

대전입자형 디스플레이의 입자주입 방법에 의한 구동특성 연구

이동진¹, 김영조^{2,a}

¹ 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학과

² 청운대학교 전자공학과

A Study on Driving Characteristics by Particle-inserting Method in Charged Particle Type Display

Dong-Jin Lee¹ and Young-Cho Kim^{2,a}

¹ Department of Electrical and Computer Engineering, The University of Seoul, Seoul 130-743 Korea

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

(Received January 2, 2012; Revised January 18, 2012; Accepted January 19, 2012)

Abstract: We analyzed the movement and response time of charged particles according to particle-inserting methods to understand the variation of quantity of q/m of charged particles, which is a very important factor in electrical and optical characteristics of the charged particle type display, such as lifetime, response time, contrast ratio, reflectivity, etc. For our study we used white and black charged particles of which diameter is $20 \mu\text{m}$, prepared pieces of ITO(indium tin oxide) coated glass substrate, and formed ribs on the glass substrates. The width of a rib is $30 \mu\text{m}$ and the cell size is $220 \mu\text{m} \times 220 \mu\text{m}$. As the particle-inserting methods, the white and black charged particles were respectively inserted into a front and a rear panel with a very small electric field and also the mixture of the white and black charged particles were inserted into a rear panel. As a result of the driving characteristics of charged particles, the factors about variation of quantity of q/m according to the particle inserting method was experimentally demonstrate, showing very different driving voltage, response time, the particle movement, etc.

Keywords: Response time, CCA, Silica, Charged particle, q/m

1. 서론

정보기술의 발전과 함께 유·무선 통신을 이용한 다양한 콘텐츠 (contents)산업의 성장과 더불어 공간적인 제약에서 벗어나 시간과 장소에 구애받지 않는 유비쿼터스 (ubiquitous) 시스템이 최근 들어 구축되기 시작하였다. 이를 위하여 무선통신 기술과 축전지 기술을 적용한 휴대용 단말기들이 사용되고 있으며, 디

스플레이 기술로써 소자 내부에 내장된 광발생장치 혹은 자발광하는 빛의 방출을 제어하여 이미지를 나타내는 LCD (liquid crystal display)와 OLED (organic light emitting diode)가 대부분 적용되고 있다. LCD와 OLED가 적용된 디스플레이는 소자의 두께가 얇고 가벼우며 구현된 이미지가 선명한 이점이 있다. 그러나 이미지 구현을 위하여 지속적으로 빛을 방출해야 하므로 전력소모가 커 장시간의 사용이 어려우며, 강한 외부광원에 노출 시 이미지 구현을 위해 소자에서 방출되는 빛이 외부광원에 의해 간섭받

아 명확한 이미지를 보기가 어려운 문제가 있다. 또한 눈에 편광된 빛이 직접적으로 노출되어 눈의 피로를 쉽게 느끼게 한다.

전자종이는 이미지 구현을 위하여 외부의 광원을 이용하여 눈의 피로가 적고 가독성이 좋으며, 높은 쌍안정성으로 인하여 구현된 이미지를 유지하는데 낮은 소비전력이 필요함으로써 별도의 충전 없이도 장시간 사용이 가능하다. 전자종이의 구동방식으로 마이크로캡슐형 (microcapsule), 마이크로컵 (microcup), 액정 (liquid crystal), 전기습윤 (electrowetting), 대전입자형 (charged particle), 액정 (liquid crystal), 트위스트볼 (twistball), 전기변색 (electrochromic) 방식 등이 있다 [1-3]. 특히 전하를 띠는 대전입자의 움직임을 제어하여 이미지를 구현하는 대전입자형 디스플레이는 높은 대조비와 빠른 응답속도로 인하여 계조범위가 넓고 명멸 (flicker) 현상이 없으며, 높은 쌍안정성과 명확하게 구분되는 비선형의 문턱전압으로 소비전력이 낮고 능동형 (active matrix)과 수동형 (passive matrix) 구동이 모두 가능하다. 대전입자형 디스플레이의 전기 및 광학특성은 패널구조와 함께 전하를 띠는 대전입자의 전하량/질량비인 q/m 에 의하여 결정된다 [4-6]. 대전입자는 입자주입공정 및 구동 시 마찰과 더불어 외부의 기계적이고 전기적인 힘에 의해 대전입자가 지닌 고유한 전하량을 잃거나 의도하지 않는 전하를 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 입자의 배열, 배치 그리고 주입방법에 따른 대전입자형 디스플레이의 구동특성을 분석하기 위하여 대전입자를 전기 및 기계적인 힘으로 혼합 및 분리 주입하여 인가된 전압에 의한 대전입자의 운동특성을 관찰 및 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 대전입자의 구동원리

