

## 싱글입자-마이크로캡슐형 전자종이의 셀갭 차이에 따른 구동 특성평가

송진석, 김영조<sup>a</sup>

청운대학교 전자공학과

### Evaluation of Driving Properties by Cell-gap Difference of Single Particle-Microcapsule Type Electronic Paper

Jin-Seok Song and Young-Cho Kim<sup>a</sup>

Electronic Engineering, Chungwoon University, Incheon 402-803, Korea

(Received October 3, 2014; Revised July 6, 2015; Accepted July 9, 2015)

**Abstract:** We fabricate a single particle-microcapsule type electronic paper using electrophoresis, which is different with a reported dual particle-microcapsule type and of which electro-optical researches are not reported. So we analyzed a basic properties, such as reflectivity, response time, and driving voltage. Our display panels having various cell-gaps of 30  $\mu\text{m}$ , 34  $\mu\text{m}$ , 38  $\mu\text{m}$ , 42  $\mu\text{m}$ , and 46  $\mu\text{m}$  are inspected. As a results, a driving voltage is defined to 10 V and desirable cell-gap is 30  $\mu\text{m}$  or 34  $\mu\text{m}$ . Considering a mechanical strength, the optimum cell-gap is 34  $\mu\text{m}$  for the single particle type electronic paper.

**Keywords:** E-paper, Single-microcapsule, Electrophoresis, Response time, Reflectivity

#### 1. 서 론

발광형 디스플레이는 소자의 내부로부터 방출되는 빛을 제어하여 이미지를 표시하는 소자로 우수한 색재현성을 바탕으로 휴대형 단말기를 비롯한 대부분의 디스플레이에 적용되고 있다. 그러나 발광형 디스플레이는 이미지를 표시하기 위해 높은 소비전력이 필요하며 표시된 이미지를 보기 위해 방출되는 빛이 장시간 안구에 노출될 경우 피로를 느끼게 된다. 또한 태양광 아래에서와 같이 외부 빛의 세기가 디스플레이에서 방

출되는 빛보다 강한 경우에는 선명한 이미지를 볼 수 없다는 단점이 있다 [1]. 이러한 단점을 극복하기 위한 디스플레이 소자로 반사형 디스플레이가 제안되어 왔으며, 저전력 구동, 넓은 시야각, 얇은 모듈 두께, 낮은 제조비용, 플라스틱 기판을 적용할 경우 플렉시블 디스플레이로 적용의 용이성 등을 가지며, 특히 발광형 디스플레이에서 해결하기 힘든 외부광이 강한 옥외에서는 오히려 이미지가 더 선명해지는 강점을 가지는데 이는 반사형 디스플레이의 원리인 외부광의 흡수 및 반사의 원리에서 쉽게 이해된다 [2,3].

이러한 장점을 가진 반사형 디스플레이 혹은 전자종이 디스플레이는 구동원리에 따라 전기영동 방식, MEMS (micro-electro-mechanical system) 방식, 전기습윤 방식 등이 있다. 전기영동 방식은 전자종이 디스플레이의 대표적인 구동방법으로 패널의 상부와

<sup>a</sup> Corresponding author; [ykim@chungwoon.ac.kr](mailto:ykim@chungwoon.ac.kr)

하부의 전극 사이에 형성한 마이크로캡슐이나 마이크로캡 내부의 중성용액에 혼합된 (+) 혹은 (-) 전하를 띤 흑백의 나노 입자들이 상부 및 하부전극에 인가된 전계의 방향에 따라 이동하여 이미지를 표현하는 방식이다. MEMS 방식은 유리기판과 이격된 반사형 화소막에 일정 전압을 인가하여 유리기판상의 광학 박막층과 반사형 화소막 사이의 간격을 변동시킴으로써 빛의 상쇄간섭과 보강간섭을 유도하여 필요한 파장대의 빛을 외부로 표현하여 이미지를 나타내는 방식이다. 전기습윤 방식은 전압을 인가했을 때 각 화소의 염료 오일들이 퍼지거나 모이는 원리를 이용해서 빛의 반사 및 색을 표현하는 방식이다 [4,5].

