

반복복원 기법을 이용한 전자회로기판의 납땜부 형상 복원

Shape Reconstruction of Solder Joints on PCB using Iterative Reconstruction Technique

조영빈, 권대갑

(Young-Bin Cho, and Dae-Gab Gweon)

Abstract : This paper presents a shape reconstruction method for automatic inspection of the solder joints on PCBs using X-ray. Shape reconstruction from X-ray radiographic image has been very important since X-ray equipment was used for improving the reliability of inspection result. For this purpose there have been lots of previous works using tomography, which reconstructs the correct shape, laminography or tomosynthesis, which are very fast algorithm. Latter two methods show outstanding performance in cross-sectional image reconstruction of lead type component, but they are also known to show some fatal limitations to some kinds of components such as BGA, because of shadow effect. Although conventional tomography does not have any shadow effect, the shape of PCB prohibits it from being applied to shape reconstruction of solder joints on PCB. This paper shows that tomography using Iterative Reconstruction Technique(IRT) can be applied to this difficult problem without any limitations. This makes conventional radiographic instrument used for shape reconstruction without shadow effect. This means that the new method makes cost down and shadow-free shape reconstruction. To verify the effectiveness of IRT, we develop three dimensional model of BGA solder ball, make projection model to obtain X ray projection data. and perform a simulation study of shape reconstruction. To compare the performance of IRT with that of conventional laminography or tomosynthesis, reconstruction data are reorganized and error analysis between the original model are also performed.

Keywords : X-ray, tomography, laminography, reconstruction, solder joints, PCB inspection

1. 서론

전자회로 기판의 집적도 향상을 위하여 새로운 형태의 실장 부품, 실장 기술, 그리고 실장상태를 검사하는 자동화 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 납땜부의 접합상태 검사는 기존의 육안 검사에서 벗어나 머신 비전을 적용하려는 노력이 많이 있었다[5]-[7][12]. 그 결과 품질을 일정하게 관리하고 공정을 개선시키는데 큰 도움을 주었다. 그러나 외부로 드러나는 분명한 결함 뿐 아니라 내부에 존재하는 미소한 결함도 검사해야 할 필요성이 알려지면서 납땜의 내부 결함 검사에 대한 관심이 최근 크게 증가하였다. 그림 1에는 Gull wing 형 다리를 갖은 전자부품의 모습과 납땜의 대표적인 불량형태를 나타내었다. 그림 1의 (a)는 패키지 밑에 가려져 외관상 잘 보이지 않는 브릿지의 모습이, 그리고 (b)-(e)에는 정상 납땜과 여러 가지 불량 납땜의 형상들이 나타나 있다. 부품의 다리와 그 밑에 놓인 납의 모양을 잘 살펴보면 마치 납신을 신은 발 모양과 같아서 패키지의 바깥쪽 납을 토우 필렛(toe fillet)이라고 하고 그 반대쪽을 힐필렛(heel fillet)이라 부른다. 외관검사가 불가능한 힐필렛에 응력이 집중됨이 알려지고, 가려진 브릿지의 검사는 물론이고 다리뚝이나 기공의 검사가 중요해지면서 X선 검사는 많은 관심을 끌고 있다. 또한 90년대 초, 워크스테이션 제품에 적용되기 시작한 BGA(Ball Grid Array)와 MCM(Multi-Chip Module)과

같은 첨단 소자는 외관상 납땜 부위가 전혀 보이지 않아 X선 검사의 필요성은 더욱 절실해 지고 있다[1]-[4]. X선은 물질 투과 성능이 있으므로 납땜 내부의 균열, 기포 등 여러 가지 결함을 가시화하는데 용이하며 투과식과 단층식으로 대별 할 수 있다. 투과식은 피검물을 투과하여 나오는 X선의 강도를 시각화하는 것으로 라디오그래피(radiography) 혹은 투시 영상법이라고 부른다. 투과식은 하드웨어의 구성이 간단하고 내부 결함이 잘 나타나지만 부품의 다리나 패키지의 간섭을 받을 경우 정확한 납땜 형상이 구해지지 않는다. 또한 양면 기판의 경우와 같이 반대면에 위치한 납땜에 의해 받는 간섭은 납

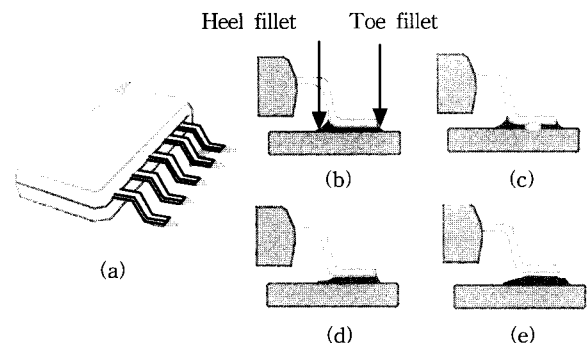


그림 1. 납땜불량의 예. (a) 리드간 브릿지, (b) 정상납, (c) 기공, (d) 힐필렛부족, (e) 다리뚝.
Fig. 1. Example of solder defect. (a) bridge, (b) normal, (c) void, (d) insufficient heel fillet, (e) lifted lead.

접수일자 : 1998. 5. 25., 수정완료 : 1999. 2. 10.

조영빈, 권대갑 : 한국과학기술원 기계공학과

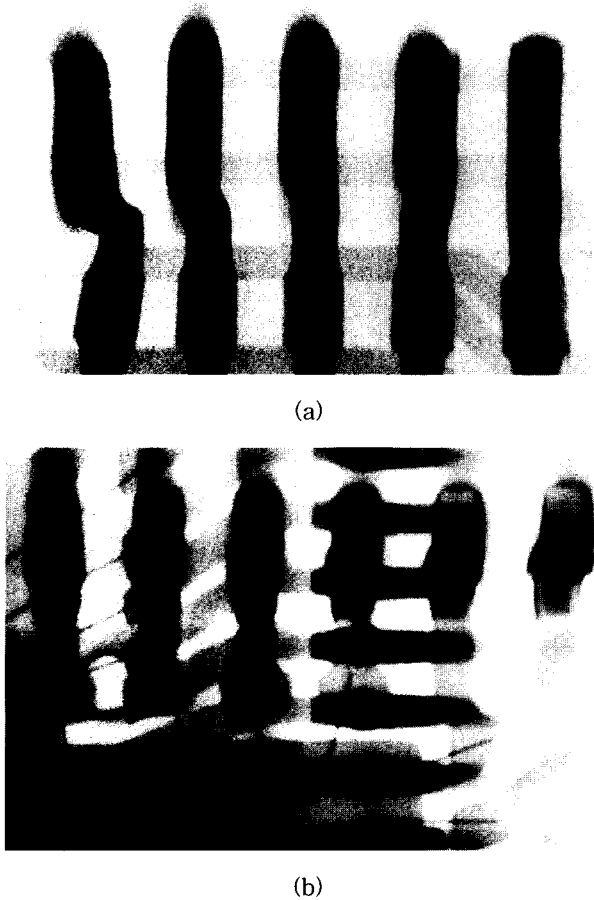


그림 2. 투시상의 형성 (a) 단면 기판, (b) 양면 기판.
 Fig. 2. Radiographic image formation (a) single-sided PCB, (b) double-sided PCB.

