

인쇄회로기판용 Au 패드의 산란 특성 측정 및 분석에 의한 산란 인자 추출

고낙훈 · 박대서 · 김영석 · 오범환 · 박세근 · 이일항 · 이승걸[†]

인하대학교 정보통신공학부
☎ 402-751 인천광역시 남구 용현동 253

최태일

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

(2009년 1월 9일 받음, 2009년 3월 9일 수정본 받음, 2009년 3월 23일 게재 확정)

본 논문에서는 인쇄회로기판에 있는 Au 패드의 표면 조도와 산란 현상의 상관 관계를 연구하였다. 여러 가지 Au 패드에 대해 입사 각을 달리하여 산란 각도 별 산란 분포를 측정하였으며, 표면 조도와 정반사 성분의 관련성을 이용하여 정반사 성분과 난반사 성분을 분리하였다. 최종적으로 분리된 난반사 성분을 physics based model에 곡선 맞춤을 수행하여 주요 산란 인자들을 추출하였으며 측정된 산란 인자와 비교를 통해 모델의 정확성을 확인하였다.

주제어: BRDF, Surface scattering, Surface roughness, PCB

I. 서 론

인쇄회로기판(Printed Circuit Board, 이하 PCB)의 결함 여부는 PCB를 포함하는 제품에 대한 신뢰성과 생산성에 영향을 미치기 때문에 PCB 결함 검사는 공정 관리 측면에서 매우 중요하다. 과거 PCB 결함 검사는 검사원에 의한 시각 검사에 의해 이루어졌으나, PCB 패턴이 점차 복잡해지고, 그 선폭(linewidth)이 축소됨에 따라 신속하고 정확한 검사를 수행할 수 있는 비전 검사(vision inspection) 방법으로 발전하였다.^[1] 비전 검사에서는 단순히 밝은 영상을 얻는 것이 아니라, 검사 항목에 해당하는 특이부의 조도 대비(luminance contrast)를 극대화하여 검사 항목을 선명하게 식별할 수 있는 영상을 획득할 수 있어야 한다. 이를 위해 비전 검사 시스템에서는 결함이 있는 부분과 없는 부분에서의 반사율 혹은 산란 특성 등의 차이를 활용한다. 따라서 검사 대상체의 조명 방식과 대상체에 의한 산란 특성의 관계를 이해하는 것은 최적 조명 조건을 규명하는데 매우 중요하며, 비전 검사 시스템의 성능 향상을 위해서도 매우 필요하다.^[2]

산란은 순수 광학분야의 아주 오래된 연구 주제 중의 하나이며, 최근에는 물체 표면을 실감나게 표현하기 위한 목적에서 컴퓨터 그래픽스 분야에서도 큰 관심을 가지는 분야이다.^[3] 산란 현상을 다루는 대표적인 산란 이론으로 Beckmann-Kirchhoff model,^[4-7] statistical ray method,^[8] physics based model^[9] 등이 있다. Beckmann-Kirchhoff model의 경우, 다중 산란을 고려하지 못하기 때문에 매우 거친 표면에서 정확도가 낮고 투명한 매질과 복잡한 표면에서의 산란을 구현하지 못한다. 또한 산란 현상은 시료 높이의 표준 편차와 상관 거리뿐만 아니라 매질의 굴절률에 의해서도 영향을 받으나 이

를 고려하지 못한다.^[6] 이에 비해 statistical ray method는 Fresnel 방정식에 의한 반사율을 고려하며, 가시도 함수를 통해 다중 산란을 고려한다. 하지만 회절 현상을 고려하지 못하므로, 이 모델 역시 적용 범위에 제한을 갖는다.^[8] 한편, physics based model은 기존 산란 모델들의 한계점을 극복하기 위해 만들어진 산란 모델로서 산란 현상의 각종 효과를 모두 고려하고 있을 뿐만 아니라 표면 내부의 부피 산란(bulk scattering) 및 역반사(retro-reflection) 등도 고려하고 있다.^[9]

전술한 바와 같이 결함 검사의 정확도를 향상하기 위해 PCB 표면에서의 산란 현상을 이해하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 기존의 산란 이론을 활용하여 PCB 표면의 산란 현상을 정확히 해석하고 관련 산란 인자를 추출함으로써, 자동 광학 검사(Automatic Optical Inspection, AOI) 장비의 최적 조명 조건을 규명하기 위한 기초를 제공하고자 한다. 이를 위해 physics based model에 기반한 산란 분석 프로그램을 개발하였으며, 표면 조도가 서로 다른 Au 패드(pad)의 산란 현상을 실험적으로 측정하고, 그 결과를 곡선 맞춤(curve fitting)함으로써 PCB의 산란 현상을 설명하는 산란 인자들을 추출하였다.

