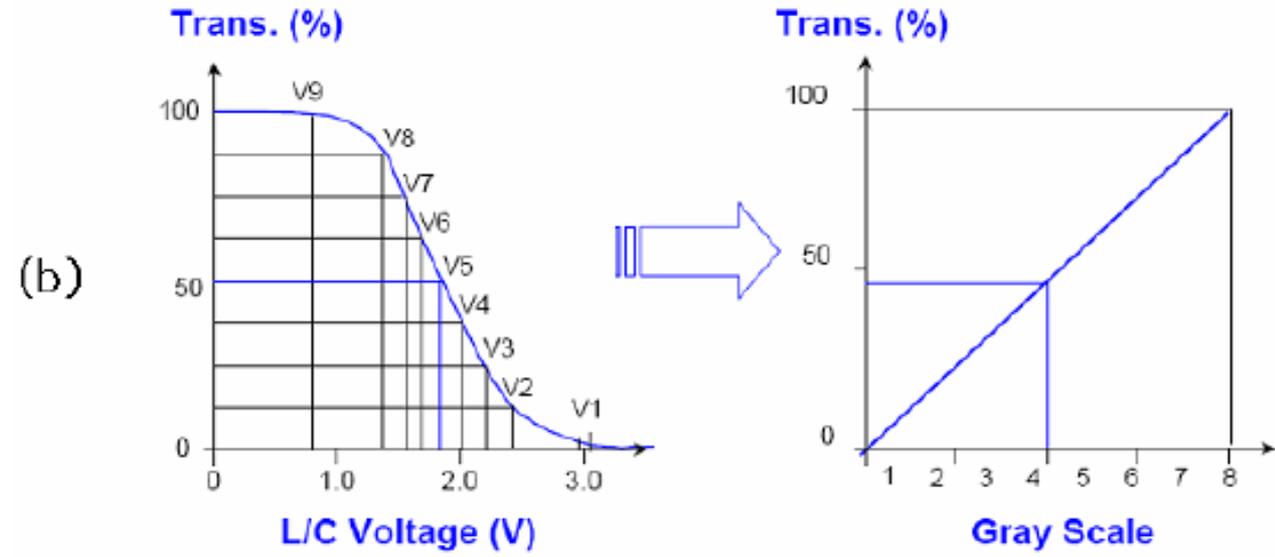
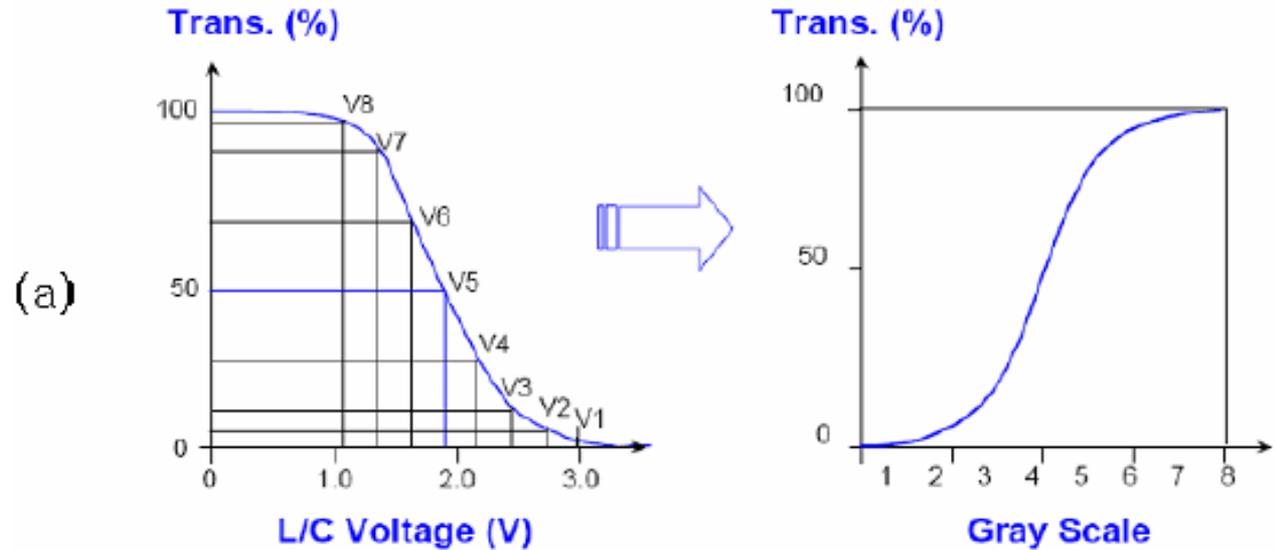
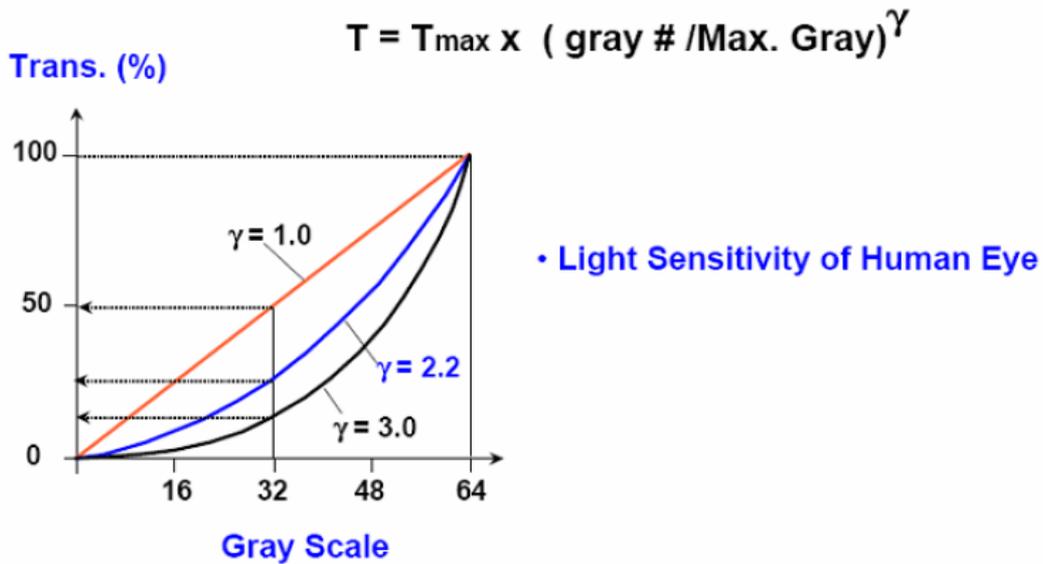


