

논문 2016-53-4-11

# 방사선 영상 디텍터에서 필터링된 이득지도를 사용한 불균일 이득 잡음의 보정

( Nonuniform Gain Correction Based on the Filtered Gain Map in  
Radiography Image Detectors )

김 동 식\*

( Dong Sik Kim<sup>©</sup> )

## 요 약

방사선 영상 디텍터는 x선 광자로부터 생성된 전하를 수집하여 다수의 전하증폭기 회로를 사용하여 전압 신호로 바꾼 뒤 이를 디지털 신호로 바꾸어 디지털 영상을 생성한다. 이때 다수로 사용한 회로의 불균일한 특성으로 인하여 이득의 불균일이라는 고정형태잡음이 발생한다. 이를 제거하기 위하여 이득지도를 사용하는 이득 보정 알고리즘이 일반적으로 사용되는데, 이득지도 설계 시에 광자 잡음이 이득지도에 남게 되고 이 잡음은 이득 보정된 영상을 오염시킨다. 본 논문에서는 이러한 남아 있는 잡음을 필터를 사용하여 제거하는 실험을 하였으며, 효율적으로 잡음을 제거하기 위한 필터를 최적화하는 알고리즘을 제안하였다. 실제 디텍터로 획득한 영상에 대하여 실험을 수행하여, 단순한 필터로 제거하기 힘든, 고정형태잡음의 크기가 상대적으로 큰 경우에도, 필터 최적화 알고리즘을 사용하여 효율적으로 잡음 제거에 대한 성능을 개선시킬 수 있음을 보였다.

## Abstract

Radiography image detector produces digital images by collecting the charges from the incident x-ray photons and converting it to the voltage signals and then the digital signals. The fixed-pattern noise from the nonuniform amplifier gains in the employed multiple readout circuits. In order to correct the nonuniform gains, a gain-correction technique which is based on the gain map is conventionally used. Since the photon noise remains in the designed gain map, the noise contaminates the gain-corrected images. In this paper, experimental observations are conducted for filtering the remained noise in the gain map, and a filter optimization algorithm is proposed to efficiently remove the noise. For acquired x-ray images from detectors, the filtered gain maps are evaluated and it is shown that optimization algorithm can improve the filtering performance even for relatively strong fixed-pattern noises, which cannot be removed by a simple filter.

**Keywords** : Filtered gain map, Gain correction, Noise power spectrum, Radiography detector

## I. 서 론

X선을 사용한 사물의 투사 영상 기법은 의료 분야뿐만 아니라 산업 분야 등에서 매우 중요하게 사용되고 있다. X선 디지털 영상의 획득을 위하여 여러 기술이

발전해왔는데, 형광체에 기초한 영상판을 사용하여 촬영한 영상을 레이저로 스캔 후 디지털 신호로 변환하여 디지털 영상을 획득하는 방법인 CR (computed radiography) 기법에서부터, 이미지 디텍터에서 직접 디지털 영상을 얻는 DR(digital radiography) 기술로 발전하고 있다.<sup>[1]</sup> DR 기술에는 x선 광자(photon)를 CsI(cesium iodide)와 같은 물체로 구성된 방사선 검출을 위한 형광체인 신틸레이터(scintillator)를 통하여 가시광선 광자로 변환 후 광다이오드와 같은 소자를 사용하여 전하로 변환하는 간접 방식과, x선 광자를

\* 정회원, 한국외국어대학교 전자공학과

(Hankuk University of Foreign Studies)

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

Received ; November 8, 2015 Revised ; March 16, 2016

Accepted ; March 29, 2016

a-Se(amorphous selenium) 물체를 사용하여 직접 전하로 변환하는 직접 방식이 있다.<sup>[2~3]</sup> X선 광자로부터 발생한 전하는 해당하는 화소에 수집된 전하를 TFT(thin film transistor) 장치를 통하여 수집하여 ROIC(readout integrated circuit)의 전하증폭기를 사용하여 전압 신호로 바뀌고 다시 ADC(analog-to-digital convertor)를 통하여 디지털 영상 신호가 만들어 진다. 이때, 하나의 디텍터에서 빠른 속도로 효율적으로 디지털 신호를 얻기 위하여 다수의 ROIC를 사용한다.<sup>[4]</sup> 이때 각 ROIC에 구현되어 있는 전하증폭기의 특성이 일정하지 못함으로 인한 불균일 이득 특성이 발생하는데, 이는 고정형태잡음(fixed pattern noise)의 원인이 된다. 다행히도 이러한 고정형태잡음은 영상을 획득할 때마다 같은 형태로 발생하므로 디텍터의 고정형태를 미리 구해서 x선 영상을 획득 시 고정형태잡음을 제거해줄 수 있다.

고정형태잡음은 주로 비균일 이득으로 인한 것이므로 비균일 이득을 보정하여 제거 할 수 있다. 측정에 기초한 이득 보정 방법(calibration-based gain correction)으로<sup>[5]</sup> 이득지도(gain map)를 사용하는 방법이 있는데<sup>[6~8]</sup>, 이는 물체가 없는 상태에서 여러 장의 영상을 획득하고 이 영상들의 평균으로 이득지도를 설계하고 이러한 이득지도를 입력 영상에 곱하여 고정형태잡음을 제거하는 방법이다. 이렇게 이득에 대한 기준 영상을 사용하는 이득 보정 방법은 투과전자현미경의 CCD 영상 센서에도 사용되며, 원격탐사(remote sensing) 분야에서도 사용된다<sup>[9]</sup>. Seibert 등<sup>[8]</sup>은 여러 피폭 노출에 대하여 이득지도를 설계하여 노출에 따라 효율적 보정을 수행할 수 있는 알고리즘을 제안하였다. 이때 각 이득지도는 여덟 장의 영상을 평균하여 설계하였다. Moy와 Bosset<sup>[10]</sup>은 평판 디텍터(flat-panel detector)의 불균일 이득을 분석하기 위하여 더하기 형태의 이득 모델을 제안하였으며 NPS(noise power spectrum)<sup>[6]</sup>에 대한 실험적 결과를 제시하였다.

