Journal of Radiation Industry 9(3) : 153~159(2015)

PCB 비파괴 검사에 있어서 단일 에너지 소스와 이중 에너지 소스의 영상비교를 위한 엑스선 스펙트럼 분석

김명수[1] · 김기윤[1] · 이민주[1] · 강동욱[1] · 이대희[1] · 박경진[1]
김예원[1] · 김찬규[1] · 김형택[1] · 조규성[1,*]

[1]한국과학기술원 원자력 및 양자 공학과

Energy Spectrum Analysis between Single and Dual Energy Source X-ray Imaging for PCB Non-destructive Test

Myungsoo Kim[1], Giyoon Kim[1], Minju Lee[1], Dong-uk Kang[1], Daehee Lee[1], Kyeongjin Park[1], Yewon Kim[1], Chankyu Kim[1], Hyoungtaek Kim[1] and Gyuseong Cho[1,*]

[1]*Department of Nuclear & Quantum Engineering, KAIST, Daejeon, Korea*

Abstract - Reliability of printed circuit board (PCB), which is based on high integrated circuit technology, is having been important because of development of electric and self-driving car. In order to answer these demand, automated X-ray inspection (AXI) is best solution for PCB non-destructive test. PCB is consist of plastic, copper, and, lead, which have low to high Z-number materials. By using dual energy X-ray imaging, these materials can be inspected accurately and efficiently. Dual energy X-ray imaging, that have the advantage of separating materials, however, need some solution such as energy separation method and enhancing efficiency because PCB has materials that has wide range of Z-number. In this work, we found out several things by analysis of X-ray energy spectrum. Separating between lead and combination of plastic and copper is only possible with energy range not dose. On the other hand, separating between plastic and copper is only with dose not energy range. Moreover the copper filter of high energy part of dual X-ray imaging and 50 kVp of low energy part of dual X-ray imaging is best for efficiency.

Key words : NDT, Dual energy X-ray, Energy spectrum

서 론

제품 수율 향상 및 기업 신뢰도 향상은 현존하는 기업들의 경쟁력 평가 기준의 중요한 요소이다. 최근의 자동차 업계에서는 기계적 요소 못지 않게 많은 전자부품들이 들어가고 2014년 도요타의 급발진 사고를 시발점으로 하여 자동차 내부에 사용되는 많은 컨트롤러의 결함 가능성을 인정하였고, 이러한 컨트롤러의 대부분은 반도체 공정을 이용한 칩과 Printed Circuit Board (PCB)를 이용한 회로기판을 사용한다. 또한 최근 자동차 시장에서 가장 큰 화두는 자율주행과 전기 자동차에 대한 내용이고 이는 곧 앞서 언급한 PCB의 신뢰성과 안정성이 매우 중요함을 시사한다(전 등 2015)[1)].

PCB의 안정성 및 신뢰성을 높이기 위해 크게 세 가지 방법의 검수(Inspection)방법이 존재한다. 첫째는 가시광을 이

* Corresponding author: Gyuseong Cho, Tel. +82-42-350-3821, Fax. +82-42-350-5861, E-mail. gscho@kaist.ac.kr

용하여 표면에 존재하는 다양한 문제점을 분석하는 방법이고(Automated optical inspection, AOI), 둘째는 엑스선을 이용하여 투과된 영상을 이용한 방법이며(Automated X-ray inspection, AXI), 셋째는 전기 회로적인 분석을 이용하여 테스트를 진행하는 방법이다(In Circuit Test, ICT). AOI와 ICT는 회로의 도선 연결 불량(Open Circuit), 땜납 형성 불량(Solder Bridges, Solder Shorts, In sufficient Solder), 소자 접합 불량(Missing component, Misaligned component), 소자성능 불량(Incorrect component value, Faulty component) 등의 문제점을 분석하기에 용의하나 땜납내 기포(Solder void), 적정 땜납 비율(Solder quality), Ball Grid Array 형성 불량(BGA Short, BGA open, BGA crack) 등 부분에 대해서는 확인이 어려우며 이는 AXI에 의존적이다(문 등 2006; 이 등 2006; Poole *et al*. 2014)[2].

PCB의 제작에는 크게 3가지 물질이 사용된다. 낮은 Z 번호를 갖는 Polyimide와 중간 Z 번호를 갖는 Copper와 높은 Z 번호를 갖는 Solder이다. Solder는 크게 Sn과 Pb의 혼합으로 구성되며, 혼합비율에 따라서 사용되는 부분이 다르다. Table 1에 PCB 제작 시 사용되는 물질들과 주요 두께 정보를 정리하였다.

