

# 목 차

제 1 장. 개요

제 2 장. 산업 동향

제 3 장. R&D 기술 동향

제 4 장. 특허 동향

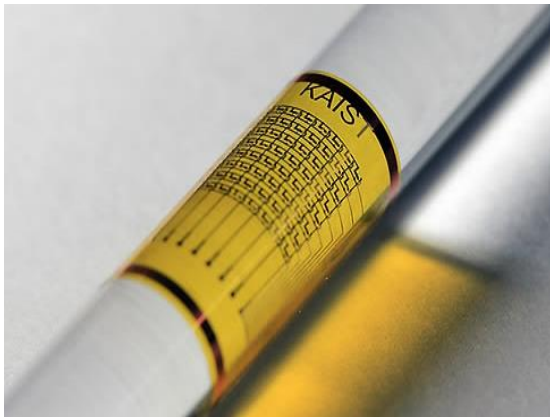
제 5 장. 유연반도체 신뢰성 및 평가 기술

제 6 장. 유연반도체 표준화

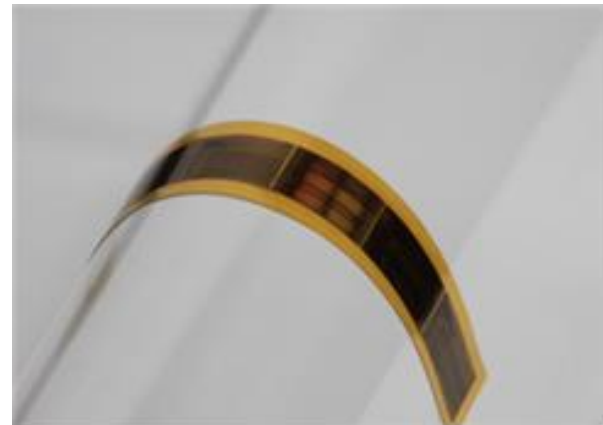
# 유연 반도체/메모리 정의

- 유연반도체는 휴대폰, MP3, 디지털카메라 등에 쓰이는 기존 메모리 소자를 유연화(flexibility)시켜 상용화하는 기술로 자유자재로 접거나 두루마리 형태로 말 수 있는 형태로 만드는 메모리/반도체를 의미함.
- 유연반도체는 향후 플렉서블 스마트폰, 플렉서블 디스플레이, 웨어러블(wearable) PC 등의 핵심 부품으로 사용될 전망임

## 유연반도체 제품



플라스틱 기판 위에 저항메모리(Memristor)와 고성능 실리콘 트랜지스터를 집적시킨 RRAM  
(KAIST 이건재 교수 연구팀, 2011)



유연 반도체/메모리 소자  
(하나마이크론, 2012)



Samsung shows phone with bendable screen



Samsung Galaxy Gear



LG flexible OLED TV

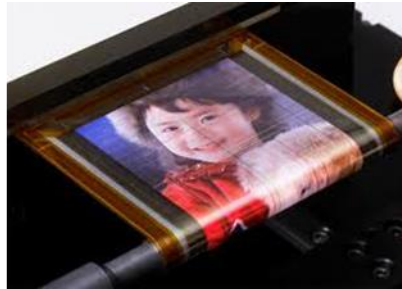


Samsung Flexible OLED TV

# 유연 전자 소자 및 제품의 진화



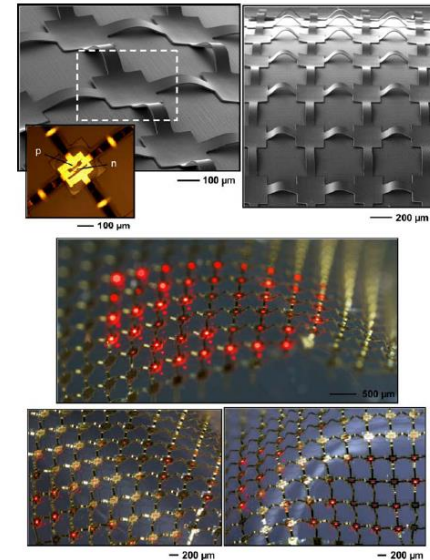
Flexible electronics



Foldable electronics



Rollable electronics



Stretchable electronics

# Flexible smart phone





# Foldable smart phone



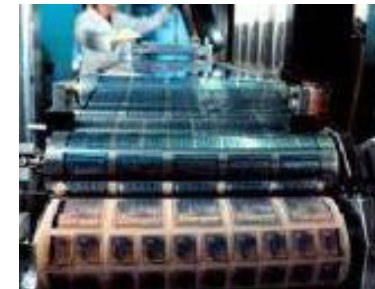
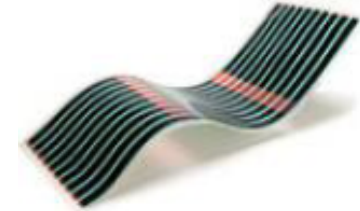
# Flexible device and components

- Passive/Active IC
- Display
- Memory
- Sensor
- Battery
- Interconnection
- Packaging



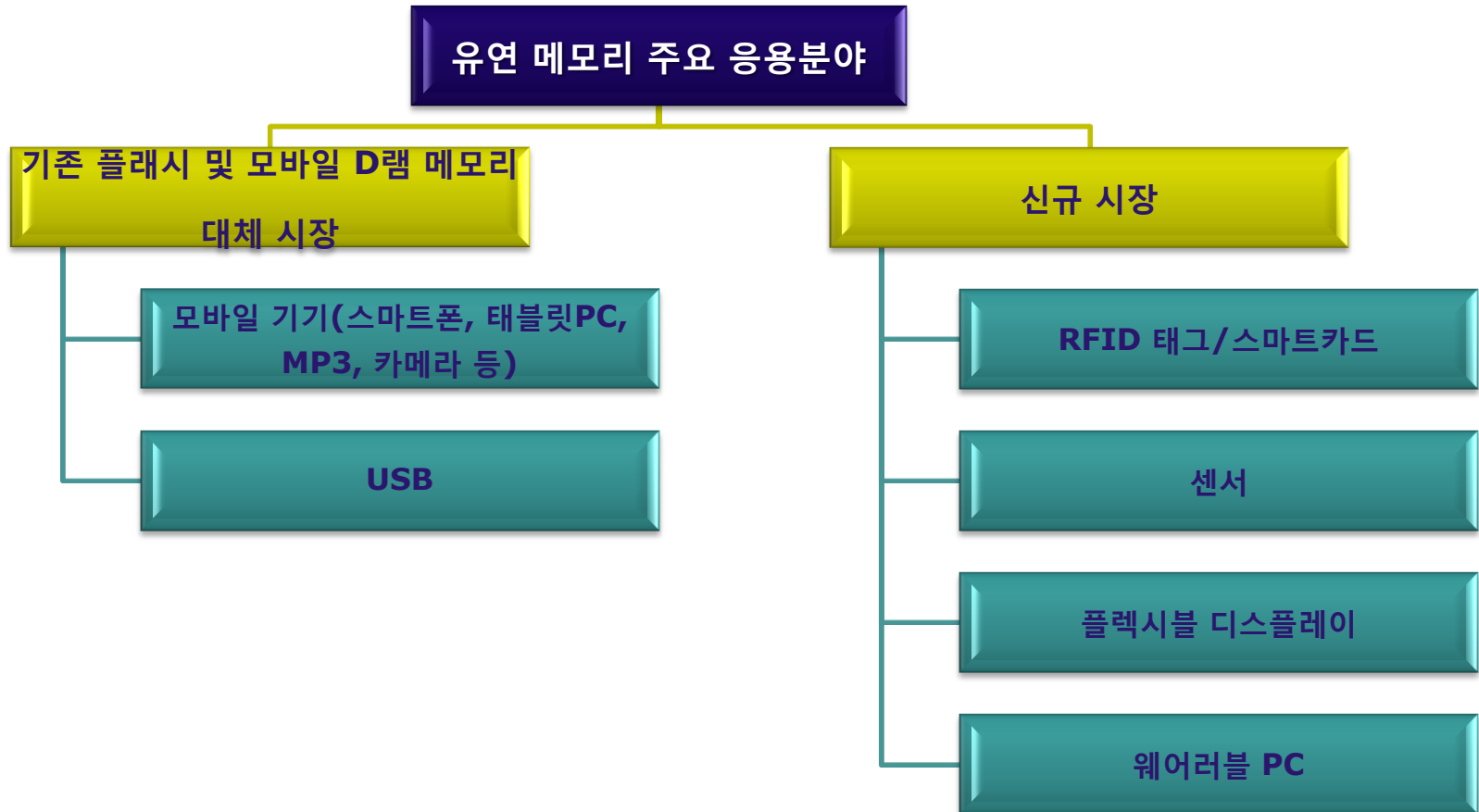
# Why flexible electronics ?

