Journal of Radiation Industry 9(3) : 137~141(2015)

인쇄회로기판 검사를 위한 단일조사 이중에너지 엑스선 영상기법의 유용성에 관한 연구

김승호[1] · 김동운[1] · 김대천[1] · 김준우[1] · 박지웅[1] · 박은평[1] · 김진우[1] · 김호경[1,*]

[1]부산대학교 기계공학부

Feasibility of Single-Shot Dual-Energy X-ray Imaging Technique for Printed-Circuit Board Inspection

Seung Ho Kim[1], Dong Woon Kim[1], Daecheon Kim[1], Junwoo Kim[1], Ji Woong Park[1], Eunpyeong Park[1], Jinwoo Kim[1] and Ho Kyung Kim[1,*]

[1]*School of Mechanical Engineering, Pusan National University*

Abstract - A single-shot dual-energy x-ray imaging technique has been developed using a sandwich detector by stacking two detectors, in which the front and rear detectors respectively produce relatively lower and higher x-ray energy images. Each detector layer is composed of a phosphor screen coupled with a photodiode array. The front detector layer employs a thinner phosphor screen, whereas the rear detector layer employs a thicker phosphor screen considering the quantum efficiency for x-ray photons with higher energies. We have applied the proposed method into the inspection of printed circuit boards, and obtained dual-energy images with background clutter suppressed. In addition, the single-shot dual-energy method provides sharper-edge images than the conventional radiography because of the unsharp masking effect resulting from the use of different thickness phosphors between the two detector layers. It is promising to use the single-shot dual-energy x-ray imaging for high-resolution nondestructive testing. For the reliable use of the developed method, however, more quantitative analysis is further required in comparisons with the conventional method for various types of printed circuit boards.

Key words : Nondestructive testing, X-ray, Dual-energy imaging, Multilayer detector, PCB

서 론

반도체 회로의 집적도가 증가할수록 전자부품과 인쇄회로기판(PCB, printed-circuit board) 간의 납땜 부위의 수 역시 증가하며, 따라서 BGA(ball grid array)와 같이 납땜 부의 위치가 부품의 아랫면에 위치하는 전자부품 패키지를 주로 이용한다. 생산자동화 기술의 발전에 따라 정밀한 부품 검사가 요구되는 반면, 외관 검사만 가능한 기존의 광학적인 방법으로는 BGA 타입의 전자부품을 포함하는 회로기판의 검사는 불가능하다. X선을 이용할 경우 이러한 외관 검사의 단점을 극복할 수 있다(Neubauer 1997). 그러나, 일반적인 투과 X선 영상에서는 각종 부품들이 인쇄회로기판과 겹쳐서 나타나기 때문에 부품 내부 구조를 비롯한 납땜 부 결함 검사가 힘들 수도 있다.

X선 CT(computed tomography)는 부품들 간의 중첩이 없는 영상을 제공할 수 있다(Chiffre *et al*. 2014). 하지만, CT

* Corresponding author: Ho Kyung Kim, Tel. +82-51-510-3511, Fax. +82-51-518-4613, E-mail. hokyung@pusan.ac.kr

의 경우 360도 방향에 대해 모든 X선 투과 영상을 요구하기 때문에 인쇄회로기판과 같이 얇은 구조물에 대해서는 비실용적이다(Zhou *et al*. 1996; Liu 2012). 이와 같은 문제를 극복하기 위해 laminography (Kim *et al*. 2005) 또는 digital tomosynthesis (Cho *et al*. 2012a, b) 방법이 인쇄회로기판 검사에 활용되고 있다.

