

탄소나노튜브 전극을 이용한 플렉시블 반사형 디스플레이의 구동 특성

황인성¹, 김영조^{2,a}

¹ 주식회사 실텍

² 청운대학교 전자공학과

Driving Characteristics of Flexible Reflective Display Using Carbon Nanotube Electrode

In-Sung Hwang¹ and Young-Cho Kim^{2,a}

¹ Seal Tech Co., Ltd, 29, Poongse-Ggil, Cheonan 330-912, Korea

² Department of Electronic Engineering, Chungwoon University, Hongseong 350-701, Korea

(Received April 30, 2012; Revised May 11, 2012; Accepted May 17, 2012)

Abstract: To compare an electrical and optical characteristics of indium tin oxide (ITO) and carbon nanotube (CNT) electrode on flexible and reflective display, we fabricate two charged particle-type display panels under the same panel condition of which the width of ribs is 10 μm , the cell size is 300 $\mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$, the q/m value of the white particles is $-4.3 \mu\text{C/g}$ and that for the black is $+1.3 \mu\text{C/g}$, and the cell gap is 75 μm , 125 μm , and 175 μm . We use plastic substrates coated with ITO and CNT electrode. To evaluate optical property, we measure a response time of particles using a laser and a photodiode. Threshold and driving voltages of CNT electrode according to the sheet resistance of 300, 600, 1,000 (ohm/sq) are compared with ITO electrode of 10 (ohm/sq). A response time of the CNT panel is similar to that of ITO panel, but the threshold and driving voltages of CNT panel are higher than that of ITO panel, inducing a large bombardment of the particles and shortening the lifetime of the panel. High difference of a threshold and a driving voltage of CNT panel will induce an particle clumping, resulting degradation of the panel. A bending radius of the fabricated CNT panel is 18 μm .

Keywords: Reflective display, ITO, CNT, Charged particle, Response time, Driving voltage

1. 서 론

플렉시블 디스플레이는 플라스틱 기판 등을 사용하여 기존의 평판패널에 비하여 제조비용 절감과 더불어 얇고 가벼우며 유연성이 뛰어나 휴대가 용이하나 비교적 낮은 광투과도 및 높은 면저항으로 인하여 현

재까지 상용화가 이루어지지 않고 있다.

뛰어난 전도성과 투과성으로 인하여 대부분의 평판 디스플레이에서 투명전극으로 많이 사용되는 ITO는 전극과 플라스틱 기판과의 열팽창계수 차에 의해 공정 및 구동 시에 기판의 변형을 불러오며, 플렉시블 패널을 구부릴 때 발생하는 기판의 굴곡과 기계적인 충격 등에 의한 내구성이 취약하여 전극이 파괴되고

a. Corresponding author: yckim@chungwoon.ac.kr

저항이 증가하는 문제를 나타내고 있어 플렉시블 기판에 대한 적용이 현재까지는 어려운 상태이다 [1].

이에 비하여 CNT 전극은 기판과의 접착력이 높고 물리적인 충격 등에 의한 전도성과 안정성이 크기 때문에 플렉시블 패널에서 사용되는 ITO 투명전극의 대안으로 주목받고 있다. 그러나 이와 같은 CNT 전극의 우수한 기계적인 내구성에 비하여 면저항이 높기 때문에 구동전압 및 지연시간의 상승요인이 되는 단점이 있으며 따라서 전력소비 및 구동전압을 증가시키게 된다. 고전압의 구동은 구동칩의 단가상승 요인이 되며 패널의 수명을 단축시키게 된다. 또한 광투과도가 ITO에 비해 낮은 것도 단점으로 지적되고 있다 [2]. CNT 전극의 기계적 우수성으로 인하여 전자종이 분야에서는 일부 시제품으로 시도된 바는 있으나 그 특성을 분석하는 연구는 활발하지 않다. 또한 인가된 전계에 따라 이동하는 입자에 의해 이미지를 구현하는 대전입자형 전자종이 디스플레이에서 전하량이 큰 입자의 경우 외부전계 인가 시 강하게 전극표면과 충돌을 일으키게 되는데 이때 발생하는 전극표면의 손상을 고려하면 ITO 전극의 CNT로의 대체는 전극의 빈번한 구부림에 의해 저항이 증가하는 문제와 더불어 수명연장 및 성능향상에 기여할 수 있을 것으로 판단된다 [3,4].

