

광선 추적법에 의한 자동 광검사 장비의 결상 과정 전산모사

정상철^{1,2} · 이윤석^{1,2} · 김대찬^{1,2} · 오범환^{1,2} · 박세근² · 이일항² · 이승걸^{1,2†}

인하대학교 정보통신공학부 ¹조정밀 검사계측 연구센터(PIMC), ²집적형 광자기술 연구센터(OPERA)
☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

박성찬

단국대학교 첨단과학대학 전자물리학과
☎ 330-714 충청남도 천안시 안서동 산29번지

최태일

(주) 삼성전기
☎ 442-743 경기도 수원시 영통구 매탄3동 314

(2009년 7월 6일 받음, 2009년 7월 24일 게재 확정)

자동 광검사 장비의 검사 영상 획득과정을 전산모사하는 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터는 광선 추적법을 기반으로 조명 광학계, 검사 대상체 및 결상 광학계의 3가지 모듈로 구성하였다. 각 모듈이 갖는 광학적 특성을 실제와 일치시키기 위해, 다양한 물리적 모델과 실측 결과를 반영하여 주요 인자들의 종류와 범위를 결정하였다. 전산모사 결과의 타당성은 논리적인 검증 과정과 실험 결과와의 비교를 통해 확인할 수 있었다.

Ray Tracing-based Simulation of Image Formation in an Equipment for Automated Optical Inspection

Sang-Chul Jung^{1,2}, Yoon-Suk Lee^{1,2}, Dae-Chan Kim^{1,2}, Se-Geun Park², Beom-Hoan O^{1,2},
El-Hang Lee², and Seung Gol Lee^{1,2†}

¹SEM Co. - Inha Univ. Precision Inspection and Measurement Center (PIMC),

²Optics and Photonics Elite Research Academy (OPERA), Inha University, 253 Yonghyun-dong, Nam-gu, Incheon 402-751, Korea

†E-mail: sglee@inha.ac.kr

Sung-Chan Park

Department of Electro Physics, School of Advanced Sciences, Dankook University, Cheonan 330-714, Korea

Tae-II Choi

SAMSUNG ELECTRO-MECHANICS CO., LTD., 314, Maetan3-Dong, Yeongtong-Gu, Suwon 442-743, Korea

(Received July 6, 2009; Accepted July 24, 2009)

This paper describes the development of a simulator which can numerically calculate an image to be acquired in a machine vision system for automated optical inspection. The simulator is based on a ray tracing technique and composed of three modules which are an illuminating system, a specimen and an imaging system. Kinds of model parameters for modules and their values are carefully chosen from the direct measurement and the observation of related phenomena. Finally, the validity of the simulator is evaluated by logical analysis and by comparison with measured images.

Keywords: Automated Optical Inspection, Machine vision, Illumination, PCB

OCIS codes: (150.0150) Machine vision; (150.2950) Illumination; (120.4630) Optical inspection

†E-mail: sglee@inha.ac.kr

I. 서 론

제품의 대량 생산과 품질 향상 측면에서 공장 자동화(Factory Automation)와 자동 검사(Automatic Inspection) 기술은 매우 중요하며, 관련 기술 수준을 향상시키기 위한 노력이 국내외에서 활발히 진행 중이다. 이 중에서 자동 광검사(Automated Optical Inspection, 이하 AOI) 기술은 비접촉식 검사 기술의 하나로서, 비전 검사(vision inspection)를 통해 제품(혹은 검사 대상체)의 결함 유무를 신속히 판별하는 것이다.^[1] AOI에 의한 제품 검사에 있어서 검사의 신속성과 정확성은 검사 조건 즉, 조명 및 결상 조건과 밀접한 관련을 가지며, 제품의 속성에 따라 그 구체적인 조건이 크게 달라진다. 지금까지 검사 조건의 최적화는 전문가의 노하우(know-how)를 바탕으로 많은 시행 착오를 거쳐 이루어졌으므로, 이 과정에 많은 비용과 시간이 소요되었다. 특히, 소량 다품종 생산이 일반화되고 제품의 라이프 사이클이 짧아짐에 따라, 다양한 제품에 대한 검사 기술 혹은 검사 조건의 신속한 대응이 절실히 요구되고 있다.^[2]

만일 전산모사(simulation)를 통해 AOI 장비에서 획득되는 검사 영상을 예측할 수 있다면, 검사 조건의 최적화를 단기간, 저비용으로 진행할 수 있을 것이다. 검사 영상 예측을 위해서는 AOI 장비에서 사용되는 조명용 광원을 모델링할 수 있어야 하고, 제품 표면의 산란 및 광 특성을 반영하여 조명광이 제품 표면에 의해 산란 혹은 반사되는 것을 예측할 수 있어야 한다. 최근 광선 추적법(Ray tracing technique) 기반의 상용 프로그램들이 개발되어 조명 광학계 설계, 분석, 개선의 목적으로 광범위하게 활용되고 있다.^[3] 그러나, 상용 프로그램에서는 제품 표면의 산란 특성을 고려하지 못하거나 결상 과정을 지원하지 않으므로, 전문적인 문제를 해결하는 수단으로 활용하는데 한계가 있다.

