

논문 2016-53-5-15

의료 방사선 검출기로서 스마트폰 카메라의 특성에 관한 연구

(A Study on the Characteristics of Smartphone Camera as a Medical Radiation Detector)

강 한 규*, 김 호 철**

(Han Gyu Kang and Ho Chul Kim[Ⓞ])

요 약

본 연구의 목적은 별도의 방사선 외부 검출장치 없이 스마트폰 자체의 CMOS 반도체 소자만을 활용하여 의료용 방사선 발생장치에서 발생하는 방사선을 효율적으로 검출하기 위한 최적의 조건과 알고리즘을 개발하는 것이다. 본 연구를 통하여 스마트폰에 내장된 CMOS 반도체 소자에 X-선의 선량을 증가시키면서 CMOS 영상 센서에서 반응하는 픽셀의 개수 및 밝기 등을 측정하였다. 스마트폰의 전면 카메라가 후면 카메라보다 노이즈가 적고 X-선과 같은 방사선에 대한 반응 특성이 우수하였다. 섬광결정을 사용한 간접 검출방식에 보다 CMOS 자체에 X-선을 반응시키는 직접 검출방식이 더 적은 선량까지 정확하게 검출이 가능하였다. 또한 X-선에 대한 선량의존성은 역치값을 넘어가는 픽셀의 개수를 계산한 Pixel number에 비해 개별 반응한 픽셀의 밝기까지 이용한 Pixel intensity가 더욱 선형적으로 나타났다. 컬러모델에 의한 실험에서는 스마트폰의 컬러모델인 YUV 컬러모델의 값 중 픽셀의 밝기값의 정보를 가지고 있는 Y값을 활용하면 방사선 검출에 있어 효율적인 것으로 사료된다. 향후 이와 같은 방사선 검출을 위한 최적의 조건들과 효율적 검출 알고리즘들에 대한 추가적인 연구가 진행된다면 방사선 선량의 관리가 효율적이며 체계적으로 이루어 질 수 있기 때문에 국민보건건강에 일조 할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract

The aim of this study is to investigate the optimal algorithm to extract medical radiation induced pixel signal from complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) sensors of smartphones camera. The pixel intensity and pixel number of smartphone camera were measured as the X-ray dose was increased. The front camera of the smartphone camera has low noise property and excellent dose response as compared to the back camera of the smartphone. The indirect method which uses scintillation crystal in front of the smartphone camera, couldn't improve the X-ray detection efficiency as compared to the direct method which does not use any scintillator in front of the smartphone camera. When we used the algorithm which employing threshold level on the pixel intensity and pixel number, the dose linearity was more higher for the pixel intensity rather for the pixel number. The use of pixel intensity of Y color component which represents the grey scale, would be efficient in terms of the radiation detection efficiency and reducing the complexity of the image processing. We expect that the radiation dose monitoring can be managed effectively and systematically by using the proposed radiation detection algorithm, thus eventually will contribute to the public healthcare

Keywords : X-ray, Radiation detection, CMOS, Smartphone

I. 서 론

2011년 3월에 일어난 일본의 후쿠시마 원자력 발전소 사고로 인해 최근 대중들에게 방사선의위험성에 대한 인식이 높아지게 된 계기가 되었다. 방사선 피폭 관련 언론보도들로 인해 방사선에 대한 국민들의 인식 수준과 및 피폭에 대한 관심 또한 높아졌다. 의료영역에서

* 학생회원, 을지대학교 대학원 시니어헬스케어학과
(Department of Senior Healthcare, Graduate School, Eulji University)

** 정회원, 을지대학교 방사선학과
(Department of Radiological Science, Eulji University)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail : tiger1005@gmail.com)

Received : April 19, 2016 Revised : April 28, 2016

Accepted : May 8, 2016

도 첨단 방사선 의료영상 장치의 급속한 발전으로 인해 진단용 방사선 발생장치인 X-선장치, 컴퓨터 단층 영상 촬영 장치(CT; Computed Tomography) 및 방사성 동위원소를 이용한 핵의학 검사 등에서 방사선의 사용이 급격하게 증가하고 있다. 이에 따라 의료용 방사선의 피폭에 대한 국민들의 우려와 관심 또한 높아지게 되었으며, 이러한 방사선 피폭 선량을 보다 간편하고 정확하게 측정하려는 수요 또한 늘고 있는 실정이다.

일반적으로 사용되는 방사선 측정 장비인 GM-counter의 경우 측정범위가 넓고 작은 선량까지도 측정이 가능하지만 제품의 제조 목적상 병원 및 연구소에 주로 공급된다. 반도체 검출기의 경우는 에너지 분해능이 우수하지만 가격대가 높아 일반 대중들에게는 보급되기 어려운 것이 현실이다. 따라서 방사선 계측 장비의 보급화를 위해서는 방사선 검출능력이 우수하며 가격이 낮은 제품의 개발이 반드시 필요하다.

대부분의 스마트폰 카메라에 탑재된 CMOS 기반의 반도체 소자는 원래 가시광선 영상 촬영을 목적으로 개발되었다. 그러나 CMOS 반도체 소자는 가시광선 외에도 자외선, 감마선 및 방사선과 같은 다른 파장대의 전자기과와도 반응하여 전기적인 신호를 내보내며 이것을 해당 픽셀의 밝기정보 및 픽셀개수를 통해 표현 된다^[1~3].

