

논문 2011-48SP-4-1

디지털 방사선 영상에서 그리드 왜곡의 포화 특성에 관한 연구와 적응 필터링에 기초한 제거

(Analysis on the Saturation of Grid Artifact and its Reduction in
Digital Radiography Images Based on the Adaptive Filtering)

김 동 식*, 이 상 균**

(Dong Sik Kim and Sanggyun Lee)

요 약

산란선을 흡수하여 보다 선명한 x선 영상을 얻기 위하여 산란방지 그리드를 사용하여 투사영상을 얻는데, 이때 그리드 패턴으로 인한 왜곡이 발생하며, 디지털 필터를 사용하여 제거할 필요가 있다. 그런데 x선에 대하여 과하게 노출되어 영상디테일에서 포화된 영상이 형성되는 경우에는 그리드 왜곡의 제거가 잘되지 않는다. 본 논문에서는, 보다 효율적으로 그리드 왜곡을 제거하기 위하여 x선 영상 형성에서 노출량에 따른 특성을 포화 현상까지 포함하여 분석하였다. 포화가 되기 시작하면 그리드 왜곡 성분의 최대 크기가 오히려 줄어들고 대역폭은 넓어지는 특성을 관찰할 수 있었다. 또한 왜곡 성분의 중요신호대역폭 (significant-signal bandwidth)을 측정하여 필터의 대역폭을 결정하여 그리드 왜곡을 효율적으로 줄일 수 있는 적응 필터링 알고리즘을 제안하였다. 실제 x선 디지털 영상에 대한 실험을 통하여 제안한 알고리즘이 효율적으로 그리드 왜곡을 제거할 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In order to obtain more clear x-ray images, an antiscatter grid, which can absorb the scattered rays, is employed. The artifacts due to the grid pattern are, however, visible, and thus should be removed by employing digital filters. For over exposed x-ray images, the strength of the grid artifacts are too big to be removed if fixed-bandwidth filters are employed. In this paper, for an efficient grid artifact reduction, we analyze the characteristics of the image formation and image saturation as the x-ray exposure increases. We can notice that, as the saturation begins to occur, the maximum of the artifact component decreases contrary to increasing exposure amount. We propose then an adaptive filtering algorithm for reduction of the grid artifacts, where the significant-signal bandwidth of the artifact component is used to choose appropriate filter bandwidths. The proposed algorithm is tested for real x-ray digital images, and can efficiently remove the grid artifacts.

Keywords : 그리드, 방사선 영상, 그리드 왜곡, 포화 영상

I. 서 론

X선을 사용한 사물의 투사영상은 의료 분야뿐만 아니라 여러 분야에서 매우 중요하게 사용되고 있다. 기존의 아날로그 방식인 필름과 필름 스캐너를 사용한 디지털 영상의 획득 방법은, 디지털 컴퓨터의 발달과 함께 형광체에 기초한 영상판을 사용하여 촬영한 영상을

* 정회원, 한국외국어대학교 전자공학과
(Department of Electronics Engineering, Hankuk University of Foreign Studies)

** 정회원, (주) 디알텍 연구소
(R & D Center, DRTECH Co.)

※ 이 연구는 2011학년도 한국외국어대학교 교내 학술 연구비의 지원에 의하여 이루어진 것임.

접수일자: 2011년1월13일, 수정완료일: 2011년3월3일

레이저로 스캔 후 디지털 신호로 변환하여 영상을 획득하는 간접 방법으로 발달하였다^[1-2]. 최근에는 중간 매개체를 사용하지 않고, x선의 에너지를 이미지디텍터에서 직접 디지털 신호로 변환하여 보다 고해상도의 영상으로 변환할 수 있는 직접 방식이 개발되어 어느 정도 실용화되고 있는 단계이다^[3].

X선관에서 발생한 x선이 물체를 투과한 후 영상을 획득하기 위한 획득 장치로 입사하게 되는데, 물체를 투과하기 전 또는 후에 발생하는 산란선은 영상 획득 장치에 입사하여 영상의 품질을 저하시킨다. 이러한 산란선으로 인한 영상의 품질 저하를 방지하기 위하여, 매우 가는 납줄을 일정 간격으로 배열한 그리드를 사용하는데, 이는 x선관에서 방사되는 각도 이외의 다른 각을 가지는 산란선을 차단하여 산란으로 인한 화질의 흐려짐을 방지하려는 목적을 가지고 있다. 그러나 그리드를 사용하므로 그리드 패턴으로 인한 왜곡이 심하게 발생한다^[4]. 이러한 왜곡은 디지털 표본주파수와 그리드의 주파수 성분과의 관계에 의한 영상 표본화 과정에서 발생한 에일리어스 왜곡 형태가 되며, 디지털 필터 등을 사용하여 효율적으로 제거시킬 필요가 있다^[5].