본 논문에서는 플렉시블 패널을 적용하는데 가장 용이하며 향후 수요가 가장 클 것으로 판단되는 전자종이 중에서 면저항의 영향이 가장 적은 저전류 전압구동형 반사형 표시 소자인 대전입자형 전자종이 (charged particle-type electronic paper)에 CNT전극을 적용하고자 한다. CNT전극을 형성한 플라스틱 기판과 ITO 전극으로 형성한 플라스틱 기판으로 제작한 패널의 전기 및 광학특성을 비교 분석하고자 하며, CNT의 ITO 전극대체 가능성을 확인하고 성능향상을 위한 개선점을 논의하고자 한다.

2. 실험 방법

대전입자형 전자종이 디스플레이에 적용된 ITO 전극과 CNT 전극의 특성을 비교하기 위하여 동일한 조건을 가진 대전입자형 전자종이 디스플레이 패널을 제작하였다. 본 연구에 사용된 흰색 입자는 $-4.3 \mu\text{C/g}$ 이며 검정색 입자는 $+1.3 \mu\text{C/g}$ 인 입자를 사용하였으며 입자의 지름은 약 $10 \mu\text{m}$ 이며, 셀 사이즈는 $300 \mu\text{m} \times 300 \mu\text{m}$ 이며 격벽높이는 상판 및 하판에 따로 형성하였으며 그 높이는 $30 \mu\text{m}$ 이며 폭은 $10 \mu\text{m}$ 로

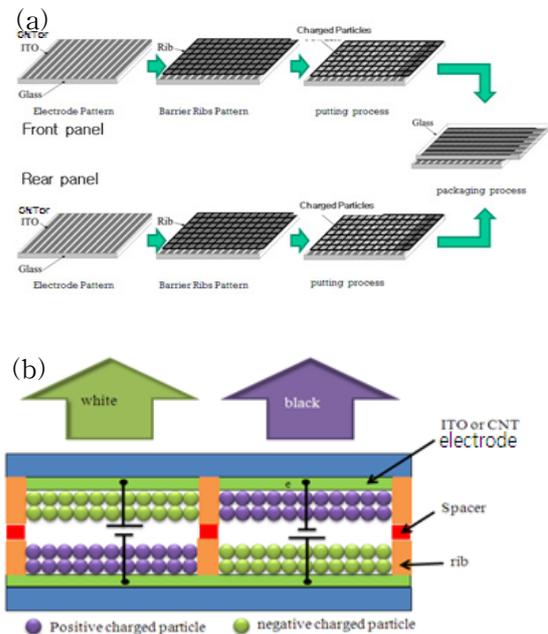


Fig. 1. Fabrication process (a) and cross sectional view (b) of the charged particle-type electronic display.

제조하였다. 전극 간의 간격 (cell gap)은 스페이서 (spacer)를 이용하여 $75 \mu\text{m}$, $125 \mu\text{m}$, $175 \mu\text{m}$ 로 변화하였다. 전자종이 기판은 ITO 또는 CNT가 코팅된 플라스틱 기판을 사용하였으며 패널 사이즈는 $81.3 \text{ mm} \times 61 \text{ mm}$ 기판을 사용하였다. 전극의 폭 (W)과 길이 (L)에 대한 비율을 달리하여 특성을 평가하였으며, 전기 및 광학적 특성 평가를 위하여 레이저 광원을 입사광으로 하고 포토다이오드를 반사광의 센서로 하여 응답특성을 측정하였으며, 패널에 인가하는 전압은 $10 \text{ V}/\mu\text{s}$ 의 상승시간을 가지는 펄스발생기를 사용하였으며 반사광의 출력은 센서출력을 여파기를 거친 후 증폭하여 얻었으며 오실로스코프로 데이터를 얻었다.

패널제조를 위해 격벽을 상판 및 하판에 따로 형성하였으며 사진식각공정을 이용하였으며 격벽재료로 포토레지스트를 이용하였다 [5]. 또한 상판 및 하판에 각각 반대 전하를 가진 흰색 및 검정색 입자를 따로 주입하는 공정을 택하였다. 패널 제조공정 및 최종 패널의 단면도를 그림 1에 간단히 보였다. 그림 1(a)에서 보는 바와 같이 동일한 셀패턴을 가지도록 설계된 상판 및 하판에 대하여 각각의 격벽제조공정을 진행하였으며 (+)의 전하를 띤 검정색 입자와 (-)의 전하를 띤 흰색 입자를 따로 주입하고 방향이 서로 엇

갈리도록 합착공정을 하였다. 패널 합착은 UV epoxy 를 사용하였으며 합착 이후 외부에서 테이핑을 하였다. 본 연구에서는 입자를 주입하고 패널 전체를 동작하도록 하여 단색구동을 하였다. 그림 1(b)는 공정을 마친 패널의 최종 단면을 보인 개념도이다. 외부에서 인가되는 전압에 따라 (+) 및 (-) 전하를 띤 입자가 이동하여 검정색 및 흰색의 이미지를 형성하도록 하였으며 상판 및 하판의 전극은 ITO 및 CNT 전극으로 제작하였다. 본 연구를 위한 패널제작에 사용된 전극의 면저항으로 ITO는 10 (ohm/sq)이며, CNT는 300 (ohm/sq), 600 (ohm/sq), 1,000 (ohm/sq)이다.

