

# 링 조명에 의한 BGA 볼의 3차원 형상 인식

## Shape Recognition of a BGA Ball using Ring Illumination

김 종 형\*, Chanh D. Tr. Nguyen  
(Jong Hyeong Kim<sup>1</sup> and Chanh D. Tr. Nguyen<sup>2</sup>)

<sup>1</sup>Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology

<sup>2</sup>Division of Mechanical Engineering, KAIST

**Abstract:** Shape recognition of solder ball bumps in a BGA (Ball Grid Array) is an important issue in flip chip bonding technology. In particular, the semiconductor industry has required faster and more accurate inspection of micron-size solder bumps in flip chip bonding as the density of balls has increased dramatically. The difficulty of this issue comes from specular reflection on the metal ball. Shape recognition of a metal ball is a very real problem for computer vision systems. Specular reflection of the metal ball appears, disappears, or changes its image abruptly due to tiny movements on behalf of the viewer. This paper presents a practical shape recognition method for three dimensional (3-D) inspection of a BGA using a 5-step ring illumination device. When the ring light illuminates the balls, distinctive specular images of the balls, which are referred to as "iso-slope contours" in this paper, are shown. By using a mathematical reflectance model, we can drive the 3-D shape information of the ball in a quantitative manner. The experimental results show the usefulness of the method for industrial application in terms of time and accuracy.

**Keywords:** specular reflection, ring illumination, iso-slope contour, hybrid reflectance model

### I. 서론

반도체 기술의 눈부신 발전으로 웨이퍼 상의 회로 선의 폭이 45nm급으로 발전함에 따라, 반도체 칩의 크기는 작아지고 기능은 매우 증대 되고 있다. 이러한 추세에 맞추어 반도체 칩도 보다 많은 입출력 단자를 가질 수 있는 ball grid array (BGA) 형식이 많이 등장하였다. BGA 칩 내에는 작게는 100개 많게는 수 백 개의 금속 볼이 존재하며, 이들 중에서 한 개만 불량이나 전체를 수리해야 됨으로 볼 하나하나의 검사가 매우 중요하다.

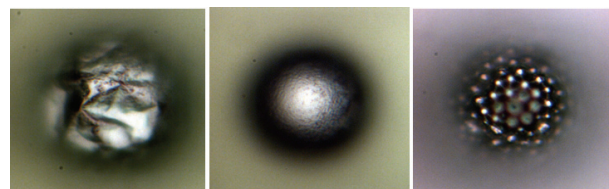
이러한 볼의 크기 및 체적은 향후 이어지는 접합 공정의 품질에 영향을 주는 매우 중요한 요소이다. 다양한 방법으로 볼을 검사하고 있으나, 높은 품질을 얻기 위해서는 볼의 3차원 정보를 검사하는 것이 필수적이다. 그러나 최근들어 볼의 지름이 50 μm 정도로 매우 작고, 표면이 경면 반사하고 있어서 물체의 3차원적 높이 정보를 얻기는 매우 어렵다[1].

그림 1은 검사 대상으로 하는 BGA 금속 볼의 특징을 잘 보여 준다. 그림 1(a)는 불량 볼은 2차원적으로 보면 정상 볼과 별 차이가 없지만, 형상적으로는 좀 크고 표면이 울퉁불퉁하다. 즉, 2차원 영상으로 보면 비슷하지만, 형상은 조금씩 차이가 난다고 할 수 있다. 그림 1(b)는 정상 볼인데, 표면이 경면 반사를 하므로 상부만, 밝게 보이고, 경사면을 따라서 내려가면 주변은 어둡게 보인다. 전체를 잘 보려면 다양한 각도에서의 빛이 필요함을 알 수 있다. 그림 1(c)는 볼의 일부를 1000배로 확대한 현미경 사진인데, 표면이 무수히 작은

뾰족이는 알갱이로 이루어져 있음을 알 수 있다. 이처럼 경면 반사를 하는 작은 금속 볼의 3차원적 형상을 측정하는 것은 현재 산업계에서도 어렵지만 꼭 해결해야 할 과제 중에 하나이다.

일반적으로 비전 시스템에서 경면 반사는 까다로운 요소이다. 표면에 입사된 빛을 좁은 폭을 가지고 특정한 방향으로만 반사하는 특징을 갖는 경면 반사 물체의 형상 인식은 컴퓨터 비전에서 어려운 분야 중에 하나이다[2-4]. 수광부 또는 광원부의 미소한 움직임만으로도 경면 반사가 수광부에 나타나기도 하고 사라지기도 할 뿐 아니라 그 형상 또한 갑작스럽게 변하기 때문이다. 이러한 어려움 때문에 기존의 많은 연구들은 경면 반사의 성분을 불필요한 노이즈로 취급하고 제거하고, 나머지 반사되는 빛의 난반사 성분만을 사용하여 물체의 형상을 인식하고자 하였다. E. Coleman 등은 4개의 점 광원을 사용하여 이들 중 영상면에 경면 반사를 유발하는 광원을 색출하여 이를 제외한 다른 3개의 광원에 의한 명암의 정보만을 이용하여 표면의 법선 방향 및 반사 계수를 구하고, 이로부터 구나, 피라미드와 같은 기본적인 물체의 3차원 형상을 복원하였다[5].

경면 반사 및 난반사의 수학적 모델을 동시에 이용한 3차



(a) Bad ball. (b) Good ball. (c) Magnified 1000x.

그림 1. 리플로우 후의 BGA 금속 볼의 확대 사진.

Fig. 1. The microscopic image of BGA metal ball after reflow.

\* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received August 20, 2013 / revised September 15, 2013 / accepted October 4, 2013

김종형: 서울과학기술대학교(johnkim@seoultech.ac.kr)

Chanh D. Tr. Nguyen: KAIST(chanhnguyen@kaist.ac.kr)

※ 본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었음.