과거에는 제작된 Ball Grid Array, Chip Scale Package에 사용되는 Ball 혹은 Bump의 결함을 찾아내거나 Quad Flat Package 사용 시 납 균일성을 평가하는 용도로 AXI가 사용되었지만, 최근에 들어서 이 부분 뿐만 아니라 PCB 조립 시 사용하는 에폭시 보이드나 Twisted and Bow를 검사 및 Full alignment 등을 진행할 때 PCB에서 Low Z material에 해당하는 정보가 중요하다. 따라서 낮은 Z 물질 영상정보로 부터 높은 Z 물질 영상정보까지 넓은 범위의 에너지 스펙트럼을 표현할 수 있는 두 개의 에너지 소스와 에너지 구분 영상을 취득할 수 있는 장치에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 비파괴 검사 분야에서는 공항에서 엑스선 화물 검사에 컬러 엑스선 영상의 형태로 에너지 구분 영상 취득 장치를 사용하고 있으며 의료분야에서도 에너지 구분영상을 통해 인체의 뼈 부분과 장기 부분을 명확히 구분할 수 있도록 하기 위한 연구가 계속되고 있다(Macdonald 2001; Kim *et al*. 2007; Yun *et al*. 2014).

두개의 에너지 소스와 에너지 구분 영상 취득 장치를 이용하는 경우 영상의 품질은 에너지 분별력이 얼마나 뛰어나는가 하는 부분이 큰 영향을 미치게 되는데 대부분의 장치에서 높은 에너지 발생원 혹은 취득 장치의 앞 뒤쪽에 구리를 이용한 필터를 적용한다. 구리는 대략 50 keV의 에너지를 막아주는 기능을 갖기 때문에 100 keV 근방의 최대 에너지 소스를 이용하는 의료나 비파괴 검사 분야에서 필터로 많이 사용된다(Rebuffel *et al*. 2007; Shepherd *et al*. 2010; Han *et al*. 2014).

본 연구에서는 효율적인 두개의 에너지를 갖는 엑스선 이미징을 얻어내기 위해 단일 엑스선 소스와 두개의 엑스선 소스가 PCB를 거친 후 영상 계측장치로 들어갈 때 어떤 에너지 스펙트럼을 갖는지 측정하고 분석함으로써 AXI 영상 취득에 있어서 효율성을 높이고자 한다.

재료 및 방법

본 연구에서는 두 개의 에너지를 갖는 엑스선 이미지와 단일 에너지의 엑스선 이미지에 사용되는 엑스선 소스의 에너지 스펙트럼 분석을 통해 효율성을 분석하고자 한다. 따라서 Fig. 1에서와 같이 각 엑스선 소스에서 출력된 광자의 에너지 스펙트럼과 PCB 물질을 지난 후의 에너지 스펙트럼을 취득 및 분석하고자 한다.

사용되는 PCB는 4층 기판을 기준으로 실험을 진행하였으며 앞서 언급된 바와 같이 관련 내용을 Table 2에 정리하였다. 납의 경우 실제 사용되는 땜납의 밀도를 고려하여 보유 중인 납 팬텀의 두께를 반영하였다. 필요에 따라서 와이어 본딩에 사용되는 금에 대한 물질 분석도 진행하려 하였으나 크기가 매우 작고 사용되는 가장 높은 Z 물질인 납을 기준으로 분석함으로써 분석 대상에서 제외하였다. 실제 측정은 3가지 소스의 종류와 5가지의 피사체 종류에 대해 진

Table 1. Kinds of Materials and thicknesses for consisting PCB

	Polyimide $C_6H_2(C_2O_3)_2$	Copper 13 Al	Solder 50 Sn, 82 Pb	Aluminum 13 Al	Gold Au 79
Thickness	1.8~4 mm	0.035 mm	0.5 mm~	0.05 mm~	0.03~1 mm
4 Layers PCB	2.2 mm	1.3 mm	0.8 mm (11.4 g cm^{-3})		

[1] 전승원. 2015. 산업용 X-ray 검사기술의 이해,
http://www.hellot.net/new_hellot/search/search_magazine_read.html?code=202&sub=002&idx=22753&page=1&search_keyfield=all&search_keyword=%EA%B2%80%EC%82%AC%EA%B8%B0%EC%88%A0