그림: 등 간격 계조 전압 (a)과 등 간격 투과율 (b)로 각각 분리한 계조 특성 곡선

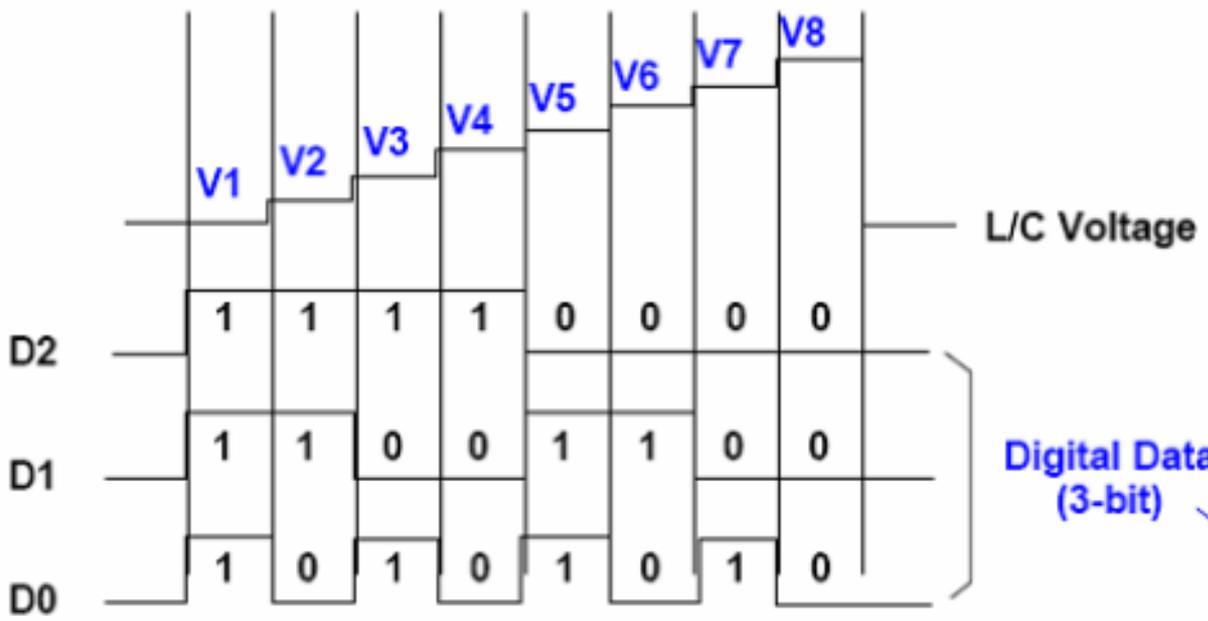
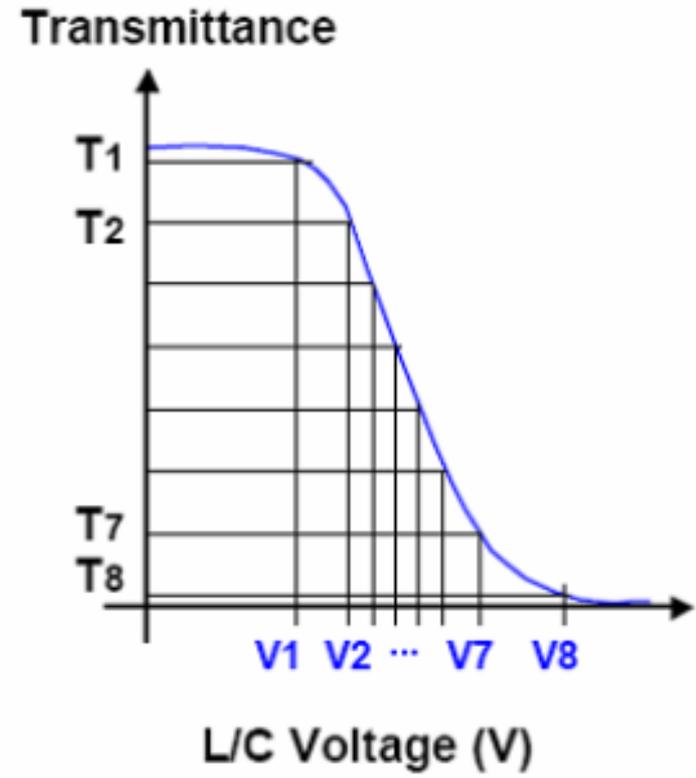
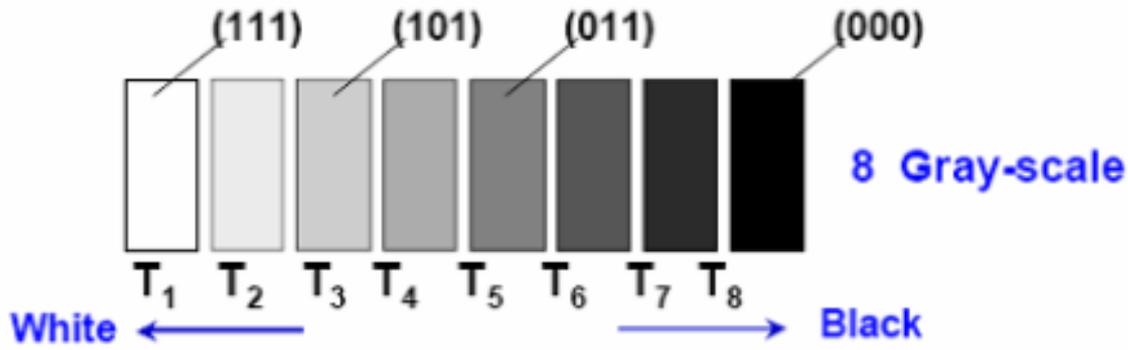
- 앞장의 그림 (a)와 같이 계조 전압을 기준으로 전압을 일정한 간격을 두고 등급을 나눈다면 계조 전압에 대한 투과율 특성은 비선형적으로 된다. 이와 반대로 (b)와 같이 투과율을 기준으로 등급을 나눈다면 gray scale 전압에 대한 투과율 특성은 선형적으로 된다.