그러므로 본 연구에서는 AOI 장비의 영상 획득 과정을 전산모사하여 검사 영상을 예측하는 시뮬레이터(simulator)를 개발하였다. 영상 획득 과정을 조명 광학계(illuminating system), 검사 대상체(specimen), 그리고 결상 광학계(imaging system)로 모듈(module)화 하였으며, 조명 광원에서 방출된 빛이 결상 광학계의 이미지 센서 면에 도달하는 일련의 과정을 광선 추적법으로 취급하였다. 구현된 시뮬레이터의 정확성을 비교 평가하였으며, AOI 장비의 검사 조건을 최적화하는데 활용될 수 있음을 보였다. 논문의 II장에서는 시뮬레이터의 구성 및 구현 알고리즘을 소개하고, III장에서는 조명 광원과 제품 속성을 규정하는 각종 인자의 설정 과정을 설명하였다. 그리고 IV장에서는 시뮬레이터의 계산 결과를 비교 검증하여 적용된 알고리즘의 적절성 및 시뮬레이터의 활용 가능성을 확인하였고 끝으로 결론을 맺었다.

II. 자동 광검사 시뮬레이터의 구성 및 이론

2.1. 시뮬레이터의 구성 및 기능

제품의 결함 유무를 신속하고 정확하게 판별하기 위해,

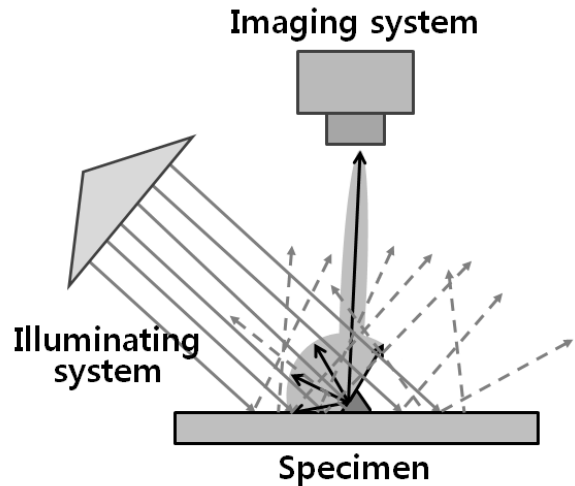


Fig. 1. Schematic of an automated optical inspection system.

AOI 장비에서는 제품의 2차원 영상을 단순히 획득하는 것이 아니라, 검사 항목이 뚜렷이 식별될 수 있는 영상을 획득해야 한다. 검사 영상에서 검사 항목의 명암 대비(contrast)를 높이기 위해서는 제품의 형상과 표면의 산란 특성 등을 고려하여 조명 광학계, 조명 조건, 결상 광학계 및 결상 조건을 적절히 선정해야 한다. 따라서, 최적의 검사 조건은 제품의 속성 및 검사 항목에 따라 크게 달라질 수 있다. 그러므로 개발될 시뮬레이터는 다양한 형태의 조명 광원을 모델링할 수 있어야 하고, 검사 조건을 쉽게 변경해 볼 수 있어야 한다.

이를 위해 시뮬레이터는 검사 제품을 비추는 조명 광학계, 측정하고자 하는 제품인 검사 대상체 그리고 검사 영상을 획득하는 결상 광학계로 모듈화되며, 그 구성은 그림 1과 같다. 조명 광학계 모듈을 이용하여 light emitting diode (LED), LED 배열 광원 등과 같은 다양한 조명 광원을 모델링할 수 있으며, 광원으로부터 방출되는 빛은 유한개의 광선으로 묘사된다.^[4] 검사 대상체 모듈은 제품의 형상, 표면의 광 특성 및 산란 특성^[5]을 규정하며, 입사된 조명광이 제품 표면으로부터 산란되는 과정도 다룬다. 마지막으로 결상 광학계는 제품 표면으로부터 산란된 광선을 결상하여 검사 영상을 형성하게 된다.

