

# 액정디스플레이 기술의 발전전망

기술해설

## An Outlook of Liquid Crystal Display Technology

장진

(Jin Jang)

**Key Words(중요 용어)** : Liquid Crystal Display(액정디스플레이), Thin Film Transistor(박막트랜지스터), Array(어레이), Projector(프로젝터), Active matrix(능동 행렬)

### 1. 서론

LCD의 시장규모는 92년도 일본에서 생산액 3256억엔 (일본 통산성 자료)에 도달하였고, 94년까지 매년 30% 정도의 성장을 나타냈으나, 95년도에는 0%의 성장을 기록하였다. 하지만 96년부터는 다시 30%정도의 성장을 할 것으로 예측하고 있다.

액정디스플레이가 본격적으로 전자기기에 채용되기 시작한 것은 최근의 일이고 지금까지 25년 정도의 역사에 지나지 않는다. 이 사이에 액정디스플레이 기술도 TN-LCD에서 STN-LCD, MIM (Metal Insulator Metal)-LCD, TFT (Thin Film Transistor)-LCD로 발전하였고, 더불어 액정디스플레이의 표시성능도 현저하게 향상되었으며 박형, 경량, 저소비전력이라는 특징으로 CRT에서는 어려운 새로운 분야에서의 수요를 창출해 왔다. LCD는 그 응용상품에의 발전과정에서 크게 4세대로 분류할 수 있다.

제 1세대는 TN 모드 LCD이며 전자계산기, 시계 등의 표시소자로서 사용되었다. 제 2세대는 1986년에 개발된 고 콘트라스트 대형 단순 매트릭스 STN-LCD이고 본격적으로 PC 워드프로세서의 디스플레이로 이용되었다. 제 3세대는 1985년에 개발되어 그동안 꾸준히 성장해 온 TFT-LCD이며 10"급의 TFT-LCD가 양산되기 시작한 1991년 이후는 새로운 비약을 향한 제 3세대 칼라화가 시작되었다고 말할 수 있다. 현재까지 LCD의 주요한 응용제품은 노트북 PC이며 1995년에 개발된 in-plane switching 기술이 LCD의 모니터 응용에 새로운 이정표를 마련하였다. 따라서 13인치 이상의 모니터용 광시야각 TFT-LCD는 제 4세대 액정디스플레이로 분류할 수 있다.

단순 매트릭스 액정은 여러 분야에서 시장을 확대해 왔지만 일본 메이커의 생산능력 증가와 동남아시아 업체의 신규 참여에 따라 수급 균형이 무너져 가격에 영향을 미치고 있다. 또한 액티브 매트릭스 LCD의 확대와 함께 OA 분야에서는 단순 매트릭스와 액티브 매트릭스가 서로 경쟁하였으나 96년도부터 단순 매트릭스 LCD는 소형이고 단순한 문자표시용으로 이용되고, OA 및 AV는 액티브 매트릭스 LCD쪽으로 치중하고 있다.

액정디스플레이 산업은 생산기술에 있어서는 일본이 선도해 왔다. 국제적으로도 더욱 발전된 산업으로 성장시키기 위해서는 일본, 미국, 한국 등이 넓은 시야를 가지고 국제문제, 환경문제, 표준화문제 등에 대해서 신중히 대처해 가지 않으면 안된다.

액티브 매트릭스 LCD는 각 화소에 스윗칭 소자를 붙여 각 화소의 명암을 조절하고 전체 화면을 구성한다. 액티브 매트릭스 LCD는 스윗칭 소자의 종류에 따라서 다음과 같이 분류한다.

능동행렬액정디스플레이 (AM-LCD)

2단소자 액정디스플레이

MIM-LCD

Amorphous Silicon Diode LCD

3단소자 액정디스플레이

박막트랜지스터 액정디스플레이 (TFT-LCD)

a-Si

Poly-Si

CdSe

c-Si

MOSFET-LCD

액티브 매트릭스 LCD 제작에 사용되는 TFT는 대부분 비정질 실리콘 TFT이고, 비정질 실리콘 TFT-LCD는 액정 TV에서 노트북 PC, 워크스테이션에 이르기까지 다양도로 이용된다. 반면에 poly-Si TFT-LCD는 크기가 작은 LCD, 예를 들면 주로 투사형 LCD에 이용된다. Poly-Si TFT-LCD의 장점은 주변회로를 화소의 스윗칭 소자와

동시에 유리 기판위에 제작이 가능하다는 것이다.

1986년에 처음으로 3인치 액정TV의 생산에 사용된 비정질 실리콘 TFT-LCD는 1990년까지 3~5인치급 소형 TV에 주로 응용되었으며, 91년부터 8.4" 부터 10.4" 급의 생산이 진행되었고 95년부터는 11.3", 12.1", 13.3" 등의 다양한 크기의 제품이 양산되고 있다. 또한 최근에는 모니터용으로 15.1", 17" 급의 생산도 진행되고 있다.

액티브 매트릭스 LCD는 박형, 경량, 저소비전력 특징 때문에 여러가지 용도에 응용이 진행됨과 동시에 CRT 디스플레이 시장의 단순한 교체뿐만 아니라 전혀 새로운 개념의 상품개발을 가능하게 하고 수요를 창조하고 있다. 액티브 매트릭스 LCD의 생산기술을 발전시키기 위해서는 패널, 장비 및 부품·소재 업체의 삼위일체가 된 협조가 필요하다. TFT-LCD의 시장을 계속 성장시키기 위해서는 가격감소, 설비투자, 성능개선, 무역마찰 해소, 주변 산업과의 협조 등의 과제를 해결해야 된다.

LCD시장은 94년까지 년 30%의 성장을 보였고 95년에는 0%, 96년에는 다시 30%의 성장이 예측되고 있다. 일본 노무라연구소의 자료에 의하면 2005년도의 TFT-LCD시장은 2700억엔이고 STN-LCD는 3,000억엔이다. 2005년의 TFT-LCD 시장은 AV용이 11,000억엔, OA용이 10,500억엔이며 통신용이 3,500억엔, 기타 계측 및 의료분야가 2,000억엔으로 예상하고 있다.