이득지도의 설계를 위해 방사선에 노출된 영상을 사용하므로 광자 잡음을 포함하고 있다.<sup>[10]</sup> 이렇게 이득 지도에 포함되어있는 잡음을 이득지도 잡음(GMN, gain map noise)이라고 부르자. 만일 GMN이 큰 이득지도로 입력 영상의 이득을 보정하면 불균일한 이득은 보정이 되지만 보정한 영상의 잡음은 GMN으로 인하여 늘어나고 NPS 측면에서의 성능이 악화된다. GMN으로 인한 보정된 영상의 오염을 막으려면 이득지도를 설계하기 위해 사용하는 영상의 개수를 늘려야 한다<sup>[1]</sup>. 그러나 실제로는 7-8장 정도의 영상을 사용하며, 그로 인하여

GMN이 충분히 줄어들지 못하고 이득지도에 남아서 이득 보정할 때 영향을 미친다. Rodricks 등<sup>[11]</sup>은 이득지도 설계를 위한 영상의 개수를 늘려 나감에 따라 특히 노출이 높을 때 보정된 영상의 DQE(detective quantum efficiency)<sup>[12]</sup>가 실제 값으로 근접함을 관찰하였다. 또한 그들은 가우시언 필터를 단일 영상으로 설계한 이득지도에 적용하는 필터링된 이득지도를 제안하였다.

본 논문에서는 먼저 간단한 이동평균필터(moving average filter)<sup>[11]</sup>를 일반 이득지도에 확대 적용하여 GMN을 제거하는 방법을 관찰하였다<sup>[13]</sup>. 나아가서 가우시언 필터를 적용하는데 있어서 필터의 크기와 분산을 최적화하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 최적화 알고리즘을 사용한 이득 보정의 성능은 실제 직접과 간접 방식의 방사선 디텍터에 적용하여 NPS를 구하여 관찰하였다. 이득 잡음이 상대적으로 크거나 피폭 노출이 높은 경우에도 성능을 비교해보면, 간단한 이동평균필터를 사용하는 경우보다 효율적으로 GMN을 줄일 수 있음을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 제 II장에서는 방사선 디텍터의 불균일한 이득의 수학적 모델을 정리하고, 제 III장에서는 이득지도를 사용한 이득 보정을 정리한다. 제 IV장에서는 제안된 필터링된 이득지도를 소개하고, 제 V장에서는 실제 획득한 방사선 영상에 대하여 이득 보정한 결과를 제시하며, 마지막 장에 본 논문의 결론을 정리한다.

## II. 방사선 영상 디텍터의 불균일 이득 모델

본장에서는 이득 보정에 대한 분석을 위하여 영상 디텍터의 불균일 이득을 표현하는 영상 형상 모델을 정리한다.

주어진 노출 시간에 입사된 x선 광자의 일부가 디텍터에서 전하량을 가지는 전자를 생성하는데,  $h(x)$ 를 위치가  $x \in \Gamma$  인 화소에서 수집한 전자의 개수라고 정의하자. 여기서 집합  $\Gamma$  는 영상 디텍터에서  $m$  개 화소의 이산 위치를 의미한다. 따라서  $h(x)$ 는 광자에 의해 만들어지는 Poisson 분포를 가지며, 평균이  $\mu$ 라고 하면 이산 공간의 영상을  $h(x)$  ( $e^-$ )로 나타낼 수 있다. 이러한 영상의 SNR(signal-to-noise ratio)  $s$ 는 다음과 같다.<sup>[12]</sup>

$$s := \frac{E\{h\}}{\sqrt{\text{Var}\{h\}}} = \sqrt{\mu} \quad (1)$$

식 (1)의 SNR를 광자잡음에 의하여 만들어지는 디텍터의 고유 SNR이라고 하자.

TFT와 이의 구동회로는 각 화소에서 수집한 전자를 읽어내서 ROIC의 전하증폭기를 사용하여 전압 신호로 바꾸고 ADC에서 디지털 값(digital value, DV)으로 바꾼다. 불규칙변수  $g(x)$  ( $DV/e^-$ )를 화소 위치  $x \in \Gamma$  에서의 이득을 나타낸다고 하자. 그러면 영상 디텍터에서 획득한 디지털 영상  $f$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$f(x) := g(x)h(x) \quad (x \in \Gamma) \quad (2)$$

여기서 이득  $g(x)$ 의 평균은  $\bar{g}$  이고 분산은  $\sigma_g^2$  이라고 가정하자. 획득한 디지털 영상  $f$ 의 평균은  $E\{f\} = \bar{g}\mu$  이고 분산은  $Var\{f\} = \bar{g}^2 \mu [1 + (1 + s^2)/S_g^2]$  이므로  $f(x)$ 의 SNR  $S_f$ 는 다음과 같다.

$$S_f = \frac{E\{f\}}{\sqrt{Var\{f\}}} = \frac{s}{\sqrt{1 + (1 + s^2)/S_g^2}} \quad (3)$$

여기서  $S_g := \bar{g}/\sigma_g$  는 불규칙 이득의 SNR이다.

식 (1)과 (3)의 SNR은  $S_f \leq s$ 의 관계식을 만족하는데, 이득  $g$ 가 상수일 때 등식이 성립한다. 즉, 이득이 균일할 때 최댓값인 디텍터의 고유 SNR  $s$ 를 얻을 수 있다. 또한  $S_g \rightarrow \infty$  일 때  $S_f \uparrow s$ , 즉  $S_f$ 는 단조증가하여  $s$ 로 수렴하므로, Yaffe<sup>[17]</sup>가 언급한 바와 같이  $S_g$ 가 상대적으로 큰 디텍터가 불균일한 이득의 영향을 덜 받는 것을 알 수 있다. 반면에  $S_h \rightarrow \infty$  일 때  $S_f \uparrow S_g$ 가 성립하므로 x선의 피폭 노출이 높을 때 얻는 영상의 경우 불균일 이득에 의한 영향이 심해지고, 따라서 적절한 이득 보정 알고리즘을 적용하여 불규칙 이득으로 인한 고정형태잡음을 제거해야 고유 SNR  $s$ 를 가지는 깨끗한 영상을 획득할 수 있다.