지난 십 수 년간 이와 같은 많은 전자종이 디스플레이들이 제안, 제작, 평가되어 오고 있었으며, 특히 본 논문의 연구와 관련이 있는 전기영동 현상을 이용한 마이크로캡슐형 전자종이의 경우는 양산기술까지 개발되어 제품화에 성공하기도 하였으나 아직 신뢰성 확립과 구동원리, 다양한 파라미터의 확립이 부족한 이유 등으로 자리매김에 성공하지 못하였으며 또한 입자거동의 원리에서 이해하는 바와 같이 두 종류의 입자가 서로 교행을 할 경우 입자의 충돌, 전하의 상실 및 획득 등으로 입자의 수명에 관련한 신뢰성이 떨어지는 것으로 보고되고 있다 [6,7].

특히 앞서 언급한 대표적인 전기영동 방식을 응용한 마이크로캡슐형 전자종이의 경우 두 종류의 전하와 컬러를 각각 띤 입자를 투명 유체에 혼합하여 전계에 의해 움직이게 하여 이미지를 표현하는 이른바 듀얼입자 방식은 이미 많은 전자종이 연구기관이 연구를 진행한 바 있으며, 또 다른 동향으로 새로운 방식의 전자종이 구현 방법도 활발히 연구되고 있다. 특히 두 종류의 전하를 띤 입자가 움직이는 경우의 단점을 보완하기 위하여 전하를 띠지 않는 컬러유체에 전하를 띤 컬러입자를 혼합한 방식이 제안된 바 있다 [5]. 이 방식의 구동 예는 흰색입자에 검정색 염료를 혼합하여 흰색입자가 운동할 때 흑백의 이미지가 상부기판 표면에 구현되며, 이를 싱글입자-마이크로캡슐형 방식으로 지칭하고 있다 [6,8].

이 두 가지 전기영동 방식을 그림 1에 보였다. 그림 1(a)는 싱글입자-마이크로캡슐형 방식으로 음의 전하를 띤 흰색입자가 (+) 전압이 인가된 상부 투명전극에 부착되도록 한 바이어스인 경우 흰색의 이미지가 구현

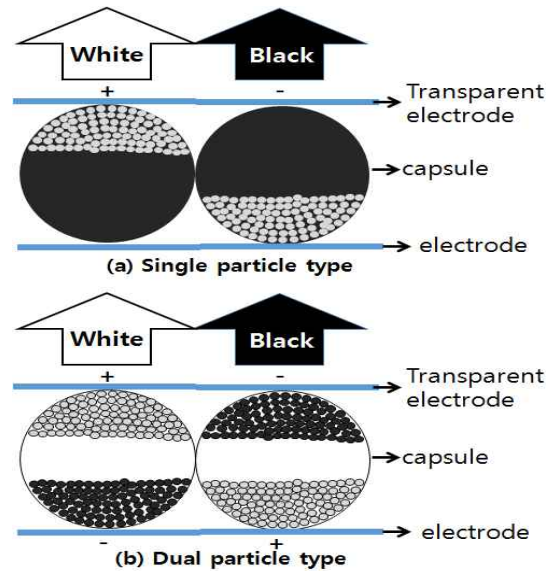


Fig. 1. Driving method of the microcapsule-type display. (a) single particle type and (b) dual particle type.

되며, 반대의 경우는 검정색 이미지를 구현하게 된다. 유체 및 입자의 컬러를 변화시킬 경우 다른 컬러구현이 가능함은 당연하다. 그림 1(b)는 기존의 많은 연구에서 언급한 것과 마찬가지로 두 종류의 컬러 및 전하를 띤 입자가 상하부 전극에 따라 입자의 컬러이미지가 표시되는 것을 표현한 것이다. 싱글입자 구동 방식과 마찬가지로 입자의 컬러를 변화시킬 경우 다른 컬러 구현이 가능하다. 여기에서 입자의 전하는 정해져 있지 않아서 흰색입자는 반대의 전하로 구성하는 것도 가능하다 [9,10].

전기영동법을 이용한 구동 방식은 전자종이를 구현하는 가장 대표적인 방식으로 알려져 있으며 대량생산에서 가장 유리한 것으로 알려져 있음에도 충분한 파라미터 해석이나 신뢰성에 대한 보고는 상세하게 이루어지지 않고 있으며, 특히 싱글입자 방식의 경우 그 원리가 단순함에도 불구하고 최근에 제안된 방식이기 때문에 전기광학적 데이터 및 해석이 공개된 바가 없다. 그러나 기본적으로 동일한 전기영동법을 이용한 듀얼입자-마이크로캡슐형 디스플레이에서와 같이 동일한 전하량을 지닌 나노입자들에 대해, 동일한 구동전압이 인가된다면 셀갭이 클수록 응답시간이 느려지고, 동일한 셀갭에 대해 전압이 증가할수록 응답시간이 빨라지

는 것을 예상할 수 있으나 그 실험 결과가 보고 분석된 예는 보고된 바 없다.