[2] Ian Poole. 2014. Automated X-Ray Inspection AXI for PCB & BGA
- key essentials about automated X-ray inspection, AXI, systems used for inspection PCB printed circuit board assemblies and especially ones with BGA ICs. http://www.radio-electronics.com/info/t_and_m/ate/automated-x-ray-inspection-pcb-bga.php

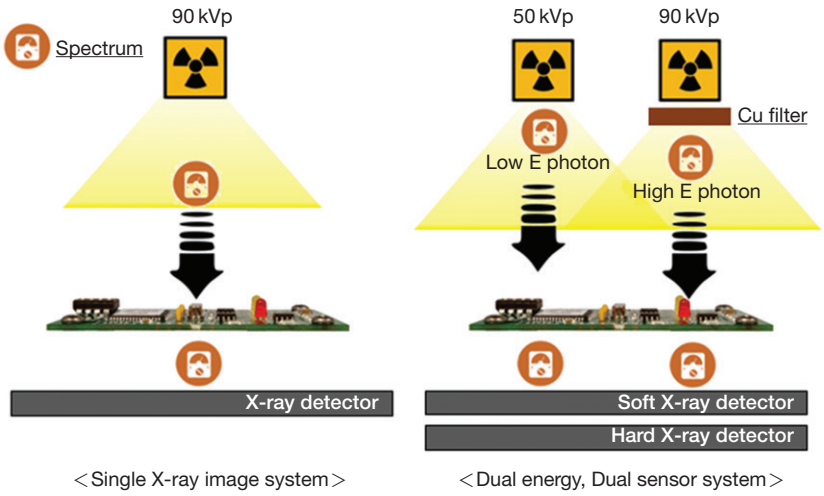


Fig. 1. System diagram for energy spectrum acquisition.

Table 2. X-ray generator and targets for energy spectrum analysis

Source specification	Single energy	No filter	90 kVp	7 μA 120 sec
	Dual energy	Cu 1 mm	90 kVp	20 μA 120 sec
		No filter	30 kVp	7 μA 120 sec
Target specification	Plastic (Polyimide)			2.2 mm
	Copper			1.3 mm
	Plastic + Copper			3.5 mm
	Lead			0.8 mm
	Plastic + Copper + Lead			4.3 mm

행되었다. 소스와 피사체에 대한 정보는 Table 2에 정리하였다.

엑스선 소스는 NDT용으로 많이 사용되는 Thermo Scientific사의 PXS5-927모델을 사용하였다. 이 소스는 최대 90 kVp의 관전압을 가지며 최소 Focal spot이 5 μm 이하로서 1~3 μm의 물체 구분력을 갖는 해상도를 갖는다. 두 개의 에너지 소스를 이용하는 경우 높은 에너지 소스원에는 낮은 에너지의 광자를 걸러내기 위한 필터로서 구리를 사용하였다. 실험의 용의한 측정 및 비교를 위해 1 mm의 두께를 사용하였는데, 실제 비파괴 검사에 사용되어 높은 Flux를 적용하는 경우 5 mm 이상의 두께를 사용한다.

에너지 스펙트럼을 얻기 위해 AMPTEK 사의 X-123 CdTe 제품을 이용하였다. 사용된 계측 물질은 25 mm^2의 크기를 갖는 Single crystal이고 두께는 1 mm로서 대략 150 keV까지 측정이 가능하고 최대 1.2 keV의 FWHM 해상도를 갖는 스펙트럼 측정이 가능하다. 최대 Count rate는 2×10^5 cps로서 엑스선 발생장치에서 나오는 광자를 모두 읽어내기에는 한계가 있기 때문에 400 μm의 크기를 갖는 Pin hole type filter를 사용하여 광량을 줄여 측정하였다. 그럼에도 불구하고 측정 총량 기준 0.5% 이내의 pile-up 현상이 발생하였지만 신호 왜곡의 가능성을 배제하기 위해 프로그램적인 보상은 해주지 않았다. 측정되는 신호는 Cobalt 57과 Americium 241 두 개의 디스크 방사선원을 이용하여 3개의 에너지 포인트를 이용한 Linear Energy Fitting 방법을 적용하였다. 고에너지 광자가 입사 도중 측면의 다른 물질에 영향을 받아 왜곡되는 문제를 방지하기 위해 레이저를 이용하여 소스와 검출기를 정렬하였다.