비록 CT, laminography 또는 digital tomosynthesis에 비해 가시성이 떨어지지만 추가의 기구학적인 장치 및 운동 없이 중첩된 배경 영상을 줄일 수 있는 이중에너지(dual-energy) X선 영상 기법이 최근 들어 주목을 받고 있다(Alvarez and Macovski 1976; Firsching *et al*. 2011). 특히 이 방법은 물질의 정량적 분석이 가능하기 때문에 더욱 큰 관심을 받고 있다. 일반적으로 이중에너지 기법은 서로 다른 에너지를 이용하여 얻은 2장의 X선 투과 영상 간의 차이를 구하는 기법으로, 배경이 되는 영상 신호를 억제시키고, 반대로 목적하는 물질에 대한 영상 신호를 강조시켜 가시성을 향상시키는 방법이다.

본 연구에서는 "이중조사(double-shot)" 이중에너지 방법을 대신하여 1회의 X선 조사를 통해 이중에너지 기법의 결과를 얻을 수 있는 "단일조사(single-shot)" 이중에너지 기법을 소개하고, 인쇄회로기판 검사로의 가능성에 대해 논하고자 한다. 1회의 X선 조사로 이중에너지 효과를 얻기 위해서는 2대의 X선 영상 검출기의 적층이 필요하며, 이와 같은 구성의 영상 검출기를 다층 검출기(multilayer detector) 또는 샌드위치 영상 검출기(sandwich detector)라 부른다. 앞쪽의 영상 검출기로부터(상대적으로) 낮은 X선 에너지 영상을 획득하고, 뒤쪽의 영상 검출기로부터 높은 X선 에너지 영상을 획득하는 원리를 이용한다. 비록 이중조사 기법에 비해 추가의 영상 검출기가 하나 더 필요하지만, 단일조사이기 때문에 X선관의 가열 부하(heat load)를 줄일 수 있고, 촬영 시간을 절반으로 줄일 수 있는 장점이 있다.

재료 및 방법

1. 이론적 배경

Fig. 1에서 보인 바와 같이 두 영상 검출기를 적층하여 X선 영상을 획득하게 되면 뒤편에 위치한 영상 검출기는 앞쪽 영상 검출기를 통한 X선 빔 경화(beam hardening) 효과에 의해 앞쪽 영상 검출기에 비해 상대적으로 높은 에너지에 대한 영상 신호를 획득하게 된다. X선 스펙트럼 $N(E)$를 다양한 물질(선형감쇠계수 μ_j로 표현) 및 두께 t_j로 구성된 피사체에 조사하였을 때 앞쪽 및 뒤쪽 영상 검출기에서의 신호를 표현하면 각각 다음과 같다(하첨자 F와 R로 구분).

$$d_F = \int_0^\infty N(E)\, e^{-\Sigma_j \mu_j t_j} R_F(E)\, \mathrm{d}E \tag{1}$$

$$d_R = \int_0^\infty N(E)\, e^{-\Sigma_j \mu_j t_j} T(E)\, R_R(E)\, \mathrm{d}E \tag{2}$$

여기서 $R(E)$는 영상 검출기의 응답 함수(spectral response function)를 의미하며, $T(E)$는 앞쪽 영상 검출기 등에 의한 X선 빔 세기의 감쇠를 나타낸다.

위 두 식은 비선형 함수이기 때문에 선형 연산이 불가능하다. 이에 본 연구에서는 두 영상 신호를 다음과 같이 간략하게 가정하였다.

$$d_F \approx N_F\, e^{-\Sigma_j \mu_j t_j} \tag{3}$$

$$d_R \approx N_R\, e^{-\Sigma_j \mu_j t_j} \tag{4}$$

식(3) 및 (4)를 선형 연산이 가능하도록 각각 로그 변환한 후(즉, $p_k = -\ln\left(\frac{d_k}{N_k}\right)$) 다음과 같이 가중치 w를 고려하여 뺄셈 연산을 적용하면 이중에너지 영상을 획득할 수 있다.

