

## 태양광 웨이퍼의 결함검출을 위한 자동 정밀검사 시스템 개발

백승엽\*

(논문접수일 2011. 04. 20, 수정일 2011. 06. 03, 심사완료일 2011. 06. 04)

### Development of Automatic Precision Inspection System for Defect Detection of Photovoltaic Wafer

Baik Seung Yeb\*

#### Abstract

In this paper, we describes the development of automatic inspection system for detecting the defects on photovoltaic wafer by using machine vision. Until now, The defect inspection process was manually performed by operators. So these processes caused the produce of poorly-made articles and inaccuracy results. To improve the inspection accuracy, the inspection system is not only configured, but the image processing algorithm is also developed. The inspection system includes dimensional verification and pattern matching which compares a 2-D image of an object to a pattern image. the method proves to be computationally efficient and accurate for real time application. and we confirmed the applicability of the proposed method though the experience in a complex environment.

**Key Words :** Photovoltaic cell(태양 전지), Vision Inspection(비전 검사), Defects Detection(결함 검출), Image Processing(영상처리), Defects Pattern(결함 패턴)

## 1. 서론

반도체(semiconductor) 분야는 산업의 다각화와 급속한 변화가 진행되는 산업분야 중의 하나이다. 특히 대체에너지(alternative energy)로써의 태양광 발전용 셀(cell)은 단결정 또는 다결정 실리콘(polycrystalline)을 주원료로 웨이퍼 표면에 흡수된 빛에 의해 발생하는 광기전력 효과를 이용하는 것이다. 다시 말하면, 반도체 경계면에 강한 빛이 조사되면 전자와 정공이 접촉 전위차에 의해 분리되어 서로 다른 전기가 발생하는 원리를 이용하여 전기를 발생 및 축적하는 대체에너지로써 소재의 효율성이 점점 더 주목받고 있으며 시장이 지속적으로 성장하고 있다<sup>(1)</sup>.

따라서 태양전지의 생산현장은 대량생산을 고려하여 단가 인하와 관련된 노력에 따라 180 $\mu$ m 이상의 두께를 유지했던

웨이퍼를 공정개선을 통해 차츰 160 $\mu$ m 이하의 얇은 웨이퍼를 핸들링하면서 발생할 수 있는 여러 가지 생산 공정상의 불량들을 효과적으로 검출하여 불량품이 이 출하되지 않도록 하는 정밀검사에 대한 수요들이 점차 확대되고 있다<sup>(2)</sup>.

그러나 다양한 외관상의 불량에 대한 검사 솔루션은 대체로 육안이나 고배율의 현미경을 이용한 시각적 검사에만 의존하는 것이 현실이다. 또한, 웨이퍼 크기(wafer size)가 기존의 200mm에서 300mm로 커짐에 따라 사람의 육안에 의존하는 시각적 검사방법은 결함발생 오차확률(error probability)을 점차 크게 할 것으로 예상된다.

\* 대림대학교 기계설계학과 (sandos7@kornet.net)  
주소: 431-715 경기도 안양시 동안구 비산동 526-7

따라서 컴퓨터를 이용한 자동 비전 검사가 공장 자동화를 통해 이러한 문제점들을 보완해 줄 수 있을 것으로 생각된다<sup>(3,4)</sup>.

그러나 현재 반도체 제조공정에서 사용하는 자동 비전 검사 시스템(automatic vision inspection system)은 하드웨어 및 소프트웨어의 제약 때문에 주로 결함검출(defects detection)에만 적용되고 있다. 그러나 결함의 유형까지 판별할 수 있다면 결함의 발생 원인을 분석하여 결함을 일으키는 공정을 재조정할 수 있을 것이다.

따라서 본 논문에서는 양산성을 고려한 생산구조를 갖추어가고 있는 태양광 반도체 생산 추세에 대응하기 위한 고 정밀 (high precision) 비전 시스템의 타당성을 검증하여 태양광 반도체 웨이퍼 상의 결함을 자동으로 검출할 수 있는 성능향상에 기여함으로써 국내 태양광 반도체 산업의 경쟁력 확보를 하는데 핵심기술로서 활용하고자 하였다.

