

# Evaluation of the Filling Sodium States Inside the Fuel rod of Sodium-Cooled Fast Reactor by Optimized Spatial Resolution in Medical Digital Radiographic Images

Youl-Hun Seoung

Department of Radiological Science, Cheongju University

Received: February 11, 2016. Revised: February 20, 2016. Accepted: February 29, 2016.

## ABSTRACT

The purpose of this study was tried to evaluate the filling sodium states inside the fuel rod of sodium-cooled fast reactor by digital medical X-ray. We used the diagnostic X-ray generators in digital radiography (DR). This study have found the optimal conditions by changing the effective focal spot size of X-ray tube and post-processing of the DR method with a tungsten edge plate in order to ensure excellent sharpness At this time, the sharpness and resolution were evaluated using the MTF (modulation transfer function). As a result, this study obtained a spatial resolution of 3.871 lp/mm (0.1 MTF), 3.290 lp/mm (0.5 MTF) when implemented the contrast strengthen post-processing in small focal spot. In this research, the result is able to evaluate the level of sodium inside the fuel rod by using the diagnostic X-ray generators in medical digital radiographic images.

Keywords: Sodium-cooled fast reactor, Filling sodium states, Digital radiography, Modulation transfer function, Spatial resolution

## I. INTRODUCTION

원자력 에너지는 1953년 미국의 아이젠하워 대통령이 유엔총회에서 원자력 에너지의 평화적 이용을 촉구한 이후 인류의 동력원으로 매우 중요한 기술로 발전하였다.<sup>[1,2]</sup> 2000년 이후 국제원자력기구(international atomic energy agency, IAEA)의 주도로 경제적이고 안전하며, 지속가능하고 핵확산 저항성을 갖춘 제4세대 원자력(generation IV)로 개발이 추진되었다.<sup>[3-6]</sup> 소듐냉각고속로(sodium-cooled fast reactor, SFR)는 제4세대 원자로 중 하나로 기존의 경수로와는 달리 사용 후 핵연료를 재순환하여 사용함으로써 경수로의 사용 후 핵연료 처분 문제를 해결할 수 있는 원자로시스템이다.<sup>[7,8]</sup> 소듐냉각고속로는 고방사성 장수명 핵종인 초우라늄원소를 안정적이고 반감기가 짧은 단수명 핵종으로 핵변환시키는 것이 가능하다. 핵변환을 통한 고준위 폐기물

처분량과 방사성 독성의 획기적인 감소는 장기적 원자력에너지 이용확대에 따른 후손의 부담을 경감하며, 환경에 대한 관심이 점점 커지고 있는 요즘 환경친화성과 대중의 수용성을 한층 높이는데 기여하고 있다. 특히, 원자력 에너지 의존성이 큰 국내에서는 한국원자력연구원(Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI)에서 2001년 150 MWe급 소형 SFR 노심의 개념 설계를 시작으로 2006년 600 MWe급인 KALIMER-600 노심 설계를 완성하여 독창적인 개념의 원자로로서 인정받고 있으며 2028년까지 원형로 수준의 소듐냉각고속로 건설을 목표로 하고 있다.<sup>[9]</sup> 소듐냉각고속로의 냉각재인 소듐은 지구상에서 6번째로 많은 금속으로 조달이 편리하며, 구조재 및 피복관 재료와의 우수한 양립성을 보유해 고온부식을 걱정할 필요가 없다. 또한 밀도가 물보다 작고 열전도가 물보다 120배 높아 대형원전 개발과 먼진설계 적용이 용이한 장점이 있다. 소듐

냉각고속로에서 사용하게 될 금속 우라늄 연료봉은 피폭관 내부에 소듐을 충전하여 냉각시키는 금속연료이므로 소듐의 장입이 제조과정에서 중요한 공정 중 한 부분이다. 따라서 금속 연료봉의 연료심과 피복관 사이의 틈새와 연료심 상단부로부터 일정거리의 위치까지 소듐이 충전된 상태를 확인하여야 한다. 그러나 소듐냉각고속로의 연료봉 내부 관찰은 육안적으로 불가능하다. 이러한 내부결함검사는 X선이나 감마선을 이용한 비파괴검사법으로 이용할 수 있으나 저용량의 산업용 X선 비파괴검사법으로는 내부결함 상태를 확인하기가 어려웠다.<sup>[10]</sup>