대전입자형 디스플레이는 그림 1에서 보이는 바와 같이 상부 및 하부전극 그리고 격벽으로 둘러싸인 패널 내부에 대조되는 컬러와 양전하와 음전하를 띠는 대전입자들이 주입된 구조로서 상부의 투명전극에 부착된 입자들의 컬러를 통하여 외부로부터 입사된 광원의 특정 파장을 흡수하고 반사하여 이미지표시를 한다. 이때 두 전극 사이에 형성된 전계의 방향에 따라 대전입자들의 움직임이 제어된다. 대전입자가 운동시키기 위하여 두 전극에 전계가 형성 시 대전입자

는 운동에너지를 가지게 되는데 $qV = (1/2)mv^2$ 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 대전입자의 전하량/질량비인 q/m 과 인가전압으로 대전입자의 응답속도를 조절할 수 있다.

대전입자형 디스플레이에 있어서 구현된 이미지를 별도의 인가전압 없이도 유지하는 쌍안정성은 전하를 띠는 대전입자가 도전성 물질에 부착될 경우 작용하는 영상력 (image force)에 의해 가지게 되며, 이때의 영상력은 $F = q^2/16\pi\epsilon x^2$ 로 표현된다. 여기에서 F 는 영상력이며, ϵ 은 유전률, x 는 입자에 존재하는 전하와 영상전하 간의 거리이다. 이 식에서 보는 바와 같이 입자에 존재하는 전하가 클수록 영상력은 커져 메모리 효과의 향상을 기대할 수 있으나 커진 영상력을 극복하고 반대편 전극으로 운동하는데 필요한 에너지가 더욱 증가하게 되어 구동전압의 증가를 야기시킨다.

위의 두 식은 구동전압에 있어서 대전입자의 q/m 값이 반대되는 결과를 가져온다. 즉, q/m 값이 크면 초기에 전극표면에 부착된 대전입자와 전극 사이에 영상력이 커져 높은 쌍안정성을 가지지만 높은 구동전압이 요구되는 한편, 전극표면에서 대전입자가 벗어나는 순간부터 거리에 비례하여 영상력이 약화된 대전입자가 입자가 지닌 고유한 q/m 에 의해 운동하게 된다. 이때 높아진 구동전압에 의해 대전입자 운동속도는 더욱 증가하게 되어 전극표면과 입자들 사이의 강한 충돌로 인하여 입자와 전극의 손상과 함께 입자가 지닌 고유한 q/m 잃을 수 있다. 따라서 대전입자는 낮은 구동전압과 쌍안정성을 안정적으로 유지할 수 있도록 최적화된 입자구조와 q/m 값을 가지게 해야 한다.

위의 두 관계식과 더불어 그림 1에서 보이는 바와 같이 실제의 소자에 있어서 두 전극 사이에 상반된 전하를 띠는 대전입자들이 함께 존재하므로 두 대전입자들 사이에 작용하는 힘도 함께 고려되어야 한다. 대전입자는 같은 전하를 띠는 대전입자가 인접하면 척력이 작용하며 반대전하를 띠는 대전입자가 인접하면 인력이 작용된다. 이 힘의 크기는 대전입자들 사이의 거리와 q/m 값에 의해 결정된다. 따라서 상반된 전하를 띠는 대전입자들의 위치와 배열에 따라 대전입자들 사이에 작용하는 힘이 달라지며 더불어 대전입자들과 전극 사이의 영상력에도 영향을 준다. 이와 같은 이유로 대전입자가 전극표면에 접촉하여 영상력