따라서 본 연구에서는 캡슐형 전자종이의 가장 기본적인 파라미터인 상하판 전극사이의 간격인 셀갭(cell gap)의 변화에 대한 응답시간 및 반사율을 측정 및 분석하고 본 연구에서 사용한 입자에 대한 최적의 셀갭을 제안한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 소자 제작

본 논문을 위한 디스플레이 패널은 싱글입자 방식의 마이크로캡슐형으로 제작하였으며, 컬러 염료 내에 (-) 전하를 띠는 직경 100 nm 내외의 흰색 나노입자를 내부에 가진 평균 60  $\mu\text{m}$ 의 직경을 가지는 마이크로캡슐 제조 후 바코터를 사용하여 캡슐층을 코팅한 후 캡슐의 외형을 변형시키기 위하여 외부로부터 가해지는 기계적인 압력의 차를 이용하여 그림 2와 같이 상하판의 갭이 30  $\mu\text{m}$ , 34  $\mu\text{m}$ , 38  $\mu\text{m}$ , 42  $\mu\text{m}$ , 46  $\mu\text{m}$ 가 되도록 제작하였다. 이때, 셀갭에 따라 캡슐이 그림 2와 같이 종횡비가 달라지는데 이는 그림에서 편의상 보여진 것이며 실제로는 캡슐간의 공간이 전혀 없기 때문에 외부에서 보여지는 이미지의 변화는 전혀 없다. 또한 캡슐층의 개수에 따라 광 특성이 달라지는 것을 방지하기 위하여 단일층으로 캡슐을 배열하였다.

### 2.2 측정 방법

전자종이의 특성평가로 가장 중요한 반사율 및 응답시간은 전극 사이에 위치한 전하를 띤 입자들의 이동을 평가하는 수단이 된다.

본 연구에서는 기존에 다루어지지 않은 싱글입자의 거동을 평가하기 위한 것으로 입자의 이동시간, 즉 하부전극에서 상부전극까지 입자가 이동하는 평균시간으로 정의되는 응답시간과 이때의 반사율을 평가하였다 [11]. 다른 전자종이 연구에서도 사용되는 일반적인 광 특성을 측정하기 위하여 입사광원인 레이저를 이미지가 변화하는 상부패널 표면에 입사시켜 반사되는 레이저광을 포토다이오드로 측정한 후 오실로스코프를 이용하여 측정하였다.

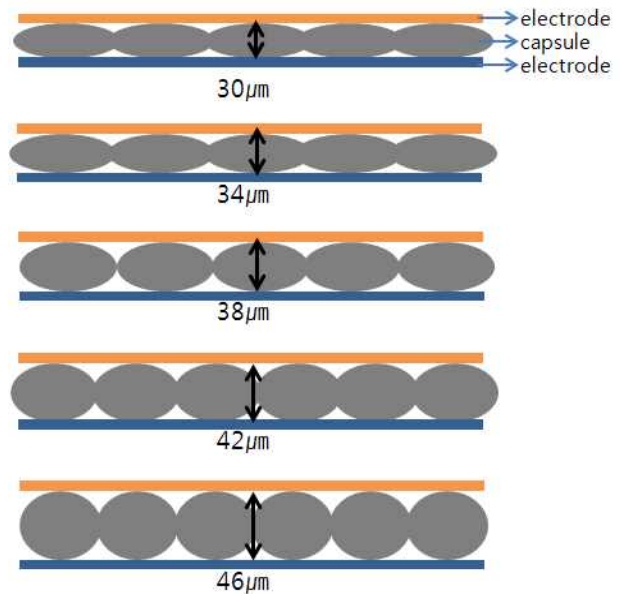


Fig. 2. A cross-sectional view taken along a cell gap of the microcapsule display.

이때 패널에 인가하는 구동전압은 3 V, 5 V, 10 V, 15 V, 20 V로 하였고 인가시간을 (+) 전압에서 2초, (-) 전압에서 2초로 고정하여 변화하는 소자의 상승시간과 하강시간을 측정하였다.