- 그러나 사람의 눈은 이러한 선형적인 빛의 밝기 변화를 선형적으로 인식하지 못한다. 예를 들어, 빛이 전혀 없는 방에서 초가 하나 켜지는 것은 매우 예민하게 인식할 수 있지만, 이미 100개의 초가 켜진 상태에서는 하나의 초가 켜질 때는 밝기의 차이를 잘 느끼지 못한다. 이처럼 비선형적으로 밝기 변화를 인식하는 사람의 눈에 맞추어, 낮은 계조에서는 빛의 밝기 변화 폭을 작게, 높은 계조에서는 빛의 변화 폭을 크게 재조정해주는 것을 **감마 조정**이라고 한다.

→ 식에서 지수 γ 값의 결정을 통해 재조정한다. $\gamma=1$ 은 계조와 밝기가 선형적으로 비례하는 관계이고, $\gamma=2.2$ 일 때가 사람의 눈에 가장 적합한 것으로 알려져 있다.



TN 액정의 3-bit 계조 표현 방법



$2^3 = 8$ gray scales

3-bit 디지털 신호로부터 8가지의 전압 레벨 V1~V8 을 생성하고, 각각의 전압 값에 따라 투과되는 빛의 밝기를 나타냄.

액정 cell에서 빛의 투과를 완전 차단하거나 완전통과 다시 말해서 off/on만 할 수 있다고 가정하면 각각의 sub-pixel이 표현 가능한 색의 수는 RGB와 이들의 조합으로 $2 \times 2 \times 2 = 8$ 종류의 색상표현이 가능하다.

각각의 RGB를 3-bit씩 표현한다면 $8 \times 8 \times 8 = 512$ 의 color 조합이 가능하다. 즉, 표현이 가능한 color의 수는 driver ic의 digital 동작의 bit 수에 따라 결정된다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

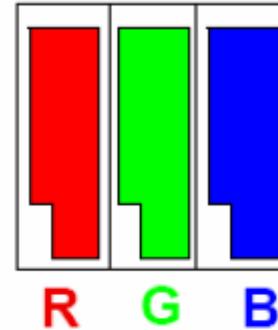
$$N = 2^n (R) \times 2^n (G) \times 2^n (B) = 2^{3n}$$

즉, 6-bit data driver IC를 사용하면 262,144종류(218)의 컬러 표현이 이론적으로 가능하다.