### 2. 태양광발전의 원리 및 구성요소

Fig. 1은 태양전지의 기본구조 및 전기 생산과정을 나타낸 것이다. 태양전지는 p형과 n형 반도체를 접합시키고(p-n 접합) 각각의 표면에 금속전극을 붙여 제작한다. 빛이 반도체에서 흡수되면 전자와 정공 쌍이 생성되고 이러한 전자(electron)와 정공(hole)은 p-n 접합부에 존재하는 전기장의 영향으로 서로 반대 방향으로 흘러가서 도선으로 연결된 외부 회로에 전기가 발생하게 된다<sup>(5)</sup>.

따라서 에너지 변환 효율을 높이기 위해서는 될 수 있는 대로 많은 빛이 반도체 내부에서 흡수되도록 하기 위해 반도체 표면의 결함 또는 이물질 등의 영향을 차단할 수 있도록 설계 및 검사하여야 하고 빛에 의해 생성된 전하(전자 및 정공)들이 소멸되지 않고 전극까지 전달되도록 p-n 접합부에 큰 전기장이 형성되도록 소재 및 공정을 디자인해야 한다.

### 3. 비전시스템의 구성 및 원리

비전 검사 시스템의 구성은 광학부, 검사부, 구동부 등의 3가

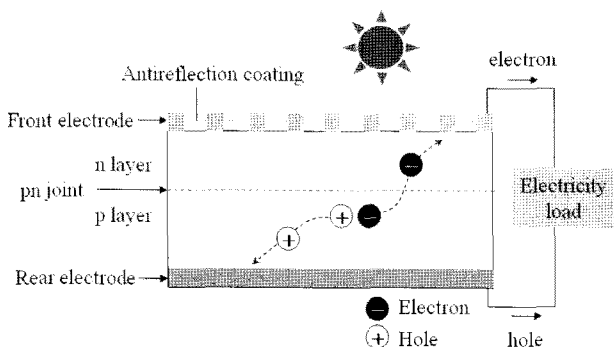


Fig. 1 Principle of operation and basic structure of solar cell

지로 구성하였다. 그 중 광학부는 전체 시스템의 70 % 이상을 차지하는 매우 중요한 부분으로 검사대상에 대한 정확한 사전 정보와 광학에 대한 특성 등을 종합적으로 분석하여 검사부와 구동부에 의해 원하는 결과를 얻을 수 있도록 구성하였다. 태양광 발전은 태양전지를 여러 개 붙이고 유리 등의 보호 장치를 붙인 것으로 태양전지 모듈(module)이라고 한다. 웨이퍼 표면의 위아래를 투명한 합성수지로 감싸고 유리판을 덮은 형태는 외부로부터의 습기나 오염 물질 등의 영향을 차단하여 빛의 흡수를 최대한 많이 확보하여 전기를 생산하고 태양전지의 수명을 연장할 수 있는 매우 중요한 요소이다.

그래서 본 연구에서는 웨이퍼 표면에서 발생할 수 있는 여러 종류의 결함 유형을 자동으로 검사할 수 있는 비전 시스템을 Fig. 2와 같이 구성하였다. FOV(Field of View)는 185mm 8K 라인스캔(line scan) 카메라로 8,192 × 8,192의 픽셀(pixel)의 2차원 영상을 획득하기 위해서 Matrox 사의 Solios 64M 프레임 그래버(frame grabber)를 사용하고 조명은 할로겐 광원과 광섬유(fiber optic)를 이용하여 사이드 조명으로 사용하였다. 양면의 표면 결함검출용 카메라 2대와 pin hole과 같은 내부 결함 검출용 카메라 1대로 구성하였으며 내부 결함검출을 위해서

