

논문 2017-54-3-8

# 방사선 디텍터의 Noise Power Spectrum :

## II. Spectrum의 평균을 통한 측정

### (Noise Power Spectrum of Radiography Detectors: II. Measurement Based on the Spectrum Averaging)

이 은 애\*, 김 동 식\*\*

(Eunae Lee<sup>©</sup> and Dong Sik Kim)

#### 요 약

NNPS(normalized noise power spectrum)는 획득한 x선 영상에서 평판형 방사선 디텍터의 잡음 특성을 spectrum을 관찰하기 위해 측정한다. 그러나 NNPS 측정은 획득한 영상에 따라 일관적이지 못한 성질을 가지고 있어서 안정된 측정이 필요하다. 디텍터의 NNPS 측정은 표본 periodogram을 구하여 평균을 내는 방법을 사용하는데, 일반적으로 표본의 개수를 충분히 늘리면 정확하면서 안정된 값을 구할 수 있다. 본 논문에서는 periodogram과 같은 표본 spectrum의 평균으로 유한한 개수의 영상이 주어졌을 때 일관적이고 효율적인 NNPS 값을 제공 할 수 있는 두 가지 방법을 제안하고 그 성능을 비교하고 분석했다. 실제 두 종류의 방사선 디텍터로부터 획득한 x선 영상을 사용하여 제안한 방법을 실험하였으며, 주어진 영상을 사용하여 표본 spectrum의 최대 가지 수를 갖는 조합으로 NNPS를 구하고 평균을 내는 방법이 기존 방법에 비하여 안정된 NNPS 측정이 가능함을 보였다.

#### Abstract

In order to observe the noise property of the flat-panel digital radiography detector, measuring the normalized noise power spectrum (NNPS) from acquired x-ray images is conducted. However, the conventional NNPS measurement has an unstable property depending on the acquired image. Averaging the sample periodograms of the input image is usually performed to estimate the NNPS values and increasing the number of samples can provide a reliable NNPS measurement. In this paper, for a finite number of images, two measurement methods, which are based on averaging spectra, such as the image periodogram, are proposed and their performances are analyzed. Using x-ray images acquired from two types of radiography detectors, the two spectrum averaging methods are compared and it is shown that averaging spectra based on the maximal number of combinations of the image pairs provides the best performance in measuring NNPS.

**Keywords :** Noise power spectrum, periodogram, radiography detector

\* 학생회원, 한국외국어대학교(Hankuk University of Foreign Studies)

\*\* 정회원, 한국외국어대학교 (Hankuk University of Foreign Studies)

© Corresponding Author(E-mail : dskim@hufs.ac.kr)

※ 본 논문은 2017학년도 한국외국어대학교 학술연구비 지원에 의해서 연구되었음.

Received ; October 17, 2016    Revised ; December 31, 2016

Accepted ; February 27, 2017

## I. 서 론

윈트겐에 의해 발견된 x선은 의료 및 산업 분야에서 영상의 획득을 위하여 최근까지도 감광용 필름과 증감지를 활용한 아날로그 방식의 방사선 영상 진단에 활용되고 있다.<sup>[1]</sup> 필름으로 획득한 영상은 아날로그만이 가