LDI 출력 신호에 따른 LCD에서 표현할 수 있는 색의 수

$$\# \text{ of Color} = 2^n(\text{R}) \times 2^n(\text{G}) \times 2^n(\text{B}) = 2^{3n}$$

n: # of data bits of LDI



3 bit = 8-gray/RGB = 512 colors

4 bit = 16-gray/RGB = 4,096 colors

✓ 6 bit = 64-gray/RGB = 262,144 colors

8 bit = 256-gray/RGB = 16,777,216 colors

$$\begin{aligned} 2^6 &= 64 \\ 2^{18} &= 262,144 \\ 2^{24} &= 16.7\text{M} \end{aligned}$$

Analog IC = Continuous gray-scale = full color

- 그러나 위와 같이 표현 가능한 칼라의 수가 되려면 앞에서 언급한 RGB 각각의 sub-pixel에서 gray scale 구분이 명확해야 한다.

→ 8-bit IC를 사용하여 16.7 M (224) 또는 full color로 표현하기 위해서는 256 단계로 구분이 가능해야 한다.

Active Matrix 구동 원리

- LCD나 OLED 디스플레이는 많은 수의 화소들이 **matrix** 형태로 배열되어 있다.
- Matrix 형태의 화소 배열을 갖는 디스플레이를 구동하는 데 있어 가장 효과적인 방식인 **active matrix** 구동 원리를 학습한다.

Active Matrix 구동 방식

- 화소의 배열이 $m \times n$ matrix 형태로 배열되어 있는 경우, 즉 가로로 m 개, 세로로 n 개가 배열되어 있는 경우 총 화소수는 통상 수십만 혹은 백만 개 이상 (XGA 해상도의 경우, 1024×768)이 된다.
- 1 프레임의 영상을 표시하기 위해 모든 화소와 데이터 드라이버 IC의 출력단을 1대1로 배선으로 연결하여 신호를 전송하려면 드라이버 IC의 출력 개수와 배선의 개수는 구현이 어려운 수준으로 많아지게 된다: **direct 구동 방식**
- 드라이버 IC의 출력 개수와 배선의 개수를 획기적으로 줄임과 동시에 우수한 화질을 구현할 수 있도록 하는 구동 방식: **active matrix 구동 방식**

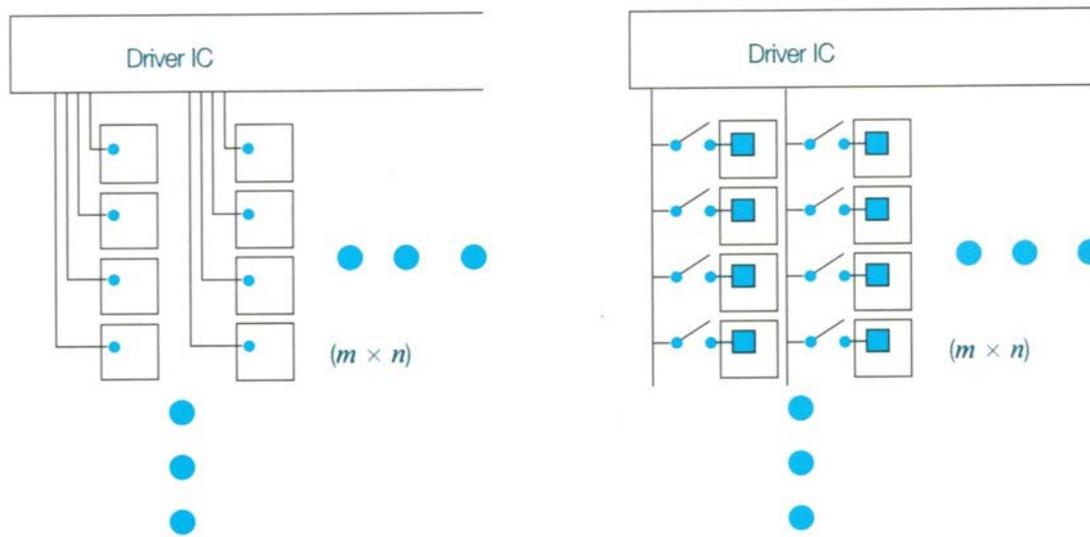


그림 3.1 (a) direct 구동 방식의 개념도, (b) active matrix 구동 방식의 개념도

- Active matrix 구동 방식에서는 1개의 드라이버 IC의 출력으로 부터 다수의 화소에 신호를 전송하게 된다. 그러나 다수의 화소가 필요로 하는 여러가지 신호를 동시에 전송할 수는 없다.