- 초 경량화
- Unbreakable
- 자유로운 디자인
- 공간적 제약 탈피
- 초대형 Display 가능
- 다양한 응용(Wearable, Bio)
- Roll-to-roll 공정 가능
- Low cost
- 새로운 시장 창출

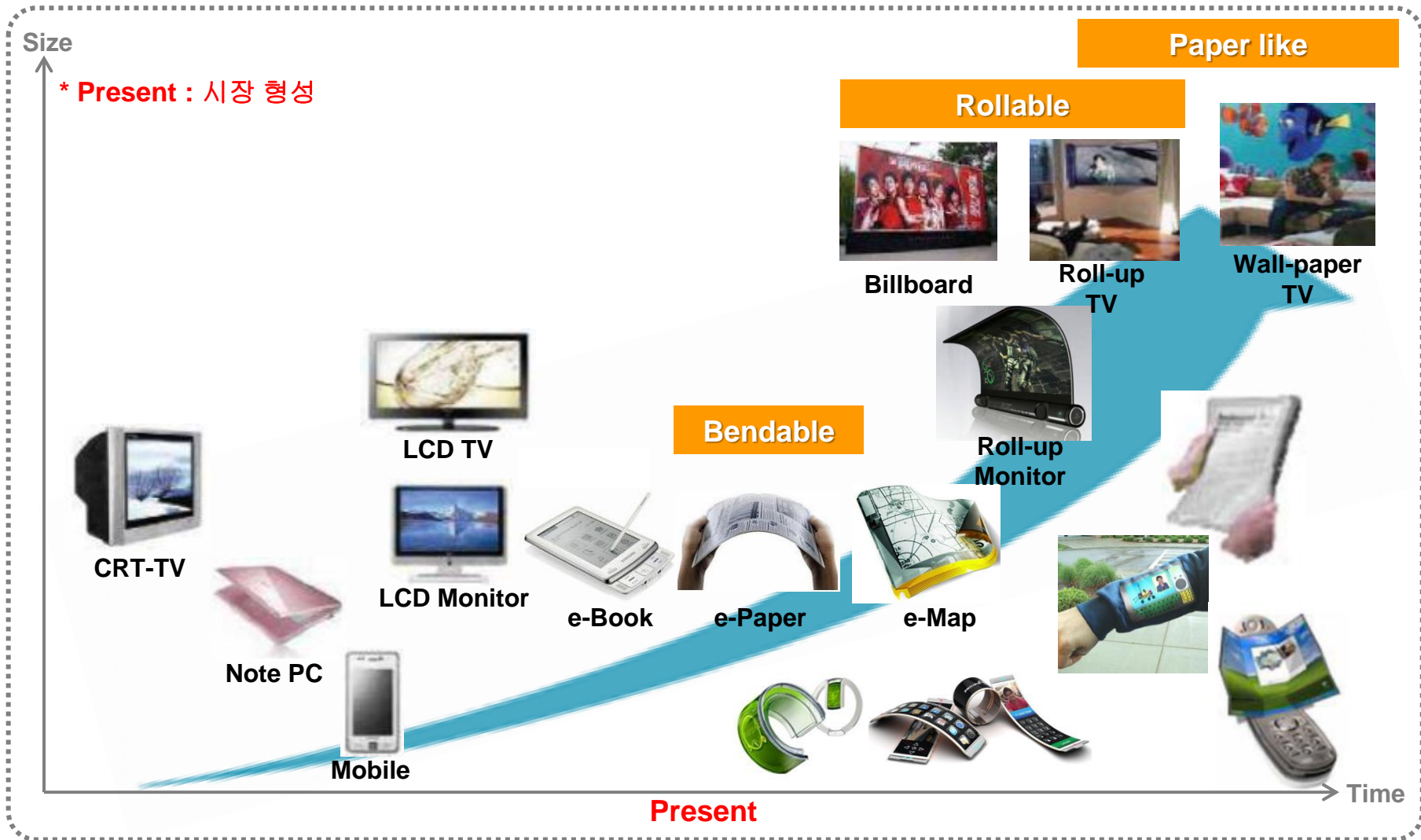




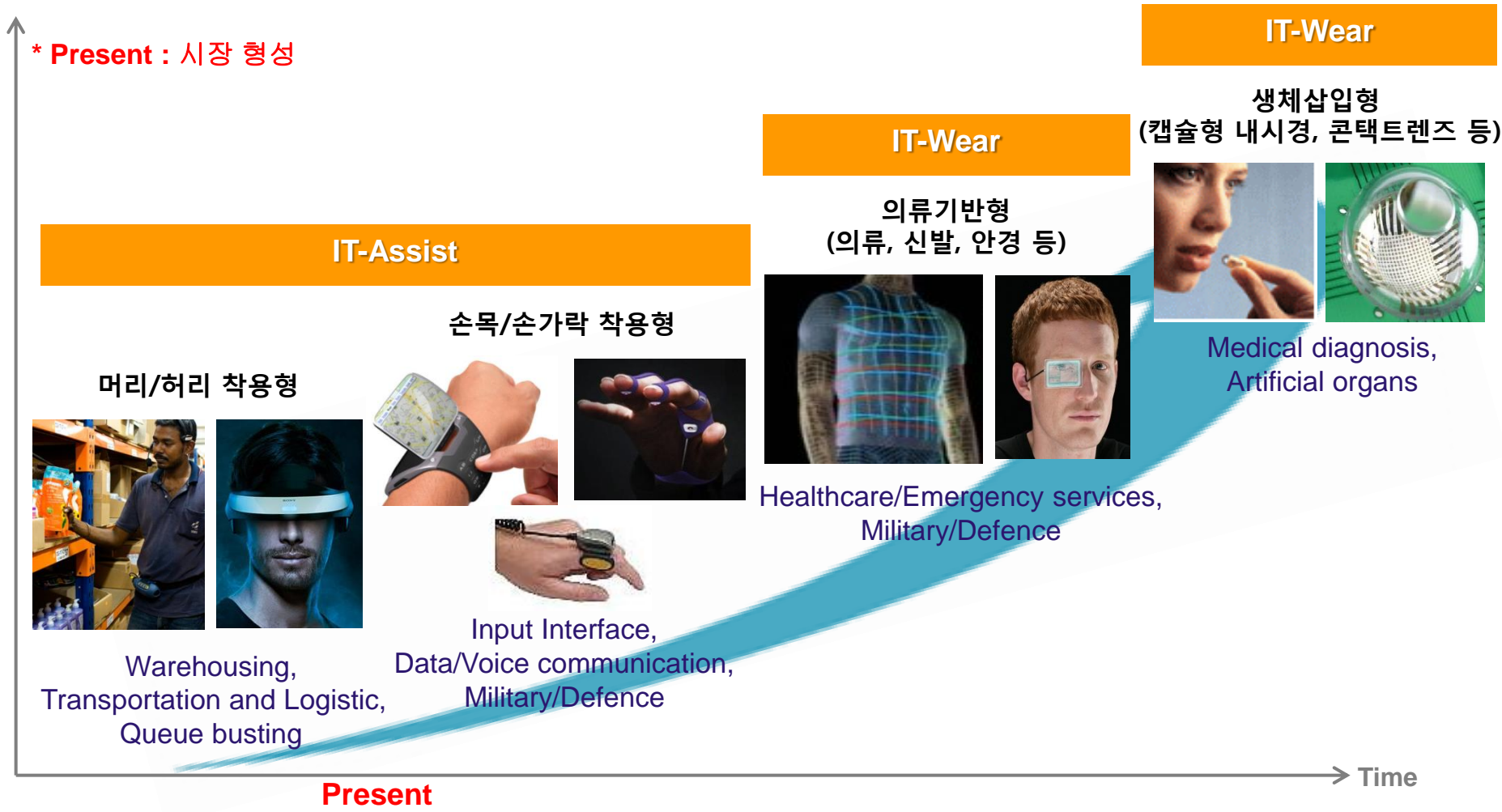
# 플렉서블 메모리 응용분야 시장



# 플렉시블 디스플레이 응용분야 로드맵



# 웨어러블 PC 응용분야 로드맵



# 유연 반도체

- 유기 반도체 (Organic based memory)
- 무기 반도체 (Inorganic based memory or silicon based memory)



# 유기 반도체 vs. 무기 반도체

	Polycrystalline silicon TFTs	Metal oxide TFTs	Amorphous silicon TFTs	Organic TFTs
Field-effect mobility	$> 10 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	$7 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	$0.5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$	$0.5 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$
Operating voltage	4 V	10 V	15 V	40 V
Minimum bending radius	10 mm	30 mm	5 mm	0.5 mm





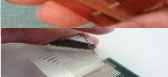
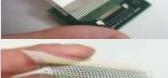



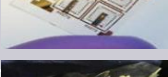
---





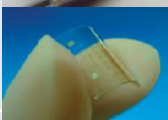

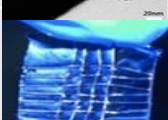
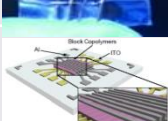
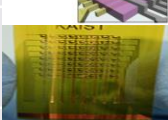
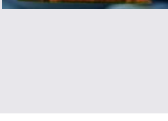
# 유기 반도체 vs. 무기 반도체 응용