II. 산란 이론

2.1. 표면 조도와 산란

일반적으로 거친 표면으로부터 산란된 산란광은 난반사(diffuse scattering) 성분과 정반사(specular scattering) 성분의 합으로 주어진다. 산란 특성에 가장 큰 영향을 주는 요소는 표면의 거칠기 상태인데, 이는 표면 높이의 표준 편차(RMS roughness, σ , 이하 표면 조도)와 상관 거리(correlation length, l_c)에 의해 정의된다. 상관 거리는 자체공분산함수(autocovariance function)

[†]E-mail: sglee@inha.ac.kr

로부터 정의될 수 있다.^[10] 자체공분산함수는 표면의 높이 함수(surface profile)와 면 방향으로 이동된(shifted) 동일한 높이 함수를 서로 곱한 것으로 표면 거칠기의 상관 관계(correlation)를 설명해 준다. 이때 상관 거리는 자체공분산함수 값이 최대치의 1/e로 감소되는 표면 방향의 이동 길이로 정의되며, 거칠기의 주기성과 관련을 갖는다.

산란광 중에서 정반사 방향(입사각의 대칭 방향)으로 방출되는 정반사 성분(I_{sp})의 크기는 식 (1)과 같이 표현되며,^[11]

$$I_{sp} = I_0 \exp\left\{-\left(\frac{4\pi\sigma \cos\theta_i}{\lambda}\right)^2\right\} \quad (1)$$

여기서, I_0 , θ_i , λ 는 각각 정반사 성분을 포함하여 모든 방향으로 산란되는 산란광 세기의 합(간단히 총 반사율이라고 함), 입사각, 입사광의 파장을 의미한다. 식 (1)에서 입사광의 파장과 입사각이 커질수록 정반사 성분이 커지고, 반대로 표면 조도 σ 가 커질수록 정반사 성분이 작아짐을 알 수 있다. 한편, 표면 거칠기의 자체공분산함수에 푸리에 변환(Fourier transform)을 적용하여 power spectral density를 구하면, 그 결과는 바로 난반사 성분의 산란광 분포가 된다. 이러한 산란광 분포 즉, 산란 특성을 양방향 반사 분포 함수(Bidirectional Reflectance Distribution Function, 이하 BRDF)로 나타낸다. 이때 BRDF는 입사광의 복사 조도(Irradiance)와 반사광의 복사 휘도(Radiance)의 비로 정의되며, 단위는 [sr^{-1}]이다.^[10,12]

2.2. Physics based model

여러 가지 산란 이론 중에서 2008년 Ingmar G. E. Renhorn 와 Glenn D. Boreman에 의해 제안된 physics based model은 산란 현상과 관련된 거의 모든 효과를 고려하는 이론이다. 따라서 본 연구에서는 Au 패드의 산란 현상을 설명하기 위해 이 모델을 활용하였다. 이것은 산란 현상을 정교하게 모델링하여 이론적으로 BRDF를 유도한 것이 아니라 일종의 경험식(empirical relation)에 가까운 것이다. 기본적인 산란 이론에 관련된 특이 효과를 현상론적으로 고려하여 BRDF 표현을 단계적으로 확장한 것이다.^[9]

Physics based model에서 BRDF 표현이 정립되는 과정을 간단히 기술하면 다음과 같다. 먼저 시료 표면이 xy 평면과 나란하고 각 점에서의 높이가 z좌표로 표현되는 경우, 시료 표면의 높이 함수는 $z = h(x, y)$ 로, 자체공분산함수는 $g(x, y)$ 로 각각 표현된다. 거친 표면의 자체공분산함수는 지수함수 혹은 가우스 함수(Gaussian function)로 기술될 수 있으나, 참고 문헌 [9]에서는 자체공분산함수가 지수함수인 경우를 가정하고 있다.

$$g(x, y) = \sigma^2 e^{-(|x|+|y|)/\rho} \quad (2)$$

식 (2)의 자체공분산함수를 푸리에 변환하면, 식 (3)과 같은 기본적인 BRDF 식을 얻을 수 있다.

$$G(\alpha, \beta) = \frac{2}{\pi} \frac{\rho^2 \sigma^2}{\alpha^2 + \beta^2 + \rho^2} \quad (3)$$

여기서 σ 와 ρ 는 표면 조도와 상관 거리(l_c)의 역수이며, α , β 는 산란광의 방향 여현(directional cosine)이다. 구면좌표계의 위도각(polar angle)과 방위각(azimuthal angle)을 이용하여 입사 광선의 입사각은 θ_0 와 $\phi_i = 0^\circ$ 로, 산란각은 θ_s 와 ϕ_s 로 각각 표현된다. 이때 식 (3)의 방향 여현은 다음과 같이 주어진다.

$$\alpha = \sin(\theta_s) \cos(\phi_s), \beta = -\sin(\theta_s) \sin(\phi_s) \quad (4)$$

식 (3)의 기본적인 BRDF 식은 Lorentzian 함수 꼴을 가지는데, 이 식에 여러 가지 산란 효과를 반영하여 식 (5)와 같은 최종적인 Lorentzian BRDF 표현을 얻게 된다. 자세한 과정은 참고문헌 [9]에 기술되어 있으므로, 본 논문에서는 고려되는 산란 효과만을 소개한다. 고려되는 효과로는 입사각에 따라 산란 특성이 변하는 효과, 입사각과 산란각에 따라 ρ 값이 달라지는 효과(foreshortening effect), 입사각이 커짐에 따라 난반사 성분이 감소하는 효과(forward scattering behavior, 이하 정방향 산란 효과), 그리고 입사각이 커짐에 따라 요철 부분이 부분적으로 가려지는 효과(shadowing effect)이다.