원 복원에 대한 연구도 많이 이루어졌다. H. Saito 등은 한 개의 빛 광원을 돌려가면서 얻은 영상들에 대해서 난반사와 경면 반사 모델을 각기 적용하여 3차원 형상 정보를 얻었다[6]. C. Lindner 등은 다양한 점 광원과 Torrance and Sparrow의 모델을 이용하여 부분적은 표면의 반사 특성을 측정하고, 3차원 정보를 추출하도록 하였다[7]. S. Nayer 등은 127개의 점 광원을 반구 상에 일정한 간격으로 배열하고 순차적으로 점등하면서 그때마다 나타나는 영상 상의 경면 반사의 최고 값에서 일치하는 표면의 법선의 값을 찾아내고 이를 이용하여 대상 물체의 대략적 3차원 정보를 복원하였다[8]. Kim 등은 이전의 연구로서는 다층의 색깔이 있는 링 조명을 사용하여 물체의 3차원적 특징을 잡아내고 이를 이용하여 검사하는 방법들에 대한 연구들도 많이 진행이 되었다[9]. Yun 등은 다층의 링 조명과 하이브리드 반사 모델을 이용하여 일반 납땜부의 3차원 복원을 하였고, 이를 기반으로 대략적인 3차원 형상을 인식할 수 있었다[10]. 이러한 연구들은 경면 반사 물체의 특성을 적극적으로 이용하기 위하여 구조화된 조명 장치와 측정 대상에 적합한 수학적 반사 모델을 정립하는 것이 중요하다는 것을 알 수 있다.

이러한 방법들을 실제 산업 현장에 사용하기 위해서는 측정의 정밀도, 신뢰성, 그리고 속도 측면에서 개선이 필요하다. 3차원 형상 복원도 정성적인 측면에서 비슷한 모양 정도를 파악하고, 이를 검사에 활용한 정도이다. 아직 정량적인 측면에서 영상에 의한 3차원 복원 결과를 해석한 것은 찾아 보기 힘들다. 또한, 균일하고 일정한 조명 및 측정 대상의 카메라를 통해 들어 오는 영상 그리고 알고리즘의 신뢰성이 중요하다. 속도 측면에서도 S. Nayer의 방법[8]처럼 127개의 점 광원을 켜다 끄다 하면서 영상의 취득에 많은 시간을 소요할 수는 없다. Kim [2-4] 등은 이러한 점을 개선하고자 색깔이 서로 다른 링 형상의 조명을 동시에 사용하여 영상 취득의 시간을 획기적으로 줄였다. 아무튼 칩에 사용되는 금속 볼의 수가 계속 늘어 나므로 검사의 요구 속도 또한 계속해서 줄여야 한다.

BGA 볼을 검사하기 위해 많이 시도된 또 다른 방법으로 삼각도법에 근거한 3차원 높이를 측정법이다. 가장 대표적인 것이 laser beam을 이용한 방법으로, laser에서 생성된 점, 또는 직선의 beam을 대상물에 투사하고, 삼각도법에 의해 3차원적 높이를 직접 구하는 원리이다. 그러나 laser로 구조광(structured light)를 만드는 경우 그 beam의 폭을 얇게 만드는 데는 많은 광기학적 한계를 가진다. 지름이 50 $\mu$ m인 금속 볼을 측정하기 위해서는 5-7개의 측정 점 또는 선을 가져야 하는데, 이를 만들어 내기가 매우 어렵다[11-13]. 또한 위상변이를 이용한 모아레 방법을 에서도 모아레 격자를 대상 볼에 투사하여 영상을 얻는 것은 쉽지 않은 일이다.

본 논문에서는 BGA의 금속 볼의 3차원 검사에 한정하여 가장 적합한 5층 링 조명과, 금속 볼의 반사 특성을 고려한 실용적 하이브리드 반사 모델을 제안하였다. 그리고 전산모사를 통하여 제안한 본 방법의 타당성을 검증하고 실제 BGA 금속 볼을 대상으로 정량적 평가를 시도하였다.

이러한 정량적 평가는 광도측정법(photometric approach)이 3차원 검사에서 대략적인 영상 패턴에 의한 검사가 아닌 측

정에 의한 검사가 가능하다는 것을 증명하는 것이다. 매우 제한적이고 고정된 환경하에서는 광도측정법에서는 한 화소(pixel) 단위의 3차원적 측정 분해능을 가짐을 의미하는 것이다. 본 논문은 이를 검증하여, 제안하는 방법이 BGA의 금속 볼을 검사하는 작업에 매우 적합함을 보이고자 한다.

## II. 링 조명과 하이브리드 반사 모델

### 1. 링 조명 시스템

BGA 칩 위에 있는 많은 금속 볼의 검사를 위해서 가장 효과적인 조명 방식은 링 조명의 형태이다[4,9,10]. 그림 2와 같이 전체 검사시스템은 5단 링 조명으로 구성되어 있으며, 제일 하단의 링의 크기는 금속 볼에 비해 충분히 큰 250mm의 지름을 가지고 있다. 각 링 조명에는 LED 발광 소자를 최대한 많이 심어서, 가능한 연속된 링 조명의 효과를 내도록 하였다. 링 형광등처럼 연속된 발광체를 사용할 수도 있으나, 켜고 끄는 시간이 많이 걸리므로, 켜고 끄는 시간이 매우 빠른 LED 발광 소자를 사용하게 되었다. 금속 볼의 형상을 인식하기 위해서는, 조명에 연결된 제어를 통하여 각 단별로 켜고 영상을 촬영하고 다시 끄고 하는 순서로, 1회에 5장의 영상을 얻는다.

5단의 링 조명은 각 단별로, 카메라 축을 기준으로 15°, 30°, 45°, 60°, 75°의 5개의 서로 다른 투사각으로 금속볼을 조명하고 있다. 링 조명의 단수를 더 늘이거나, 또는 링 조명을 상하로 연속적으로 움직이면서 측정을 할 수 있으나[9] 설치 공간 상의 제약 등 현실적 제한 조건을 고려하면 5단 정도가 적절하다.

카메라는 링 조명 중심에 배치되어 있으며, 검사 대상이 카메라의 중심, 그리고 링 조명의 중심에 있도록 동심을 맞추도록 한다. 카메라의 촬영 면적(field of view) 내에서는 링 조명에서 오는 빛의 양은 거의 균일하도록 구성되어 있는데, 그 면적은 4mm(H)×3mm(V) 정도이다. 또한, 카메라의 초점 거리 및 링 조명의 계획된 입사각의 나올 수 있도록 카메라 및 조명이 상하로 조절이 가능하도록 하였다.