질 수 있는 양질의 영상 품질을 제공하지만, 영상을 얻기 위한 화학적 처리, 영상의 후처리, 필름의 보관 및 의료 정보 공유 등에 있어서 치명적인 단점들을 가지고 있다. 필름의 단점을 보완하기 위하여 CR (computed radiography)이라는 영상판(image plate)을 사용한 장비가 활용되기 시작했는데, 이 또한 사용자가 촬영 후 영상판에 저장된 영상 정보를 획득하기 위해 카세트 리더기에 삽입 하고 레이저 및 이동장치를 이용하여 스캔한 다음 디지털 영상 정보를 저장한다. 하지만 영상판을 재활용하기 위해서는 영상판에 기억되어 있는 정보를 제거해야하며, 이를 위하여 얼마간의 시간이 소요된다. 결과적으로 CR 시스템 또한 영상의 디지털 획득은 가능하나 필름 방식과 마찬가지로 효율적이지 못한 단점을 가지고 있다. 그러므로 디지털 영상을 직접 획득할 수 있는 DR(digital radiography) 방식의 방사선 디텍터가 활발히 연구, 개발되어 보급되고 있다.<sup>[2]</sup> DR 방식에는, 여러 가지 새로운 방식이 제시가 되었는데, CCD (charge-coupled device) 디텍터와 평판형 디텍터 등이 있다. CCD는 물리적 구조로 인한 공간 분해능의 저하 등의 단점으로 인하여 널리 사용되지 못하지만, a-Si (amorphous-silicon) 기반의 TFT (thin film transistor)를 사용한 평판형 디텍터 방식은 여러 장점으로 인하여 널리 사용된다. TFT 평판형 디텍터에는 x선 검출 방법에 있어서 간접방식과 직접방식이 있다. 간접방식 디텍터는 x선 광자를 일차적으로 가시광선 광자로 변환하고, CsI (cesium iodide)와 같은 scintillator에서 TFT위에 형성된 광다이오드 (photodiode)에 의해 간접적으로 전하로 변환시킨다. 이러한 전하는 TFT와 ROIC (readout integrated circuit)를 통하여 전압 신호로 변환된 후 디지털 신호로 변환된다. 이와는 다르게 직접 방식은 a-Se (amorphous selenium)에 의해 x선 광자를 직접적으로 전하로 변환하므로 간접 방식보다 상대적으로 낮은 잡음과 공간 분해능이 우수하다.<sup>[3]</sup>

이와 같은 디지털 방사선 디텍터의 성능을 평가하기 위해서는 주파수 응답 특성을 관찰하기 위한 MTF (modulation transfer function)와 잡음 특성을 관찰하기 위한 NPS (noise power spectrum)를 정량적으로 측정하여 평가한다.<sup>[4-5]</sup> 이러한 평가 인자들을 사용하여 구하는 복합 평가 지표로 DQE (detective quantum efficiency)를 일반적으로 사용하는데,<sup>[5]</sup> 정확하고 일관적인 DQE 값을 계산하기 위해서는 디지털 방사선 디텍터의 MTF와 NPS의 값을 안정적으로 측정해야 한다. 그러나 특히 NPS의 경우 획득한 영상에 따라서 전혀 다른 NPS

값들이 측정되거나 잡음이 섞여서 일관적인 값을 측정하기 어렵다.

본 논문에서는 평가 인자 중 NNPS(normalized NPS)를 주어진 유한한 개수의 영상을 사용하여 안정적이고 효율적으로 구하는 방법을 고찰하였다. 다수의 획득한 X선 영상으로부터 표본 periodogram 들을 구하고 이들을 평균 내는 방법으로 NNPS를 추정한다.<sup>[6-7]</sup> 따라서 안정된 NNPS 값을 구하기 위해서는 가능한 많은 표본 periodogram을 구하여 평균을 낼 필요가 있다. 본 논문에서는 이렇게 표본 periodogram의 평균을 내는 원리에 기초하여 다수의 영상에서 구한 NNPS를 다시 평균을 내서 안정적인 NNPS 값을 측정하는 방법을 제시하였다. 실제 획득한 x선 영상을 사용하여 기존의 다른 방법과 비교 분석함으로써 제안한 방법이 일관적인 NNPS를 효율적으로 측정할 수 있음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 II장에서는 방사선 디텍터의 수학적 모델을 정리하고, 입력 영상의 NNPS를 고찰한다. 제 III장에서는 제 II장의 수학적 모델을 토대로 두 가지 spectrum 평균 방법을 제시한다. 제 IV장에서는 제안한 평균 방법들을 실제 방사선 디텍터에서 획득한 x선 영상에 실험을 수행하여 그 성능과 특성을 비교 분석하였다. 마지막 장에는 논문의 결론을 정리하였다.

## II. 방사선 디텍터의 Noise Power Spectrum

본 장에서는 고정형태잡음을 가지는 디텍터의 영상 형성 모델을 불균일이득이라는 개념을 도입하여 정리하고<sup>[8-10]</sup> NNPS를 구하여 디텍터의 잡음 특성을 관찰하려 한다.