3. 결과 및 고찰

디스플레이 구동에 있어서 가장 기본이 되는 문턱전압 및 구동전압을 측정하였으며 그 결과를 표 1에 보였다. 10 (ohm/sq)인 ITO전극이 코팅된 유리기관과 면저항이 각각 300, 600, 1,000 (ohm/sq)인 CNT전극이 코팅된 필름 기관으로 전극간의 간격 (cell gap)이 125 μm 인 패널을 제작하여 구동한 결과 CNT전극은 문턱전압이 50 V, 구동전압이 70 V인 반면에 ITO 전극의 경우가 문턱전압이 45 V, 구동전압이 60 V로 CNT 전극을 적용한 패널이 문턱전압은 5 V, 구동전압은 10 V가 더 높았다. 이는 입자가 운동하는데 있어서 입자가 접촉 및 전계를 형성하는 표면상태가 영향을 미칠 수 있지만 이 경우는 면저항 차가 300배 이상 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 즉, CNT 전극을 사용할 경우 일반적으로 알려진 바와 같이 광투과도 뿐 아니라 면저항의 증가에 따른 구동전압의 증가도 해결해야 할 중요한 기술로 판단된다. 면저항과 광투과도는 비례하며 본 연구에 사용된 600 (ohm/sq)의 광투과도는 약 95%이며 300 (ohm/sq)은 92%이다. 즉, 광투과도를 개선할 경우 면저항이 동시에 증가하여 구동특성이 악화된다.

또한 반사형 디스플레이는 자발광형 디스플레이와 달리 입사광도 CNT를 투과하기 때문에 투과도는 상대적으로 중요하다. 따라서 면저항과 광투과도는 상호보완적이기 때문에 적용분야에 따라 선택을 차별화해야 할 것으로 판단된다. 표 1에서 면저항의 차에도 불구하고 CNT 전극의 문턱전압 및 구동전압에 차가 없음을 본 연구에서 사용한 전자종이는 전압구동이기 때문이며 전극의 저항은 패널의 저항에 비해 무시된다. 이와 같은 전압구동형 디스플레이는 구동전압은 상대적으로 높으나 전력소비를 줄여주기 때문에 전기

Table 1. Threshold and driving voltage according to the sheet resistance.

sample	electrode	sheet resistance (ohm/sq)	V_T	V_D
1	ITO	10	45	60
2	CNT	300	50	70
3	CNT	600	50	70
4	CNT	1,000	50	70

영동방식의 전자잉크를 사용하는 전자종이에 비해 장점이 된다.

또한 문턱전압과 구동전압과의 차가 ITO전극은 15 V인 반면에 CNT전극은 전압차가 20 V인 것을 확인하였다. 이는 CNT 전극의 경우 입자를 동시에 움직이게 하는 이른바 abrupt driving 특성이 ITO 전극에 비해 떨어짐을 의미한다. 즉, 입자의 입장에서 저전압에서 운동이 가능한 입자에 과도한 전압이 인가됨을 의미하며 이는 곧 입자의 수명을 단축시키는 원인을 제공한다 [6]. 또한 고전압의 구동은 과도한 운동에너지가 입자에 제공되어 입자와 전극 간의 충돌에너지가 증가하여 입자몽침의 원인이 된다 [7].

대전입자형 전자종이 디스플레이는 부도체인 격벽과 상판 및 하판에 도전성 물질인 전극으로 구성된 폐쇄된 셀 내에 대전입자가 주입되어 있으며 상하판 전극에 인가된 전계에 의해 이 대전입자가 운동을 하는 구조로 되어 있다. 따라서 전극간의 간격 (cell gap) 및 주입된 대전입자의 충전량에 따라 문턱전압 및 구동전압이 결정된다. 입자의 충전량은 전계의 영향으로 인해 입자의 운동을 지배하기 때문에 광특성과 관련이 깊으며, 기존의 연구결과에 의하면 입자는 2 layer 이상일 경우 반사율이 거의 포화되어 크게 영향을 미치지 않기 때문에 본 연구에서는 입자의 충전량을 약 2.5 layer로 하였다 [8].