땀 형상 추정을 매우 어렵게 한다. 그림 2는 gull wing형 다리를 갖은 부품의 투시 영상을 나타낸 것이다. 그림 2의 (a)에는 휘어진 다리와 기공이 잘 보이고 가장 오른쪽 납땀부와 같이 힐필렛이 부족한 것도 쉽게 드러난다. 그림 2의 (b)는 양면에 부품이 놓인 기판의 투시 영상으로 불량률의 종류와 납땀의 형상을 판단하기 어려우므로 투시 영상 기법은 양면 기판의 자동 검사에는 잘 적용되지 않고 있다. 원하는 단면의 형상을 정확히 인식하기 위해서는 투시 영상보다는 단층 영상이 더욱 유리하다. 단층 영상 기법은 기본적으로 피검물을 여러 방향에서 촬영한 후 복잡한 연산과정을 거쳐 임의의 단면을 복원하는 것으로 현재 여러가지로 연구되고 있다[10].

단층 영상 기법은 1970년대부터 의료용으로 도입된 토모그래피(tomography) 기법과 산업용으로 연구된 라미노그래피(laminography), 토모신서시스(tomosynthesis)로 크게 대별된다. 토모그래피 기법은 정교한 하드웨어와 긴 복원시간을 요구하지만 이론적으로 완벽한 복원 성능을 가지고 있다. 그러나 0.5 - 1mm정도의 분해능을 가지고 있는 의료용 단층 장비를 0.01 - 0.02mm의 분해능을 요구하는 회로 기판 검사에 사용할 수는 없다. 이

에 비해 라미노그래피는 복원속도가 빠르고 대상물의 일부분만을 확대 단층 촬영할 수 있어서 고가의 하드웨어임에도 불구하고 회로기판의 실시간 검사에 많이 적용되어 왔다. 그러나 양면 기판이나 BGA의 검사에서는 라미노그래피의 그림자 효과가 큰 문제를 발생시키고 있음이 보고되어 있다[10]. 그림자 효과를 극복하기 위한 많은 연구중 대표적인 것으로 토모신서시스가 있는데 그림자 효과는 크게 줄었으나 이가 빠진 듯한(mouse-bite) 불균일한 영상을 만드는 또 다른 문제가 있다. 기판의 두께에 비해 매우 얇은 납이 기판 양면에 도포된 경우에 한하여 투시 장치와 부품 이송 장치만으로 그림자 효과를 완전히 제거한 연구도 있었다[14]. 이것은 기판의 패드에 얇게 도포된 납 상태의 검사와 같은 경우는 훌륭한 결과를 나타내지만 도포된 납이 두껍거나 부품이 조립된 상태와 같이 앞서의 가정을 만족시키지 못할 경우 복원결과에 큰 왜곡이 발생하였다. 따라서 BGA와 같이 납의 크기가 큰 부품에는 적용이 불가능하다. 이후 여러 사람들이 이러한 특별한 가정 없이 그림자 효과와 불균일한 영상 복원문제를 해결하기 위하여 많은 연구를 수행하였다[12][13]. 그러나 복잡한 하드웨어의 도입에도 불구하고 두 가지 문제를 근본적으로 해결한 연구는 아직까지 없었다. 결국 기판의 일부분만을 선택적으로 확대 단층 촬영하면서도 의료용 장비와 같이 완벽한 복원을 수행할 새로운 장비가 필요하게 되었다.

본 논문에서는 고가의 단층 촬영 전용 하드웨어 대신 기존의 투시장비를 그대로 사용하여 완벽한 복원을 수행하는 새로운 개념의 단층 촬영 방법을 설명한다. 이것은 기판을 중심으로 회전하여 여러 장의 투시 상을 얻는 기존의 단층 촬영 기법대신 기판을 평행 이동시켜 여러 장의 투시상을 획득하고 이를 재 조합하여 임의의 단층 영상을 복원하는 것으로 기존의 회로기판용 투시 장비만으로도 가능한 방법이다. 180도 전 방향에서 촬영이 불가능한 경우에는 기존의 의료용 단층 촬영 기법이 적용되지 못하므로 반복 연산을 통하여 이를 극복하고자 하는 노력이 있었다[15][16]. 그러나 이것도 역시 기존의 의료용 단층 촬영 장치를 모델로 하여 만들어진 것들이었다. 본 논문에서는 기판의 일부분을 원하는 분해능대로 확대 복원하기 위하여 기판의 이동에 따른 투시상의 영상으로부터 반복 복원 기법에 의해 단층을 구하였다. 이로 인해 간단한 투시 영상만으로 원하는 부분만을 그림자 효과없이 확대 복원하는 것이 가능하게 되었다. 우선 기존의 방법들이 가지는 방법상의 문제점들을 간단히 기술하고 본 논문에서 제시하는 모델에 대한 설명을 하였다. 또한 기존의 방법들과 그림자효과의 차이를 비교하기 위하여 BGA를 비롯한 여러 가지 납 형상을 모델링하고 라미노그래피와 토모신서시스 원리를 적용하여 복원 영상을 구하였으며 이를 반복 복원 기법으로 얻어진 결과와 비교하였다. 라미노그래피와 토모신서시스에 대한 시뮬레이션 결과는 역시 참고문헌에 나타난 것과 같이 많은 그림자 효과와 이가 빠진 듯한 형태를 나타내고 있으며 반복 복원은 우수한 결과를 나타내는 것을 확인할 수

있었다. 반복 복원 기법은 약 10회 이상의 반복 후에야 수렴하는 모습을 보여 시간이 많이 걸리는 단점을 보이고 있다. 그러나 불과 1회의 계산만으로도 라미노그래피와 토모신서시스보다는 좋은 결과를 나타내고 있었다.

II. 3차원 형상 복원 원리

1. X선 투시 영상

X선이 물체를 투과할 때 전자를 이온화시키는 콤프턴 효과와 물질의 내부 전자를 때어내고 광전자를 발생시키는 광전효과로 인해 아래와 같이 강도의 감소가 일어난다.

$$I = I_0 e^{-\mu \rho t} \tag{1}$$

여기서 I_0 는 물질에 입사하기 전의 X선 강도이며, ρ 는 물질의 밀도이고, 흡수계수 μ 는 X선의 강도 퍼투과체의 종류에 따라 변하는 비선형 인자이므로 대부분 실험으로 구하는 것이 일반적이다.

그림 3은 전산화 투시 장치(computerized radiography)의 예를 나타내고 있다. 전자부품 검사에 사용되는 X선 튜브에서는 점광원에 가까운 작은 초점으로부터 X선이 나오는데 보통 0.01mm정도이다. 물체를 투과해 나온 X선의 분포를 시각화하기 위해서 영상증배관과 CCD 카메라로 구성된 영상 획득 장치를 사용한다. 영상증배관은 X선 분포를 가시광선 영역의 빛으로 바꾸어주는

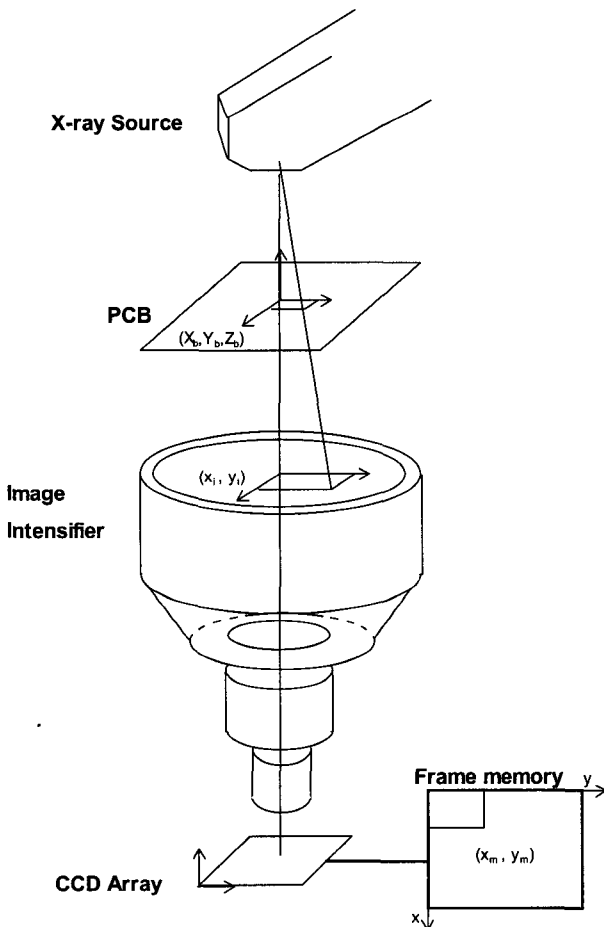


그림 3. X선 영상 획득 장치.
Fig. 3. X-ray imaging system.