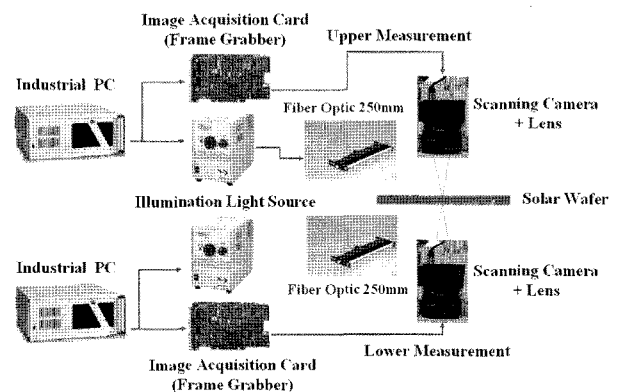


Fig. 2 Schematic diagram of the vision system

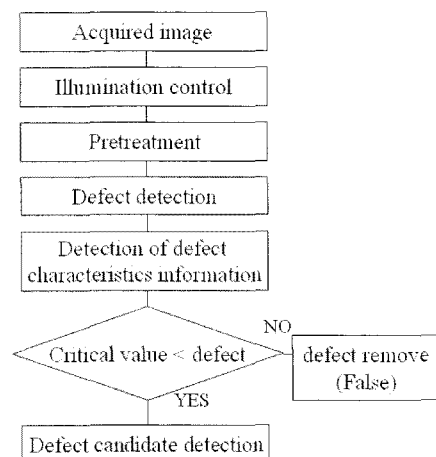


Fig. 3 Flow of defect candidates detection algorithm

투과성이 강한 적외선 할로겐 광섬유를 적용하여 구성하였다.

### 4. 영상처리 알고리즘

태양광 웨이퍼의 결함 영상에는 결함 영상과 다수의 잡음이 포함된 가결함을 모두 포함하고 있기 때문에 문제가 될 수 있는 정도의 결함만을 검출하기에는 부적절한 상태의 영상이다.

따라서 본 연구에서는 모든 결함을 포함하도록 영상을 획득하고 각 결함에 대해 최적의 검출력을 보이는 광학계 설계를 하여 다양한 알고리즘을 적용하여 잡음과 가결함을 순차적으로 제거하면서 원래의 결함만을 검출하는 알고리즘을 개발 적용하였다. Fig. 3은 이러한 검출 알고리즘에서 결함후보를 검출하는 방법에 대한 흐름도를 나타낸 것이다. 우선 라인스캔 카메라와 영역스캔 카메라에 의해 획득된 영상이 전처리 과정을 통해서 노이즈가 제거되고 이진화 및 영상의 개선작업 등이 이루어지며 영상에서 결함 후보군을 검출하기 위해 각 검사부의 영상에 존재하는 결함들을 모두 찾는다. 그리고 찾아진 결함들에 대한 특징 정보를 획득하기 위해 결함 특징추출 알고리즘을 적용하여 획득된 결함의 정보들을 이용하여 크기에 대한 임계값이 50 $\mu$ m 이하일 경우 결함 후보에서 제외시킨 후 각 검사부의 결함후보로 검출하는 알고리즘을 나타내는 것이다.

#### 4.1 영상처리 알고리즘

태양광 웨이퍼의 영상을 카메라로부터 입력받은 이미지는 잡음이 많이 포함되어 있는 영상이므로 잡음을 제거하기 위해 식 (1)과 같은 메디안 가중치 필터 알고리즘<sup>(6)</sup>을 적용하여 입력된 영상에 5 $\times$ 5 마스크를 이용한 중간 값을 필터 처리를 수행하였으며 1차 특징정보의 결함을 검출하기 위해 임계값 설정과 식 (2)을 이용하여 이진화 영상을 만들었다<sup>(7)</sup>.

$$g(x_p, y_i) = Med [f(-n \leq x_i \leq n, -m \leq y_i \leq m) W] \quad (1)$$

$g(x_p, y_i)$ : i 번째 필터 알고리즘을 적용한 결과영상의 명암 값 좌표

$f(x_p, y_i)$ : 국소영역에 해당하는 가중치 값 적용

$$f_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{if } f[i, j] \leq T \\ 255 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)에서  $f[i, j]$ 는 i, j 위치의 화소의 밝기이며, T는 이진화에 사용되는 값이다. 이렇게 만들어진 이진화 영상에 식 (3)의 형태론적 기법인 침식과 팽창 기법을 적용하여 필터링 후 존재하는 잡음에 대한 정보를 제거하였고, 팽창 과정은 침식과정에서 손실되었던 정보를 복원하는 기법으로 적용하였다.

