Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 18, No. 4, pp. 377-383, 2024
https://doi.org/10.23042/radin.2024.18.4.377

Original article

CMOS 기반의 DSLR 카메라 시스템과 DR 시스템의 변조전달함수 비교

권 대 철[1]

[1]신한대학교 보건대학 방사선학과

Comparison of MTF of CMOS-based Digital Camera System and DR System

Dae Cheol Kweon[1]

[1]Department of Radiological Science, College of Health, Shinhan University, 95 Hoam-ro, Uijeongbu, Gyeonggi-do 11644, Republic of Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to apply the RQA5 conditions recommended by IEC 61267 and compare the spatial resolution to MTF using a CMOS-based DSLR camera system and a DR system to improve image quality. The study was conducted to use as basic data to confirm. The edge phantom used to acquire images for MTF measurement was the TX5 tungsten edge test device of IEC 62220-1 standard, and the wire quality and edge method suggested by IEC were used for the measurement. Images were evaluated using a GOS (gadolinium oxysulfide)-based scintillator for the DR-based X-ray system and a CsI:Tl scintillator for the DSLR camera system. In order to evaluate images using a DR system and a DSLR camera system, the resolution evaluation using the RQA-5 quality suggested by IEC applied MTF. In order to evaluate images using a DR system and a DSLR camera system, the resolution evaluation using the quality of RQA-5 presented by IEC was performed by applying MTF. In the DR system, when MTF was 2% and the spatial frequency was 0.98924 and 10%, The spatial frequency was 0.83627 LP/mm. When MTF was 50%, the spatial frequency was 0.4745 LP/mm. In the DSLR camera system, the MTF was 0.99251 at 2%, and the spatial frequency at 10% was 0.90956 LP/mm. When MTF was 50%, the spatial frequency was 0.3771 LP/mm. In conclusion, in digital X-ray inspection, image quality can be confirmed by comparing the MTF according to the resolution of the GOS-based DR system and the CMOS-based DSLR camera. Images acquired using the DR system can be used as basic data for diagnosis and treatment.

Key words: Digital radiography, DSLR camera, modulation transfer function, X-ray

1. 서 론

엑스선을 이용한 검사는 영상의학 및 의료영상기술 분야에서 진단 및 치료에 중요한 기기의 역할을 하고 있다. 또한 엑스선을 이용한 영상 획득은 필름을 감광하여 영상을 획득하고 진료하였으나 영상의 디지털 변환에 의해 필름을 기반으로 하는 영상획득의 감소하고 있다. 그러므로 엑스선을 이용한 디지털 영상 획득은 전자신호를 영상신호로 변환시켜 엑스선 영상을 획득하는 방법을 사용하여 진단에 이용하는 수준으로 성장하였다[1]. 이러한 디지털의 변환으로 인해 엑스선 영상의 획득은 필름의 영상에서 디지털 영상 장비를 급속히 발전하여 세계적으로 디지털영상으로 전환하여 환자를 위한 선량감소를 위한 교육과 함께 영상획득에 대한 새로운 패러다임의 영상획득시스템이 절실이 요구되는 시기이다[2].

디지털 방식의 엑스선 영상획득방법은 CR (computed radiography) 방법과 DR (digital radiography) 종류의 방법을 사용하고 있고, 영상획득 방법에 있어서는 성능과 기능면에 차이점이 있고, 개발 도상국의 농촌 지역에 널리 보급하기 위해 DSLR (digital single-lens reflex) 카메라를 응용한 최적의 DR 시스템을 개발하여 원격의료를 통해 의료서비스와 정보를 제공하였다[3].

DR 시스템의 장점은 높은 해상력, 넓어진 동적영역 (dynamic range), 높은 전기적 신호생성, 실시간 영상획득, 데이터 처리의 저장 및 전송이 실시간으로 영상의 구현이 가능하고 적은 방사

ISSN 1976-2402 http://www.ksri.kr/

Copyright© 2024 by Korean Society of Radiation Industry

*Corresponding author: Dae Cheol Kweon
Tel: +82-31-870-3411, E-mail: dckweon@shinhan.ac.kr

Received 22 November 2024 Revised 9 December 2024 Accepted 23 December 2024

선 선량으로 고해상도 영상을 획득할 수 있다. DR 시스템에서 영상에의 질을 분석하기 위해서는 SNR (signal noise to ratio), CNR (contrast noise to ratio), 변조전달함수(modulation transfer function, MTF), 잡음력 스펙트럼(noise power spectrum, NPS), 양자검출효율(detective quantum efficiency, DQE)를 이용한다. 영상의 분석방법에서 MTF는 엑스선 영상의 화질 평가를 위한 해상력특성에 대한 평가 방법으로 주로 현재에도 많이 이용되고 있다.