측정되는 값은 직진성을 갖는 엑스선이 400 μm의 직경을 갖는 구멍을 통해 단일 신호로 전환 되기 때문에 실제로는 대략 0.127 mm^2의 면적의 크기를 갖는 픽셀에 들어오는 광자의 개수로 정의할 수 있으며 이는 350 μm pitch의 픽셀에 들어오는 광자수로 볼 수 있다. 즉, 측정되는 Y축의 값이 개략적인 광자의 개수와 유사하며 엑스선 소스의 형태나 종류가 달라지더라도 그 값의 비교가 가능하다.

입사된 엑스선이 신호에 기여하기 위해서는 직접 변환 혹은 섬광체를 통한 간접 변환을 해야 하는데, 이때 입사되는 엑스선의 Dose량에 그 신호의 크기가 비례하며 Dose는 수식 1과 같이 정의할 수 있다.

$$\text{Dose} = \int_{E=0}^{E=\text{High kV}} (\text{Number of photons}) \cdot (\text{Energy})\, dE \qquad (1)$$

결 과

Fig. 2는 전체 엑스선 소스 에너지 스펙트럼을 보여준다. 10 keV 미만에서 2개의 Peak이 발생하는데, 이는 사용된 엑스선 소스 내부에 있는 Cu Filter 때문이다. 10 keV 미만의 광자는 에너지도 작고 투과력도 작기 때문에 대부분 피사체에 흡수되어 섬광체를 이용하는 장치에서는 영상에 큰 영향을 미지치 않는다.

알려진 바와 같이 90 keV의 엑스선을 사용하는 경우 최대 90 keV의 에너지를 갖는 스펙트럼을 얻을 수 있다(Fig. 3-

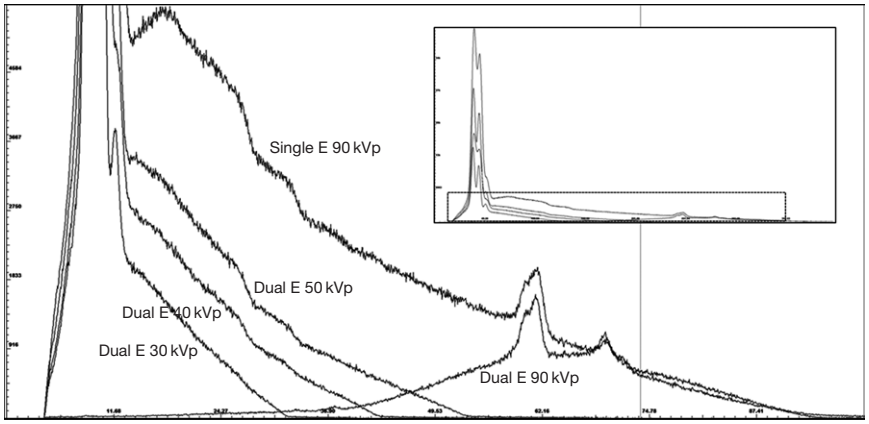


Fig. 2. Results of energy specturms: Single energy source and Dual energy source.

Table 3. Comparing doses for high energy source of dual energy by each target materials

90 kVp filtered by copper	Plastic + Copper	Lead	Plastic + Copper + Lead
Sum of passed energy (AU)	21.84	1.12	1

(a)). PCB의 플라스틱을 지난 후의 스펙트럼(Fig. 3-(b))와 구리도선을 지난 후의 스펙트럼(Fig. 3-(c))을 보면 전체 에너지에 대해 서로 다른 비율로 감쇠가 일어남을 확인할 수 있다. 특히 40 keV보다 낮은 에너지 영역의 경우 많은 엑스선 광자가 물질에 흡수되어 영상에는 반영되지 않음을 확인할 수 있다. 일반적으로 의료분야에서는 환자의 피폭선량을 관리하기 위해 알루미늄 등을 이용한 낮은 에너지 대역의 광자를 걸러내기도 하지만 본 연구의 분야인 비파괴 검사에서는 필터를 적용하지 않는다. 피사체인 구리를 지난 후의 스펙트럼의 경우 엑스선 소스의 경우와 같이 10 keV보다 낮은 에너지에서 Peak을 가지며 이는 앞서 언급한 바와 같이 구리의 물질 특성으로 볼 수 있다. 특이한 점은 PCB의 플라스틱 부분과 구리부분이 10 keV보다 낮은 부분을 제외하고 거의 유사한 비율의 스펙트럼을 갖는다는 점이다. 이는 두 개의 물질을 엑스선 영상으로 비교할 경우 단순히 에너지를 구분함으로서는 두 개의 물질을 구분하기가 용의하지 않을 것임을 의미한다. 플라스틱과 구리부분을 모두 지난 경우의 스펙트럼(Fig. 3-(d))의 경우 앞선 두 스펙트럼의 결과가 반영된 결과를 보여줌을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 두개의 에너지소스(구리 필터가 적용된 90 kVp, 50 kVp)의 스펙트럼과 플라스틱과 구리를 각각 및 둘 다 통과한 후 스펙트럼을 보여준다. 앞서 Fig. 2에서의 분석과 같이 50 kVp의 스펙트럼에서는 플라스틱과 구리에 의한 흡수가 많이 발생하는 데 반해 구리 필터가 적용된 90 kVp의 경우 약간의 흡수가 되지만 그 양이 영상에 크게 반영될 만큼 크지 않다.