카메라에서 나온 영상을 이용하여 3차원 형상을 인식하고, 이를 기반으로 3차원적 검사가 가능한 시스템이다. 물론 검사 관점에서는 금속 볼의 크기, 존재 유무와 같은 2차원적 검사 항목과 형상과 체적과 같은 3차원적 검사 항목이 나누

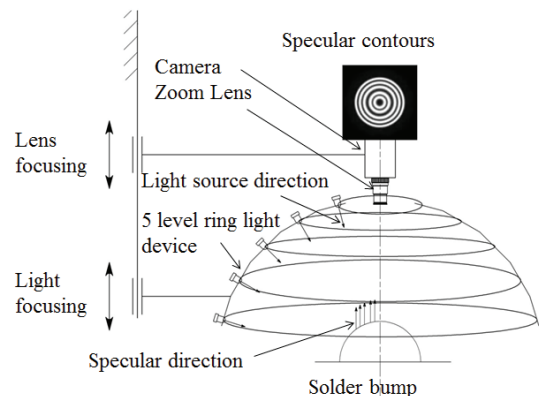


그림 2. 5단 링 조명을 이용한 전체 검사 시스템.

Fig. 2. The inspection system using 5 step ring illumination.

어져 있다. 본 논문에서는 3차원 검사를 위한 3차원 형상 인식 부분을 다루고자 한다.

2. 하이브리드 반사모델

BGA 금속 볼의 표면은 거울면과 같이 경면 반사(specular reflection)와 난반사(Lambertian reflection)이 혼재 되어 있다. 이 중에서도 경면 반사의 특징이 강하다. 경면 반사는 수광부 또는 광원부의 미소한 움직임으로 인하여 경면 반사의 섬광이 나타나기도 하고 사라지기도 하여 명암에 의해 물체의 형상을 인식하는 일반적인 머신 비전(machine vision)기법을 적용하기 어렵다. 그 이유는 경면 반사가 일어나는 부분에서는 경계선 추출 방법(edge detection)이나 영역 분리(region segmentation) 방법을 사용 위해 기본이 되는 명암 정보를 이용하기가 매우 까다롭다. 반면에 난반사 부분은 영역이 매우 작기는 하나, 이를 잘 이용해야 한다.

그림 3은 링 조명의 기하학적 개요도를 보여주고 있다. 대상을 원점으로 할 때, (X, Y, Z) 직교 좌표가 정의되며, 카메라는 Z축 상에 위치하게 된다. 그리고 대상물의 표면법선 벡터는 N로, 한 개의 점 광원이 대상물에 투사되는 벡터는 S로 표시된다.

한 개의 링 조명을 여러 개의 점 광원으로 이루어진 것으로 가정할 때, 한 개의 점 광원이 중심에 투사하는 방향 S는 투사각 벡터로 천정각(zenith angle,  $\theta_s$ )와 방위각(azimuth angle,  $\phi_s$ )으로 표현된다. 투사각 벡터 S는 다음 식 (1)로 표현된다.

$$\begin{cases} s_x = \sin \theta_s \cos \phi_s \\ s_y = \sin \theta_s \sin \phi_s \\ s_z = \cos \theta_s \end{cases} \quad (1)$$

반사 모델 유도에 있어서, 본 논문에서는 Nayar et al. [14]와 동일한 가정을 도입하였다. 즉, 대상물 표면의 조도(roughness)에 비해 빛의 파장이 매우 작다는 가정이다. 이 가정 하에서 영상에 들어오는 빛의 에너지는 표면의 법선벡터, 빛의 투사 벡터, 그리고 표면의 반사 계수에 의존하게 된다.

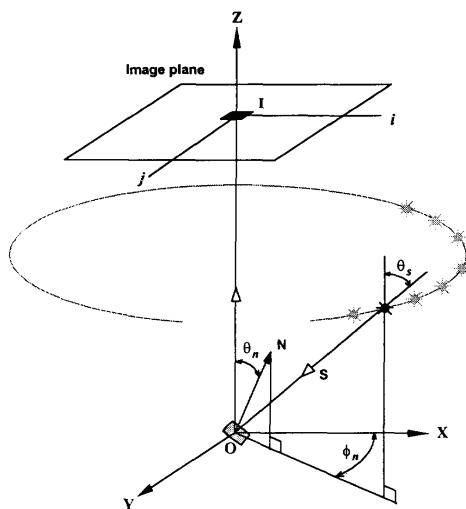


그림 3. 링 조명이 기하학적 개요도.  
Fig. 3. The geometrical schematic diagram of the ring illumination.

만약 이 가정이 사용하지 않을 경우, 우리는 산란에 따른 영향도 고려해야 하나, 본 논문에서는 미미하므로 제외하였다. 이러한 조건으로 하이브리드 반사 모델을 만들면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$I = I_d + I_{sl} + I_{ss} \quad (2)$$

여기서  $I_d, I_{sl}, I_{ss}$ 은 각각 난반사 분포(lobe), 경면반사 분포, 그리고 경면반사 스파이크(spike)라고 한다. 여기서 실제 공학적 측면에서 보면, BGA 금속 볼에 한하여 조명의 밝기와 조리개를 잘 조절하면, 경면반사 spike는 무시할 수 있다. 난반사 분포는 람버시안(Lambertian) 반사 모델을 따르게 되는데, 이는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$I_L = \max[0, K_L(N \cdot S)] \quad (3)$$

여기서 “·”는 두 벡터의 내적의 표시이다. N, S 두 벡터는 모두 (0,  $\pi/2$ )의 범위에 있게 되고 따라서 두 벡터의 내적은 항상 양의 값을 갖게 된다.  $K_L$ 은 난반사 성분의 강도를 타낸다.