$$BRDF = \frac{I_0 N V_m(\zeta, \zeta_0, w_a, w_b, \gamma, \delta)}{(\alpha - \alpha_0)^2 + \beta^2 + \frac{1}{4} \left(\sqrt{1 - \alpha_0^2} + \sqrt{1 - \alpha_0^2 - \beta^2} \right)^2 V(\alpha_0, \omega, n) V(\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \omega, n) \rho^2} \quad (5)$$

여기서, I_0 는 표면의 총 반사율, N 은 BRDF의 이차원 적분을 1로 정규화 해주는 인자, ζ , ζ_0 는 각각 $\zeta = \alpha/(1 - \alpha)^{1/2}$ 와 $\zeta_0 = \alpha_0/(1 - \alpha_0)^{1/2}$ 의 관계를 만족한다. 여기서 α_0 는 입사 광선의 방향 여현을 의미한다. 또한, 분자항의 함수 V_m 은 정방향 산란 효과를 고려하는 함수로서 w_a 와 w_b 는 표면 거칠기에 관련된 경험 인자이며, γ 와 δ 는 함수의 변곡점을 결정하는 인자들이다. 분모 항에 있는 함수 V 는 입사각이나 산란각이 클 경우, 거친 표면의 일부분이 조명되지 못하는 현상을 고려한 것이며, 여기서 ω 와 n 은 표면의 거칠기 특성에 따른 함수 V 의 특성을 규정하는 인자이며, n 은 정수를 취한다.

식 (5)에 주어진 physics based model의 BRDF 식은 총 13개의 산란 인자를 포함하고 있다. 이 중에는 실험적으로 쉽게 결정되는 것도 있지만, 대부분은 BRDF 식과 측정된 산란 특성과의 곡선 맞춤 과정을 통해 결정되는 것들이다. 따라서 이러한 산란 인자 중에는 명확한 물리적 해석을 부여하기 어려운 것도 있다. 하지만, 산란 인자가 확정될 경우 임의의 조건에 대한 산란 특성을 예측할 수 있으므로 그 유용성이 있다고 본다. 특히 본 연구의 궁극적인 목표인 최적 조명조건의 규명 측면에서 본다면, 실험적 산란 결과를 식 (5)와 같은 해석적인 표현으로 나타낼 경우, 조명 조건에 따라 비전 검사의 영상이 달라지는 경향을 예측하는데 도움이 될 수 있다.

본 논문에서는 거친 표면의 자체공분산함수가 지수함수인 경우와 가우스 함수인 경우를 비교 분석하기 위해 참고 문헌

[9]에 서술된 방식에 따라 가우스 함수에 관한 BRDF를 결정하였다. 먼저, 식 (6)에 표현된 가우스 함수 꼴의 자체공분산 함수에 대해 푸리에 변환을 적용하여 식 (7)과 같은 기본적인 BRDF 식을 결정하였다.

$$g(x, y) = \sigma_g^2 e^{-(x^2+y^2)\rho^2} \quad (6)$$

$$G(\alpha, \beta) = \frac{\sigma_g^2}{\sqrt{2\rho}} e^{-\frac{1}{4}(\alpha^2+\beta^2)\rho^2} \quad (7)$$

식 (7)에 각종 산란 효과를 반영하여 최종적인 Gaussian BRDF 를 구하면 아래와 같다.

$$BRDF = I_0 N V_m(\zeta, \zeta_0, w_a, w_b, \gamma, \delta) \times \exp\left(\frac{-[(\alpha - \alpha_0)^2 + \beta^2]}{\{(1 - \alpha_0^2)^{1/2} + (1 - \alpha^2 - \beta^2)^{1/2}\}^2 V(\alpha_0, \omega, n) V(\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}, \omega, n)}\right) \quad (8)$$

이상의 결과식은 시료 표면 자체로부터 직접 산란되는 빛의 표면 산란(surface scattering) 효과를 설명하는 것이지만, 시료 내부로 투과된 입사광의 일부가 내부에서 산란되어 표면 밖으로 나오는 부피 산란(bulk scattering) 현상을 설명하는 데도 활용될 수 있다. 이때 식 (5)와 식 (8)의 분자 항에 있는 표면의 총 반사율 I_0 의 정의는 달라져야 한다. 입사광 중에서 반사되지 않는 성분이 표면 내부로 투과해 들어가며, 그 중의 일부가 내부 산란에 의해 다시 표면 밖으로 나오는 것이므로 부피 산란을 설명하는 BRDF 표현의 총 반사율 $I_{0,Bulk}$ 는 표면의 총 반사율 I_0 와 다음의 관계를 가질 것이다.

$$I_{0,Bulk} = (1 - I_o) \Sigma_{bulk} \quad (9)$$

여기서 Σ_{Bulk} 는 내부로 투과된 입사광 중에서 내부 산란에 의해 다시 표면 밖으로 나오는 비율을 의미한다. 같은 방법으로 입사광의 방향으로 되돌아 가는 역반사(retro-reflection) 현상도 취급할 수 있으나, 본 연구의 대상이 되는 Au 패드에서는 역반사 현상이 미미하므로 논의 대상에서 제외한다.