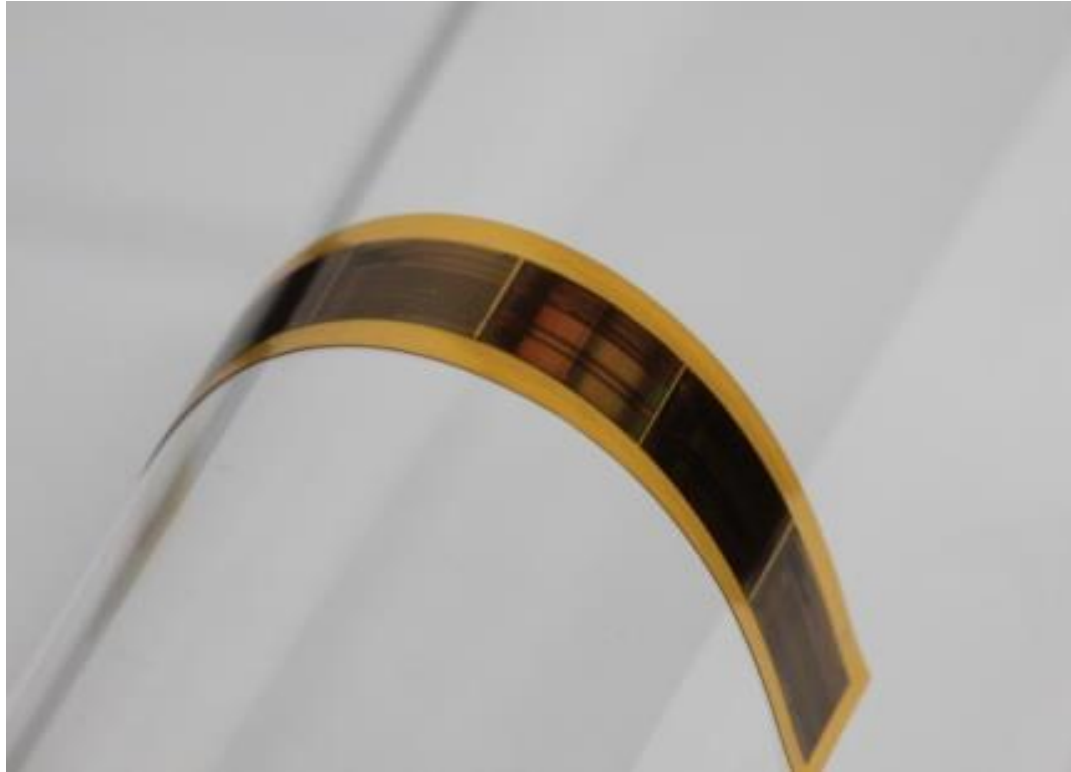
- 유기 반도체 (Organic based memory)
  - Low performance and low reliability,  
but low cost, and high speed fabrication
- 무기 반도체 (Inorganic based memory or silicon based memory)
  - High performance and high reliability  
but high cost and moderated speed fabrication

# 해외 플렉서블 메모리 R&D동향

업체명	개발내용	사진	개발 시기
UCLA/IBM (미국)	AIDCN이라는 유기물 박막 사이에 알루미늄 나노 클러스터를 분산시킨 삼중층(유기물/금속박막/유기물) 구조를 상하 전극 사이에 끼워 넣은 비휘발성 유기 메모리 개발		2002
Thin Film (노르웨이)	세계 최초로 R2R 인쇄 공정에 의해 생산할 수 있는 비휘발성 메모리 개발 전극 사이에 강유전체 고분자를 끼워 넣은 구조		2005
세이코 엡슨 (일본)	자사의 SUFTLA(Laser lift-off) 기술로 플렉시블 기판에 TFT 회로를 형성하여 플렉시블 SRAM 개발		2005
AIST (일본)	나선 구조의 폴리펩티드와 DNA 등의 생체 고분자 재료가 가진 강유전성을 이용하여 전계효과 트랜지스터형 메모리 소자를 제작하는 기술 개발		2006
국립충성대학/ ITRI(대만)	알루미늄 전극 사이에 PC고분자와 금 나노입자의 혼합물을 끼워 넣어 비휘발성 유기 쌍안정 메모리 개발		2007
도쿄 대학 (일본)	PEN 수지 기판 위에 금속 트랜지스터를 제작하고 그 위에 산화 알루미늄 박막을 증착하여 플렉시블 유기 메모리 개발		2009
NIST(미국)	액체 상태의 이산화물 티타늄 겔을 스핀 코팅하여 플렉시블 투명 고분자 박막을 형성하고 그 위에 전기적 접촉을 위한 플렉시블 메모리 스위치를 제작하여 플렉시블 메모리 소자 개발		2009
캠브리지대학 (영국)	플라스틱 기판 위에 나노와이어 트랜지스터를 제작한 다음 와이어의 양쪽 끝에 소스와 드레인 전극을 형성하고 그 위에 알루미늄 게이트 전극층을 증착하여 플렉시블 비휘발성 메모리 시제품 개발		2010
노스캐롤라이나 주립대학(미국)	4개의 금속 스트립을 수직, 수평으로 교차시키고 워터 베이스 겔을 슬라브 측면에 발라 수중에서도 손상이 없는 플렉시블 메모리 시스템 개발		2011
라이스대학 (미국)	그래핀 없이 실리콘 산화물 표면이 메모리 기능을 하는 3D 투명 플렉시블 메모리 개발		2012

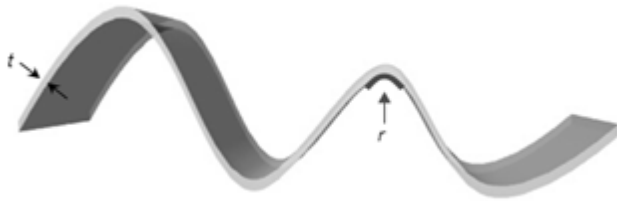
# 국내 플렉서블 메모리 R&D동향

업체명	개발내용	사진	개발 시기
GIST	PET 기판 위에 하부전극을 형성하고 그 위에 유기물을 스프인코팅한 후 상부 전극을 증착하여 플렉서블 비휘발성 저항변화형 메모리(RRAM) 개발		2010
국민대	플라스틱 기판 위에 유기 트랜지스터를 제작하고 정보 저장층으로 기존의 단일층 구조 대신 고분자층과 금 나노입자층이 번갈아 쌓여있는 다층 구조를 삽입하여 플렉시블 유기 트랜지스터 메모리 개발		2010
한양대/KAIST/ETRI/텍사스 오스틴대(美)	PES 플렉시블 기판 위에 금속-절연체-금속(AI-GO-AI) 적층구조를 형성해 메모리 소자 개발		2010
KIST/한양대	PMMA 고분자 사이에 초박형 그래핀 시트를 끼워넣어 유기 쌍안정 메모리 개발		2011
KIST/NASA(美)	메모리 내부가 구리선과 산화구리막, 플래티넘선을 격자 모양으로 배열해 직물에 쉽게 적용할 수 있는 저항 스위칭 메모리 개발		2011
GIST	카바졸 블록(전자 주게)과 피리딘 블록(전자 받게)을 함유한 블록 공중합체를 음이온 중합법으로 합성하여 비휘발성 유기 메모리 개발		2011
KAIST	플렉시블 기판 위에 단결정 실리콘 트랜지스터와 멤리스터를 통합해 NOR 타입의 플렉시블 RRAM 개발		2011
한밭대/ETRI/GIST/노스웨스턴대(美)	플라스틱 기판 위에 잉크젯 프린팅 공정으로 유기 박막 트랜지스터(절연막으로 금 나노입자가 함유된 고분자 박막 사용)를 인쇄하여 플렉시블 낸드 플래시 메모리 개발		2012



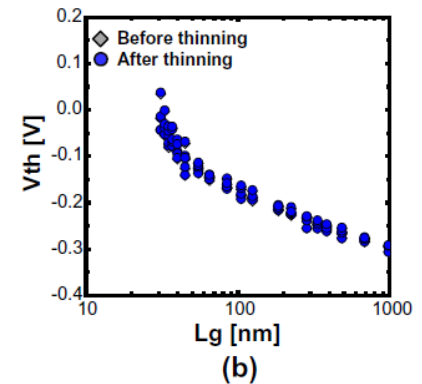
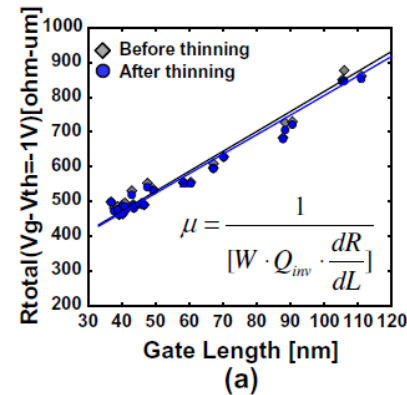
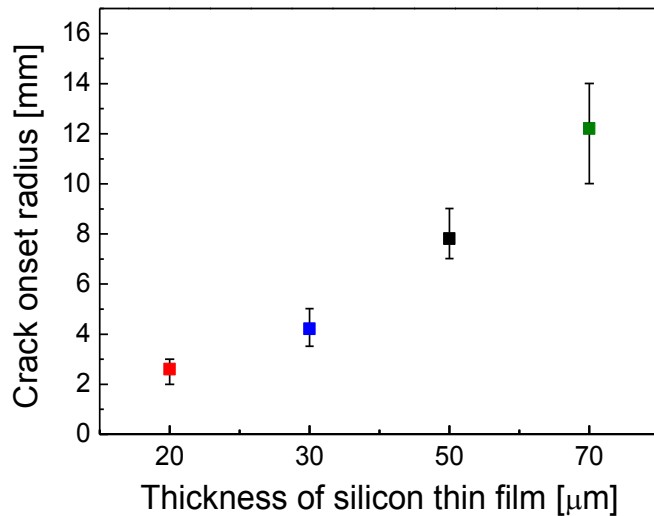
Flexible memory developed by HanaMicron in Korea