반사율을 측정하기 위해 Minolta사의 CM-5장비를 사용하였다. 전자종이의 표면반사를 막기 위해 정반사광을 제거하고 반사광만을 측정하기 위하여 SCE 모드에서 3 V, 5 V, 10 V, 15 V, 20 V의 DC 전압을 인가하여 흰색 및 검정색의 반사율을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

일반적으로 사용하고 있는 투명유체 내에 포함된 전하의 극성과 컬러를 달리하는 두 종류의 나노입자를 외부 전계에 의해 이동하게 하여 상판의 투명기판에 이미지를 표현하는 듀얼입자-마이크로캡슐형 전자종이 디스플레이와 달리 컬러를 띠는 유체에 단일 전하 및 단일 컬러만을 포함하는 싱글입자-마이크로캡슐형 전자종이 디스플레이는 기본적인 운동 방식은 유사하나 입자들 간의 상호작용이 상대적으로 적을 것으로 예상되기 때문에 별도의 연구가 요구되며 이에 기본적인 반사율과 응답시간을 측정하였다. 응답시간은 반사율의

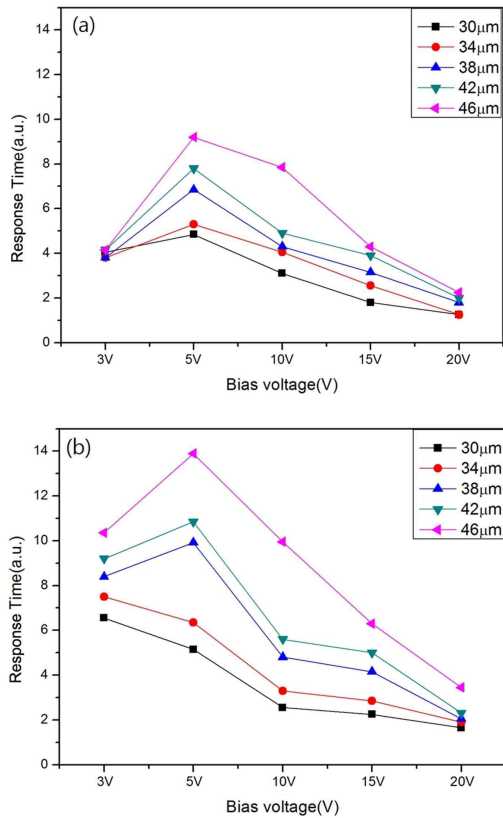


Fig. 3. Response time according to cell gap. (a) rising time and (b) falling time.

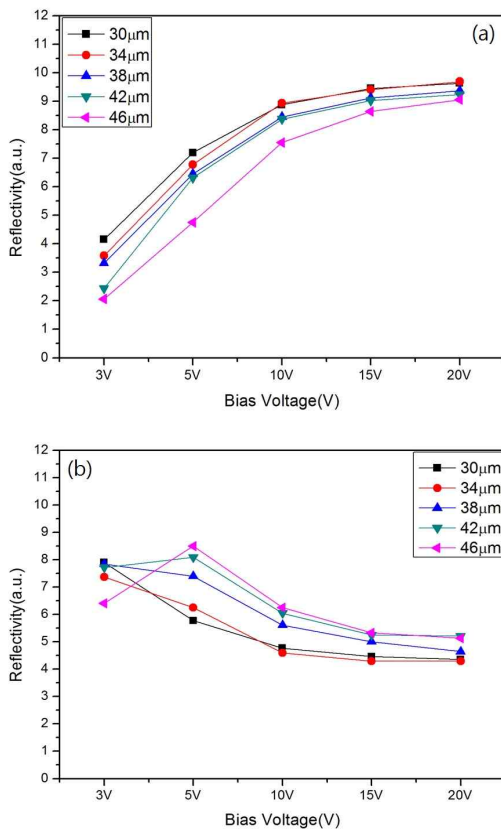
변화가 10%에서 90%로 변하는데 걸린 시간으로 정의하는데, 이는 대부분의 입자가 반대편 전극으로 이동하는데 걸리는 평균시간으로 입자의 운동을 이해하는데 기초가 되는 개념으로 인가전압에 따라 변화하며 기울기는 입자이동의 안정을 표현한다. 반사율은 최종적으로 상하판에 부착된 입자의 수에 비례하며 전자종이 디스플레이의 대조비를 결정하는 파라미터이다 [12,13].

그림 3은 상하판의 갭에 따른 응답시간을 나타낸 그래프로, 그림 3(a)는 어두운 상태에서 밝은 상태로 변화하는데 걸리는 상승시간이며, 그림 3(b)는 밝은 상태에서 어두운 상태로 변화하는 하강시간을 나타낸 것이다. 그림 3(a)에서 초기 0 V에서 3 V로 인가된 전계에서 상승시간이 모두 비슷하게 되는데 이는 컬러유체 내에 혼입된 상부전극 근처의 흰색입자들이 이동하는 시간이 일정하기 때문에 발생하는 측정원리의 문제이며 구동전압에 이르기 전으로 큰 의미는 없다.