영상의 공간분해능을 평가할 수 있는 MTF는 검출기에서의 입력된 신호가 엑스선 시스템을 통해서 출력신호로 변환될 때 원래 정보를 표현하는 해상력과 선예도를 측정하는 방법의 주파수전달 함수로 정의하고 있다. 따라서 MTF는 고주파성분의 값이 많을수록 우수한 선예도를 얻을 수 있다[4]. 이러한 MTF는 영상에서 공간주파수의 시스템 성능에 대한 대조도 응답 정보를 나타내기 때문에 디지털 방사선영상시스템에서 정량적 분석의 척도가 되며, 전달능력을 나타낸다. MTF 평가방법에서 공간분해능의 평가는 MTF (10%)와 곡선이 교차하는 곳의 공간주파수의 값을 시스템의 최대 공간주파수의 지표로 사용하며, 선예도 평가는 MTF (50%)와 곡선이 교차하는 곳의 공간주파수를 사용하는 MTF 분석은 영상의 질을 분석하는 기초자료로 활용될 수 있다. 개발된 DSLR 카메라 시스템과 DR 시스템의 영상에 대한 평가에 대한 연구가 전문하고 미흡한 실정이다.

본 연구의 목적은 IEC 61267에서 권고하는 RQA5 조건을 적용하여 공간분해능의 MTF를 CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) 기반의 DSLR 카메라 시스템과 DR 시스템을 이용하여 공간분해능을 MTF로 비교하여 영상의 질을 확인하는 기초자료로 활용하기 위해 연구하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. DSLR 카메라 시스템과 DR 시스템

DSLR 카메라 시스템은 엑스선 발생장치, 디지털카메라, 전원케이블 등으로 구성하고, 엑스선관에서 조사된 엑스선을 형광판에 검출하여 형광판의 하부에 설치된 디지털 카메라에서 영상을 촬영한다. DSLR 카메라 시스템 (G-ray Co., Ltd., Seoul, Korea)의 구조에 대한 내용을 Fig. 1과 같이 영상을 획득하여 출력하는 과정을 보여주고 있다.

CMOS 영상 센서를 구비한 DSLR camera (Canon EOS 6D,

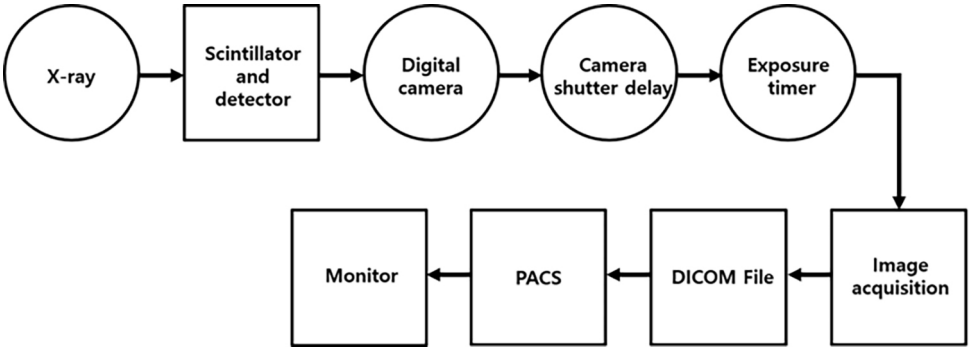


Fig. 1. Block diagram of the method proposed for acquisition of DSLR camera based radiographic images

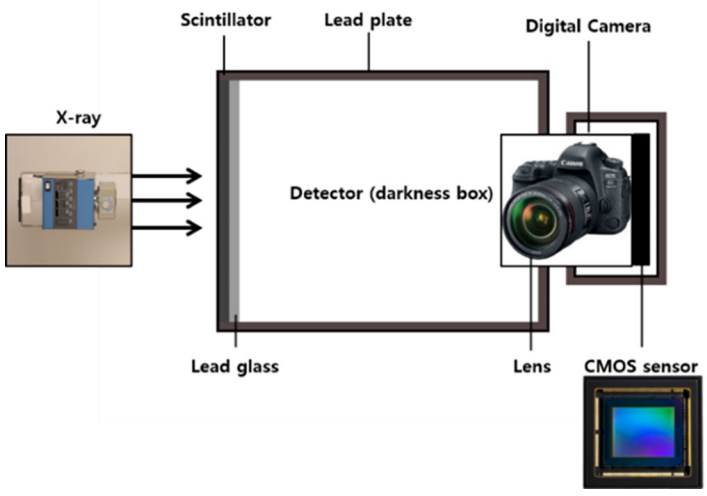


Fig. 2. X-ray acquisition detector of component with DSLR camera system with CMOS sensor