주어진 노출 시간에 입사된 x선 광자가 디텍터에서 전하량을 가지는 입자를 생성하는데,  $h(x)$  ( $e$ )를 위치가  $x \in \Gamma$  인 화소에서 수집한 전하의 개수라고 정의한다면, 여기서 집합  $\Gamma$  는 영상 디텍터에서 화소들의 이산위치를 의미하며,  $h(x)$ 를 평균이  $\mu$ 이고 weakly stationary sequence라 가정한다. TFT와 구동회로는 각 화소에서 수집한 전하를 읽어내서 ROIC의 전하증폭기를 사용하여 전압 신호로 바꾸고 ADC (analog-to-digital convertor)에서 디지털값(digital value, DV)으로 바꾼다. 불규칙변수  $g(x)$  (DV/e)를 화소 위치  $x \in \Gamma$ 에서의 불균일이득을 나타낸다고 하면, 영상 디텍터에서 획득한 디지털 영상  $f$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>[10]</sup>

$$f(x) := g(x)h(x) (x \in \Gamma) \quad (1)$$

여기서 이득  $g(x)$ 의 평균은  $\bar{g}$ 이고, 분산은  $\sigma_g^2$ 이라고 가정한다.

이제 디텍터의 NNPS에 대하여 살펴보기로 한다.  $F(w)$ 를 획득한 디지털 영상  $f$ 의 Fourier 변환이라고 하면  $|F(w)|^2$ 는  $f$ 의 periodogram이라고 한다.<sup>[7]</sup> 이러한 periodogram의 기대값은  $E\{|F(w)|^2\}$ 인데, 이것이  $f$ 의 NPS가 된다.<sup>[6-7]</sup> 이러한 이상적인 NPS를 추정하기 위하여 영상 데이터로부터  $M$ 개의 표본 periodogram을 구한다고 하고, 이때의 표본 periodogram을  $|F_1|^2, |F_2|^2, \dots, |F_M|^2$ 으로 표기하면  $M$ 개의 periodogram의 표본 평균은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |F_i(w)|^2 \quad (2)$$

대수의 법칙(law of large numbers)에 의하면, 이러한 periodogram의 표본 평균은  $M$ 이 증가하면서  $f$ 의 NPS인  $E\{|F(w)|^2\}$ 로 수렴한다. 즉 다음 식과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |F_i(w)|^2 \rightarrow E\{|F(w)|^2\}, \text{ almost surely } (3)$$

따라서 충분히 많은  $M$ 개의 표본 periodogram을 구할 수 있다면 안정된 NNPS를 측정하는 것이 가능하다. 표준 IEC62220-1에 NNPS를 계산하는 방법이 소개되어 있는데,<sup>[6]</sup> 이 경우에 획득한 한 장의 x선 영상으로부터 약 36개의 표본 periodogram을 구하여 표본 평균을 내서 NNPS를 추정하고 있다. 만일 여러 장의 x선 영상을 사용하여 보다 많은 표본 periodogram을 구할 수 있다면 매우 안정된 NNPS 값을 구할 수 있을 것이다.

### III. Noise Power Spectrum 측정 방법

본 장에서는 획득한  $n$ 장의 영상을 사용하여 안정된 NNPS를 구하는 방법에 대하여 정리한다.

제안하는 spectrum의 평균을 이용한 방법의 성능 비교 평가를 위하여, 참고문헌<sup>[9]</sup>에서 제안한, 두 장의 평균영상을 구하고 이 두 영상의 차를 사용하여 NNPS를 측정하는 방법을 먼저 소개한다.  $n$ 장의 영상을 반으로 나눠서  $n/2$ 장의 영상으로 두 장의 평균 영상을 얻고 이 두 영상의 차를  $d$ 라고 표기한다고 하면 다음과 같이 정의한다.

$$d(x) := \left[ \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} f_i(x) \right] - \left[ \frac{2}{n} \sum_{i=n/2+1}^n f_i(x) \right] \quad (4)$$