$$A \oplus B = \{x | (B)_x \subseteq A\}$$

$$A \ominus B = \{x | [(B)_x \cap A] \subseteq A\} \quad (3)$$

(A ; 영상, B ; 구조체 요소)

침식과정의 적용은 중간 값과 필터링한 후 존재하는 잡음에 대한 정보를 제거하는 역할을 하였고 팽창과정은 침식 과정에서 손실되었던 정보를 복원하는 기능으로 수행하였다.

#### 4.2 영상입력 및 전처리

태양광 웨이퍼의 검사대상 영역의 위치정보가 웨이퍼 맵을 통하여 주어지면 고배율의 광학현미경과 CCD 카메라를 이용하여 결함 영상패턴이 컴퓨터에 입력하게 된다. 또한, 결함영역을 검출하기 위해 기준 영상과 비교하게 되는데 이를 위해 영상의 위치, 크기, 회전 등의 보정이 미리 수행되어진다.

#### 4.3 결함특징정보의 정의

결함의 특징에 대한 적합한 선정은 정확한 비전검사에서 필수적이고 어려운 문제 중의 하나이다. 모호하고 부적합한 결함의 정의는 아무리 좋은 인식 알고리즘을 사용한다 하더라도 바람직한 결과를 기대할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 적합한 결함 영상패턴을 표현하기 위해 결함 영역의 명암분포, 히스토그램 등의 형태적인 요소들과 결함영역 주위 픽셀들과의 관계를 정립하기 위해 Table 1과 같이 결함특징에 대한 정의를 하였다. 그리고 결함의 판단기준으로 결함의 무게 중심, 크기, 밝기의 강도, 장축의 길이, 위치 그리고 폭 등을 사용하였으며 이러한 결함에 대한 특징정보를 추출하기 위해 Blob 알고리즘<sup>(8)</sup>을 사용하였다. 한 예로써 Fig. 4 (a)는 웨이퍼 표면에 이물질에 의해 오염된 현상을 나타내고 있으며 이러한 결함의 판단기준을 하기위해 Blob 알고리즘을

Table 1 Definition of defect pattern characteristic

NO	Characteristics
1	Size of defect area
2	Average light & darkness
3	Pattern repeatability
4	Maximum rate of histogram
5	Standard deviation of light & darkness around defect
6	Average light & darkness rate of pixel around defect
7	Distribution of light & darkness of defect area
8	Compare standard image and light & darkness dispersion
9	The focus of light & darkness of defect area
10	Pixel density of defect
11	The Number of inner clnster
12	Average light & darkness of boundary pixel

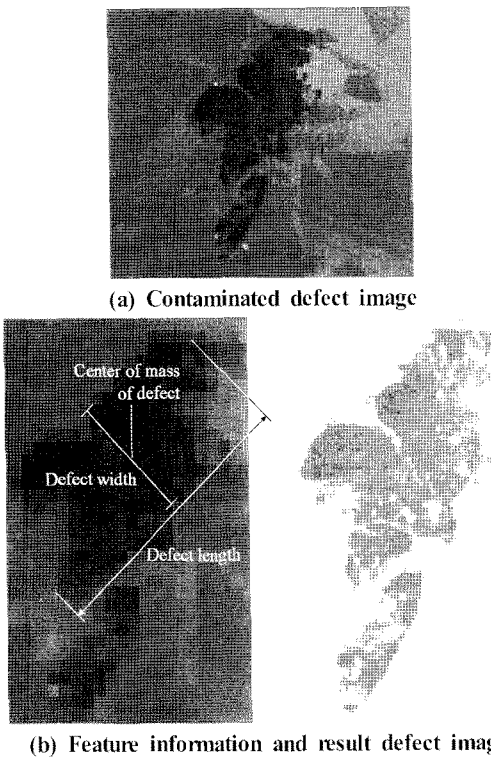


Fig. 4 Filtering process of defect image using Blob algorithm

사용하여 특징정보를 (b)의 좌측 영상과 같이 추출하여 결함에 적용되는 특징들만의 부각시켜 우측영상과 같이 결정할 수 있었다.