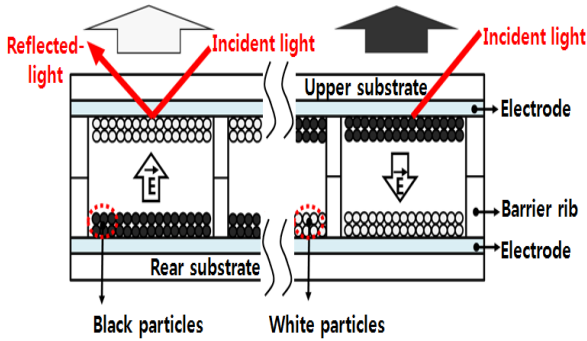


Fig. 1. Driving principle of the charged particle type display.

이 작용되기 전 입자주입방법과 대전입자들의 배열과 배치를 달리하여 구동하면 대전입자들의 운동특성이 확연히 달라질 것이다.

대전입자들의 배열과 배치 그리고 주입방법에 따른 대전입자의 구동특성을 확인하기 위하여 ITO (indium tin oxide)가 코팅된 유리기판에 격벽 폭 30 μm , 셀 크기 220 $\mu\text{m} \times 220 \mu\text{m}$ 인 패널을 제작하여 상부 및 하부 패널로 사용하였으며, 음전하를 띠는 흰색 대전입자와 양전하를 띠는 검은색 대전입자를 사용하였다. 이때, 두 대전입자들의 지름은 평균 20 μm 이며, 입자의 q/m 또한 동일하였다.

그림 2는 대전입자를 주입하는 방법을 나타낸 단면도이다. 그림 2의 (a)는 대전입자들을 충전판을 이용하여 기계적인 힘으로 주입하는 방법으로서 상반된 전하를 띠는 흰색과 검은색 대전입자들은 상부 및 하부 패널에 각각 분리하여 주입하게 된다. 그림 2의 (b)는 그림 (a)와 동일한 방법으로 두 대전입자들을 각각 주입하나 기계적인 힘 대신 약 0.2 V/ μm 이하의 전계를 형성하여 전기적인 힘으로 대전입자들 주입한다 [7]. 그림 2의 (c)는 1:1 비율로 혼합된 흰색 및 검은색 대전입자들을 기계적인 힘으로 주입하는 방법으로서 하부패널에만 혼합된 입자들이 주입된다.

본 연구를 위해 위의 3가지 주입방법으로 대전입자들의 주입량과 충전비율 그리고 패널의 셀 간격이 동일한 패널을 제작하였으며, 이때 그림 2의 (a)와 (b) 방식에서 사용된 상부 및 하부패널의 격벽 높이는 동일한 반면 대전입자들의 주입량을 조절하기 위하여 그림 2의 (c) 방식에서 사용된 하부패널의 격벽 높이를 2배로 형성하였다. 또한 셀 내부의 대전입자들의

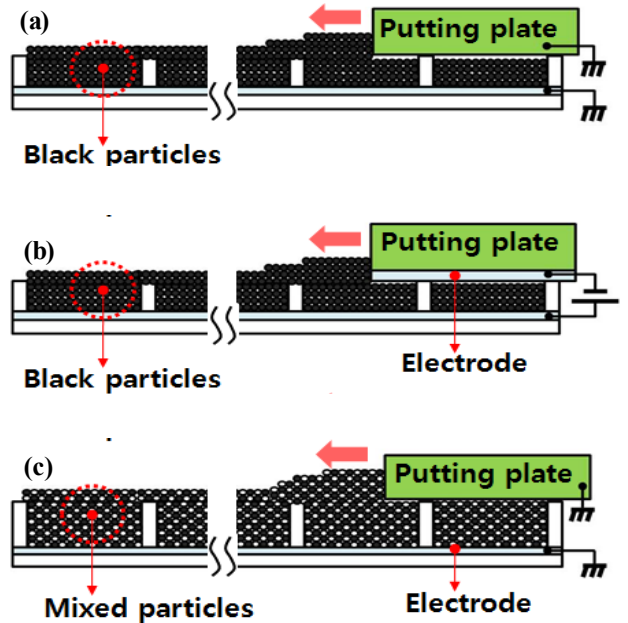


Fig. 2. Particle-inserting methods. (a) inserts one type of charged particles(white or black) into a front and a rear panel by mechanical force respectively, (b) inserts one type of charged particles into a front and a rear panel by a small electric field respectively, and (c) inserts both charged particles (white and black) into a rear panel by mechanical force.