따라서 본 연구에서는 연료봉 내부에 존재하는 소듐의 기포 및 형상, 준위를 분석하고 소듐의 충전 상태를 평가할 수 있도록 의료용 디지털방사선영상의 공간분해능을 최적화하고자 하였다.

## II. MATERIALS AND METHODS

### 1. 장비 및 재료

본 실험에서 사용한 소듐냉각고속로의 금속 연료봉은 길이 990 mm, 지름 7.5 mm, 피복관 두께는 1.0 mm, 연료심 지름은 5.5 mm로 구성되어 있으며 스테인레스강 소재로 되어 있다. 금속 연료봉의 내부를 2차원적으로 투사하기 위하여 의료 진단용 X선 발생장치(M XHF-1500R, MIS, Geumsna, Korea)를 이용하였다. 진단용 X선 발생장치의 양극 타겟 각도는 12°, 고유여과는 0.9 mmAl, 부가여과는 2.4 mm Al으로 총 여과는 3.3 mm Al이며 관전압 사용범위는 40 kVp에서 150 kVp까지이며, 관전류 사용범위는 10 mA에서 630 mA까지이다. 공간분해능 측정을 위한 실험기구는 100.0(w)×75.0(d)×1.0(h) mm 크기의 직사각형 모양으로 순도 90% 이상의 텅스텐을 이용하였다. 디지털방사선영상(digital radiography, DR, CXDI-401G Compact, Canon, Japan) 시스템은 Table 1과 같은 사양으로 구성된 X선 영상획득의 검출기와 검출된 영상신호를 디지털표준의료영상(digital imaging and communications in medicine, DICOM) 파일로 변환하고 대조도와 선예도 등의 디지털 후처리를 할 수 있는 워크스테이션(workstation)으로 이루어져 있다.

Table 1. Specification of digital detector

Items	Values
Number of pixels	11,300,000
Image Size	17" × 17"
Scintillator	GOS (Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S:Tb)
Bit Depth	14 bit
Pixel Size	125 μm

### 2. 영상 획득

본 실험에서 사용한 소듐냉각고속로의 금속 연료봉은 길이가 검출기보다 길기 때문에 3등분으로 나누어 영상을 획득하였다. Fig. 1과 같이 그리드 없이 금속 연료봉을 검출기 위에 올려놓은 후 X선과 금속 연료봉의 상호작용에 의한 2차 산란선을 제거하기 위한 3 mm 두께의 납판으로 연료봉 주변을 차폐한 후 X선을 70 kVp, 3.5 mA로 조사하였다. 소듐냉각고속로의 금속 연료봉 내 소듐충전상태의 윤곽선을 관찰하기 위해 X선 조사 전 X선관의 실효초점 크기와 디지털방사선시스템의 영상후처리 방법을 달리하면서 고 공간분해능의 최적화 작업을 실시하였다. 그리고 도출된 결과 값을 바탕으로 X선 조사조건을 설정한 후 소듐냉각고속로의 금속 연료봉 내 소듐의 충전 X선 영상을 획득하였다.

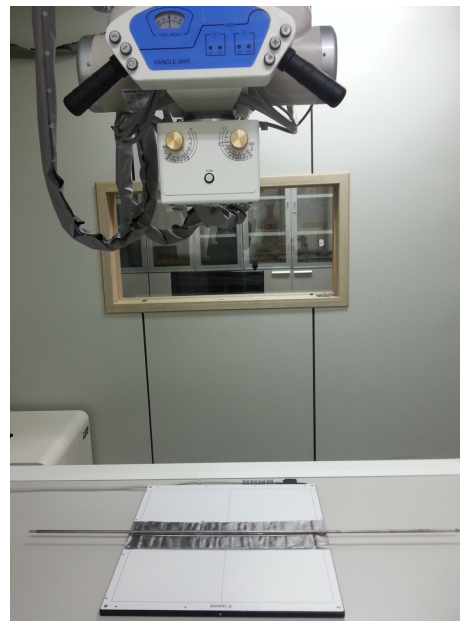


Fig. 1. Experimental set-up for the sodium-cooled fast reactor by digital radiography.

