

논문 2012-50-5-21

개선된 비등방 확산 모델을 이용한 다결정형 솔라셀의 마이크로 크랙 검출

(Micro-crack Detection in Polycrystalline Solar Cells using Improved Anisotropic Diffusion Model)

고진석*, 임재열**

(JinSeok Ko and JaeYeol Rheem[©])

요약

본 논문에서는 불균일한 표면을 갖는 다결정형 솔라셀에서의 마이크로 크랙 검출을 위한 개선된 비등방 확산 모델 기반의 불량 검출 기법에 대해서 다룬다. 산업용 카메라를 이용하여 획득한 영상에서 CCD 센서의 특성으로 인하여 대각선 방향으로 발생한 마이크로 크랙의 밝기가 일정하지 않게 표현되는 경우가 발생한다. 이와 같은 특징으로 인하여 기존의 비등방성 확산 모델 기반의 마이크로 크랙 검출 알고리즘에서 충분한 반복확산이 이뤄지지 않을 경우, 대각선 방향으로 발생한 마이크로 크랙을 불연속적으로 검출하는 단점을 가지고 있다. 그러나 확산 횟수가 증가할수록 전체 알고리즘 수행 시간이 증가하며, 실제 마이크로 크랙보다 두껍게 검출하는 경향이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위하여 기존의 동서남북 방향 기울기를 이용하는 비등방 확산 모델에 확장된 대각선 방향의 기울기를 추가로 적용하였다. 제안된 방법은 십자방향의 기울기와 확장된 기울기를 비교하고, 보다 큰 값을 확산계수 함수에 적용하는 방법이다. 이는 대각선 방향으로 발생한 마이크로 크랙의 정보를 반영하기 위한 것이다. Tsai *et al.*의 방법과 Ko and Rheem의 방법과 비교실험 한 결과, 본 논문에서 제안된 알고리즘이 기존에 제안된 알고리즘에 비하여 적은 반복횟수에서 마이크로 크랙을 우수하게 검출하는 것을 확인했다. 또한 기존 알고리즘에 비하여 실제 마이크로 크랙과 유사한 두께로 검출하는 것을 확인했다.

Abstract

In this paper, we propose an improved anisotropic diffusion model for micro-crack detection in heterogeneously textured surface of polycrystalline solar wafers. Due to the nature of the image sensor, the gray-level of the diagonal micro-crack is non-uniform. Thus, the conventional algorithms can't fully detect diagonal micro-cracks when the number of iteration is not enough. However, the increasing of the iteration number leads to increase computation time and detects micro-crack thicker than the original micro-crack. In order to overcome this drawback, we use the gradient of north, south, east, and west directions as well as extended directions. To calculate the diffusion coefficients, we compare the gradients of conventional directions and extended directions and apply the larger gradient values to the coefficient function. This is because the proposed method reflects the information of diagonal micro-crack. Comparing to Tsai *et al.*'s and Ko and Rheem's, the proposed algorithm shows superior efficiency in detecting the diagonal micro-cracks with less iterations in the images of polycrystalline solar wafers. In addition, it also shows that the thickness of segmented micro-crack is similar to the original micro-crack.

Keywords : anisotropic diffusion model, micro-crack detection, solar wafer, defect detection

* 정회원, ** 평생회원, 한국기술교육대학교 전기전자통신공학과

(Dept. of Electrical, Electronics and Communication Engineering, Korea University of Technology and Education)

© Corresponding Author(E-mail:rheem@kut.ac.kr)

접수일자: 2012년11월26일, 수정완료일: 2013년4월25일

I. 서론

머신비전을 이용한 불량 자동검사 시스템은 반도체, 디스플레이, 제지, 목재 등 많은 산업현장에서 적극적으로 활용되고 있다^[1~6, 11]. 최근 솔라셀에 대한 연구가 많

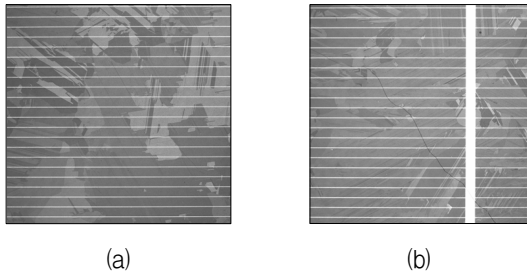


그림 1. 불량 없이 영상과 마이크로 크랙 영상:
 (a) 불량 없이 영상, (b) 마이크로 크랙 영상
 Fig. 1. Defect-free and micro-crack images:
 (a) defect-free image, (b) micro-crack image

이 이루어져 왔고, 현재는 실용화 단계에 도달하였다. 솔라셀 제조현장에는 제품에 대한 불량검사를 수행해야 하며, 이때 중요한 검사항목 중 하나가 마이크로 크랙 검사이다. 마이크로 크랙이 있을 경우, 제조 설비 내부에서 솔라셀이 파손되는 경우가 생기며 이는 인라인으로 구성된 자동화 생산라인의 중단을 야기한다. 중단된 생산라인은 다시 재개하기까지 많은 시간이 소요되며, 이는 생산성 저하와 제조 원가 상승을 초래한다. 따라서 마이크로 크랙 검출은 중요한 문제이다.