표 2는 전극간의 간격과 입자의 충전량에 따라 ITO 전극과 CNT 전극의 문턱전압 및 구동전압을 보인 것이다. 이 표에서 보는 바와 같이 전극간의 간격과 전압은 비례하나 전극의 종류에 관계없이 40% 정도의 충전량일 때 문턱전압과 구동전압의 차가 가장 적으며 입자가 동시에 운동하는 것을 알 수 있다. 문턱전압과 구동전압의 차는 입자의 수명과 직접적인 관련이 있다. 이는 기존의 ITO 전극을 적용한 연구에서 확인된 내용과 유사한 결과를 보인다 [9].

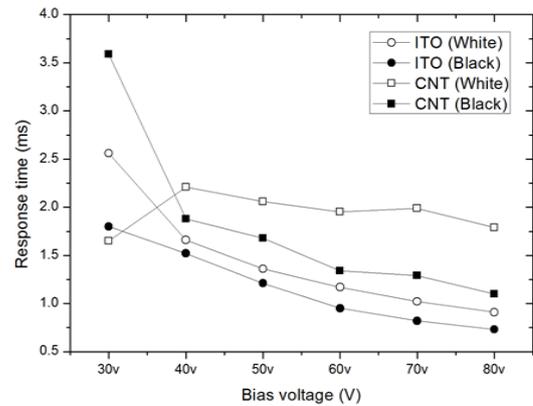
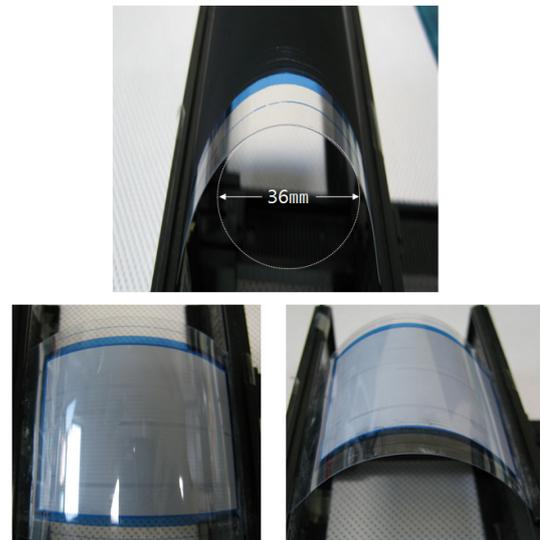
Table 2. Voltage characteristics according to cell gap and filling ratio.

sample	cell gap (μm)	loading ratio(%)	ITO(V)		CNT(V)	
			V_T	V_D	V_T	V_D
1	75	66	30	50	35	60
2	125	40	45	60	50	70
3	175	28.5	55	85	60	90

폐쇄된 공간 내부에서 움직이는 입자의 운동을 이해하기 위하여 응답특성은 바람직한 분석방법으로 이해되며 다수의 연구에서 이용되고 있다 [10]. 응답특성을 분석하기 위하여 표 2에서 보인 2번째 샘플을 사용하여 인가전압에 따른 응답시간을 그림 2에 보였다. 응답시간은 전극 커패시터와 저항에 의해 발생하는 지연시간, 불균일한 입자의 q/m (전하 대 질량비) 값에 의한 응답시간의 분포, 그리고 자신의 전극표면에서 반대전극까지 입자가 운동하는데 걸리는 시간을 포함한다.

대전입자형 디스플레이에서 커패시터와 저항의 직렬연결로 구성된 지연시간은 커패시터인 패널의 전극 양단에 걸리는 전압식 $V_c = V_0(1 - \exp(-t/RC))$ 에서 시정수인 $\tau = RC$ 에 의해 결정된다 [11]. 본 연구에 제작한 샘플인 ITO 뿐 아니라 CNT 전극도 커패시터의 값이 nF 단위가기 때문에 문제되지 않는다. q/m의 분포 또한 공통으로 사용되었기 때문에 위의 응답시간을 결정하는 3가지 경우 중 오직 마지막 경우인 입자가 전극 양단간을 움직이는데 걸리는 시간이 응답특성을 결정한다.