Table 1. Comparison of properties of CsI:Tl and GOS scintillators [5]

Parameter	CsI:Tl	GOS
Density (g/cm^3)	4.51	7.3
Attenuation coefficient at 141 keV (cm^2/g)	0.847	1.092
Photon yield (per keV)	52-66	35-50
Peak emission wavelength (nm)	550	512
Theoretical sensitivity to 141 keV photons (1500 μm thickness)	43.6%	69.8%

Canon Ltd., Tokyo, Japan)는 active area 350×460 cm, image matrix 4,856×3,584, F 1.4, 30 mm lens를 사용하였다. 이미지 센서의 화소 내부에서 전기신호로 변환시키고 외부에 설치된 컴퓨터에 데이터가 출력되며 Fig. 2는 엑스선을 조사하여 CMOS 기반의 DSLR 카메라의 영상획득 과정이다(Fig. 2).

영상획득은 Fig. 2와 같이 엑스선을 조사하여 박스 내부의 형광판에 형성되는 영상을 촬영하는 디지털 카메라로 이루어져 있고, 섬광을 검출하는 섬광체는 cesium iodide (CSI:Tl, Toshiba Corporation, Japan)을 사용하였다. 섬광체(CsI:Tl)는 주상 결정 구조로 형성되어 있어 높은 해상도와 엑스선 광자와 상호작용이 증가하여 가시광선이 증가되어 공간분해능과 높은 검출효율로 피폭선량을 줄일 수 있는 장점이 있다[4]. DR 시스템에 적용한 섬광체인 GOS (gadolinium oxysulfide)와 DSLR에서 사용한 섬광체(CsI:Tl) Bugby 등[5]이 보고한 내용을 Table 1과 같이 구체적으로 비교하여 설명하였다.

2.3. 엑스선 영상 획득 및 평가

MTF 측정을 위해 영상획득을 위해 사용한 팬텀은 IEC 62220-1 규격의 TX5 tungsten edge test device (IBA Dosimetry America, Bartlett, TN, USA)를 사용하였으며, DR 기반의 엑스선 영상의 엑스선 기기(DXC-RML, DRGEM Co. Ltd., Korea)의 섬광체는 GOS 를 기반으로 하는 flat panel의 검출기를 이용하여 엑스선을 촬영하여 DR 시스템에서 영상을 획득하였다.

MTF를 분석하기 위해 적용된 선질은 IEC-61267에서 RQA5를 적용하여 분석하였다. 부가필터는 IEC 61267에서 방사선질별로 제시하는 알루미늄 부가필터(0.7+21 mmAl)를 사용하였고, IEC 62220-1에서 제시하는 edge method을 사용하여 엣지 팬텀은 3° 기울기로 edge spread function (ESP) 작성에서 엘리어싱(aliasing)을 최소화하였다[6].

방사선의 선질은 IEC 61267에서 권고하고 있는 RQA5를 적용하여 분석하기 위하여 관전압 70 kVp, 선질을 사용하였고, 엑스선과 검출기와 150 mm로 MTF를 위한 test device는 장비의 에지 중앙 부분은 엑스선 유효 범위 중앙 축에 일직선으로 맞추어 설치되도록 했다[7].

영상의 공간해상도 평가를 위해 엣지 영상에서 ESF (edge spread function)을 확인하고 LSF (line spread function) 곡선의 해상력을 Quick MTF 프로그램(version 2.10, http://www.quick-mtf.com)을 이용하여 MTF의 해상력 특성을 확인하였다.