장치로 CCD 카메라에 의해 영상 데이터로 최종 변환되어 컴퓨터내에서 디지털 정보로 저장, 처리된다.

2. 라미노그래피와 토모신서시스

전자부품의 실시간 단층 촬영과 같은 응용 분야에 널리 적용되고 있는 이 방법은 복원 시간이 극히 짧아 최근 많은 연구가 진행되고 있다[10]. 그림 4에 나타난 바와 같이 전자적으로 혹은 기구적으로 회전하는 X선원과 이와 동기 되어 반대 방향으로 회전하는 검출기로 구성된다. X선원과 검출기는 가상의 초점면을 중심으로 동기 되어 회전하는데 일반적으로 검출기에서 나온 영상을 평균화 처리하여 물체의 단면 영상을 구한다. 이것을 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$F(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [f(i, j) + g(i + \delta_n, j + \nu_n)] \tag{2}$$

$$= f(i, j) + \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N g(i + \delta_n, j + \nu_n)$$

여기서 i, j 는 영상의 위치를 나타내며, $F(i, j)$ 는 라미노그래피로 얻어진 영상이고 $f(i, j)$ 는 초점면물체가 만드는 영상이고 $g(i, j)$ 는 비초점면의 물체가 만드는 영상이다. δ_n, ν_n 은 X선의 초점이 위치 n 에 있을 때 만드는 위치 이동량이다. 이 값은 비 초점면과 초점면사이의 거리가 멀수록, 회전 X선의 반경이 클수록 커지고 이 값이 커질수록 비 초점면의 물체 영상은 더 넓게 흩어지게 된다. 실제의 라미노그래피는 초점 평면의 법선에 대하여 약 30°의 각을 이루며 검출기와 X 선원을 매우 고속으로 회전시켜서 산술 평균한 효과를 얻으므로 디지털 처리 없이 매우 고속으로 단층 화상을 얻을 수 있다.

그러나 비초점면의 물체가 만드는 상, $g(i, j)$ 은 결코 사라지는 것이 아니라 화면 전체에 걸쳐 흩뿌려지는데 ((2)의 두 번째 항) 이것을 그림자 효과라 부른다. 그림 4에서 보는 바와 같이 초점면에 A 형상의 물체가 있고 그 위에 원형 물체가 붙어 있는 물체를 가정하자. 초점면에 위치한 A 물체의 형상은 검출기내에서 항상 고정된 위치에 나타나지만 초점면에서 떨어진 원형 물체는 X선원과 검출기가 회전하면서 계속 다른 위치에 영상을 형성하게 된다. 이 모든 영상을 평균하면 (2)와 같이 원

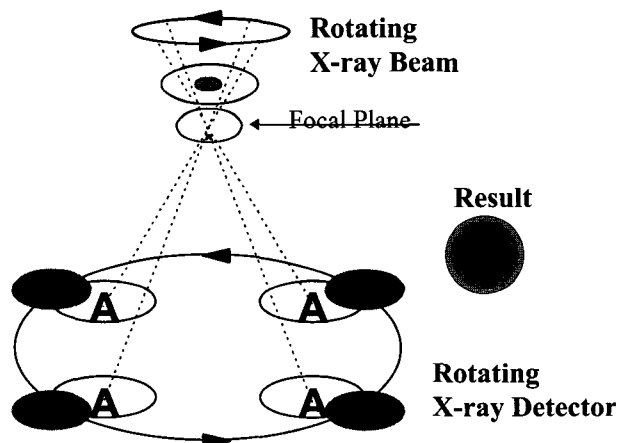


그림 4. 라미노그래피의 원리.
Fig. 4. Principle of Laminography.

하는 단면과 그림자 효과가 겹쳐진 영상을 얻게 된다. 만일 물체를 검출기 쪽으로 내려서 원형 물체의 위치가 초점면에 오도록 하면 A 물체가 그림자를 형성하고 원형 물체의 상은 뚜렷이 나타난다.

영상 평균 대신 최소화 연산을 수행하면 그림자 효과가 크게 줄어드는데 이 방법을 토모신서시스(tomosynthesis)라고 한다. 이 방법은 데이터의 획득과 처리에 라미노그래피보다 많은 시간이 소요되지만 그림자효과는 크게 줄어든다. 토모신서시스는 보통 매 회전마다 8장의 영상을 얻고 다음과 같은 디지털 처리를 수행하게 된다.

$$F(i, j) = \min[f(i, j) + g(i + \delta_n, j + \nu_n)]$$

$$= f(i, j) + \min g(i + \delta_n, j + \nu_n)$$
(3)

위의 (3)에서 알 수 있는 바와 같이 N개의 투시 영상 중 비 초점면의 물체의 영향이 가장 적은 영상으로부터 복원 영상을 얻으므로 그림자 효과는 크게 줄어든다.

3. 토모그래피와 반복 연산 기법

주로 의료용으로 이용이 많은 토모그래피는 1972년 Hounsfield 에 의해 개발된 EMI scanner를 시작으로 상용화 된후 많은 발전을 거듭해 왔다. 크게 나누어 4세대로 구별되는 토모그래피의 하드웨어 구조는 그림 5에서 보는 바와 같다. 세대가 증가할수록 검출기의 수와 배치의 복잡성이 증가하는 경향을 보인다. 어느 것이나 환자를 대상으로 하고 있는 것이므로 피검체를 회전하는 대신 거대한 장치가 기구적으로 회전하는 구조를 하고 있다.

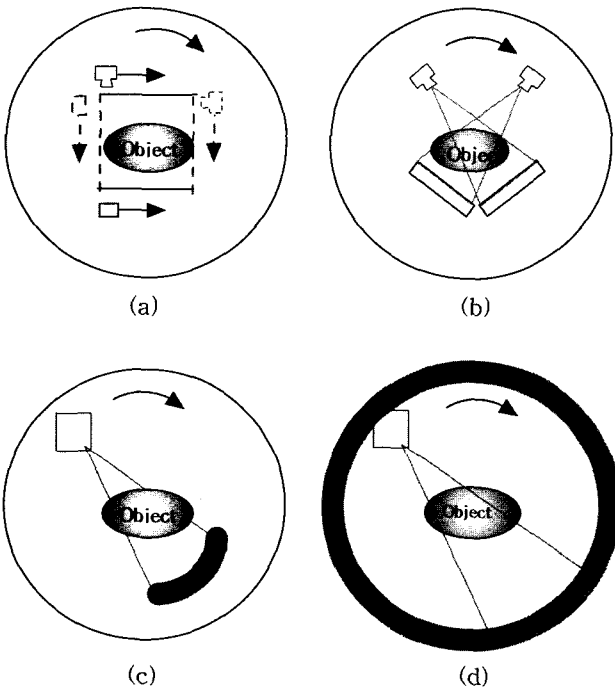


그림 5. X ray CT의 발전과정 : (a) 1세대, (b) 2세대, (c) 3세대, (d) 4세대.

