

대전입자형 디스플레이에 있어서 입자뭉침의 분석 및 구동특성 개선에 관한 연구

김영조^{1,a}

¹ 청운대학교 전자공학과

Studies on Analysis of Particle Lumping and Improvement of Driving Characteristics in Charged Particle Type Display

Young-Cho Kim^{1,a}

¹ Department of Electronic Engineering, Chungwoon University, Hongseong 350-701, Korea

(Received September 21, 2011; Revised October 21, 2011; Accepted October 23, 2011)

Abstract: We analyzed various forces affective to the charged particles in closed space, to explain the image degradation and lifetime-shortening phenomena because of particle lumping which is one of the serious problems in reflective displays. It is possible to predict the quantity of q/m which is the most important parameter in determining the optical and electrical characteristics, by calculating the image force and kinetic energy. For stable driving, the quantity of q/m must be in the defined range but it changes during the fabrication process, so we added the filtering process to solve this problem and obtained the well-defined nonlinear driving voltage coinciding with the threshold voltage. And we obtained the fully-driving property which prevents the particle lumping and decides the image quality and lifetime of panel from the optical characteristics and occupation surface of moving particles.

Keywords: Force, Filtering, Fully driving, Particle lumping phenomenon, q/m

1. 서 론

최근 전자산업의 발전에 따라 FPD (flat panel display) 기술은 날로 성장을 하고 있으며 LCD (liquid crystal display) 및 OLED (organic light emitting diode) 등 자발광 혹은 내장된 광발생장치를 이용한 디스플레이 소자가 주도하고 있다. 또한 디스플레이 시장이 성장하면서 최근 몇 년간 자유롭게 말거나 휘어지는 플렉서블 디스플레이 (flexible display) 분야도 크게 발전하고 있다. 특히 전자종이는 플렉서

블 기관의 적용이 용이하며 발광형이 아닌 반사형 디스플레이로써 눈의 피로가 적어 가독성이 좋고 쌍안정성 메모리 효과로 화상을 유지하는데 낮은 소비전력을 가지기 때문에 주목을 받고 있다. 전자종이는 모토폰, kindle (e-book)과 같은 상품이 출시되었으며, 스마트 카드, POP (point of purchase), ESL (electronic shelf label) 시장이 형성되었다. 향후 전자종이의 응용분야로는 포스터, 대형광고판, 의료기기 등과 같은 신규어플리케이션 시장이 급성장할 것으로 전망된다.

전자종이의 구동방식으로 전기영동 (electrophoretic)현상의 이용한 마이크로캡슐형, 대전입자형 (charged particle), 전기습윤 (electrowetting), 액정 (liquid crystal), 전기변

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

색 (electrochromic) 방식 등이 있으며, 특히 대전입자형 디스플레이는 높은 대조비와 동영상 구현이 가능할 정도의 빠른 응답속도와 명확하게 구분되는 비선형 문턱 전압으로 수동형 (passive matrix) 구동이 가능하며, 전자책 등에서 단점으로 지적되고 있는 깜박거림 (flicker) 현상이 없는 것도 유리한 장점으로 이해되고 있다 [1-4].

한편 현재의 디스플레이 소자는 자발광형이 LCD 및 OLED이 주도하고 있기 때문에 반사형 디스플레이의 구동이론도 이에 기초하고 있다. 그러나 반사형 디스플레이는 외부에서 인가되는 전계에 의해 전하를 띤 입자가 물리적으로 이동하는 원리에 의해 이미지가 형성되기 때문에 입자가 투명전극 아랫부분에서 이미지를 형성하는 입자의 점유면적, 쌍안정성 효과를 측정할 수 있는 광의 세기, 개구율 등을 평가항목으로 적용하여야 하며, 특히 컬러구현에서는 자발광에서 사용되는 가산형이 아닌 채색을 기본으로 하는 감산형 광학이론을 기초로 평가되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 반사형 디스플레이의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있는 입자몽침으로 인한 화질저하 및 수명단축 현상을 구동원리에 기초하여 분석하고 그 개선방법을 논하고자 한다. 또한 패널의 광학 및 전기적 특성을 결정하는데 있어서 가장 중요한 파라미터로 보고되고 있는 적용될 패널구조에 적합한 대전입자의 전하량 대 질량비 (q/m)을 예측이 가능함을 보이고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 입자몽침 과정분석

입자몽침 현상은 전하를 띤 입자의 이동을 이용하여 투명전극의 내부표면에 이미지를 표현하는 방식의 반사형 디스플레이에서 관찰되는데 본 연구에서는 대전입자형 디스플레이에서 관찰되는 입자의 몽침현상을 논하고자 한다.