3. 결 과

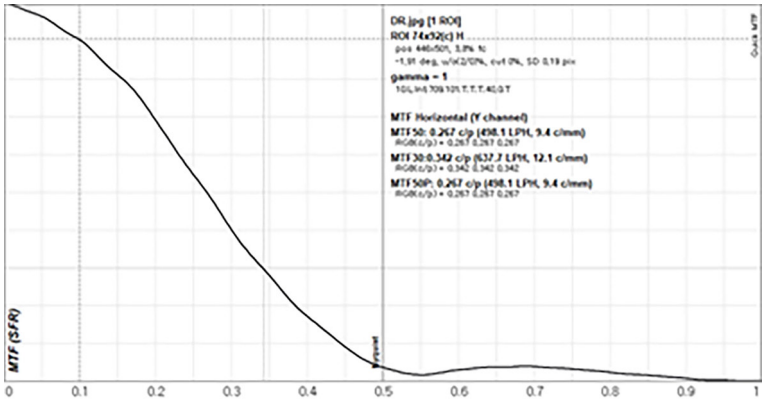
DR 시스템과 DSLR 카메라 시스템을 이용하여 영상을 평가하기 위해 IEC에서 제시하는 RQA-5의 선질을 적용한 해상력의 평가는 MTF를 적용하여 영상을 평가를 위해 관전압 70 kVp에서 부가필터를 사용하여 SID 100 cm에서 MTF가 50, 10, 2%에서의 공간주파수에 대한 결과는 Table 2와 같다. DR 시스템에서 MTF 가 2%에서 공간주파수는 0.98924 LP/mm이었고, 10%일 때, 공간주파수는 0.83627 LP/mm 이었다. MTF가 50%일 때, 공간주파수는 0.4745 LP/mm를 나타났다. DSLR 카메라 시스템에서 MTF 가 2%에서는 0.99251이었고, 10%일 때의 공간주파수는 0.90956 LP/mm 이었다. MTF 가 50%에서 공간주파수는 0.3771 LP/mm를 분석되었다.

DR 시스템에서 해상력을 평가하기 위한 MTF의 영상은 Fig. 3(a)과 같이 보여주고 있다. 또한 SPF 및 LSF를 Fig. 3(b)에서 나타내고 있다. 또한 DSLR 카메라 시스템에서 획득한 MTF의 영상은 Fig. 4(a)에서 SPF 및 LSF는 Fig. 4(b)와 같이 보여주고 있다.

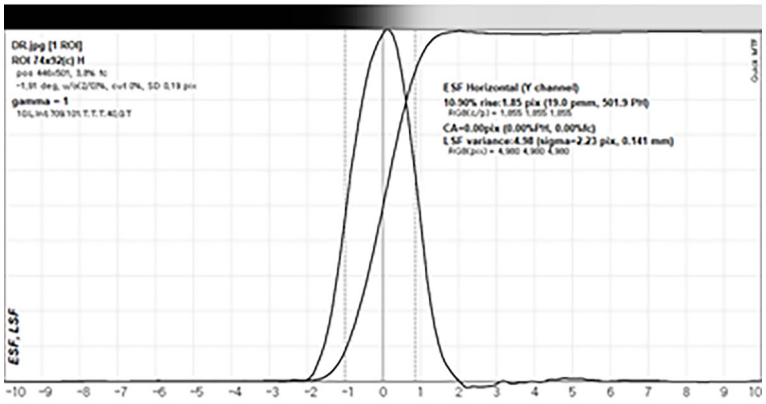
DR 시스템과 DSLR 시스템에서 엣지 팬텀을 적용하여 획득

Table 2. Spatial frequency from the DSLR camera system and DR system at different values of MTF

	Spatial frequency (LP/mm)		
	MTT at 50%	MTF at 10%	MTF at 2%
DR system	0.4745	0.83627	0.98924
DSLR camera system	0.3771	0.90956	0.99251



(a)



(b)

Fig. 3. Pre-sampling MTF measured for the RQA5 by edge method of DR X-ray system of MTF (a) and line spread function and edge spread function output in Quick MTF.

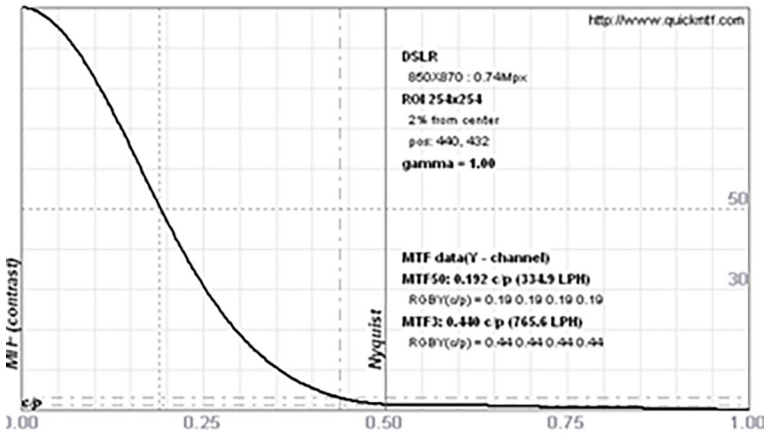
한 데이터를 해상력의 MTF를 비교하기 위한 물리적인 MTF의 비교는 Fig. 5과 같이 DR 시스템이 DSLR 카메라 시스템에 비해 해상력이 우수함을 보여주고 있다.