적절한 x선 투사영상을 얻기 위해서는, 물체에 따라서 x선의 노출량을 달리하여 찍을 필요가 있으며, 따라서 그리드 왜곡의 크기도 그에 따라 달라진다. 그런데 어느 정도의 노출 범위에서 획득한 x선 영상은 고정된 대역폭을 가지는 필터를 사용하여 그리드 왜곡을 제거할 수 있지만, 넓은 범위의 노출에서 영상을 획득하거나, 과도한 노출로 인하여 영상디텍터에서 포화가 되는 영상이 형성되면, 그리드 왜곡의 특성이 달라져서 기존에 사용하고 있는 왜곡 제거 알고리즘이 잘 작동하지 않는다. 따라서 이러한 그리드 왜곡을 효율적으로 제거하기 위한 적응 그리드 왜곡 제거 알고리즘의 개발이 필요하다. Barski와 Wang^[4]은 Gaussian 형태의 LPF(low-pass filter)를 공간 영역에서 사용하여 그리드 왜곡을 제거하였는데, 화소의 밝기에 따라 Gaussian 함수의 표준편차를 조정하여 적응필터링을 시도하였다. 그러나 그리드 왜곡을 일으키는 각 성분의 크기에 따른 적응필터링을 수행할 수 없다는 단점이 있다. Lin 등^[5]은 주파수 영역에서, 미리 알고 있는 그리드 주파수와 표본 주파수를 사용하여 그리드 왜곡에 해당하는 주파수 성분을 계산하고, 그 부근의 값을 평균하여 보다 정확한 그리드 주파수를 예측하였으며, 표준편차를 구하여, 이를 표준편차로 사용하는 Gaussian 형태의

BRF(band-rejection filter)를 적용하여 그리드 왜곡을 적응적으로 제거하였다. 그러나 이러한 표준편차는 제거하려고 하는 성분의 크기를 묘사하지 못하므로 적절한 적응필터링이 불가하다.

본 논문에서는 포화된 영상에서의 그리드 왜곡을 효율적으로 제거하기 위하여 변조 모델^[6]에 기초한 포화 영상 형성에 대한 모델을 제시하고, 이를 사용하여 노출량에 따른 x선 디지털 영상의 특성을 포화와 함께 분석하였다. 물체 영역에서의 노출에 대한 그리드 왜곡의 크기를 잘 묘사할 수 있는 측정으로 중요신호대역폭(significant-signal bandwidth, SSB)을 정의하였으며, 그로부터 BRF의 대역폭을 결정하여, 영상의 노출에 따라 적용하는 그리드 왜곡 제거 알고리즘을 제안하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 II장에서는 x선 영상의 형성 과정에 노출과 포화 영상을 고려한 형태의 진폭 변조 모델을 제시하고 이론적인 분석을 하였다. 제 III장에서는 그리드 왜곡을 효율적으로 제거할 수 있는 적응 BRF 알고리즘을 제안하였다. 제 IV장에서는 실제 x선 디지털 영상을 노출량을 변화시키면서 획득하고 분석하였으며 제안한 적응 BRF 알고리즘의 성능을 비교하였고, 마지막 장에서는 결론을 정리하였다.