## 5. 실험 및 고찰

### 5.1 장비구성

결함검출 알고리즘과 광학계를 적용하기 위한 전체 시스템은 로딩부(loading part), 구동부(moving part), 클리닝 부(cleaning part), 검사부(inspection part), 언로딩부(unloading part)로 구성하였다.

로딩부는 전수검사를 고려하여 적재된 태양광 웨이퍼를 한 장씩 자동으로 로딩할 수 있도록 컨베이어 시스템과 연동되게 구성하였으며, 클리닝부는 비전 검사의 오류를 최소화하기 위해서 태양광 웨이퍼 표면에 부착되어 있는 먼지나 이물질을 이온나이저(ionizer)와 바람을 이용하여 이물질을 분리한 다음 집진장치를 사용하여 이물질을 제거하였다. 검사부인 비전 시스템의 구성은 IBM/386 호환 기종에 비디오 입력으로 하나의 CCD 카메라와 프레임 그래버 영상처리용 보드로 구성되어 최적의 결함 검출력을 얻을 수 있도록 하였다. 또한 양산성을 고려해서 정지된 웨이퍼의 전체영상을 얻을 수 있도록 영역스캔 카메라와 컨베이어 시스템에 의해 이동하면서 고해상도로 웨이퍼를 스캔할 수 있도록 한 개의 라인 픽셀로 이루어진 라인스

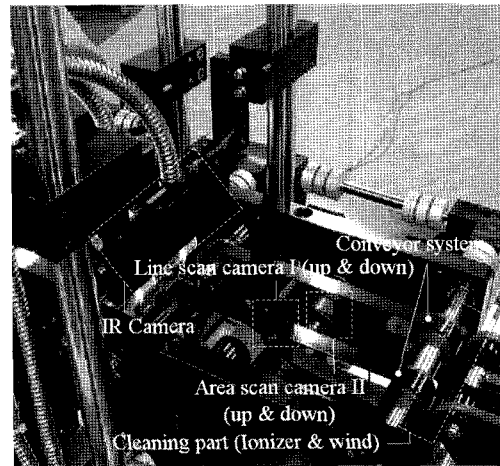


Fig. 5 Experimental setup of the vision system

캔 카메라를 조합하여 빠른 영상획득 및 영상처리를 구현할 수 있도록 하였다. Table 2는 라인 CCD 카메라의 사양이고 Table 3은 영역 스캔(area scan) 카메라의 사양을 나타낸 것이다. 언로딩 부는 검사를 완료한 태양광 웨이퍼를 검사결과에 따라 양

Table 2 Specification of line-scan camera

No	Items	Specifications
1	Resolution	8,192
2	Total data rate	80MHz
3	Maximum line rate	12MHz
4	Pixel size	7×7μm
5	The Number of Camera output	2Tab
6	Lens	Mikon EL 63mm
7	WD(Working Distance)	310mm
8	FOV(Field Of View)	185mm
9	Pixel	20μm
10	Illumination	Line type
	(Line type; High frequency fluorescent lamp)	

Table 3 Specification of area-scan camera

No	Items	Specifications
1	Effective pixe	4,069
2	Frame rate	80MHz
3	Pixel rate	12MHz
6	Lens	Nikon EL 63mm
7	WD(Working Distance)	310mm
8	FOV(Field Of View)	185mm
9	Pixel	45μm
10	Illumination	Flat type
	(Flat type; High frequency fluorescent lamp)	

**Table 4 Specification of image processing**

Line pixel		10K
FOV(Field of View)		185×185
Total speed		1.2sec~1.8sec
1	Image acquisition	About 1,000ms
2	Camera #1, #2, #3 (I.P.)	About 800ms
3	Output of inspection result	About 100ms

I.P.; Image Processing(image compensation & analysis etc.)