$d(x)$ 을 사용하여 NPS를 구하는데, 이때의 NPS를  $NPS_d(w)$ 라고 표기하고, dNNPS(difference NNPS)를 다음과 정의한다.<sup>[1-2, 9]</sup>

$$dNNPS := \frac{n}{4} \frac{NPS_d(w)}{E^2\{f\}} \quad (5)$$

이렇게 구한 dNNPS는 고정형태잡음을 제거한 디텍터 NNPS의 근사값이 된다.<sup>[9]</sup>

이제 소개하는 두 가지 방법은 spectrum의 평균을 사용하여 안정된 NNPS를 측정한다. 첫 번째 방법은,  $n$ 장의 영상에서 짝수 번째 영상을 각 홀수 번째 영상에서 빼서  $n/2$ 개의 차 영상을 만들고 각각  $n/2$ 개의 NPS를 구한다.  $i$ 번째 영상에서  $j$ 번째 영상을 빼 영상은  $f_i - f_j$ 이 되는데 이 영상의 NPS를  $NPS_{i,j}(w)$ 라고 표기한다. 그러면  $f_i - f_j$ 를 사용한 dNNPS를 다음과 같이 정의한다.

$$dNNPS_{i,j} = \frac{1}{2} \frac{NPS_{i,j}(w)}{E^2\{f\}} \quad (6)$$

이렇게 구한  $dNNPS_{i,j}$ 도 고정형태잡음을 제거한 디텍터 NNPS의 근사값이 된다.<sup>[8]</sup> 이것을 다음과 같이 평균을 내는 방법이 첫 번째 방법이다.

$$\frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} dNNPS_{2i-1, 2i}(w) \quad (7)$$

그리고 두 번째 방법은  $n$ 장의 영상에서 서로 다른 두 장의 영상을 선택하여 전체  $\binom{n}{2}$ 가지의 NNPS를 구한 후 다음과 같이 평균하는 것이다.

$$\frac{1}{\binom{n}{2}} \sum_{i,j, i \neq j} dNNPS_{i,j}(w) \quad (8)$$

두 번째 방법은 주어진  $n$ 장의 영상에서 모든 가능한 조합으로 NNPS를 구하여 평균을 내는 방법으로 식 (7)의 방법에 비하여 안정된 NNPS 값을 측정할 수 있을 거라 기대된다.

### IV. 결론

본 장에서는 실제 x선 영상을 획득하여 본 논문에서 제안한 spectrum을 평균하는 방법을 비교 실험했다. 실험에서 사용한 DRTECH 사(www.drtech.co.kr)의 디지털

텔 방사선 디텍터는 표 1에 정리하였다. 실험을 위한 x선 영상은 x선 튜브 전압 70kVp와 전류 250mA 조건(RQA5)에서 획득하였다.

표 1. 실험에 사용한 방사선 디텍터(DRTECH Co. LTD, www.drtech.co.kr)  
Table1. Radiography image detectors(DRTECH Co. LTD, www.drtech.co.kr).

Detector	Collection element	Type	Pitch (um/pixel) Size (pixels)
A	TFT/ photodiode	indirect, columnal CsI	140 3072x3072
B	TFT	direct, a-Se	168 2560x2560

먼저 충분히 많은 영상을 사용하여 NNPS를 구하면 정확한 NNPS를 구할 수 있다는 가정 하에 100장의 x선 영상을 사용하여 디텍터 A의 NNPS를 다음과 같은 방법으로 구했다. 첫 번째는 식 (5)의 방법을 사용하여 같은 조건에서 획득한 홀수 50장, 짝수 50장의 영상을 각각 홀수 평균 영상 1장, 짝수 평균 영상 1장으로 만든 뒤, 그 차영상을 사용하여 NNPS를 구하였고, 두 번째는 식 (7)의 방법을 사용하여 같은 조건에서 획득한 홀수 50장, 짝수 50장의 영상을 홀수 영상 1장, 짝수 영상 1장씩 입력 영상으로 사용하여 50개의 NNPS를 구한 뒤 평균하였다.

그 결과를 그림 1에 도시하였는데, 50개의 NNPS를 구하여 평균하는 식 (7)에 기초한 방법이 보다 잡음이 없는 곡선을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 이 NNPS를 기준 NNPS라고 부르고 이와 비교하여 제한한 방법의 성능을 평가해 보았다.