LCD는 다른 전자부품에 비하여 재료 및 부품비의 비율이 높으며 2,000년의 재료 및 부품 시장은 7,200억엔으로 예상된다(노무라연구소자료). 부품 및 재료별 시장은 드라이버 IC 2,500억엔, 컬러필터 2,000억엔, ITO막 1,000억엔, 유리판 500억엔, 백라이트 400억엔, 편광필름 350억엔, 액정 200억엔 등이다. TFT-LCD용 부품 및 재료 중에서 컬러필터, 드라이버 IC, ITO막, 유리막 등의 국산화가 2000년까지 이루어질 것으로 기대된다.

미국의 Stanford Research에서 예상한 미국의 디스플레이 및 LCD 시장이 표1-1부터 표1-3에 나타나 있다.

## 2. LCD의 기능·성능 향상

### 2-1. CRT와 TFT-LCD의 기능, 성능 비교

LCD가 CRT와의 비교로 본질적으로 우위인 것은 박형, 경량, 저소비전력이다. 그러나 응답속도, 화면크기, 시야각, 가격 등에서는 LCD가 아직 CRT에 열세이다. [표 2-1 참조]

(표 1-1) 미국 디스플레이 시장동향(판매고)

(Table 1-1) Display market in United States.

단위 : 백만US\$

	1995년	1998년	2000년
CRT	3,423	4,026	4,339
LCD	1,642	2,424	2,704
LED	134	179	218
VFD	111	129	145
PDP	82	115	154
EL	43	74	107
합계	5,435	6,947	7,667

(표 1-2) 미국 액정시장동향(판매고)

(Table 1-2) Liquid crystal display market in United States.

단위 : 백만US\$

	1995년	1998년	2000년
컴퓨터	1,049	1,734	1,984
사무용기기	250	279	264
생산기기	150	169	179
통신기기	86	121	145
운수관계	75	80	84
민생용기기	32	40	47
합계	1,642	2,423	2,703

(표 1-3) 미국의 칼라 TFT 액정시장 동향(해상도별)

(Table 1-3) Color TFT-LCD market in United States.

단위 : 천대

	1995년	1998년	2000년
VGA	1,000	500	0
SVGA	510	3,500	5,900
XGA	10	1,180	2,030
합계	1,520	5,180	7,930

### 2-2. TFT-LCD의 기능·성능 향상을 위한 과제

LCD의 디스플레이 성능을 CRT와 동일하게 하고, 또한 박형 및 경량화를 달성하기 위한 과제는 표 2-2 및 표 2-3으로 요약될 수 있다.

(표 2-1) CRT와 TFT-LCD의 기능·성능 비교

(Table 2-1) Comparison of performance between CRT and TFT-LCD.

	CRT (14인치 기준)	TFT-LCD (10인치급 기준)	CRT 대비
표시 모드	발광	수광	
동작 전압	22~25 KV	<15 V	우
응답 속도	수 ms	~50 ms	열
발광 색	Full color	Full color	
표시 품위	◎	○	
시야각	◎	△~○	열
소비 전력	△	◎	우
수명 (hr)	10 <sup>4</sup> 이상	10 <sup>4</sup> 이상	
주 용 도	AV OA	OA AV	
중량(모니터기준)	20 (액정비)	1	우
가 격	◎	△	열
표시 용량	人	人	

◎ : 매우 우수, ○ : 우수, △ : 보통, × : 나쁨

(표 2-2) 디스플레이 성능 향상 과제

(Table 2-2) Performance improvement targets in LCD display.

항 목	과 제 및 대 응 책
대형화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AV용은 화면크기 (직시) 40" HDTV용</li> <li>• OA용은 20" EWS용</li> <li>• 20"~40" 형은 직시 및 투사형 양쪽의 개발을 모색함.</li> </ul>
시야각	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CRT와의 성능비교에 따른 최대의 현안</li> <li>• 구동방식, 배향, 보상판 등의 각도에서 개선</li> <li>• 최근에 IPS모드의 개발로 큰 진전이 있음.</li> </ul>
다색화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 완전컬러화가 필요 (1,670만)</li> <li>• 고속, 저소비전력 드라이버, 신호처리 방식의 도입에 의해 1670만색을 실현</li> <li>• 드라이버 IC의 자가격화가 최대의 현안임.</li> </ul>
고밀도화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EWS 및 HDTV용은 이미 제품화 완료</li> <li>• 차기 목표는 고개구율의 고밀도 모듈 개발임.</li> </ul>
휘도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CRT의 휘도는 150~300cd/m<sup>2</sup> 이고 TFT-LCD는 종합적인 개선이 필요</li> <li>• 백라이트의 효율 향상, 개구율증가, 편광판 및 칼라 필터의 투과율 개선</li> <li>• TFT의 광누설전류 감소</li> </ul>
응답속도	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HDTV급의 동화면 표시를 위해 저전압에 대한 응답속도 개선요망</li> <li>• 저전압, 고속응답 액정재료 개발</li> <li>• TFT의 이동도 증가</li> </ul>

(표 2-3) 모듈 관련 과제

(Table 2-3) Subjects related with liquid crystal modules.

항 목	과 제 및 대 응 책
저소비전력	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 노트북 PC에서 특히 중요/소비전력의 반이상이 백라이트에서 소비</li> <li>• 개구율 개선과 백라이트 효율 향상</li> <li>• 드라이버 IC 개선/구동방식 개선/부품개선</li> </ul>
박형화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 백라이트의 박형화가 최대 현안, 플라스틱 기관 개발</li> <li>• 균일하며 더 밝은 면발광제 (차세대 유기분산형 FL) 개발</li> <li>• 플라스틱 기관위에 저온 TFT개발</li> </ul>
경량화	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 현재 노트북 PC용 모듈에서는 400g 이하(10" 기준)이지만, 300g 이하가 목표</li> <li>• Glass 두께의 박형화[0.7/0.5mm], 백라이트 경량화</li> <li>• 플라스틱 기관 개발</li> </ul>
신뢰성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 항공탑재용, 차탑재용 등은 넓은 동작 온도 필요</li> <li>• 액정 재료, 모듈구조의 개선</li> <li>• TFT의 신뢰성 개선/TFT이동도 개선(저온동작)</li> <li>• 백라이트 수명에 좌우</li> </ul>
수명	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 백라이트 및 패널의 장수명화 필요</li> </ul>

### 3. TFT-LCD의 가격 및 수급현황

TFT-LCD는 전자부품산업으로 시작되었지만, 현재 수요자의 기대는 노트북용 TFT-LCD 가격이 어디까지 내려갈까와 언제 LCD가 CRT 모니터를 본격적으로 대체할 것인가에 집중되어 있다. 액티브 매트릭스 LCD는 반도체와 같이 장치산업의 전형이다. 모듈 업체 각사는 이러한 저가격에의 요구에 부응해야 하고 장래성을 보아 지난 수년동안 수 천억원씩을 각 사별로 투자하여 양산공장을 본격 가동시켰다. 현재 여러회사가 각각 월생산 10만대 [10" 형 기준] 이상의 생산능력을 갖추기에 이르렀으나 95년 중반부터 공급이 수요를 초과하여 96년 6월 현재 패널 가격이 \$400(10" 기준) 이하로 떨어졌다.