Fig. 5. Evolution of the X ray CT system : (a) 1st generation, (b) 2nd generation, (c) 3rd generation, (d) 4th generation.

전자회로의 납땀부 형상 복원은 의료 진단의 단층 촬영과는 몇 가지 다른 특징이 있다. 의료용 진단이 필요한 피검물의 형상은 대부분 타원형의 단면을 가지며 피검체를 이동, 회전시키는 것은 극히 제한 받는다. 이에 비해 전자회로 기관은 얇은 평면 형태를 가지며 높은 분해능이 필요해 기존의 의료용 단층 촬영 장치에서 이용되는 방법은 적용할 수 없다. 만일 의료용 촬영장치는 물론이고, 라미노그래피와 같은 특수하고도 거대한 장치 없이 기존의 투시 촬영 장치를 그대로 이용하여 단층을 복원할 수 있다면 하드웨어의 개발, 유지에 들어가는 시간과 경비를 줄이는 가장 좋은 방법이 될 것이다. 기관의 이동과 줌 카메라의 동기 구동에 의한 단층 복원[13], 양면 기관의 분리 영상 획득[14]과 같은 연구들은 이러한 시도중 하나이다.

그림 6에는 기관의 이동과 이에 따른 투시상의 형상을 나타내고 있다. 실제 X선이 조사하는 영역은 흐린 색으로 표시된 원뿔형 영역이고 기관의 이동에 따라 기관 내의 특정 검사 위치가 X선원과 형성하는 조사영역은 진하게 표시된 부분이다. 진하게 표시된 X선 영역을 주의해서 관찰하면 마치 X선이 서로 다른 방향에서 비추는 것과 유사한 모습을 나타낸다 이것은 CT가 가지는 기본적인 원리이기도 하다. 다만 물체 주위로 회전하는 대신 상대적인 평행이동이 있다는 점이 다를 뿐이다.

물체의 밀도가 함수 $f(x, y)$ 로 표현될 때 임의의 방향 θ 에서 조사하는 X선에 의해 형성되는 투시상 $g(s, \theta)$ 는 아래의 그림 7과 같다. 토모그래피에 의한 형상 복원은 물체 $f(x, y)$ 로부터 투시상 $g(s, \theta)$ 로 변환되는 수학적 관계를 규명하고 투시상 $g(s, \theta)$ 로부터 물체 $f(x, y)$ 로의 관계를 구하는 것으로 크게 필터링 역변환(FBP, Filtered Back-Projection)과 반복 연산 기법(IRT, Iterative Reconstruction Algorithm)으로 대별된다. 이 중에서 전자는 영상의 획득이 일정한 회전각에서 모두 이루어진다는 것을 가정하고 있는 일반적인 의료용 단층 복원 기법이다. 후자는 제한된 회전각에서만 투시상을 얻어도 복원이 가능한 대신 계산량이 많다는 단점을 가지고 있다 [15][16].

X선 투시 영상의 복원은 우선 투시 영상의 형성을 기술하는 것으로부터 시작한다. 투시 영상 $g(s, \theta)$ 의 형성은 라돈변환(radon transform, R)에 의해 다음과 같이

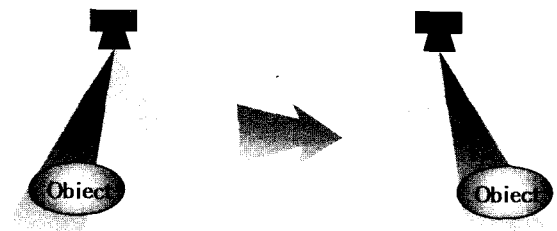


그림 6. 기관 이동에 따른 단층 촬영 원리.
Fig. 6. Principle of tomographic system using PCB movement.

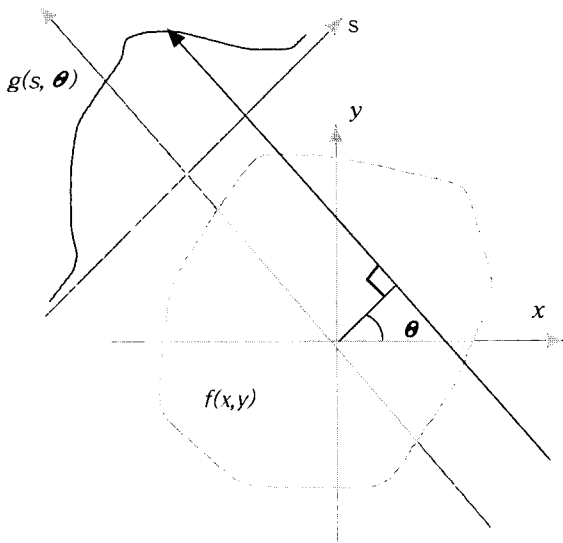


그림 7. X선 투시상의 형성.
Fig. 7. X-ray image formation.

표현할 수 있다.

$$g(s, \theta) = Rf \tag{4}$$

$$= \int \int f(x, y) \delta(x \cos \theta + y \sin \theta - s) dx dy$$

만일 다음과 같은 파라미터를 도입한다면

$$\begin{aligned} s &= x \cos \theta + y \sin \theta \\ u &= -x \sin \theta + y \cos \theta \end{aligned} \tag{5}$$

(4)는 결국 아래와 같이 간단히 정리된다.

$$g(s, \theta) = \int f(s \cos \theta - u \sin \theta, s \sin \theta + u \cos \theta) du \tag{6}$$

$g(s, \theta)$ 는 X선의 조사 방 θ 에서 검출기 위의 좌표 s 에 형성되는 투시영상으로 X선의 경로상에 있는 모든 물질의 밀도값을 합한 것이다. 단면의 복원이란, 투시영상 $g(s, \theta)$ 로부터 물질의 밀도 분포함수 $f(x, y)$ 를 계산하는 것으로 역투시 변환(back projection, B)에 의해 다음과 같이 구할 수 있다.

$$b(x, y) = Bg = \int_0^\pi g(x \cos \theta + y \sin \theta, \theta) d\theta \tag{7}$$

그리고 역투시 변환에 의해 얻어진 $b(x, y)$ 는 $f(x, y)$ 와 다음과 같은 관계를 가진다는 것이 밝혀져 있다.

$$b(x, y) = f(x, y) * (x^2 + y^2)^{-\frac{1}{2}} \tag{8}$$

위의 결과에 따르면 투시 영상 $g(s, \theta)$ 을 고주파 필터링한 후 역 투시 변환을 행하면 참값을 얻을 수 있게 된다. 그러나 이 기법의 경우 영상의 획득이 일정한 회전 간격으로 이루어지지 않으면 복원이 불가능하다는 단점이 있다. 이에 비해 반복 연산에 의한 영상 복원은 다음과 같은 선형 방정식에 기초한다.

$$g(s_m, \theta_n) \approx \sum_{ij} f_{ij} h_{ij}(s_m, \theta_n), \tag{9}$$

$$0 \leq m \leq M-1, 0 \leq n \leq N-1$$

여기서 n, m 은 투시상의 갯수와 얻어진 투시상의 픽셀 갯수를 의미한다. 또 f_{ij} 는 물질의 밀도를 나타내는 $f(x, y)$ 를 양자화해서 나타낸 것이고 $h_{ij}(s_m, \theta_n)$ 는 (s_m, θ_n) 에 의해 경로가 결정된 X선이 f_{ij} 를 점유하는 정도를 나타낸다. 결국 (9)는 (6)을 이산 데이터에 대하여 표현한 것이 된다. 표현을 간결하게 정리하기 위하여 다음과 같이 식을 정리하기로 하자

$$f = \begin{bmatrix} f_{1j} \\ f_{2j} \\ \vdots \\ f_{ij} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$H = \begin{bmatrix} h(s_1, \theta_1) \\ h(s_2, \theta_1) \\ \vdots \\ h(s_M, \theta_N) \end{bmatrix} \tag{11}$$