그림 1의 기준 NNPS 실험을 바탕으로, 본 실험에서는 식 (5)와 식 (7) 그리고 식 (8)의 세 가지 방법을 사용하여 100장의 영상을 10장씩 10set으로 나눈 뒤 각 set의 NNPS를 구하여 표준편차(STDEV)와 그림 1의 기준 NNPS에 대한 MSE(mean square error)를 구하여 세 가지 방법을 비교 분석하였다. 먼저 식 (5)의 방법을 사용한 디텍터 A의 평균영상 차의 결과를 그림 2에 도시하였다. 이때 STDEV는  $4.442 \times 10^{-7}$ , MSE는  $7.870 \times 10^{-13}$ 이다. 그리고 식 (7)의 방법을 사용한 첫 번째 방법의 결과는 그림 3에 비교하였다. 이때 STDEV는  $3.249 \times 10^{-7}$ , MSE는  $2.245 \times 10^{-13}$ 이다. 마지막으로 식 (8)의 방법을 사용한 두 번째 방법의 결과는 그림 4에 도시하였는데, STDEV는  $3.029 \times 10^{-7}$ , MSE는  $1.848 \times 10^{-13}$ 로 세 가지 방법 중에서 가장 작은

STDEV 값을 보이고 있다. 따라서 주어진 n개의 영상으로 가장 안정된 NNPS를 효율적으로 구하는 방법은 간접방식인 디텍터 A의 경우, 식 (8)의 마지막 결과의 것임을 알 수 있다.

또한 50장의 x선 영상을 사용하여 디텍터 B의 NNPS를 다음과 같은 방법으로 구했다. 첫 번째는 식 (5)의 방법을 사용하여 같은 조건에서 획득한 홀수 25장, 짝수 25장의 영상을 각각 홀수 평균 영상 1장, 짝수 평균 영상 1장으로 만든 뒤, 그 차영상을 사용하여 NNPS를 구하였고, 두 번째는 식 (7)의 방법을 사용하여 같은 조건에서 획득한 홀수 25장, 짝수 25장의 영상을 홀수 영상 1장, 짝수 영상 1장씩 입력 영상으로 사용하여 50개의 NNPS를 구한 뒤 평균하였다.

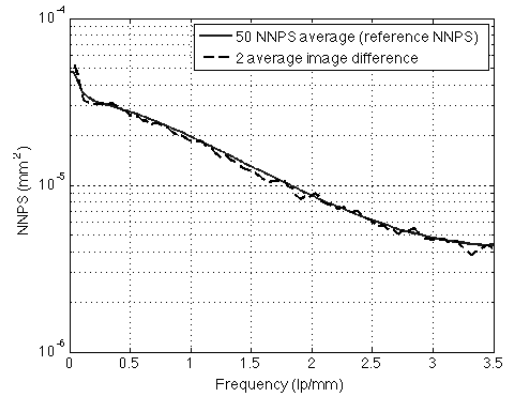


그림 1. 100장의 영상을 사용한 디텍터 A의 기준 NNPS 실험  
Fig. 1. Experiment of the reference NNPS using 100 images for Detector A.

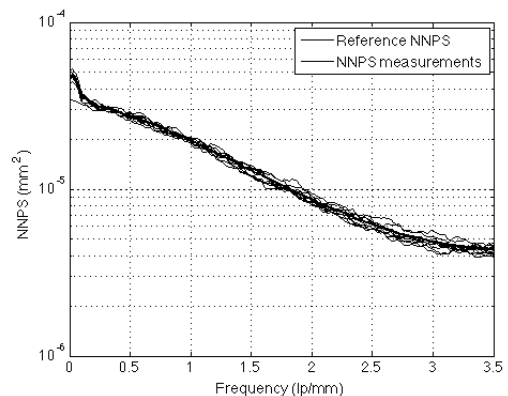


그림 2. 비교를 위한 평균영상 차를 이용한 디텍터 A의 NNPS<sup>[9]</sup> (n = 10, MSE =  $7.870 \times 10^{-13}$ )  
Fig. 2. NNPS of Detector A based on the average image difference method for comparison<sup>[9]</sup> (n = 10, MSE =  $7.870 \times 10^{-13}$ )