### 3. 공간분해능 최적화

공간분해능에 기하학적으로 영향을 줄 수 있는 X선관의 0.6 mm 소초점과 1.2 mm 대초점으로 획득된 영상은 look up table (LUT)을 선형으로 변환한 후 DR 제조사의 검출기 워크스테이션에서 제공하는 영상후처리(post-processing) 기능 중 대조도를 조절하는 contrast boost와 선예도를 조절하는 edge enhancement를 0 부터 20 까지 각각 2 단계씩 높이면서 총 242 가지의 영상에서 가장 높은 공간분해능을 구하였다.

공간분해능 평가법으로는 에지(edge) 방법의 변조전달함수(modulation transfer function, MTF)를 이용하였다. 이때 에지는 텅스텐판의 슬릿 각도를 약 2° 정도로 조절하였다.<sup>[11]</sup> 그리고 텅스텐판 양측에 납차폐체를 설치하여 2차 산란선에 의한 영향을 최소화하였다. 측정된 MTF곡선에서 선예도를 나타내는 0.5 MTF와 해상력을 나타내는 0.1 MTF의 값을 측정하여 획득된 영상 중에서 최대값으로 최적화하였다. Fig. 2와 같이 X선원과 검출기의 거리는 100 cm로 하고 X선 조사조건을 관전압 70 kVp, 관전류량 1 mAs로 설정하였다.

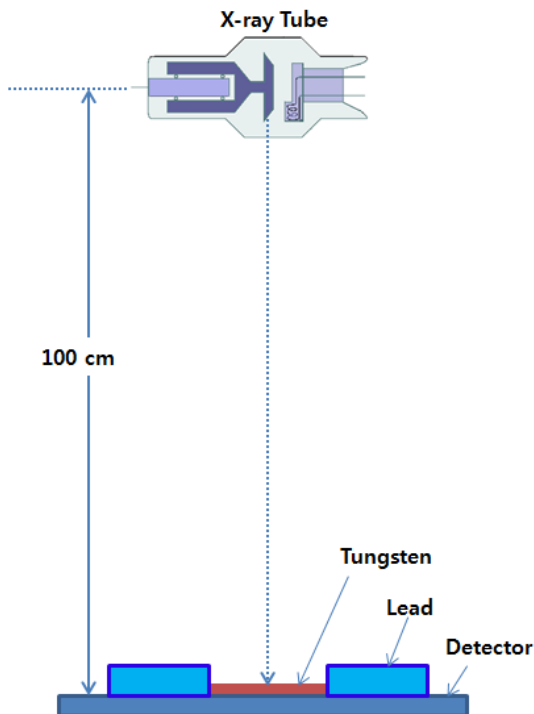


Fig. 2. Experimental set-up for edge method of MTF.

획득된 영상들은 미국 국립보건원(national institutes of health, NIH)에서 공인된 영상분석 프로그램인 image J (ver. 1.47, National Institutes of Health, USA)를 이용하여 Fig. 3과 같이 텅스텐 edge 부분의 영상에 측정 관심영역(region of interest, ROI)을 설정하고 ESF를 측정하였다. 측정된 ESF는 Originpro ver. 8.0 software (OriginLab Corp, Northampton, MA, USA)를 사용하여 미분하고 합성하여 line spread function (LSF)을 만들었다. 도출된 LSF는 고속 푸리에 변환(fast fourier transform, FFT)한 후 절대값의 MTF를 구하였다.<sup>[12]</sup>