여기서 $f_{ij} = [f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{ij}]^T$ 이고, $h(s_1, \theta_1)$ 는 $[h_{11}(s_1, \theta_1), \dots, h_{ij}(s_1, \theta_1)]$ 를 나타낸다. $R^{(I \times J) \times 1}$ 벡터와 $R^{(N \times M) \times (I \times J)}$ 인 행렬로 (9)를 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$g = Hf \tag{12}$$

여기서 $g = [g(s_1, \theta_1), \dots, g(s_M, \theta_N)]^T$ 를 의미한다. H 행렬은 X선원과 검출기 그리고 검사대상의 기하학적 관계에 의해 미리 계산할 수 있으므로 영상복원은 투시영상 g 로부터 물체의 밀도 함수 f 를 구하는 것이 된다. 결국 이것은 (12)에서 H 의 역행렬을 구하는 문제가 되는데 H 의 크기가 매우 커서 실제로는 적용이 불가능하다. 예를 들어 256×256 단면 영상을 512개의 sample로 100장의 투시 데이터를 얻을 경우 H 는 $R^{(512 \times 100) \times (256 \times 256)}$ 의 크기가 되어 역행렬을 구하는 방법으로는 영상복원이 어렵다. (12)로부터 영상 복원을 수행하는 방법으로는 다음과 같은 반복식을 사용하는 것이다[17].

$$\hat{f}^{(k+1)} = \hat{f}^{(k)} + \frac{g_{k+1} - \langle h_{k+1}, \hat{f}^{(k)} \rangle}{\|h_{k+1}\|^2} h_{k+1} \tag{13}$$

여기서 k 는 반복 횟수를 나타내고 h_k, g_k 는 각각 H, g 의 k 번째 행을 의미하며 $h_k = h(k \text{ modulo } N \times M), g_k = g(k \text{ modulo } N, M)$ 로 정의한다. 그런데 최근 이런 방법보다는 다음과 같이 특정 위치 m 에서 입사한 X선에 의해 형성되는 n 개의 데이터끼리만 합산하여 반복 복원하면 영상 복원 결과가 개선될 수 있음이 여러 연구에서 보고된 바 있다 [15]. 이러한 방법을 SART(Simultaneous Arithmetic Reconstruction Technique)이라고 하는데 이것도 역시 여러 가지 IRT(Iterative Reconstruction Technique)기법 중 하나이다. 본 논문에서도 이 방법을 적용하였다.

$$\hat{f}_{ij}^{(k+1)} = \hat{f}_{ij}^{(k)} + \lambda^{(k)}.$$

$$\frac{\sum_n h_{ij(m, n)} [(g_{(m, n)} - \sum_{ij} h_{ij(m, n)} \hat{f}_{ij}^{(k)}) / \sum_{ij} h_{ij(m, n)}]}{\sum_n h_{ij(m, n)}} \tag{14}$$

이 방법은 특정 각도 θ_n 에 대하여 추정 복원값을 갱신하는 것으로 어떤 순서로 투시 각도 n 을 정하는가에 따라 복원 정확도가 달라진다는 것도 보고되어 있다. 본 논문에서는 연속하는 2 개의 투시 각도의 차이의 최소치가 최대가 되도록 순서를 정하였다.

III. 납땜부 형상 복원

라미노그래피 기법과 토모신서시스 기법에서 발생하는 그림자효과와 반복연산 결과를 비교하기 위해서 우선 그림 8에 나와 있는 것과 같은 리드형 부품과 칩칩으로 구성된 양면 기판에 대한 모의 실험을 우선 수행하고 보다 밀도가 높은 부품이 조립되었을 때의 경우에 대한 문제를 조사하였다.

산업용으로 사용되는 라미노그래피와 토모신서시스는 초점면에 수직인 방향에 대하여 약 25-30도 정도 기울어져 회전하는 것이 대부분이므로 여기서는 30도의 각도를 갖는 것으로 가정하였다.

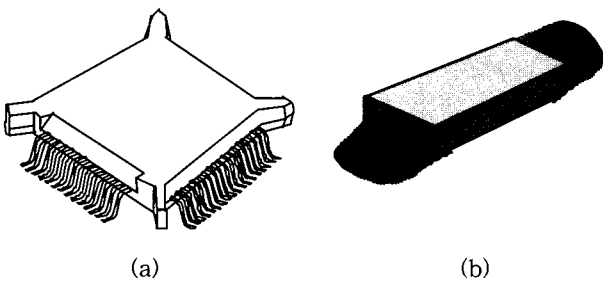


그림 8. 모의실험 대상 : (a) gull wing type component, (b) chip condenser.

Fig. 8. Objects for simulation : (a) gull wing type component, (b) chip condenser.

부품 다리의 형상과 납의 형상은 3차원으로 모델링 하였으며 부품 다리의 밀도는 20 납은 100으로 하였다. 이것은 다리가 주로 철과 니켈로 이루어져 있으며 X선의 에너지를 100-160keV로 가정하고 선형 질량 감쇄계수를 이용하여 계산하였다.

그림 9에는 gull-wing 형 리드와 칩 저항으로 이루어진 양면 기판의 단층 복원 결과를 나타내었다. 비초점면에 놓인 물체의 밀도가 크지 않으므로 기존의 논문에서 알려진 바와 같이 우수한 단층 복원 결과를 나타낸다.

그러나 그림 10, 11에서와 같이 gull wing 형 리드와 칩 콘덴서가 혼재하는 양면기판의 경우는 단층 복원 결과가 매우 현저히 저하되는 것을 알 수 있다. 일반적으로 콘덴서는 저항보다 밀도가 훨씬 크기 때문이다. 앞에서 설명한 대로 라미노그래피는 그림자 효과가 크게 나타나지만 전체적으로 부드러운 결과를 나타내고 토모신서시스는 그림자 효과는 줄어들지만 이 빠진 듯한 결과를 나타낸다. 그림 11은 기판을 초점 쪽으로 들어올려 하면에 초점이 오도록 맞추었을 때의 결과이다. 칩 칩 콘덴서와 같이 밀도가 높고 부피가 큰 물체가 없는 경우 라미노그래피와 토모신서시스는 자동 검사에 큰 문제없이 복원 영상을 생성하는 것을 알 수 있었다. 다음으로

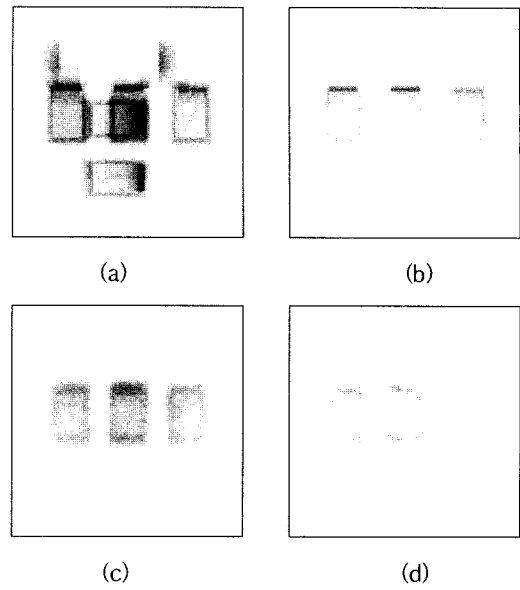


그림 9. 칩 저항이 존재하는 양면 기판의 단층 형상 복원 : (a) 양면 기판 투시영상, (b) 단면 투시영상, (c) 라미노그래피, (d) 토모신서시스.