다결정형 솔라셀은 그림 1과 같이 표면의 무늬가 불규칙하여 기존의 불량검출 알고리즘을 적용할 수 없었다. 따라서 적외선 영상을 이용하여 마이크로 크랙을 검출하는 기법이 활용되었으나, 가격이 비싸고, 속도가 느린 단점이 있었다. 이를 극복하기 위하여 최근에는 가격이 상대적으로 저렴하고, 영상획득 속도가 빠른 산업용 카메라를 적용하려는 연구가 시도되었다.

Tsai *et al.*는 비등방 확산 모델을 이용하여 다결정형 솔라셀에 대한 마이크로 크랙 검출 알고리즘을 제안하였다^[7]. 비등방 확산 모델을 이용하여 영상에서 마이크로 크랙은 평탄화 시키고, 배경영역은 영상을 보존하는 확산과정을 수행하고, 확산 전 불량영상과 확산된 불량영상을 차감하여 검출하는 방법이다. Ko and Rheem은 대각선 방향의 마이크로 크랙을 보다 효과적으로 검출하기 위하여 Tsai *et al.* 알고리즘의 성능을 개선시켰다^[8-9]. 십자방향의 커널과 대각선 방향의 커널을 병렬적으로 적용하는 방식으로 기존 방식에 비하여 계산량이 많지만, 대각선 방향으로 발생한 마이크로 크랙을 보다 우수하게 검출하는 장점을 가지고 있다.

그러나 위 방법들 모두 충분한 반복확산이 이뤄지지 않을 경우, 대각선 방향 마이크로 크랙을 부분적으로 검출하고, 잡음화소가 남아있는 단점이 있다. 마이크로 크랙을 부분적으로 검출하는 경우, 최종 불량판정에서

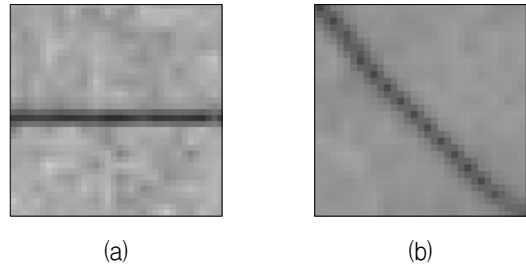


그림 2. 마이크로 크랙 불연속성: (a) 수평방향 마이크로 크랙, (b) 대각선 방향 마이크로 크랙
 Fig. 2. Micro-crack discontinuity in a digital image:
 (a) continuous micro-crack of horizontal direction,
 (b) discontinuous micro-crack of diagonal direction.

오분류 할 확률이 높아지기 때문에 가급적 형태를 유지하며 검출해야 한다. 또한 잡음화소가 존재하면, 역시 최종 불량 검출에서 오분류 할 확률이 높아진다.

본 논문에서는 대각선 방향의 마이크로 크랙도 효과적으로 검출하는 확장된 비등방 확산 모델을 제안하였다. 제안된 방법은 3×3 크기의 십자방향 커널의 기울기와 5×5 크기의 확장된 대각선방향 커널의 기울기를 이용하는 방법으로, 각각의 기울기를 서로 비교하고 보다 큰 값을 확산계수 함수에 적용한다. 이후 확산과정을 수행하고, 원본 영상과 확산된 영상을 차감하여 불량을 검출하는 방법이다. 확장된 기울기를 적용함으로써, 마이크로 크랙에서 연결강도가 약한 지점의 주변 화소 정보를 이용하여 확산과정에 반영한다.

본 논문의 II장에서 비등방 확산 모델에 대해서 살펴보고, III장에서는 확장된 기울기를 갖는 개선된 비등방 확산 모델에 대해서 설명한다. IV장에서는 실험 및 결과물, V장에서는 결론을 도출하였다.

II. 비등방 확산 모델 기반의 마이크로 크랙 검출

1. 다결정형 솔라셀에서의 마이크로 크랙의 특징

그림 1은 다결정형 솔라셀을 나타내며, 표면이 불규칙한 텍스처로 표현되는 것을 볼 수 있다. 마이크로 크랙은 영상에서 낮은 밝기 값과 높은 기울기 값을 갖는 것으로 알려져 있다^[7]. 반면에 배경 영역은 낮은 밝기 또는 높은 기울기 값만을 갖는다.