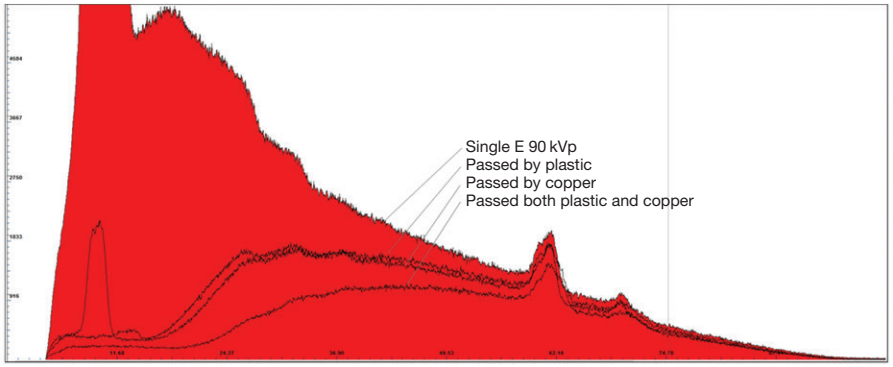
납을 지난 후의 에너지 스펙트럼(Fig. 5)을 보면 대부분의 정보는 50 keV 이상에서 발생하고 있다. 그리고 30, 40, 50 keV의 에너지의 엑스레이 소스를 사용한 납을 투과한 에너지 스펙트럼에서는 어떠한 신호도 취득되지 않았다. 따라서 두 개의 에너지 소스를 이용하여 영상 취득 시 납에 의한 정보는 대부분 고에너지용 센서에서 취득될 것으로 보인다.

구리필터가 적용된 90 kVp 엑스레이 소스를 이용하여 취득된 플라스틱과 구리를 투과한 에너지량과 납을 투과한 에너지량을 비교하면 Table 3과 같이 대략 20배의 에너지 차이가 난다. PCB 제작 시 대부분의 납땜이 되는 부분에 구리와 플라스틱이 동시에 존재한다. 따라서 납땜이 되는 부분과 되지 않는 부분의 광량의 차이가 대략 20배가 나게 된다. 즉, 납이 있는 부분이 납이 없는 부분에 비해 20배 가량 어두워지기 때문에 납의 두께나 납 내부에 존재하는 문제점을 분석하기 위해서는 더 높은 Dose의 엑스선을 쬐어주어야 하는데 이렇게 되면 플라스틱과 구리의 영상정보는 대부분 사라지게 된다. 따라서 단일 에너지의 단일 센서를 이용하는 경우 납의 정보를 명확하게 보려는 경우 플라스틱과 구리의 영상정보가 소실되는 문제점이 발생한다.