가격이 급속히 하락하여 수요량이 크게 확대되고 있고 각사 공히 점유율 확대를 겨냥한 치열한 경쟁이 계속되고 있다. 모듈업체측의 문제로서는 대규모투자, 대량생산 라인 때문에 사업의 위험성이 크다는 것이다. 또한, 사업규모, 수요규모에 따른 적절한 설비투자가 어렵고, 설비투자 의지 결정

에서 가동까지 1년 정도를 필요로 하기 때문에 환경변화에 적절히 대응하기 어렵다.

모듈의 수요자측에서 본 TFT-LCD의 가격기대도는 아래와 같다.

(표 3-1) 패널 수요자의 '92년도를 100으로한 기대 가격 지수

(Table 3-1) Expected price of TFT-LCD panel with respect to 1992 value(100).

1992년도	1995년도	2000년도
100	40	20

(표 3-2) TFT-LCD의 가격분석

(Table 3-2) Cost-breakdown of TFT-LCD)

TFT Plate (One Plate)	\$
<b>Fixed Cost</b>	
Depreciation	90
Other Expenses	50
<b>Variable Cost</b>	
Labor	30
Materials	30
Indirect Materials	40
<hr/>	
SubTotal	240
Yield	90%
Cost/Plate	267
<b>Cell Assembly</b>	
Materials	230
(Colorfilter Plate)	(200)
Process Cost	50
<hr/>	
Cost/Plate	547
Yield	85%
Cost/Panel	160
<b>Module Assembly</b>	
LCD Cell	160
Driver TCP's	60
Backlight Unit	40
Others	80
Packaging Cost	30
<hr/>	
SubTotal	370
Yield	95%
Module Cost	410
Indirect & Overhead	90
Breakeven Price	500

TFT-LCD의 저가격화를 달성하기 위해서는 설비업체, 부품·재료업체와의 협조로 기술 break-through를 달성해야만 한다. 더욱이 2000년도의 기대가격에 가깝게 가기 위해서는 이러한 생산성 향상외에 새로운 생산공정의 확립에 의한 break-through가 필요하다. 물론 수율향상, 부품저가격화 등 설비메이커, 부품메이커와의 협조가 필요하다. 결국, CRT의 두배정도의 가격이면 CRT를 대체하는 평판디스플레이로 성장할 것이다.

모듈업체는 그러한 목표가격을 고려하고, 주변산업 (설비, 부품)과의 협조를 포함하여 표3-3의 목표를 향해 노력할 필요가 있다.

(표 3-3) TFT-LCD의 저가격화를 향한 요소별·공정별 목표

(Table 3-3) Targets of parts and processes for low cost TFT-LCD.

	TFT array 공정	액 정 공 정	조립설장공정
수 율 향 상	90~100%	90~100%	100%
생산성 (단위시간당 처리량) 향상	단위시간당 처리량 3배이상 (PECVD가 과제)		
부 품	부품비 1/2 (Glass 기판, 칼라필터, 드라이버 IC, 백라이트 등)		
설 비 투 자	수요 공급 예측 필요		

액정디스플레이산업은 장비, 재료 및 부품산업의 발전이 없이는 크게 성장할 수 없다. 제조장치 및 부품표준화가 요구되고 있다. 최근에 사프를 비롯한 12개의 일본 LCD업체가 유리기판의 표준 크기를 550×650mm<sup>2</sup>로 정한 것은 표준화를 달성하기 위한 첫 시도로 평가된다. 기본적인 장비가 반도체용과 유사하지만 기판크기가 실리콘에 비해 크고 처리속도가 전반적으로 낮은 특성이 있으므로 독자적인 기술개발이 요구된다. 공정간의 라인 균형을 고려하면서 완전자동화 in-line 방식을 사용하며, 가장 bottle-neck이 된 기술이 플라즈마 CVD이다.

TFT-LCD의 제조기술은 박막형성기술과 포토리소래피가 중심이 된다. 따라서 자연히 플라즈마 CVD와 노광장치의 생산성이 매우 중요하다. 플라즈마 CVD는 입자생성을 최소화하기 위한 연구와 장치를 가동상태중에서 박막에 악영향을 미치지 않는 가스로 크리닝을 행하는 (self cleaning) 기술, 장치의 점유면적 감소 등이 중요한 과제가 되고

있다. 노광방식으로는 주로 스테퍼방식이 사용되며 미리 프로젝션 노광방식도 고려되고 있다. 스테퍼 노광방식은 분할노광이고 대형화에도 용이하게 대응할 수 있는 반면 단위시간당 처리량에 어려움이 있다. 현재 니콘에서는  $550 \times 650 \text{mm}^2$  면적까지 처리 가능한 스테퍼가 개발되어 시판중이다. 한편 미리 프로젝션 방식은 단위시간당 처리량이 뛰어나지만 일괄 노광이므로 대형 고정세 마스크의 한계와 주사선금이 생기고 수율에 악영향을 미친다.

하층의 TFT 어레이 기판과 상층의 칼라필터 기판에 각각 배향을 실시하고 붙이고, 절단하고, 액정주입 후 봉인된다. 셀갯의 균일성은 액정패널의 표시성능과 수율에 큰 영향을 준다. 따라서 액정생산의 종합수율에 미치는 영향은 대단히 크고 생산기술과 함께 자동화설비의 개선이 요망되고 있다.

부품·재료에 대해서는 패널원가에 점유하는 비율이 높은 것부터 특히 가격 하락이 기대되고 있다. 부품·재료에는 표준화를 포함하여 경량화, 박형화 등을 중심으로 한 성능향상이 요구되고 있다. 유리기판, 칼라필터, 드라이버 IC, 백라이트 등 주요부품의 성능향상 및 저가격화 기술개발이 필수적이다.