그림 2는 마이크로 크랙을 확대한 영상이다. 그림 2(a)는 수평방향 마이크로 크랙으로 영상에서 연속적으로 표현되며, 그림 2(b)는 대각선 방향 마이크로 크랙으로 연결이 불연속적으로 표현되는 것을 볼 수 있다. 영상에서 불연속적으로 표현될 경우, 기존의 검출 알고리

증으로는 마이크로 크랙을 불연속적으로 검출한다.

그림 3은 Tsai *et al.*의 방법을 이용하여 대각선 방향과 수평방향 마이크로 크랙 검출 결과를 보여주며, 확산횟수가 적을수록 불연속적으로 검출하는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 불연속적으로 검출하는 경우 최종 불량 판정에서 오분류 할 확률이 높아진다. 따라서 가급적 마이크로 크랙의 형태를 유지하며 검출해야 한다.

2. Perona-Malik의 확산 모델

Perona-Malik의 비등방 확산 방식은 윤곽선을 뚜렷하게 하면서 영역 내부를 부드럽게 하고 잡음을 제거하는데 효과적이다^[10]. 이 방식은 4방향의 십자형 커널구조의 화소정보를 이용한 확산필터이다. 식 (1)에서 t 는 확산의 반복을 의미하며, $I_t(x,y)$ 는 t 단계의 확산 적용 후 필터링 된 영상의 (x,y) 좌표에서의 밝기 값을 나타낸다. 또한 십자형 방향의 기울기는 다음과 같이 적용된다.

$$I_{t+1} = I_t(x,y) + \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 [c_t^i(x,y) \nabla I_t^i(x,y)] \quad (1)$$

여기서 $\nabla I_t^i(x,y)$, $i=1,2,3,4$ 는 동서남북 방향의 기울기 값을 의미하며 다음 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \nabla I_t^1(x,y) &= I_t(x,y-1) - I_t(x,y) \\ \nabla I_t^2(x,y) &= I_t(x,y+1) - I_t(x,y) \\ \nabla I_t^3(x,y) &= I_t(x+1,y) - I_t(x,y) \\ \nabla I_t^4(x,y) &= I_t(x-1,y) - I_t(x,y) \end{aligned} \quad (2)$$

비등방 확산은 십자형 커널을 이용하여 주변 화소들과 기울기 값을 가감처리 하여 영상의 확산작용을 수행한다. 이때 기울기 값을 그대로 이용할 경우, 영상의 에지 정보까지 함께 확산 처리되므로 에지 보존은 이뤄질 수 없게 된다. 따라서 십자형 커널을 적용할 때 동질영역은 확산의 낮추거나 정지시키는 제어역할을 하는 $c_t^i(x,y)$ 를 필요하게 된다.

$$c_t^i(x,y) = g(\nabla I_t^i(x,y)) \quad (3)$$

Perona-Malik의 확산 모델에서 확산 계수 함수 $g(\nabla I_t^i(x,y))$ 는 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다. 이때 표현의 편의성을 위하여 $g(\nabla I_t^i(x,y))$ 를 ∇I 로 표현하기로 하자.

$$g(\nabla I) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{|\nabla I|}{K}\right)^2\right]} \quad (4)$$

여기서 파라미터 K 는 상수로서, 에지 강화 임계값으로 동작한다.

3. Tsai *et al.*의 확산 모델

다결정형 솔라셀에서 마이크로 크랙은 낮은 화소 밝기와 높은 기울기 값을 갖는다. Tsai *et al.*는 이러한 정보를 이용하여 마이크로 크랙을 검출하는 방법을 제안하였다^[7]. 제안된 방법은 다음과 같다. 우선 영상에서 마이크로 크랙의 부분은 평탄화 시키고, 배경영역에 대해서는 밝기 값을 보존한다. 이후, 원본영상과 확산된 영상을 차감시키면 마이크로 크랙 영역의 화소 값이 강조되며, 이를 이용하여 검출하는 방법이다. 이때 확산 계수 함수는 다음과 같다.

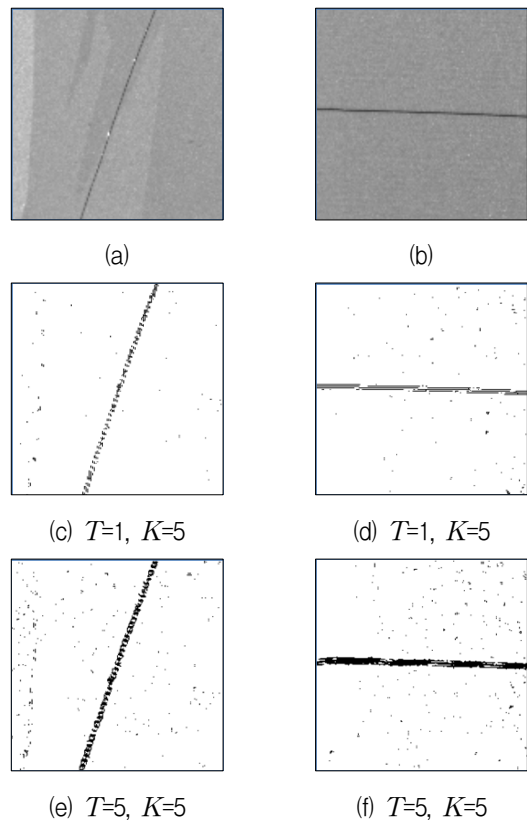


그림 3. 수평방향과 대각선 방향 마이크로 크랙의 검출 결과 비교: (a)(c)(e) 대각선 방향 마이크로 크랙, (b)(d)(f) 수평방향 마이크로 크랙