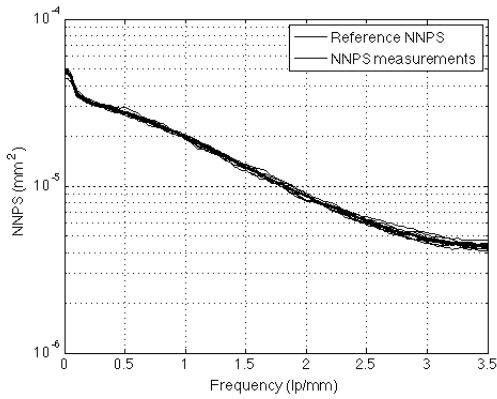


그림 3. 첫 번째 방법: 디텍터 A의  $n/2$ 개 NNPS 평균( $n = 10$ ,  $MSE = 2.245 \times 10^{-13}$ )

Fig. 3. First method: averaging  $n/2$  NNPS values of Detector A ( $n = 10$ ,  $MSE = 2.245 \times 10^{-13}$ )

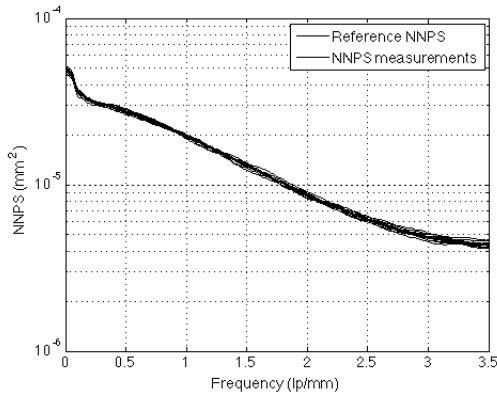


그림 4. 두 번째 방법: 디텍터 A의  $\binom{n}{2}$ 개 NNPS 평균( $n = 10$ ,  $MSE = 1.848 \times 10^{-13}$ )

Fig. 4. Second method: averaging  $\binom{n}{2}$  NNPS values of Detector A ( $n = 10$ ,  $MSE = 1.848 \times 10^{-13}$ )

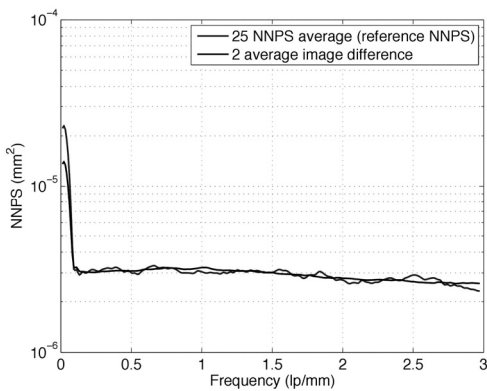


그림 5. 50장의 영상을 사용한 디텍터 B의 기준 NNPS 실험

Fig. 5. Experiment of the reference NNPS using 50 images for Detector B.

그 결과를 그림 5에 도시하였는데, 마찬가지로 25개의 NNPS를 구하여 평균하는 식 (7)에 기초한 방법보다 잡음이 없는 곡선을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이 NNPS를 기준 NNPS라고 부르고 이와 비교하여 제안한 방법의 성능을 평가해 보았다.

그림 5의 기준 NNPS 실험을 바탕으로, 본 실험에서는 식 (5)와 식 (7)의 방법을 사용하여 100장의 영상을 5장씩 10set으로 나눈 뒤 각 set의 NNPS를 구하여 STDEV와 그림 5의 기준 NNPS에 대한 MSE를 구하여 세 가지 방법을 비교 분석하였다. 먼저 식 (5)의 방법을 사용한 디텍터 B의 평균영상 차의 결과를 그림 6에 도시하였다. 이때 STDEV는  $5.263 \times 10^{-8}$ , MSE는  $2.599 \times 10^{-13}$ 이다. 그리고 식 (7)의 방법을 사용한 첫 번째 방법의 결과는 그림 7에 비교하였다. 이때 STDEV

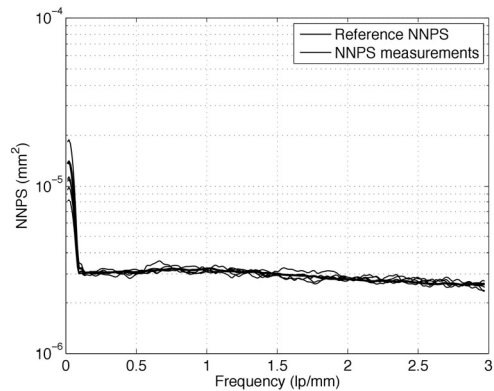


그림 6. 비교를 위한 평균영상 차를 이용한 디텍터 B의 NNPS<sup>[9]</sup> ( $n = 10$ ,  $MSE = 2.599 \times 10^{-13}$ )