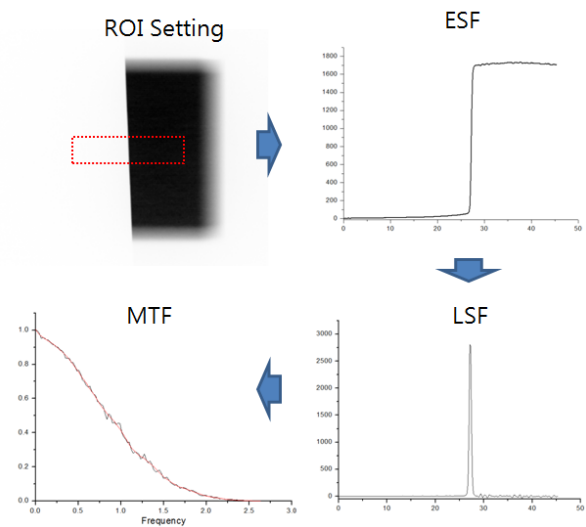


Fig. 3. The MTF was computed by performing the FFT of the LSF, LSF was calculated ESF by extracted the ROI from edge method.

## III. RESULTS

### 1. 공간분해능 최적화 결과

본 실험에서는 MTF를 이용하여 소초점과 대초점을 디지털방사선시스템의 영상후처리 방법에 따라 선예도(0.5 MTF)와 해상도(0.1 MTF)를 평가하여 Table 2와 같은 MTF 결과 값을 얻었다. 디지털 영상후처리 최적화는 대초점에서 contrast boost를 2, edge enhancement를 8로 조절했을 때 0.1 MTF 값이 3.826 lp/mm, 0.5 MTF 값이 2.991 lp/mm로 가장 우수하였고, 소초점에서는 contrast boost를 12, edge enhancement를 0로 조절했을 때 0.1 MTF 값이 3.871 lp/mm, 0.5 MTF 값이 3.290 lp/mm로 가장 우수하였으며 대초점보다 소초점에서 0.1 MTF와

0.5 MTF 모두 공간분해능이 향상되었다.

Table 2. The results of the MTF in accordance with change of focal spot sizes in X-ray tube with digital post-processing at DR system

Edge Enhancement	Contrast Boost	Large focal spot (1.2 mm)		Small focal spot (0.6 mm)	
		0.5 MTF (lp/mm)	0.1 MTF (lp/mm)	0.5 MTF (lp/mm)	0.1 MTF (lp/mm)
0	0	2.949	3.821	2.768	3.744
	2	2.898	3.795	3.107	3.845
	4	2.682	3.705	3.053	3.842
	6	2.730	3.723	3.281	3.865
	8	2.672	3.701	2.896	3.792
	10	2.587	3.667	3.275	3.868
	12	2.667	3.688	3.290	3.871
	14	2.657	3.686	2.922	3.797
	16	2.681	3.681	2.935	3.806
	18	2.463	3.563	2.882	3.790
2	20	2.648	3.669	2.882	3.795
	0	2.619	3.669	3.247	3.871
	2	2.638	3.667	2.924	3.798
	4	2.841	3.778	2.974	3.812
	6	2.676	3.676	2.831	3.769
	8	2.610	3.631	2.960	3.808
	10	2.843	3.769	2.902	3.803
	12	2.653	3.653	2.927	3.789
	14	2.711	3.719	2.938	3.797
	16	2.766	3.731	2.983	3.814
4	18	2.696	3.719	2.873	3.794
	20	2.648	3.676	2.898	3.795
	0	2.868	3.783	3.026	3.826
	2	2.638	3.667	3.046	3.835
	4	2.738	3.738	2.927	3.805
	6	2.653	3.646	2.911	3.805
	8	2.710	3.725	2.864	3.792
	10	2.746	3.731	3.071	3.839
	12	2.662	3.683	2.887	3.790
	14	2.756	3.733	2.806	3.767
4	16	2.871	3.786	2.871	3.790
	18	2.712	3.727	2.871	3.790
	20	2.726	3.719	2.949	3.814