$$p_{DE} = p_R - w \times p_F \tag{5}$$

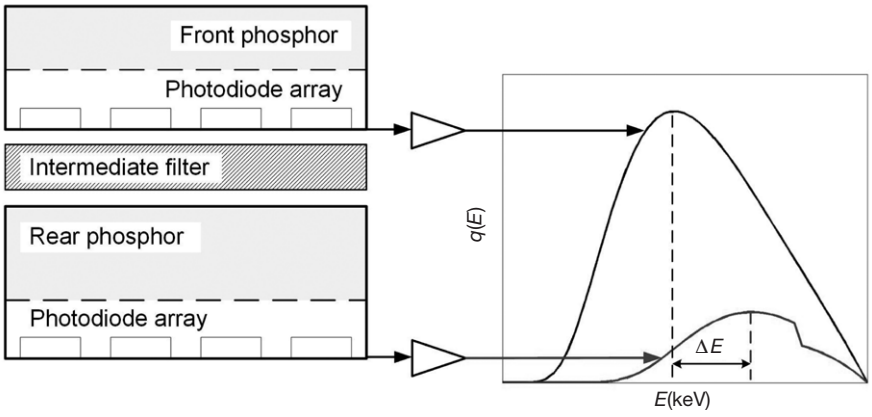

Fig. 1. Sketch describing the operation principle of the sandwich detector. While the front detector generates low-energy-weighted image signal, the rear detector generates high-energy-weighted image signal. ΔE denotes the energy difference between the two measured x-ray spectra from the front and rear detector layers.

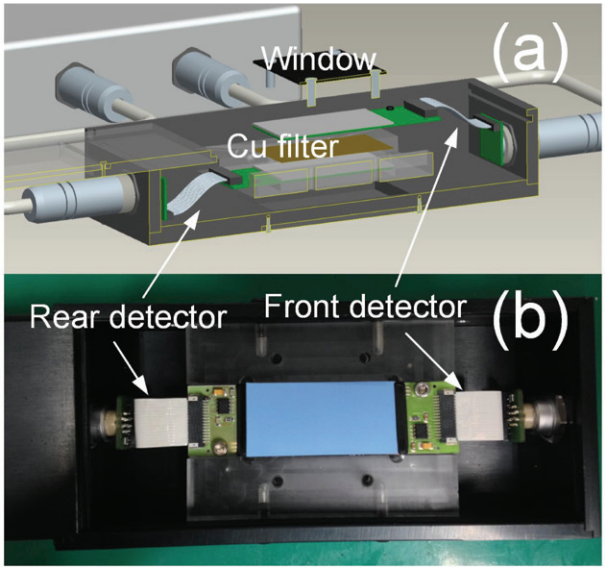

Fig. 2. Design and realization of the sandwich detector. (a) A CAD drawing and (b) a picture describing the developed sandwich detector.

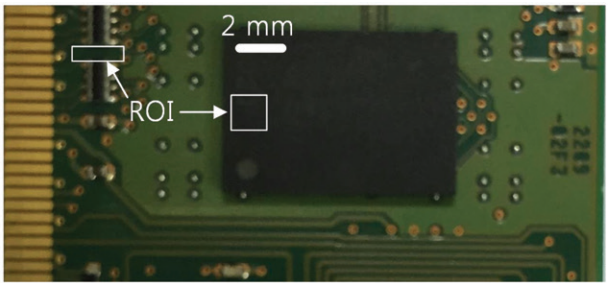

Fig. 3. A picture showing a phantom used for single-shot dual-energy imaging. The phantom is the PCB with memory chip packages.

2. 샌드위치 검출기의 제작

본 연구에서는 미국의 Carestream 사의 Gd_2O_2S:Tb 기반의 형광스크린과 Teledyne Rad-icon Imaging 사의 포토다이오드 어레이를 이용하여 영상 검출기를 제작하였다. X선 빔의 감쇠 및 검출 효율을 고려하여 앞쪽에는 얇은 형광스크린(~34 mg cm^{-2})을, 그리고 뒤쪽에는 상대적으로 두꺼운 형광스크린(~67 mg cm^{-2})을 사용하였다. 영상 검출기의 픽셀의 크기는 0.048 mm이며, 영상 면적은 25×50 mm^2이다. Fig. 2에 개발한 샌드위치 영상 검출기의 CAD 드로잉 및 실제 제작된 사진을 나타내었다.