4. 고 찰

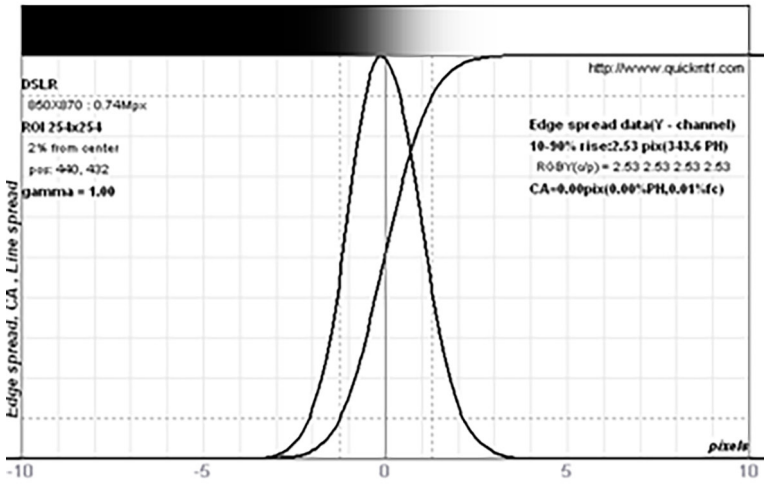
본 연구는 엑스선 영상을 획득하여 DR 시스템과 DSLR 카메라 시스템의 영상을 MTF를 평가하였다. 디지털 방사선영상시스템은 최초로 barium fluorohalide로 도포된 image plate에 엑스선 영상신호가 형상되고 레이저를 조사하는 CR 시스템으로 낮은 양자 검출효율로 필름 시스템에 비해 낮은 영상의 질을 낮다[8]. 다음은 FPD (flat panel detector)로 크게 두 가지로 구분한다. 하나는 직접 DR로 엑스선에 반응하는 광전도체에 Se이 덮여 있는 TFT (thin film transistor)를 사용하여 엑스선 신호를 전기신호로 전환한다. 다른 하나는 간접 DR로 CsI:Tl 같은 형광체를 TFT 위에 위치하고 엑스선 신호를 빛 신호로 바꾸어 디지털 신호를 획득하는 방식이다[9]. 결과적으로 직접 DR이 높은 해상력을 가지며, 간접 DR은 상대적으로 높은 에너지 흡수로 기인해서 높은 양자 검출효율을 나타낸다[1].

DSLR 카메라 시스템을 이용한 영상의 특징은 첫째, 엑스선을 노출하여 실시간으로 영상을 획득하여 비용절감과 편리성, 공간확보 등에 편익을 제공한다[10]. 둘째, ISO 감도조정기능에 의해 어두운 광량의 영상도 촬영이 가능하여 기존의 CR 및 DR에 비해 단시간 촬영에도 영상을 획득하므로 환자선량을 크게 감소시킬 수 있다. 셋째, 현재는 CR, CCD 방식 및 flat panel DR 방식을 대체하여 영상시스템을 응용하는 첨단기술로 방사선영상시스템으로 발전할 수 있는 장점이 있다.

DSLR 카메라 시스템을 응용한 DR 시스템의 주요 특징은 엑스선을 섬광체를 이용하여 빛을 모으는 것이 주요한 관심항목이다 [11]. 기존 연구의 보고에 따르면 표준 F/1.4 카메라 렌즈는 빛을 약 0.1%를 수집한다[12]. 섬광체의 CsI:Tl에서 K-edge는 약 34 keV로 보고되어 있다. 본 연구에서는 DSLR을 이용하여 의료용 다기능 진단영상장치개발로 이러한 DSLR 카메라 시스템은 DSLR의 비약적인 기술 발달로 인하여 DR 기반의 엑스선 영상의 질이 비슷하고 대조도 및 감도를 적용하여 응용할 수 있다. 디지털 DSLR 카메라 시스템을 이용하여 저선량 및 저가로



(a)



(b)

Fig. 4. Pre-sampling MTF measured for the RQA5 by edge method of DSLR X-ray system of MTF (a) and line spread function and edge spread function output in Quick MTF.