품, 불량, 재검사로 분리하여 각각의 매거진에 자동으로 언로딩 되도록 구성하였다. 비전에 의한 태양광 웨이퍼의 전수검사를 가능하도록 하기위해 영상처리속도를 Table 4와 같이 구성하였다. Fig. 5는 본 연구에서 구성된 실험적 비전 시스템을 나타낸 것이다.

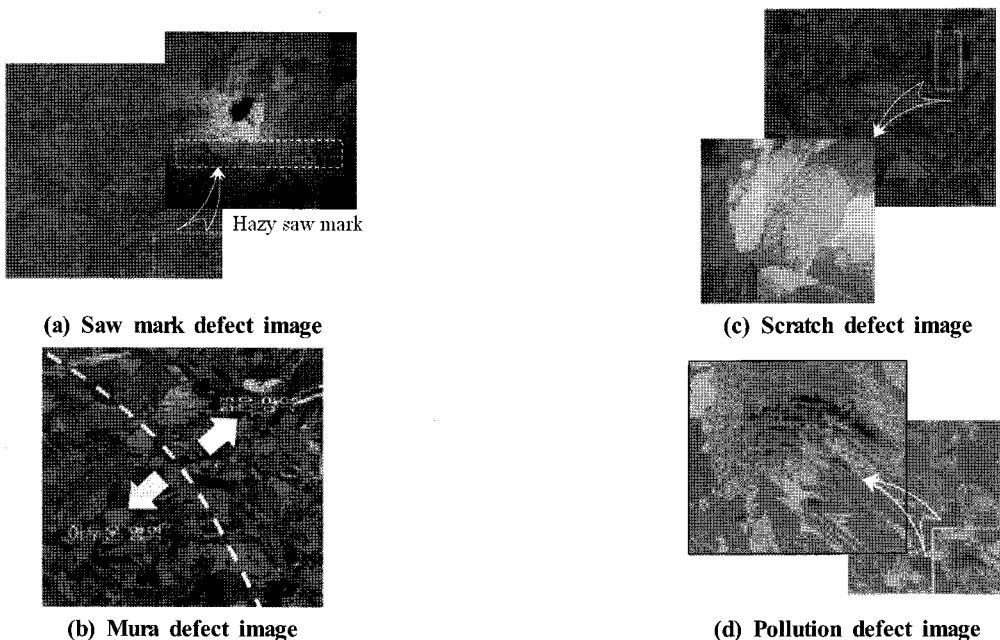
**5.2 실험**

컨베이어 시스템에 의해 로딩된 태양광 웨이퍼는 검사부 스테이지(stage)에 수평이 되도록 위치하며 할로겐 광원과 적외선 광원, 광섬유를 이용하여 비전으로 검사할 수 있는 최적의 환경을 만들었다. 카메라에 부착된 회전 스테이지를 이용하여 검사대상의 웨이퍼를 정확한 위치로 조정된 다음 하단부에 설치된 광학 거울을 일정한 각도로 정렬하여 입사된 빛이 정반사 되도록 조정하였다. 그리고 줌(zoom) 렌즈를 x1로 설정하여 카메라를 통하여 입력되는 영상을 관찰하였다. 그리고 결함크기에 대한 기준치는 검사 속도와 생산성에 직접적인 영향을 미치므로 기준치에 대한 유연성을 갖게 하기위해서 사용자가 조

정할 수 있도록 하였다. 본 연구에서 적용한 결함영상의 기준치는 50 $\mu$ m로 하였다. Fig. 6은 영상처리 알고리즘을 사용하기 전, 비전 시스템을 이용하여 얻어진 태양광 웨이퍼의 여러 가지 결함에 대한 측정 영상을 나타낸 것이다. (a) 웨이퍼 절단 시 마찰에 의한 줄무늬 모양의 결함, (b) 얼룩, (c) 긁힘 자국, (d) 이물질에 의한 오염 등을 나타낸 것이다.