최근 스마트폰 보급률이 전세계적으로 급격하게 높아지고 있으며, 한국의 경우 스마트폰 보급률이 세계 최고 수준을 유지하고 있는 것을 볼 때, CMOS 반도체 소자가 X-선과 같은 방사선에 반응하는 특성을 이용하면 별도의 외부 검출기 없이 기존의 스마트폰만을 이용하여 누구나 간편하게 의료용 X선을 검출할 수 있을 것으로 기대된다.

하지만 스마트폰을 X-선과 같은 방사선 검출기로 사용하기 위해서는 스마트폰 자체에서 획득되는 노이즈가 포함된 신호로부터 X-선에 의해 생성된 픽셀 신호를 분리 할 수 있는 알고리즘이 개발되어야 한다. 또한 스마트폰의 X-선에 대한 반응특성을 정확히 파악해야 한다^[4~5].

따라서 본 연구의 목적은 별도의 방사선 외부 검출장치 없이 스마트폰의 CMOS 반도체 소자만을 활용하여 의료용 방사선을 검출하게 해주는 알고리즘을 개발하고 이를 이용해 의료용 X-선에 대한 선량 의존성을 측정하는 것이다.

II. 본 론

본 연구에서는 스마트폰에 내장된 CMOS 반도체 소

자가 X-선과 같은 방사선에 반응하는 특성을 이용하여 스마트폰으로 의료용 방사선 발생장치에서 발생하는 방사선을 검출하기 위한 최적의 조건과 알고리즘을 개발하고자 하였다.

본 연구에서는 감마선 검출도 가능하고 의료현장에서 사용되는 X-선으로 인한 환자 및 의료진의 피폭 선량을 측정하여 효율적으로 관리하기 위한 목적으로 실험을 진행하였다. 또한 스마트폰의 전·후면 카메라의 하드웨어적 특성에 따른 CMOS 소자의 방사선 민감도를 비교하고, 스마트폰 카메라의 CMOS소자와 방사선을 받으면 빛을 발하는 섬광결정의 조합 유무, 영상신호 변환 방식 및 RGB 컬러모델과 Gray 모델에서의 반응정도 차이를 각각 비교 측정하여 최적의 방사선 검출 방법을 찾고자 하였다. 또한 방사선에 반응하면 빛을 발하는 섬광체를 카메라 센서 앞에 부착시켜서 엑스선 검출효율 향상에 대한 가능성을 확인하기 위한 실험도 진행하였다.

III. 실험

1. 측정장비

방사선 발생 장치로는 진단용 X선 장치(Choongwae Medical, CXD-RI55, South Korea)를 사용하였고, X선의 반응특성을 검출하기 위한 스마트폰은 Galaxy S2(Samsung Electronics, SHW-M250S, South Korea)를 사용하였다. 또한 진단용 X선 장치로부터의 발생되는 선량을 측정하기 위해 이온챔버(PTW, UNIDOS® E, Germany)를 사용하였다.

2. 실험내용

가. 스마트폰 카메라의 방사선 반응 특성 실험 방법

스마트폰의 전·후면 카메라의 하드웨어적 특성에 따른 CMOS 소자의 방사선 민감도를 비교하기 위하여 전면카메라와 후면카메라에 대해 각각 실험을 시행하였다. 먼저 스마트폰의 카메라가 위치하고 있는 부분에 가시광선을 완전히 차폐시키기 위해 검은색 전기절연 테이프 5겹을 사용하여 CMOS 센서가 가시광선 대신 X-선에만 반응할 수 있도록 하였다. X선 발생방향을 따른 중심축과 스마트폰의 CMOS 반도체 소자의 위치를 수직으로 맞추고 엑스선 초점-검출기간의 거리(FSD : Focus-to-Surface Distance)는 100 cm, 엑스선 조사야(Field Size)는 10 cm×10 cm로 고정하였다(그림. 1).

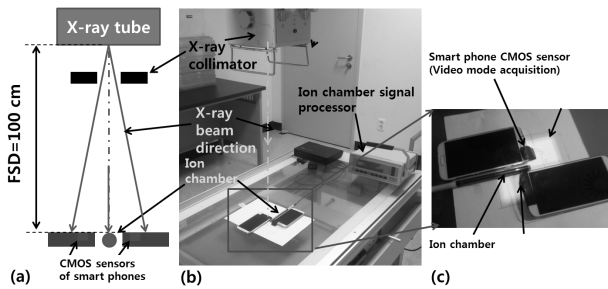


그림 1. 스마트폰을 이용한 엑스선 검출 실험
(a) 스마트 폰과 이온챔버를 이용한 엑스선 검출 모식도
(b) 엑스선검출을 위한 스마트폰 및 이온챔버 사진
(c) 스마트 폰의 카메라와 이온챔버가 엑스선 10 cm² 조사야 내에 들어와 있는 모습

Fig. 1. X-ray detection experiments setup using the smartphone camera. (Samsung Galaxy S2)
(a) Schematic diagram of the experimental setup for X-ray detection using smartphone and ion chamber.
(b) Photograph of the experimental setup.
(c) X-ray irradiation field of 10 cm x 10 cm with smartphone and ion chamber.

스마트폰은 동영상 모드로 촬영하였고 동영상 촬영시작 10초 후부터 X-선을 50 ms동안 조사시켰다. 스마트폰의 X선 의 선량에 대한 의존성을 평가하기 위해서는 관전압을 80 kV로 고정하고 관전류를 20, 40, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250 mA로 각각 변화시킨 영상을 얻었다. 또한 같은 실험조건에서 방사선 이온챔버(PTW, UNIDOS® E, Germany)에 의해 측정된 흡수선량을 이용하여 스마트폰 영상에서 측정된 픽셀 밝기 및 반응한 픽셀 개수를 흡수선량에 따라 얼마나 선형적으로 나타나는지를 분석하였다.