# Flexible memory/semiconductor



$$\varepsilon = \frac{t}{2r} \times 100\%$$

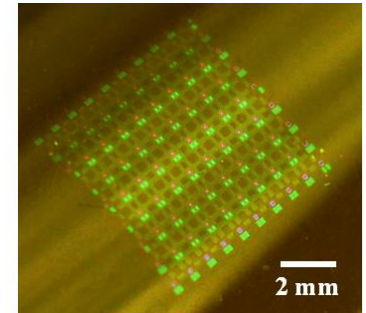
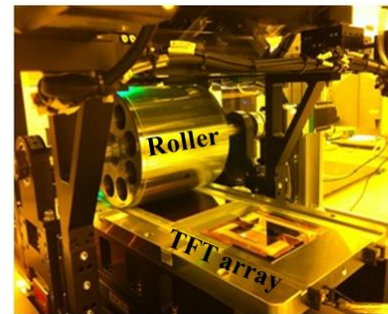
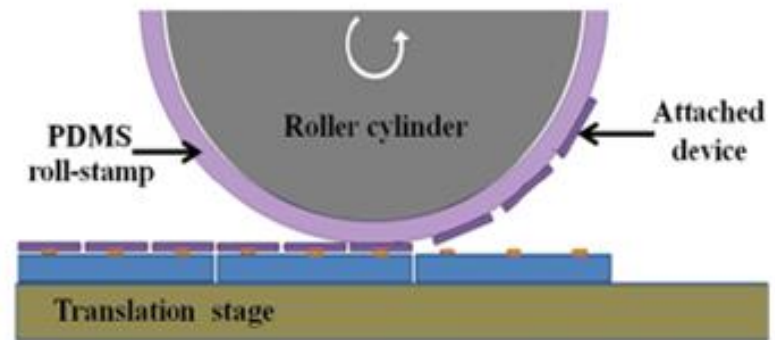
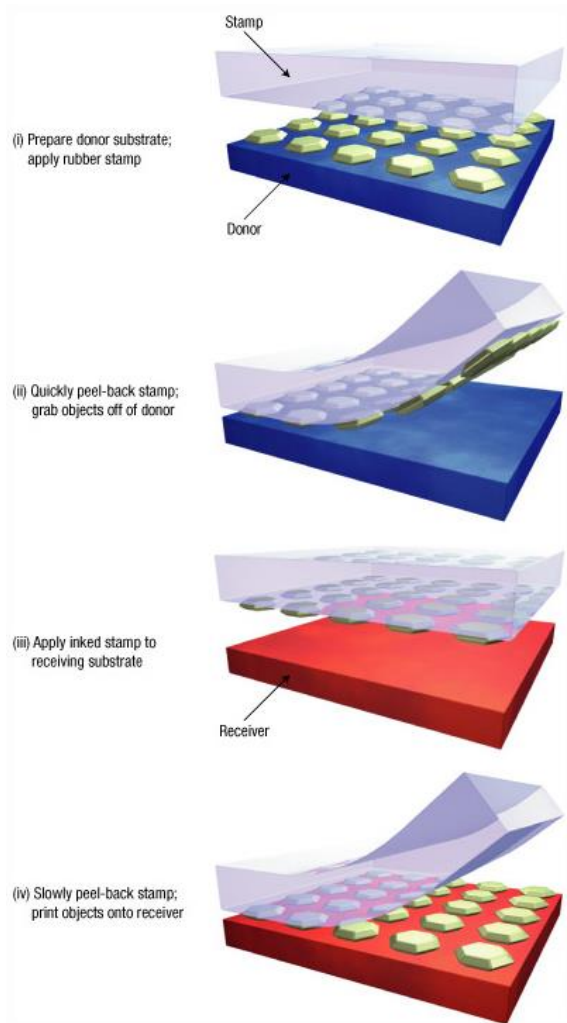
- 10 nm 실리콘: 파괴곡률 반경은 0.5  $\mu\text{m}$
- 1 mm 실리콘: 파괴곡률 반경은 5 cm



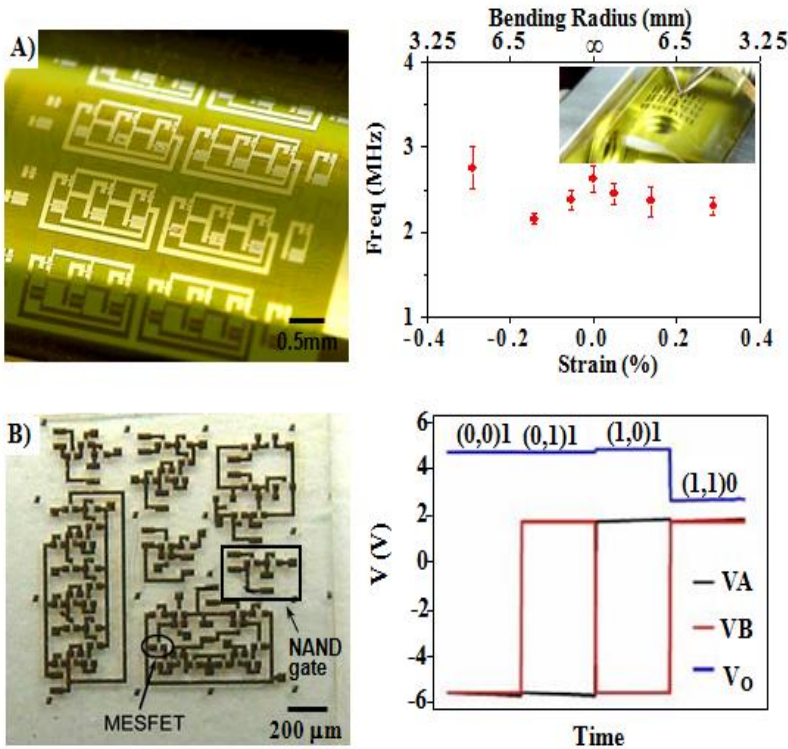
Hole mobility and threshold voltage for PMOSFETs before and after wafer thinning down to 7  $\mu\text{m}$ .