II. 그리드를 사용한 X선 디지털 영상

Wang과 Huang^[2], 그리고 Lin 등^[5]은 x선 디지털 영상의 형성에서 그리드 왜곡이 발생하는 과정을 묘사하기 위하여 더하기 형태의 모델을 고려하였다. 그러나 이러한 기존의 모델과는 달리 Kim^[6]은 곱하기 형태의 진폭 변조 모델이 보다 타당하다고 제안하였으며, 본 장에서는 이러한 변조 모델에 x선에 대한 노출량과 영상디텍터의 포화 특성을 묘사할 수 있는 부분을 추가한

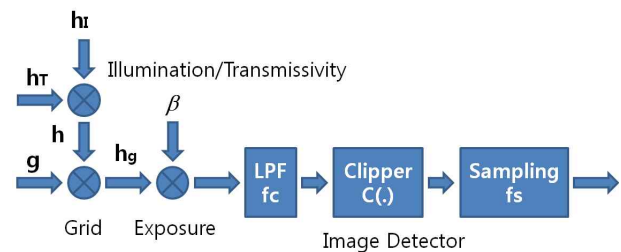


그림 1. X선에 대한 노출량과 영상포화를 고려한 그리드를 사용하는 방사선 영상 시스템의 영상 형성 모델

Fig. 1. X-ray image formation model, which includes the image saturation to the x-ray exposure.

개선된 모델을 제시하고 노출량이 증가함에 따른 영상의 포화 특성을 이론적으로 분석해 보았다.

그리드를 사용한 x선 디지털 영상의 형성은, 초점 그리드의 초점에 위치한 x선관에서 방사되는 x선이 투시를 위한 물체를 거쳐서 그리드에 도착하고, 여기서 산란선은 흡수되고 기본선만 통과하여 영상디텍터로 투사되어 표본화되고 양자화되므로 이루어진다.

1. X선 투과 영상 형성

본 절에서는 투과 영상 형성 모델^[7,p.51]에 기초하여 제일 처음 단계인 투과영상의 형성에 대하여 설명한다. 물체의 투과율(transmissivity)을 함수 h_T 라 표기하고 $0 < h_T(x,y) \leq 1 ((x,y) \in \Lambda)$ 를 만족한다고 하자. 여기서 (x,y) 는 영상 신호의 위치로 2차원 평면 R^2 의 어떠한 부분 집합 Λ 의 원소라고 하자. 또한 조명(illumination)을 나타내는 함수를 h_I 라 하고 $0 < h_I(x,y) < \infty ((x,y) \in \Lambda)$ 을 만족한다고 하자. 복원해야할 투과영상을 함수 h 라고 할 때, 투과 모델에 기초하여 h 는 다음과 같이 정의한다(그림 1참조).

$$h(x,y) := h_I(x,y)h_T(x,y) ((x,y) \in \Lambda) \quad (1)$$

이러한 영상 h 를 복원해야할 원영상이라고 부르자. 이렇게 형성된 영상의 특성을 물체와 배경으로 분리하여 주파수영역에서 최대치를 먼저 관찰해 보자. 만일 물체의 투과 영상에서 배경이 없다고 하고 투과율 h_T 가 $h_T'(x,y) \ll 1 ((x,y) \in \Lambda)$ 를 만족한다고 가정하자. 그리고 투과 모델에 의하여 형성된 투과 영상 $h' = h_I h_T'$ 의 Fourier 변환을 H' 로 표기하고 주파수 크기 응답에서 최대치가 $|H'(0,0)|$ 이라고 하자. 또한 x선 영상에서 물체가 없고 배경만 있다고 하면, 즉 투과율이 상수 1이라고 하면, 투과 모델에 의하여 형성된 영상은 h_I 가 된다. 이의 Fourier 변환을 H_I 라 표기하고 주파수 크기 응답에서 최대치가 $|H_I(0,0)|$ 라고 하면, 가정 $h_T'(x,y) \ll 1$ 으로부터 다음 관계식이 성립한다.

$$|H'(0,0)| \ll |H_I(0,0)| \quad (2)$$

따라서 물체와 배경이 섞여 있는 일반적인 x선 영상 h 의 Fourier 변환 H 를 관찰해 볼 때, H 의 크기 응답에서 일반적으로 최대치는 영상의 평균을 의미하는 $|H(0,0)|$ 가 되며, 이러한 최대치는 식 (2)로부터 물체 영역보다는 배

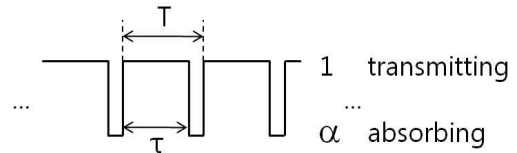


그림 2. 그리드 각도가 $\phi=0$ 일 때의 영상 포화를 고려한 그리드 모델 g ($0 \leq \alpha < 1$).
Fig. 2. Grid signal model for image saturation when $\phi=0$.