충전비율과 셀 간격을 조절하기 위하여 두께가 다른 스페이서를 이용하여 조절하였으며, 셀 내부에서 대전입자들이 차지하는 충전비율은 60%이며 전체 셀 간격은 140 μm 이다.

대전입자들의 주입이 완료된 후 패널들을 패키징한 후 대전입자들의 운동특성을 분석하기위해 5 V 단위로 전압을 증가시켜 광학현미경으로 대전입자들의 움직임을 관찰하였으며, 대전입자들의 응답특성을 확인하기 위하여 광원으로 직진성이 강한 레이저와 검출기로 빛에 민감한 포토다이오드를 사용하여 인가된 전압과 전계의 방향에 의해 변화하는 대전입자들의 움직임을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

대전입자들을 주입 시 상반된 전하를 띠는 대전입자들이 혼합된 대전입자들은 입자들 사이의 인력으로

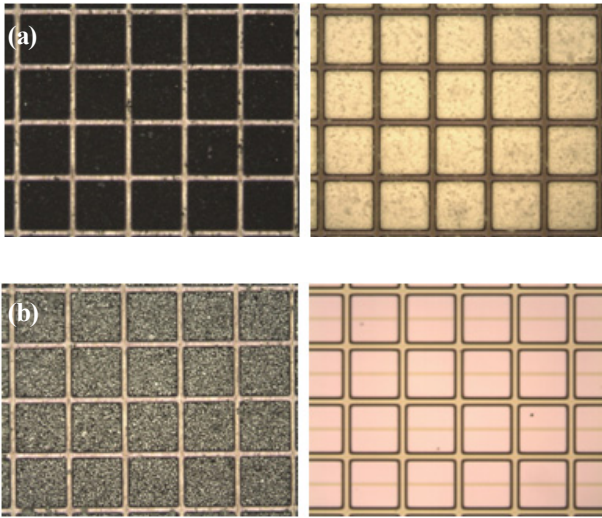


Fig. 3. Charged particles inserted in cells of the panel. (a) shows black particles inserted in a rear panel and white particles inserted in a front panel and (b) shows the mixture of the white and black particles inserted in a rear panel.

인하여 유동성이 떨어진 반면에 같은 전하를 띠는 대전입자들은 척력으로 인하여 유동성이 뛰어난 분리주입 방식이 더욱 안정적으로 패널의 셀에 주입되었다.

그림 3은 기계적인 힘으로 대전입자들을 상부 및 하부패널에 각각 주입된 패널과 하부패널에 혼합된 대전입자들이 주입된 것을 패키징 (packaging) 전에 광학현미경으로 관찰한 사진이다.

위의 3가지 주입방법으로 대전입자들을 주입하여 패널을 제작한 후 전압을 5 V 단위로 증가하여 대전입자들을 움직임을 관찰한 결과 그림 2의 (b)와 (c) 방식으로 대전입자들을 주입한 패널들은 30 V에서부터 대전입자들이 운동하기 시작한 반면에 그림 2의 (a)방식으로 대전입자들을 주입한 패널은 200 V가 넘어서야 대전입자들이 운동하기 시작하였으며, 더욱 증가된 전압에서도 운동하는 대전입자들의 수가 극히 적었다. 이는 대전입자들을 주입 시 가해지는 기계적인 힘과 전극표면, 격벽표면 그리고 같은 전하를 띠는 대전입자들 사이의 강한 마찰력에 의해 의도하지 않은 전하를 대전입자들이 얻어 나타난 현상으로 판단된다. 즉, 대전입자가 지닌 고유한 q/m 의 변화에 의해 대전입자와 전극 사이의 커진 영상력에 의해 나타난 현상일 것이다. 그 근거로 대전입자들을 상부 및 하부패널로 각각 분리하여 기계적인 힘을 최소화