결론적으로 시료 표면으로부터 최종적으로 산란되는 산란광은 표면 산란과 부피 산란에 의해 기술되어야 하므로 최종적인 BRDF는 식 (10)과 같이 주어질 수 있다.

$$BRDF_{Total} = BRDF_{Surface} + BRDF_{Bulk} \quad (10)$$

여기서 $BRDF_{Surface}$ 는 표면 산란 효과를, $BRDF_{Bulk}$ 는 부피 산란 효과를 각각 의미한다. 이 때 산란 특성을 지배하는 산란 인자들은 두 종류 BRDF 표현에서 각기 다른 값을 가질 수 있다. 예를 들어 표면 산란에 영향을 주는 표면 조도 및 상관 거리는 표면 상태 즉 표면 자체의 거칠기 특성에 의해 결정될 것이고, 부피 산란은 내부 물질의 불균일이나 불연속성에 기인한 현상이므로, 표면 조도나 상관 거리에 대응하는 부피 산란의 산란 인자는 내부 불균일에 의해 주어질 것이다.

본 연구에서는 Au 패드로부터 표면 산란과 부피 산란이 동시에 일어난다고 가정하였으며, 실제 측정된 산란 현상을 분석하고 BRDF에 관한 표현을 얻기 위해 식 (5), 식 (8), 식 (10)을 활용하였다. 이를 위해 physics based model을 기반으로 하는 산란 분석 프로그램을 개발하였으며, 개발 코드를 이용하여 표면 조도, 상관 거리, 입사각 등에 따른 산란 경향성을 사전에 분석하였다.

III. Au 패드의 산란 특성 측정

PCB 표면의 산란 특성을 분석하기 위해 그림 1에 보여진 고니오미터(Goniometer) 방식의 산란 측정 장치(J&C Technology사의 모델 RT-300)를 이용하여 Au 패드에 대한 산란 실험을 수행하였다. 산란 측정에 있어서 측정 장치의 보정이 매우 중요한데, 이를 위해 반사율이 98%이며 Lambertian 산란 특성을 가진 표준 확산판(reference reflecting diffuser)를 활용하였다. 산란 측정에서 사용된 광원의 파장은 656 nm이었으며, Au 패드의 굴절률은 0.142+3.37i이다. Au 패드의 표면 조도 등을 측정하기 위해 백색광 간섭계(Zygo사의 모델 nv6200)를 이용하였으며, 세가지 Au 패드의 표면 조도는 각각 0.117 μm , 0.212 μm , 0.328 μm 으로 측정되었다.

입사각 θ_i 를 10°~60°까지 10° 간격으로 조정하면서 세 가지 Au 패드에 대해 산란 분포를 측정하였으며, 이때 입사광과 산란광의 방위각(ϕ)은 각각 0°와 180°로 고정하였다. 산란광의 위도각(θ_s)에 따른 산란광의 세기 변화는 그림 2와 같이 측정되었다. 본 실험에서 산란 특성을 측정할 때 개구(aperture)가 큰 검출기를 사용했기 때문에, 정반사 성분에 해당하는 피크의 반치폭이 일반적인 정반사 성분의 반치폭에 비해 상대적으로 넓게 측정되었다.^[13]

그림 2의 (a), (b), (c)는 표면 조도가 각각 0.117 μm , 0.212 μm , 0.328 μm 인 시료에 대한 결과로서, 입사각이 커짐에 따라 정반사 성분이 커지고, 정반사 피크의 반치폭도 넓어짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 거친 표면에 대한 일반적인 산란 특성이며, 식 (1)을 통해 예측한 결과와 동일하다. 또한, 표면 조도가 작은 경우 정반사 성분이 지배적이고, 그 반대의 경우는 난반사 성분이 지배적임을 알 수 있다.

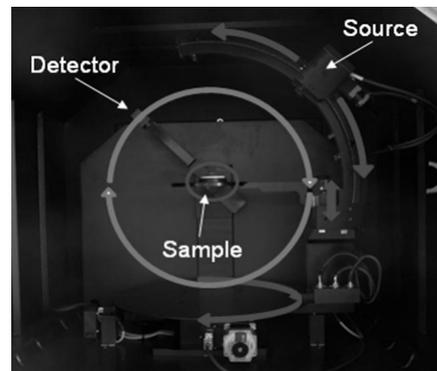
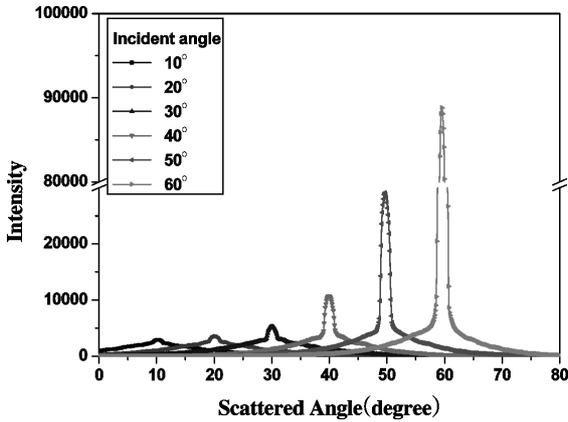
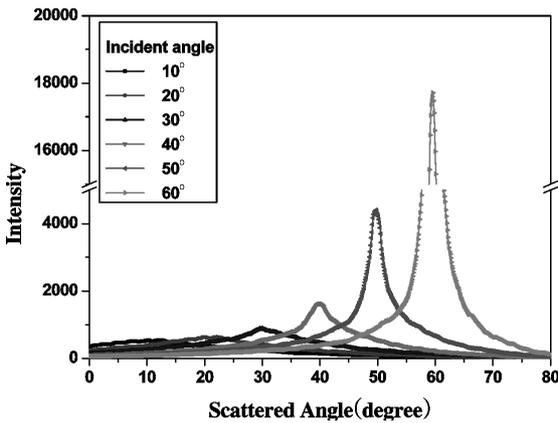