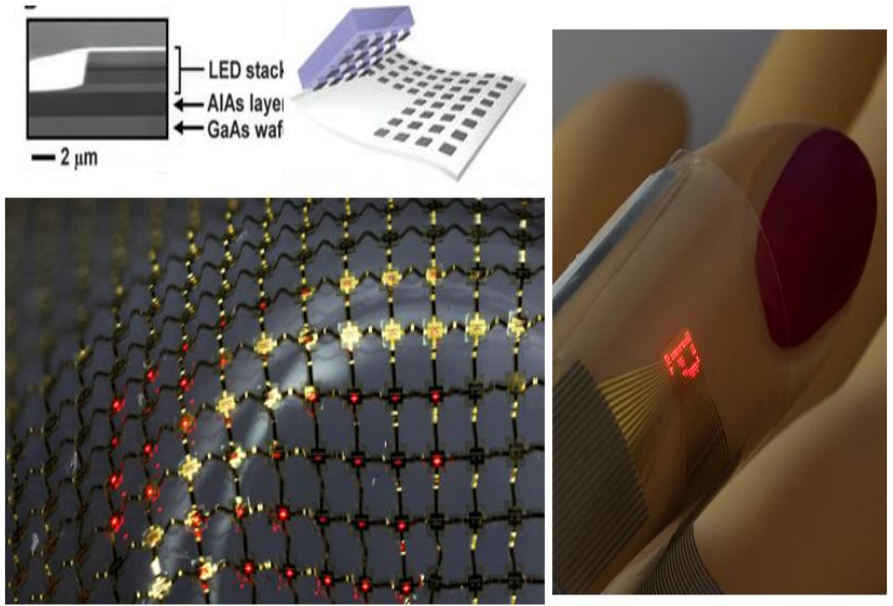
# Transfer printing technology



# 전사기술(Transfer Printing)을 이용한 무기 반도체 소자

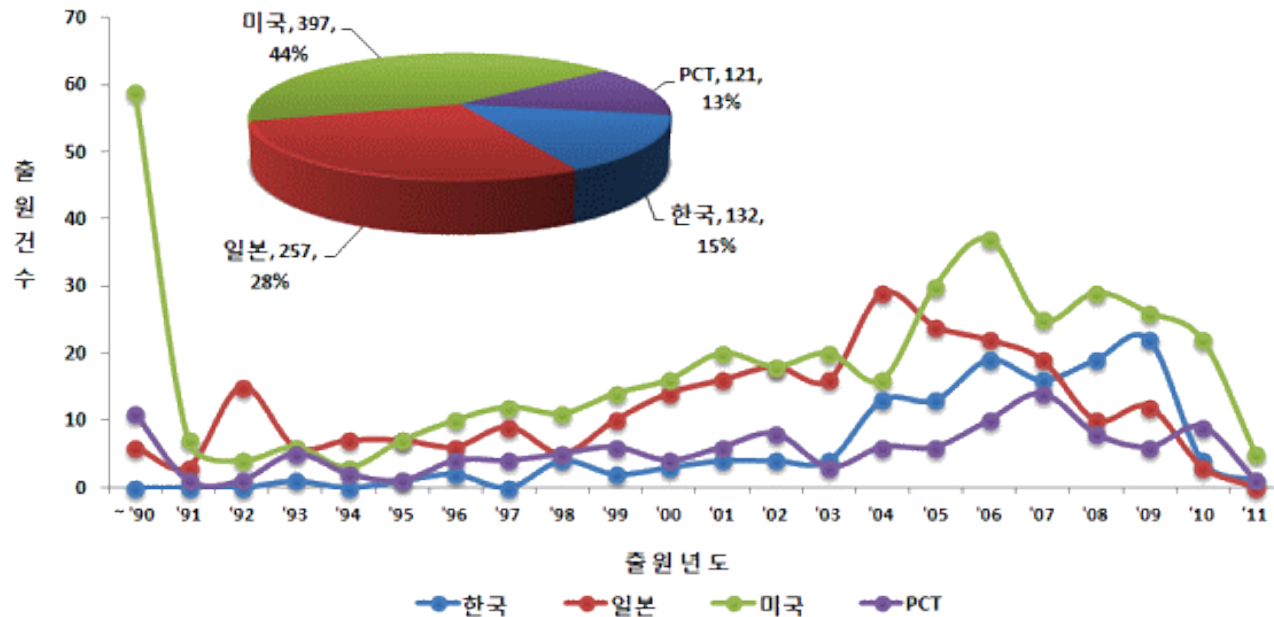


(A)  $\mu$ s-Si CMOS ring oscillator  
 (B)  $\mu$ s-GaAs NAND 소자 어레이



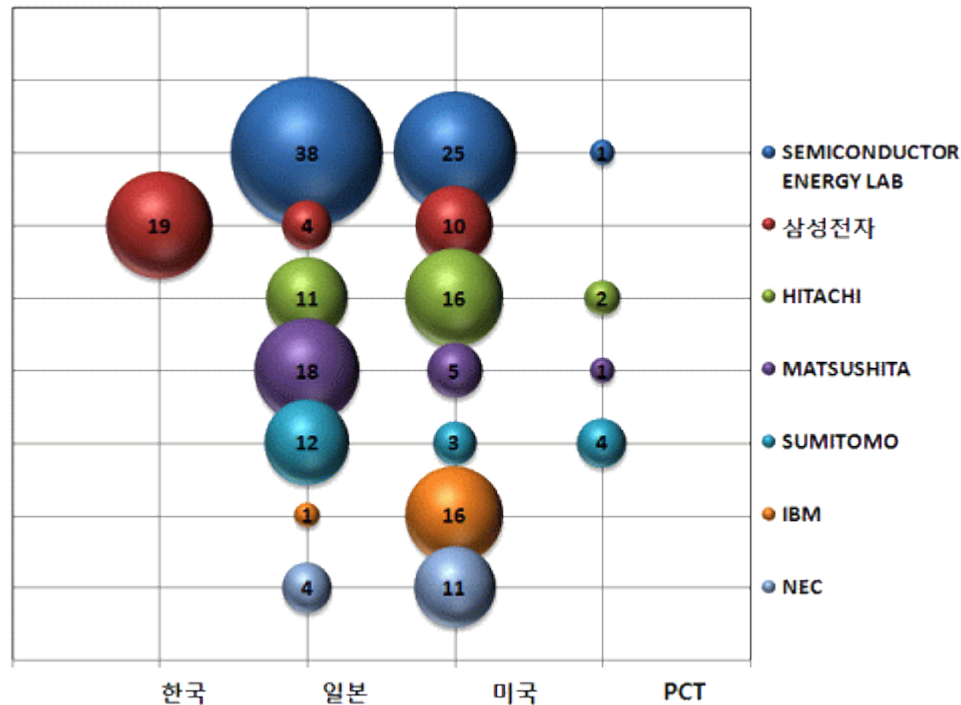
LED 웨이퍼로부터 active LED 층을 박리하여 유연한 플라스틱 기판으로 전사된 LED 디스플레이

# 플렉서블 메모리 특허 출원의 연도별 동향



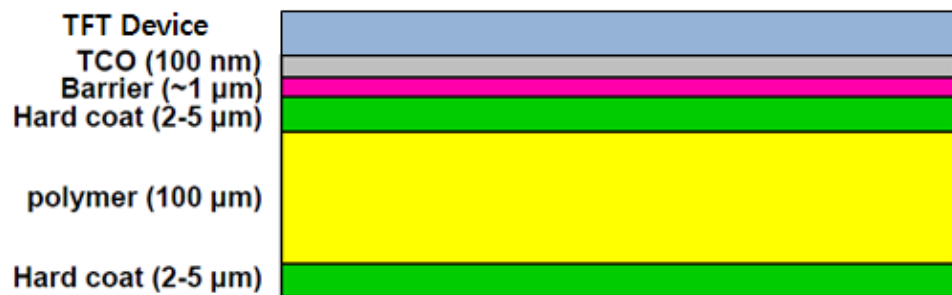
- 각 국가의 연도별 특허동향을 살펴보면, 대체적으로 증가하는 추세를 보이며, 특히 2004년도 이후에 출원건이 많이 존재함. 2000년대에 들어 연구 개발 활동이 활발하게 진행됨.
- 국가별 점유율을 살펴보면, 미국특허가 44%, 일본특허가 28%, 한국특허가 15%, PCT 특허가 13%의 점유율을 가지는 것으로 나타남.

# 플렉서블 메모리 주요 기업의 각국 특허 현황



- SEMICONDUCTOR ENERGY LABORATORY는 일본에서 38건, 미국에서 25건, PCT 1건을 출원함
- 삼성전자는 한국에서 19건, 미국에서 10건, 일본에서 4건의 특허를 출원함
- SEMICONDUCTOR ENERGY LABORATORY, HITACHI, MATSUSHITA, SUMITOMO 등 일본 기업들의 특허 활동이 활발함

# Failure mechanisms for a coating/substrate system



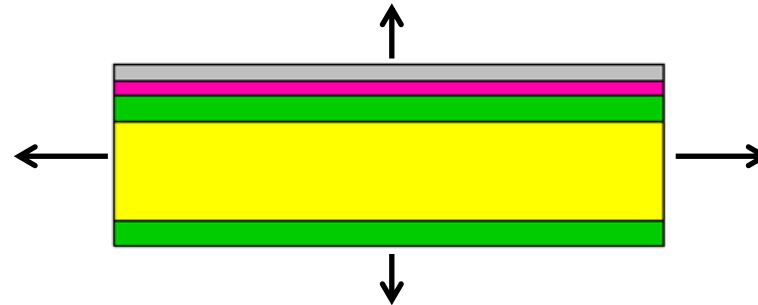
- Substrate : Polymer (PET, PI, PEN) → **Flexible**
- Film : TFT device, Inorganic, TCO(ITO), Hard coat, Barrier layer → **Brittle**

- OC(Overcoat) or Hardcoat layer
  - Scratch resistance
- Barrier layer
  - Environmental resistance ( $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )
  - Multi(organic/inorganic or inorganic) layer

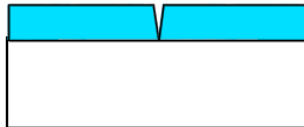
Material	Young's modulus, E (GPa)	Coefficient of Thermal Expansion, CTE (ppm/K)
Hardcoat	$6.0 \pm 0.5$	$61 \pm 1$
Base polymer	2.9	~65
Gas Barrier	150	10
ITO	$119 \pm 5$	7.6



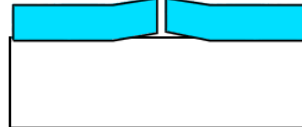
# Failure mechanisms for a coating/substrate system



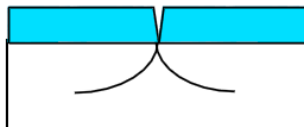
**Tensile stress cracking**



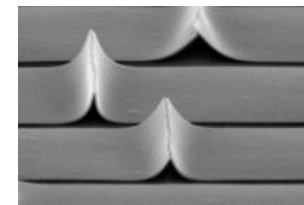
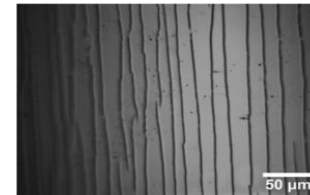
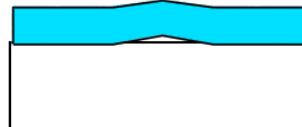
**Tensile stress cracking and delamination**



**Tensile stress cracking and failure of the substrate**



**Compressive stress cracking leading to delamination**



# Critical factors affecting film flexibility



- Thickness
  - Film thickness, Substrate thickness
- Materials
  - ITO, Metal,  $\text{SiO}_2$ , Si, Nanowire, Conducting polymer
- Hardcoating
- Fatigue resistance
- Microstructure
- Adhesion