6	0	2.519	3.585	2.891	3.797
	2	2.584	3.636	2.891	3.797
	4	2.571	3.584	3.101	3.835
	6	2.596	3.603	2.966	3.814
	8	2.471	3.608	2.846	3.785
	10	2.604	3.624	3.130	3.852
	12	2.723	3.723	2.959	3.805
	14	2.681	3.681	2.951	3.803
	16	2.745	3.725	2.935	3.806
	18	2.591	3.624	2.887	3.790
8	20	2.784	3.760	3.000	3.817
	0	2.625	3.639	3.053	3.825
	2	2.991	3.826	2.873	3.778
	4	2.680	3.673	2.919	3.806
	6	2.654	3.660	2.846	3.769
	8	2.608	3.608	2.947	3.802
	10	2.629	3.671	3.081	3.838
	12	2.667	3.667	2.934	3.803
	14	2.658	3.651	2.841	3.778
	16	2.482	3.660	2.878	3.789
10	18	2.733	3.733	2.886	3.786
	20	2.708	3.681	2.848	3.776
	0	2.570	3.608	2.763	3.740
	2	2.653	3.694	2.827	3.759
	4	2.859	3.772	2.806	3.755
	6	2.667	3.688	3.000	3.814
	8	2.490	3.605	2.839	3.774
	10	2.643	3.664	2.866	3.780
	12	2.790	3.758	2.891	3.797
	14	2.681	3.696	2.991	3.812
12	16	2.708	3.736	2.769	3.754
	18	2.643	3.664	2.824	3.779
	20	2.699	3.692	2.848	3.776
	0	2.645	3.658	2.797	3.766
	2	2.618	3.618	2.918	3.803
	4	2.737	3.729	2.983	3.817
	6	2.768	3.739	2.929	3.795
	8	2.662	3.704	3.000	3.825
	10	2.710	3.725	2.912	3.792
	12	2.672	3.693	2.840	3.771
12	14	2.658	3.664	3.017	3.831
	16	2.629	3.678	3.061	3.826
	18	2.841	3.778	3.151	3.849
	20	2.685	3.692	2.912	3.792

14	0	2.724	3.748	2.809	3.771
	2	2.779	3.756	3.138	3.853
	4	2.715	3.723	2.975	3.815
	6	2.686	3.714	3.119	3.853
	8	2.583	3.611	3.138	3.853
	10	2.658	3.671	2.869	3.787
	12	2.681	3.681	2.873	3.794
	14	2.721	3.721	2.915	3.797
	16	2.552	3.628	3.063	3.838
	18	2.706	3.721	2.850	3.780
20	2.667	3.654	2.924	3.798	
16	0	2.559	3.618	3.118	3.843
	2	2.788	3.758	2.983	3.810
	4	2.864	3.776	3.216	3.856
	6	2.930	3.798	3.168	3.861
	8	2.756	3.733	3.196	3.856
	10	2.808	3.775	3.269	3.871
	12	2.782	3.759	3.154	3.846
	14	2.624	3.631	3.093	3.833
	16	2.682	3.727	3.143	3.848
	18	2.783	3.754	3.000	3.807
20	2.757	3.730	3.154	3.846	
18	0	2.617	3.664	2.880	3.792
	2	2.734	3.727	3.017	3.828
	4	2.713	3.706	3.081	3.838
	6	2.676	3.662	2.909	3.802
	8	2.895	3.790	2.991	3.812
	10	2.619	3.613	2.937	3.810
	12	2.815	3.745	2.896	3.792
	14	2.789	3.737	2.873	3.794
	16	2.713	3.734	3.044	3.823
	18	2.752	3.718	3.113	3.849
20	2.580	3.609	2.967	3.817	
20	0	2.662	3.708	2.763	3.740
	2	2.676	3.697	2.828	3.766
	4	2.662	3.683	2.957	3.809
	6	2.813	3.766	2.885	3.787
	8	2.642	3.701	3.184	3.845
	10	2.901	3.789	2.738	3.754
	12	2.807	3.765	3.168	3.842
	14	2.992	3.817	2.816	3.760
	16	2.722	3.736	3.204	3.845
	18	2.662	3.656	3.204	3.857
20	2.529	3.643	2.924	3.798	