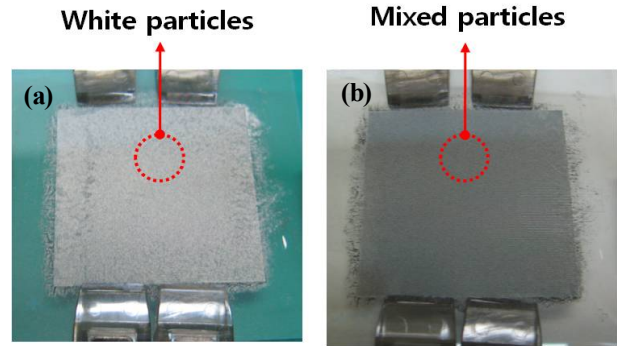


Fig. 4. Movements of white particles at biased voltage. (a) shows white particles moved onto the electrode of the front panel and (b) shows mixed particles clung onto the electrode of the rear panel.

하여 전기적인 힘으로 주입한 패널의 경우 상부 및 하부전극의 표면에 부착된 대전입자들이 상대적으로 저전압에서 운동하기 시작하였으며, 상반된 전하를 띠는 대전입자들을 혼합하여 하부의 패널에 기계적인 힘으로 주입한 경우에는 그림 4의 (b)에서 보인 바와 같이 하부전극 표면에 부착된 대전입자들은 100 V 이상의 전압에서도 거의 운동하지 않는 반면에 그림 4의 (a)에서 보인 바와 같이 두 번째 층 이상의 대전입자들은 상부전극의 표면으로 30 V에서부터 운동하기 시작하여 증가된 전압의 세기만큼 운동하는 입자의 수도 증가하였으며, 상부전극의 표면으로 운동하는 대전입자들은 동일한 인가전압에 의해 지속적으로 운동하였다. 이 실험결과로 입자주입 시 전극표면에 직접적으로 접촉하는 첫 번째 층의 대전입자들이 상대적으로 가해지는 물리적인 힘과 마찰력의 영향을 가장 많이 받으며, 입자의 배열 상 상대적으로 전극과의 영상력에 자유로운 두 번째 층 이상의 대전입자들은 입자가 지닌 고유한 q/m 의 값만큼 운동할 수 있어 전압을 인가 시 물리적인 힘을 최대한 배제하여 고유한 q/m 유지하여 운동을 한다는 것을 예측할 수 있다. 따라서 대전입자가 지닌 고유한 q/m 을 무시한 채 기계적인 힘으로만 대전입자를 주입하는 경우 전극표면에 부착된 대전입자는 의도하지 않은 전하를 얻어 영상력이 커짐과 동시에 높은 구동전압을 요구하게 되어 저전압에서 운동할 수 있는 대전입자의 운동속도를 증가시키고 운동하는 대전입자의 진로를 막아 대전입자들의 수명저하를 초래할 뿐만 아니라 입자들의 고유한 q/m 의 변화를 나타낼 것으로 판단된다.