2.2. 각 모듈의 구현 이론 및 방법

첫째, 조명 광학계 모듈에서는 빛을 방출하는 광원부, LED 정의^[6]에 필요한 반사컵 및 LED 캡슐, 그리고 조명광의 방출 특성을 변경하기 위한 반사경, 렌즈, 필터, 확산판 등의 각종 광학소자를 정의한다. 이들 요소 혹은 소자를 조합하여 AOI장비에서 사용되는 LED 배열 광원^[7]이나 fiber illuminator와 같은 다양한 조명 광원을 모델링 한다. 광원부에서 빛의 방출 과정을 묘사하기 위해 Lambertian 방출 분포나 가우스 방출 분포를 가정하고^[8], 이들 확률분포 함수에 맞춰 광선의 출발점 및 방향을 무작위로 결정한다. 생성된 광선은 정의된 여러 요소를 지나 조명 광학계를 빠져 나오게 되는데, 이때 요소와 광선의 상호 작용은 광선 전파, 경계면에서의 반사

혹은 투과에 관한 광선 추적 이론으로 취급한다.

예를 들어 LED 배열 광원을 모델링 하는 경우, 먼저 LED chip이라 불리는 광원부, 반사컵, 그리고 캡슐의 정의를 통해 단일 LED를 모델링한 후, 이를 조합해서 다양한 형태의 LED 배열 광원을 구성한다. 이때 광선은 LED chip 표면과 측면으로부터 모두 방출될 수 있다고 가정하고, 반사컵 표면에서의 산란 효과도 고려한다. 조명 광학계 모듈에서는 정의된 조명 광원의 타당성을 검증하기 위해 방출 특성을 나타내는 방출광의 광량 분포나 방출광의 조명각도 분포를 계산할 수 있다.

두 번째로 검사 대상체 모듈에서는 형상 정보와 표면의 산란 및 광 특성을 정의하여 검사 제품의 속성을 모델링하게 된다. 제품 표면으로부터 산란되는 광선을 예측하기 위해 산란 특성은 physics-based model^[9]을 따른다고 가정하며, 해당 산란 인자들로 산란 특성을 정의한다. 산란 특성을 정확히 규정하기 위해 실제 제품의 표면 산란 특성을 실험적으로 측정하였으며, 측정 결과를 산란 이론에 곡선 맞춤하여 정확한 산란 인자를 추출하였다.^[10]

제품 표면에 입사된 조명 광원의 산란 과정은 검사 대상체 모듈에서 다루어지며, 이를 위해 전술한 산란 이론과 Monte Carlo method를 결합하여 표면 산란 특성에 맞춰 산란 광선을 확률적으로 생성한다. 이때 거부법(rejection method)^[11]을 활용하여 산란 광선 생성에 요구되는 계산량과 계산 시간을 크게 단축하였다.

마지막으로 결상 광학계 모듈은 AOI 장비의 카메라와 그 기능을 모델링하는 것으로 결상용 렌즈의 초점거리 및 수치구경, 이미지 센서의 크기, 픽셀 수 등을 정의할 수 있다. 이미지 센서에 상이 맺히는 과정을 다루기 위해 제품 표면으로부터 산란된 광선이 결상용 렌즈 구경 내로 입사하는 지를 먼저 판별하고, 구경 내로 입사한 광선에 대해 결상 이론을 적용하여 이미지 센서 면에 도달한 광선의 위치를 결정한다. 도달점 위치로부터 이미지 센서의 픽셀 위치를 구한 후 해당 픽셀의 밝기를 한 단계 증가시켜 준다. 결상 이론으로는 thin lens equation 을 이용하며, 결상용 렌즈는 수차를 갖지 않는 것으로 가정한다.

개발된 시뮬레이터의 동작 흐름도는 그림 2와 같다. 우선, 세가지 모듈을 통해 조명 광원, 검사 제품, 그리고 카메라를 정의한 다음, 조명 광원과 제품의 공간적 배치(혹은 조명 조건), 제품과 카메라의 공간적 배치 (혹은 결상 조건)를 규정함으로써, AOI 장비의 검사 영상을 획득하기 위한 전산모사 준비 단계가 완료된다. 이제 조명용 광학계로부터 백만개 이상의 광선을 무작위로 생성한 후, 각 광선이 검사 제품 표면에 입사하는 과정, 입사된 광선의 산란 과정, 그리고 최종 산란광이 이미지 센서의 어떤 픽셀에 도달하는 지를 수치해석적으로 계산한다. 이 계산을 모든 광선에 대해 반복함으로써, 이미지 센서를 구성하는 각 픽셀에 입사된 광선의 수를 구할 수 있으며, 광선 수 분포가 바로 AOI 장비의 최종 검사 영상이 된다.