2.2 대전입자의 구동원리

대전입자형 디스플레이는 상부 및 하부전극, 입자의 crosstalk을 방지하기 위한 대개 부도체의 재료로 형성하는 격벽으로 둘러싸인 약 $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ (cell size) $\times 150 \mu\text{m}$ (cell gap) 이내의 좁은 공간에 주입된

대전입자가 상부 및 하부전극을 이동하면서 상부전극에 형성된 투명전극의 내부에 대전입자가 부착하는 현상을 이용하여 이미지를 형성하게 된다. 그러나 대전입자 뿐 아니라 모든 물질은 크든 작든 일정한 전하량을 가지고 있기 때문에 대전입자가 운동하는 변수를 완벽하게 해석하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 절에서는 입자의 크기에 비해 셀 공간이 무한공간이라고 가정하고 입자에 작용하는 힘들을 논하고자 한다.

먼저 상부 및 하부전극에 작용하는 전계에 작용하는 힘, 즉 전계에 의해 입자가 운동을 하게 되는 힘이 있다. 이 전계에 의해 투명전극의 내부표면에 형성된 이미지가 변환되게 되는데 전극 간에 작용하는 전계에 의해 대전입자는 운동에너지를 가지게 되어 $qV = (1/2)mv^2$, 즉 $(2q/m) \cdot V = v^2$ 으로 표현된다.

여기에서 q 는 전하량, V 는 인가전압, m 은 입자의 질량, 그리고 v 는 움직이는 입자의 속도이다. 이 식에서 알 수 있는 바와 같이 입자의 전하량이 클수록 구동 전압은 작아진다. 즉, 구동 전압을 작게 하기 위해서는 입자의 전하량을 증가시키는 것이 바람직하다 [5,6].

또한 대전입자는 도전성 물질에 부착될 경우 영상력 (image force)을 가지게 되는데 $F = q^2/16\pi\epsilon x^2$ 로 표현된다. 여기에서 F 는 영상력이며, ϵ 은 유전률, x 는 입자에 존재하는 전하와 영상 전하간의 거리이다. 이 식에서 보는 바와 같이 입자에 존재하는 전하가 클수록 영상력은 커지며 따라서 메모리 효과가 커진다. 동일한 대전입자의 질량을 고려하면 결국 q/m 값이 클수록 투명전극의 내부표면에 부착하려는 힘, 즉 메모리 효과는 커진다. 그러나 영상력이 커지면 현재의 이미지를 유지하는 효과는 개선되나 영상력을 극복하고 반대편 전극으로 운동하는데 필요한 에너지가 더욱 증가하게 되어 구동 전압이 증가하게 된다.

이는 q/m 과 구동 전압의 반비례관계를 보여준 앞의 식과 반대되는 결과를 가져온다. 즉, q/m 값을 크게 하면 영상력이 증가하여 뚜렷한 이미지를 유지하는데는 유리하나 구동 전압은 증가하게 된다. 또한 다음 장에서 보일 입자의 운동속도가 증가하게 되어 전극표면 또는 입자와의 충격량이 증가하게 되어 입자의 기계적인 손상을 가져온다 [5,6]. 따라서 q/m 값은 앞에서 보인 식을 모두 고려해서 최적화된 값을 가지게 해야 할 것이다. 위의 식을 이용하면 대전입자가 반대편 전극으로 이동하는데 걸리는 시간, 즉 응답시간이 계산되는데 이는 실험적으로도 측정이 가

능하다. 따라서 이러한 결과를 이용하면 설계된 패널 구조에 적합한 q/m 값을 예측할 수 있다. 그러나 정밀한 측정이 이루어져야 하기 때문에 본 연구에서는 다루지 않고 향후 연구로 남겨두고자 한다.