# Mechanical reliability of flexible electronics

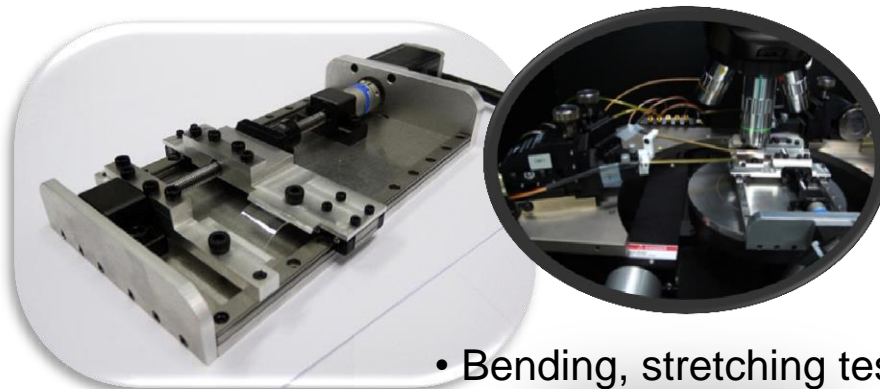
- 현재까지 유연 전자 소자의 신뢰성을 평가하는 표준화된 평가 방법이 없음
- Flexible, Bendable, Rollable, Stretchable의 정의는 ?
- 유연 소자의 신뢰성은 주로 Bending test(굽힘 시험)에 의하여 수행되었으나 생산 공정 및 실제 사용 시에는 다양한 변형이 존재할 수 있다.
  - Bendable guideline: 곡률 반경  $R = 10\text{ mm}, 5\text{ mm}, R3, R2, R1$ .
  - Stretchable guideline: Stretching strain = 5%
  - Fatigue guideline : 10,000 ~ 1,000,000 cycle @  $R = 2 \sim 10\text{ mm}$
- 제품 사용 중 보다는 실제 공정 중에 더 문제가 심각할 수가 있음
- Bending, Stretching, Twisting 및 Fatigue 등 유연소자의 성능 및 신뢰성을 통합적으로 평가하는 방법 필요

# Reliability test for flexible electronics

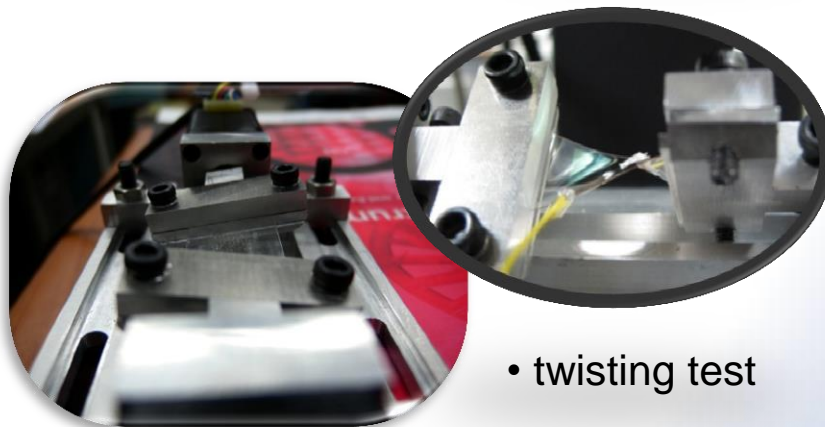
## 유연소자의 신뢰성 평가 항목

- Outer bending test (Tensile)
- Inner bending test (Compression)
- Ultra bending test (Foldable)
- Stretching test
- Twisting test
- Fatigue test
- Rolling test
- Adhesion test (peel-off or nanoscratch test)

## 신뢰성 평가를 위한 시험장비 구축



• Bending, stretching test

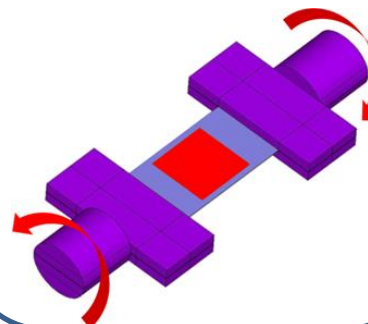
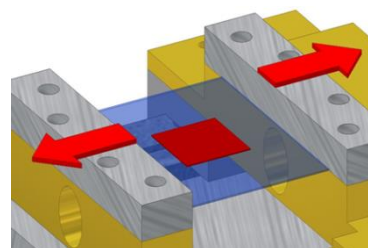
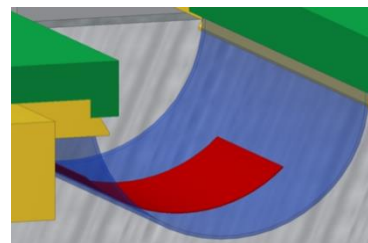
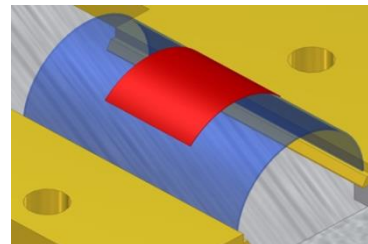


• twisting test

# Reliability test for flexible electronics

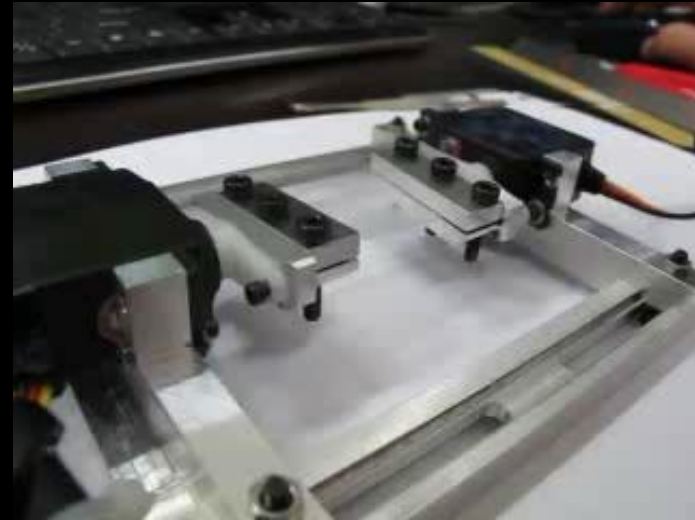
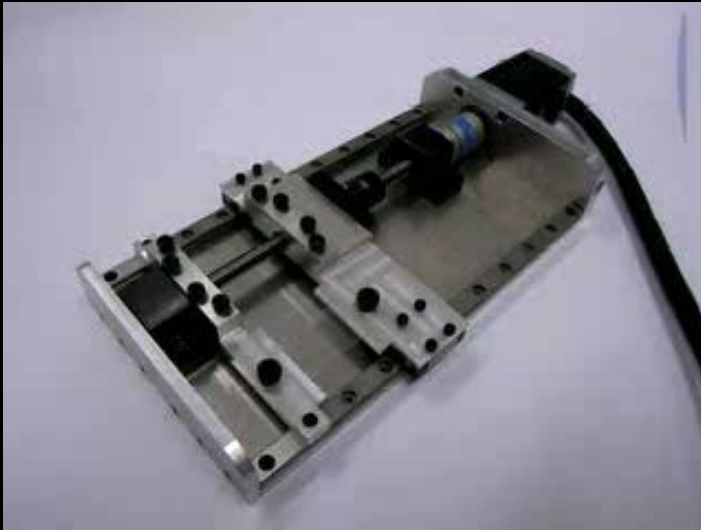
## Reliability Test Methods

- Outer bending test (**tensile**)
- Inner bending test (**compressive**)
- Stretching test (**tensile + delamination**)
- Twisting (**tensile + compressive**)

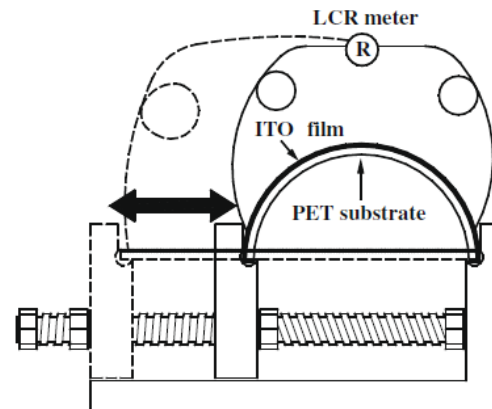
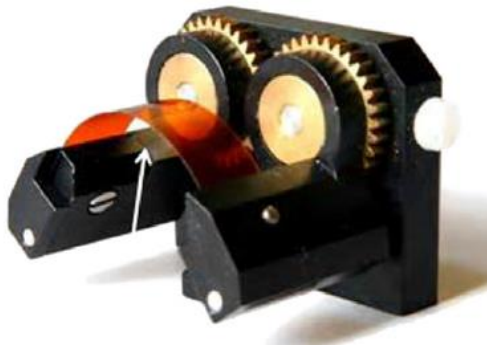
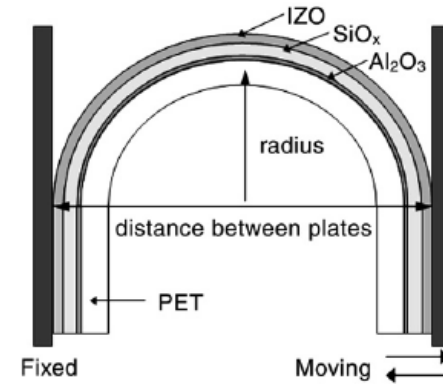
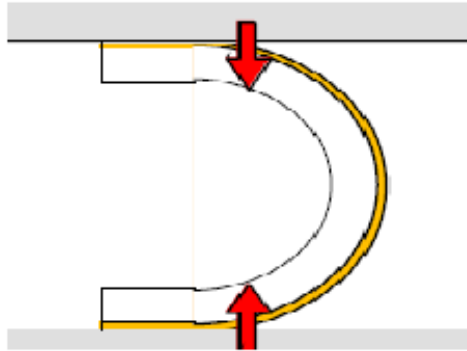