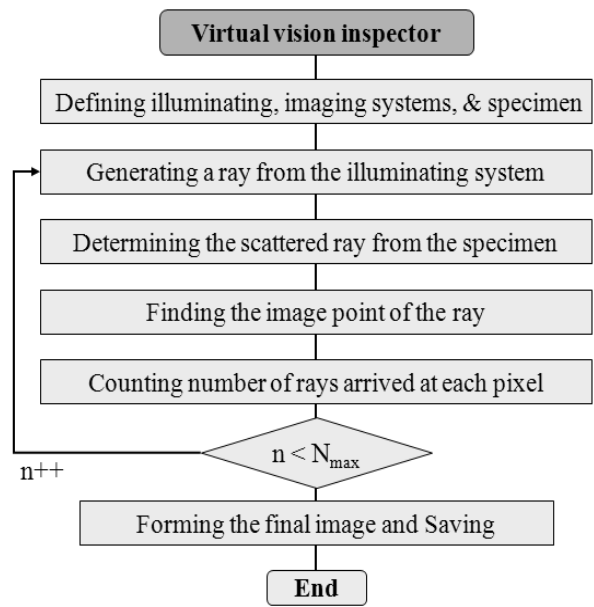


Fig. 2. Flow chart for calculating the final image in an automated optical inspection equipment system.

III. 조명 광원 및 제품의 속성인자 설정 과정

시뮬레이터의 정확성은 구현 과정에 도입된 이론과 알고리즘의 타당성에 의해 좌우되며, 전산모사된 결과의 정확성은 조명 광원과 제품의 속성을 규정하는 각종 인자들에 의해 결정된다. 따라서 의미 있는 전산모사 결과를 얻고 이를 통해 AOI 장비의 최적 검사 조건을 예측하기 위해서는 전산모사에서 요구되는 각종 인자를 정확히 파악하는 것이 매우 중요하다. 이미 설명한 바와 같이 제품 표면의 산란 특성을 규정하기 위해 실험적으로 측정된 산란 특성으로부터 추출된 인자를 사용하였다. 그리고 조명 광원의 속성을 실제 광원과 일치시키기 위해서는 다음과 같은 실험 및 비교 과정을 통해 관련 인자를 추출하였다.

AOI 장비에서 사용되는 LED 배열 광원은 휘도가 높은 LED들로 구성되므로, 본 연구에서는 Nichia사의 고휘도 LED 제품들을 대상으로 삼았다. LED정의에 필요한 인자를 얻기 위해 우선 제품 규격 자료를 참고하였고, LED 캡슐에 관한 정보(반경, 높이, 곡면의 곡률 반경)는 외형 측정을 통해 파악하였으며, LED 캡슐 내부에 포함된 LED chip과 반사컵의 규격은 LED 캡슐을 연삭한 후 측정하였다. 그러나, LED chip 표면의 광선 방출 분포, LED chip의 상단 및 측면 방출 비율, 그리고 반사컵의 산란 특성 등은 실측 과정으로는 파악하기 어려워, 실제 LED 제품의 방출광 분포(radiation distribution)와 시뮬레이터로 예측된 방출광 분포를 일치시키는 방법으로 확정하였다. 이러한 과정을 통해 단일 LED의 모든 인자를 확정하고 LED 배열 광원을 정의하였다.