나. 방사선에 반응한 픽셀 추출을 위한 알고리즘

방사선에 의해 반응한 픽셀만을 추출하기 위해서는 CMOS센서 자체에서 발생하는 픽셀의 노이즈값을 측정하여야한다. 우선 방사선이 조사되지 않을 때의 CMOS 반도체 소자 픽셀의 잡음수준을 측정하기 위해 동영상 촬영 시작 이후 X선을 조사하기 전까지 10초 동안 발생한 각 프레임별 총 pixel intensity의 합을 Gray, R, G, B 성분마다 구하고 10초 동안 프레임의 각 성분의 합의 평균과 표준편차를 구하였다. 방사선의 들어왔음을 판단하는 각 성분마다의 역치값은 평균값+(표준편차 × 3)으로 정하였다. 각 프레임마다 pixel intensity의 Gray, R, G, B 성분의 총합은 정규분포를 따르기 때문에 이 역치값은 잡음픽셀값의 99% 상한값에 해당한다. 따라서 역치값은 각 Gray, R, G, B 성분별로 설정을 하였고 4가지 성분의 역치 값 모두를 넘는 값을 가진 프레임은 X-

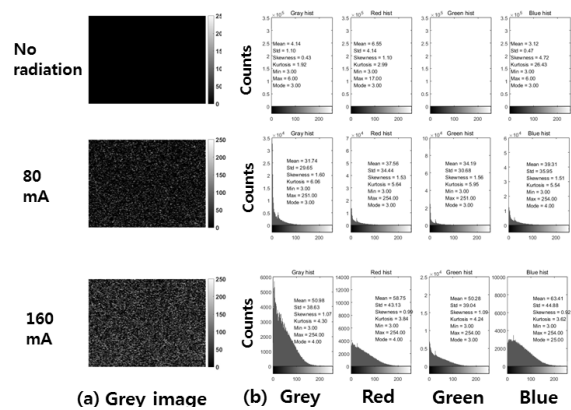


그림 2. 스마트폰 전면 카메라의 관전류에 따른 영상과 히스토그램 (관전압=80 kV, 조사시간 =50 msec로 고정)

(a) Grey 스케일 영상
(b) Grey, red, green, blue 성분별 히스토그램
Fig. 2. Smartphone's sum images and histograms of the front camera with different X-ray tube current.
(a) Grey scale sum image of the front camera.
(b) Pixel intensity histograms of the grey, red, green and blue components with front camera.

선과 반응한 프레임으로 간주하였다. X-선과 반응한 프레임의 전체 픽셀 밝기 합을 Pixel intensity, 전체 픽셀 개수를 Pixel number로 명명하였다.

1) Pixel intensity

전체 프레임에서 방사선과 반응한 픽셀을 찾아 픽셀의 밝기정도를 8비트의 그레이스케일로 나타내었다. 그 값을 모두 더한 결과를 pixel intensity 라고 하였다.

2) Pixel number

방사선에 반응을 나타낸 모든 프레임에서 역치값을 넘는 반응 픽셀의 총 개수를 구하여 Pixel number라고 하였다. 위의 실험에서 획득한 데이터를 Matlab R2012a (The Math-Works Inc., USA) 소프트웨어로 분석하였다. 실험에 사용된 스마트폰의 전면 카메라의 매트릭스 크기는 가로 640×세로 480으로, 총 픽셀 수가 307,200개 이고 후면 카메라는 가로 1080 × 세로 1920으로 총 픽셀 수는 2,073,600개이다. 스마트폰의 동영상 파일 형식은 MPEG-4로 초당 24 프레임을 가진다. 위의 2.1 에서 획득한 실험 영상을 MATLAB 소프트웨어를 이용하여 프레임 단위로 나누어 분석하였다.

다. 스마트폰 전·후면 카메라의 방사선 반응 특성 비교 그림 2의 윗줄은 X-선을 조사하지 않았을 때의 Grey

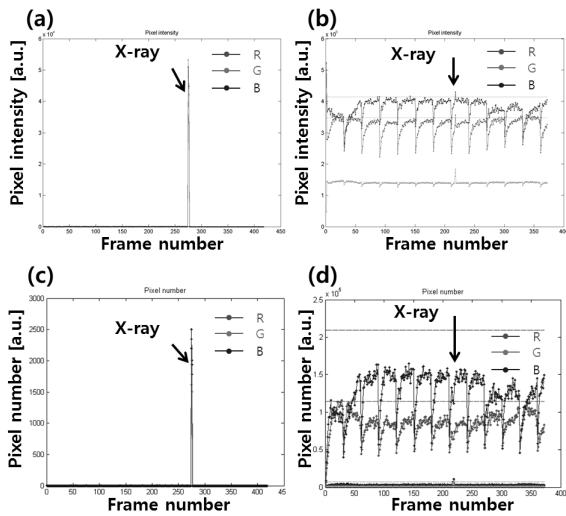


그림 3. 스마트폰의 전/후면 카메라 비교

- (a) 전면 카메라에서 픽셀의 밝기
- (b) 후면 카메라에서 픽셀의 밝기
- (c) 전면 카메라에서 반응픽셀의 개수
- (d) 후면 카메라에서 반응픽셀의 개수

Fig. 3. Smartphone's X-ray response comparison between the front and back camera.