### III. 이득 지도를 이용한 불규칙 이득의 보정

본 장에서는 일반적으로 사용하는, 이득지도를 사용한 이득 보정 알고리즘을 소개한다.<sup>[7~8,10]</sup>

#### 1. 이득지도의 설계와 이득 보정

물체 없이 동일한 노출에서 획득한  $n$ 개의 영상을  $f_1, \dots, f_n$ 로 표기하자. 그러면  $i$ 번째 영상은  $f_i := gh_i$

로 정의할 수 있다. 이때  $h_1, \dots, h_n$ 은 평균  $\mu_0$ 인 서로 독립이고 동일한 Poisson 분포를 가진다고 가정하며, 불균일 이득  $g$ 는 고정형태잡음을 묘사하기 위하여  $n$ 개의 영상에 모두 동일하다고 가정한다.

이렇게 획득한  $n$ 개의 영상으로 이득지도 설계를 하는데, 이득지도를  $G_n$ 으로 표기하면 다음과 같이 정의된다.

$$G_n(x) := \frac{E\{F_n(x)\}}{F_n(x)} \quad (x \in \Gamma) \quad (4)$$

여기서  $F_n$ 은  $n$ 개 영상의 평균으로 다음과 같이 정의한다.

$$F_n(x) := \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_i(x) \quad (x \in \Gamma) \quad (5)$$

이러한 이득지도  $G_n$ 을 사용하여 이득 보정된 영상은  $G_n f$ 로 주어지는데,  $E\{F_n\} = \bar{g}\mu_0$ 이므로 다음과 같은 식으로 전개된다.

$$G_n(x)f(x) = \bar{g}\mu_0 \frac{f(x)}{F_n(x)} \quad (x \in \Gamma) \quad (6)$$

또한  $n$ 이 증가하면서  $F_n \rightarrow \mu_0 g$ , almost surely, 이므로 식 (6)의 이득 보정된 영상은  $G_n f \rightarrow \bar{g}h$ 를 만족한다. 따라서 충분히 많은 영상  $f_1, \dots, f_n$ 을 사용하여 불균일한 이득이 제거된 영상을 보정된 영상  $G_n f$ 로부터 얻을 수 있다.

그러나 식 (5)의 평균 영상  $F_n$ 에서 평균을 위한 영상의 개수  $n$ 이 충분히 크지 않으면 광자잡음을 가지는  $h_i$ 의 평균에 광자잡음으로 인한 잡음이 남아있으며 이 잡음이 이득 보정을 하는 과정에서 이득 보정된 영상에 잡음을 추가하게 되는 문제가 발생한다. 이렇게 이득지도에 유한한 값  $n$ 으로 인하여 존재하는 잡음을 GMN이라고 부르자.

#### 2. 이득지도로 이득 보정된 영상의 SNR

이득지도로 이득 보정된 SNR을 구해보면 다음과 같다. 함수  $\gamma$ 를  $\gamma(F_n) := F_n^{-1}$ 로 정의하면, 1차 Taylor 근사화로부터  $\gamma(F_n) \approx \gamma(\mu_0) + \gamma^{(1)}(\mu_0)(F_n - \mu_0)$  관계식을 얻을 수 있으며, 따라서 영상의 평균  $F_n$ 은 다음 식을 근사적으로 만족한다.

$$\frac{1}{F_n} \approx \frac{2}{\mu_0} - \frac{1}{\mu_0^2} F_n \quad (7)$$

식 (6)과 (7)로부터 이득 보정된 영상의 평균은 근사적으로  $E\{G_n f\} \approx \bar{g}\mu$ 를 만족하며 SNR  $s_n$ 은 다음과 같이 주어진다.

$$s_n \approx \frac{s}{\sqrt{1 + (1 + s^2)/nS_0^2}} \quad (8)$$

여기서  $S_0$ 은 영상  $f_i$ 의 SNR로  $S_0 := \sqrt{\mu_0}$ 이다. 식 (8)로부터  $s_n < s$  이므로 이득 보정된 영상의 SNR은 GMN으로 인하여 여전히 고유 SNR  $s$ 보다 낮으며 화질이 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 평균을 위한 영상의 개수  $n$ 을 증가시키면  $s_n \sim s$ 가 되므로 충분한 영상을 확보하여 이득 지도를 설계할 필요가 있다. 고정된 광자비  $\alpha := \mu/\mu_0$ 에서  $\mu_0$ 가 크다고 하면 식 (8)은 다음과 같은 식으로 단순화시킬 수 있다.<sup>[14]</sup>

$$s_n \sim \frac{s}{\sqrt{1 + \alpha/n}} \quad (9)$$

식 (9)로부터 고정된  $\mu$ 에 대하여  $\mu_0 \rightarrow \infty$  일 때 역시  $s_n \sim s$ 이 성립한다. 따라서, Seibert 등<sup>[8]</sup>과 Rodricks 등<sup>[11]</sup>이 언급한 바와 같이, 입력 영상의 평균  $\mu$ 보다 이득지도 설계를 위한 영상의 평균  $\mu_0$ , 즉 x선의 도즈를 더 크게 설정하면 GMN을 보다 줄이는 이득지도 설계가 가능하다. 디텍터 SNR  $s$ 는 이득 보정된 영상의 SNR이 가질 수 있는 최댓값이며, 실험으로 구할 수 있는 값  $s_n$ 로부터 식 (9)의  $s \sim s_n \sqrt{1 + \alpha/n}$  관계로부터 계산이 가능하다. 이 SNR  $s$ 는 다음 장에서 이득 지도의 GMN을 제거하기 위한 필터를 설계하고 적용하는데 있어서 성능을 비교 분석하기 위한 상한 값(upper bound)이 된다.