경면반사 분포는 Torrance and Sparrow [18] 모델을 따르며, 이 또한 조명에 사용하는 빛의 파장이 표면 조도에 비해 충분히 작다는 가정을 사용한다. 그러면 표면은 매우 작은 마이크로 단위의 평면의 합으로 아주 매끈하게 이루어져 있다고 본다. 그러면 경면반사의 분포는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$I_s = K_s \exp\left(-\frac{\alpha^2}{4\sigma^2}\right) \quad (4)$$

여기서  $K_s$ 는 경면반사의 강도를 나타내며,  $\sigma$ 는 대상물 표면의 조도를 나타낸다. 각도  $\alpha$ 는 볼 표면법선 벡터의 천정각( $\theta_n$ )과 반사되어 나가는 빛의 각 ( $\theta_s/2$ )의 사이 각이다.

식 (1)에서 (4)를 정리하면 점 광원에 대한 반사 모델은 식 (5)와 같이 정리된다.:

$$\begin{aligned} I_s &= K_L(N \cdot S) + K_s \exp\left(-\frac{\left(\theta_n - \frac{\theta_s}{2}\right)^2}{4\sigma^2}\right) \\ &= K_L(\sin \theta_n \cos \phi_n \sin \theta_s \cos \phi_s + \sin \theta_n \sin \phi_n \sin \theta_s \sin \phi_s \\ &\quad + \cos \theta_n \cos \theta_s) + K_s \exp\left(-\frac{\left(\theta_n - \frac{\theta_s}{2}\right)^2}{4\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

링 조명에 대한 반사 모델을 찾기 위해서는 점 광원의 식을 링 조명으로 확대 적용하면 된다.

$$\begin{aligned} I &= K_L \int_{-\beta}^{\beta} (\sin \theta_n \cos \phi_n \sin \theta_s \cos \phi_s + \cos \theta_n \cos \theta_s) d\phi_s \\ &\quad + K_s' \exp\left(-\frac{\left(\theta_n - \frac{\theta_s}{2}\right)^2}{4\sigma^2}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)은 링의 원주를 따라가면서 적분한 식이다. 여기서  $\beta$ 는  $(N \cdot S) \geq 0$ 의 조건을 만족하는 링 원주 상의 점 광원의 영역이다. 이 조건은 빛이 표면에 입사될 수 있는 점 광원의 위치 범위를 제한한다.  $\beta$ 의 값은  $\pi/2$ 에서  $\pi$ 까지 범위를 가지게 되고 수식적으로 표현하면 식 (7)과 같다.

$$\beta = \sin^{-1} \frac{h_i}{\tan \theta_{asum} R_i} + \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

여기서  $R_i$  은 이때 사용된 링 조명의 반지름이고,  $h_i$  는 대상 물이 있는 바닥에서 링 조명까지 수직 높이이다.  $\theta_{asum}$  은 대상 표면 법선 벡터에서 천정각을 의미한다. 이때 우리는  $\theta_{asum}$  의 각도를 모르므로 가정하여야 한다. 실제적으로는 큰 차이를 보이지 않으므로 보통은  $\pi$  로 지정하여 사용한다[10]. 이 경우 식 (6)은 식 (8)과 같이 정리할 수 있다.

$$I = K_L 2\pi \cos \theta_n \cos \theta_s + K_S \exp \left( - \frac{\left( \theta_n - \frac{\theta_s}{2} \right)^2}{4\sigma^2} \right) \quad (8)$$

식 (8)을 보면 난반사의 값은 평편한 부분에서 최대가 되고, 경면반사의 값은 반사 조건이 맞을 때 최대 값을 가짐을 알 수 있다. 금속 볼의 반사 특성에 따라  $K_L$  과  $K_S$  의 값이 달라 지는데, 이는 볼에 따라 다르므로 미리 알고 있어야 하는데, 보통은  $K_S$  의 값 크다.

III. 3차원 형상 인식을 위한 높이 계산

3차원 형상 인식을 위해서는 검사 표면의 기준면에서의 높이를 측정함으로써 가능하다. 이를 위해서는 먼저 5개의 링을 점등하면서 영상의 각 화소(pixel)마다 5개의 링에 해당 하는 명암 값을 저장하여야 한다. 다음으로는 이 명암 값들을 이용하여 화소에 해당하는 작은 표면의 법선 벡터를 구하고, 주변의 이웃 화소들과의 관계로부터 3차원 높이를 계산 하여 간다. 본 논문에서는 3차원 높이를 계산하는 6개 단계를 제안하였다.

• 1단계:

화소 위치 (x, y)의 명암 값 ( $I_i, i=1\sim 5$ ) 5개를 검토하여 배경과 경면반사의 성분으로 구분한다.

- 배경 문턱값 (threshold value, T) 보다 작으면 배경
- 경면 문턱값 (threshold value,  $T_{spec}$ )보다 크면, 경면반사 영역

• 2단계:

$T < I_i' < T_{spec}$  의 조건을 만족하는 화소 값들은 난반사 성분이 주 성분이므로 주로 다음 식에 지배를 받는다.

$$\begin{aligned} I_L' &= K_L' (n_L \cdot s) \\ &= K_L' n_{Lx} s_x + K_L' n_{Lz} s_z \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $s_x$  와  $s_z$  는 해당하는 링 조명의 투사 방향의 (X, Z)축의 벡터 성분 법선 성분을 나타낸다. 링 조명은 작은 점 광원이 집합이라고 가정 하였으므로, 이 두 성분은 식 (10)과 같이 등가의 값으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} s_x &= \sin \theta_s \cdot 2 \cdot \sum_{\phi_i < \beta} \sin(\phi_i) \\ s_z &= \cos \theta_s \cdot 2 \cdot \sum_{-\beta < \phi_i < \beta} \cos(\phi_i) \end{aligned} \quad (10)$$

식 (9)에서 난반사 계수 ( $K_L'$ )은 Lambertian albedo에 비례하며,  $n_L$  은 국부적 표면의 법선 벡터를 위한다. 여기서 최소자승법(least-square method)를 이용하여 미지수인  $K_L, n_L$  을 찾는다. 에너지 함수를 식 (11)과같이 정의 할 수 있다.

$$E = \sum_{i=1}^M \left[ I_L' - (K_L' n_{Lx} s_x + K_L' n_{Lz} s_z) \right]^2 \quad (11)$$

식 (12)의 최소화 조건을 적용하면,

$$\frac{\partial E}{\partial s_x} = 0 \quad \text{and} \quad \frac{\partial E}{\partial s_z} = 0 \quad (12)$$

다음과 같은 연립 방정식을 얻는다.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M I_L' s_{xi} = K_L'^2 \left( n_{Lx} \sum_{i=1}^M s_{xi}^2 + n_{Lz} \sum_{i=1}^M s_{xi} \cdot s_{zi} \right) \\ \sum_{i=1}^M I_L' s_{zi} = K_L'^2 \left( n_{Lx} \sum_{i=1}^M s_{zi} \cdot s_{xi} + n_{Lz} \sum_{i=1}^M s_{zi}^2 \right) \end{cases} \quad (13)$$

여기서  $\sqrt{n_{Lx}^2 + n_{Lz}^2} = 1$  이다. 따라서  $n_L$  과  $K_L'$  을 구할 수 있다.