3. 실험

단일조사 이중에너지 영상기법의 가능성 확인을 위해 개발한 샌드위치 영상 검출기를 이용하여 Fig. 3에 보인 바와 같이 메모리 칩을 실장한 인쇄회로기판에 대한 영상을 획득하였다. 메모리 칩 뒤편에 숨겨진 부위를 강조하기 위해 Fig. 3에 나타낸 두 영역에서의 신호 차이가 최소가 되도록 식(5)를 반복 계산하여 가중치 w를 결정한 후 이를 고려하여 이중에너지 영상을 구하였다. Fig. 4는 실험 장치를 보여주며, 영상획득을 위해 X선 관전압은 50 kVp 그리고 관전류는 0.9 mA를 인가하였다.

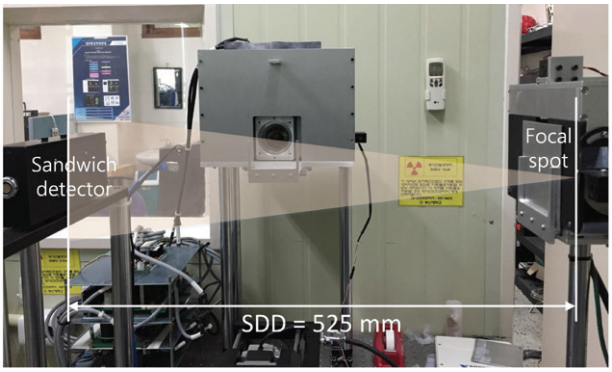

Fig. 4. A picture showing the experimental setup.

결 과

샌드위치 영상 검출기를 구성하는 각 층의 검출기로부터 샘플 인쇄회로기판에 대해 얻은 영상을 Fig. 5(a)와 5(b)에 각각 나타내었다. 얇은 형광스크린을 채택하고 있는 앞쪽 영상 검출기에서 얻은 영상이 두꺼운 형광스크린을 사용하는 뒤쪽 영상 검출기에 비해 훨씬 선명함을 알 수 있다. 더불어 뒤쪽 영상 검출기에서 얻은 영상을 살펴 볼 때 양자잡음(quantum noise 또는 quantum mottle)이 거의 관찰되지 않는 것으로 보아 충분한 양의 X선 양자가 뒤쪽 영상 검출기에 측정되는 것으로 판단된다. 한 가지 더 주목할 점은 메모리 칩의 그림자가 Fig. 5(a)와 5(b)에 보이는 것을 알 수 있으며, 따라서 영상의 contrast를 떨어뜨리고 있다는 사실이다.

메모리 칩의 그림자가 억제된 이중에너지 영상을 구하기 위해 Fig. 3에 표시한 두 영역의 평균 신호 차이가 최소가 되도록 식(5)의 w를 바꾸어 가며 계산하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. w가 증가할수록 신호의 차이가 감소하다가 최소값을 보인 후 다시 증가하는 결과를 보였으며, 신호 차이의 최소값에서의 w 값인 0.99를 이중에너지 영상을 구하기 위한 가중치로 결정하였다.