### 3. 이득 보정된 영상의 NPS

본 장에서는 이득지도로 이득 보정된 영상의 NPS를 분석하였다. 일반적으로 디텍터의 NPS는 영상 평균의 제곱으로 정규화시킨 NNPS(normalized NPS)<sup>[5]</sup>를 흔히 사용하는데, 본 논문에서는 이러한 NNPS를 구하여 디텍터와 이득 보정된 영상의 성능을 분석하였다. 먼저

입력 영상  $f$ 의 NNPS는 다음과 같은 관계를 만족한다.

$$\begin{aligned} NNPS_f(\omega) = & NNPS_h(\omega) \\ & + NNPS_h(\omega) * NNPS_g(\omega) \\ & + NNPS_g(\omega) \quad (\omega \in [-\pi, \pi]^2) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서  $NNPS_f$ ,  $NNPS_h$ ,  $NNPS_g$ 는 각각 영상  $f$ ,  $h$ ,  $g$ 의 NNPS인데,  $NNPS_h$ 는 디텍터의 불균일 이득과 무관한 디텍터의 고유 NNPS이다. 식 (10)을 보면 입력 영상  $f$ 의 NNPS는 불균일 이득으로 인하여 항상  $NNPS_h$ 보다 큰 것을 알 수 있다. 즉 잡음 성분이 더 많다. 만일 양수인  $NNPS_h(\omega)$ 와  $NNPS_g(\omega)$ 가 주파수  $\omega$ 에 대하여 구간  $[-\pi, \pi]^2$ 에서 연속이라고 가정하면 다음 관계식이 성립한다.

$$NNPS_f(\omega) \rightarrow NNPS_g(\omega), \quad \mu_0 \rightarrow \infty \quad (11)$$

즉 x선 도즈를 높게 해서 획득한 영상의 경우 NNPS가 불균일 이득의 NNPS에 영향을 많이 받음을 알 수 있으며, 실험 대상인 디텍터의 불균일 이득으로 인한 NNPS를 점근적으로 구할 수 있다.

이제 이득 보정된 영상  $G_n f$ 로 구하는 NNPS를 분석해보자. 이러한 NNPS를  $NNPS_{G_n f}$ 라 표기하면 다음과 같은 식을 만족한다.

$$\begin{aligned} NNPS_{G_n f}(\omega) = & NNPS_h(\omega) \\ & + NNPS_h(\omega) * NNPS_{F_n/g}(\omega) \\ & + NNPS_{F_n/g}(\omega) \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서  $NNPS_h$ 와  $NNPS_{F_n/g}$ 는 일반적으로 1보다 훨씬 작으므로,  $NNPS_{G_n f}$ 는 다음과 같은 근사식을 만족한다.

$$NNPS_{G_n f}(\omega) \approx NNPS_h(\omega) + NNPS_{F_n/g}(\omega) \quad (13)$$

또한  $NNPS_{F_n/g} = NNPS_{h_1}/n$ 을 만족하므로 식 (13)은 다음과 같이 단순화된다.

$$NNPS_{G_n f}(\omega) \approx \left(1 + \frac{1}{n}\right) \cdot NNPS_h(\omega) \quad (14)$$

즉 이득 보정된 영상의 NNPS 역시  $NNPS_h$ 보다 항상 크지만, 식 (9)의 SNR의 경우와 마찬가지로  $n$ 을 증가시키면  $NNPS_h$ 로 근접함을 알 수 있다. 또한 식 (14)의 관계식과 실험으로 얻은  $NNPS_{G_n, f}$ 를 사용하여 디텍터의 고유 NNPS인  $NNPS_h$ 를 측정할 수 있다. 이렇게 구한 디텍터의 고유 NNPS는 다음 장에서 설계하는 이득지도의 성능을 평가하기 위한 기준으로 사용할 수 있는 하한 값(lower bound)이 될 수 있다.

#### IV. 필터링된 이득지도를 사용한 이득 보정

Rodricks 등<sup>[11]</sup>은 GMN을 줄이기 위해 단순한 가우시언 지역 통과 필터를 사용하여 이득지도  $G_1$ 을 필터링 하였으며 이러한 필터링이 DQE에 미치는 영향을 분석하였다. 본 장에서는 이러한 개념을 확장하여 이득지도  $G_n$  ( $n \geq 1$ )을 필터링하여 이득 보정을 하는 알고리즘을 제안한다.

먼저  $L \times L$ 의 크기를 가지는 이동평균필터(moving average filter)를 사용해서 이득지도의 GMN을 필터링을 시켰다. 이때 최적의 필터 크기는 이득 보정된 영상의 SNR을 최대화시키는 값으로 선택하였다. 이렇게 간단한 필터는 피폭 노출이 낮아서 상대적으로 불균일 이득으로 인한 잡음이 적은 경우, 즉 불균일 이득의 SNR  $S_g$ 가 높은 경우에 효율적으로 GMN를 제거할 수 있다.

반면에  $S_g$ 가 낮은 경우, 단순한 이동평균필터로 GMN을 줄일 수 없다. 본 장에서는  $S_g$ 가 낮은 경우에도 필터링을 최적화하여 GMN을 효율적으로 줄일 수 있는 알고리즘을 제안한다. 이득지도의 GMN을 제거하기 위하여 사용하는  $L \times L$  크기의 필터는 화소의 위치

$$x = (x_1, x_2) \in \left\{ -\frac{L-1}{2}, \dots, \frac{L-1}{2} \right\}^2$$

에 대하여 다음과 같이 가우시언 형태로 정의한다.

$$A e^{-\left(x_1^2/2\sigma_1^2 + x_2^2/2\sigma_2^2\right)} \quad (15)$$

여기서  $A$ 는 정규화를 위한 상수이며  $\sigma_1$ 과  $\sigma_2$ 는 필터의 각 축에 대한 표준편차이며 필터의 크기를 결정하는  $L$ 은  $L \geq 3$ 을 만족하는 정수이다. 이득지도  $G_n$ 에 식 (15)의 필터를 적용한 필터링된 이득지도를  $\widetilde{G}_n$ 로 표시

표 1. 실험에 사용한 방사선 영상 디텍터(DRTECH Co. LTD, www.drtech.co.kr)

Table 1. Radiography image detectors (DRTECH Co. LTD, www.drtech.co.kr).

Detectors	Collection element	Type	Pitch (um/pixel) Size (pixels)
Detector A	TFT	direct, a-Se	139 2560x3072
Detector B	TFT/ photodiode	indirect, columnal CsI	140 3072x3072

하면 이러한 이득지도로 이득 보정된 영상은  $\widetilde{G}_n f$ 이 되며 이때 SNR을  $S_{\widetilde{G}_n, f}$ 로 표기하자. 이제 이러한 SNR을 최대화하는 파라미터  $L$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ 를 구하는 필터링된 이득지도 설계 알고리즘을 정리하면 다음과 같다.

필터 최적화 알고리즘

0) 파라미터  $L$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ 에 대한 초기 값 설정.