액정디스플레이에 사용되는 기판은 현재 소위 무알카리 유리가 사용되고 있고 코닝 (Corning)사의 1737, 일본전기초자사의 OA-2, Hoya사의 NA45, 아사히초자사의 AN 등이 양산되고 있다. 기판의 두께는 현재 1.1mm~0.7mm가 사용되고 있으나 점차 0.7mm로 표준화되고 있으며 0.5mm 유리 사용이 검토되고 있다. 코닝 제품으로는 1737 유리판을 연마하지 않고 세정만하여 사용한다.

액정재료로서는 초기의 시안계에서 최근에는 특히 TFT용으로서 불소계가 사용되고 있으며 TFT-LCD의 실용화에 영향을 주었다. 불소계는 시안계에 비하여 비저항이 크기 때문에 voltage holding ratio를 증가시킬 수 있다. 현재 TFT-LCD에 사용되는 액정은 저전압 구동, 광온도 영역 등에서 많은 발전을 거듭하였으나 현재에도 구동전압을 더욱 낮추려는 연구가 진행중이다.

액정 디스플레이의 개발에 따라 칼라필터의 제조방법도 염색법, 안료분산법, 전착법, 인쇄법 등이 개발되고 거기에 따라서 각각의 방법에 적합한 칼라필터재료가 개발되었다. 안료분산법이 많이 사용되고 있으며 현재 문제가 되는 점은 고투과도 및 저가격화의 달성이다.

편광판이 액정디스플레이에 사용되지만 고온다습환경에서는 문제점이 있다. 자동차항법시스템용으로 사용되는 경우에는 특히 신뢰성이 중요하기

때문에 이점을 고려하여 재료개발이 행하여 지고 있다. 백라이트는 특성상 가장 중요한 부품이고 또한 소비전력의 대부분이 이 부품으로 소비되고 있으므로 고효율광효율화가 특히 바람직하다.

드라이버 IC는 LCD의 3대 부품중의 하나이며 현재 6비트가 범용되고 있으며 앞으로 8비트로 발전될 것이다. 다색화와 병행하여 고속화, 저전압화, 저소비전력화의 요구가 커지고 있다.

#### 4. Poly-Si TFT-LCD 전망

다결정실리콘 TFT는 비정질 실리콘 TFT에 비하여 이동도가 크기 때문에 주변회로 일체형 LCD 또는 고밀도 LCD 제작에 적합하다. 따라서 드라이버 IC. 값만큼 저가격화를 이룰 수 있기 때문에 차세대 디스플레이로서 큰 기대가 모아지고 있다. 그러나 현재 대부분의 TFT-LCD 양산은 비정질 실리콘 TFT를 이용한다. 그 이유는 첫째로 TFT 제조공정이 복잡하고 높은 공정온도 때문에 제작단가가 높고, 둘째로는 고온공정에 의해 제작된 경우를 제외하고는 누설전류의 불균일성 때문에 양산에 적용하기가 어렵다는 점이다.

다결정 실리콘을 제작하는 방법은  $600^\circ\text{C}$  이상에서 CVD에 의해 기판위에 다결정 실리콘을 증착시키는 LPCVD 방법, 비정질 실리콘 박막을 제작한 후에  $550^\circ\text{C}$  이상의 온도에서 장시간 열처리하여 결정화시키는 고상결정화 방법, 비정질 실리콘막을 100nm정도 증착한 후에 레이저 빛을 조사시켜 순간적으로 실리콘을 녹인 후에 재결정화시키는 레이저 아틸링 방법과 PECVD 방법으로 기판위에 직접 다결정실리콘을 증착시키는 방법 등이 있다. 저온 다결정 실리콘 제조방법은 주로 레이저 아틸링 방법이 연구되고 있으며 PECVD 방법도 기초연구 차원에서 진행되고 있다.

현재 실용화되고 있는 poly-Si TFT-LCD는 액정디스플레이로서 확대 광학계를 통한 표시를 목표로 하는 것이고, 대표적 응용예로는 액정 프로젝터용 라이트 벨트이며, 그 외에도 비디오 무비용 뷰파인더, 헤드마운티드 디스플레이 등이 있다.

이 분야에서 최대의 과제는 밝기이다.  $30 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$  정도의 작은 화소로 어떻게 광이용 효율을 높일지가 매우 중요하다. 직시형에서 문제가 되는 시야각은 이 분야에서는 거의 문제가 되지 않는다. 그러므로 현재의 TN액정으로 충분히 사용할 수 있다. 오히려 전계에 의한 횡방향의 액정배열 불량 등이 화소크기가 소형화되기 때문에 더욱 중요한 문제가 되고 있다. 패널크기는 가격과 화질의 쌍방

에서 결정되고 가능한 작은 패셀에 많은 화소를 집적하여 가격을 낮추는 것이 목표이다.

제조공정으로는 1000°C 이상의 고온 열산화공정을 이용하기 위해 기판으로 비싼 석영을 이용하고 있으며 대형화는 가격적으로 곤란하다. 최근에는 대형화와 저가격화를 겨냥하기 위해서 기판으로 유리를 사용한 저온 (450°C 이하) 공정 poly-Si TFT에 대한 성과가 크게 나타났다. 저온공정에서는 소스 드레인부의 형성에 이온도핑장치를 사용하고 다결정 실리콘은 레이저 어닐링에 의해 얻어진다.

저온공정 poly-Si TFT가 거의 실용화 단계에 도달하면 대형유리기판을 이용하고 또한 주변회로를 모든 기판상에 집적되기 때문에 재료비의 대폭적인 삭감과 공정의 단순화가 가능하다. 저온공정이 안고 있는 과제 해결을 위해 현재 레이저 어닐링에 의한 a-Si의 다결정화와 ion doping법에 의한 소스 드레인 형성의 연구에 큰 진전이 있다. 이 방법은 대면적에서도 단위 시간당 처리량이 높고 또한 전극간 용량이 거의 없어 고속드라이버에 꼭 필요한 CMOS화도 가능하다.