**5.3 실험결과**

Fig. 7은 본 연구에서 고안된 결함의 특징에 대한 패턴인식 영상처리 최적화 알고리즘을 적용한 영상을 나타낸 것이다. Fig. 6과 같이 기존의 비전 시스템에 의해 얻어진 영상들은 결함의 형태에 대해서는 알 수 있지만 결함의 특징정보에 대해 정량적으로 정확하게 측정할 수는 없었다. 그러나 본 연구에서 고안된 머신비전 시스템은 레이저 센서(3개; 중심, 좌측, 우측)와 영상처리 알고리즘을 이용하여 Fig. 8과 같은 결과들을 얻을 수 있었다. 예를 들어 웨이퍼 표면에 마찰에 의한 줄무늬(hazy saw mark)의 결함형상의 깊이와 두께에 대한 결함 특징들을 히스토그램으로 나타냄으로써 결함깊이 30~50 $\mu$ m 와 두께 150~350 $\mu$ m을 정확하게 측정하여 결함 기준치를 정의할 수 있었으며, (b)(c)(d)의 얼룩이나 오염에 의한 결함은 가중치 필터 알고리즘을 적용하여 기준치(50 $\mu$ m) 이하의 왜곡된 영상의 잡음을 제거함으로써 실제결함에 대한 특징들만을 부각시켜 결정할 수 있었다. 또한, 태양광 웨이퍼는 2절에서 언급한 바와 같이 에너지 변환효율을 높이기 위해 많은 빛이 반도체 내부로 투과되어야 하는데 2차적 결함인 표면결함 이외에도 반도체 내부에 이물질이 포함되어 있다면 에너지 변환효율이 떨어



**Fig. 6 Original defect images**

어지기 때문에 웨이퍼 내부의 결함을 검출하기 위해 Fig. 8와 같이 적외선을 이용하여 태양광 웨이퍼 내부결함 특징을 검사하여 웨이퍼 자체의 불량을 검사하였다.