Fig. 3. Comparison of micro-crack detection results between diagonal and horizontal directions: (a)(c)(e) diagonal micro-crack, (b)(d)(f) horizontal micro-crack.

$$g(\nabla I, f) = \frac{1}{1 + \left[f(x, y) \times \left(\frac{K}{\nabla I(x, y)} \right)^2 \right]} \quad (5)$$

여기서 $f(x, y)$ 는 정규화 파라미터로 사용되며 식 (6)과 같이 표현된다.

$$f(x, y) = \frac{I_o(x, y)}{255} \quad (6)$$

영상이 확산되면 원본영상과 차감시켜준다. 이와 같은 과정을 거치면 차감된 영상에서 마이크로 크랙 영역의 밝기가 강조되어 나타나게 된다. 이때 T 는 확산의 반복 횟수를 의미한다.

$$\Delta I(x, y) = |I_o(x, y) - I_T(x, y)|, \forall (x, y) \quad (7)$$

4. Ko and Rheem의 확산 모델

Tsai *et al.*의 방법은 동서남북 방향 화소정보를 이용하여 확산 방정식을 적용한 모델이며, 대각선 방향의 화소정보를 반영하지 못하는 단점이 있다. 그러나 마이크로 크랙은 모든 방향에서 발생할 수 있다. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 Ko and Rheem은 대각선 방향의 격자 구조를 갖는 확산 모델을 추가로 적용하였다^[8].

식 (8)은 원본영상과 기존의 동서남북 방향의 확산모델을 적용한 영상을 차감시켜준 결과를 의미한다.

$$\Delta I^{cross}(x, y) = |I_o(x, y) - I_T^{cross}(x, y)| \quad (8)$$

식 (9)는 원본영상과 대각선 방향의 확산모델을 적용한 영상을 차감시켜준 결과를 의미한다.

$$\Delta I^{diag}(x, y) = |I_o(x, y) - I_T^{diag}(x, y)| \quad (9)$$

이때 대각선 방향의 기울기는 식 (10)과 같이 적용된다.

$$\begin{aligned} \nabla I_t^1(x, y) &= I_t(x-1, y-1) - I_t(x, y) \\ \nabla I_t^2(x, y) &= I_t(x+1, y+1) - I_t(x, y) \\ \nabla I_t^3(x, y) &= I_t(x+1, y-1) - I_t(x, y) \\ \nabla I_t^4(x, y) &= I_t(x-1, y+1) - I_t(x, y) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (8)과 (9)을 적용한 영상을 더해서 최종 영상을 식 (11)과 같이 얻는다.

$$\Delta I(x, y) = \Delta I^{cross}(x, y) + \Delta I^{diag}(x, y) \quad (11)$$

III. 제안된 비등방 확산 모델 기반 마이크로 크랙 검출 기법

1. 핑거패턴 제거를 위한 전처리

선행연구^[7~8]의 연구결과를 실제 머신비전 시스템에 적용하기 위해서는 핑거패턴 제거를 고려해야 한다. 핑거패턴을 포함하여 확산을 수행하면 핑거패턴 경계에서 경계선 효과(border effect)가 발생한다.

그림 4는 핑거패턴 영역을 포함하여 영상 확산을 수행한 모습을 보여준다. 그림 4(a)는 영상에서 마이크로 크랙을 확대한 부분으로 밝게 보이는 부분이 핑거패턴이고, 어둡고 대각선으로 보이는 부분이 마이크로 크랙을 의미한다. 그림 4(b)는 Tsai *et al.*의 알고리즘을 수행한 것으로, 반복적인 확산이 이루어질수록 핑거패턴의 경계부분이 두꺼워진다. 마이크로 크랙을 검출 시 이와 같은 경계선 효과 때문에 오검출이 발생할 수 있다. 따라서 영상 확산을 수행할 때, 핑거패턴을 제외하고 수행해야 한다. 이를 위하여 다음과 같이 핑거패턴의 제거를 위한 전처리 과정을 수행하며, 우선 전체 영상의 평균 밝기 값과 표준편차를 계산한다.

$$\mu_{\Delta I} = \frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y I_o(x, y) \quad (12)$$

$$\sigma_{\Delta I} = \sqrt{\frac{1}{XY} \sum_{x=1}^X \sum_{y=1}^Y (I_o(x, y))^2} \quad (13)$$

여기서 $\mu_{\Delta I}$ 는 평균이고, $\sigma_{\Delta I}$ 는 표준편차를 의미한다.