Poly-Si TFT에서 가장 중요한 문제중의 하나가 off 상태 전류가 높다는 것이다. 현재 여러 가지 poly-Si TFT 구조에서 낮은 off 전류를 얻을 수 있지만 아직까지 양산에서 적용할 수 있는 간단한 공정을 갖는 구조를 개발해야 하는 문제점이 남아 있다. Poly-Si의 특징을 가장 잘 살리는 것은 주변드라이버 회로를 집적할 수 있는 것이다. 스위칭소자로는 a-Si TFT가 poly-Si TFT보다 우수하기 때문에 a-Si의 주변부분만을 레이저 어닐링에 의해서 다결정화하여 주변회로를 집적하는 방법도 연구되었다.

(표 4-1) 레이저 어닐링 방법에 의한 드라이버 IC 일체형 TFT-LCD(95년 세이코-엡슨 제작)

(Table 4-1) Integrated TFT-LCD using laser annealed poly-Si TFT('95, Seiko-Epson)

화소수	420×220
Dot Pitch	34μm×45μm
개구율	27%
화면크기	0.7"
콘트라스트	200 : 1
스위칭 소자	Dual Gate

고온공정을 이용한 3.3", 3", 2" 급의 주변회로 일체형 TFT-LCD는 HDTV용으로 개발되었고, VGA용은 1.3"급으로 제작되었다(1995년도). 이들은 모두 투사형이기 때문에 모듈의 크기를 줄이고 개구율을 증가시키기 위한 연구가 계속해서 진행되고 있다. 모듈의 크기가 작을수록 투사형 렌즈 시스템의 가격이 낮아진다. 특히 고온다결정 실리콘 TFT의 게이트 절연막으로 열산화막을 사용할 때 다결정 실리콘에 존재한 경계면 상태밀도가 열산화막 성막시 산화에 의하여 감소된다. 사프에서는 게이트로 다결정실리콘 대신에 Al 게이트를 사용하여 모듈을 제작하였다. LCD는 모두 금속게이트, 특히 비저항이 낮은 Al 또는 Al 합금 금속 게이트를 사용해야 게이트 라인의 지연시간을 줄일 수 있다.

레이저 어닐링에 의해 다결정 실리콘 TFT를 제작하기 위해서는 양질의 절연막 및 대면적 공정이 가능한 이온도핑을 이용해야 된다. 레이저 어닐링의 경우에는 여러번 어닐링, 어닐링시의 기판온도 증가(400°C), 박막 두께조절 등의 기술을 이용하여 이동도가 500 cm<sup>2</sup>/Vs 이상인 TFT가 제조되었다. 균일도 및 p채널 특성도 많이 개선되었고 레이저 다결정 실리콘을 이용하여 18.2"의 모듈이 제작되었다. 그러나, 레이저 어닐링 기술을 양산에 적용시키기 위해서는 균일도 향상 및 게이트 절연막 등에 관한 연구가 필요하다. 세이코-엡슨에서 개발한 0.7" TFT-LCD 모듈의 규격이 표4-1에 나타나 있다.

96년도 SID에 발표된 주변회로 일체형 poly-Si TFT-LCD는 사프 2.2" (1024 × 768), 휴지츄 3.2" (1280 × 1024), 세이코 2.9" (320 × 3 × 200) 이 있다. 화소 크기는 50μm × 50μm 정도이다. 세 회사 모두 레이저 어닐링에 의한 다결정 실리콘, 게이트 절연막으로 SiO<sub>2</sub>, 이온도핑에 의한 소스/드레인 형성 기술을 사용하였다. 이러한 연구결과와 지난 3 ~ 4년 동안의 연구 동향으로 미루어 볼 때에 poly-Si TFT-LCD의 기술 흐름이 유리기판을 사용하고 현재 기판크기가 30cm × 30cm - 30cm × 40cm 비정질 실리콘 line을 다결정실리콘 라인으로 바꾸려는 노력이 계속되고 있다. 기존의 라인을 다결정 실리콘 라인으로 바꾸기 위해서는 레이저 어닐링 장비, 이온도핑 장비 및 게이트 절연막 증착장비가 추가로 요구된다. 이미 많은 연구 개발이 수행되었으나 균일한 레이저 어닐링 기술, 누설전류 감소 기술이 가장 중요한 문제로 남아있다. 또한 비정질 실리콘 TFT-LCD와 경쟁하기 위한 TFT 어레이 제조 공정의 단순화가

매우 중요한 과제이다.

누설전류 감소를 위해서는 off-set 구조를 사용하는데, 생산 공정에 이용될 수 있는 간단하고 offset 길이를 정확히 조절할 수 있는 공정을 개발해야 된다. 게이트 전극으로는 RC delay time이 작은 Al이 바람직하고 게이트 절연막으로는 비정질 실리콘 라인에서 가능한 질화막이 저가격화를 위하여 가장 적합하다.

구동회로를 패널의 가장자리 영역에 집적화시키기 위해서 수율을 높이기 위한 redundancy 구조, 디지털 구동회로, 고속회로 구조 등에 대한 개발연구가 필요하다.

SiF<sub>4</sub>/SiH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub>를 PECVD 방법으로 분해하여 280℃에서 제작한 다결정실리콘 TFT는 이동도가 10cm<sup>2</sup>/Vs 정도로, 고밀도 및 투사형 TFT-LCD에 이용될 수 있다. 특히 증착 다결정실리콘은 제조방법 및 장비가 현재 양산에 적용된 비정질 실리콘 TFT와 동일하기 때문에 좋은 TFT만 개발되면 양산에 쉽게 적용될 수 있다. 특히 이러한 기술을 저이동도 TFT를 이용한 구동회로 기술과 접목시키면 저가격의 투사형 LCD 용 poly-Si panel을 제작할 수 있다.

스윗칭소자로는 비정질 실리콘 TFT를, 주변회로는 다결정실리콘을 CMOS 공정에 의해 제작된 모듈이 미국의 Xerox에 의해 개발되었다. 주변회로는 따로 제작하여 패널에 부착되었다. 비정질 실리콘 TFT는 누설전류가 다결정 실리콘 TFT에 비하여 낮고 양산하기가 쉽다는 장점이 있기 때문에 두가지 기술을 접목시켰다..

현재 TFT-LCD에 사용되고 있는 구동회로용 IC는 TAB에 실장되고서 TFT 기판에 실장되어 실용화되고 있지만 전체 가격의 10% 이상 (10인치 기준)을 차지하기 때문에 주변회로 집적기술이 완성되면 저가격 및 실장 소형화 측면에서 큰 장점이 있다. 특히 레이저 아닐링 기술이 최근에 거의 실용화 단계에 있으며 단채널 a-Si TFT 기술과 함께 미래에 매우 중요한 핵심 기술이 될 것이다.