1) Cyclic coordinate descent 기법<sup>[15]</sup>을 사용하여 다음 식을 만족하는 파라미터를 찾는다.

$$\max_{L, \sigma_1, \sigma_2} S_{\widetilde{G}_n, f}(L, \sigma_1, \sigma_2) \quad (16)$$

이 알고리즘의 첫 번째 단계에서는, 필터의 크기는  $L = 3$ 으로 설정했으며, 표준편차는  $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.1$ 로 설정했다. 두 번째 단계에서는 cyclic coordinate descent 기법을 사용하여 SNR  $S_{\widetilde{G}_n, f}$ 를 각 파라미터에 대하여 순차적으로 증가시킨다. 또한 SNR의 증가가 더 이상 없을 때까지 이러한 순차적 증가를 반복해서 적용한다. 이렇게 해서 구한 파라미터를 사용하여 이득지도를 필터링하고, 필터링된 이득지도를 저장하고 있다가 디텍터로부터 획득한 물체가 포함된 x선 영상의 이득 보정에 사용한다.

#### V. 실험 결과

본 실험에서 사용한 방사선 영상 디텍터는 DRTECH 사(www.drtech.co.kr)의 두 종류로 표 1에 정리하였다. Detector A는 a-Se와 TFT에 의해 전하를 수집하는 형태의 직접 방식 디텍터이며, Detector B는 columnal CsI를 신틸레이터로 사용하고 TFT와 광다이오드로 전하를 수집하는 간접 방식의 디텍터이다. 각 디텍터의 화소당 비트수는 14b/pixel이다. 실험을 위한 x선 영상은 x선 튜브 전압 72kVp와 전류

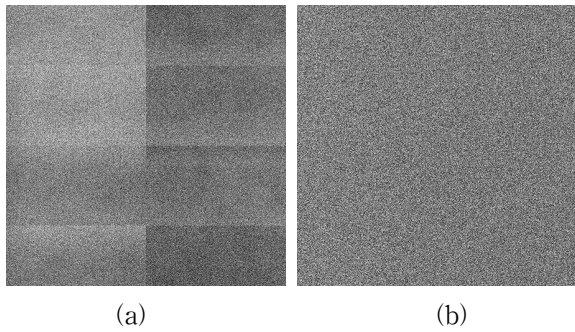


그림 1. 피폭 노출이 11.0 $\mu$ Gy일 때 Detector A로 획득한 영상의 예 (900x900의 일부분 영상) (a) 불균일 이득으로 인한 고정 형태 잡음 (b) 이득지도를 사용한 이득 보정 결과( $n = 1, \alpha = 1$ )

Fig. 1. Example of the acquired image from Detector A at the incident exposure of 11.0 $\mu$ Gy (Image part of 900x900). (a) Fixed pattern noise from the nonuniform gain. (b) Gain correction based on the gain map ( $n = 1, \alpha = 1$ ).

250mA 조건(RQA5)에서 획득하였다. 또한 디텍터의 NNPS는 표준 IEC62220-1<sup>[16]</sup>에 따라서 구했다.

Detector A는, Lee 등<sup>[4]</sup>이 언급한 바와 같이 게이트 구동장치는 2,560개 이고 전하증폭기는 3,072 $\times$ 2개가 된다. 따라서 각 증폭기에 따라 증폭 특성이 균일하지 못한 불균일 이득 특성이 나타난다. 특히 256개의 증폭기가 동일 ROIC에 구현되어 있는데 이로 인해서 획득한 영상에는 수직으로 3,072/256 = 12 구간의 선명한 이득 차이를 보여준다. 그림 1(a)는 획득한 영상에서 이러한 불균일 이득 현상을 확대해서 보여준 예이다. 그림 1(a)에서 밝기차가 일정한 한 수직 구간의 화소 수는 256이며 같은 ROIC내에 집적된 전하증폭기에 해당한다. 그림 1(b)는 이득지도를 사용하여 이득을 보정한 결과로 불균일한 화소 값과 ROIC 구간의 밝기차가 제거된 영상을 관찰할 수 있다.

그림 2에는 이득지도를 사용한 이득 보정의 성능을 SNR을 통하여 관찰해보았다. 이득 보정이 필요한 입력 영상은 피폭 노출이 35.4 $\mu$ Gy에서 획득하였으며, 두 종류의 이득지도를 피폭 노출 22.0 $\mu$ Gy( $\alpha = 1.61$ )와 44.3 $\mu$ Gy( $\alpha = 0.80$ )에서 각각 설계하였다. 그림 2에서 이득 보정된 영상의 SNR인  $s_n$  ('Gain map at 44.3 $\mu$ Gy'와 'Gain map at 22.0 $\mu$ Gy')은 식 (9)의 이론적 분석과 같이 평균을 위한 영상의 개수  $n$ 이 증가하면서 증가하여 어떠한 값으로 근접함을 관찰할 수 있다. 그림 2에서 'Compensated' 실험 곡선은 식 (9)로부터, 실험에서 구한  $s_n$ 에 보정을 위한 상수  $\sqrt{1 + \alpha/n}$ 을 곱하여 고유 디텍터 SNR을 구한 것으로, GMN이

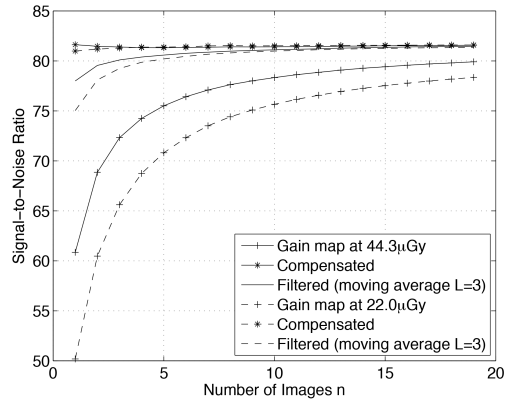


그림 2. Detector A로부터 획득한 이득 보정된 영상의 여러  $n$ 에 대한 SNR 값 (입력영상의 피폭 노출은 35.4 $\mu$ Gy)

Fig. 2. SNRs of gain-corrected images versus  $n$  for acquired images from Detector A (The incident exposure of the input image is 35.4 $\mu$ Gy).