→ 따라서, 배선과 화소 사이에 스위치를 형성하고 이 스위치들이 ON/OFF 동작을 하도록 하되 순서를 정하여 순차적으로 동작하게 한다. 즉, 1개의 데이터 배선에 연결된 여러 스위치 중에서 어떤 순간 ON이 되어 있는 스위치는 오직 1개여야 한다. 이때 ON이 되어 있는 스위치에 연결되어 있는 화소는 데이터 배선에 인가된 신호 (ex. 전압)을 전달 받게 된다.

데이터 드라이버 IC는 여러 화소가 필요로 하는 전압을 출력하되 순차적으로 ON되는 스위치와 동기되어 해당 화소가 필요로 하는 전압을 순차적으로 타이밍에 맞게 출력하는 기능을 해야 한다.

- 한편, 스위치가 **OFF**된 후에도 화소가 발광을 지속하기 위해서는 전달받은 전압을 저장하고 있을 필요가 있는데, 이를 위한 목적으로 화소에 저장소 (**ex**, 커패시터)를 형성해야 한다.
- $m \times n$ matrix 화소 배열에서 **direct** 구동방식에 필요한 배선수가 $m \times n$ 이지만, **active matrix** 구동 방식에서는 데이터 배선을 세로로 형성할 경우 m 개만 필요하게 되어 획기적인 감소가 가능해진다.
- 그러나, 데이터 드라이버 IC의 출력과 동기되어 스위치가 **ON/OFF** 동작을 하도록 하기 위해서는 스위치를 제어하기 위한 **ON/OFF** 신호를 출력하는 드라이버 IC와 이 신호를 전달하기 위한 배선을 필요로 하게 된다. 이 배선은 데이터 배선과 교차하는 방향으로, 즉 가로로 형성하여 각각의 배선에 연결된 여러 개의 스위치를 동시에 제어하게 된다. 따라서 **active matrix** 구동을 위해 필요로 하는 배선의 수는 데이터 배선 m 개와 스위치 제어 배선의 개수 n 개의 합이 된다.

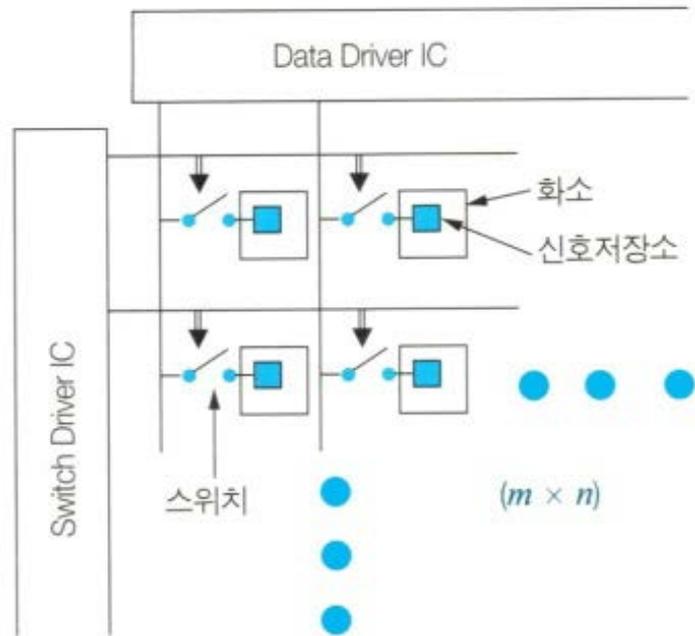


그림 3.2 Active matrix 구동 방식의 개념도 및 구성 요소

- 위 그림은 **active matrix** 구동을 하기 위해 필요한 스위치 제어 배선과 데이터 배선의 배치 및 기본 구성 요소들을 개략적으로 표현하고 있는 그림이다.
- **Active matrix** 구동 방식의 대표적인 특징은 데이터 배선과 화소 사이에 스위치를 필요로 한다는 점과 전달받은 신호, 즉 전압을 저장하기 위한 신호 저장소를 필요로 한다는 점이다.

Active Matrix LCD 구동 원리

LCD의 화소 동작 원리

- LCD는 개별 화소의 투과도를 제어하여 영상을 표시하는 장치이다.
- LCD 화소의 투과도는 간단히 말해 화소에 포함된 액정 분자의 배열 상태에 따라 달라지게 되며, 액정 분자의 배열은 액정에 인가되는 전기장의 크기에 따라 달라지게 된다.
- LCD의 화소 구조는 아래 그림(a)와 같이 액정층의 양쪽에 투명한 전극이 형성되어 있으며, 이 중 1개의 전극은 기준전압이 인가되며 이를 **공통 전극**이라고 부른다. 공통 전극의 의미는 이 전극이 화소마다 분리되어 있지 않아서 모든 화소가 공유하는 전극이라는 의미이며, 따라서 모든 화소가 동일한 기준 전압을 갖게 된다는 의미이다.
- 이 공통 전극과 마주보도록 형성된 또 하나의 전극을 **화소 전극**이라고 부르며, 이 화소 전극에 인가된 전압과 공통 전극의 기준 전압과의 차이가 액정층에 인가되는 전기장의 크기를 결정한다.