표4-2에 미국의 SRI에서 예측한 poly-Si TFT-LCD 시장이 나타나 있다. Poly-Si TFT-LCD의 주요 시장은 projection TV와 data projector이다.

### 5. 투사형 TFT-LCD

투사형 LCD에는 전면 투사형(front projection)과 배면 투사형(rear projection)이 있으며 액정패널, 확대렌즈시스템과 dichroic mirror를 이용한 것

(표 4-2) Poly-Si TFT-LCD 시장

(Table 4-2) Market for Poly-Si TFT-LCD.

			1995 년	1996 년	1997 년	1998 년	1999 년	2000 년
View Finder	수량	만대	309	370	438	511	536	563
	금액	억엔	154	148	158	165	156	148
배면 Projec- tion TV	수량	만대	40	123	378	540	815	1,050
	금액	억엔	99	246	662	810	815	840
DATA Projec- tor	수량	만대	24	90	150	240	360	450
	금액	억엔	60	180	263	360	360	360
Head Moun- ted 디스플 레이	수량	만대	10	100	150	225	338	506
	금액	억엔	5	40	54	73	98	133
합계	수량	만대	383	683	1,116	1,516	2,049	2,569
	금액	억엔	318	614	1,137	1,408	1,430	1,481

으로 투사형 TV, data projector 등에 이용된다. 투사형 LCD에서 가장 큰 issue는 저가격화, 고정세화 및 고휘도화이다.

저가격화를 달성하기 위하여 3판식을 단판식으로 바꾸고 더불어 패널의 소형화에 의한 확대 렌즈시스템의 저가격화를 이룰 수 있다. 또한 구동회로의 직접화에 의해 해상도를 높이고 저가격화에 기여한다.

고휘도를 달성하기 위해서는 1) 마이크로 렌즈 사용에 의한 유효개구율 증대, 2) PDLC를 사용한 편광판 제거, 3) 개구율 증대, 4) 샤프에서 개발한 3개의 색분리 미러를 이용한 단패널식 등의 방법이 채용되었다. 개구율 증대는 다결정실리콘 TFT를 사용하여 달성될 수 있고 마이크로렌즈 기술은 가격문제가 있다. PDLC는 안정성에 문제가 있지만 점차 양산에 응용될 것으로 기대된다. 샤프에서 개발한 방법은 고휘도 및 저가격화에 크게 기여할 수 있기 때문에 앞으로 기대되는 기술이다.

고품질, 고정세, 고개구율화를 달성하기 위하여 다결정 실리콘 기술이 비정질 실리콘 기술에 비하여 우수하고 평탄화 및 고개구율화를 위하여 저유전율 물질을 층간 절연막으로 사용하면 버스 라인과 ITO화소를 분리하지 않은 패널을 제작할 수 있다.

비정질 실리콘 TFT, 다결정 실리콘 TFT, 또는 MOSFET와 PDLC를 결합한 PDLCD가 투과형,

반사형 및 투사형 디스플레이 모듈로 개발되고 있다. 다결정 실리콘 TFT를 이용한 1.2인치 PDLCD가 투사형 모듈로 세이코-엡슨에 의해 1995년에 개발되었다. PDLC를 이용할 경우에 편광판이 필요없기 때문에 투과도를 25%까지 증가시켰다. 투사형의 경우에는 패널의 크기가 작기 때문에 a-Si TFT-LCD에 비하여 가격 경쟁력이 있다. 주요 응용 제품은 projection TV(표5-1 참조), data projector(표5-2 참조)이다.

(표 5-1) 프로젝션 TV의 LCD 탑재 추이  
(Table 5-1) Trend of LCD adoption for projection TV.

단위 : 만대

	1994 년	1995 년	1996 년	1997 년	1998 년	1999 년	2000년
WIDE TV 대수	30	155	330	840	900	970	1,000
액정 프로젝터화율	0%	3%	4%	15%	20%	28%	35%
액정 프로젝터의 대수	-	4.7	13.2	126.0	180.0	271.0	350.0
1.3인치형 poly-Si TFT수	-	14.0	39.6	378.0	540.0	814.8	1,050.0
1.3인치형 poly-Si TFT대상금액(억엔)	-	-	99	662	810	815	840

(표 5-2) 데이터 프로젝터의 LCD탑재 (3 panels/projector) 추이

(Table 5-2) Trend of LCD adoption for data-projector(3 panels/projector).

단위 : 만대

	1994 년	1995 년	1996 년	1997 년	1998 년	1999 년	2000 년
데이터 프로젝터	3	8	30	50	80	120	150
1.3인치형 poly-Si TFT수량	9	24	90	150	240	360	450
1.3인치형 poly-Si TFT대상금액(억엔)	-	60	180	263	360	360	360

1.32인치 다결정 실리콘 TFT-LCD를 이용한 head mounted display 및 projection용 PC모니터도 개발되었으나 아직까지 시장성이 크지 않다.

## 6. 반사형 LCD

종래의 PDA 시장을 주도하던 흑백 반사형 패널 이외에 95년 들어 4~16색 수준의 칼라반사형 패널이 출시되고 있다. 이전의 STN 위주의 흑백 반사형 패널에 비하여 소비전력이 30~50mW로 비슷하고 칼라화에 따른 비용 상승도 color filter를 사용하지 않으므로 작다. 향후 97년까지 256색, 2000년에는 26만 컬러 실현이 예상된다. 이와같은 추세에 칼라화를 추진하기 위해서는 다계조화, 색순도 향상 기술, 반사 휘도 향상 기술 등의 개발이 중요하며, 여러 가지 구동법의 개발과 반사판, 위상차판 등 panel 설계기술의 향상도 필요하다.

현재의 투과형에 사용되는 TN 액정모드를 반사형에 채용할 경우 편광판 2매를 사용한 구조이므로 색의 중간 계조 표시에는 유리하지만 어두운 화면이 된다는 단점이 있다. 근래 제안되고 있는 액정 표시 모드는 샤프, 동북대 등에서 사용하는 PCGH (Phase Charge Guest Host) 모드와 NTT, AT&T 등에서 사용하는 PDLC (Polymer Dispersed Liquid Crystal) 모드가 있다. PCGH 모드의 경우는 색소의 이방성 흡수를 이용하여 편광판을 이용하지 않고 색을 구현하여 밝기를 향상하고 저전압 구동 및 고신뢰성이 가능하며 액티브 소자에 주로 적용한다. 그러나 전압 투과율 특성이 강한 hysteresis를 가지고 있어 중간 계조 표시가 어렵다.