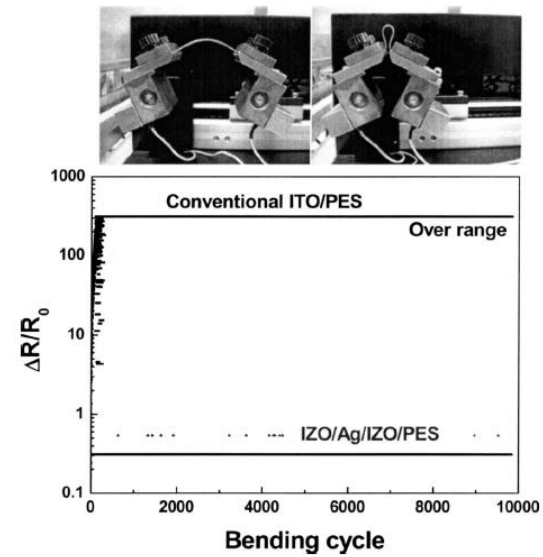
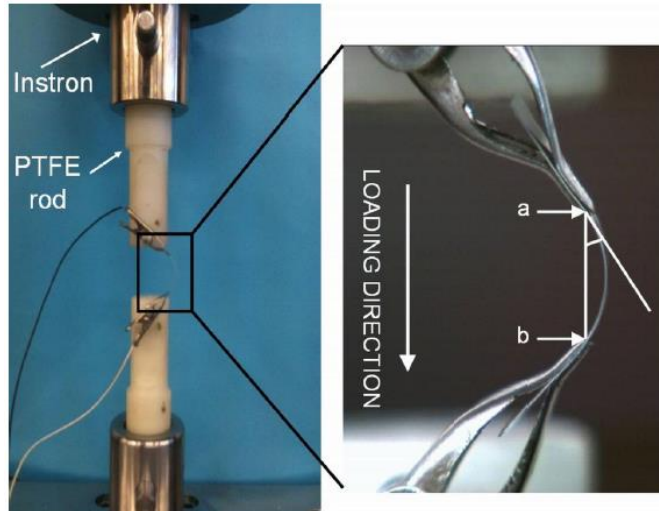
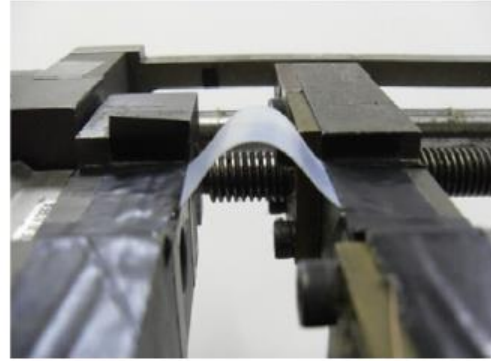
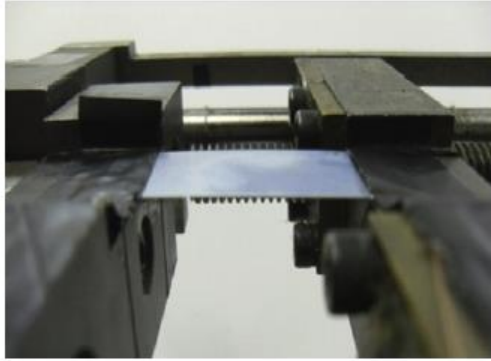
# Bending, stretching, twisting, rolling test



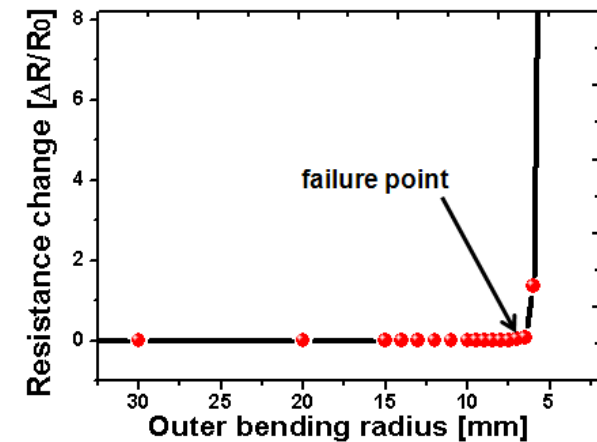
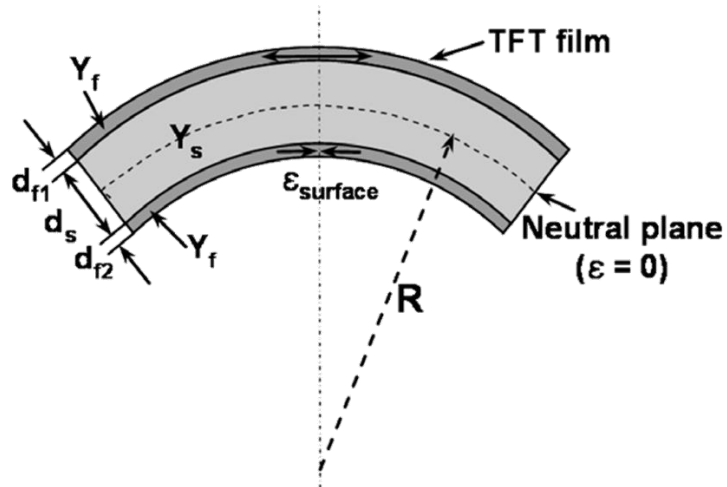
# Various bending testers



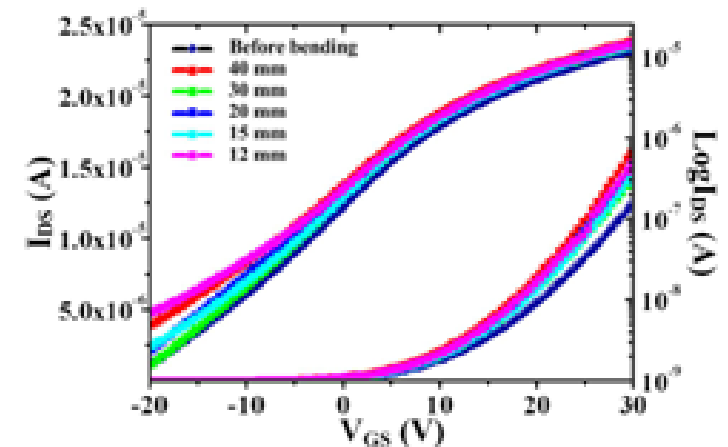
# Various bending testers



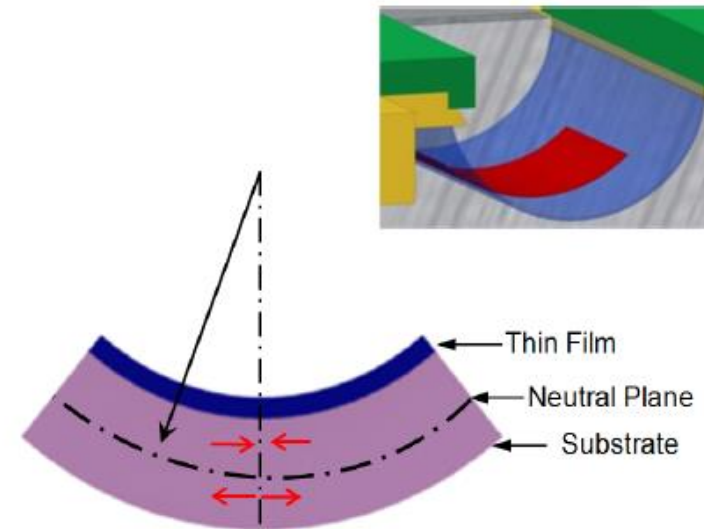
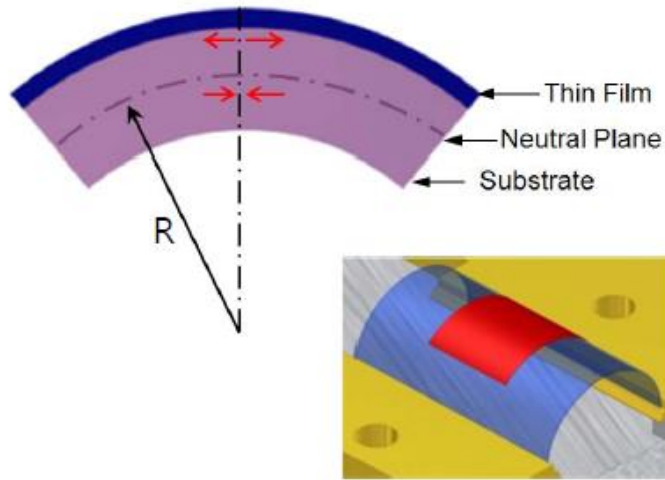
# Bending test methods



$$\left. \begin{aligned} R &= \rho \frac{L}{A} \\ AL &= A_o L_o \\ R_o &= \rho \frac{L_o}{A_o} \end{aligned} \right\} \frac{R}{R_o} = \left( \frac{L}{L_o} \right)^2$$



# Bending test for flexible electronics



- If material properties are known

$$R_{nom} = \frac{L}{2\pi \sqrt{\frac{dL}{L} - \frac{\pi^2 h_s^2}{12L^2}}}, \quad \varepsilon_{top} = \left( \frac{h_f + h_s}{2R} \right) \frac{(1 + 2\eta + \chi\eta^2)}{(1 + \eta)(1 + \chi\eta)}$$

$$\eta = \frac{h_f}{h_s}, \quad \chi = \frac{E_f}{E_s}, \quad \begin{array}{l} h_f = \text{film thickness, } h_s = \text{substrate thickness} \\ E_f = \text{elastic modulus of film, } E_s = \text{elastic modulus of substrate} \end{array}$$