- (a) Pixel intensity of front camera as a function of frame number.
- (b) Pixel intensity of back camera as a function of frame number.
- (c) Pixel number of front camera as a function of frame number.
- (d) Pixel number of back camera as a function of frame number.

스케일 영상과 R, G, B 성분별 픽셀 히스토그램을 나타낸다. 그림 2(b)의 두 번째 줄과 세 번째 줄은 관전압은 80 kV, 조사시간은 50 msec로 고정 시킨 상태에서 관전류를 각각 80 mA, 160 mA로 증가시켰을 때의 grey 스케일 영상과 R, G, B 성분별 히스토그램을 보여주고 있다. 그림 2(a)에서 보듯이 영상의 픽셀 밝기 값이 커지는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 관전압 40 kV와 관전류 20 mA의 조건에서 스마트폰의 전면카메라와 후면카메라에서 픽셀의 밝기 정도와 반응 픽셀의 개수를 비교한 것이다.

촬영시작 후 10초 이내의 프레임을 CMOS 영상 센서 자체의 잠음으로 간주하고, X선에 반응한 프레임을 신호로 하였을 때 X선에 반응한 전체 픽셀 밝기의 합에 대한 신호 대 잡음 비(SNR; Signal-to-noise ratio)를 구하였다. 전면카메라의 pixel intensity에 대한 SNR은 Gray에서 42,570, R, G, B에서 각각 26,635, 35,700, 7,266 로 나타났고, 후면카메라에서는 Gray의 SNR이 1.20, R, G, B에서 각각 1.13, 1.33, 1.09로 나타났다. 또한 pixel number에 대한 SNR을 구하였을 때, 전면카메라의 SNR은 Gray에서 2198, R, G, B에서 각각 2,342, 1,615, 2,505 로 나타났고, 후면카메라에서는 Gray의

SNR이 3.85, RGB에서 각각 0.82, 24.11, 0.81로 나타났다. 후면 카메라의 SNR이 전면카메라에 비해 작은 이유는 후면 카메라의 매트릭스 크기가 1080 × 1920으로 전면카메라의 640× 480보다 면적이 6배 크기 때문에 후면 카메라 개별 화소의 면적이 작아지면서 CMOS 개별 화소의 read noise가 커졌기 때문으로 설명할 수 있다.

다. 직/간접 검출방식에 대한 비교 실험

스마트폰 카메라 CMOS소자 앞쪽에 LGSO섬광결정을 결합시켰을 때 X-선에 대한 pixel intensity와 pixel number의 X-선에 대한 선형성이 더욱 커지는지를 실험하였다. CMOS 반도체 소자에 섬광결정을 결합시키는 간접방식과 섬광결정 없이 CMOS 반도체 소자에 X 선을 직접 반응시키는 직접방식을 상호 비교 평가 하였다. (그림. 4)

1) 직접 검출방식 (CMOS 반도체 소자)

CMOS 반도체 소자에 X-선을 직접 반응시키는 방식으로 실험진행 방법은 ‘가. 스마트폰 카메라의 방사선 반응 특성 실험 방법’의 실험방식과 동일하게 진행하였다.

2) 간접 검출방식 (CMOS 반도체 소자 + 섬광결정)

CMOS 반도체 소자에 섬광결정을 결합시켜 X-선에 반응시키는 간접방식의 검출방식 실험은 1.5×1.5×7 mm³의 크기의 LGSO(Lu_{0.4}Gd_{1.6}SiO₄:Ce) 섬광결정을 사용하였다. 스마트폰의 카메라 부분에 LGSO섬광결정 4×4 배열을 밀착시키고 공기층에 의한 전반사를 줄이기 위해 두 접합면 사이에 굴절률 1.46의 광그리드를 사용하였다.

그림 4(a),(b)는 관전압 80 kV, 조사시간 50 ms으로 고정하고 관전류를 20 mA에서 250 mA까지 증가시키면서 직접 검출 방식으로 측정된 전면카메라의 Gray, Red, Green, Blue 성분 별 pixel intensity와 pixel number이다.

그림 4(c),(d)는 위와 같은 조건에서 간접 검출 방식으로 측정된 전면카메라의 Gray, Red, Green, Blue 성분 별 pixel intensity와 pixel number이다. 간접검출방식을 사용했을 때 Gray, Red, Green, Blue성분의 pixel intensity는 직접검출방식에 비해 오히려 각각 0.28배, 0.26배, 0.29배, 0.34배로 감소한 이유는 LGSO섬광결정으로 입사된 X-선의 섬광 빛으로 변환 되었지만 스마트폰 전면카메라의 양자 검출 효율이 높지 않아 변환된 섬광 빛들이 전면카메라에서 거의 반응하지 않았기 때

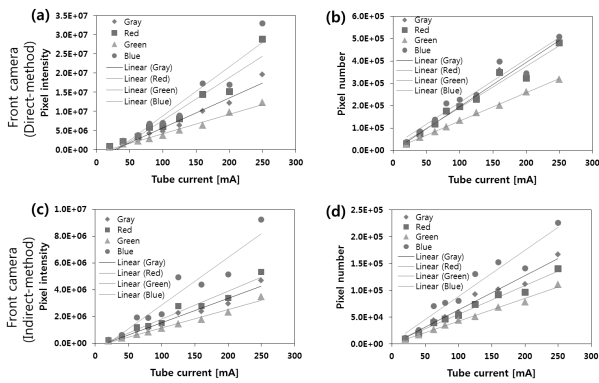


그림 4. 전면 카메라에서 직접과 간접검출방식의 비교
(a) 전면카메라의 관전류에 따른 픽셀 밝기 (직접검출방식)
(b) 전면카메라의 관전류에 따른 픽셀 개수 (직접검출방식)
(c) 전면카메라의 관전류에 따른 픽셀 밝기 (간접검출방식)
(d) 전면카메라의 관전류에 따른 픽셀 개수 (간접검출방식)

Fig. 4. Comparison of X-ray responses between the direct and indirect method with smartphone's front camera.