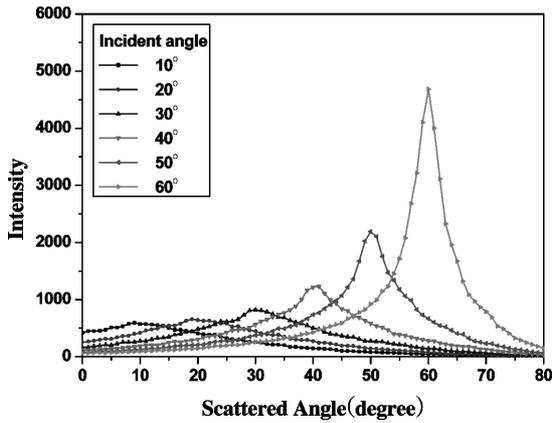
그림 1. 산란 측정 장치 및 구성 요소의 회전 범위.



(a) 시료 1, $\sigma_1 = 0.117 \mu\text{m}$



(b) 시료 2, $\sigma_2 = 0.212 \mu\text{m}$



(c) 시료 3, $\sigma_3 = 0.328 \mu\text{m}$

그림 2. 표면 조도가 서로 다른 3가지 Au 패드의 산란 분포.

IV. 산란 특성 측정 결과의 곡선 맞춤 및 분석

표면 조도가 다른 세 가지 시료의 산란 분포 측정 결과로부터 각 시료의 산란 인자를 추출하기 위해 2-2절에서 설명한 physics based model을 이용하였다. 이 모델은 다양한 거칠기 특성을 가진 시료에 대해 적용 가능하다는 장점이 있으나 난반사 산란만을 다루므로, 측정 결과로부터 먼저 정반사 성분을 분리시켜야 한다. 만일 그림 2(a)와 같이 정반사 성분

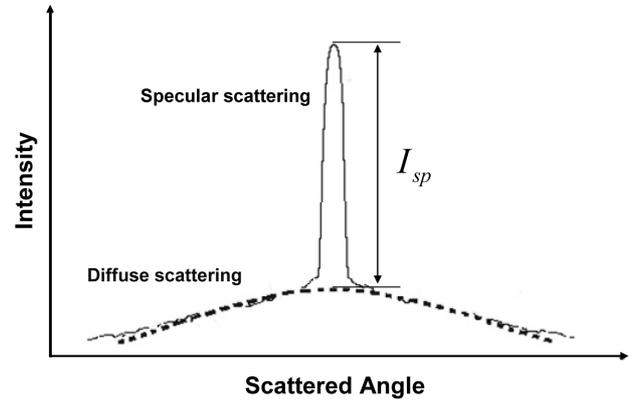


그림 3. 정반사 성분과 난반사 성분으로 혼합된 산란 분포의 개념도.

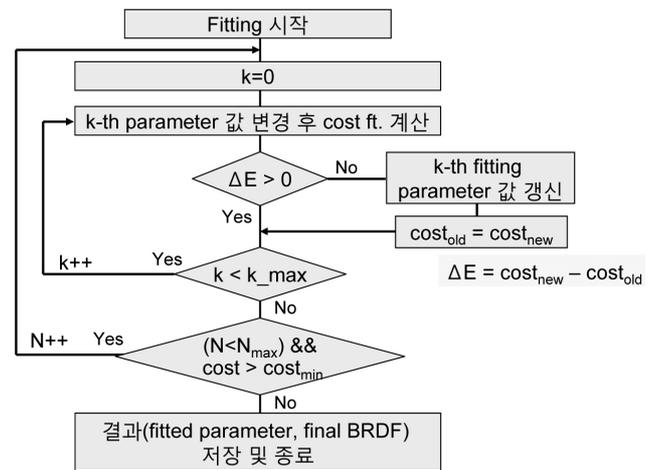


그림 4. 최소 비용 함수의 결정을 통한 곡선 맞춤 순서도.

이 상대적으로 큰 측정 결과에 이 모델을 바로 적용하여 곡선 맞춤을 한다면, 적절한 산란 인자를 결정할 수 없게 된다. 먼저 산란 측정 결과로부터 정반사 성분을 분리하기 위해 정반사 성분은 정반사각($\theta_s = \theta_i$)을 중심으로 좁은 각도 범위 내에만 존재한다는 사실을 활용하였다. 이에 따라 측정 결과에서 정반사각을 중심으로 $\pm 3^\circ$ 범위의 측정 결과를 뺀 후, 나머지 측정 결과만을 physics based model의 BRDF 식에 곡선 맞춤하였다. 곡선 맞춤을 통해 추출된 산란 인자를 이용하면 정반사각에서 난반사 성분의 크기(I_{di})를 알 수 있을 것이다. 따라서 정반사각에서 측정된 산란광 세기 $I(\theta_i)$ 를 I_{di} 로 빼주면, 정반사 성분의 크기, I_{sp} 를 결정할 수 있게 된다. 이러한 개념을 그림 3에 도시하였다. 측정된 산란광의 세기는 점선으로 표현된 난반사 산란 성분과 피크 형태로 표현된 정반사 성분의 합이 되므로, 정반사각에서 난반사 산란광의 크기를 결정할 수 있다면 정반사 성분의 크기는 간단히 결정될 수 있다.