정상적인 입자구동을 시작하는 5 V 이후부터는 상하판의 갭이 46 μm인 경우를 제외하고 듀얼 입자 방식과 마찬가지로 상하판의 갭이 클수록 선형적으로 응답시간이 느려지는데, 이는 46 μm인 경우는 전기영동 방식에서 응답시간이 나노입자의 이동거리의 제곱에 비례하기 때문에 다른 셀갭의 경우보다 크게 증가하는 것으로 보인다. 그러나 인가전압이 20 V로 커질 경우 다시 다른 셀갭의 경우와 유사해지게 된다. 이는 전기영동에서 논의되는 일정한 유체 내에서의 최대속도로 판단된다 [13].

그림 3(b)는 컬러유체 내에 포함된 (-)전하를 띤 흰색 나노입자가 하부에 인가된 양의 전압에 의해 하부 방향으로 이동할 때 소요되는 시간을 측정 한 것이다. 그림 3(a)와 달리 초기 3 V에서도 셀갭에 따라 응답시간이 달라지나 역시 구동전압에 아직 이르지 않았기 때문에 의미는 없으나 이는 상부전극에 부착된 흰색입자가 하부전극으로 이동하는데 걸리는 시간을 의미하기 때문에 셀갭이 클수록 응답시간은 커짐을 의미한다. 기판에 5 V 이후 인가전압을 살펴보면 셀갭이 30 μm와 34 μm에서는 전기영동의 원리에서 예상하는 바와 같이 전압에 따라 응답시간이 선형적으로 감소함을 알 수 있다. 그러나 셀갭이 38 μm와 42 μm들의 경우는 5 V에서 응답시간이 오히려 증가하는 것을 알 수 있는데 이는 이후 그림 4에서 논의하는 바와 같이 구동되기 전의 현상으로 이해된다. 셀갭이 46 μm인 경우는 다른 셀갭의 경우와 다르게 인가전압에 따라 응답시간의 감소가 직선으로 감소하여 포화되지 않기 때문에 구동전압을 정의하기 어렵다. 구동전압은 대부분의 입자가 이동하였음을 의미하는데 인가전압에 따라 계속 변하고 있음은 이미 이동한 입자에는 과전압을 인가한 것으로 패널의 수명을 감소하는 결과를 초래하게 된다.

셀갭에 따른 반사율을 측정 한 결과를 그림 4에 보였다. 그림 4(a)는 음의 전하를 띤 흰색입자가 상부전극으로 이동함에 따라 이루어진 반사율을 보인 것이고 그림 4(b)는 흰색 입자가 하부전극으로 이동함으로써 검은색 유체에 의한 반사율을 보인 것이다. 먼저 그림 4(a)의 3 V에서는 모든 셀갭의 경우에서 구동이 이루어지지 않음을 알 수 있으며, 이후 전압이 상승할수록 모든 셀갭에서 반사율은 증가하였다. 셀갭이 상대적으로 낮은 30 μm와 34 μm의 셀갭에서는 10 V부터 포화된 반사율을 보였으며, 38 μm와 42 μm는 두 갭의 반사율이 비슷한 반면 셀갭이 낮은 30 μm와 34 μm의 반사율 수치보다 낮게 측정되었다. 또한 셀갭이 가장 높은



**Fig. 4.** Reflectivity along the cell gap. (a) white reflectivity and (b) black reflectivity.

46  $\mu\text{m}$ 은 가장 낮은 반사율이 측정되었으며, 전압이 낮을 때보다 전압이 증가하면서 셀갭의 편차가 줄어드는 것을 확인하였다. 이는 대부분의 흰색입자가 상부전극으로 이동하면서 달성된 것으로 이해된다.