• 3단계:

다음은 경면 반사가 주 성분이 되는 요소들에 대한 계산이다. 경면 반사 성분의 명암 값은 다음 식 (14)의 지배를 받는다.

$$I_S' = I_L' - (K_L' n_{Lx} s_x + K_L' n_{Lz} s_z) \quad (14)$$

국부적 표면의 법선 벡터는 식 (15)와 같이 계산 된다.

$$\theta_{ns} = \frac{\theta_s}{2} \pm \sqrt{-4\sigma^2 \ln \frac{I_S'}{K_S}} \quad (15)$$

여기서  $\sigma$  은 대상의 물체의 표면 특성이므로 주어진 값을 사용하거나, 별도로 실험에서 구할 수 있다. 실제 영상상의 명암 값과  $\sigma$  의 값을 가정하고 본 반사 모델에서 유도된 인공의 명암 값을 서로 비교하여 오차가 가장 없을 때의  $\sigma$  값을 찾는 것이다. 자세한 내용은 다음 장 실험 편에서 자세히 기술하고자 한다.

다음으로  $K_S$  는 영상 상의 가장 밝은 값으로부터 바로 구할 수 있다. 가장 밝은 값을 갖는 화소의 표면 법선 벡터의 기울기 값은 바로  $\theta_s/2$  이라고 가정하고, 식 (4)에서부터  $K_S$  의 값을 바로 구할 수 있다. 이 경우 난반사의 값은 경면 반사에 비해서 매우 작으므로 이를 무시한다.

• 4단계:

한 개의 화소에 대해서 2단계에서는 난반사 모델을 이용하여 표면 법선 벡터의 기울기,  $\theta_{nl}$  과 3 단계의 경면반사 모델을 이용하여 표면 법선 벡터의 기울기,  $\theta_{ns}$  를 구하였다. 이를 평균되어서 한 점 화소에 대한 기울기 값을 구해야 한다. Nayar [15]는 식 (16)과 같이 제안하였다. 본 논문에서도 이를 사용한다.

$$\theta_n = \frac{K_S' \theta_{ns} + K_L' \theta_{nl}}{K_S' + K_L'} \quad (16)$$

이 기울기 값의 분포만을 가지고도 향후 검사가 가능하다.

• 5단계:

식 (16)의 기울기 값으로 표면법선 벡터의 기울기 (p, q)를 다음과 같이 구할 수 있다[10].

영상에서 동일한 기울기 값을 가지는 궤적을 정의할 수 있고, 이 궤적의 기울기 보조선울 그을 때, 이 보조선과 좌표계



의  $X$ 축이 이루는 각도를  $\gamma$  라고 정의하면 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$\tan \gamma = \left( \frac{\partial \theta_n / \partial x}{\partial \theta_n / \partial y} \right) = \left( \frac{\partial y}{\partial x} \right) = \left( \frac{p}{q} \right) \quad (17)$$

여기서

$$p = \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right), \quad q = \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right), \quad \tan \theta_n = \sqrt{p^2 + q^2} \quad (18)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} |p| = |\tan \theta_n \sin \gamma| \\ |q| = |\tan \theta_n \cos \gamma| \end{cases}$$

• 6단계:

표면의 3차원적 높이는  $X, Y$  방향으로 따라 가면서 기울기 값을 구해 가면 된다. 자세한 내용은 R. Klette [16]의 방법을 따랐다.

$$z_{i+1,j+1} = \frac{1}{2}(z_{i,j+1} + z_{i+1,j}) + \frac{1}{4}(p_{i,j+1} + p_{i+1,j+1} + q_{i,j+1} + q_{i+1,j+1})$$

$$z_{i-1,j-1} = \frac{1}{2}(z_{i-1,j} + z_{i,j-1}) - \frac{1}{4}(p_{i-1,j} + p_{i,j} + q_{i,j-1} + q_{i,j}) \quad (19)$$

식 (19)에서 구한 2방향의  $z$  값을 평균하여 최종 높이 값을 구한다. 높이 값은 초기 값에 계속하여 적분을 해 나가는 형태이다. 따라서 초기 높이 값에 따라 전체 높이 값은 영향을 많이 받는다. 본 논문은 BGA 볼에 국한하므로 높이  $z$  값의 초기치를 다음과 같이 가정하였다. BGA 볼은 패드 위에 원형으로 구성되어 있으므로, 2차원 패드 영상에서 볼의 경계 값을 "0"으로 가정하였다. 2차원 영상에서 표준 보다 작은 볼 또는 큰 볼 또는 원형이 아닌 볼들은 쉽게 골라 낼 수 있다.

#### IV. 실험 및 토의

제안된 하이브리드 모델 및 3차원 높이 계산 방식이 정확성을 보기 위해서 전산 모사 실험을 먼저 실시 하였다. 이를 위해 BGA 금속 볼의 3차원  $(x, y, z)$  데이터를 인공적으로 만들다. 그림 4는 5단 링 조명의 각 단계로 인공 볼에 투사하였을 때의 생성이 된 영상을 보여준다. 이 명암 값은 식 (6)에 의해서 만들어 졌다.

그림 4의 각 화소별 명암의 값을 입력으로 하여 단계 1에서 단계 6까지의 과정을 통하여 다시 볼의 3차원 정보  $(x, y, z)$ 를 복원하였다.