이후, 다음 식 (14)를 이용하여 핑거패턴부분을 전체 영상의 평균값으로 대체해준다. 이와 같은 과정을 거친 후, 영상 확산을 수행하면 핑거패턴이 없는 것과 유사한 결과를 얻게 된다. 이때 C_{pre} 는 핑거패턴으로 판단하는 제어 변수이다.

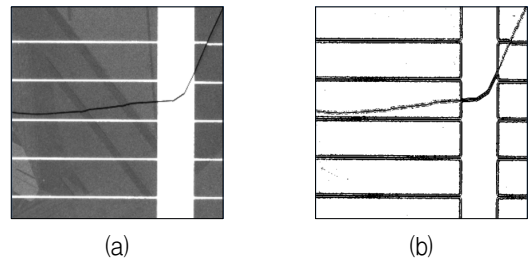


그림 4. 핑거패턴에서의 경계선 효과: (a) 핑거패턴, (b) 경계선 효과

Fig. 4. Border effect at the finger pattern: (a) finger pattern image, (b) boarder effect of the iteration algorithm.

$$I_O(x,y) = \begin{cases} \mu_{\Delta I} & ,if \Delta I_O(x,y) > \mu_{\Delta I} + C_{pre}\sigma_{\Delta I} \\ I_O(x,y) & ,otherwise \end{cases} \quad (14)$$

2. 제안된 비등방 확산 모델

다결정형 솔라셀에서 마이크로 크랙은 여러 방향에서 발생된다. 그림 2(b)는 대각선 방향의 마이크로 크랙을 보여주고 있다. 센서 내부 구조의 특성으로 인하여 대각선 방향의 마이크로 크랙의 밝기가 일정하지 못하게 나타나고 있다. 따라서 기존의 알고리즘으로는 대각선 방향의 마이크로 크랙을 부분적으로 검출하는 단점을 가지고 있었다. 이와 같은 단점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 기존의 3×3의 커널 크기를 5×5 크기로 확장하고 다음과 같은 기울기를 정의하였다.

$$\begin{aligned} \nabla I_t^1(x,y) &= |I_t(x+2,y-1) - I_t(x-2,y-1)| \\ \nabla I_t^2(x,y) &= |I_t(x+2,y+1) - I_t(x-2,y+1)| \\ \nabla I_t^3(x,y) &= |I_t(x+1,y-2) - I_t(x+1,y+2)| \\ \nabla I_t^4(x,y) &= |I_t(x-1,y+2) - I_t(x-1,y-2)| \end{aligned} \quad (15)$$

확산계수를 계산하기 위한 식(5)에서는 영상의 동서남북 방향의 기울기를 사용한다. 본 논문에서는 확산계수 계산 시, 기존의 동서남북 방향의 기울기와 확장된 기울기를 비교하여 보다 큰 값을 갖는 기울기를 식(5)에 적용하였다. 대각선 방향의 마이크로 크랙에서 연결

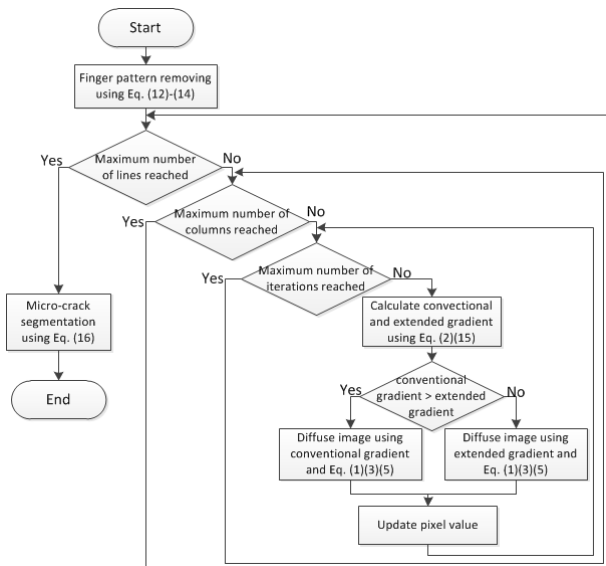


그림 5. 개선된 비등방 확산 모델 기반 마이크로 크랙 검출 순서도

Fig. 5. Flow chart of improved anisotropic diffusion model based micro-crack detection.