확정하지 못한 LED 인자들의 조정 과정을 통해 시뮬레이터의 예측 결과를 측정된 LED의 방출광 분포에 일치시킨 결

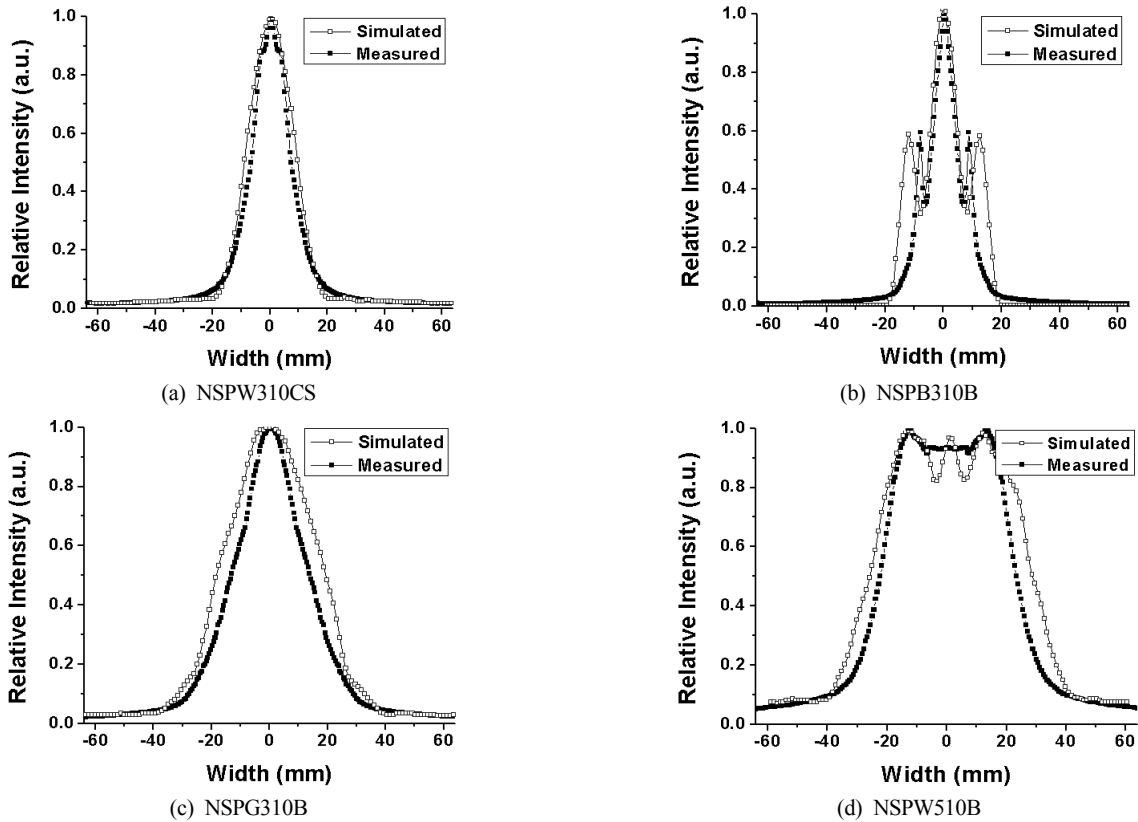


Fig. 3. Comparison of measured and simulated radiation patterns for four kinds of LEDs. (a)NSPW310CS (b)NSPB310B (c)NSPG310B (d)NSPW510DS

과는 그림 3과 같다. 여기서 측정 결과는 LED 전방 5cm 위치에서 측정된 광량 분포이다. 총 4가지 모델(NSPW310CS, NSPB310B, NSPG310B, NSPW510BS)의 LED가 비교되었으며, 내부 반사컵에 의해 공통적으로 지향성을 가지고 있다. NSPB310B 모델의 경우에는 side lobe를 보이며, NSPW510BS 모델의 경우에는 박쥐 날개(batwing) 모양의 특이한 분포를 보이고 있다. 일부 미세한 차이가 보이긴 하지만, 인자 조정을 통해 방출광 분포의 예측 결과를 측정 결과에 최대한 맞출 수 있었다. 부분적인 불일치는 반사컵의 산란 특성을 정확히 반영하지 못했기 때문으로 이해된다.

IV. 전산모사 결과 및 분석

AOI 장비의 결상 과정을 전산모사하기 위해 조명 광원으로 64개의 LED (Nichia사의 NSPW310CS)로 구성된 정사각형 LED 배열 광원을 정의하였다. 정의된 광원의 형태와 방출 특성은 그림 4와 같다. 그림에서 (a), (b), (c)는 조명 광원으로부터 각각 $z=10, 20, 30$ mm 떨어진 곳에 위치한 관찰면 (크기는 50×50 mm²)에서의 광량 분포이다. 그림 4(a)에서처럼 근거리에서는 단일 LED의 형상들이 대략적으로 관찰되며, 거리가 멀어짐에 따라 관찰면의 광량 분포가 점차 균일해 짐을 알 수 있다. 그리고 그림 4(c)에 표시된 두 점 A와 B에 입사한 조명광의 입사각도 분포는 그림 4(d), 4(e)와 같

다. 여기서 K와 L은 x축(가로 방향)과 y축(세로 방향)에 대한 입사 광선의 방향 여현(directional cosine)이다. 그림 4(d)에 보여진 것처럼 30 mm 떨어진 곳에 위치한 관찰면의 중앙점 A에는 광선들이 주로 관찰면에 수직하게 입사하며, 나머지 광선이 사각을 이루며 입사하는데 그 분포는 대칭적임을 알 수 있다. 그러나 그림 4(e)에 보여진 것처럼 관찰면의 오른쪽 점 B에 입사하는 광선의 각도 분포는 y축 방향에 대해 비대칭적임을 알 수 있다. 이는 LED 배열 광원으로부터 -x축 방향으로 방출된 광선들은 x좌표가 양의 값을 갖는 관찰면의 오른쪽 지점으로 올 수 없음을 의미한다.

전산모사의 타당성을 논리적으로 검증하기 위해 검사 제품으로 20×20 mm²의 단면 크기를 갖는 평판 위에 폭이 3 mm이고 두께가 각각 1.0과 1.5 mm인 두 종류의 띠가 가로 방향으로 서로 평행하게 배열된 형상을 가정한다. 정의된 제품의 대략적인 형상은 그림 5에 나타내었는데, 이는 PCB 기판의 일부 영역을 모사한 것으로 평판은 solder resist (SR) 면을 의미하며, 두 가지 띠는 Au PAD를 의미한다. SR 면의 산란 특성은 정반사가 지배적이고 반사율이 높은 표면^[12]으로 규정하며, 두께가 1.5 mm인 Au pad 띠는 정반사 방향의 지향성 산란(directional scattering)을 보이는 표면으로, 두께가 1.0 mm인 Au pad 띠는 Lambertian 산란 속성을 갖는 표면으로 각각 규정한다. 따라서 두번째 띠에 입사되는 광선은 넓은 각도 범위로 산란하게 된다.