- (a) Pixel intensity of the front camera as a function of X-ray tube current. (direct detection method)
- (b) Pixel number of the front camera as a function of X-ray tube current. (direct detection method)
- (c) Pixel intensity of the front camera as a function of X-ray tube current. (indirect detection method)
- (d) Pixel intensity of the front camera as a function of X-ray tube current. (indirect detection method)

문이다. 또한 간접검출방식에서 Blue성분의 값이 pixelintensity와 pixel number에서 Red와 Green성분에 비해 증가한 이유는 LGSO섬광결정 이 X-선과 반응하여 방출된 파란색 섬광 빛들이 전면카메라에서 일부 검출되었기 때문이다. 따라서 전면카메라의 경우에는 섬광결정을 사용하는 간접방식보다 CMOS 소자 자체만으로 X-선을 검출하는 직접검출방식을 사용하면 X-선에 대한 민감도 및 선형성을 높일 수 있다.

후면카메라에서도 전면카메라에서와 같은 조건으로 X-선 관전류에 대한 pixel intensity와 pixel number를 직접과 간접방식으로 측정하였다. (그림 5)

후면카메라에서 간접검출방식을 사용했을 때 직접검출방식을 사용했을 때 보다 pixel intensity는 Gray는 1.1배, Red는 0.5배, Green은 0.9배 Blue는 3.4배로 측정되었다. 이는 후면카메라의 경우는 전면카메라보다 양자 검출 효율이 높기 때문에 X-선과 LGSO섬광결정이 반응하여 생긴 섬광 빛을 전면카메라보다 많이 검출하였기 때문이다. 간접검출방식을 사용했을 때 Blue성분을 제외한 Red, Green성분에서는 pixel intensity가 직접검출방식에 비해 오히려 각각 0.5배 0.9배로 감소한

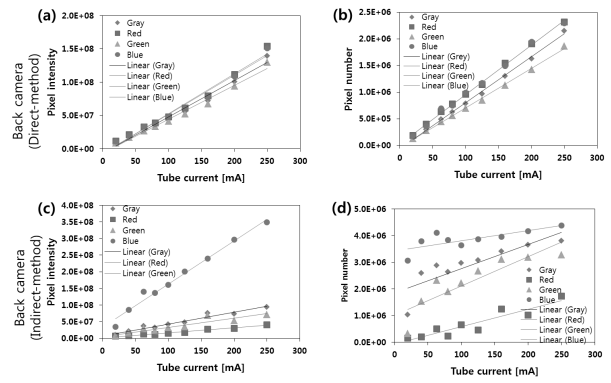


그림 5. 후면 카메라에서 직접과 간접 검출방식의 비교
(a) 후면카메라의 관전류에 따른 픽셀 밝기 (직접검출방식)
(b) 후면카메라의 관전류에 따른 픽셀 개수 (직접검출방식)
(c) 후면카메라의 관전류에 따른 픽셀 밝기 (간접검출방식)
(d) 후면카메라의 관전류에 따른 픽셀 개수 (간접검출방식)

Fig. 5. Comparison of X-ray responses between the direct and indirect method with smartphone's back camera.

- (a) Pixel intensity of the back camera as a function of X-ray tube current. (direct detection method)
- (b) Pixel number of the back camera as a function of X-ray tube current. (direct detection method)
- (c) Pixel intensity of the back camera as a function of X-ray tube current. (indirect detection method)
- (d) Pixel intensity of the back camera as a function of X-ray tube current. (indirect detection method)

이유는 LGSO에서 방출되는 섬광 빛의 최대 피크 방출 파장이 440 nm로 파란색에 가깝기 때문이다.

후면카메라에서 간접검출방식을 사용하면 직접검출방식을 사용했을 때보다 pixel number가 2배 가량 증가하였지만 pixel number의 선형성은 오히려 감소하였다. (표 2)

특히 그림 5(c)(d)의 직접검출방식에서 Blue성분의 pixel intensity와 pixel number의 절편은 각각 3.3E+07과 3E+06으로 그림 5(a)(b)의 간접검출방식의 -7E+06과 2.4E+04에 비해 크게 증가한 이유는 LGSO섬광결정 자체에 포함되어 있는 Lu-176가 자체방사능(intrinsic activity)을 가지고 있어서 베타선을 방출하게 되고 이로 인해 여기된 LGSO섬광결정에서 파란색 섬광빛이 방출되었기 때문이다. 따라서 간접검출방식을 사용하기 위해서는 자체방사능이 없는 GAGG섬광결정을 사용해야 할 것이다.