제거된 이득지도가 가질 수 있는 SNR의 최솟값을 의미한다. 또한 식 (9) 이후에 언급한 바와 같이,  $\alpha$  값이 더 작은  $\alpha = 0.80$  ('Gain map at 44.3 $\mu$ Gy') 인 경우의 이득지도가 주어진  $n$ 에 대하여 더 좋은 SNR을 보여줌을 확인할 수 있다. 이제  $L \times L$  크기의 이동평균필터를 사용하여 이득지도를 필터링한 결과 ('Filtered')를 관찰해보자.  $L = 3$ 인 작은 크기의 필터는 한 장의 영상( $n = 1$ )으로 설계한 이득지도의 GMN도 효율적으로 줄여주어 일곱 장의 영상( $n = 7$ )으로 설계한 일반 이득지도보다 더 좋은 SNR을 보여준다.

그림 2에는 필터링된 이득지도의 성능 향상을 SNR 값에 의하여 확인을 해보았는데, 그림 3에는 이득지도의 성능 향상을 contrast-detail phantom을 통하여 물체를 검출할 수 있는 화질 측면에서 관찰해보았다. 이를 위하여 Artinis 사(www.artinis.com)의 CDRAD phantom을 사용하였으며 그림 3에는 IQFinv(inverse of the image quality figure)를 여러  $n$ 에 대하여 도시하였다. 그림 2의 관찰과 일관되게 필터링된 이득지도 ('Filtered gain map')가 더 좋은 IQFinv값을 보여주고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 4에는 contrast-detail 곡선을 도시하였는데 필터링된 이득지도('Filtered gain map')의 경우 가장 아래쪽의 곡선이 되며 물체의 크기와 대비 측면에서도 가장 좋은 검출 성능을 보임을 알 수 있다.

이제 이동평균필터로 필터링된 이득지도의 성능을 NNPS를 비교하여 분석하였다. 그림 5(a)와 (b)에는 Detector A와 B의 NNPS 곡선을 구해서 각각 도시하였

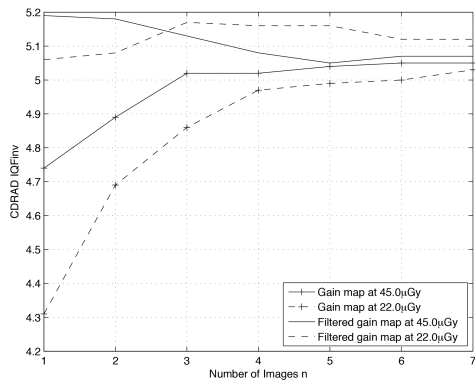


그림 3. 그림 2의 실험에서 물체 검출 성능 평가를 위한 CDRAD(www.artinis.com) IQFinv 성능 분석  
Fig. 3. CDRAD (www.artinis.com) IQFinv performance analysis of Fig. 2 for the evaluation of the object detectability.

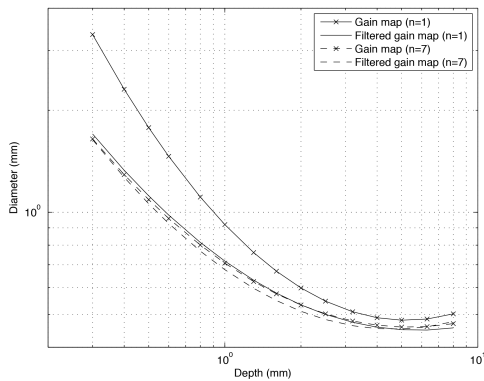
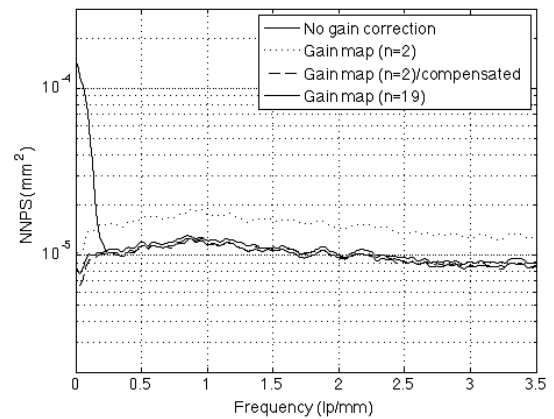
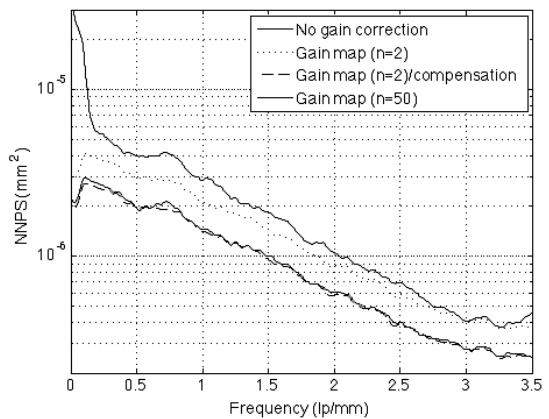


그림 4. 그림 2의 실험에서 CDRAD 곡선 성능 분석  
Fig. 4. CDRAD curve performance analysis of Fig. 2.

는데, 이득 보정의 경우  $n$  값을 크게 할수록 NNPS가 고유 NNPS인  $NNPS_h$  곡선으로 근접함을 알 수 있다. 특히 이득 보정이 안되어 있는 영상의 NNPS 경우 낮은 주파수 영역에서 값이 크게 올라가는 현상이 있는데, 이득 보정을 통하여 이러한 올라감 현상이 제거됨을 관찰할 수 있다. 또한  $n=2$ 로 설계한 이득지도의 경우 낮은 주파수 영역에서 올라가는 곡선 형태는 제거되었지만 GMN으로 인하여,  $n$ 이 큰 경우, 즉 디텍터의 고유 NNPS에 가까운 곡선과는 큰 차이를 가지고 있음을 알 수 있다. 이때 식 (14)를 사용하여 이득 보정된 영상의 NNPS 곡선을 보상해주면('Gain map( $n=2$ )/compensation')  $n$ 을 충분히 많이 사용한 경우와 비슷한 곡선을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉 디텍터의 고유 NNPS는 임의의  $n$  일 때의 이득지도로 보정한 영상으로부터 얻은 NNPS에  $(1 + \alpha/n)$ 를 곱하여 GMN으로 인한 잡음을 보상해주면 얻을 수 있다. 이러한 보상으로 구한 NNPS 곡선은 필터링된 이득지도의 이득 보정 성능을 비교 평



(a)



(b)

그림 5. 이득 보정되지 않은 영상과 이득 보정된 영상의 NNPS 비교와 NNPS의 보상 (a) 노출  $11.0\mu\text{Gy}$ 에서 Detector A의 결과 (b) 노출  $28.2\mu\text{Gy}$ 에서 Detector B의 결과

Fig. 5. Comparisons of the NNPSs of the acquired images with and without gain corrections, and the compensated NNPS. (a) Detector A at the incident exposure of  $11.0\mu\text{Gy}$ . (b) Detector B at the incident exposure of  $28.2\mu\text{Gy}$ .