## 2. 소듐냉각고속로의 금속 연료봉 X선 영상 분석

Fig. 4(a)는 대초점을 사용하고 영상후처리를 최소화 하지 않은 기본 설정값으로 소듐냉각고속로의 금속 연료봉 내부 영상을 획득한 X선 영상이다. X선 영상을 분석하면 연료봉 내부의 선예도가 떨어져 소듐의 충전 상태를 관찰하기 어려웠으며 금속 연료봉 피폭관의 윤곽선에서는 퍼짐현상이 보이고 있었다. 반면 Fig. 4(b)는 소초점을 사용하고 영상후처리의 contrast boost를 1, 2, edge enhancement를 0로 조절했을 때 획득한 소듐냉각고속로의 금속 연료봉 X선 영상이다. 금속 연료봉 내부가 Fig. 4(a) 보다 상대적으로 선명하게 보였으며 특히 노란색 활살표로 표시된 소듐의 충전상태가 잘 관찰되었다.

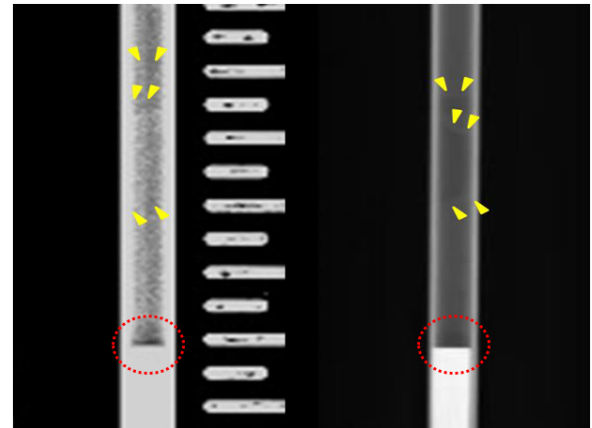


Fig. 4. The images shown the level of sodium inside the fuel rod (yellow arrow) by digital X-ray images (a) the acquired X-ray image by the large focal spot and not post-processing (b) the acquired X-ray image by the small focal spot and post-processing

## IV. DISCUSSION

본 연구에서는 연료봉 내부에 장전된 소듐의 충전 상태를 관찰할 수 있도록 의료용 디지털방사선영상시스템을 이용하여 연료봉 내부에 존재하는 소듐의 기포 및 형상, 준위를 X선으로 이용하여 2차원 영상으로 분석하고 평가하고자 하였다. 소듐의 충전 상태를 잘 보기 위해서는 소듐의 적층 윤곽선이 잘 보여야 하기 때문에 MTF를 이용하여 공간분해능을 최적화하고자 하였다. 특히 기하학적으로 영향을 줄 수 있는 X선 초점 크기 변화와 디지털 영상 후처리 방법에 변화를 주었다.

윤곽선부분을 강조하기 위한 edge enhancement와 소듐 주변 물질에 대한 농도를 변화시키는 contrast boost를 조절하면서 최상의 공간분해능을 획득한 후 금속 연료봉 내부의 소듐을 관찰하였다. 이를 위해 본 연구에서는 일반적으로 IEC62220-1을 기준으로 X선 영상에서 가장 널리 사용하는 에지방법의 MTF를 사용하였다. 그러나 본 실험에서는 공간분해능 평가에만 한정되었기 때문에 양자검출효율(detective quantum efficiency, DQE)을 구하기 위한 21 mmAl 부가필터를 사용하지 않았으며 검출기와 X선관의 거리를 150 cm으로 설정하지 않고 일반적인 의료영상 획득방법과 동일하게 100 cm으로 설정하였다.