강도가 약한 부분에서는 동서남북 방향의 기울기의 역할이 미흡하다. 이때는 확장된 기울기를 이용하면 주변의 마이크로 크랙의 정보를 보다 적극적으로 반영할 수 있다. 그림 5는 본 논문에서 제안한 방법의 순서도를 나타내고 있다.

3. 마이크로 크랙 검출을 위한 후처리

원본 영상에서 확산모델을 적용한 영상을 차감시킨 후, 마이크로 크랙을 검출하기 위하여 임계값 기법을 적용하였다^[7]. 관련 수식은 다음 식 (16)과 같다. 이때 C_{post} 는 세그멘테이션을 조정하는 컨트롤 파라미터이다.

$$B(x,y) = \begin{cases} 0 & ,if \Delta I(x,y) > \mu_{\Delta I} + C_{post} \cdot \sigma_{\Delta I} \\ 255 & ,otherwise \end{cases} \quad (16)$$

IV. 실험

제안된 알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 기존의 Tsai *et al.*의 알고리즘^[7]과 Ko and Rheem의 알고리즘^[8], 그리고 본 논문에서 제안한 알고리즘과 비교실험을 수행하였다. 측면 45도 입사각을 갖는 확산된 백색 LED 면조명을 사용하여 영상을 획득했으며, 영상의 화소 해상도는 23 μ m이다. 실험에는 마이크로 크랙 이미지 96장, 불량인 없는 영상 21장이 사용되었다. 알고리즘에서 사용되는 각각의 파라미터는 반복적인 실험을 통하여 최적의 성능을 보여주는 파라미터를 선정하였다. 실험결과 마이크로 크랙이 존재하는 모든 영상에서 기존의 방법에 비하여 적은 반복횟수에서도 상대적으로 우수한 검출 성능과 적은 잡음 화소를 나타내는 것을 볼 수 있었다. 또한 마이크로 크랙이 없는 영상에 대해서는 과검출이 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다.

1. 핑거패턴 제거를 위한 전처리 효과

그림 6은 제안된 마이크로 크랙 검출 방법에서 C_{pre} 값의 변화에 따른 결과를 보여주고 있다. C_{pre} 값의 변화에 따른 효과를 비교하기 위하여 확산 반복 횟수 T 는 5로 설정하였으며, K 는 30으로 설정하였다. 또한 마이크로 크랙 세그멘테이션을 위한 C_{post} 는 5로 설정하였다. C_{pre} 값을 1.5로 설정했을 때, 경계선 효과가 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

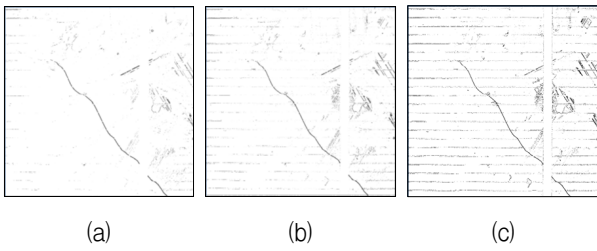


그림 6. C_{pre} 의 변화에 따른 효과:

(a) $C_{pre} = 1.5$, (b) $C_{pre} = 3$, (c) $C_{pre} = 4.5$

Fig. 6. Effect of changes in control parameter C_{pre} :

(a) $C_{pre} = 1.5$, (b) $C_{pre} = 3$, (c) $C_{pre} = 4.5$

2. 파라미터 K 와 T 의 변화에 따른 효과

K 값과 반복횟수 T 의 변화에 따른 결과를 확인하기 위하여 다음과 같은 실험을 수행하였다. K 값은 10에서 50까지의 범위에서, T 는 1에서 7까지의 범위에 두고 비교실험을 하였다. 본 실험을 위하여 C_{pre} 는 1.5, C_{post} 는 5로 설정하였다.

그림 7은 제안된 알고리즘에서 K 값이 40과 50일 때, 반복횟수 T 값의 변화에 따른 마이크로 크랙 검출 결과를 비교하여 보여주고 있다. 실험결과 동일한 확산 횟수에서, K 가 증가할수록 잡음 화소는 억제되고, 마이크로 크랙만 검출하는 것을 볼 수 있었다.

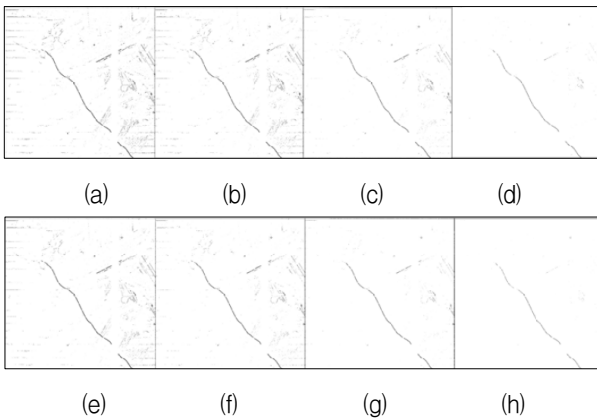


그림 7. 제안된 방법에서 K 와 T 의 변화에 따른 효과:

(a) $K=40, T=1$, (b) $K=40, T=3$, (c) $K=40, T=5$, (d) $K=40, T=7$, (e) $K=50, T=1$, (f) $K=50, T=3$, (g) $K=50, T=5$, (h) $K=50, T=7$

Fig. 7. Effect of changes in the regularization value K

and the number of iteration T : (a) $K=40, T=1$, (b) $K=40, T=3$, (c) $K=40, T=5$, (d) $K=40, T=7$, (e) $K=50, T=1$, (f) $K=50, T=3$, (g) $K=50, T=5$, (h) $K=50, T=7$.

3. 마이크로 크랙 검출 결과

그림 8은 대각선 방향의 마이크로 크랙에 대해서 각각의 알고리즘을 수행한 결과를 부분적으로 확대하여 보여준다. 기존 방법에 비하여 본 논문에서 제안한 방법이 동일한 알고리즘 반복 횟수에서 원래 마이크로 크랙과 유사한 두께로 검출하는 것을 볼 수 있다. 또한 기존 방법에 비하여 연속적으로 마이크로 크랙을 검출하고 있다.

표 1에서 마이크로 크랙 검출결과를 비교하였다. 동일한 파라미터 조건에서 정검출 점수, 과검출 점수, 미검출 점수를 비교하였으며, 평균평가점(mean opinion score, MOS) 방법을 적용하였다. 알고리즘 비교 실험에서 T 는 7, K 는 30, C_{pre} 는 1.5, 그리고 C_{post} 는 5로 설정하였다. 정검출 점수는 마이크로 크랙을 얼마나 정확히 검출하였는지, 과검출 점수는 배경 잡음 화소가 얼

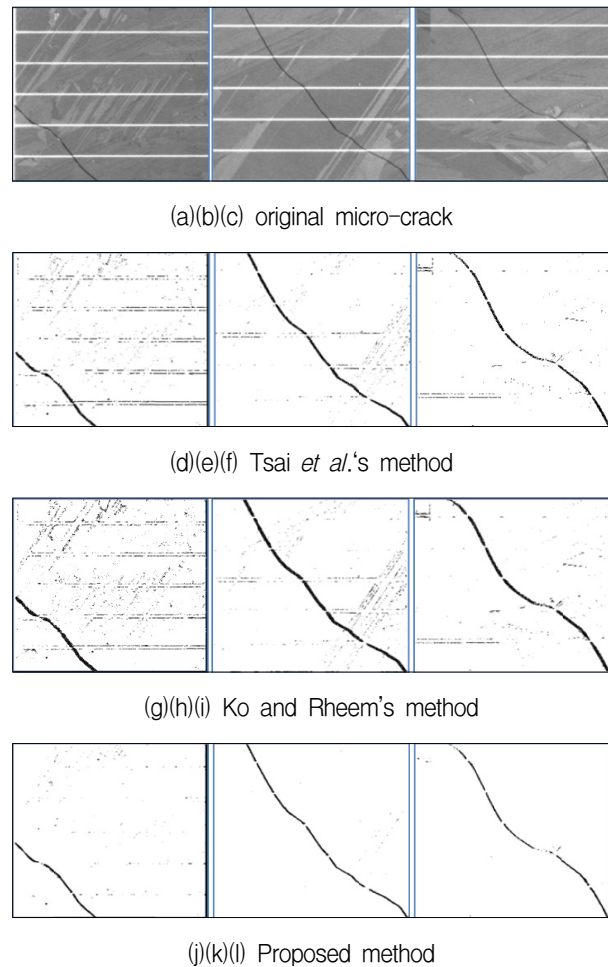


그림 8. 기존 알고리즘과의 성능 비교 ($T=7, K=30, C_{pre} = 1.5, C_{post} = 5$)

Fig. 8. Comparison of the proposed algorithm. ($T=7, K=30, C_{pre} = 1.5, C_{post} = 5$)

표 1. 평균평가점을 이용한 마이크로 크랙 검출 결과

Table 1. The results of micro-crack using mean opinion score.