2.3 입자뭉침 분석

앞 절에서 보인 바와 같이 입자질량에 대한 전하량 (q/m)이 커지면 입자의 운동에너지가 증가하게 되어 반대편 전극 또는 다른 입자와의 충격량이 증가하게 되고 이는 입자가 충돌하면서 대전입자의 표면에 실리카와 함께 첨가되는 하전물질인 CCA (charge control agent)가 이탈하게 된다. CCA가 이탈하게 되면 입자 자신은 즉시 q/m 이 급격하게 작아지게 되며 따라서 위에서 논한 식에서 보인 바와 같이 운동을 하기 위해서는 큰 구동 전압을 필요로 하게 된다 [7,8].

또한 떨어져 나간 CCA는 셀 내부에 존재하게 되는데 다른 입자에 부착될 경우는 매우 큰 q/m 을 가지게 되어 훨씬 큰 운동에너지로 움직이게 되어 또 다른 큰 충돌을 야기하게 되거나 다른 입자를 끌어당겨서 결국 입자뭉침에 도달하여 결국 패널의 광학적 성능과 수명을 단축하게 된다. 이상의 과정에 의해 입자뭉침 현상을 보인 현미경 사진을 그림 1에 보였다.

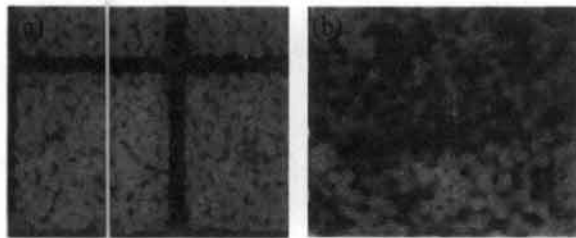


Fig. 1. Photographs of (a) nonlumped particles and (b) lumped particles.

그림 1에서 (a)는 같은 극성을 가진 대전입자를 셀에 채워넣은 것을 보인 현미경 사진으로 그림에서 보는 바와 같이 쿨롱의 힘에 의해 서로 밀치고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 입자가 충돌에 의해 기계적 혹은 전기적으로 손상을 받은 입자는 (b)에 보인 바와 같이 서로 뭉치게 된다. 이 입자뭉침은 반드시 반대극성과의 뭉침 뿐 아니라 같은 극성끼리도 뭉치는 현상은 쉽게 발견된다. 이는 앞서 설명한 하전물질 (CCA)의 이탈에서 기인하는 것으로 판단되며 많은

실험에서 관찰된 바 있다. 이러한 충돌에 의한 뭉침은 일정한 값 이상의 전압이 패널에 인가되었을 때 아주 짧은 시간에 일어나며 하전물질을 잃음에 따라 q/m 값이 크게 낮아져서 참고 문헌 8에서 보인 바와 같이 응답속도가 커지는 이른바 항복현상 (breakdown)이 관찰된다 [8]. 이러한 입자뭉침 현상은 패널의 수명을 단축시키는 가장 중요한 이유이다. 따라서 입자뭉침 현상을 피하면서 동시에 광학특성을 개선하기 위해서는 구동 전압이 낮아야 하며 구동 전압에서 모든 대전입자가 동시에 활성화되는 이른바 fully driving을 이루어야 한다. 모든 입자가 최소한의 구동 전압에서 동시에 운동하는 것은 패널의 광학특성을 개선할 뿐 아니라 입자의 충돌에너지를 감소시켜 입자의 기계적 손상에 의한 입자뭉침을 방지하는 효과가 있다.

3. 결과 및 고찰

대전입자 제조공정에서 이미 q/m 분리공정에 의해 일정 분포의 q/m 값을 가진 대전입자를 선별하지만 이후 공정에 의해 혹은 패널에 주입하는 공정에 의해 입자에 존재하는 전하량은 변하게 된다. 따라서 최종적으로 셀 내부에 주입되는 입자는 원래의 q/m 값과 다른 값을 가질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최종 공정에서 입자의 운동과 동일한 구조를 만들어서 입자를 주입하는 공정을 고안했으며 이 공정에 의해 입자를 필터링함과 동시에 입자에 기계적 및 전기적 손상없이 주입하였으며 그림 2에 개략도를 보였다.