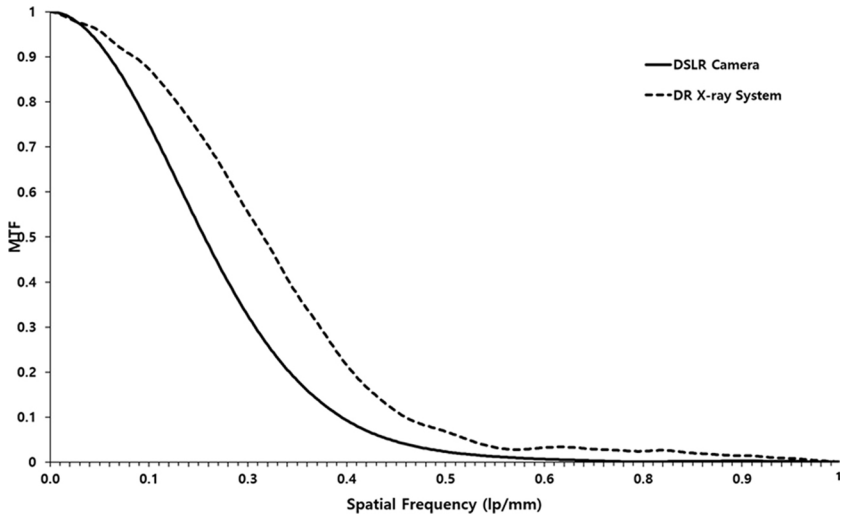


Fig. 5. The results of MTF in the DSLR camera X-ray system and DR X-ray system

엑스선을 이용한 영상을 획득할 수 있다는 보고가 있었다[10].

DSLR 카메라 시스템은 엑스선의 회절을 이용하여 피사체내부의 구조를 영상화하는 영상진단시스템으로 DSLR 카메라는 감도조절 기능이 있어 엑스선 발광이 적은 경우에도 ISO조정기능을 보강하여 우수한 영상을 획득할 수 있으며 환자의 선량을 줄일 수 있다. DSLR 카메라를 이용한 영상획득은 엑스선의 회절을 이용하여 피사체내부의 구조를 영상으로 구현하는 엑스선 진단하는 기기로 디지털 영상에서 노이즈를 제거하여 효율적으로 진단에 응용할 수 있다[13]. DSLR 카메라를 응용하여 영상을 획득하는 시스템은 DR 시스템에 비해서 제조 단가 절감이 가능하고, 유지 보수도 카메라 모듈만 업그레이드하는 방식이 가능하고, 가격이 중저가로 자원이 낮고 의료 장비 설치가 어려운 국가에서 이용할 수 있다[14,15]. 이러한 영상획득 시스템은 저가의 원격의료에 응용이 가능하여 관리 및 교육에 적용할 수 있다 [16]. 기존의 엑스선 시스템에서 해상력을 평가하는 MTF에 대한 연구는 주로 CR 및 DR 시스템 [17]에서 영상을 분석하고 있고, 디지털 영상에서 CT [18] 및 엑스선의 영상의 질을 평가하고 분석하고 있으나 DSLR 카메라 시스템에서 해상력 차트를 적용하여 영상을 분석한 예비보고는 있으나[19], 해상력을 분석한 MTF의 연구는 보고가 되어 있지 않다. 그러므로 DSLR 카메라 시스템과 DR 시스템의 해상력에 대한 연구는 임상에서 적용 가능성을 위한 기초자료를 제공할 수 있다.

디지털 엑스선 영상의 질을 평가하는 MTF는 영상시스템의 주파수 응답을 나타내며 영상의 선예도 특징을 보여주고 있어 정량적인 분해능을 관찰할 수 있는 장점을 가지고 있다 [20]. 이러한 MTF 측정은 50, 10, 2% 지점에서 해상력을 측정하고 있으며, 50%는 영상의 선예도 결정하고, 10%는 그래프로 나타내는 파라메터로 이용하고 있으며 2%는 육안으로 확인할 수 있는 최저 상태의 공간주파수로 공간분해능을 기술하는 파라메타로 이용한다. 0%는 주파수가 소멸하는 부분이다[18].