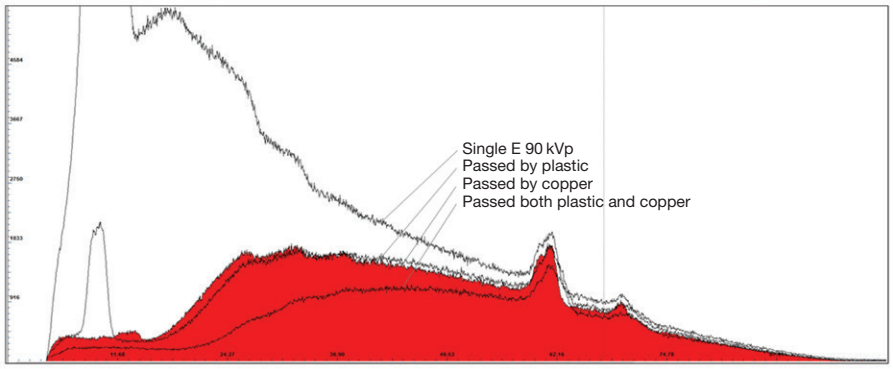
두 개의 엑스선 소스를 이용하는 경우 낮은 소스의 에너지를 어떤 것으로 하는 것이 효율적인지에 대해 플라스틱과 구리에 대해서 입력 Dose 대비 투과 Dose 비율을 비교해 본 결과 50 keV는 13%, 40 keV는 7%, 30 keV는 2%로서 50 keV 소스를 이용하는 경우 효율이 가장 높음을 확인할 수 있었다.

고 찰

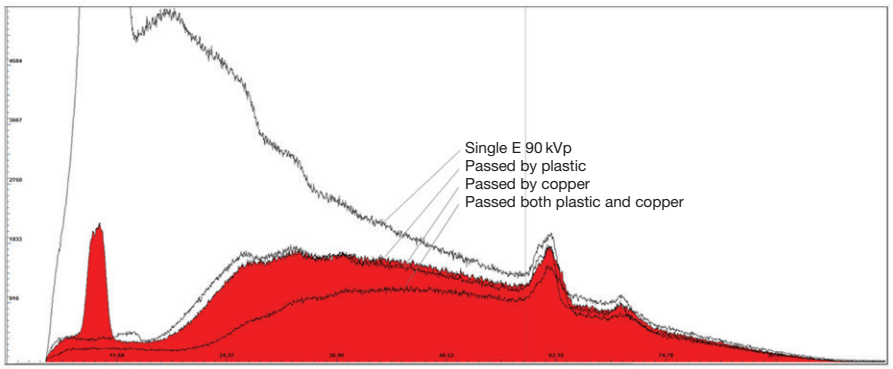
PCB를 구성하는 물질 중 가장 많은 부분을 차지하는 구리와 플라스틱 부분의 경우 물질의 구성이 서로 상이함에도



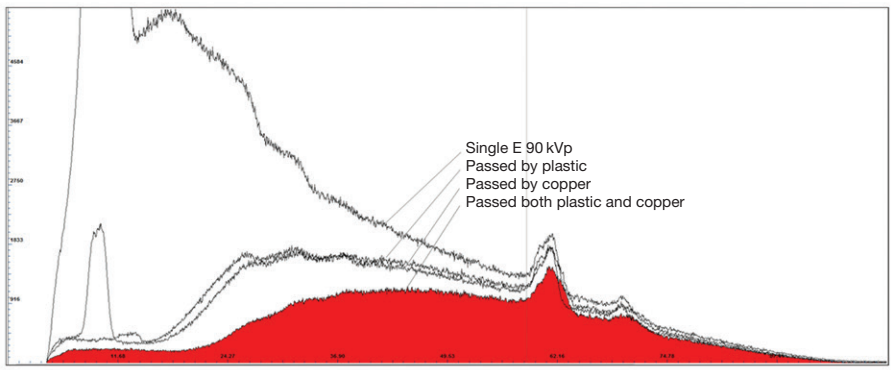
(a) Energy spectrum after single energy source (90kVp)



(b) Energy spectrum after plastic



(c) Energy spectrum after copper



(d) Energy spectrum after plastic and copper

Fig. 3. Energy spectrums of each PCB parts by single energy source.

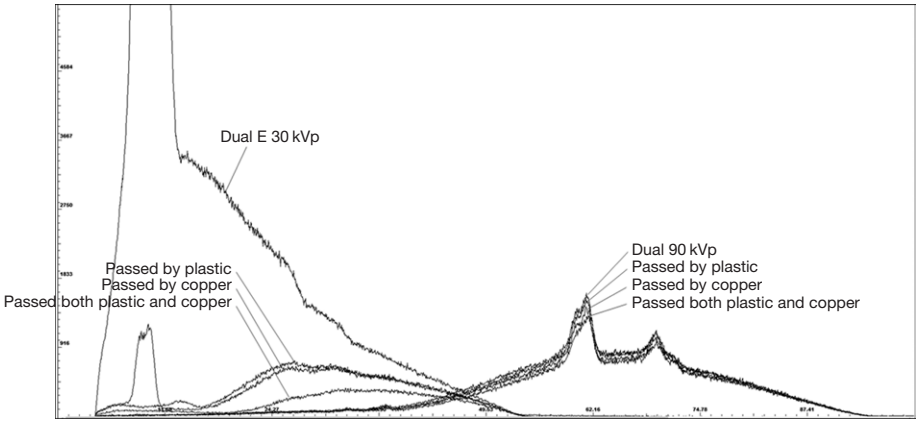


Fig. 4. Energy spectrum of each PCB parts by dual energy source.