Fig. 6. NNPS of Detector B based on the average image difference method for comparison<sup>[9]</sup> ( $n = 10$ ,  $MSE = 2.599 \times 10^{-13}$ )

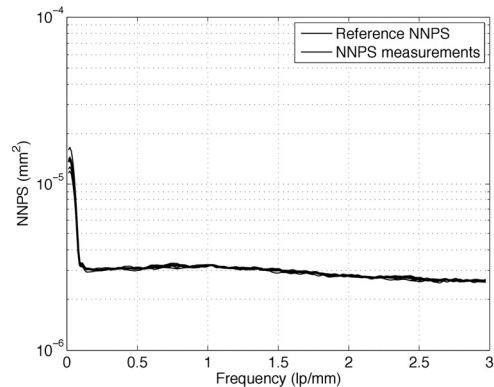


그림 7. 첫 번째 방법: 디텍터 B의  $n/2$ 개 NNPS 평균 ( $n = 10$ ,  $MSE = 3.692 \times 10^{-14}$ )

Fig. 7. First method: averaging  $n/2$  NNPS values of Detector B ( $n = 10$ ,  $MSE = 3.692 \times 10^{-14}$ )

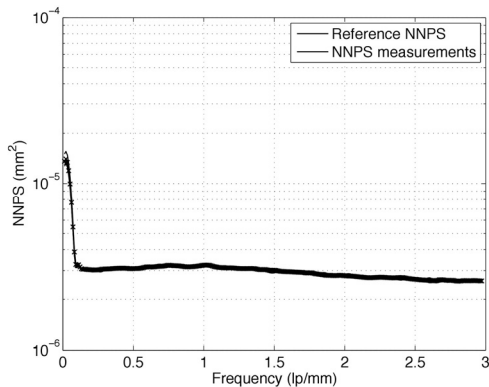


그림 8. 두 번째 방법: 디텍터 B의  $\binom{n}{2}$ 개 NNPS 평균  
( $n = 10$ ,  $MSE = 1.327 \times 10^{-14}$ )

Fig. 8. Second method: averaging  $\binom{n}{2}$  NNPS values of  
Detector B ( $n = 10$ ,  $MSE = 1.327 \times 10^{-14}$ )

는  $3.466 \times 10^{-8}$ , MSE는  $3.692 \times 10^{-14}$ 이다. 또한 마지막으로 식 (8)의 방법을 사용한 두 번째 방법의 결과는 그림 7에 도시하였는데, STDEV는  $1.663 \times 10^{-8}$ , MSE는  $1.327 \times 10^{-14}$ 로 세 가지 방법 중에서 가장 작은 STDEV 값을 보이고 있다. 따라서 주어진  $n$ 개의 영상으로 가장 안정된 NNPS를 효율적으로 구하는 방법은 직접방식의 디텍터 B의 경우에도 식 (8)의 마지막 결과의 것임을 알 수 있다.

이제 가장 안정된 NNPS를 효율적으로 측정하는 최소한의 영상 수  $n$ 을 파악하기 위해서 디텍터 A의 영상의 개수를 두 장씩 늘려가며 세 가지 방법에 적용하여 각각의 MSE를 측정하여 그림 9에 도시하였다. Image difference의 MSE 그래프 추이를 보면 영상 개수 별로 안정적이지 못한 그래프를 보이고 있고, 식 (7)의 방법을 사용한 첫 번째 방법은 보다 안정적인 그래프를 보이고 있다. 식 (8)의 방법을 사용한 두 번째 방법은 세 가지 그래프 중 가장 안정적인 그래프를 보이고 있다. 또한 영상을 많이 사용할수록 안정적인 결과를 보인다. 8장과 20장의 MSE를 비교해보면, 각각  $1.9719 \times 10^{-13}$ 와  $2.1348 \times 10^{-13}$ 값으로 7.63%의 차이를 나타낸다. 즉, 8장에서 20장으로 영상의 개수를 늘려도 7.63% 개선되므로 최소한의 영상으로  $n$ 이 8장일 때 효율적인 결과를 얻을 수 있었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 periodogram과 같은 spectrum을 평균