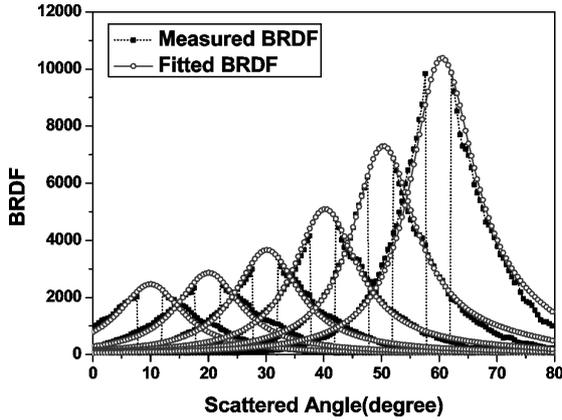
Physics based model의 BRDF에 난반사 산란 성분을 곡선 맞춤할 때, 식 (11)과 같은 비용 함수(cost function) ε 를 이용하였다.

$$\varepsilon = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^{Q_p} \left(\frac{BRDF_{meas}(\theta_i^p, \theta_s^q)}{BRDF_{meas,max}} - \frac{BRDF_{cal}(\theta_i^p, \theta_s^q)}{BRDF_{cal,max}} \right)^2 \quad (11)$$

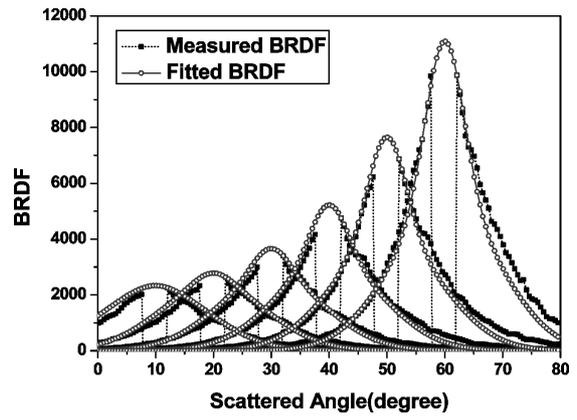
$$BRDF_{meas,max} = \max\{BRDF_{meas}(\theta_i^p, \theta_s^q)\} \quad (12)$$

$$BRDF_{cal,max} = \max\{BRDF_{cal}(\theta_i^p, \theta_s^q)\} \quad (13)$$

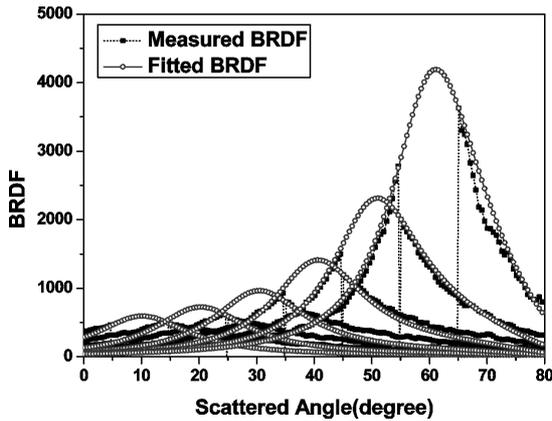
위 식에서 P 는 입사각의 개수이며, Q_p 는 각 입사각에 대한 산란 측정치의 데이터 개수, 아래 첨자 $meas$ 와 cal 은 각각 측정치와 BRDF 식으로부터 계산된 값이다. 비용 함수 정의에 포함된 실험치와 이론치는 각각의 최대값으로 정규화되었으며, 이 비용 함수는 산란 인자의 함수가 된다. 그림 4는 순수 난반사 성분만을 곡선 맞춤하기 위한 순서도로서, 비용 함수가 최소가 될 때까지 반복 계산을 수행한다.