경 영역에 의해 만들어지는 최대치 $|H_I(0,0)|$ 에 좌우된다는 사실을 알 수 있다.

이제 영상 신호의 최대주파수에 대하여 관찰해 보자. 물체만 있는 경우 최대주파수를 f_M' 이라고 하고 배경만 있는 영상의 경우 f_m 이라고 하면 조명 h_I 의 변화는 투과율 h_T 에 비하여 매우 완만하므로 다음의 관계가 성립한다고 가정할 수 있다.

$$f_M' \gg f_m \quad (3)$$

따라서 배경과 물체가 섞여 있는 일반 x선 영상의 경우 최대주파수가 f_M 이라고 하면 이는 주로 물체의 최대주파수 f_M' 에 의해 좌우된다는 사실을 알 수 있다. 정리하면 투과영상 h 의 주파수 크기 응답에서, 최대치는 배경 영역의 $|H_I(0,0)|$ 에 좌우되고 최대주파수는 물체 영역의 f_M' 에 의해 좌우된다. 신호의 신호대역폭은 최대주파수의 두 배가 되는데, 실제 경우는 이러한 신호대역폭보다는 어떠한 임계치 이상의 신호만 고려하는 SSB를 일반적으로 사용한다.

2. 그리드와 진폭 변조

본 절에서는 투과 모델에 근거하여 형성된 투과영상 h 가 그리드에 의하여 진폭 변조 됨을 기존의 연구^[6,8]를 기초로 영상 포화를 묘사할 수 있도록 개선하여 정리하였다.

상수 ϕ 가 그리드의 줄이 y 축의 방향과 이루는 각도를 의미하고, 양의 상수 T 와 τ 가 각각 그리드의 주기, 투과 부분의 두께를 나타낸다고 할 때, $\phi=0$ 인 고정 그리드로 만들어지는 그리드 영상 신호를 $g((x,y),\alpha)$ 라 하고 다음과 같이 정의하자(그림 2 참조).

$$g((x,y),\alpha) = \begin{cases} 1, & 0 < x \leq \tau \\ \alpha, & \tau < x \leq T \end{cases} ((x,y) \in R^2)$$

여기서 $0 \leq \alpha < 1$ 이다. 또한 그리드 영상 신호는 다

음 식을 만족하는 주기 신호라 하자.

$$g((x,y),\alpha) = g((x+T,y),\alpha) \quad ((x,y) \in R^2)$$

그리드의 밀도 또는 주파수를 f_1 (lines/mm)이라고 하면, $f_1 = 1/T$ 이며, 그리드 영상 신호 g 는 f_1 을 기본 주파수로 하는 주기 신호로 nf_1 ($n = 2, 3, \dots$)인 고조파 성분을 가지게 된다. 즉 그리드 g 는 주기신호이므로 다음과 같은 Fourier 급수 형태로 전개할 수 있다.

$$g((x,y),\alpha) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_1 x + \theta_n) \quad (4)$$

식 (4)에서 a_0 은 g 의 평균으로 다음과 같이 주어진다.

$$a_0 = \frac{\tau + \alpha(T - \tau)}{T} \quad (5)$$

또한 나머지 계수 a_n 은 다음과 같다.

$$a_n = 2(1 - \alpha) \frac{\sin(\pi n f_1 \tau)}{\pi n} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (6)$$

그러면 투과영상 h 가 그리드를 통과하여 형성되는 그리드투과영상 h_g 는 다음과 같이 곱셈 형태로 나타낼 수 있다^[6](그림 1 참조).

$$h_g(x,y) = h(x,y)g((x,y),\alpha) \quad ((x,y) \in A) \quad (7)$$

즉 식 (4)과 (7)로부터 h_g 는 다음과 같은 진폭 변조 형태가 된다.

$$\begin{aligned} h_g(x,y) \\ = h(x,y)a_0 + h(x,y) \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(2\pi n f_1 x + \theta_n) \end{aligned} \quad (8)$$

그리드투과영상 h_g 는, 원영상 h 에 이득항인 a_0 을 곱한 항과 h 를 nf_1 ($n = 1, 2, \dots$)의 주파수를 가지는 반송파로 진폭 변조한 항들의 합으로 되어있다. 식 (8)에서 변조항들이 그리드 왜곡을 일으키며, 그리드 왜곡을 완화시키기 위해서는 이러한 변조항을 필터를 사용하여 제거해야 한다.