라. Gray와 Color 모델의 비교 실험

영상을 Gray 성분에 대해 분석했을 때와 RGB 컬러 모델에서 R, G, B성분 별로 각각으로 분석했을 때 반응

표 1. 전면카메라에서 X-선 관전류에 따른 Gray, R, G, B성분의 1차 선형 피팅 방정식(직접 검출 방식 vs. 간접 검출 방식) (그림 4)

Table 1. The equations of the linear fitting of the pixel intensity and pixel number with front camera versus the tube current of Fig. 4. (Direct vs. Indirect detection method)

Front camera	Color component	Linear fitting equation	R ²
Pixel intensity (Direct)	Gray	y=78,003x + 2E+06	R ² =0.962
	Red	y=111,722 - 4E+06	R ² =0.925
	Green	y= 51,138 - 1E+6	R ² =0.984
	Blue	y=127,877x + 4E-06	R ² =0.918
Pixel number (Direct)	Gray	y= 1,941x + 2E+4	R ² =0.943
	Red	y= 1,857x - 5E+3	R ² =0.964
	Green	y= 1,263x + 4,902	R ² =0.999
	Blue	y= 1,972x + 1,344	R ² =0.970
Pixel intensity (Indirect)	Gray	y= 18,255x + 3E+05	R ² =0.967
	Red	y= 20,790x - 3E+05	R ² =0.961
	Green	y= 13,623x - 2E+5	R ² =0.979
	Blue	y= 35,556x + 7E-05	R ² =0.918
Pixel number (Indirect)	Gray	y= 641x + 1209	R ² =0.939
	Red	y= 537x - 897	R ² =0.981
	Green	y= 425x + 582	R ² =0.991
	Blue	y= 859x + 1,344	R ² =0.939

정도의 차이를 분석하여 가장 안정적이고 유용한 값을 나타내는 인자를 확인하고자 하였다.

Gray영상은 수식 (1)과 같이 R, G, B 컬러영상의 평균값을 이용하여 구하였고 이후 pixel intensity와 pixel number를 X-선의 선량에 따라 분석하였다. (그림. 5)

$$Gray = \frac{R + G + B}{3} \tag{1}$$

X선 관전류에 대한 스마트폰 전면카메라의 pixel intensity의 1차 선형 피팅 방정식의 기울기는 Blue성분에서 127,877로 가장 크고 Green성분에서 51,138로 가장 낮았지만, 관전류에 대한 선형성을 나타내는 결정계수 R²값은 Blue에서 0.918로 가장 낮고 Green 성분에서 0.988로 가장 높았다.

스마트폰 전면카메라의 pixel number의 경우에도 Blue성분의 관전류에 대한 기울기가 1,972로 가장 크고

표 2. 후면카메라에서 X-선 관전류에 따른 Gray, R, G, B성분의 1차 선형 피팅 방정식(직접 검출 방식 vs. 간접 검출 방식) (그림 4)

Table 2. The equations of the linear fitting of the pixel intensity and pixel number with back camera versus the tube current of Fig. 4 (Direct vs. Indirect detection method)

Back camera	Color component	Linear fitting equation	R ²
Pixel intensity (Direct)	Gray	y=545,669x - 7E+06	R ² =0.982
	Red	y=600,181x - 8E+06	R ² =0.979
	Green	y=509,008x - 7E+6	R ² =0.983
	Blue	y=587,854x - 7E+06	R ² =0.979
Pixel number (Direct)	Gray	y= 8,625x + 6E+4	R ² =0.997
	Red	y= 9,278x - 2.7E+4	R ² =0.999
	Green	y= 7,416x + 3.8E+4	R ² =0.999
	Blue	y= 9,293x + 2.4E+4	R ² =0.996
Pixel intensity (Indirect)	Gray	y=355,189x + 7E+06	R ² =0.959
	Red	y=150,017x - 2E+06	R ² =0.972
	Green	y=276,037x - 5E+6	R ² =0.867
	Blue	y=1,299,293x + 3.3E+07	R ² =0.983
Pixel number (Indirect)	Gray	y= 9,108x + 2E+06	R ² =0.718
	Red	y= 6569x - 8E+4	R ² =0.862
	Green	y= 10,968x + 1E+06	R ² =0.771
	Blue	y= 3,768x + 3E+06	R ² =0.577

Green성분의 기울기는 1,263으로 가장 낮았지만 결정계수 R2값은 Blue에서 0.970로 가장 낮고 Green 성분에서 0.999로 가장 높았다.

그림 6는 그림 1의 방법으로 스마트폰의 gray모델에서의 pixel intensity와 이온 챔버의 흡수 선량값을 관전압은 80 kV, 조사시간은 50 ms으로 고정하고 관전류를 20 mA에서 250 mA까지 증가시키면서 측정했을 때 두 값 모두 관전류에 따라 매우 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Pixel intensity는 이온 챔버의 흡수 선량 값과 매우 선형적인 관계를 나타냈고 흡수선량 80 μGy부터 1.3 mGy의 범위에서 이온 챔버의 흡수선량이 1 μGy 증가함에 따라 pixel intensity는 2670 씩 증가하는 것으로 나타났다.

마. 관전압과 관전류에 따른 스마트폰의 pixel intensity 및 이온챔버의 선량 비교
X-선 장치의 관전류와 관전압에 따른 스마트폰의

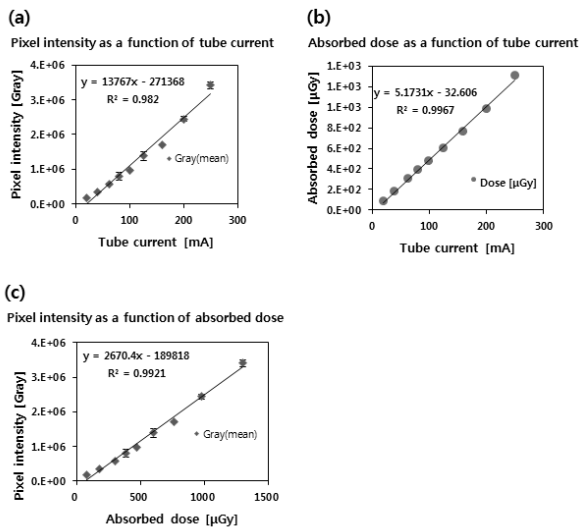


그림 6. X-선 선량에 따른 전면 카메라의 pixel intensity와 흡수선량과의 관계(Gray 영상)