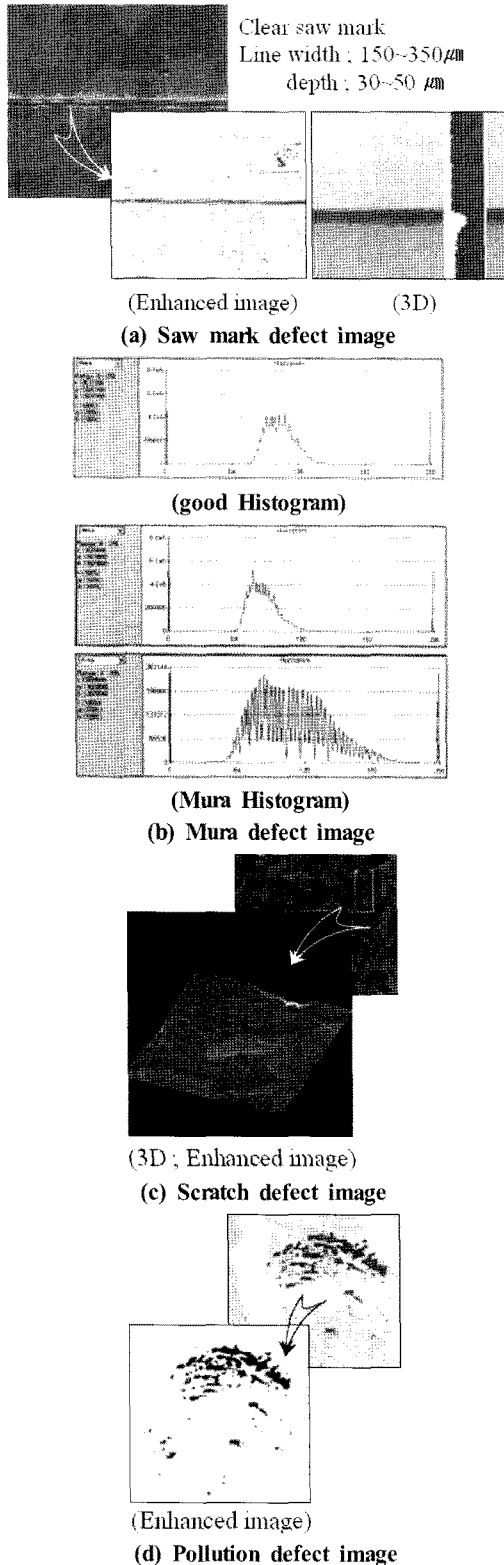


Fig. 7 Resulted images by using the filters



Fig. 8 Crack image of inner solar wafer by infrared rays

## 6. 결론

비전 검사 시스템에 의한 태양광 웨이퍼의 표면 영상에는 실제 존재하는 결함뿐만 아니라 과 검출을 일으키는 결함도 함께 포함된다. 그러나 가결함의 특징 정보들은 실제 존재하는 결함과 아주 유사하기 때문에 일반적인 광학설계 및 결함 검출용 알고리즘을 적용하여 검출하는 방법은 정확도가 많이 떨어지기 때문에 검사결과가 왜곡될 수 있다.

따라서 본 연구에서는 태양광 웨이퍼의 광학적 특성을 분석한 후 최적의 비전 광학계를 설계하여 영상을 획득한 후 표면에 발생하는 실제결함과 가결함을 정확하게 분리하고 실험적으로 검증함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 웨이퍼 상의 가결함을 찾아내기 위해 적용된 가중치 필터 알고리즘과 영상처리 알고리즘을 적용하여 마찰에 의한 줄무늬의 결함형상특징을 깊이(30~50µm)와 두께(150~350µm)를 정량적으로 구체화 하여 결함의 기준치를 정의할 수 있었다.
- (2) 결함의 유무뿐만 아니라 유형까지도 판별할 수 있는 자동 검사 시스템을 구현하기 위해 결함크기 50µm 기준치에서 대표적인 결함들을 분류하기 위한 특징과 패턴 알고리즘을 이용하여 새로운 결함을 추가하기 쉽도록 실험 등을 통해 확인하였다.
- (3) 향후 추가적인 결함 영상 및 결함패턴에 관한 지식을 통하여 다양한 결함 패턴들을 분류할 수 있도록 시스템의 기능이 추가되고 보완되어야 하며 분류방법에서도 좀 더 다양한 시도를 통해 최적의 결과를 얻을 수 있도록 지속적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

## 참고 문헌

- (1) Baik, J. H., 2005, "Vision of Solar Cell Technology," *KISTI, Kosen Expert Review paper*, pp. 21~35.
- (2) Chou, P. B., Rao, A. R., Sturzenbecker, M. C., and

- Brecher, V. H., 1997, "Automatic Defect Classification for Semiconductor Manufacturing," *Machine Vision and Application*, Vol. 9, No. 4, pp. 201~207.
- (3) Tobin, K. W., 1996, *Inspection in Semiconductor Manufacturing*, *Webster's Encyclopedia of Electrical and Electronic Engineering*, Wiley & Sons, New York, pp. 242~263.
- (4) Dana, H., and Christopher, M., 1982, *Computer Vision*, Prentice Hall, New Jersey.
- (5) Martina, C., and Vassilios, G., 1999, "Multi-level Counters for Single-phase Grid Connected Photovoltaic System," *Solar energy*, Vol. 66, No. 5, pp. 325~335.
- (6) Funck, J. W., Zhong, Y., Butler, D. A., Brunner, C. C., and Forrer, J. B., 2003, "Image Segmentation Algorithms Applied to Wood Defect Detection," *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 41, No. 1, pp. 157~179.
- (7) Park, H. J., and Hwang, Y. M., 2001, "Dimension Measurement using the Machine Vision," *Journal of the Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 91~99.
- (8) Boukharouha, S., Rebordao, J. M., and Wendel, P. L., 1985, "An Amplitude Method Based on the Distribution Function of an image," *Computer Vision, Graphic and Image Processing*, Vol.29, No. 1, pp. 47~59.