우선은 단계 1에서 단계 4까지를 수행하면서, 각 화소별 표면 법선 벡터의 기울기 값을 그림 5와 같이 구하였다. 다음은 이 기울기 값을 가지고 단계 5와 6을 수행함으로써, 각 화소별 3차원적 높이를 그림 6과 같이 구할 수 있었다. 여기서 높이  $z$  값의 초기 조건은 원형 경계를 따라  $z=0$ 의 값을 주고 계산하였다. 그림 6에서는 계산된  $z$  값이 전체적으로 기준 볼의 형상과 비교할 때, 비슷함을 알 수 있다. 세부적인 정밀도 보다는 전체의 형상이 얼마나 기준 볼과 비슷한가를 보고자 하였다.

높이 계산 값의 세부적인 정밀도는 측정 값의 한 단면 프로파일을 비교하였다. 금속 볼의 한 단면에서의 계산된 기울기

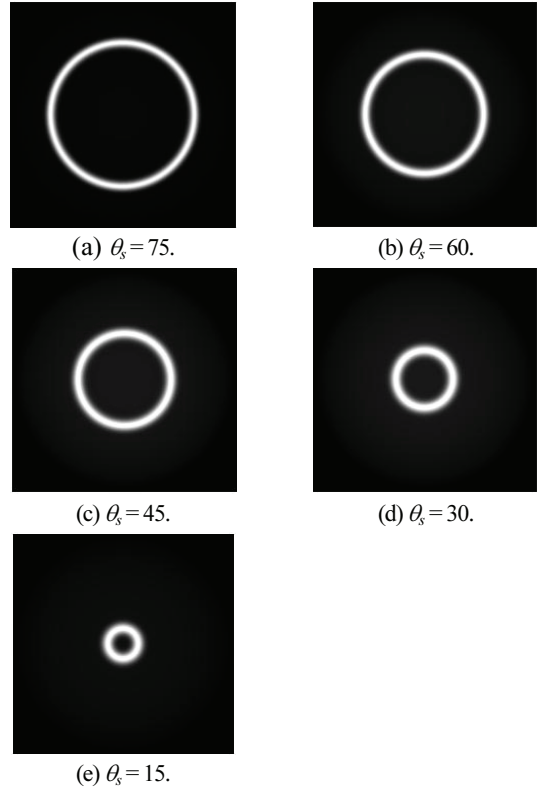


그림 4. 인공적인 BGA 금속 볼의 5단 링 조명에서의 영상.  
Fig. 4. Images of artificial BGA metal ball with the 5-step ring illumination.

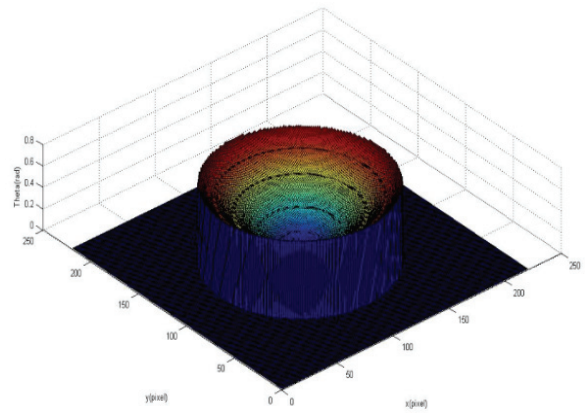


그림 5. 인공 BGA 금속 볼의 표면 기울기 측정 값 분포.  
Fig. 5. The slope angle distribution of the artificial BGA metal ball.

기와 높이 값을 당초 인위적으로 만든 기준 데이터와 비교하여, 제안된 반사 모델과 높이를 구하는 방법의 정확성을 살펴 보았다. 그림 7에서 전산 모사 실험에서 평균 오차 기울기가 0.5%, 높이가 1% 미만으로 제안된 하이브리드 반사 모델과 3차원 높이를 구하는 방법이 매우 잘 맞는다고 할 수 있다.

다음은 실제 지름이  $80 \mu\text{m}$  BGA 금속 볼에 대한 측정을 하였다. 대표적인 금속 볼에 대해서 기울기와 3차원 높이를 계산하였다. 그림 8을 측정된 값의 2차원적으로 보여 주고 있는데, 가장 자리는 경사가 매우 급하기 때문에 잘 측정이 안 됨을 알 수 있다.

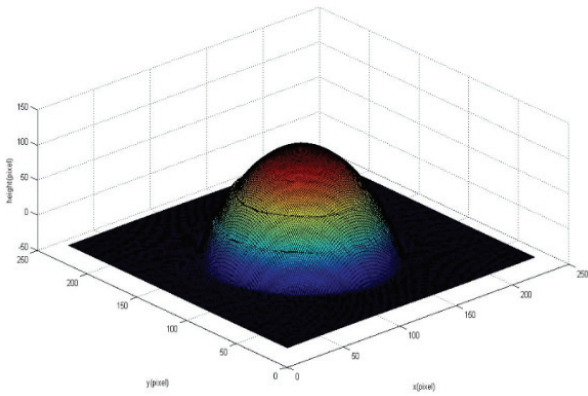


그림 6. 인공 BGA 금속 볼의 계산된 표면 높이 값 분포.  
Fig. 6. The calculation data of the artificial BGA metal ball.

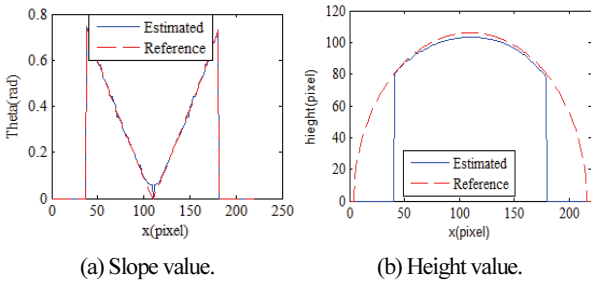


그림 7. 계산된 값과 기준 데이터와의 비교.  
Fig. 7. Comparison between the calculation and the reference data.