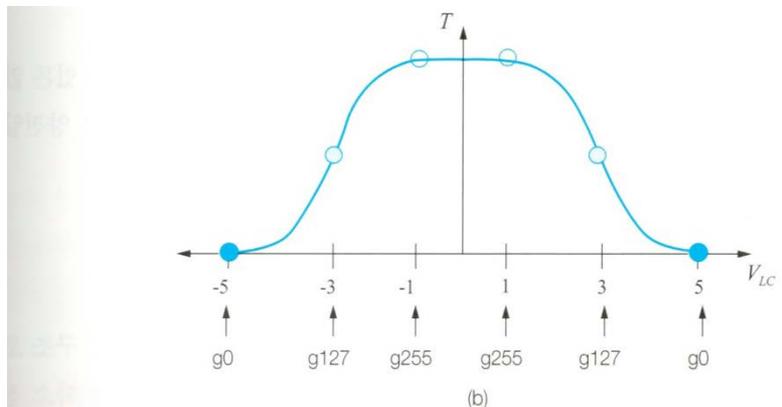
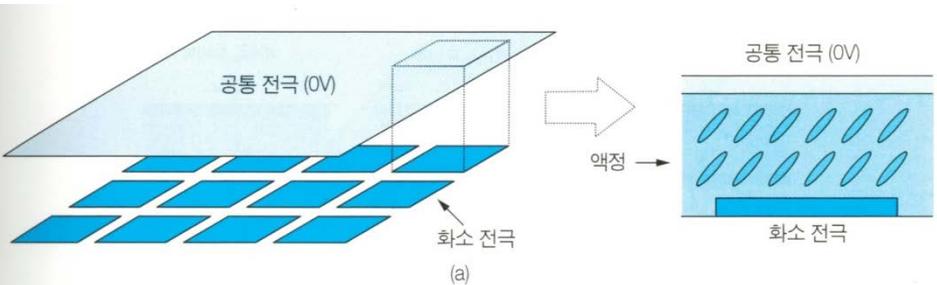


그림 3.3 (a) LCD의 화소 구조, (b) LCD의 voltage-transmittance curve 및 게조 전압

- 앞장의 그림 (b)는 공통 전극의 기준 전압이 0 V라고 가정했을 때, 화소 전극에 인가된 전압과 화소의 투과도 관계를 나타내는 그래프이다. (voltage-transmittance curve, V-T curve)
- 일반적으로 사람의 시각은 가장 어두운 단계로 부터 가장 밝은 단계 사이를 128 단계 이상으로 표현하면 인접 단계 간의 밝기의 차이를 인식하기 어려워진다고 알려져 있으므로, 통상 256 단계로 계조를 구현하면 디스플레이에서는 충분하다.
- 그림 (b)에서는 256 계조 표현에서 각각의 계조 표현을 위해 화소 전극에 필요한 전압이 표시되어 있다. 그래프 상에서 모든 계조 전압을 표시하지는 않았고, 대표적인 계조의 계조 전압만 선별해서 표시하였다. 바로 이 전압이 데이터 배선을 통해 화소로 전달되어야 하는 신호이다. 따라서, 어느 순간 데이터 드라이버 IC의 출력 전압은 이 256가지 단계의 전압 중 한가지 값이어야 한다.

- LCD 화소의 V-T curve 특징은 앞서의 그림 (b)에서 보듯이 좌우 대칭이라는 점이다.

→ 데이터 드라이버 IC의 출력 전압은 256가지 양전압을 출력하도록 하거나 256가지 음전압을 출력하도록 하면 될 것으로 생각될 수 있으나, 실제로는 256가지의 양전압과 음전압을 모두 출력할 수 있어야 한다. 그 이유는 다음과 같다.

액정에는 전하를 띄는 이온성 불순물이 소량 포함될 수 밖에 없는데, 이온성 불순물이 초기에는 액정층 내에 균일하게 산포하고 있어서 액정층의 배열에 영향을 주지 않는다. 그러나 한 가지 극성의 전압 만으로 액정층의 배열을 제어할 경우, 이온성 불순물이 전기장의 방향을 따라 천천히 이동을 하게 되어 이러한 환경이 장시간 지속되면 한쪽의 전극 계면에 축적되면 이온의 양이 증가하면서 액정층의 배열에 영향을 주게 된다. 따라서, 인가된 계조 전압에 해당하는 밝기 표현이 제대로 되지 않게 되는 문제가 발생한다.