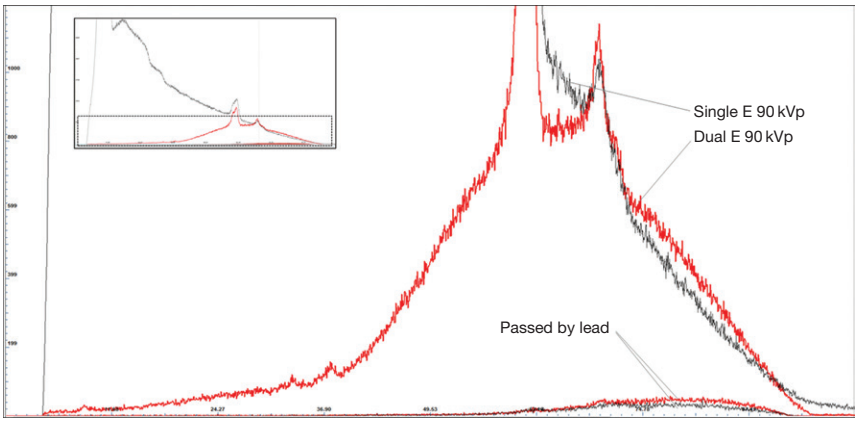


Fig. 5. Energy spectrum after lead.

불구하고 엑스선이 투과하는 정도는 실험적 유의 범위 내에서 거의 유사함을 보여준다. 이는 실질적으로 단일 에너지를 이용하는 경우나 두 개의 에너지를 이용하는 경우에 크게 관계없이 PCB에 있어서 구리와 플라스틱의 구분 능력은 크게 차이가 나지 않을 것으로 판단된다. 하지만 비교적 높은 Z 물질인 납의 경우 물질을 거친 후의 영상 정보가 미미하기 때문에 단일 에너지를 이용한 영상의 경우 Dose량을 적절히 조정하더라도 플라스틱 부분과 납을 동시에 판별하기는 힘들다. 반면에 두 개의 에너지를 이용하는 경우 낮은 에너지와 높은 에너지의 Dose량을 적절히 조정함으로써 납 부분과 나머지 부분에 대한 구분을 명확하게 할 뿐 아니라 각각의 물질에 대한 두께 차이를 명확히 할 수 있음으로서 PCB 회로 불량과 땜납 형성 불량을 한 장의 영상으로 구분할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 4의 결과를 보면 구리 필터를 사용하는 경우와 아닌 경우에 대한 에너지별 엑스선 포톤 입사율이 크게 차이난다. 실질적으로 섬광체에 피사체를 통과한 엑스선 입자가 들어오는 경우 스펙트럼에서 보여주는 입자의 양도 중요하지만 그 에너지도 발광하는 데 있어 큰 영향을 미친다. 따라서 단순히 Dose를 조절하는 것 뿐만 아니라 에너지 민감도가 많이 차이나는 저에너지용 센서와 고에너지용 센서를 적절히 사용해야만 두 개의 에너지 소스를 이용하여 영상을 만드는 데 있어서의 효율이 발생할 것으로 보인다.

에너지 구분을 크게 가지는 측면에서는 구리 필터가 큰 역할을 하지만 실질적인 효율성 측면에서는 두께나 밀도 등의 측면에서의 필터 재설계가 필요하다. 그리고 에너지 측면에서도 구리 필터를 사용하는 경우 50 keV를 기준으로 에너지 구분을 하는 것이 가장 효율적이다. 정확한 에너지 구분이 가능해 진다면 물질 자체에 대한 구분해능을 가질 수 있기 때문에 컬러 엑스선 영상 등을 작성하는 데 있어서 높은 효율성을 가질 수 있다.