최종적으로, 그리드에 의하여 변조된 영상 h_g 에 x선의 노출량을 의미하는 상수 β (> 0)를 곱한 영상 βh_g 가 영상디텍터에 입력된다(그림 1 참조). 실제 x선 영상 시스템에서 이러한 노출량은 x선관의 전류와, 전류가

흐른 시간을 곱한 mAs 값을 통하여 조정할 수 있다. 따라서 그림 1의 모델에서 조명을 βh_1 형태로 고려할 수도 있는데, 이론적 전개의 편의성을 위하여 노출량 β 를 분리하여 곱하는 형태를 취한다.

원영상 h 의 최대 주파수가 f_M 이므로 그리드투과영상 h_g 에 h 성분의 겹침이 발생하지 않기 위해서는 그리드 주파수 f_1 은 다음 관계식을 만족해야 한다^[6].

$$f_1 > 2f_M \quad (9)$$

이러한 결과는 기존의 더하기 모델^[2, 5]의 경우에 있어서 $f_1 > f_M$ 의 조건과는 상이한 결과이다. 또한 식 (8)의 변조 모델을 통해서 그리드 왜곡을 일으키는 각 변조항들의 신호대역폭이 모두 $2f_M$ 으로, 이러한 변조항들을 제거하기 위해서는 대역폭이 매우 좁은 notch 필터를 사용해서는 충실히 제거 할 수 없음을 알 수 있다.

3. 사진기응답함수와 포화 특성

그리드를 사용하는 방사선 영상 시스템의 구성은 그림 1에 도시한 바와 같이, 그리드로 인한 진폭 변조된 영상 βh_g 를 얻는 부분과 영상디텍터로 구성되어 있다. 영상디텍터에서는 βh_g 를 디지털 신호로 변환하는데, 입력되는 βh_g 에 LPF를 적용하고 사진기응답함수(camera response function)^[9]를 통과 후 표본주파수 f_s (lines/mm)로 표본화하고 양자화함으로 변환이 이루어진다. 여기서 사진기응답함수는 일반적으로 일정한 영역에서는 선형적인 특성을 가지지만 노출이 매우 낮거나 높은 경우에는 비선형적인 특성을 보인다. 본 논문에서는 영상 형성 모델의 단순화를 위하여 일정한 영역에서 선형적인 특성을 가지는 사진기응답함수를 사용하였는데*, 영상의 포화를 묘사하기 위하여 $a \geq 0$ 인 상수 a 에 대하여 다음과 같이 정의되는 클리퍼 함수 C 를 사진기응답함수로 사용하였다.

$$C(a) = \begin{cases} a, & 0 \leq a \leq 1 \\ 1, & a > 1 \end{cases} \quad (10)$$

여기서 포화된 신호의 최대치는 1이 된다. 영상디텍터에서의 포화 특성을 관찰하기 위하여, 기존의 진폭 변조 영상 형성 모델^[6]에 상수 β 가 곱해지는 투과 모델과 클리

* DRTECH Co. FDXD1417의 경우^[3], SID(source to image distance)가 150cm일 때 1-6.3mAs 범위의 노출량에서 영상디텍터에 x선을 직접 방사하는 경우 선형적인 특성을 보인다.

퍼 함수를 통과하는 부분을 더 추가 하였으며, 그리드 영상 g 에서 기존의 $\alpha = 0$ 인 경우^[5]와 비교하여 그림 2에서 보는 바와 같이 α 가 다른 값도 가질 수 있도록 하였다.

이제 노출량 β 가 증가함에 따라 획득하는 x선 영상의 특성에 대하여 고찰해보기로 한다. 본 절에서는 영상 포화 특성에 대한 이론적 고찰의 용이함을 위하여 그림 1에서 LPF 과정은 생략하였다. 즉 βh_g 가 카메라 응답함수 C 에 직접 입력된다고 가정한다. 따라서 영상 디텍터 내에서 표본화하기 전의 신호는 $C(\beta h_g)$ 가 된다. 일정한 범위의 노출량 β 에 대하여 아직 포화가 발생하지 않은 경우 다음의 식이 만족된다고 하자.

$$\beta h_g(x, y) \leq 1 \quad ((x, y) \in \Lambda) \quad (11)$$

이때 식 (10)과 (11)로부터, 영상디텍터로 입력되는 신호는 다음과 같다.

$$C(\beta h_g(x, y)) = \beta h_g(x, y) \quad ((x, y) \in \Lambda) \quad (12)$$

식 (8)과 (12)에서 각 주파수에 해당하는 계수의 크기는 $\beta a_n \quad (n = 0, 1, \dots)$ 이 되므로 변조항의 크기는 β 에 정비례해서 증가한다. 이렇게 식 (11)이 만족되는 β 의 범위에 있는 x선 영상을 정상 영상이라고 하자.