Fig. 9 Shape reconstruction of solder joint on double-side PCB with gull wing & chip resistor : (a) radiography of double-side PCB, (b) radiography of one-side PCB, (c) image by laminography, (d) image by tomosynthesis.

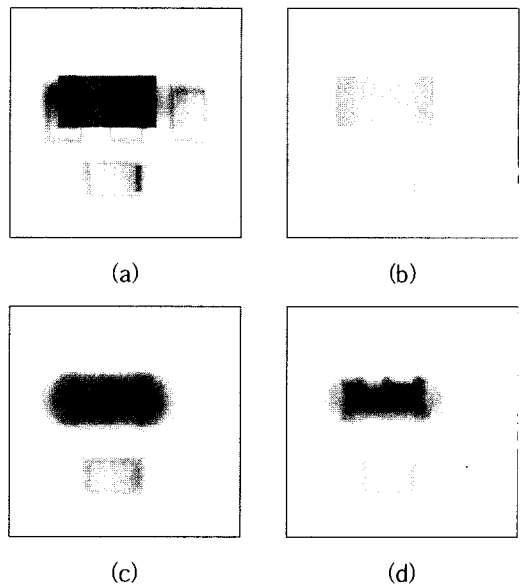


그림 10. 칩 콘덴서가 존재하는 양면 기판의 단층 형상 복원 (상면) : (a) 양면 기판 투시영상, (b) 상면 투시영상, (c) 라미노그래피, (d) 토모신서시스.

Fig. 10. Shape reconstruction of solder joint on double-side PCB with gull wing & chip condenser (Up side) : (a) radiography of double-side PCB, (b) radiography of up-side PCB, (c) image by laminography, (d) image by tomosynthesis.

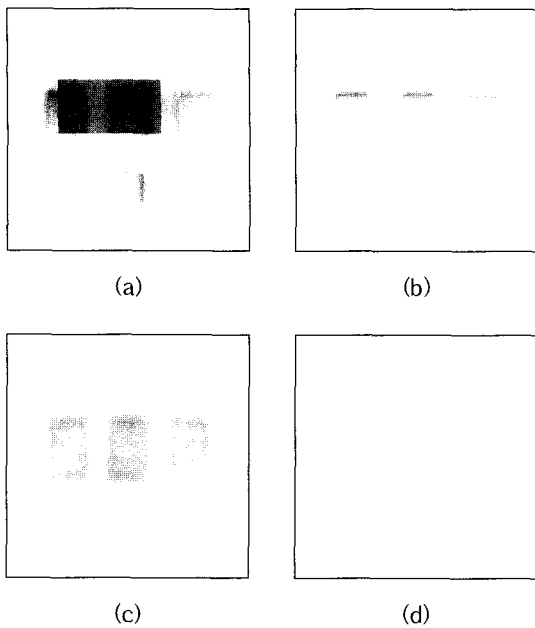


그림 11. 칩 콘덴서가 존재하는 양면 기판의 단층 형상 복원 (하면) : (a) 양면 기판 투시영상, (b) 하면 투시영상, (c) 라미노그래피 (d) 토모신서시스.

Fig. 11. Shape reconstruction of solder joint on double-side PCB with gull wing & chip condenser : (a) radiography of double-side PCB, (b) radiography of down-side PCB, (c) image by laminography, (d) image by tomosynthesis.

는 납의 부피가 커서 그림자 효과가 문제가 되는 BGA의 경우를 모의 실험하였다.

BGA(Ball Grid Array)는 리드를 사용하는 대신 패키지 하부의 하면에 지름 1mm 이하의 작은 납볼을 사용하여 기판과 패키지를 연결하는 것으로 전기적 통로의 길이가 짧아 고속 동작 소자에 유용하고 리드형 부품보다 많은 입출력 단자 수를 제공할 수 있으며 내구성이 우수하고 집적도를 높일 수 있는 장점이 있어 최근 많이 사용되고 있다. 이 부품의 납땜 검사는 납볼 상하에 존재하는 납필렛의 형상을 구하는 것이므로 기존의 라미노그래피 장치에서는 초점면을 납볼의 상면이나 하면에 맞추어야 한다. 그러나 이 경우 납볼의 밀도와 크기가 커서 초점면에 존재하는 납필렛 보다 비초점면에 존재하는 납볼에 의한 그림자 효과가 더욱 커지게 된다.

납볼의 단층 영상 복원에 대한 모의실험을 행하기 위해 BGA를 3차원으로 모델링하고 그 단면 형상을 도시하였다. 그림 12는 x와 z가 이루는 평면(y=0)으로 납볼을 절단한 모습이다. 구형의 납볼 상면엔 패키지의 패드와 연결된 필렛이 있고 하면에는 기판의 패드와 연결된 패드가 있다. 검사는 주로 이 필렛의 유무와 크기 등에 대하여 이루어지게 된다. 반복연산에 의한 복원을 수행하기 위하여 z=20mm인 곳에 X선원이 존재하며 피검물을 x방향으로 2mm씩 이동하여 7군데에서 데이터를 받는 것으로 가정하였다. 모의실험에 사용된 납볼은 지

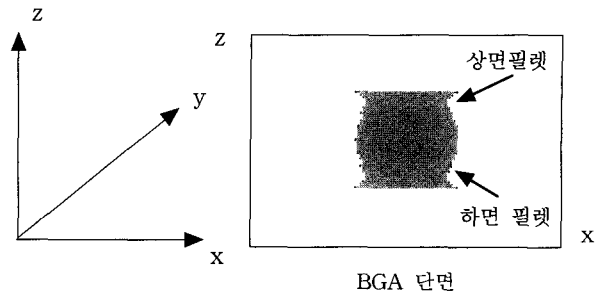
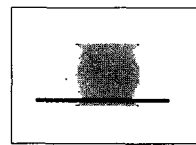
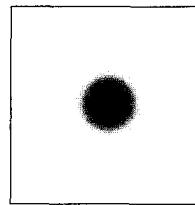


그림 12. 좌표계와 BGA 단면 형상.

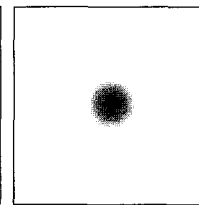
Fig. 12. Coordinate system and slicing shape of BGA.



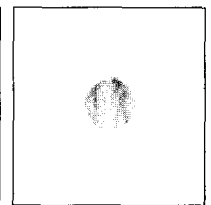
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 13. 정상 BGA 단층 복원 (Z=0.6mm 단면) : (a) 단면 형상, (b) 라미노그래피, (c) 토모신서시스, (d) 반복복원기법.

Fig. 13. Reconstruction for normal BGA in Z=0.6mm plane : (a) original shape, (b) laminography, (c) tomosynthesis, (d) IRT.

름이 0.8mm인 구형이며 납볼의 상하면에 정상적인 납필렛이 존재하는 것과 하면의 필렛이 없는 2가지 종류에 대하여 모의실험 하였다. 이때 납필렛은 납볼과 같은 밀도를 가지는 것으로 가정하였다.

그림 13은 그림 12에 나타난 BGA의 납땜 부위의 단층 영상을 복원한 결과를 나타낸다. 라미노그래피와 토모신서시스는 기본적으로 Z=z인 평면으로 단면복원을 수행하고 반복복원 기법은 Y=y인 평면이 이루는 평면으로 단면을 복원하므로 동일한 표현을 위해 재구성이 필요하다. 이것은 그림 13의 (a)에 표시된 실선의 위치를 초점면으로 하는 것으로서 Z=0.6mm인 단면이다.