PDLC 모드는 고분자와 액정의 혼합물을 열, 광, 용매 등을 이용하여 고분자를 분산시켜 산란 특성을 이용하는 방식으로 중간 계조 표시가 가능하며 다색화에 유리하지만 구동 전압이 높다는 단점이 있다.

그 외에 PSCT (Polymer Stabilized Cholesteric Texture), ECB (Electrically Controlled Birefringence)형 등도 연구되고 있다.

반사형 칼라 LCD의 경우에는 backlight가 없기 때문에 주변광의 이용 효율을 최대한 높여야 하고 이를 위해서는 color filter의 광손실을 줄이고 개구율 향상, 고투과율 편광판 개발, 반사판의 반사 효율 증대 등이 필요하다.

근래에 제안되는 액정 표시 모드들은 편광판을 사용하지 않거나 (N\*-GH-LCD) 1개만 사용하는 (ECB type LCD)방식을 취하여 편광판에 의한 빛의 손실을 줄이고, 칼라화 시동에 있어서도 RGB 3원색의 사용대신에 cyan, red 등의 보색관계 2가지 색만을 사용하여 color filter에 의한 빛의 손실을 감소시키는 연구도 진행되고 있다. [표 6-1 참조]

아울러 PDLC 모드와 PCGH 모드를 결합하여 2

(표 6-1) 반사형 액정 모드에 따른 디스플레이 특성

(Table 6-1) Display characteristics of reflective LCDs.

표시모드	PC(GH)	PDLC	PSCT	ECB	TN
광학적 성질	광흡수	광산란/ 광흡수/ 회절	선택 반사	복굴절	선광
반사 휘도 (백색 표시)	◎	△~○	△	△~○	△
다색화	○	○	○	○	×
저전압화	○	×~△	×~△	◎	◎
고속화	△~○	◎	△~○	○	○
구동법	액티브	액티브	액티브/ 단순 매트릭스	액티브/ 단순 매트릭스	액티브

개의 LC layers를 구성하여 밝은 반사형 LCD 제조에 대한 제안도 나오고 있다. 반사형에 사용되는 반사판에 대해서는 현재까지 제품화된 대부분의 PDA는 패널뒤에 따로 반사판을 부착한 형식으로 밝기가 저하되고 색 구현에도 불리하다. 최근 제안되는 대부분의 방식들은 픽셀 전극으로 ITO 대신 Al 등을 사용하여 픽셀 전극과 반사판의 역할을 함께 하도록 하고 있다. 이와같이 제작되는 반사판은 빛의 이용 효율을 증가시키기 위하여 즉 비스듬히 입사하는 빛도 효율적으로 반사시키기 위하여 표면에 요철을 두어 빛의 반사 효율을 증가시키고 있다. 최근 샤프사에서 제안된 구조는 TFT 형성후 감광성 수지를 도포한 후 photomask를 이용하여 패터닝하여 표면에 요철을 두고, 그 위에 Al 전극을 형성하여 이 Al 전극의 표면에 요철을 만드는 방식이다. 이와같은 반사판의 구조에서는 요철의 pitch와 높이에 의해 결정되는 경사각도가 반사 특성을 결정짓게 된다. 요철의 높이와 pitch가 다르게 하여 반사 특성을 조사한 결과가 많이 제시되고 있고 또한 1 픽셀안에 요철을 불규칙적으로 배열하여 광의 회절과 간섭에 의한 영향을 줄이고 있다. 반사판에 있어서 고려되어야 할 점은 시야각과 반사율에 대한 조정이다. 이상적인 반사판의 경우 어느 일정 시야각까지의 반사율은 일정하게 분포하고 그 시야각 이후는 반사율을 매우 낮게 가져가는 구조이다. 여기서 시야각을 좁게 만들어 밝기를 높이면 그에 따라 반사 효율의 시야각 의존성이 심하게 된다. 이와 같은 문제를 해결하게 위하여 반사판 요철 형성을 EB

(Electron Beam)을 사용하여 형성하고 그 morphology를 최적화하여 일정 시야각까지 밝은 표시 성능을 얻는 시도가 제안되고 있다. 반사형은 그 기술의 발전에도 불구하고 주로 PDA 등의 중소형 디스플레이에 주로 응용될 전망이다.

7. 필름형 LCD

유리기관 대신에 플라스틱 필름을 이용하여 종래의 패널보다 더욱 얇고 가벼운 디스플레이가 가능하게 된다. 또한 곡면 패널도 가능하게 된다. 지금까지 이 필름형 LCD는 소형 TN셀로서 페이지용 등에 일부의 메이커에서 생산되어 왔지만 최근 STN용 필름 LCD와 MIM-LCD의 기술개발이 진행되고 계속 상품화되고 있다. 필름형 TFT-LCD가 실현되면 특히 포터블형 표시말단용으로서 그 응용범위가 크게 확대될 것이다.

가장 이상적인 LCD는 구부릴 수도 있고 얇으며 전력소비가 극히 작은 고화질 디스플레이이다. 1995년 IDRC에서 플라스틱 기관을 이용한 AMLCD가 처음으로 발표되었다. 독일의 Leuder교수팀에서 플라스틱 기관위에 유사다이아몬드를 이용한 MIM-LCD를 제작하여 구부릴 수 있는 LCD의 실용화가 임박했음을 알리고 있다.

8. 고분자 분산형 액정 (PDLC)

편광판을 사용하지 않으므로 종래의 액정패널에 비해 투과율이 대폭 높다는 특징을 갖고 있다. 그 때문에 투사형 광밸브, 광서터용 등으로 새로운 용도의 전개가 기대되고, TFT를 이용한 비정질 실리콘, 다결정실리콘, 단결정실리콘(반사형) 형이 개발되어 상품화를 시도하고 있다 [표 8-1 참조]. 그러나, 고분자 분산형의 단점은 안정성으로 UV에 의해 중합화된 고분자액정 중합체가 시간이 경과함에 따라 해리되어 디스플레이 특성이 나빠진다.