# Bending stress and strain calculation

- If material properties are unknown
- If  $h_f$  (film thickness)  $\ll$   $h_s$  (substrate thickness)

$$\varepsilon_{top} = \left( \frac{h_f + h_s}{2R} \right) \frac{(1 + 2\eta + \chi\eta^2)}{(1 + \eta)(1 + \chi\eta)} \approx \frac{h_f + h_s}{2R} \approx \frac{h_s}{2R}$$

$$\eta = \frac{h_f}{h_s}, \quad \chi = \frac{E_f}{E_s}, \quad \begin{array}{l} h_f = \text{film thickness, } h_s = \text{substrate thickness} \\ E_f = \text{elastic modulus of film, } E_s = \text{elastic modulus of substrate} \end{array}$$

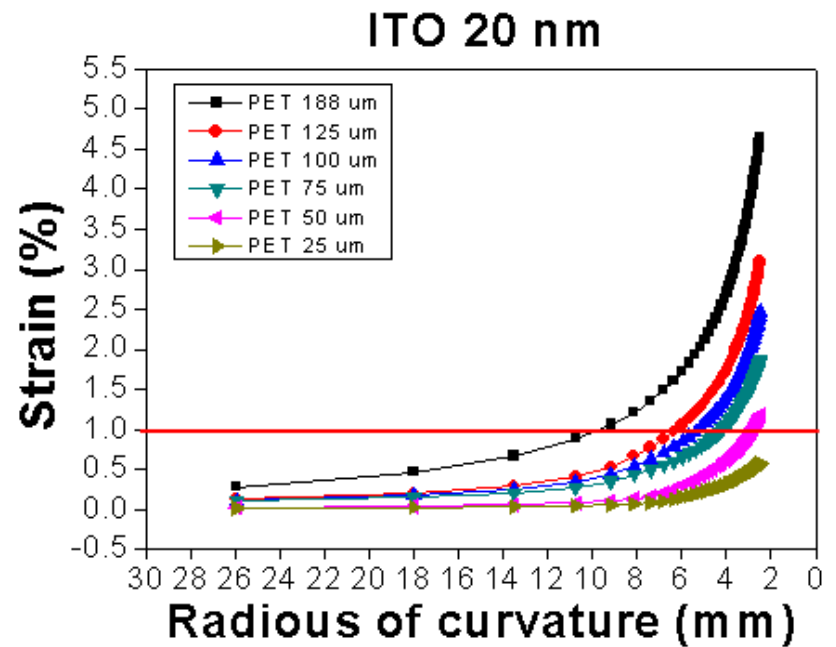
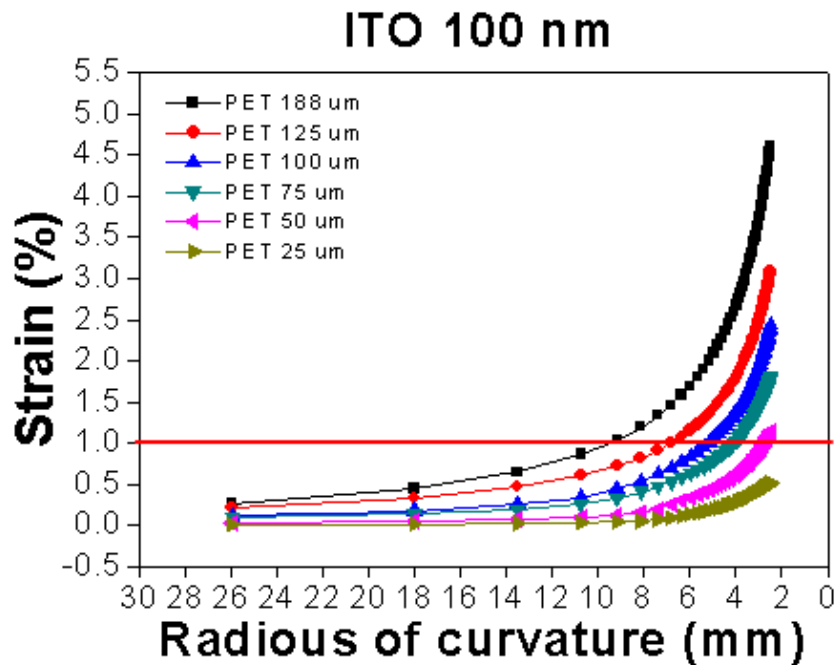


# Fracture strain of flexible memory components

Material	Fracture strain
Silicon	0.8%
ITO	0.58 ~ 1%
SiO <sub>2</sub>	0.55 %
Au	1 ~ 8%
CNT	15 ~ 18%
Graphene	15%
Polyimide	4%
PET	4 ~ 5%

# Thickness effects (Substrate vs. ITO thickness)

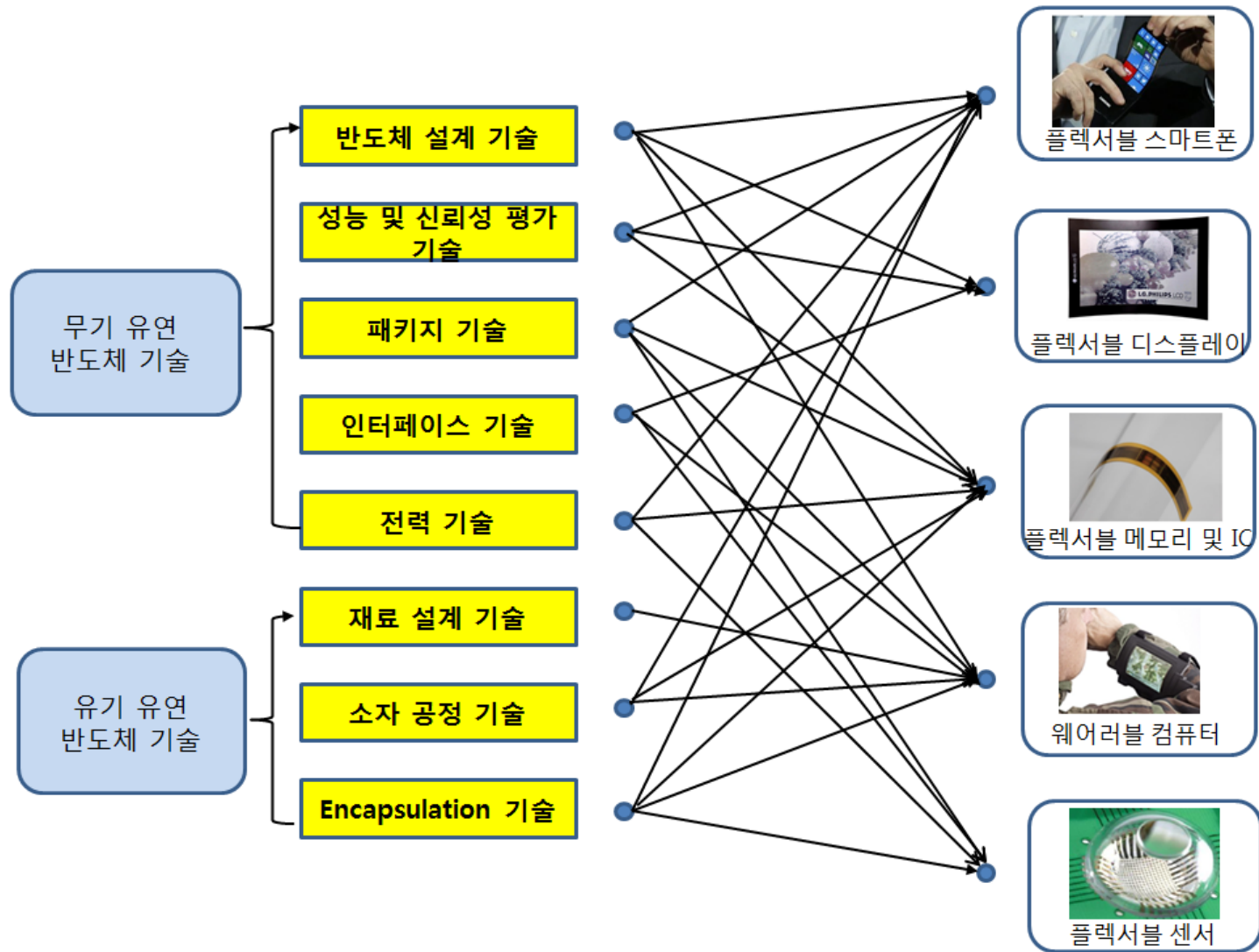
- 만일 ITO의 failure strain을 1%로 가정한다면



# Flexible TCO (Transparent conducting oxide)

- Alternative ITO : ZITO, IZO, ITZO, ZnO, AZO, GZO, IZTO
- OMO(oxide/metal/oxide): ITO/Ag/ITO, IZO/Ag/IZO, IZTO/Ag/IZTO, AZO/Ag/AZO, ZTO/Ag/ZTO, ZnO/Cu/ZnO, ITO/Cu/ITO, ITO/Au/ITO, ITO/Ag/ZTO, TiO<sub>2</sub>/AgNW/TiO<sub>2</sub>
- Conducting polymer : PEDOT:PSS, ITO/PEDOT:PSS
- Ag nanowire
- CNT, Graphene, Metal grid

# Roadmap of flexible memory



경청해 주셔서 감사합니다