그림 4(b)는 흰색 입자가 하부전극으로 이동함으로써 검은색 이미지를 보이는 패널의 반사율을 측정된 것으로 흰색 이미지의 경우와 마찬가지로 3 V의 전압을 인가하였을 때는 구동전의 상태로 큰 의미는 없다. 상대적으로 셀갭이 작은 30  $\mu\text{m}$ 와 34  $\mu\text{m}$ 의 경우는 5 V의 경우보다 반사율이 높지만 38  $\mu\text{m}$ 와 42  $\mu\text{m}$ 의 경우보다 5 V에서 다수의 흰색 입자가 하부전극으로 이동하기 때문이다. 그림에서 보는 바와 같이 셀갭이 낮은 30  $\mu\text{m}$ 와 34  $\mu\text{m}$ 는 10 V부터 일정한 반사율이 포화되었다. 38  $\mu\text{m}$ , 42  $\mu\text{m}$ , 46  $\mu\text{m}$ 의 검은색 반사율은 30  $\mu\text{m}$ 와 34  $\mu\text{m}$ 보다 검은색 반사율이 상대적으로 높다. 흰색 및 검은색 반사율로 판단하였을 때 30  $\mu\text{m}$ 와 34  $\mu\text{m}$ 의 셀갭에서 구동전압이 10 V로 정의되는 것이 바람직하며 그

이상의 전압을 인가하는 것은 패널의 수명을 단축할 것으로 이해된다 [12,13]. 또한 응답시간도 이 셀갭에서 유사하게 포화되는 것으로 판단된다.

지금까지 살펴본 응답시간, 반사율, 구동전압 등의 결과를 고려할 때 적절한 셀갭은 30  $\mu\text{m}$ 와 34  $\mu\text{m}$ 인 경우가 가장 바람직한 것으로 보인다. 여기에 기계적 강도를 추가로 고려한다면 동일한 전기광학적 특성을 가진다면 셀갭은 큰 경우가 강하기 때문에 본 연구에서 적절한 셀갭은 34  $\mu\text{m}$ 라고 할 수 있다.

#### 4. 결론

전기영동 현상을 이용한 듀얼입자 방식의 캡슐형 전자종이의 구동 특성은 이미 많은 연구에서 밝혀진 바 있으나 최근 연구가 진행되고 있는 싱글입자 방식 전자종이의 구동 특성은 거의 발표된 바가 없다. 따라서 본 논문은 싱글입자 방식의 캡슐형 전자종이를 제작하고 기본적인 구동 특성을 분석하였다.

반사형 디스플레이의 기본 파라미터인 반사율 및 응답시간이 셀갭에 따라 변화하기 때문에 이를 측정 및 분석하였으며, 알려진 바와 같이 동일한 전압일 때 셀갭이 클수록 응답시간이 느려지는 현상을 확인하였으며, 전압이 상승할수록 응답시간도 빨라지는 것을 확인하였다. 반사율은 30  $\mu\text{m}$ 와 34  $\mu\text{m}$ 의 셀갭을 가진 패널의 경우 10 V부터 포화 상태를 이루었으며 그 이상의 전압이 인가되어도 크게 변화하지 않았다. 응답시간 특성의 경우도 일치하는 것으로 볼 때 10 V를 구동전압으로 정의할 수 있었다. 38  $\mu\text{m}$ , 42  $\mu\text{m}$ , 46  $\mu\text{m}$ 의 경우는 흰색 입자의 경우는 낮은 반사율을, 검은색의 경우는 높은 반사율을 가지게 되어 대비비가 낮기 때문에 전기 광학적인 특성으로 볼 때 상대적으로 바람직하지 않는 것으로 판단된다. 또한 동일한 반사율 및 구동전압으로 판단할 때 기계적 강도를 고려한다면 셀갭을 클수록 강해지기 때문에 본 연구에서 바람직한 셀갭은 34  $\mu\text{m}$ 가 적절함을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2012R1A1A2044210). 또한 본 연구는 중소기업청 기술혁신개발사업(S2128870)의 일환으로 수행되었음.

## REFERENCES

- [1] T. Kitamura, *IDW* 06, 587 (2006).
- [2] M. K. Yoo and S. J. Lim, *Expert Syst. Appl.*, **37**, 6459 (2010). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.139>]
- [3] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 129 (2012).
- [4] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 48 (2012).
- [5] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **24**, 669 (2011).
- [6] Y. J. Park, *Master's Thesis*, Pusan University, 13-19 (2009).
- [7] L. S. Park, Y. S. Han, and Y. H. Kwon, *KIC News*, **7**, 54 (2004).
- [8] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 48 (2012).
- [9] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 129 (2012).
- [10] J. S. Kim and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 48 (2012).
- [11] A. A. Terry, *Library Hi Tech*, **4**, 376 (2001). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/07378830110411925>]
- [12] D. J. Lee and Y. C. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **21**, 63 (2008).
- [13] 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*, **11**, 1523 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1889/1.3621149>]