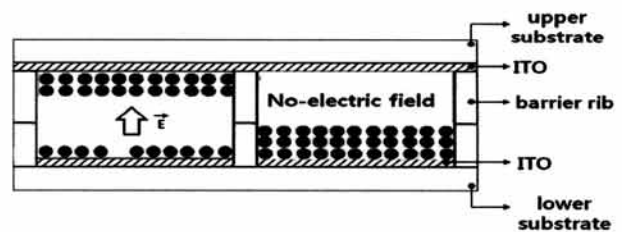


Fig. 2. Schematic illustration of particle filtering method.

그림 2는 본 연구에서 적용한 입자주입 방법을 보인 것으로, 패널구조는 상부 및 하부기판에 격벽을 따로 형성하여 aspect ratio를 개선하는 구조를 적용하였다 [9]. 하부기판에 입자를 주입한 다음 상부 및 하부에 전압을 인가하여 특정 전압에 상부기판으로 운동한 입자를 채택하도록 하는 방법이다. 이 공정은

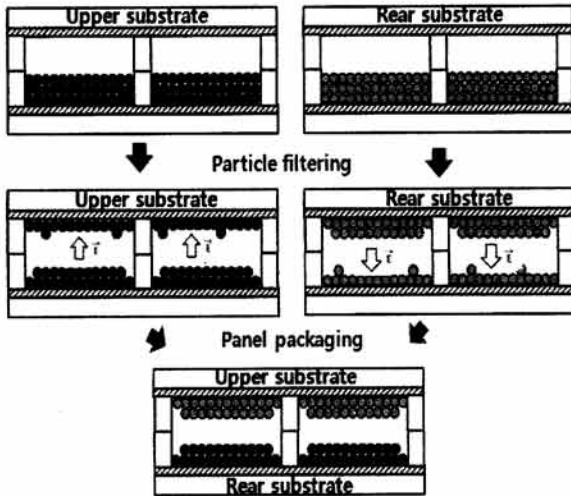


Fig. 3. Schematic illustration of particle putting process by filtering method.

(+)전하를 띤 검정색 입자에 대해 진행하고 또 다른 공정에 의해 반대 방향의 전계를 인가하여 (-)전하를 띤 흰색 입자에 대해 진행한 후 두 기판을 합착하여 하나의 패널을 완성한다. 본 실험에서 사용한 입자는 흰색과 검정색 입자의 지름 (ϕ)은 $10\ \mu\text{m}$ 이고, q/m 은 $4.5\ \mu\text{C/g}$ 이며, 사용된 패널의 셀 사이즈는 $150\ \mu\text{m} \times 150\ \mu\text{m}$ 이다. 한편 셀 간격은 스페이서를 포함하여 $120\ \mu\text{m}$ 이며, 입자 활성화를 위한 전계는 $0.2\ \text{V}/\mu\text{m}$ 를 사용하였으며 이 전계에서 운동하지 않은 입자는 20% 이하였다. 입자의 필터링은 실제 패널과 유사한 구조를 사용하였으며, 그 공정은 그림 3에 보였다. 그림에서 보는 바와 같이 실제 패널을 제작하는 공정은 단순하며 반도체 공정에 비해 훨씬 큰 패턴을 사용하기 때문에 많은 시간을 요하지는 않는다. 또한 동일한 기술로 패널을 제조할 경우 격벽의 폭은 aspect ratio에 의해 격벽의 폭이 절반으로 감소하기 때문에 개구율의 개선에 의해 광학적 특성이 우수하다 [7].

앞서 설명한 q/m 값의 불균일한 분포를 가진 입자가 주입된 패널의 경우 모든 입자를 구동하기 위해서는 높은 전압을 인가하게 되는데 이 경우 입자 충돌에 의해 뭉침현상을 야기하게 될 뿐 아니라 상대적으로 높은 값의 q/m 입자는 낮은 전압에서도 움직이게 되어 문턱전압을 불분명하게 하는데 이러한 현상을 보다 정밀하게 분석하기 위해 투명전극의 하부에 존재하는 입자의 점유 면적을 평가하는 방법을 활용하였다 [10-12].