(표 8-1) Data projector에서 PDLC의 채용 추이 예측

(Table 8-1) Trend of PDLC adoption in data projector.

	1995 년	1996 년	1997 년	1998 년	1999 년	2000 년
DATA PROJECTOR SET 동향(만대)	8	13	17	22	29	37
PDLC수요, 3매사용(만매)	0	2	5	10	17	33
금액(억엔)	-	4	9	15	17	27
PDLC의 비율	0%	5%	10%	15%	20%	30%

(표 9-1) 2000년에 주로 상용될 TFT-LCD 규격

(Table 9-1) TFT-LCD specification widely commercialized in the year of 2000.

	OA용 대형 액티브 매트릭스LCD	HDTV용 액티브 매트릭스LCD	자동차 탑재용 액티브 매트릭스LCD
화면사이즈	17" 형	30" 형	6" 형
화 소 수	1280×1024	1920×1035	320×240
화소 피치	0.27mm	0.345-0.36mm	0.375mm
표 시 색	풀컬러	풀컬러	풀컬러
콘트라스트	100:1	100:1	100:1
시 야 각 상하/좌우	100° cone (10:1)	100° cone (10:1)	140° (10:1)
응답 속도	30ms	20ms	20ms
화면 휘도	150cd/cm <sup>2</sup>	200cd/cm <sup>2</sup>	300cd/cm <sup>2</sup>
소비 전력	15W	50W	3W

### 9. 결 론

액정디스플레이는 전자계산기, 시계에 응용되는 TN액정으로부터 출발했지만 그 후 단순 매트릭스액정이 개발된 것에 의해 대형화, 고대비가 실현되고 시장은 크게 확대되어 갔다. 단순 매트릭스액정은 워드프로세서, PC의 램탑화, 노트북화에 빠질 수 없는 키 디스플레이로서 크게 공헌했다. 그 후 액티브 매트릭스 LCD의 양산이 개시되어 칼라화애의 수요와 함께 가격저하와 관련하여 시장의 흐름은 TFT로 기울고 단순매트릭스 액정은 수급균형의 붕괴로 고전하고 있다. 예를 들면 휴대정보 단말기에는 보다 얇고 고분자 분산형 등의 신기술에 따라 각각의 목적에 맞는 사용법을 쓰고 AMLCD와 공존하면서 응용분야가 확대되어 갈 것이다.

앞으로 디스플레이의 주류가 될 AMLCD는 CRT의 자리바꿈을 포함하여 동화상 필수 아이템, 즉 멀티미디어, HDTV 등 고화질이 요구되는 시장을 중심으로 큰 확대가 기대된다. 2000년까지는 대면적 광시야각 기술에 의해 신규시장을 창조해 간다. 2000년 이후에는 CRT와 가격변동이 일치하여 CRT의 대체가 시작되고 AMLCD의 시장확대는 될 것이다 [표 9-1 참조].

TFT-LCD의 응용제품도 모듈의 고품질화에 힘입어 다양화되고 있는 추세이다. 응용제품은 직시형 및 투사형으로 구별되며, 투사형은 주로 20" 이상의 화면을 요구하는 디스플레이에 이용된다. 그동안 주로 응용되었던 노트북 PC는 고품질의 노트

북 PC (26만 컬러 이상), 노트북 WS, 서브노트북 PC 및 멀티미디어용 PC 등으로 응용 범위가 확대되고 있다. 한편, 소형 액정 패널을 이용한 제품의 대명사로 불리우는 액정 TV도 93년에 사프에서 상품화하여 히트한 액정 뷰캡, 액정 패널장착 자동차 항법 시스템, 비디오폰, 비디오카메라, 멀티미디어 액정 TV, 액정 패널 장착 VCR, 항공기용 디스플레이 및 휴대용 CD-ROM 등으로 응용 범위가 확대되고 있다. 그리고 오실로스코우프로 LCD화면을 부착한 휴대용 오실로스코우프로 대치되는 시대가 왔다.

앞으로 액정디스플레이 산업의 발전을 생각하면 지금까지 기술한 과제외에도 각종의 표준화문제, 해외생산과 국제협조 환경문제 등이 피할 수 없는 공통의 과제가 된다. 이들 모든 과제 가운데 표준화 및 해외생산과 국제협조에 대한 과제를 아래에 그 개요를 기술했다. 액정은 일본, 유럽, 미국에서 연구개발이 활발히 행하여지고 있지만 생산기술 확립에 성공한 일본의 생산량, 생산액은 다른 나라와 비교하여 거의 독점적이다.

특히 AMLCD에 대하여 그 대부분이 일본에서 생산되고 있다. 1991년에 미국의 FPD업체 7개사가 일본의 FPD업체를 상대로 불공정 판매행위로 제소한 결과로 TFT-LCD에 대해서 62.67%라는 높은 관세율이 적용되는 결과를 낳았다. 이 제소는 결국 취소되었지만 모듈업체로서는 항상 이러한 가능성을 고려해 둘 필요가 있다.

최근에 TFT-LCD 모듈 가격이 급격히 하락하여 노트북 이외의 분야에 TFT-LCD를 채용하려는 전력이 두드러지게 나타나고 있다. 예를 들면, 일본 샤프사에서는 10인치급 TFT-LCD를 이용한 TV를 시판하고 있다. 현재로는 Desktop PC, TV, 멀티 디스플레이 시스템(현재의 PC 및 WS에 CDT와 LCD모듈을 채용한 시스템) 등에서의 응용이 진행되고 있으며, LCD가 앞으로 얼마나 발전할 수 있는가는 이러한 응용 제품의 개발에 달려 있다. TFT-LCD가 다양한 응용 제품에 이용되기 위해서는 광시야각기술, 저반사 기술, 광온도 영역 액정 및 TFT에 관한 연구개발이 필수적이며 이 방면에 큰 진전이 최근에 이루어졌다. 따라서 이러한 기술의 실용화와 함께 단순 구조 TFT 등에 관한 연구가 수행되어야 한다.

### 장 진



1954년 11월 28일생. 1977년 서울대학교 자연대 물리학과 졸업. 1979년 KAIST 물리학과 졸업(석사). 1982년 KAIST 물리학과 (박사). 1982년~88년 KAIST 대우교수, 위촉연구원. 현재 경희대학교 교수.