그림 14는 하면 납땜이 납볼위로 타고 올라가 제대로 납땜되지 못한 경우(납볼뜸)에 대한 모의 실험 결과로서 이것도 역시 Z=0.6mm인 평면에 대한 복원 영상이다. 그림 13과 14를 비교해보면 알 수 있듯이 라미노그래피와 토모신서시스의 경우 정상과 납볼뜸의 차이가 너무 미소해서 구분이 무척 어렵다. 라미노그래피의 경우 납볼 밑에 존재하는 필렛을 정확히 검사하기가 어렵다는 것은 기존 연구에서 지적된 바와 같고[10] 복원된 형상

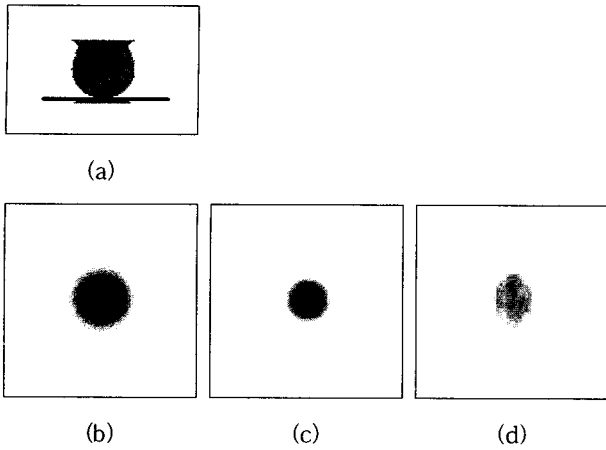


그림 14. 미납 BGA 단층 복원(Z=0.6mm) : (a) 단면 형상, (b) 라미노그래피, (c) 토모신서시스, (d) 반복복원 기법.

Fig. 14. Reconstruction for normal BGA in Z = 0.6mm plane : (a) original shape, (b) laminography, (c) tomosynthesis, (d) IRT.

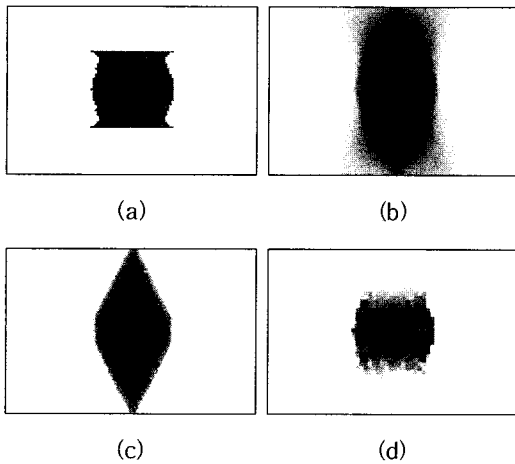


그림 15. 정상 BGA 단층 복원 (Y=0mm 평면) : (a) 단면 형상, (b) 라미노그래피, (c) 토모신서시스, (d) 반복복원기법.

Fig. 15. Reconstruction for normal BGA in Y = 0mm plane : (a) original shape, (b) laminography, (c) tomosynthesis, (d) IRT.

도 앞서의 논문과 매우 유사하여 시뮬레이션의 신뢰성을 검증할 수 있다.

Z방향에 따른 그림자 효과의 분포를 살펴보기 위하여 Y=0인 평면상에 재구성하여 나타내어 보기로 하자. 그림 15에서 보는 바와 같이 라미노그래피의 경우는 납볼의 상하면에 그림자 효과가 매우 심각하게 나타나는 것을 알 수 있다. 토모신서시스는 납볼의 주위에서는 강력한 그림자 효과 제거 기능을 발휘하지만 납볼의 상하면에서는 역시 그림자 효과를 제거할 수 없다. 이것은 어느 방향에서 조사하여도 납볼의 영향을 피할 수 있는 곳이 없음을 의미한다. 이에 비해 반복 복원 기법은 월등한 복원 정밀도로 단면을 복원하는 것을 알 수 있다. 그림 15과 16에서 알 수 있듯이 틈 불량의 차이도 확실하

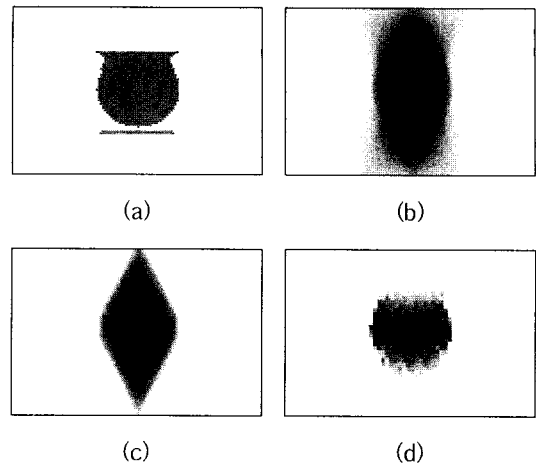


그림 16. 미납 BGA 단층 복원 (Y=0mm 평면) : (a) 단면 형상, (b) 라미노그래피, (c) 토모신서시스, (d) 반복복원기법.

Fig. 16. Reconstruction for insufficient solder BGA in Y = 0mm plane : (a) original shape, (b) laminography, (c) tomosynthesis, (d) IRT.

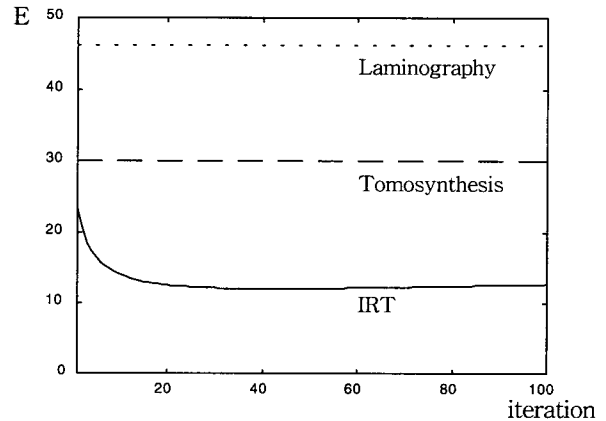


그림 17. 각 알고리즘의 평균 제곱근 오차의 분포. Fig. 17. RMS error for normal BGA.

게 나타난다.

마지막으로 복원된 영상과 원래 모델과의 오차를 다음과 같이 조사하였다.

$$E = \sqrt{\frac{1}{I \times J} \sum_{i,j} (f(i,j) - \hat{f}(i,j))^2} \quad (15)$$

$i=1, \dots, I, j=1, \dots, J$

여기서 $f(i,j)$ 는 모의 실험에 사용된 모델의 밀도 분포 함수이고 $\hat{f}(i,j)$ 는 복원된 영상의 밀도 분포값이다.

그림 17은 그림 13의 (a)에서 주어진 모델에 대하여 3가지의 알고리즘의 복원 오차를 나타내었다. 반복복원에 의한 단면복원은 단지 1번만의 복원으로도 라미노그래피와 토모신서시스보다 우수한 정확도를 나타내며 반복횟수가 증가할수록 오차는 더욱 작아지게 된다.