본 연구와 같이 초점 크기 변화와 영상후처리에 대한 MTF를 평가한 선행 연구는 컴퓨터방사선영상(computed radiography, CR)시스템을 이용한 연구가 있었지만<sup>[13]</sup> 최근 의료현장에서는 DR이 더 널리 사용하는 경향을 보이고 있기 때문에 DR을 이용하여 소듐냉각고속로의 금속 연료봉 내부를 평가하였다. 이러한 선행 연구와 비교하면 대조점보다는 소조점이 공간분해능이 우수하다는 결과는 동일하였다. 하지만 DR에서의 공간분해능이 CR보다 우수하였다. 이는 선행연구에서 사용된 CR에서의 디지털 샘플링 간격이 150  $\mu\text{m}$ 인 반면 본 실험에서 사용된 DR은 125  $\mu\text{m}$ 로 더 작기 때문에 공간분해능이 우수한 것으로 판단된다. 또한 X선 영상에 대한 MTF 평가는 전 처리하지 않은 원시데이터를 사용하지만<sup>[14,15]</sup> 본 실험에서는 소듐냉각고속로의 금속 연료봉 내부를 관찰하기 위한 최적의 조건을 구하는 것이 목적이기 때문에 영상후처리를 시도하였다.

그 결과 디지털 영상후처리 방법은 선행 연구에서 사용된 CR과 본 실험에서 사용된 DR 모두 공간분해능에 영향을 주고 있음을 확인하였지만 영상후처리 알고리즘에 따라 다르기 때문에 정량적으로 비교 분석하기에는 적절하지 못한 한계점이 있었다. 그럼에도 불구하고 본 실험에서 제시한 대조도분해능 강화 디지털 영상후처리 방법은 소듐 충전상태의 농도 차를 높임으로서 소듐의 윤곽선이 상대적으로 분명하게 묘출되는 것으로 판단된다. 그리고 금속연료봉과 X선과의 상호작용으로 나타날 수 있는 산란선을 최소화하기 위해 연료봉주변을 3 mm 두께의 납으로 차폐하였다. 산란선은 2차 X선으로 포그(fog)를 유발할 수 있으며 영상의 대조도 분해능을

저하시키기 때문에 제거해야 한다. 그러나 연료봉 내부에서 발생하는 산란선은 제거가 어렵다. 이러한 사례는 Fig. 4(빨간 원형점선)에서 금속 연료봉 내부의 연료심과 소듐사이 경계면이 어둡게 보이는 현상이 발견되었다. 이는 연료심을 투과한 X선이 경화되어 발생된 산란선이 소듐이 있는 영역에 영향을 미친것으로 판단된다.

따라서 경계면에서의 소듐 충전 상태를 관찰하기 위해서는 단면영상을 획득할 수 있는 전산화단층영상(Computed Tomography, CT)장비를 사용하는 것이 적절할 것으로 판단되며 향후 이에 대한 추가연구가 필요할 것이다. 또한 본 연구에서는 일개 제조사의 DR을 대상으로 한 제한점이 있다.

## V. CONCLUSIONS

본 연구에서는 기존의 산업용 X선 발생장치에서 관찰이 어려웠던 금속연료봉내의 소듐 충전상태를 의료용 X선 발생장치에서 관측할 수 있도록 X선 초점크기와 디지털 영상후처리 기법을 다음과 같이 제안하였다.

1. 대조점보다는 소조점의 0.1 MTF(3.871 lp/mm)와 0.5 MTF(3.290 lp/mm) 모두 공간분해능이 우수하여 소듐의 충전상태를 관찰하는데 용이하였다.
2. 디지털방사선시스템의 영상후처리에서 대조도 분해능을 높임으로서 소듐의 충전상태를 더 선명하게 획득할 수 있었다.
3. 향후 소듐냉각고속로의 금속연료봉 내부의 소듐 충전상태 관찰에 의료용 디지털방사선영상시스템이 유용하게 사용될 수 있으리라 기대한다.