영상디텍터에 입력되는 영상 βh_g 가 식 (11)을 만족하지 못하면, 즉 화소의 위치 $(x, y) \in \Lambda$ 에 대하여 다음 식을 만족하는 경우가 발생하면 영상디텍터에서 포화가 발생하기 시작한다.

$$\beta h_g(x, y) > 1 \quad (13)$$

영상디텍터에서 포화가 발생하기 시작할 때, 그리드의 투과하는 부분, 즉 그림 2의 g 에서 1에 해당하는 부분의 $C(\beta h_g(x, y))$ 값이 영상디텍터에서 먼저 포화가 되어 모두 1이 되고, g 의 α 에 해당하는 부분의 값은 아직 포화가 되지 않아서 $\alpha \beta h(x, y)$ 의 값을 가진다고 가정하자. 그러면 표본화하기 전의 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$C(\beta h_g(x, y)) = g((x, y), \alpha \beta) h(x, y) + g((x, y), 0)(1 - h(x, y))$$

이 식에서 노출량 β 와 관련된 항은 우측의 $g((x, y), \alpha \beta) h(x, y)$ 이며, 이때 g 의 Fourier 급수에 있어서 각 계수 a_n' 는 식 (5)와 (6)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$a_0' = \frac{\tau + \alpha \beta (T - \tau)}{T} \quad (14)$$

$$a_n' = 2(1 - \alpha \beta) \frac{\sin(\pi n f_1 \tau)}{\pi n} \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (15)$$

따라서 $\beta \leq 1/\alpha$ 의 범위에서 β 가 증가하면($\beta \rightarrow 1/\alpha$) 식 (14)와 (15)로부터 다음과 같은 특성을 얻을 수 있다.

$$a_0' \uparrow 1 \text{ 이고 } a_n' \downarrow 0 \quad (n = 1, 2, \dots) \quad (16)$$

즉 이렇게 포화가 되는 영역에서는 노출량 β 가 증가하면서 평균치 a_0' 에 해당하는 원영상 h 의 성분은 크기는 계속 증가하지만 그리드 주파수 f_1 과 그의 고조파 $n f_1 \quad (n = 2, 3, \dots)$ 에 해당하는 변조항의 크기는 오히려 감소하게 된다.

마지막으로 영상디텍터에서 완전히 포화가 되면 $C(\beta h_g(x, y)) = 1$ 이 성립한다. 이때는 더 이상 원신호 항과 그리드로 인한 변조항이 존재하지 않게 된다. 따라서 $C(\beta h_g(x, y))$ 의 Fourier 변환의 크기에서 투과영상 h 에 해당하는 최대치는 더 이상 증가하지 않고 상한치 1에 이르며, 그리드 왜곡에 해당하는 변조항의 최대치는 모두 0이 된다. 이렇게 포화가 되기 시작하면서 완전히 포화될 때까지의 영상을 포화된 영상이라고 부른다.

포화가 발생하기 시작하는 β 는 x선 영상을 얻으려고 하는 물체에 따라서 다르며, 한 물체 내에서도 다를 수 있다. 배경만 있는 영상이라고 하면 영상디텍터에서 형성되는 영상 βh_g 는 $\beta h_I(x, y)g((x, y), \alpha)$ 이고 물체만 있는 경우는 $\beta h_I(x, y)h_T'(x, y)g((x, y), \alpha)$ 이 되므로 제 II.1절의 가정 $h_T'(x, y) \ll 1$ 으로부터 다음 관계식이 만족된다.

$$\beta h_I(x, y)g((x, y), \alpha) \gg \beta h_I(x, y)h_T'(x, y)g((x, y), \alpha) \quad (17)$$