4. 결론

입자의 필터링 효과를 분석하기 위해 기존의 방법을 이용한 입자주입 공정을 적용한 패널과 본 논문에 의한 주입 공정을 적용한 패널의 광학특성을 측정하였으며 그 결과를 그림 4에 보였다. 이 그림에서 수직축은 sub-pixel의 면적에 대하여 흰색 입자가 차지하는 면적을 백분율로 나타낸 것이다. 흰색 입자의 점유 면적은 현미경의 출력 신호에서 흰색 입자의 폐곡면의 면적을 계산하는 프로그램으로 간단하게 얻을 수 있으며 격벽의 면적을 제외한 실제 sub-pixel에 대한 입자의 점유 면적을 나타내기 때문에 반사형 디스플레이에서 활성화된 입자를 평가하는데 적합하다.

이 방법은 검정색 입자에 대해서도 마찬가지로 방법으로 측정된다 [13]. 그림에서 filled rectangle 데이터는 본 연구의 필터링 공정을 따른 것이며 empty rectangle 데이터는 필터링을 거치지 않은 것이다. 이 그림에서 본 연구에 의한 공정 (filtering process)의 경우는 $40\ \text{V}$ 정도에서 거의 모든 입자가 활성화되어 포화상태에 이르는 것을 확인할 수 있다. 필터링 공정에 의해서 필터링 전압 이하에서 움직인 입자는 미리 제거되었으며 필터링 전압에서 활성화된 입자만을 취했기 때문에 이 공정에 의해 주입된 입자는 구동 전압에서만 움직이는 입자로 이루어져 $40\ \text{V}$ 이하에서 움직이는 입자는 거의 없으며 이 전압에서 거의 모든 입자가 움직이는 이른바 fully driving으로 비선형 특성이 뚜렷하다. 즉, 문턱 전압과 구동 전압이 거의 일치하여 구동 전압이 최저로 확립되었다. 이 경우 $40\ \text{V}$ 로 패널을 구동할 경우 수명은 크게 개선된다.

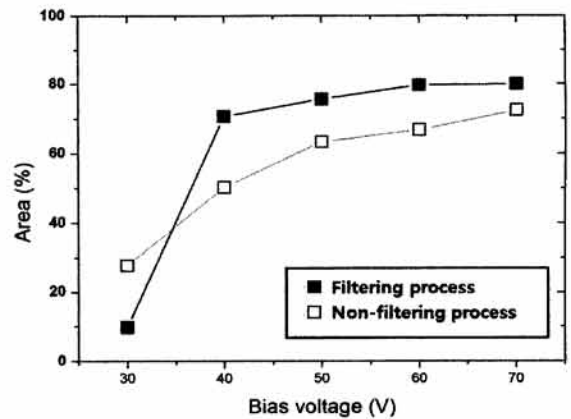


Fig. 4. Comparison of two particle putting processes.

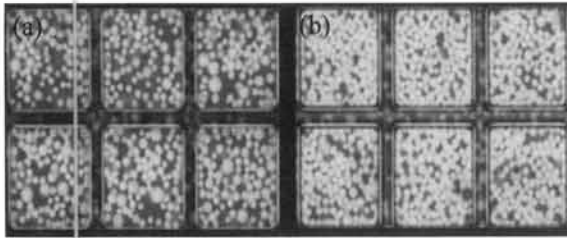


Fig. 5. Movements of white particles by two particle putting processes.