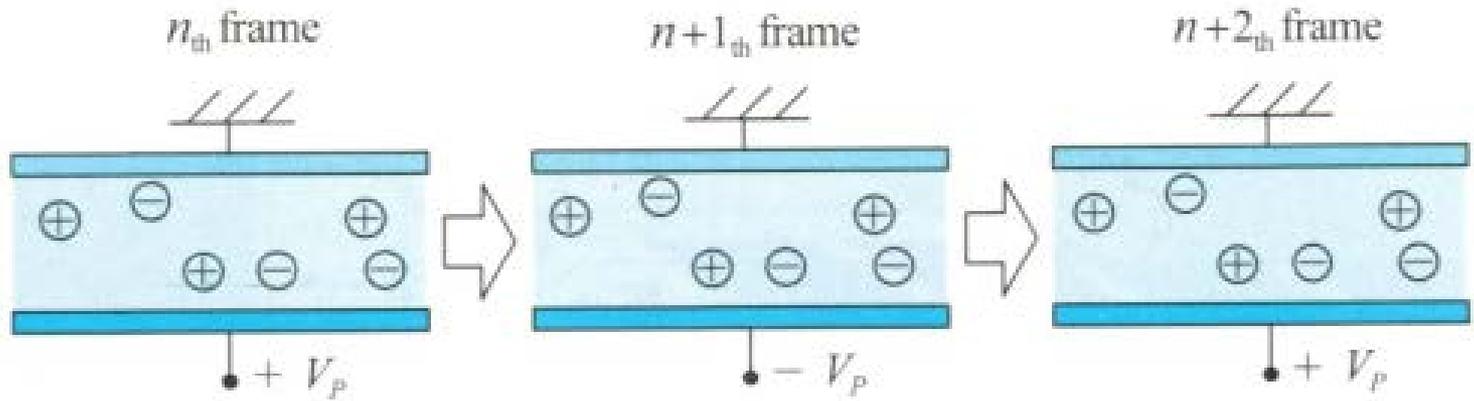


그림 3.4 이온성 불순물의 효과를 억제하기 위한 반전 구동 방식

- 이러한 문제를 극복하는 방법은 위 그림과 같이 프레임마다 화소 전극에 인가되는 전압의 극성을 교대로 바꾸어 주는 방법이며, 이를 **반전 구동 방식**이라고 한다.
- 따라서, 화소의 밝기가 인접 프레임 간에 변화가 있든 없든 화소 전압의 극성은 프레임마다 바뀌어야 하고, 따라서 데이터 드라이버 IC는 양전압 및 음전압을 모두 출력할 수 있도록 제작되어야 한다.

AM-LCD에서의 화소 구조

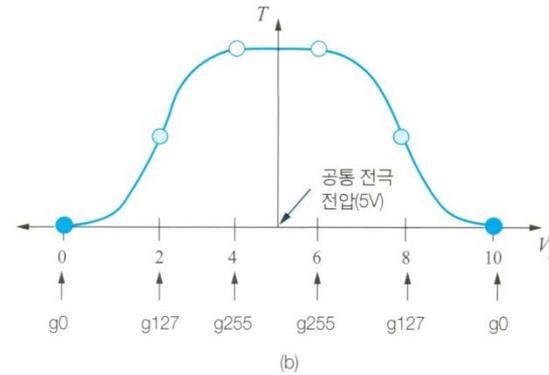
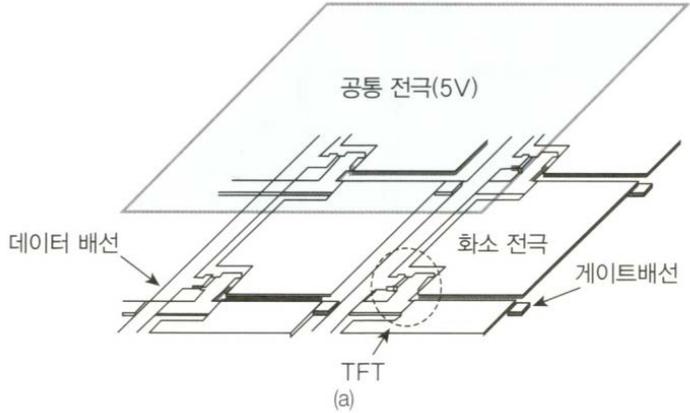


그림 3.5 (a) AM-LCD의 화소 구조, (b) 공통 전극 전압이 5V인 경우의 voltage-transmittance curve 및 계조 전압

- 위 그림 (a)는 active matrix 방식으로 구동되는 LCD (AM-LCD)에서의 화소 구조 모식도이다.
- 액정에 인가될 전기장의 크기를 제어하기 위해 공통 전극과 화소 전극이 필요하고, 액정은 두 전극 사이에 채워지게 된다. 액정과 접하는 두 전극의 표면에는 배향막이 형성되어 있어야 하지만 표시는 생략하였다. 또한 컬러를 구현하기 위해 필요한 컬러필터가 공통 전극 하부에 형성되어야 하고, 편광필름이 두 장의 유리기판 바깥쪽에 부착되어야 하지만 표시는 생략하였다.
- 현재 구조에서 중요한 점은 세로로 형성된 데이터 배선과 화소 전극 사이에 스위치 기능을 하는 박막 트랜지스터 (TFT)가 형성되어 있으며, TFT의 ON/OFF를 제어하기 위한 배선인 게이트 배선이 형성되어 있다는 점이다.