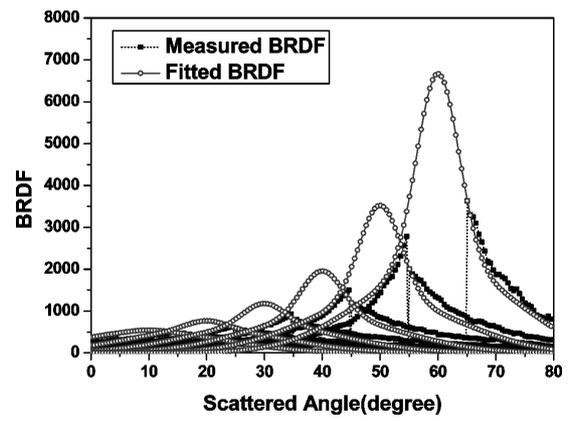
(a) 시료 1



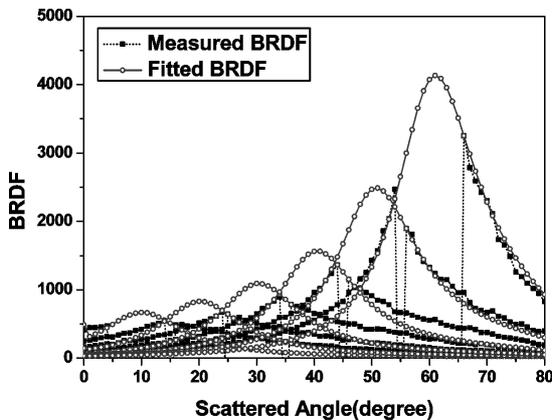
(a) 시료 1



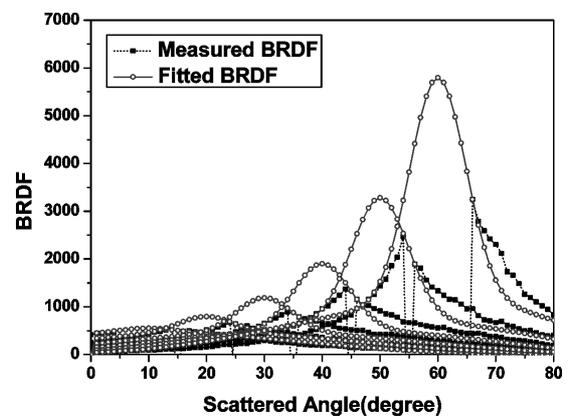
(b) 시료 2



(b) 시료 2



(c) 시료 3



(c) 시료 3

그림 5. 순수 난반사 성분에 대한 Lorentzian BRDF의 곡선 맞춤 결과.

그림 6. 순수 난반사 성분에 대한 Gaussian BRDF의 곡선 맞춤 결과.

표 1. 곡선 맞춤을 통해 추출된 Au 패드의 최적 산란 인자.

BRDF Model	parameters	Au pad 1	Au pad 2	Au pad 3
Lorentzian	σ (μm)	0.123781	0.227613	0.258911
	ρ_{surf}	0.118775	0.17	0.15
	ρ_{bulk}	0.125202	0.3	0.143792
Gaussian	σ (μm)	0.126781	0.240172	0.264578
	ρ_{surf}	0.040289	0.044687	0.06
	ρ_{bulk}	0.115051	0.164973	0.31806

한편, 정반사 성분의 크기, I_{sp} 와 표면 조도 및 입사각의 관계를 이미 알고 있으므로, 산란 측정 결과로부터 모든 입사각에 대한 I_{sp} 를 결정하고 이를 식 (1)에 적용하여 시료의 표면 조도를 결정할 수 있다. 이때 최적의 표면 조도를 확정하기 위해 최소자승법(least square method)을 사용하였다.

그림 5는 시료의 자체공분산함수가 지수함수임을 가정하고, 해당 BRDF 식을 이용하여 난반사 성분을 곡선 맞춤한 결과이며, 그림 6은 시료의 자체공분산함수가 가우스 함수임을 가정하여 곡선 맞춤한 결과이다. 이러한 비교 분석을 통해 Au 패드의 거칠기 상태가 어떤 자체공분산함수를 만족하는지를 확인했다. 두 그림에서 실선으로 연결된 점들은 곡선 맞춤을 통해 확정된 산란 인자로부터 계산된 BRDF 값이며, 점선으로 연결된 점들은 측정치이다. 전술한 바와 같이 곡선 맞춤 과정에서 정반사각 근방의 측정치를 제거했으므로, 그림에서 정반사각 근방의 실험치는 표시되어 있지 않다.

곡선 맞춤 과정을 통해 확정된 각 Au 패드의 주요 산란 인자(표면 조도, ρ_{surf} , ρ_{bulk})를 표 1에 정리하였다. 세 가지 시료에 대해 추출된 표면 조도는 Lorentzian BRDF를 가정한 경우 0.12 μm , 0.23 μm , 0.26 μm 이었으며, Gaussian BRDF를 가정한 경우 0.13 μm , 0.24 μm , 0.26 μm 이다. 자체공분산함수의 종류에 관계없이 거의 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 백색광 간섭계를 통해 측정된 표면 조도와 비교해 보면, 표면 조도가 작은 경우는 곡선 맞춤 과정을 통해 얻어진 값이 별 차이를 보이지 않지만, 세 번째 시료처럼 표면 조도가 큰 경우에는 측정치와 약 0.06의 차이를 보이고 있다. 세 번째 시료는 난반사 성분에 비해 정반사 성분이 상대적으로 미약한 경우이므로, 식 (1)을 이용하여 표면 조도를 결정하는데 오차가 발생했다고 판단된다.

한편, 그림 5와 6에서 점선으로 표시된 측정 결과와 실선으로 표시된 곡선 맞춤 결과를 상호 비교해 보면 그림 5의 경우에 두 결과가 더 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이로부터 실험에 사용된 시료의 자체공분산함수는 가우스 함수보다는 지수함수 분포를 따른다고 판단된다.