한편 필터링 공정을 사용하지 않은 주입 공정(non-filtering process)으로 제작된 패널의 경우 구동 전압을 정의하기가 어렵게 된다. 패널의 수명을 고려하여 50 V로 구동 전압을 정할 경우 그림 5를 참조하면 움직이지 않은 입자가 필터링 공정을 적용했을 경우에 비해 20% 이상 존재하기 때문에 광학특성이 바람직하지 못하게 된다. 예상하는 바와 같이 구동 전압을 60 V 이상으로 정할 경우 과전압이 걸리기 때문에 앞서 설명한 바와 같이 입자의 과도한 충돌에 의해 입자몽침에 의해 패널수명이 크게 단축된다. 이 경우는 30 V에서 운동을 시작하는 비교적 큰 값의 q/m 을 가진 입자가 몽침현상을 주도한다.

이상에서 보인 입자의 구동에 의한 광학특성을 현미경으로 관찰하였으며 그림 5에 보였다. 그림에서 흰색 입자가 차지한 면적을 계산한 결과 필터링 공정을 하지 않은 패널의 경우 흰색 입자의 점유면적은 (a)에 보인 바와 같이 50.3%였으며 필터링 공정을 적용한 경우는 (b)에 보인 바와 같이 70.6%였다. 단순 대비로 볼 경우 20.3%의 면적 차가 계산되며 이는 격벽 부분을 반영하지 않은 입자만의 점유 면적을 의미하며 반사율에 비례한다.

결과적으로 필터링 방법에 의한 입자주입 공정의 추가로 대전입자형 디스플레이에서 심각한 문제로 제기되는 문제인 수명을 개선할 수 있는 방법으로 판단되며 이는 낮은 구동 전압과 fully driving에서 기인함을 확인하였다.

반사형 디스플레이의 가장 큰 문제점으로 지적되고 있는 입자몽침으로 인한 화질저하 및 수명단축 현상을 설명하기 위해 폐쇄된 공간에 존재하는 대전입자에 작용하는 힘을 분석하여 구동 전압과의 관계를 보

였으며, 영상력과 운동에너지를 계산하여 패널의 광학 및 전기적 특성을 결정하는데 있어서 가장 중요한 파라미터인 대전 입자의 q/m 을 예측할 수 있음을 보였다. 패널 내부에 존재하는 입자의 q/m 값은 일정한 범위에 있어야 하나 공정 중에 그 값이 변하므로 그 값을 일정하게 하기 위해 필터링 공정을 추가하였으며 그 결과 구동 전압이 비선형으로 이루어져 문턱전압과 거의 일치하게 되었다. 또한 패널의 화질과 수명을 결정하는 입자몽침을 방지하게 하는 fully driving을 이룰 수 있음을 광학특성 및 운동하는 입자의 비율로부터 확인하였다.

REFERENCES

- [1] J. Heikenfeld, P. Drzaic, J. S. Yeo, and T. Koch, *Journal of the SID*, 19, 135 (2011).
- [2] R. Hattori, S. Yamada, N. Nihei, and R. Sakurai, *SID DIGEST*, 04, 136 (2004).
- [3] T. Kitamura, *International Display Workshops*, 06, 587 (2006).
- [4] R. Sakurai, S. Ohno, Y. Masuda, and R. Hattori, *SID Digest* (Tech. Papers, San Francisco, USA, 2006) p. 1922.
- [5] B. H. Kim, S. W. Park, and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, 22, 86 (2009).
- [6] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, 24, 669 (2011).
- [7] D. J. Lee, R. E. Sloper, Y. H. Jeon, S. K. Han, S. Lee, K. H. Choi, W. H. Huh, and Y. C. Kim, *SID DIGEST*, 1523 (2011).
- [8] R. J. Nash, H. Associates, J. T. Bickmore, M. L. Grande, T. Vasta, and R. N. Muller, *NIP24 and Digital Fabrication*, 21 (2008).
- [9] U. Rohr, K. Richter, and C. P. GmbH, *NIP24 and Digital Fabrication*, 26 (2008).
- [10] D. J. Lee, I. S. Hwang, and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, 21, 63 (2008).
- [11] D. J. Lee and Y. C. Kim, *Journal of the Knowledge and Information Systems*, 8, 1376 (2007).
- [12] V. M. Moren, Moreno-Villa, M. A. Ponce-Velez, E. Valle-Jaime, and J. L. Fierro-Chavez, *IEEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution*, 145, 675 (1998).
- [13] C. W. Kim and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, 23, 691 (2010).