따라서 노출량 β 가 증가하면서 영상의 값이 더 큰 배경 영역에서 먼저 식 (13)을 만족하는 경우가 발생하여 포화가 발생하기 시작하며 물체 영역은 노출량 β 가 더 증가해야지 포화되기 시작한다. 이러한 분석은 물체와 배경이 섞여있는 일반 x선 영상의 경우, 각 변조항의 최대치 특성은 배경에 의해 좌우되는데, 노출량 β 가 증가하면서 처음엔 같이 비례해서 증가하다가 물체 영역보다 먼저 포화가 발생하면서 식 (16)에서 보는 바

와 같이 원영상 성분의 경우 더 이상 증가하지 않고 머물러 있지만, 고조파에 해당하는 변조항의 경우에는 포화되면서 오히려 감소하기 시작한다. 그러나 이때는 물체 영역에는, 아직 포화가 일어나지 않으며, 단순히 각 변조항의 최대치만 측정해서는 물체 영역에서 포화가 발생하고 있는지를 알 수 없다. 만일 이러한 최대치를 기준으로 하여 BRF의 대역폭을 결정해서 변조항을 제거한다고 하면 물체의 경우 증가한 노출량 β 에 의하여 그 성분의 크기가 커져 있음에도 불구하고 배경 영역에 의해 감소되기 시작하는 최대치로 인하여 잘못된 적응 필터링을 수행할 수 있다. 따라서 물체에 대한 각 변조항의 크기에 적응하여 필터링을 적용하기 위해서는, 식 (3) 이후에 분석한바와 같이 물체에 의해서 좌우되는 최대 주파수 f_M 또는 SSB를 통하여 주어진 노출량 β 에 대한 변조항의 크기를 효율적으로 측정하고, 그에 따라 BRF의 대역폭을 조정하여 물체 내의 그리드 왜곡을 효율적으로 제거할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다.

4. 표본화와 그리드 왜곡

본 절에서는 클리퍼 함수를 통과한 영상 신호가 표본화를 거치면서 에일리어스 형태의 그리드 왜곡이 발생하는 것에 대해서 기존의 연구를 중심으로 간단히 언급하였으며^[6,8], 그리드 왜곡을 일으키는 변조항의 중심 주파수에 대하여도 정리하였다. 이러한 중심주파수를 알아야 BRF를 그 곳에 적용하여 변조항을 제거할 수 있다.

식 (9)와 (11)을 만족하는 정상 영상인 βh_g 에 대하여 그림 1에서 영상디텍터의 LPF가 이상적으로 $\beta a_0 h$ 성분만을 뽑아낼 수 있다면, 원신호의 Nyquist 주파수인 $2f_M$ 보다 높은 표본주파수 f_s 로 표본화하여 영상 βh_g 로부터 원영상 h 또는 $\beta a_0 h$ 를 복원할 수 있다. 여기서 영상디텍터의 LPF는 에일리어스 방지 필터의 역할을 한다. 따라서 그리드의 주파수가 표본주파수보다 크다고 하면, 즉 $f_1 \geq f_s$ 이면, 획득한 영상의 최대주파수 f_M 이 최대 $f_s/2$ 일 때까지 에일리어스가 발생하지 않고 고해상도의 원영상을 복원할 수 있다.

만일 영상디텍터의 LPF에서 그리드 신호를 완벽하게 제거하지 못하면 그리드 신호의 일부분이 표본화된 영상에 남아있게 된다. 이렇게 남아있는 그리드 신호의 일부분을 그리드 왜곡이라 한다. 식 (8)에서 보는 바와

같이 기본 그리드 주파수 f_1 과 그의 고조파를 중심주파수로 이루어진 변조항들이 남아있게 되는데, 표본주파수에 따라 이러한 중심주파수의 에일리어스가 그리드 왜곡으로 표출된다. 주어진 그리드 주파수 f_1 과 각도 ϕ 에 대하여 그리드 왜곡의 중심주파수를 다음과 같이 구할 수 있다. 각도 ϕ 로 회전된 그리드를 사용하는 경우 주파수 nf_1 ($n=1,2,\dots$)의 변조항을 표본화하면서 발생한 변조항의 기본항 또는 에일리어스 항의 중심 주파수는 다음과 같다.

$$(nf_1 \cos\phi + mf_s, nf_1 \sin\phi + m'f_s) \quad (m, m' \in Z)$$

사상 $\eta: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ 을 다음과 같이 정의하자.