따라서 본 연구에서는 동일한 패널조건에서 전극만을 ITO 및 CNT를 적용하여 제작한 패널에 대해 응답특성을 분석하였으며 그 결과는 그림 2에 보였다. 여기에서 전극간격은 모두 125 μm 이며 사각형의 데이터는 CNT 전극이며 원형의 데이터는 ITO 전극이다. 또한 내부가 채워진 데이터는 검정색 입자의 응답시간이며 빈 데이터는 흰색입자의 응답시간을 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 검정색 입자의 응답시간이 흰색의 응답시간보다 약간 빠른 것을 알 수 있다. 이는 흰색보다 검정색 입자가 입자운동을 주도하는 것을 의미한다 [11]. 또한 CNT 전극의 경우가 흰색과 검정색 입자 모두에서 응답시간이 늦다. 이는 구동전압이 상대적으로 높기 때문인 것으로 판단된다. 또한 인가전압에 대한 응답시간이

**Fig. 2.** Response time according to bias voltage.**Fig. 3.** Fabricated flexible display panel using CNT electrode.

ITO에 비해 다소 부족하기는 하지만 거의 일정하게 포화되는 모습을 보인다. 이는 ITO 전극을 CNT로 대체하였을 때 입자운동에는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 다만 높은 구동전압에 대한 개선연구를 향후 필요할 것으로 판단된다.

CNT 전극을 적용한 플렉시블 전자종이 디스플레이의 최종 공정을 마친 사진을 그림 3에 보였다. 최종공정을 마친 패널의 곡률 반지름은 18 mm였다. ITO 전극을 이용한 패널과 비교하여 구동전압 이외의 평가에서 전기 및 광학적 특성상의 문제점이 발견되지 않았으며, 향후 구동전압을 개선하는 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

반사형 전자종이 디스플레이에서 최근 이슈가 되고 있는 플렉시블 패널은 얇고 가벼우며, 유연성이 뛰어나 휴대성이 용이한 장점이 있다. 한편 플렉시블 패널을 적용한 소자가 안정적으로 동작하기 위해서는 기계적인 내구성이 강한 전극이 뒷받침되어야만 한다. 그러나 기존의 전극으로써 가장 많이 사용되고 있는 ITO 전극은 광투과도 등에서는 뛰어난 반면, 반복적인 구부림에 있어서는 면저항이 커지는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 동일한 패널조건을 가진 대전입자형 디스플레이를 제작하되 전극재료를 CNT 및 ITO를 사용하여 전기 및 광특성을 비교하였다.

완성된 패널의 특성평가 결과, 구동전압은 본 논문에서 CNT전극을 플렉서블 패널에 적용한 결과, ITO 전극에 비해 문턱전압은 5 V, 구동전압은 10 V 정도 증가하였으며 이는 면저항이 300배 이상 크기 때문인 것으로 판단되며, 문턱전압과 구동전압의 차가 ITO 전극에 비해 5 V 정도 크다. 이러한 전압특성은 입자 뭉침의 원인을 제공하여 그 수명을 단축시키는 원인이 될 것으로 보인다. 응답특성 측정결과 ITO 전극에 비해 포화특성이 다소 부족하나 큰 차이는 없었다. 따라서 CNT 전극은 전압특성을 개선한 경우 향후 플렉시블 디스플레이 패널의 전극으로 활용하는데 기여할 것으로 판단된다.

REFERENCES

- [1] Z. C. Wu, Z. H. Chen, X. Du, J. M. Logan, J. Sippel, M. Nikolou, K. Kamaras, J. R. Reynolds, D. B. Tanner, A. F. Hebard, and A. G. Rinzler, *Science*, **305**, 1273 (2004).
- [2] H. Z. Geng, K. K. Kim, K. P. So, Y. S. Lee, Y. Chang, and Y. H. Lee, *Journal of the American Chemical Society*, **129**, 7758 (2007).
- [3] K. H. An and Y. H. Lee, *Nano*, **1**, 115 (2006).
- [4] J. B. Park, J. Y. Hwang, D. S. Seo, D. G. Moon, and J. I. Han, *J. KIEEME*, **17**, 70 (2004).
- [5] D. J. Lee, S. W. Kim, C. J. Kim, and Y. C. Kim, *Proc. 2007 Summer Conf. KIEEME*, **8**, 72 (2007).
- [6] D. J. Lee, I. H. Kim, and Y. C. Kim, *Proceeding of the KIEEME Annual Summer Conference 08*, **9**, 89 (2008).
- [7] D. J. Lee, R. E. Sloper, Y. H. Jeon, S. K. Han, S. Lee, K. H. Choi, W. H. and Y. C. Kim, *SID Digest*, **11**, 1523 (2011).
- [8] D. J. Lee and Y. C. Kim, *Journal of the KAIS*, **8**, 1376 (2007).
- [9] R. Hattori, S. Yamada, Y. Masuda, N. Nihei, and R. Sakurai, *SID Digest*, **4**, 136 (2004).
- [10] D. J. Lee, I. H. Kim, and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, **22**, 169 (2009).
- [11] T. Kitamura, *IDW 06*, 587 (2006).