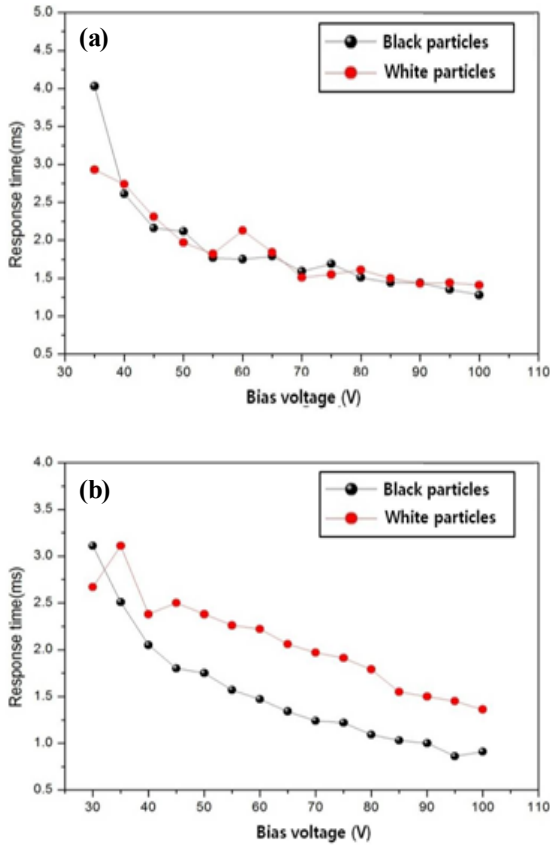


Fig. 5. Response time of white and black particles by two particle-inserting processes. (a) is the response time of charged particles inserted by the inserting method of fig. 2(b) and (b) is the response time of charged particles inserted by the inserting method of fig. 2(c).

그림 5는 양전하를 띠는 검은색 대전입자와 음전하를 띠는 흰색 대전입자의 배치가 다르게 그림 2의 (b)와 (c)의 방식으로 주입된 대전입자들의 응답속도를 나타낸 그래프로써 그림 2의 (a)방식은 운동하는 입자 수가 극히 적어 운동속도를 측정할 수 없으므로 응답속도 분석에서 배제하였다. 그림 5의 (a)의 흰색과 검은색 대전입자들의 응답속도는 상대적으로 비슷한 범위에서 운동하는 반면에 (b)의 흰색과 검은색 대전입자들은 확연한 응답속도의 차를 나타내었다. 두 패널들이 동일한 대전입자를 사용하여 같은 입자의 충전비율과 셀 크기를 가지고 있다는 것을 고려하였을 때 (a)의 흰색과 검은색 대전입자들은 비슷한 q/m 을 가진 반면에 (b)의 흰색과 검은색 대전입자들은 q/m 차가 크다는 것을 알 수 있다. 대전입자의 응

답속도는 q/m 에 의해 의존한다는 것은 앞서 위의 운동에너지 관계식에서 증명하였으며, 이는 전기적인 힘으로 주입된 (a)의 방식이 기계적인 힘으로 주입된 (b)의 방식보다 상대적으로 대전입자가 지닌 고유한 q/m 을 안정적으로 유지하며 주입된다는 것을 의미한다.

한편 그림 5에서 (a)의 흰색과 검은색 대전입자들은 증가되는 인가전압에 의해 전체적으로 비선형적이고 불규칙적인 응답속도를 나타낸 반면에 (b)의 대전입자들의 응답속도는 45 V 이후 증가되는 전압에 선형성을 나타내었다. 이는 주입공정과 입자혼합과정에 의해 기인하는 것으로 판단된다. 대전입자는 하전물질인 CCA (charge control agent)와 함께 유동성 및 전하량 조절을 위하여 대전입자의 표면에 실리카가 첨가되는데, 외부에서 가해지는 강한 기계적인 힘과 전기적인 힘에 의한 충격에 쉽게 이탈되어 대전입자가 지닌 전하를 잃거나 이탈된 물질이 다른 대전입자에 흡착되어 전하를 얻어 고유한 q/m 의 변화를 초래할 수 있다. 따라서 상반된 전하를 상부 및 하부패널에 각각 분리 주입하여 구동 전까지는 두 대전입자들이 접촉하지 않는 (a)의 방식은 주입과정 중 떨어지거나 간 CCA 및 외첨제 (silica) 등이 소자를 구동하면서 상반된 전하를 띠는 대전입자들의 접촉으로 인하여 전하를 잃거나 얻을 수 있으며, 또한 증가된 인가전압에 의하여 충돌 시 대전입자들에 가해진 충격에 의해 CCA 및 외첨제의 손실을 일으킬 것이다. 반면에 (b)의 경우에 상반된 전하를 띠는 대전입자들을 혼합과정 중에 가해지는 강한 물리적인 힘과 입자들의 충격으로 인하여 전하의 이탈현상이 구동 전에 충분히 이루어져서 구동 후 대전입자들 간의 충돌에도 상대적으로 전하의 이탈현상이 극히 적을 것이다. 이와 같은 이유로 인하여 (a)의 흰색 및 검은색 대전입자들의 응답속도는 전체적으로 비슷한 반면에 (b)의 흰색 및 검은색 대전입자들은 입자의 혼합과정 중 발생한 전하량의 변화로 인하여 응답속도의 차이를 나타내는 것이다.