- (a) 관전류에 따른 전면 카메라의 픽셀의 밝기 정도 변화
- (b) 관전류에 따른 흡수선량 변화
- (c) 흡수선량에 따른 전면 카메라의 픽셀의 밝기 정도 변화

Fig. 6. The pixel intensity and absorbed dose of the front camera as a function of X-ray tube current. (Gray image)

- (a) Pixel intensity as a function of X-ray tube current
- (b) Absorbed dose of the ion chamber as a function of X-ray tube current.
- (c) Pixel intensity as a function of the absorbed dose of the ion chamber.

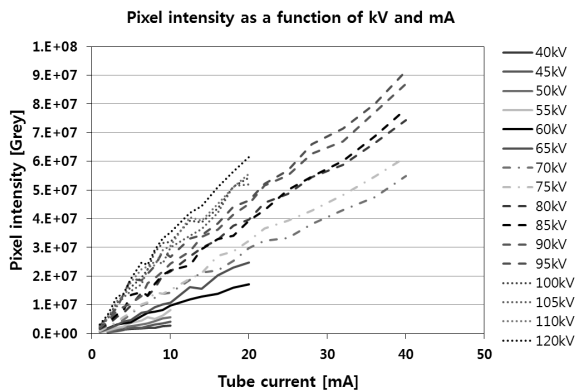


그림 7. X-선 관전류 및 관전압에 따른 전면 카메라의 pixel intensity (Gray 성분)

Fig. 7. Pixel intensity of the smartphone's front camera as functions of the tube current and tube voltage.

pixel intensity의 선형성을 알아보기 위해 FSD와 조사시간은 각각 100 cm와 1초로 고정시키고 관전압은 40 kV에서 5 kV간격으로 120 kV까지 증가시키고, 관전류는 1 mA에서 40 mA까지 약 2 mA간격으로 증가시키면서 스마트폰의 pixel intensity와 이온챔버의 조사선량을 측정하였다. Pixel intensity분석에는 R, G, B 성분의 평균값

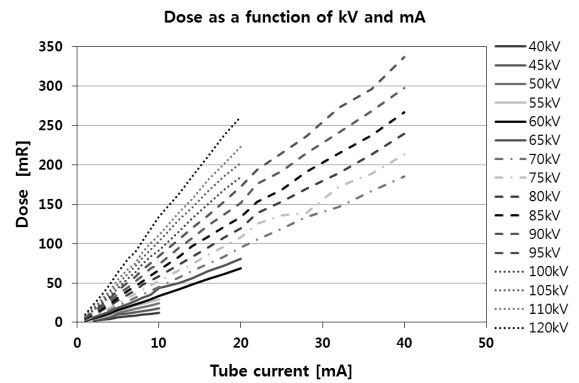


그림 8. X-선 관전류 및 관전압에 따른 이온챔버의 조사선량

Fig. 8. Exposure dose of the ion chamber as a function of tube current and tube voltage

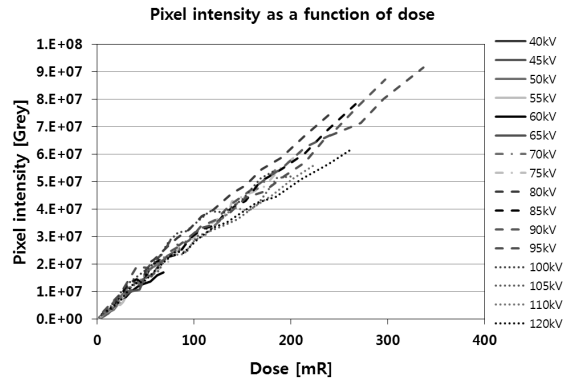


그림 9. X-선 관전압과 이온챔버의 조사선량에 따른 스마트폰 전면 카메라의 pixel intensity

Fig. 9. Pixel intensity of the smartphone's front camera as a function of ion chamber exposure dose with different tube voltages.

인 Gray 성분만을 사용하였다.

그림 7에서 보이듯이 관전류가 증가함에 따라 스마트폰 전면 카메라의 pixel intensity는 선형적으로 증가했고 같은 관전류 조건에서 관전압이 커질수록 관전류에 따른 pixel intensity 증가의 기울기는 커졌다.

그림 8은 같은 그림 7과 같은 조건에서 측정된 이온챔버의 조사선량 그래프다. 이온챔버의 선량측정에 대한 정확도가 스마트폰에 비해 훨씬 좋기 때문에 관전류에 따른 조사선량 값이 스마트폰의 pixel intensity보다 더욱 선형적으로 측정되었다.

스마트폰의 pixel intensity와 마찬가지로 관전류가 증가할수록 이온챔버의 조사선량은 선형적으로 증가하였고 관전압이 증가할수록 관전류에 대한 이온챔버의 조사선량 기울기는 증가하였다.