IV. 결론

본 논문에서는 X선을 이용한 납땜부 형상 복원에 대

해 연구하였다. 투과식 영상 획득법은 부품의 다리나 기판 반대 면의 부품들로 인해 간섭을 받으므로 자동 검사를 위해서는 단면 형상의 정확한 복원이 필요하다. 기존의 라미노그래피나 토모신서시스는 고속으로 단층을 복원할 수 있어 산업용으로 많이 사용되어 왔지만 심각한 그림자 효과로 인해 BGA와 같은 부품을 검사하는데는 여러 가지로 많은 문제를 안고 있었다. 보다 좋은 성능을 나타내는 단층 복원 장치로는 의료용으로 사용되는 기존의 토모그래피 기법이 있다. 이것은 완벽한 단면 복원 성능을 나타내지지만 기판 검사에서 요구되는 분해능을 얻을 수 없었다. 특히 이런 단층 복원 장비들은 복잡하고 특수한 구조로 인해 고가의 시스템을 요구하고 있으므로 여기서는 저렴한 투시 영상 장치를 사용하고 기판을 평행 이동시켜 여러 장의 투시 영상을 얻은 후 반복 복원 기법으로 단층을 복원하는 새로운 방법을 고안하였다. 이 방법의 타당성을 조사하기 위하여 본 논문에서는 기존에 나와 있는 라미노그래피와 토모신서시스의 원리와 반복 복원 기법에 결과를 모의 실험하였다. 다른 연구에서 지적된 바와 같이 그림자 효과가 적은 리드형 부품의 단층 복원에서는 우수한 결과를 나타내던 라미노그래피와 토모신서시스는 그림자 효과가 큰 부품들에서는 역시 많은 문제를 나타내고 있음을 확인할 수 있었다. 모의 실험으로부터 얻어진 복원 영상은 그 특징이 선행 연구된 논문의 결과와 매우 흡사해서 알고리즘의 타당성은 확인할 수 있었다. 그림자 효과를 기판의 수직방향으로 도시하기 위하여 3차원 복원형상을 재구성하여 나타내었으며 예상했던 대로 납 볼의 상하부위에 큰 그림자가 발생하는 것도 확인할 수 있었다. 반복 복원 기법은 10여 회 이상의 복원 후에야 수렴하므로 수렴을 기준으로 한 복원시간은 다른 방법보다 매우 많이 걸린다. 그러나 단지 1번의 복원 결과만으로도 라미노그래피와 토모신서시스 보다 우수한 결과를 나타낸다는 것은 매우 고무적이다. 실시간 검사를 위해서는 비록 수렴된 결과가 아니라 하더라도 단 한번만의 복원으로부터 얻어진 결과를 사용하는 것이 기존의 라미노그래피와 토모신서시스 보다 더 우수하다는 의미이기 때문이다. 또한 여러 개의 X선원과 검출기를 사용하여 동시에 화상을 획득할 경우 복원 시간은 순수하게 연산시간만으로 결정될 것이므로 더욱 효과적이 된다. 참고로 BGA의 한 단면을 복원하는데 걸린 시간은 10회 반복 연산에 약 5초 가량이 소요되었다. 앞으로 고속화를 위해 많은 연구가 이루어지고 연산 장치의 성능이 좋아진다면 진다면 우수한 복원 성능을 가진 반복 복원 기법이 BGA 실시간 검사 장치에도 적용되리라 기대된다.

참고문헌

- [1] R. Rao, Tummala, "Electronic packaging in the 1990's- a perspective from america," *IEEE Trans. on Component, Hybrid and Manufacturing Technology*, vol 14, no. 2, pp. 262-271, Jun., 1991.
- [2] T. Ohsaki, "Electronic packaging in the 1990's- a perspective from asia," *IEEE Trans. Component, Hybrid and Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 254-261, Jun., 1991.
- [3] H. Wessely, O. Fritz, M. Horn, P. Klimke, W. Koschnick and K.-H. Schmidt, "Electronic packaging in the 1990's- a perspective from Europe," *IEEE Trans. Component, Hybrid and Manufacturing Technology*, vol. 14, no. 2, pp. 272-284, Jun., 1991.
- [4] A. J. Rainal, "Performance limits of electrical Interconnections to a high-speed chip," *IEEE Trans. Components, Hybrids and Manufacturing Technology*, vol. 11, no. 3, September, 1989.
- [5] A. A. Jackimcius, R. W. Kelly, and D. J. Svektkoff "A second generation surface mount technology inspection systems using laser scanning techniques," *Proc. of Electronics show and Conveusion*, pp. 10-12, May, 1988.
- [6] Y. Takagi, S. Hata, "Visual inspection machine for solder joints using tiered illumination," *SPIE vol. 1386 Machine Vision Systems Integration In Industry 1990*.
- [7] M. R. Driels, "Automatic defect classification of PWB solder joints," *IEEE Trans. Component, Hybrid, and Manufacturing Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 331-340, June, 1990.
- [8] Y. Hara, H. Doi, K. Karasaki and T. Iida, "A system for PCB automated inspection using fluorescent light," *IEEE Trans. PAMI*, vol. 10, no. 1, pp. 69-77, Jan., 1988.
- [9] Deane et al., IRT Corp., "Using X-ray vision to verify SMD-board quality," *Electronics Test*, pp. 32-35, Feb., 1987.
- [10] S. M. Rooks, B. Benhabib and K. C. Smith, "Development of an inspection process for Ball-Grid-Array technology using scanned beam X ray laminography," *IEEE Trans. Components, Packaging, and Manufacturing Technology-Part A* vol. 18, no. 4, pp. 851-861, Dec., 1995.
- [11] J. A. Adams, "Using cross sectional X-ray techniques for testing ball grid array connections and improving process quality," *Proc. of The Technical Program, NEPCON WEST'94*, vol. 2, pp. 1373-1381.
- [12] Y. Hara, N. Akiyama and K. Karasaki, "Automatic inspection system for printed circuit boards," *IEEE PAMI*, vol. PAMI-5, no. 6, pp. 623-630, Nov., 1983.
- [13] Y. B. Cho and D. G. Gweon, "Axial lamino-graphic system for BGA inspection," *NEPCON WEST* pp. 71-77, 1997.
- [14] J. U. An, Y. B. Cho and D. G. Gweon, "A new method for image separation from overlapped image on the two-layered printed circuit board," *Image and Vision Computing*, vol. 15, pp. 861-866, 1997.

- [15] A. H. Andersen and A. C. Kak, "Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART) : superior implementation of the art algorithm," *Ultrasonic Imaging*, vol. 6, pp. 81-94, 1984.
- [16] G. T. Herman and L. B. Meyer, "Algebraic reconstruction techniques can be made computationally efficient," *IEEE Trans. Medical Imaging*, vol. 12, no. 3. SEPTEMBER, 1993.

- [17] S. Kaczmarz. "Angenaherte auflosung von systemen linearer gleichungen," *Bull. Acad. Polon. Sci. Lett. A.* 35, pp. 355-357, 1937.



조영빈

1968년 8월 15일생. 1991년 2월 한양대학교 정밀기계공학과(학사). 1993년 2월 한국과학기술원 기계공학과(석사). 1999년 2월 한국과학기술원 기계공학과(박사). 1999년 2월-현재 박사후 연수 과정. 관심분야는 실시간 단층촬영 시스템, 3차원 영상처리 및 분산학습 신경회로망.

간 단층촬영 시스템, 3차원 영상처리 및 분산학습 신경회로망.



권대갑

19년 월 일생. 1975년 한양대학교 기계공학과(학사) 1977년 한국과학기술원 기계공학과(석사) 1978년 1월-1982년 8월 부산대학교 부교수 1982년 10월-1987년 4월 독일 Stuttgart 공대 기계공학과(Dr. Ing)

1987년 5월-1989년 2월 한국과학기술원 산업기계연구소(선임연구원) 1989년 3월-현재 한국과학기술원 기계공학과 조교수, 부교수, 정교수. 관심분야는 초정밀 위치 결정 시스템의 설계 및 제어.