결정한 가중치 w를 이용하여 구한 이중에너지 영상을 Fig. 5(c)에 나타내었으며, Fig. 5(a) 및 5(b)와 비교하였을 때 메모리 칩의 그림자가 효과적으로 제거되었음을 알 수 있

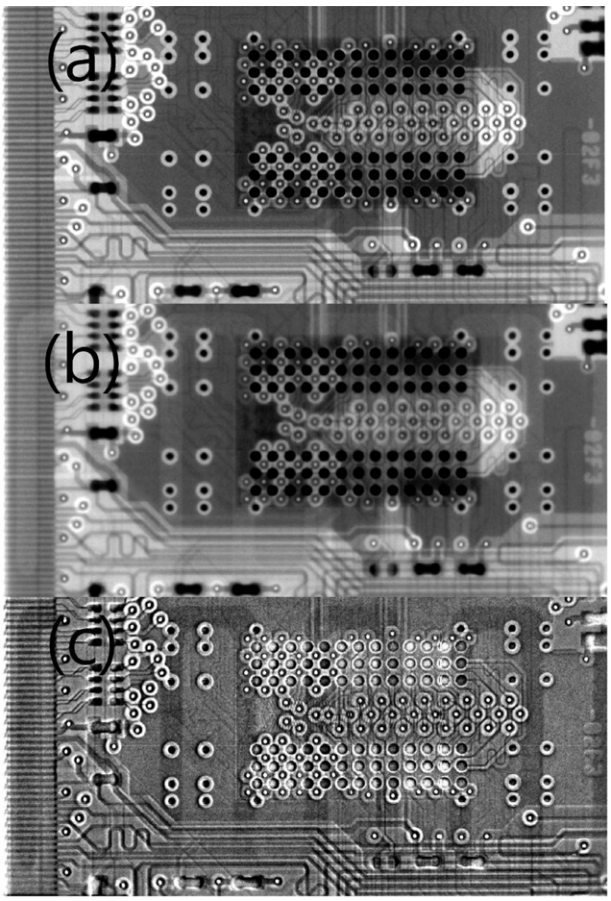

Fig. 5. Projection images obtained from (a) the front and (b) rear detectors for a single-shot x-ray exposure. The resultant dual-energy image is shown in (c).

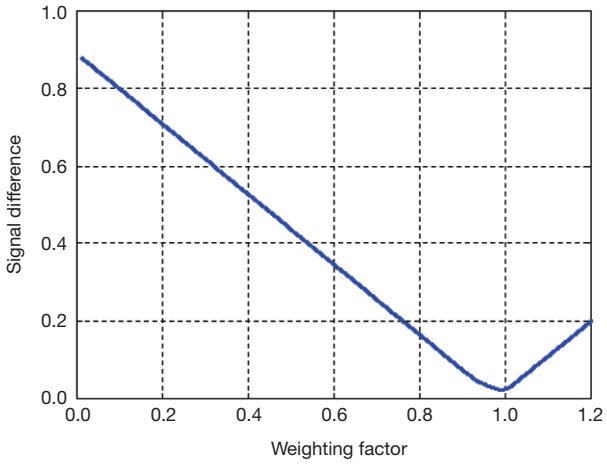

Fig. 6. Signal difference between two regions of interest, which are designated in Fig. 3, as a function of weighting factor.

다. Fig. 5(c)의 결과 영상에서 주목할 점은 영상 전반에 걸쳐 윤곽선 등이 강조되어 영상의 sharpness가 향상되었다는 것이다. 두 영상 검출기에서 사용하고 있는 형광스크린의 두께가 서로 다르기 때문에 공간해상도 능력이 다르며, 이렇게 얻어진 두 영상 간의 차이를 이중에너지 영상에서 활용하고 있기 때문에 디지털 영상처리에서 널리 알려져 있는 unsharp masking과 비슷한 효과가 적용되기 때문으로 풀이된다.

고 찰

샘플 인쇄회로기판에 대한 단일조사 이중에너지 영상화 기법의 가능성을 살펴보았다. 본 연구에서는 결과 영상들에 대해 육안으로만 판단하였으나, 제안한 방법의 장단점을 확실히 규명하기 위해서는 정량적인 지표의 정의와 기존 방법과의 비교가 필요할 것이다. 더불어 더 다양하고 많은 샘플 영상에 대한 분석이 이루어져야 할 것이다.