결 론

본 연구에서는 단일 에너지의 엑스선 영상 취득 장치와

두 개의 에너지를 갖는 영상 취득 장치의 영상 품질에 있어서 발생장치에서 방출되는 엑스선의 에너지 스펙트럼을 분석함으로써 PCB의 비파괴 검사에 있어서 각각 방식의 문제점과 효율성을 높일 수 있는 방법을 찾고자 하였다. 결과적으로 단일 에너지를 이용한 방식에 비해 두 개의 에너지를 갖는 방식이 더 넓은 에너지 스펙트럼에 대한 정보를 포함하기 때문에 영상이 더 많은 정보를 포함할 것으로 보인다. 낮은 에너지의 경우 피사체에 광자가 많이 흡수되어 오히려 측정되는 광자의 수가 상대적으로 적음을 확인할 수 있었고, 높은 에너지의 경우 납과 나머지 피사체 물질과의 흡수력 차이가 크기 때문에 Dose의 크기를 늘려서 납의 두께 분해정보만 남기고 나머지는 영상장치의 Dynamic range를 넘어서도록 설계하는 것이 유리할 수 있음을 확인하였다. 즉, 높은 에너지 소스를 이용한 영상을 통해 납의 정보를 확인하고 낮은 에너지 소스를 이용한 영상을 이용해 플라스틱과 구리의 정보를 확인할 수 있도록 설계함이 가장 높은 효율을 가져올 것으로 판단된다. 또한 높은 에너지의 영상에서 보여지는 플라스틱과 구리의 정보는 납의 정보를 확인함에 있어서 방해가 될 수 있으므로 낮은 영상에서의 플라스틱과 구리의 정보를 활용하여 제거해줌으로써 납에 정보를 조금 더 정확히 얻을 수 있을 것으로 보인다.

실험 조건의 특성상 영상의 직접적인 SNR이나 Dynamic range에 있어서의 단일 에너지를 사용하는 경우와 두 개의 에너지를 사용하는 경우의 장단점을 확인할 수는 없었다. 추가적인 연구를 통해 두 개의 에너지를 이용한 영상 측정 장치에 있어서 낮은 에너지와 높은 에너지에 최적화된 영상 취득 장치를 설계하고 실제 영상을 얻음으로써 단일 에너지 영상에 비해 품질 향상 정도가 어느 정도인지 비교하고 120 kVp 이상의 에너지원을 이용하여 에너지를 3개 구간으로 구분할 수 있는 지에 대해 알아볼 수 있도록 한다.

사 사

This work was supported by the Nuclear Research & Development Program of the Korea Science and Engineering Foundation (KOSEF) grant funded by the Korean government (MSIP). (grant code : 2015M2A2A4A03045310).

참 고 문 헌

문순환. 2006. AFVI를 위한 PCB PAD의 자동 광학 검사. *J. Opt. Soc. Korea Summer Meeting*.

이준재, 이병국, 류재칠. 2006. B-spline 표면 근사화 기반의 3 차원 솔더 페이스트 검사. *Korean Soc. Ind. Appl. Math. IT series* **10**(1):31-45.

Han JC, Kim HK, Kim DW, Yun S, Youn H, Kam S, Tanguay J and Cunningham IA. 2014. Single-shot dual-energy x-ray imaging with a flat-panel sandwich detector for preclinical imaging. *Curr. Appl. Phys.* **14**(12):1734-1742.

Kim KH, Jun IS and Yoon SE. 2007. New sandwich type detector module and its characteristics for dual x-ray baggage inspection system. *Nucl. Sci. Symp. Conf. Rec., NSS'07*. **2**:1191-1194.

Macdonald RD. 2001. Design and implementation of a dual-energy X-ray imaging system for organic material detection in an airport security application. *Photonics West 2001 Electron. Imaging. Int. Soc. Opt. Photonics*: 31-41.

Rebuffel V, Dinten JM. 2007. Dual-energy X-ray imaging: benefits and limits. *Insight Nondestr. Test. Condition Monit.* **49**(10):589-594.

Shepherd JA. 2010. IAEA Human Health Series No. 15: Dual Energy X Ray Absorptiometry for Bone Mineral Density and Body Composition Assessment. International Atomic Energy Agency. Marketing and Sales Unit, Publishing Section, pp. 30-35.

Yun S, Han JC, Kim DW, Youn H, Kim HK, Tanguay J, Cunningham IA. 2014. Feasibility of active sandwich detectors for single-shot dual-energy imaging. *Proc. SPIE, Med. Imaging Phy. Med. Imaging* **9033**:99335T-90335T.

Received: 20 August 2015
Revised: 4 September 2015
Revision accepted: 10 September 2015