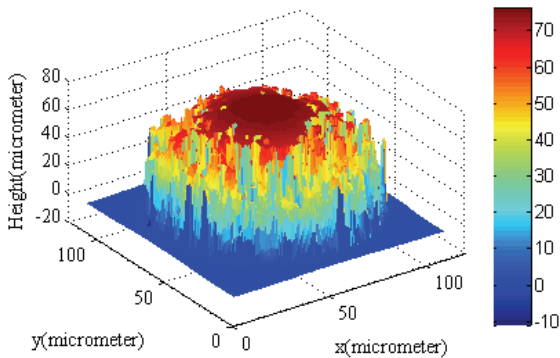


그림 8. 실제 BGA 금속 볼의 계산된 표면 높이 값 분포.  
Fig. 8. The calculation data of a real BGA metal ball.

그림 8의 계산된 높이 값의 정확성을 보기는 쉽지 않다. 왜냐하면, 실제 금속 볼의 형상을 정확히 측정할 수 없기 때문이다. 본 연구에서는 대안으로 그림 9에서 공간섭계를 원리의 3차원 측정기(ANI사 model명: nano-3D)를 사용하여 나온 측정치와 비교하였다. 이 3차원 측정기의 사양서 상의 성능은 표 1과 같다[17].

3차원 측정기는 표면의 기울기 값이 나오지 않으므로 3차원 높이 값을 얻은 후에 계산하여 얻은 값이다. 그림 9(a)에서 기울기 값에서 “\*”로 표시된 부분은 경면반사가 일어났던 지점인데, 두 개의 값이 일치하여 정확한 값을 알 수 있다.

이러한 방법으로 볼의 지름이 80  $\mu\text{m}$ 인 20개의 실제 볼을 3차원 측정기와 본 논문에서 제안된 방법의 계산 결과를 표 2

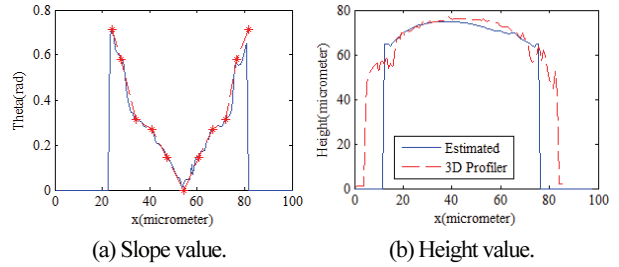


그림 9. 계산된 값과 3차원 측정값과의 비교.  
Fig. 9. Comparison between the calculation and the measurement.

표 1. ANI사 nano-3D model의 성능.

Table 1. Performance of ANI nano-3-D model.

원리	x-y 분해능	측정 정밀도(h)	측정 시간
White light interference	0.75 $\mu\text{m}$	$\pm 0.07 \mu\text{m}$	$7 \times 10^{-3} \text{mm}/\text{초}$

표 2. 샘플 20개에 대한 측정값의 비교.

Table 2. Comparison of measurements for 20 samples.

비교 항목	차이
기울기 측정값의 평균	$2.27^\circ \pm 0.80^\circ$
높이 측정값의 차이 (보정 전)	$5.10 \pm 2.86 \mu\text{m}$
높이 측정값의 차이 (보정 후)	$1.85 \pm 1.05 \mu\text{m}$

에서 비교하였다. 표 2에서 기울기의 값은 두 방법이 서로 비슷했다.

높이 측정값의 차이(보정 전)는 약 5.10  $\mu\text{m}$  (약 6.25%) 정도 오차가 발생하였다. 이는 본 논문에서 제안한 방법은 볼의 천정각이 45°를 넘어가는 급경사 면의 기울기 값을 구할 수 없거나, 신뢰도가 매우 낮다. 본 방법은 기준 면에서 기울기 정보를 따라 높이를 구해가는데, 이 급경사 부분에서의 높이 정보를 정확히 구할 수 없게 된다. 따라서 이러한 사유로 오차가 많이 발생한다.

그러나 두 높이 데이터의 측정값의 평균을 같이 맞추면, 두 데이터의 차이는 약 1.85  $\mu\text{m}$ 로 된다. 또한, 절대적 높이의 측정 오차는 약 6.25% 정도 이었지만, 상대적인 오차는 2.3% 정도가 된다. 즉 오프셋 값만 보정을 하면 높이 값도 매우 정확하게 나온다는 것이다.

처리 시간을 살펴보면 다음과 같다. 실험에서 처리 영상은 220×220 화소 기준으로 300 msec가 걸린다. 이 실험 조건에서 1 화소는 0.8  $\mu\text{m}$  이므로 실제 면적은 176×176  $\mu\text{m}$ 이므로 약 4개의 금속 볼이 검사 영역에 들어 온다. 따라서 실용화 측면에서 한 개의 기관이나 웨이퍼 위에서 작게는 400개에서 몇 십만 개를 검사하기 위해서는 검사의 전략이 필요하다.

본 논문에서 균일한 조명 조건의 촬영 면적(FOV)을 4mm (H)×3mm (V)으로 설계하였는데, 여기에 지름 80  $\mu\text{m}$ 의 볼이 약 450개 정도 들어오게 된다. 검사를 위해서는 우선 2차원적 결함, 예를 들면 볼의 테두리가 원형이 아닌 것, 브릿지, 형성이 안된 볼, 지름이 큰 볼, 지름이 작은 볼 등은 빠른 속도로 걸러 낸다. 그리고 몇 개의 샘플에 대해서 3차원 형상 및 체적의 검사를 통하여 2차원 검사에서 빠질 수 있는 항목을 검사하게 된다[17]. 모든 대상 볼에 대해서 3차원 검사를

하기 위해서는 검사 영역을 병렬처리를 통하여 동시에 검사함으로써 가능하나, 효율적인 측면에서는 2차원적 검사를 하고, 일부 문제가 있는 샘플에 대해서 3차원 검사를 하는 것이 실용화 측면에서 바람직하다.

실험을 통하여, 본 제안한 방법이 영상의 정보 만으로도 3차원 높이 정보를 정량적으로 얻을 수 있음을 보였다. 또한, 계산된 표면의 기울기 분포는 매우 정확히 구할 수 있었다. 광도측정법(photometric method)으로 기울기 및 높이 정보를 정량적으로 구한 것은 검사를 위해서 매우 중요한 발전이라고 할 수 있다.