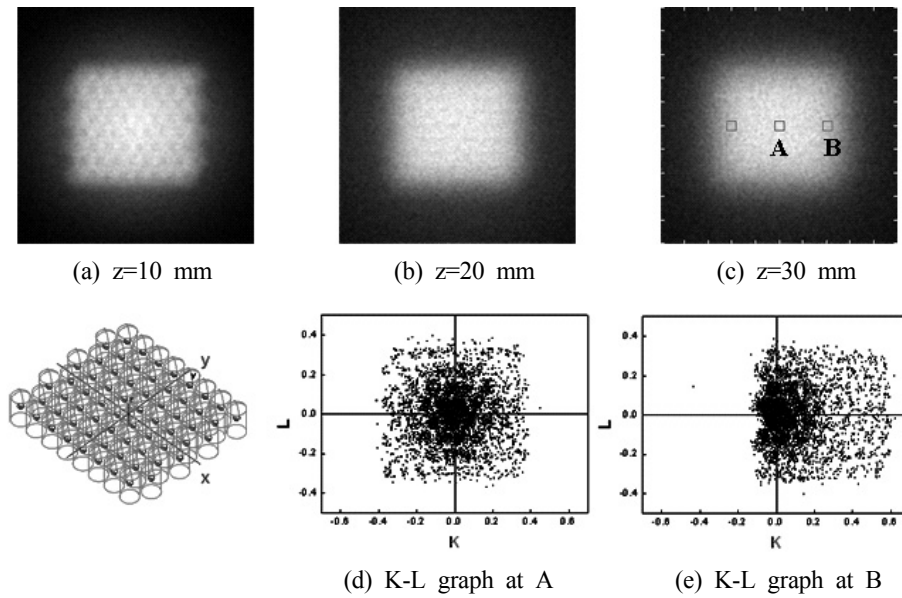


Fig. 4. A 8x8 square LED array defined by simulator and illumination characteristics

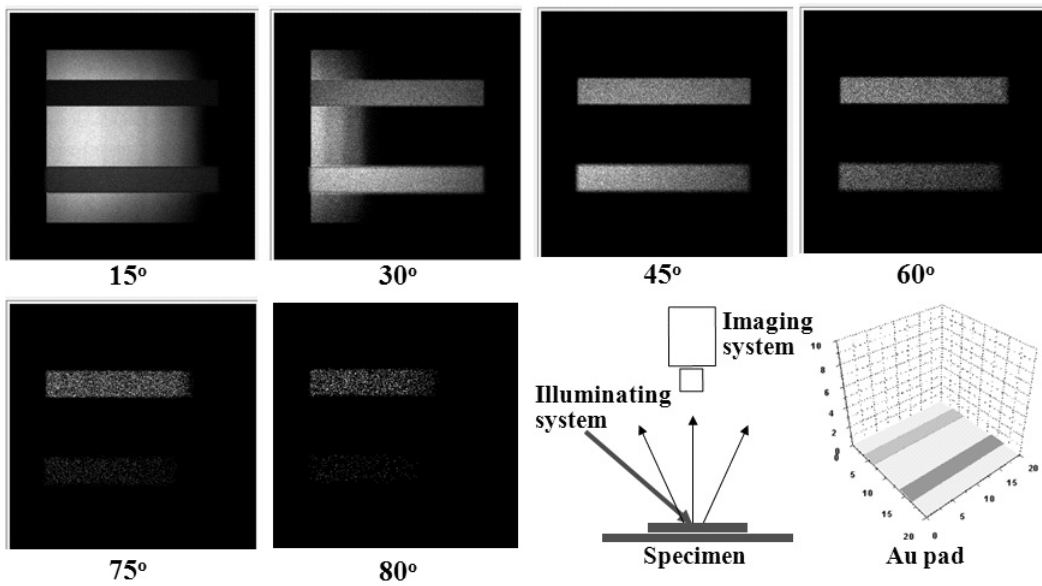


Fig. 5. Simulated images of an artificial PCB surface with two different Au pads for several illumination angles.

마지막으로 결상용 광학계로 초점거리 50 mm, 렌즈 직경 100 mm, NA 0.5인 결상용 렌즈를 정의하였고, 이미지 센서의 크기와 픽셀 수를 각각 15x15 mm²와 256x256로 설정하였다.