가할 때 최고로 얻을 수 있는 성능 곡선이 된다.

그림 6에는 이동평균필터를 사용하여 GMN를 제거한 실험결과를 도시하였다. 그림 6(a)는 Detector A에 대한 실험 결과로, 간단한 이동평균필터를 사용하여 충분히 고유 디텍터 NNPS와 근접하는 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 하지만 0 근처의 아주 낮은 주파수 영역에서는 완벽하게 고정패턴잡음이 제거되지 못함을 관찰할 수 있다. 반면에 그림 6(b)의 Detector B 실험에서는 피폭 노출이 상대적으로 높아서 불균일 이득으로 인한 고정패턴 잡음이 강하게 드러나는 경우로, 단순한 이동평균필터로 GMN 제거가 쉽지 않다. 그림 6(b)의 이동평균필터의 경우는,  $n=2$ 인 이득지도의 경

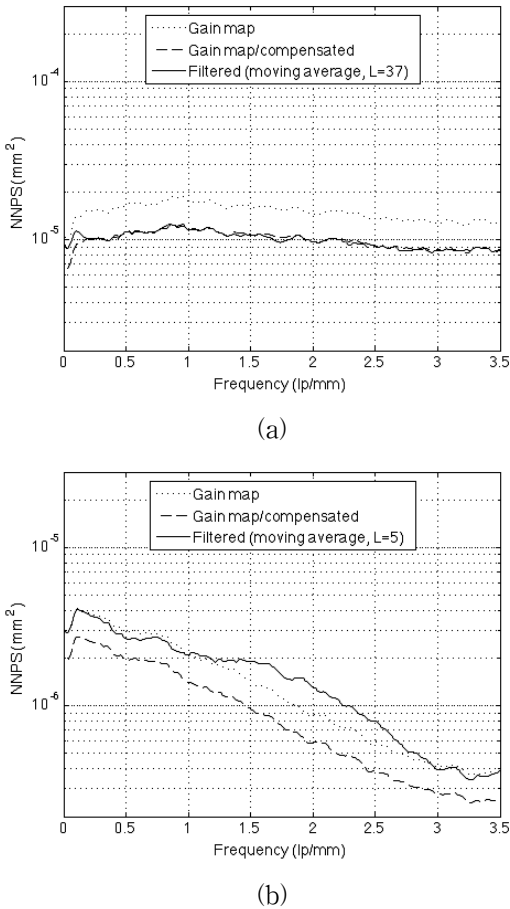


그림 6.  $L \times L$  이동평균필터로 필터링된 이득지도의 NNPS( $n=2$ ) (a) 노출  $11.0\mu\text{Gy}$ 에서 Detector A의 결과. SNR  $s_2 = 35.4\text{dB}$  이득 지도를 필터링하여 경우  $L = 37$ 일 때 43.52로 증가 (b) 노출  $28.2\mu\text{Gy}$ 에서 Detector B의 결과. SNR  $s_2 = 156.4\text{dB}$  이득 지도를 필터링하는 경우  $L = 5$ 일 때 173.5로 증가

Fig. 6. NNPS for the gain-corrected image with the filtered gain map with the moving average filter. (a) Detector A at the incident exposure of  $11.0\mu\text{Gy}$ . Filtering the gain map, which has the SNR  $s_2 = 35.4\text{dB}$  increases the SNR to 43.52 at  $L = 37$  (b) Detector B at the incident exposure of  $28.2\mu\text{Gy}$ . Filtering the gain map, which has the SNR  $s_2 = 156.4$  increases the SNR to 173.5 at  $L = 5$

우보다 SNR은 증가하였지만, 중간 주파수 영역에서는 오히려 NNPS의 특성이 나빠졌음을 알 수 있다. 그림 7에는 Detector A의 경우에 대하여 필터링된 이득지도로 이득 보정을 수행한 영상의 결과를 제시하였다. 그림 7(c)에서 보는 바와 같이 필터링된 이득지도를 사

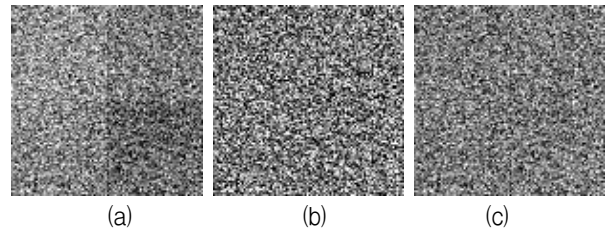


그림 7. 필터링된 이득지도로 이득 보정한 실험의 예 ( $100 \times 100$ 의 확대한 영상) (a) Detector A에서  $11.0\mu\text{Gy}$  조건에서 획득한 입력 영상(SNR: 41.91dB) (b) 이득 보정 결과( $n = 1$ , SNR: 30.96dB) (c) 필터링된 이득지도로 이득 보정 결과( $n = 1$ ,  $L = 29$ , SNR: 43.89dB)

Fig. 7. Example of the gain-correction using the filtered gain map ( $100 \times 100$  magnified image). (a) Acquired image from Detector A at the incident exposure of  $11.0\mu\text{Gy}$ . (b) Gain-corrected image ( $n = 1$ , SNR: 30.96 dB). (c) Gain-corrected image using the filtered gain map ( $n = 1$ ,  $L = 29$ , SNR: 43.89 dB).