이러한 결과를 통해서 링 조명에 의해서 나타난 명암 값의 분포를 가지고 BGA 금속 볼의 검사를 위한 기본 데이터로 사용할 수 있으며 3차원 형상에 대한 추론 및 정량적 분석이 가능해 졌다.

### V. 결론

본 논문에서는 BGA의 금속 볼의 3차원 검사를 위한 5층 링을 이용한 구조적 조명과, 금속 볼의 반사 특성을 고려한 실용적 하이브리드 반사 모델을 제안하였다. 본 연구에서는 이를 통하여 영상의 명암 값으로부터 금속 볼의 표면 법선 벡터를 구하고, 3차원적 높이 정보를 계산하는 방법을 제안하였다.

전산 모사 실험을 통하여 제안한 모델과 방법의 타당성을 검증하고 실제 BGA 금속 볼을 대상으로 계산된 값의 정량적 비교 평가를 하였다. 전산 모사 결과 제안된 하이브리드 반사 모델과 3차원 높이 측정 방법은 매우 정확히 잘 유도되었다는 것을 증명하였다. 실제 금속 볼을 대상으로 한 실험에서는 매우 정밀한 측정이 가능함을 보였다. 실험 결과 표면의 기울기 값의 계산 정밀도는 매우 정확하여, BGA 금속 볼의 3차원 형상 검사하기 위한 양·불량의 기준을 만드는데, 충분히 사용할 수 있다.

본 연구는 빠른 시간에 웨이퍼 상의 백만 개 정도의 많은 BGA 금속 볼을 3차원적 형상 인식 및 정량적 검사가 가능하도록 하는 방법으로 산업계의 효용성이 높을 것으로 기대된다.

### REFERENCES

- [1] David McCann 2012, Advanced Packaging and Progress in 3D Integration, *The ConFab 2012 Conference*.
- [2] J. H. Kim, H. S. Cho, and S. Kim, "Pattern classification of solder joint images using a correlation neural network," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 9, no. 6, pp. 655-669, 1996.
- [3] K. W. Ko, H. S. Cho, J. H. Kim, and S.-K. Kim, "Solder joint inspection using a neural network and fuzzy rule-based classification method," *Journal of control robotics and Systems*, vol. 8, no. 6, pp. 710-718, 2000.
- [4] J. H. Kim and H. S. Cho, "Neural network-based inspection of solder joints using a circular illumination," *Image and Vision Computing*, vol. 13, pp. 479-490, 1995.
- [5] E. N. Coleman and R. Jain, "Obtaining 3-dimensional shape of textured and specular surface using four-source photometry," *Computer Vision, Graph, Image Process*, vol. 18, no. 4, pp. 309-328, 1982.

- [6] H. Saito, K. Omata, and S. Ozawa, "Recovery of shape and surface reflectance of specular object from relative rotation of light source," *Image and Vision Computing*, vol. 21, no. 9, pp. 777-787, 2003.
- [7] C. Linder and F. León, "Model-based segmentation of surfaces using illumination series," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, no. 4, pp. 1340-1346, 2007.
- [8] S. K. Nayer, A. C. Sanderson, L. E. Weiss, and D. D. Simmon, "Specular surface inspection using structured highlight and Gaussian image," *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 6, no. 2, pp. 208-218, 1990.
- [9] J. H. Kim, C. H. Kim, and H. S. Cho, "Obtaining shape of specular object using ring illumination," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, vol. 2, pp. 78-87, 1995.
- [10] I. D. Yun, E. Jung, and S. U. Lee, "On the fast shape recovery technique using multiple ring lights," *Pattern Recognition*, vol. 30, pp. 883-893, 1997.
- [11] D. J. Svetkoff, D. K. Rohner, D. A. Nohleti, and R. L. Jackson, "Method and system for triangulation-based, 3D imaging utilizing an angled scanning beam of radiant energy," *U.S. Patent 5*, pp. 617-209, 1997.
- [12] P. Kim and S. Rhee, "Three-dimensional inspection of ball grid array using laser vision system," *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, vol. 22, pp. 151-155, 1999.
- [13] M. Yu, G.-Y. Jiang, S.-L. He, B.-K. Yu, and R.-D. Fu, "New approach to vision-based BGA package inspection," *Proc. of the First International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, vol. 2, pp. 1107-1110, 2002.
- [14] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Surface reflection: Physical and geometrical perspective," *IEEE Trans. Pattern Analysis Mach. Intell.*, vol. 13, pp. 611-634, 1991.
- [15] S. K. Nayar, K. Ikeuchi, and T. Kanade, "Determining shape and reflectance of hybrid surface by photometric sampling," *IEEE Trans. On Robotics and Automation*, vol. 6, pp. 418-431, 1990.
- [16] R. Klette and K. Schlüns, "Height data from gradient fields," *Proc. of SPIE (the International Society for Optical Engineering) on Machine Vision Applications, Architectures, and Systems Integration*, Boston, Massachusetts, USA. vol. 133, pp. 204-215, 1996.
- [17] J. H. Kim, J. H. Kim, S. M. Cho, H. H. Shim, M. G. Ji, S. Shin, S. H. Han, and C. D. Tr. Nguyen, "Study of 2D + 3D Visual Inspection for Tiny Object," *Project Report: The Collaborative Research Program Among Industry, Academic and Research Institutes*, 2012.



김 종 형

1984년 서울대학교 공과대학 기계설계공학과(공학사). 1989년 한국과학기술원 생산공학과(공학석사). 1995년 한국과학기술원 기계공학과(공학박사). 1993년~2002년 삼성전자 생산기술센터 부장. 2002년~현재 서울과학기술대학교 교수.

2012년~현재 제어로봇시스템학회 교육이사. 관심분야는 머신비전, 인공지능, 로봇 응용.



**Chanh D. Tr. Nguyen**

2011년 호치민시립대학교 메카트로닉스 공학과(공학사). 2013년 서울과학기술대학교 NID대학원(공학석사). 2013년~현재 한국과학기술원 기계공학과 박사과정  
관심분야는 머신비전, 기계지능.