검출방법	성능구분	평균평가점
Tsai et al.'s method	정검출 점수	4.20
	미검출 점수	1.38
	오검출 점수	1.32
Ko and Rheem's method	정검출 점수	4.22
	미검출 점수	1.38
	오검출 점수	1.57
Proposed method	정검출 점수	4.24
	미검출 점수	1.36
	오검출 점수	1.02

마나 검출되었는지, 미검출 점수는 마이크로 크랙에서 검출하지 못한 영역이 얼마나 되는지에 대한 평가이다. 정검출 점수는 5점에 가까울수록, 미검출 점수와 오검출 점수는 1점에 가까울수록 성능이 우수함을 나타낸다. 실험결과 제안된 방법이 기존의 방법에 비해서 정검출 점수가 약 0.02~0.04 높고, 미검출 점수는 약 0.02, 오검출 점수는 약 0.3~0.55 만큼 낮은 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 다결정형 솔라셀의 마이크로 크랙 검출을 위한 확장된 기울기를 사용하는 비등방 확산 모델을 제안하였다. 동서남북 방향의 기울기와 확장된 기울기를 비교하여 상대적으로 큰 값을 확산 계수 함수에 적용하는 방법으로, 영상에서 마이크로 크랙의 연결강도가 약하게 표현되는 부분에서도 주변 화소 정보를 이용하여 끊임없이 효과적으로 마이크로 크랙을 검출한다. 또한 알고리즘의 반복횟수가 증가하여도 검출된 마이크로 크랙의 너비가 원래의 마이크로 크랙의 너비와 큰 차이가 없으며, 기존의 방법에 비해서 적은 반복횟수로 우수한 성능을 보여주었다. Tsai *et al.*의 알고리즘과 Ko and Rheem의 알고리즘, 그리고 본 논문에서 제안한 알고리즘의 비교실험을 수행 결과, 제안된 방법이 기존의 방법에 비해서 정검출 점수가 약 0.02~0.04 높고, 미검출 점수는 약 0.02, 오검출 점수는 약 0.3~0.55 만큼 낮은 것을 확인하였다. 이는 본 논문에서 제안한 알고리즘의 불량검출 성능이 우수하고, 잡음 화소를 보다 적게 발생시키는 것을 의미한다.

참 고 문 헌

- [1] R. W. Conners, C. W. McMillin, K. Lin and R. E. Vasquez-Espinosa, "Identifying and locating surface defects in wood," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence PAMI-5, pp. 573 - 583, 1983.
- [2] L. H. Siew and R. M. Hogdson, "Texture measures for carpet wear assessment," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 10, pp. 92 - 105, 1988.
- [3] K. V. Ramana and B. Ramamoorthy, "Statistical methods to compare the texture features of machined surfaces," Pattern Recognition 29, pp. 1447 - 1459, 1996.
- [4] J. Escofet, M. S. Millan, H. Abril and E. Torrecilla, "Inspection of fabric resistance to abrasion by Fourier analysis," Proceedings of SPIE 3490, pp. 207 - 210, 1998.
- [5] T. Ohshige, H. Tanaka, Y. Miyazaki, T. Kanda, H. Ichimura, N. Kosaka and T. Tomoda, "Detect inspection system for patterned wafers based on the spatial-frequency filtering," IEEE/CHMT European International Electronic Manufacturing Technology Symposium, pp. 192 - 196, 1991.
- [6] K. Wiltschi, A. Pinz and T. Lindeberg, "Automatic assessment scheme for steel quality inspection," Machine Vision and Applications 12, pp. 113 - 128, 2000.
- [7] D. M. Tsai, C. C. Chang and S. M. Chao, "Micro-crack inspection in heterogeneously textured solar wafers using anisotropic diffusion," Image and Vision Computing, vol. 28, no. 3, pp. 491 - 501, 2010.
- [8] J. Ko and J. Rheem, "Anisotropic diffusion based micro-crack inspection in polycrystalline solar wafers," Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, vol. 1, pp. 524 - 528, 2011.
- [9] J. Ko, J. Rheem, "Fuzzy anisotropic diffusion and its application to micro-crack detection in polycrystalline solar wafers," International Conference on Electronics, Information and Communication, pp.92-93, 2012.
- [10] P. Perona and J. Malik, "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 12, no. 7, pp. 629 - 639, 1990.
- [11] 박중협, "SMT 공정에서 Lead-free solder(무연솔더) 적용에 따른 비전검사기 시스템의 변경 연구," 대한전자공학회 하계종합학술대회, vol. 29, no. 11, pp. 737-738, 2006.

— 저 자 소 개 —



고진석(정회원)
 2004년 한국기술교육대학교
 정보기술공학부 학사졸업
 2006년 한국기술교육대학교
 전기전자공학과 석사졸업
 2006년 3월~2009년 6월 에이티아
 이(주) 기술연구소
 주임연구원

2009년 9월~현재 한국기술교육대학교 전기전자
 통신공학과 박사과정
 <주관심분야 : 신호처리, 패턴인식, 머신비전>



임재열(평생회원)-교신저자
 1986년 서울대학교 전자공학과
 학사졸업
 1988년 서울대학교 전자공학과
 석사졸업
 1995년 서울대학교 전자공학과
 박사졸업

1995년 9월~현재 한국기술교육대학교 전기전자
 통신공학부 교수
 <주관심분야 : 디지털 신호처리, 음성신호처리,
 화자인식, 잡음처리, HRD>