결상 광학계에 의해 검출되는 영상은 조명 조건과 결상 조건에 따라 달라지는데, 이를 확인하기 위해 제품 표면을 수직으로 내려다 보도록 결상용 광학계를 고정 배치하였고, 조명 광원의 조명 각도를 변화시키면서 검사 영상을 전산모사하였다. 계산 결과는 가장 밝은 픽셀의 그레이 레벨(grey level)을 최대치인 255로 정규화하여 영상으로 표현하였다. 그림 5에서처럼 조명 각도를 10°, 30°, 45°, 60°, 75°, 80°로 변경할 때, 표면 산란 특성이 다른 3가지 부분이 영상으로

어떻게 보여지는지를 살펴보았으며, 이러한 각도 변화는 bright-field 영상에서 dark-field영상으로의 변화를 의미한다.^[1]

그림 5에서 SR 면의 경우는 정반사 특성이 매우 강하기 때문에 조명 각도가 낮은 경우에만 밝게 관찰되며, 이 조건에서도 결상 광학계의 광축으로부터 벗어난 SR면은 어렵게 관찰됨을 알 수 있다. 저각 조명의 경우, Au pad에 해당하는 두 가지 띠는 밝기가 어두워 거의 관찰되지 않는다. 한편, 조명각이 점차 커짐에 따라 위에 있는 Au pad 띠는 Lambertian 산란 특성을 가지므로 각도에 관계없이 대부분 조건에서 관찰됨을 알 수 있다. 하지만, 아래 Au pad 띠는 지향성 산란 특성을 가진 부분으로 위쪽 Au pad 띠에 비해 조명 각도가 커짐에 따라 점차 어둡게 되며 조명 각도가 75도 혹은 80도 일

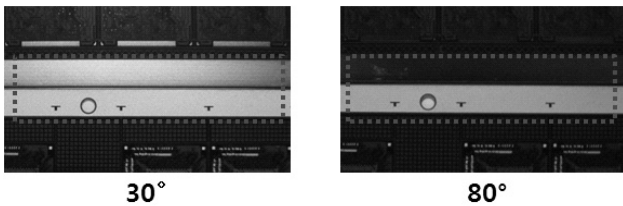


Fig. 6. Real images of a PCB surface with two different Au pads on it.

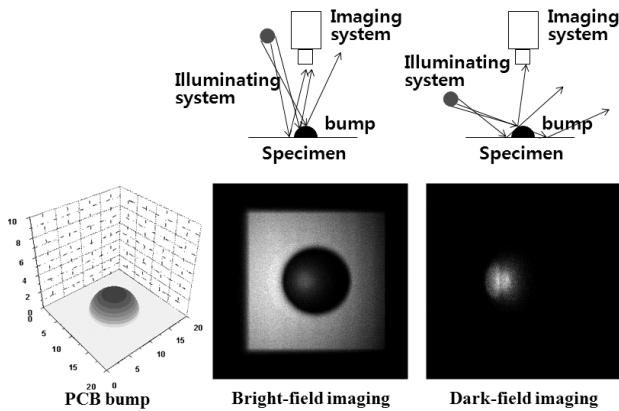


Fig. 7. Bright and dark field images of a PCB bump simulated by our simulator.

때는 거의 관찰되지 않음을 알 수 있다. 이상의 결과는 논리적으로 잘 이해될 수 있는 것으로 개발된 시뮬레이터에 의한 영상 획득 과정이 타당한 것으로 판단할 수 있다.

전사모사 과정과 동일한 조건으로 실제 영상을 얻지는 못했지만, 그림 6에 보여진 것처럼, PCB 표면에 형성된 두 가지 Au pad를 두 가지 조명 각도(30도와 80도)에 대해 각각 관찰하였다. 그림 6의 사진에서 위에 있는 Au pad는 입사광을 좁은 각도로 산란시키며 아래에 있는 Au 패드는 상대적으로 넓은 각도로 빛을 산란하는 특성을 가진다. 그림 6의 실제 영상과 그림 5의 30도 및 80도 영상은 서로 대응되는 것으로 전술한 설명과 잘 일치함을 알 수 있다.

끝으로 PCB기판 위에 직경이 5 mm인 반구 형태의 solder ball이 솟아 있는 PCB bump를 AOI 장비로 관찰한 영상을 전산모사해 보았다. 앞에서 정의했던 것과 동일한 조명 광원을 법선 방향에 대해 왼쪽 10도 방향, 결상 광학계는 수직 아래를 관찰하도록 하는 조건에서 PCB bump의 bright field 영상을 얻었다. 또한, 결상 광학계를 고정한 채 조명 광원의 조명 각도를 60도로 높여 dark field 영상을 얻었다. PCB 기판은 정반사 특성이 높은 SR 면으로 가정하였으며, solder ball은 지향성 산란 특성을 가진 것으로 가정하였다. 그림 7의 두 가지 영상에서 solder ball내의 밝은 영상은 조명 광원의 입사 방향과 결상 광학계의 광축이 정반사 조건을 이루는 경우에 해당한다. 이 결과를 결함 검사의 관점으로 보면 bright-field 영상은 정확한 위치에 solder ball이 도포되어 있는지를 검사할 때, dark-field 영상은 도포된 solder ball의 존재 유무를 검사할 때 유용하게 사용될 수 있을 것이다. 이러한 결과를 통해 제품 속성과 검사 항목에 최적화된 조명 기

술을 개발하는 수단으로 개발된 시뮬레이터가 활용될 수 있을 것으로 판단한다.