위의 실험결과들에 의하면 전기적인 힘에 상반된 전하를 띠는 대전입자들을 분리하여 주입하는 방식의 경우 대전입자가 지닌 고유한 q/m 의 변화를 최소화시키고 전극과의 영상력을 안정적으로 유지할 수 있지만 응답속도 측면에서는 신뢰성과 재현성을 확보하기가 어려울 것이다. 대전입자형 디스플레이의 응답속도는 소자의 계조표현 및 구동펄스에 직접적인 영향을 주기 때문에 안정적인 구동 및 광학특성을 유지

하기 위해서는 응답속도의 신뢰성과 재현성이 반드시 확보되어야 한다. 반대로 대전입자를 혼합하여 기계적인 힘으로 주입하는 방식은 상대적으로 신뢰성 있는 응답속도를 확보할 수 있지만 고유한 q/m 의 변화를 일으켜 특정 대전입자들의 운동특성을 약화시킬 가능성이 크고 주입 시 강한 영상력에 의해서 하부전극 표면에 붙들려 있는 대전입자들의 경우 활발히 운동하는 대전입자들의 진로를 막아 대전입자의 수명을 단축시키며, 운동하지 않는 입자의 수만큼 대전입자형 디스플레이의 광학특성을 하락시킬 것이다. 이를 보완하기 위해서는 전극표면에 부착되어 운동하지 않는 대전입자들의 비율과 혼합과정 중 발생하는 대전입자들의 q/m 변화를 고려한 대전입자의 충전량 및 q/m 의 조절이 필요하다고 판단되며, 전기적인 힘으로 입자를 주입하는 방식과 입자를 혼합하여 주입하는 방식의 이점이 결합된 주입공정 전에 대전입자를 혼합하여 전계에 의해 대전입자들을 필터링하여 주입하는 방식이 하나의 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다 [8].

4. 결 론

대전입자형 디스플레이의 전기 및 광학특성에 직접적인 영향을 주는 요소인 대전입자는 주입 시 가해지는 힘과 입자의 배열에 의해 전극과의 영상력이 달라지며, 소자의 전기 및 광특성에 직접적인 영향을 미친다.

이와 관련하여 상부 및 하부패널에 배치에 따라 대전입자들의 운동특성이 달라지는 것을 관계식과 실험 결과로 이를 증명하였다.

또한 분리주입 및 혼합주입방법에 의한 대전입자의 q/m 변화를 응답속도로 예측 및 분석하였으며, 대전입자들이 지닌 고유한 q/m 을 최대한 유지하여 안정적으로 운동할 수 있는 주입방법에 대안을 본 연구의 3가지 주입방법에 따른 대전입자의 운동특성을 바탕으로 제시하였다.

REFERENCES

- [1] J. Heikenfeld, P. Drzaic, J. S. Yeo, and T. Koch, *Journal of the SID*, **19**, 129 (2011).
- [2] R. Hattori, S. Yamada, Y. Masuda, and N. Nihei, *Journal of the SID*, **12**, 175 (2004).
- [3] T. Kitamura, *International Display Workshops*, **06**, 587 (2006).
- [4] B. H. Kim, S. W. Park, and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, **22**, 86 (2009).
- [5] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, **22**, 169 (2009).
- [6] C. W. Kim and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, **23**, 691 (2010).
- [7] D. J. Lee, I. S. Hwang, and Y. C. Kim, *J. KIEEME*, **21**, 63 (2008).
- [8] D. J. Lee, R. E. Sloper, Y. H. Jeon, S. K. Han, S. Lee, K. H. Choi, W. S. Huh, and Y. C. Kim, *SID Symposium Digest Tech. Papers*, **11**, 1523 (2011).