V. 결 론

PCB 표면에 있는 Au 패드의 산란 현상과 표면 거칠기의 관계를 규명하기 위해 실험적으로 산란 분포를 측정하였으며, 이론적인 분석을 통해 주요 산란 인자를 추출하였다. 측

정된 산란 분포에는 난반사 성분과 정반사 성분이 함께 포함되어 있으므로, 정반사 성분의 특징을 활용하여 이를 제거한 후, 난반사 성분만을 physics based model의 BRDF 식에 곡선 맞춤하였다. 이로부터 상한 거리와 같은 주요 산란 인자를 확정할 수 있었다. 또한 곡선 맞춤 결과를 활용하여 정반사 성분의 크기를 확정할 수 있었으며, 정반사 성분의 크기와 입사각 및 표면 조도의 관계로부터 표면 조도를 결정할 수 있었다. 이렇게 결정된 표면 조도는 백색광 간섭계로 직접 측정한 Au 패드의 표면 조도와 오차 범위 내에서 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

한편, Au 패드의 거칠기 상태에 대한 통계적 분포를 확인하기 위해 자체공분산함수가 지수함수인 경우와 가우스 함수인 경우를 각각 가정하여 해당 BRDF 식과 측정치를 곡선 맞춤하였다. 두 가지 곡선 맞춤 결과의 유사도를 비교하여 Au 패드의 거칠기 상태에 관한 자체공분산함수가 지수함수에 좀 더 가깝다는 것을 파악하였다. 이상의 결과는 Au 패드를 포함하는 PCB의 산란 특성을 이해하는데 활용될 수 있으며, 향후 PCB 결함 검사를 위한 최적 조명조건 규명에 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 삼성전기-인하대 초정밀 검사계측 연구센터의 지원으로 수행되었으며, 실험 장치를 지원해 주신 인하대학교 광기술교육센터(OTEC)에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] 노병욱, “PCB패턴의 고속정밀 vision검사 시스템 개발,” 전자부품종합기술연구소(KETI) 연구보고서, KETI-RD-94037, 1994년 8월.
- [2] 고낙훈, 이승걸, 박세근, 이일항, 최태일, 서승원, “BRDF 측정을 통한 PCB 표면의 광 산란 특성 연구,” 한국광학회 2008 동계학술발표회, pp. 427-428, 2008.
- [3] R. L. Cook and K. E. Torrance, “A reflectance model for computer graphics,” *Computer Graphics*, vol. 15, no. 3, pp. 307-316, 1981.
- [4] H. Ragheb and E. R. Hancock, “The modified Beckmann-Kirchhoff scattering theory for rough surface analysis,” *Pattern Recognition*, vol. 40, no. 1, pp. 2004-2020, 2007.
- [5] J. E. Harvey, A. Krywonos, and C. L. Vernold, “Modified Beckmann-Kirchhoff scattering theory for rough surfaces with large scattering and incident angles,” *Opt. Eng.*, vol. 46, no. 7, 078002, 2007.
- [6] P. Beckmann and A. Spizzichino, *The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces* (MacMillan/Pergamon, New York, 1963), pp. 70-96.
- [7] X. D. He, K. E. Torrance, F. X. Sillion, and D. P. Greenberg, “A comprehensive physical model for light reflection,” *Computer Graphics*, vol. 25, no. 4, pp. 175-186, 1991.
- [8] Y. Sun, “Statistical ray method for deriving reflection models of rough surfaces,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 24, no. 3, pp. 724-744, 2007.

- [9] I. G. E. Renhorn and G. D. Boreman, "Analytical fitting model for rough-surface BRDF," *Opt. Exp.*, vol. 16, no. 17, pp. 12892-12898, 2008.
- [10] J. M. Bennett and L. Mattsson, *Introduction to Surface Roughness and Scattering* (Opt. Soc. of Am., Washington D.C., 1999), pp. 20-70.
- [11] C. B. Rao and B. Raj, "Study of engineering surfaces using laser-scattering techniques," *Sadhana*, vol. 28, part 3&4, pp. 739-761, 2003.
- [12] A. Ishimaru, *Wave Propagation and Scattering in Random Media* (Academic Press, New York, NY, 1978), pp. 463-492.
- [13] 최명조, "고니어 방식을 이용한 편광 산란 특성 측정," 인하대학교 석사학위논문, 2008년 8월.

Measurement and Analysis of Light Scattering of Au Pads on PCB Surface to Extract Scattering Parameters

Nak-Hoon Ko^{1,2}, Dae-Seo Park^{1,2}, Young-Seok Kim², Beom-Hoan O^{1,2}, Se-Geun Park², 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

Tae-II Choi

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

(Received January 9, 2009; Revised manuscript March 9, 2009; Accepted March 23, 2009)

In this study, the influence of surface roughness on light scattering from Au pads on a PCB surface was investigated. Angular distributions of light scattered from Au pads with different surface roughness were measured for several incident angles. Diffusely-scattered light could be separated by using the fact that the amount of specularly-scattered light was directly related to surface roughness. The separated diffuse term was curve-fitted with a physics-based model, and then the related scattering parameters were extracted and compared with measured parameters.

OCIS codes: (290.0290) Scattering; (290.5880) Scattering, rough surfaces; (120.5820) Scattering measurements.