V. 결 론

본 연구에서는 광선 추적법과 표면 산란 이론을 결합하여 제품의 결함 유무를 검사하는 AOI 장비의 검사 영상 획득 과정을 전산모사하는 시뮬레이터를 개발하였다. 시뮬레이터는 조명 광학계, 검사 대상체, 그리고 결상 광학계 모듈 3가지로 구성되어, AOI 장비의 조명 광원에서 빛이 방출되는 단계, 제품 표면에서 빛이 산란되는 단계, 그리고 결상 광학계에 의해 상이 형성되는 단계를 구분 처리토록 하였다. 모듈화를 통해 조명 조건이나 결상 조건을 임의로 변경할 수 있도록 하였으며, 이러한 기능은 AOI 장비의 검사 조건을 최적화하는데 매우 유용할 것이다.

전산모사 과정에서 조명 광원이나 제품의 표면 특성에 관한 주요 인자들은 직접 계측을 통해 확보하거나 실험 결과를 이론적 모델과 비교하는 과정에서 추출하였다. 개발된 시뮬레이터는 두 가지 종류의 PCB 기판에 대해 적용되어 다양한 검사 조건에서의 검사 영상을 획득하였다. 획득된 영상은 논리적인 과정을 통해 검증되었으며, 유사한 실험 결과와 비교하여 타당성을 확인하였다.

개발된 시뮬레이터는 AOI 장비용 조명 광원의 최적화나 검사 조건 최적화에 활용되어 기존의 검사 예비 공정을 단축하거나 관련 비용을 절감하는데 유용할 것이라 기대한다. 향후 실제 검사 영상과의 비교를 통해 시뮬레이터의 정확성을 엄정하게 요구되며, 전산모사에 필요한 주요 인자의 정확성을 높이는 노력 또한 필요하다고 본다.

감사의 글

본 연구는 삼성전기-인하대 초정밀 검사계측 연구센터의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

References

1. D. Martin, "A practical guide to machine vision lighting," available at <http://www.advancedillumination.com>.
2. R. Seurin, F. Merienne, and P. Gorria, "Machine vision system for specular surface inspection: use of simulation process as a tool for design and optimization," available at <http://vision.u-bourgogne.fr/Le2i/>.
3. S.-C. Park, "Tools for optics," *Optical Science and Technology* **10**, 23-27 (2006).
4. T. Sakamoto, "Ray trace algorithms for GRIN media," *Appl. Opt.* **26**, 2943-2946 (1987).
5. M. Rea, J. van Derlofske, and Dr. William, "Illumination fundamentals," available at <http://www.opticalres.com/lt/illuminationfund> (2000).
6. H. Zerfau-Dreihöfer, U. Haack, T. Weber, and D. Wendt,

- “Light source modeling for automotive lighting devices,”
Proc. SPIE **4775**, 58-66 (2002).
7. A. L. Dubovikov, S. S. Repin, and S. N. Natarovskii,
“Features of the use of LEDs in artificial-vision systems,”
J. Opt. Technol. **72**, 40-42 (2005).
 8. A. Ryer, “*Light measurement handbook*,” Newburyport, MA:
international light, available at <http://www.intl-light.com/handbook/> (1998).
 9. X. D. He, K. E. Torrance, F. X. Sillion, and D. P. Greenberg,
“A comprehensive physical model for light reflection,”
Computer Graphics **25**, 175-186 (1991).
 10. N.-H. Ko, D.-S. Park, Y.-S. Kim, T. I. Choi, S.-G. Park,
B. H. O, E.-H. Lee, and S. G. Lee, “Measurement and
analysis of light scattering of Au pads on PCB surface to
extract scattering parameters,” Hankook Kwanghak Hoeji
(Korean J. Opt. Photon.) **20**, 134-140 (2009).
 11. W. H. Press, *Numerical Recipes In C : The Art of Scientific
Computing* (Cambridge University Press, New York, NY,
USA, 1997), pp. 290-296.
 12. F. Pernkopfa and P. O’Learyb, “Image acquisition techniques
for automatic visual inspection of metallic surfaces,”
NDT&E International **36**, 609-617 (2003).