그림 7과 그림8의 데이터를 이용하여 이온챔버에서

표 3. X-선 관전압과 이온챔버의 조사선량에 따른 스마트폰의 pixel intensity에 (그림 9) 대한 일차 선형 피팅 방정식

Table 3. The equations of the linear fitting of the pixel intensity versus the exposure dose of the ion chamber shown in Fig. 9.

kV	Linear fitting equation	R ²
40	y= 255775x + 164482	= 0.981
45	y= 461839x - 652030	= 0.988
50	y= 619728x - 558803	= 0.983
55	y= 807451x - 585996	= 0.971
60	y= 874098x + 293703	= 0.991
65	y= 1E+06x - 100300	= 0.992
70	y= 1E+06x + 606074	= 0.994
75	y= 2E+06x + 89420	= 0.996
80	y= 2E+06x + 1E+06	= 0.993
85	y= 2E+06x + 1E+06	= 0.996
90	y= 2E+06x + 1E+06	= 0.996
95	y= 2E+06x + 5E+06	= 0.993
100	y= 3E+06x + 3E+06	= 0.977
105	y= 3E+06x + 2E+06	= 0.988
110	y= 3E+06x + 2E+06	= 0.986
120	y= 3E+06x + 3E+06	= 0.989

측정된 조사선량에 따른 스마트폰의 pixel intensity를 구하였다 (그림 9).

그림 9에서 이온챔버의 조사선량값이 커질수록 스마트폰의 pixel intensity는 선형적으로 증가했지만 표 3에 알 수 있듯이 관전압이 커질수록 pixel intensity의 선량에 따른 기울기는 감소하였다. 이는 스마트폰의 CMOS 영상 센서가 에너지 의존성을 가지기 때문으로, 관전압이 높을수록 X-선의 에너지는 높아져서 CMOS 센서에서 측정되는 pixel intensity값이 감소하기 때문이다.

IV. 결 론

스마트폰에 내장된 CMOS 반도체 소자를 이용하여 의료용 X-선 대한 반응특성을 확인하였다. 또한 별도의 외부 방사선 검출기 없이 스마트폰 자체만으로 방사선 검출기로 사용하기 위한 알고리즘을 개발하였고 이를 위한 최적의 인자를 확인할 수 있었다.

스마트폰은 후면카메라에 비해 전면 카메라가 노이

즈가 적고 X-선과 같은 방사선에 대한 반응 특성이 우수했으며, 섬광결정을 사용한 간접 검출방식에 비해 CMOS 자체에 X-선을 반응시키는 직접 검출방식이 더 적은 선량까지 정확하게 검출이 가능함을 확인 할 수 있었다. 또한 영상신호로의 변환방식은 방사선에 의해 반응하는 픽셀의 개수를 카운터 하는 방식인 pixel number에 비해 픽셀의 밝기 값을 합하는 방식인 pixel intensity가 더 많은 정보를 담고 있으며 X-선에 대한 반응 역시 선형적으로 나타났다. RGB 컬러모델에 의한 컬러 값을 이용하는 것 보다는 평균값인 Gray를 사용하는 것이 좀 더 안정적으로 결과를 나타내었기 때문에 스마트폰의 컬러모델인 YUV 컬러모델의 값 중 픽셀의 밝기 값의 정보를 가지고 있는 Y값을 활용하면 효율적 일 것으로 사료된다.

스마트폰은 이온챔버에서 측정된 조사선량에 대해서 선형적인 특성을 나타냈지만 CMOS 영상 센서가 높은 관전압, 즉 높은 에너지의 X-선이 들어올 때는 감도가 감소하기 때문에 추후 실험에서는 CMOS센서의 에너지 의존성을 보상하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

향후 본 연구의 실험 결과를 토대로 추가 연구가 진행된다면 방사선이 사용되고 있는 다양한 산업현장 뿐만 아니라 병원과 같은 임상현장에서의 환자, 보호자 및 방사선 취급 종사자의 선량관리가 체계적이며 효율적으로 이루어 질 수 있기 때문에 국민보건건강에 일익을 할 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다. (No. NRF-2015M2B2A9033015)

REFERENCES

[1] G. A. Drukier, E.P. Rubenstien, P.R. Solomon, M.A. Wojtowicz, M.A. Serio, "Low cost, pervasive detection of radiation threats," *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference*, 2011. pp. 365-371,
 [2] D. Igoe, A. Parisi, and B. Carter, "Characterization of a smartphone camera's response to ultraviolet A radiation," *Photochem Photobiol*, vol. 89, no. 1, pp. 215-218, Feb, 2013.
 [3] F. Wang, M-Y. Wang, Y. -F. Liu, C. -W. MA, L. Chang, "Obtaining low energy γ dose with CMOS

- sensors,” *Nuclear Science and Techniques*, vol. 25, no. 060401, pp. 1-4, Dec, 2014.
- [4] H.Hartmann, V. Hietschold, R.Freudenberg, J. Kotzerke, Dresden, “Smartphones now even smarter - possibility of using a “dose warner”,” *RoFo*, vol. 185. 1, pp. 558-562, May, 2013.
- [5] Olivier Van Hoey, Alexia Salavrakos et al, “Radiation dosimetry properties of smartphone CMOS sensors”, *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 163, no. 3, pp. 1-8, May, 2015.

저 자 소 개



강 한 규(학생회원)
2012년 을지대학교 방사선학과 학사졸업
2014년 을지대학교 방사선학과 석사졸업
2014년~현재 을지대학교 대학원 시니어헬스케어학과 박사과정

<주관심분야: 핵의학장치, 광학영상장치, 몬테카를로 시뮬레이션>



김 호 철(정회원)
2002년 고려대학교 응용전자공학과 학사졸업
2004년 고려대학교 의학과 석사 졸업
2009년 고려대학교 의학과 박사 졸업
2012년~현재 을지대학교 방사선학과 교수

<주관심분야: 디지털의료영상처리, 방사선의료기기, 방사선계측>