- TFT는 3단자 소자로서 드레인 단자와 소오스 단자 사이가 도통 상태 (on) 또는 절연 상태 (off)로 바뀌게 되며, 각 상태를 결정하는 것은 게이트 단자에 인가된 전압의 크기이다.
- 또한 공통 전극과 화소 전극은 스스로 캐패시터를 형성하고 있음을 알 수 있다. 왜냐하면 두 전극 사이에 채워진 액정이 절연물질로서 유전층 역할을 하기 때문이다.
- 앞의 그림 (a)에서 공통 전극에 5 V의 전압이 인가된 것으로 표시되고 있다. 이는 반전 구동을 위해 데이터 드라이버 IC에서 양전압과 음전압을 모두 출력하게 하는 것보다 양전압만 출력하도록 하는 것이 데이터 드라이버 IC의 안정적인 동작을 보장할 수 있기 때문이다.
공통전극 전압이 0 V에서 5 V로 상승함에 따라 모든 계조 전압도 5 V 상승되어야 하며 이는 그림 (b)에 나타나 있다.

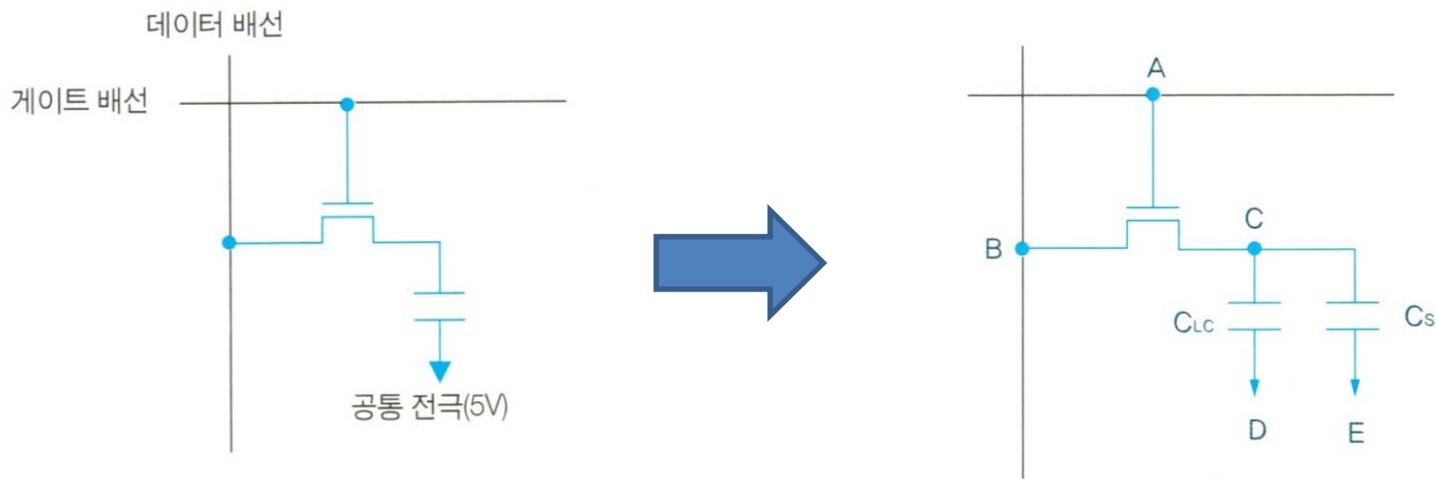


그림 3.6 AM-LCD 화소의 등가 회로

- 앞서의 그림 (a)에 나타나 있는 AM-LCD의 화소 구조를 회로기호 표시하면 위 그림과 같다.
- TFT는 통상 MOSFET의 회로기호로 표시함을 알 수 있다.
- 커패시터의 두 단자 중 기준 전압이 인가되고 있는 단자는 공통 전극에 해당하고, TFT와 직접 연결되고 있는 단자는 화소 전극에 해당한다.
- 위 그림에서 화소의 커패시터 용량을 C_{LC} 와 C_s 의 합으로 표현하였는데, C_{LC} 는 앞서 설명한 공통 전극과 화소 전극 사이에 자체적으로 형성되는 용량인데 이 용량이 통상 부족하기 때문에 이와 병렬연결이 되는 추가적인 커패시터를 화소에 형성시켜 주는 데, 이를 storage 커패시터 (C_s)라 한다.

- 보통 게이트 배선에 인가된 전압이 데이터 배선에 인가된 전압이나 화소 전극 전압보다 10 V 이상 높은 전압을 인가하여 TFT를 turn on 시킨다 (비정질 실리콘 TFT의 경우). 따라서 데이터 배선의 최고 전압이 10 V 이므로 TFT를 turn-on 시키기 위해 20 V 정도의 전압을 게이트 배선에 인가한다.
- 또한 게이트 배선에 인가된 전압이 데이터 배선에 인가된 전압이나 화소 전극 전압보다 5 V 이상 낮은 전압을 인가하여 TFT를 turn-off시킨다. 따라서 데이터 배선의 최저 전압이 0 V이므로 TFT를 turn-off 시키기 위해 -5 V 정도의 전압을 게이트 배선에 인가한다.