## References

- [1] [http://en.wikipedia.org/wiki/Atoms\\_for\\_Peace](http://en.wikipedia.org/wiki/Atoms_for_Peace)
- [2] [http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_power](http://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power)
- [3] [http://en.wikipedia.org/wiki/Generation\\_IV\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Generation_IV_reactor)
- [4] <http://www.iaea.org/INPRO>
- [5] Report of Phase 1A of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), "Guidance for the evaluation of innovative nuclear reactors and fuel cycles", IAEA-TECDOC-1362, International Atomic Energy Agency, 2003.

- [6] M. K. Lee, "Study on the progress of international generation IV nuclear energy systems project and formulation R&D policy", Graduate School of Pusan National University, 2007.
- [7] J. Y. Lim, K. Y. Lee, M. H. Kim, "Nuclear core design and performance evaluation of a Pb-Bi Cooled transmutation fast reactor", The journal of industrial liaison research institute, Vol. 13, No. 1, pp. 1-7, 2007.
- [8] J. M. Ryskamp, "A Technology roadmap for generation IV nuclear energy systems", Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, US-DoE and GIF, 2002.
- [9] Y. I. Kim, Y. B. Lee, C. B. Lee, J. W. Chang, C. W. Choi, "Design concept of advanced sodium-cooled fast reactor and related R&D in Korea", Science and Technology of Nuclear Installations, Vol. 2013, pp. 1-8, 2013.
- [10] S. J. Oh, S. H. Kim, H. J. Jeon, K. H. Kim, C. B. Lee, "Analysis of neutrons radiography in SFR simulated metal fuel core fault", Korean Radioactive Waste Society, Vol. 10, No. 2, pp. 129-130, 2012. in Korean.
- [11] H. Fujita H, D. Y. Tasi, J. Morishita, K. Ueda, A. Ohtsuka, "A simple method for deterring the modulation transfer function in digital radiography", Medical Imaging, IEEE Transactions, Vol. 11, No. 1, pp. 34-39, 1992.
- [12] Y. H. Seoung, "Evaluation of the Spatial Resolution for Exposure Class in Computed Radiography by Using the Modulation Transfer Function", Journal of Digital Convergence, Vol. 11, No. 8, pp.273-279, 2013.
- [13] Y. H. Seoung, "Quantitative Analysis of Spatial Resolution for the Influence of the Focus Size and Digital Image Post-Processing on the Computed Radiography", Journal of Digital Convergence, Vol. 12, No. 11, pp.407-414, 2014.
- [14] H. W. Cho, K. S. Chon, "Change of MTF for Sampling Interval in Digital Detector", Journal of the Korea Society of Radiology, Vol. 8, No. 5, pp. 224-230, 2014.
- [15] B. S. Kang, "Development of Image Quality Evaluation Program for Digital Diagnostic Radiography", Journal of the Korea Society of Radiology, Vol. 2, No. 2, pp. 5-10, 2008.

## 의료용 디지털방사선영상의 공간분해능 최적화에 의한 소듐냉각고속로 연료봉 내부의 소듐 충전상태 평가

성열훈

청주대학교 방사선학과

### 요약

본 연구에서는 디지털 의료용 X선을 이용하여 소듐냉각고속로 금속연료봉 내부의 소듐 충전상태를 평가하고자 하였다. 의료용 X선은 디지털방사선(digital radiography, DR)시스템을 사용하였다. 최상의 공간분해능을 도출하기 위해 X선관의 초점크기와 디지털영상후처리 방법을 변화시켰다. 이때 텅스텐을 이용한 예지방법의 변조전달함수(modulation transfer function, MTF)를 사용하여 선예도(0.5 MTF)와 해상도(0.1 MTF)를 평가하였다. 그 결과 소초점에서 영상후처리의 대조도를 강화시킨 조건에서 3.871 lp/mm (0.1 MTF)와 3.290 lp/mm (0.5 MTF)의 공간분해능을 얻었다. 결론적으로 이러한 결과는 디지털 의료용 X선을 이용하여 소듐냉각고속로 금속연료봉 내부의 소듐 충전상태를 관찰할 수 있었다.

중심단어: 소듐냉각고속로, 소듐 충전상태, 디지털방사선, 변조전달함수, 공간분해능