엣지 팬텀으로 획득한 엑스선 영상을 분석하기 위해 Quick MTF 상용 프로그램을 활용하여 MTF를 2% 및 10%, 50%에서 MTF를 측정하였다[21]. DR 시스템에서 2%는 0.98924 LP/mm 이었고, 10%는 0.83627 LP/mm, 50%는 0.4745 LP/mm를 나타냈고, DSLR 카메라 시스템에서 2%는 0.99251 LP/mm, 10%는 0.90956 LP/mm, 50%에서는 0.3771 LP/mm를 분석되어, DR 시스템에서 50%가 높게 분석되었다.

본 연구에서는 DR 시스템에서는 GOS와 DSLR 카메라의 섬광체(CsI:Tl)를 적용하여 해상력으로 MTF를 이용하여 영상을 평가하였다. 이러한 섬광체는 주상 결정 구조로 형성되어 공간분해능과 검출 효율을 높일 수 있어 환자의 피폭 경감에 효율이 있다. 또한 GOS 섬광체는 높은 원자번호로 의해 고에너지에 대한 높은 흡수율과 함께 우수한 발광효율을 가지고 있는 장점이 있으나, 무질서한 결정 구조를 갖는 특성으로 인하여 낮은 해상도를 보이고 있다[22]. 본연구에서는 DR의 GOS 섬광체를 적용한 MTF가 50%와 10%에서 약간 우수한 해상력을 보여주었다. 이러한 해상력의 MTF를 이용한 영상 분석을 통해 DSLR 카메라와 DR 시스템은 실제 적용이 가능하다.

본 연구에서의 제한점은 첫째, 엣지 팬텀으로 해상력의 MTF를 실험적으로 영상을 획득하여 영상을 분석하였으나 인체를 대상으로 하는 실제 추가적인 실험이 필요하고, 둘째, 엑스선 조사에 의한 영상획득의 영상 평가에 대한 정량적인 평가 방법으로 CNR, SNR, NPS, DQE 등의 정량적인 분석의 연구가 추가적으로 필요하다. 셋째, 엑스선 노출에 따른 선량을 측정하여 DR 시스템과 DSLR 카메라 시스템에 대한 선량 평가가 요구된다. 넷째, 섬광체를 GOS 및 CSI:Tl을 이용하였으나 다양한 섬광체를 이용한 영상의 비교가 필요하고 [22], 마지막으로 DSLR 카메라 시스템을 이용하여 획득한 영상과 DR 영상을 영상의학과 전문의가 정성적인 비교를 통한 정성적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

엑스선을 이용하여 GOS 기반의 섬광체의 DR 시스템의 영상과 CMOS 기반의 DSLR 카메라 시스템을 이용하여 해상력을 MTF로 분석하여 평가하여 비교하였다. 결론적으로 디지털 엑스선 검사에서 GOS 기반의 DR 시스템과 CMOS 기반의 DSLR 카메라의 해상력에 따른 MTF의 비교를 통해 화질을 확인할 수 있다. 엑스선의 DR 시스템을 이용한 영상획득으로 임상에서 영상의 진단과 치료를 위한 적용과 응용을 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

참고문헌

1. Jung HW, Min JH, Kim JM, Park MS and Lee GY. 2012. Performance characteristic of a CsI (Tl) flat panel detector radiography system. *Journal of Radiological Science and Technology* **35**(2):109-117.
2. Lee SH and Kweon DC. 2020. An analysis and survey of patient care curriculum of radiological science undergraduate students. *Journal of Radiation Industry* **14**(4):335-341. https://10.23042/radin.2020.14.4.335.
3. Kim JA. 2010. Telehealth in the developing world. *Healthcare Informatics Research* **16**(2):140-141. https://doi.org/10.4258/hir.2010.16.2.140.
4. Kong C, Choi N, Jung M, Song J, Kim W and Han J. 2017. Image quality evaluation of CsI:Tl and Gd_2O_2S detectors in the indirect-conversion DR system. *Journal of the Korean Society of Radiology* **11**(1):27-35. https://10.7742/jksr.2017.11.1.27.
5. Bugby SL, Jambi LK and Lees JE. 2016. A comparison of CsI:Tl and GOS in a scintillator-CCD detector for nuclear medicine imaging. *Journal of Instrumentation* **11**(9): P09009. https://10.1088/1748-0221/11/09/P09009.
6. Seong YH. 2013. Evaluation of the spatial resolution for exposure class in computed radiography by using the modulation transfer function. *The Journal of Digital Policy & Management* **11**(8): 273-