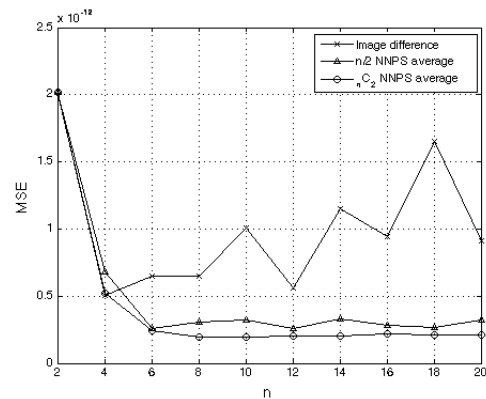


그림 9. 입력영상 개수에 따른 세 가지 방법의 MSE (디텍터 A)

Fig. 9. MSE values of the three methods versus the number of input images (Detector A)

해서 안정된 NNPS를 측정하는 방법을 비교 분석하였다. 주어진  $n$ 개의 영상을 사용하여 가장 안정되게 NNPS를 측정하는 방법을 파악하는 방법으로 제한한 방법의 성능을 평가했는데, 두 개의 평균영상의 차로 측정하는 방법과 단순히 spectrum의 평균을 구하는 방법과 비교하여,  $n$ 개 영상에서 2개의 영상을 선택하여 최대  $\binom{n}{2}$ 개의 NNPS를 구하여 평균을 내는 방법이 가장 좋을 수 있었다.

## REFERENCES

- [1] J. A. Rowlands, "The physics of computed radiography," *Phys. Med. Biol.*, vol. 47, no. 23, pp. R123 - R166, Dec. 2002.
- [2] D. L. Lee, L. K. Cheung, and L. S. Jeromin, "A new digital detector for projection radiography," in *Proc. SPIE, Medical Imaging: Phys. Med. Imaging*, vol. 2432, pp. 237-249, 1995.
- [3] J. Beutel, *Physics and Psychophysics: Handbook of Medical Imaging*, vol. 1, 2000.
- [4] J. P. Moy, "Signal-to-noise ratio and spatial resolution in x-ray electronic images: Is the MTF a relevant parameter?", *Medical Physics*, vol. 218, pp. 683-688, 2001.
- [5] J. T. Dobbins, Ch. 3 *Image Quality Metrics for Digital Systems*, *Handbook of Medical Imaging: Vol. 1. Physics and Psychophysics*, SPIE, Washington, 2000.
- [6] IEC62220-1, *Characteristics of Digital X-ray Imaging Devices-Part1: Determination of the Detective Quantum Efficiency*, International Electro Technical Commission Report, 2003.

- [7] A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2009.
- [8] D. S. Kim, "Noise power spectrum measurements in digital imaging with gain nonuniformity correction," IEEE Trans. Image Processing, vol. 25, no. 8, pp. 3712-3722, Aug. 2016.
- [9] D. S. Kim and E. Kim, "Noise power spectrum of the fixed pattern noise in digital radiography detectors," Med. Phys., vol. 43, no. 6, pp. 2765-2773, June 2016.
- [10] D. S. Kim and E. Lee, "Noise power spectrum of radiography detectors: I. measurement using the averages of images," Jour. Inst. Electr. Inform. Eng., vol. 53, no. 12, pp. 1892-1889, 2016.

---

저 자 소 개

---



이 은 애 (정회원)

2014년 한국외국어대학교 전자공학과 학사 졸업.

2017년 한국외국어대학교 전자공학과 석사 졸업.

<주관심분야: 신호처리, 의료영상시스템, 의료영상처리, 무선센서네트워크>



김 동 식 (정회원)

1986년 서울대학교 제어계측공학과 학사 졸업.

1988년 서울대학교 제어계측공학과 석사 졸업.

1994년 서울대학교 제어계측공학과 박사 졸업.

2000년~현재 한국외국어대학교 전자공학과 교수  
<주관심분야: 신호처리, 의료영상시스템, 의료영상처리, 무선센서네트워크>