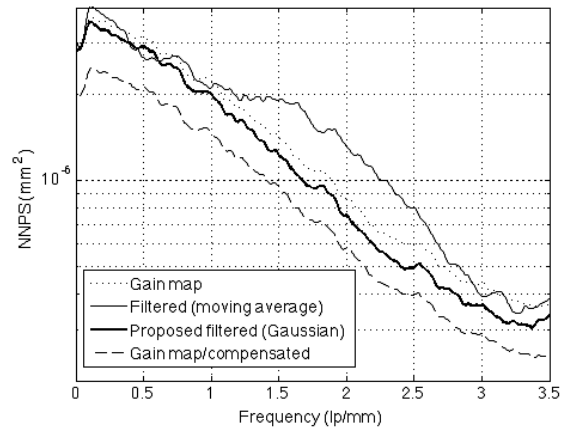


그림 8. Detector B에서 제안한 최적화 알고리즘으로 설계한 가우시안 필터와 단순한 이동평균필터의 성능 비교(SNR: 179.1,  $L = 93$ ,  $\sigma_1 = 5.5$ ,  $\sigma_2 = 0.5$ )

Fig. 8. Performance comparison of the designed Gaussian filter from the proposed optimization algorithm and the simple moving average filter (SNR: 179.1,  $L = 93$ ,  $\sigma_1 = 5.5$ ,  $\sigma_2 = 0.5$ ). 그림 8에는 제안한 필터 최적화에 대한 실험 결과를 제시하였다. 그림 6(b)의 Detector B 실험에서, 필터의 최적화를 통하여 그림 8에서 보는 바와 같이, 단순한 이동평균필터('Filtered (moving average)')에 비하여 GMN을 좀 더 줄이고 있음을 관찰할 수 있다('Proposed filtered (Gaussian)').

용하는 경우가 그림 7(b)의 그렇지 않은 경우와 비교하여 잡음의 정도가 줄어들었음을 관찰할 수 있다.



## IV. 결 론

방사성 영상 디텍터는 다수로 사용된 증폭 회로의 불균일한 특성으로 인하여 불균일 이득 문제가 발생하며, 이를 해결하기 위하여 이득지도를 사용한 이득 보정을 수행한다. 이득지도를 설계하는 과정에서 존재하는 잡음을 효율적으로 제거하기 위하여, 본 논문에서는 필터를 최적화하는 알고리즘을 제안하였으며, 단순한 필터로 제거하기 어려운 경우에도 필터의 최적화를 통하여 잡음을 어느 정도 줄여줄 수 있음을 실제 디텍터를 사용하여 획득한 영상을 사용한 실험을 통하여 관찰하였다. 최적의 필터는 디텍터에 따라서 달라지는데, 앞으로 보다 다양한 디텍터에 대하여 최적의 필터를 설계하고 그 특성을 분석하여 보다 체계적인 필터 설계 기법의 연구가 필요하다.

## REFERENCES

[1] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, *Digital Image Processing*, 3rd. ed., Prentice Hall: NY, 2008.

[2] D. S. Kim, "Artifact reduction in digital radiography images with the stationary grid based on 1-dimensional filters," *Jour. Inst. Electr. Inform. Eng.* vol. 47SP, no. 5, pp. 117-126, 2010.

[3] D. S. Kim, "Grid angle optimization and grid artifact reduction in digital radiography images based on the modulation model," *Jour. Inst. Electr. Inform. Eng.* vol. 48SP, no. 3, pp. 30-41, 2011.

[4] D. L. Lee, L. K. Cheung, and L. S. Jeromin, "A new digital detector for projection radiography," in *Proc. SPIE, Medical Imaging: Physics of Medical Imaging*, vol. 2432, pp. 237-249, 1995.

[5] G. C. Holst, *CCD Arrays, Cameras and Displays*, SPIE Optical Eng. Press, 1996.

[6] J. T. Dobbins, *Ch. 3 Image Quality Metrics for Digital Systems, Handbook of Medical Imaging: Vol. 1. Physics and Psychophysics*, SPIE, Washington, 2000.

[7] R. L. Weisfield, M. A. Harney, R. A. Street, and R. B. Apte, "New amorphous-silicon image sensor for x-ray diagnostic medical imaging applications," in *Proc. SPIE Medical Imaging: Physics of Medical Imaging*, vol. 3339, pp. 444-452, 1998.

[8] J. A. Seibert, J. M. Boone, and K. K. Linfors, "Flat-field correction technique for digital

detectors," in *Proc. SPIE Medical Imaging: Physics of Medical Imaging*, vol. 3336, pp. 348-354, 1998.

[9] D. Olsen, C. Dou, X. Zhang, L. Hu, H. Kim, and E. Hildum, "Radiometric calibration for AgCam," *Remote Sensing*, vol. 2, pp. 464-477, 2010.

[10] J. P. Moy and B. Bosset, "How does real offset and gain correction affect the DQE in images from x-ray flat detector," in *Proc. Medical Imaging: Physics of Medical Imaging*, vol. 3659, pp. 90-97, 1999.

[11] B. Rodricks, D. L. Lee, M. Hoffberg, and C. Williams, "Filtered gain calibration and its effect on DQE and image quality in digital imaging," in *Proc. SPIE Medical Imaging: Physics of Medical Imaging*, vol. 3977, pp. 477-486, 2000.

[12] J. C. Dainty and R. Shaw, *Image Science: Principles, Analysis, and Evaluation*, Academic Press: NY, 1974.

[13] D. S. Kim, E. Kim, and S. Lee, "Performance analysis of the gain correction in radiography imaging," in *Proc. IEEE International Conf. Image Processing*, pp. 3641-3645, 2014.

[14] D. S. Kim, "Estimation and compensation of the signal-to-noise ratios in radiography imaging under irregular detector gains," in *Proc. IEEE International Symp. Biomedical Imaging*, pp. 505-508, 2014.

[15] D. G. Luenberger, *Linear and Nonlinear Programming*, 2nd. ed., Addison Wesley: MA, 1984.

[16] IEC62220-1, Characteristics of Digital X-ray Imaging Devices-Part1: Determination of the Detective Quantum Efficiency, International Electro Technical Commission Report, 2003.

## 저 자 소 개



김 동 식(정희원)

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>