279. https://10.14400/JDPM.2013.11.8.273.
7. Lee JW, Kweon DC, Choi J, Goo EH, Dong KR, Jung JE, Choi YS, Hwang SK, Kang HD and Chung WK. 2011. Evaluation of the response of the modulation transfer function to a computed radiography photostimulable phosphor imaging plate for various numbers of X-ray exposures. *Journal of the Korean Physical Society* **58**(2):326-333.
8. Dobbins JT, Ergun DL, Rutz L, Hinshaw DA, Blume H and Clark DC. 1995. DQE (f) of four generations of computed radiography acquisition devices. *Medical Physics* **22**(10):1581-1593. https://doi.org/10.1118/1.597627.
9. Granfors PR and Aufrichtig R. 2000. Performance of a 41×41 cm^2 amorphous silicon flat panel X-ray detector for radiographic imaging applications. *Medical Physics* **27**(6):1324-1333. https://doi.org/10.1118/1.1609151.
10. Panna A, Gomella AA, Harmon KJ, Chen P, Miao H, Bennett EE and Wen H. 2015. Performance of low-cost X-ray area detectors with consumer digital cameras. *Journal of Instrumentation*. https://10:T05005.10.1088/1748-0221/10/05/T05005.
11. Hejazi S and Trauernicht DP. 1997. System considerations in CCD-based X-ray imaging for digital chest radiography and digital mammography. *Medical Physics* **24**(2):287-297. https://doi.org/10.1118/1.598072.
12. Fan H, Durko HL, Moore SK, Moore J, Miller BW, Furenlid LR, Pradhan S and Harrison HH. 2010. DR with a DSLR: digital radiography with a digital single-lens reflex camera. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. 7622. 76225E. https://doi.org/10.1117/12.844056.
13. Nguyen VG. 2021. Digital radiography with a consumer camera: Imaging denoising and deblurring. *IEIE Transactions on Smart Processing and Computing* **10**(5):398-406. https://doi.org/10.5573/IEIESPC.2021.10.5.369.
14. Chavarria M, Huser M, Blanc S, Monnin P, Schmid J, Chênes C, Assassi L, Blanchard H, Sahli R, Thiran JP, Salathé R and Schönenberger K. 2022. X-ray imaging detector for radiological applications adapted to the context and requirements of low- and middle-income countries. Review of Scientific Instruments. 93. 034102. https://doi.org/10.1063/5.0077985.
15. Marks IH, Thomas H, Bakhet M and Fitzgerald E. 2019. Medical equipment donation in low-resource settings: a review of the literature and guidelines for surgery and anaesthesia in low-income and middle-income countries. BMJ Global Health 4. e001785. https://doi: 10.1136/bmjgh-2019-001785.
16. Vassallo DJ, Swinfen P, Swinfen R and Wootton R. 2001. Experience with a low-cost telemedicine system in three developing countries. *Journal of Telemedicine and Telecare* **7**(1):56-58. https://doi.org/10.1177/1357633X010070S123.
17. Kuhls-Gilcrist A, Jain A, Bednarek DR, Hoffmann KR and Rudin S. 2010. Accurate MTF measurement in digital radiography using noise response. *Medical Physics* **37**(2):724-735. https://doi:10.1118/1.3284376.
18. You BG, Kweon DC and Lee JS. 2007. MTF evaluation and clinical application according to the characteristic kernels in the computed tomography. *Korean Journal of Medical Physics* **18**(2):55-64.
19. Lee JY, Lee KC and Kweon DC. 2023. X-ray-acquired imaging and detection radiography system using digital radiography with a DSLR digital camera: preliminary results of a pilot study. *Radiation Effects and Defects in Solids* **178**(5-6):654-667. https://doi.org/10.1080/10420150.2023.2166835.
20. Cho HM, Kim HJ, Nam S, Lee CL and Jung JY. 2007. Construction and performance evaluation of digital radiographic system. *Korean Journal of Medical Physics* **18**(3):144-148.
21. Kocaman S, Yalcin I and Guler M. 2016. Radiometric and geometric accuracy analysis of RATSAT pan imagery. The International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLI-B1:349-353. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B1-349-2016.
22. Kong C, Choi N, Jung M, Song J, Kim W and Han J. 2017. Image Quality Evaluation of CsI:Tl and Gd_2O_2S Detectors in the Indirect-Conversion DR System. *Journal of the Korean Society of Radiology* **11**(1):27-35. https://doi.org/10.7742/jksr.2017.11.1.27.