샌드위치 구조 내 두 영상 검출기 간의 평균 에너지 차이가 클수록 배경 영상의 억제 정도가 클 것으로 예상되기 때문에 Fig. 1 및 2(a)에서 나타낸 바와 같이 두 영상 검출기 사이에 금속판을 삽입하여 X선 빔 경화를 증가시키는 것도 하나의 방법이 될 것이다. 다만, X선 빔의 감쇠가 증가할 수록 뒤쪽 영상 검출기에 도달하는 X선 양자수가 줄기 때문에 양자 잡음이 증가할 수 있다. 따라서 금속판의 종류 및 두께의 최적화 연구 또한 필요할 것이다.

결 론

두 영상 검출기를 앞뒤로 붙여 샌드위치 구조로 만든 후 앞쪽에서는 상대적으로 낮은 X선 에너지, 그리고 뒤쪽에서는 상대적으로 높은 X선 에너지의 영상 신호를 획득한 후 가중치를 고려한 로그 변환 뺄셈 연산을 적용하여 관심 없는 배경물질 영상 신호를 억제하고, 관심 있는 물질에 대한 영상 신호를 강조하는 단일조사 이중에너지 기법을 개발하였다. 이 기법의 비파괴 검사로의 활용 가능성 타진을 위해 본 연구에서 개발한 샌드위치 영상 검출기를 이용하여 인쇄회로기판에 대한 이중에너지 영상을 획득하였으며, 전자부품에 의해 가려진 영역을 복원할 수 있었다. 무엇보다 두 영상 검출기 간의 공간해상도 차이에 의한 unsharp masking 효과로 인해 기존 투과 영상에 비해 sharpness가 향상된 영상을 얻을 수 있었다. 샌드위치 영상 검출기를 이용한 단일조사 이중에너지 기법은 높은 공간해상도를 요구하는 비파괴 검사에 적합할 것으로 예상되며, CT 또는 digital tomosynthesis로도 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

사 사

이 논문은 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2013M2A2A9046313; No. 2014R1A2A2A01004416).

참 고 문 헌

Alvarez RE and Macovski A. 1976. Energy-selective reconstructions in x-ray computerized tomography. *Phys. Med. Biol.* **21**(5):733-744.

Cho MK, Youn H, Jang SY and Kim HK. 2012a. Cone-beam digital tomosynthesis for thin slab objects. *NDT&E Int.* **47**:171-176.

Cho MK, Youn H, Jang SY, Lee S, Han M-C and Kim HK. 2012b. Digital tomosynthesis in cone-beam geometry for industrial applications: Feasibility and preliminary study. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* **13**(9):1533-1538.

De Chiffre L, Carmignato S, Kruth J-P, Schmitt R and Weckenmann A. 2014. Industrial applications of computed tomography. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* **63**(2):655-677.

Firsching M, Nachtrab F, Uhlmann N and Hanke R. 2011. Multi-energy x-ray imaging as quantitative method for materials characterization. *Adv. Mater.* **23**(22-23):2655-2656.

Kim HK, Ahn JK and Cho G. 2005. Development of a lens-coupled CMOS detector for an x-ray inspection system. Nucl. Instrum. *Methods Phys. Res. A.* **545**(1-2):210-216.

Liu T. 2012. Cone-beam CT reconstruction for planar object. *NDT&E Int.* **45**(1):9-15.

Neubauer C. 1997. Intelligent x-ray inspection for quality control of solder joints. *IEEE Trans. Compon. Packag. Manuf. Technol. Part C.* **20**(2):111-120.

Zhou J, Maisl M, Reiter H and Arnold W. 1996. Computed laminography for materials testing. *Appl. Phys. Lett.* **68**(24): 3500-3502.

Received: 11 August 2015
Revised: 20 August 2015
Revision accepted: 25 August 2015