$$\eta(a) := a - \left\lceil \frac{a}{f_s} - 0.5 \right\rceil f_s \quad (a \in \mathbb{R})$$

이 식에서 $\lceil a' \rceil$ 는 실수 a' 보다 크거나 같으면서 가장 작은 정수를 의미한다. 또한 사상 $\mu: \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ 를 다음과 같이 정의하자.

$$\mu(b, b') := (\eta(b \cos b'), \eta(b \sin b')) \quad (b, b' \in \mathbb{R})$$

그러면 표본주파수 f_s 로 표본화를 하는 경우, 인지가 가능한 주파수 영역 $(-f_s/2, f_s/2]^2 \subset \mathbb{R}^2$ 내로 들어오는, nf_1 을 가지는 변조항 또는 그의 에일리어스 항의 중심 주파수는 $\mu(nf_1, \phi)$ 가 된다. 여기서 중심주파수 $\mu(nf_1, \phi)$ 를 고조파 nf_1 에 의한 왜곡주파수라고 부르자. 또한 이러한 왜곡주파수의 원점에 대해 대칭인 주파수 $-\mu(nf_1, \phi)$ 도 주파수 영역 $[-f_s/2, f_s/2]^2$ 에 존재한다. 주파수 $-\mu(nf_1, \phi)$ 를 대칭왜곡주파수라고 부르자. 주파수 영역 $[-f_s/2, f_s/2]^2$ 에는 왜곡주파수 $\mu(nf_1, \phi)$ 와 대칭왜곡주파수 $-\mu(nf_1, \phi)$ 를 중심 주파수로 가지는 변조항이 존재하며, 이러한 변조항들은 그리드의 n 차 고조파 성분인 nf_1 로 인하여 발생하는 그리드 왜곡이 된다. 따라서 이러한 그리드 왜곡을 제거하기 위해서는 $\mu(nf_1, \phi)$ 와 $-\mu(nf_1, \phi)$ 를 중심주파수로 가지는 BRF를 사용하여 해당하는 변조항을 제거할 필요가 있다. 변조항의 중심주파수를 원점으로부터 멀리할수록 변조항의 제거가 용이해지는데^[11], 적절한 그리드 각도에 따라서 주파수 영역 $[-f_s/2, f_s/2]^2$ 의 가장자리로 보낼 수가 있다^[10]. 또한 이때는 중심주파를

예측할 필요 없이 공간 영역에서 1차원의 간단한 평균 필터를 사용하여 각 축으로 분리하여 적용하면서 효율적으로 그리드 왜곡을 제거할 수 있다^[8].

III. 그리드 왜곡의 제거를 위한 적응 필터링

그리드 왜곡을 발생시키는 변조항을 제거하기 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 n 차의 Butterworth BRF를 사용하였다^[5,7].

$$1 - \frac{1}{1 + \left[\frac{(u-u_1)^2 + (v-v_1)^2}{f_c^2} \right]^n} \quad (18)$$

이 식에서 f_c 는 차단주파수이며, BRF의 대역폭 B 는 $B = 2f_c$ 가 되며, BRF의 중심 주파수는 (u_1, v_1) ($\in [-f_s/2, f_s/2]^2$)이다. 카메라응답함수 C 를 통과한 신호의 Fourier 변환을 H_C 라고 하고, 어떠한 문턱치인 양의 상수 t_0 에 대하여 변조항의 중심 주파수 (u_1, v_1) 의 주위에서 크기 $|H_C(u, v)|$ 가 문턱치 t_0 을 넘는 신호가 그리드 왜곡을 만든다고 하고, t_0 보다 작은 신호는 그리드 왜곡에 미미한 영향을 미친다고 하자. 그러면 그리드의 제거를 위해서는 t_0 을 넘는 신호를 BRF를 사용하여 제거할 필요가 있다. 주파수 (u_1, v_1) 을 중심으로 하고 양의 상수 J 에 대하여 면적이 $J \times J$ 인 집합 $\Gamma_1 (\subset \mathbb{R}^2)$ 을 다음과 같이 정의하자.

$$\Gamma_1((u_1, v_1), J) := \left[u_1 - \frac{J}{2}, u_1 + \frac{J}{2} \right] \times \left[v_1 - \frac{J}{2}, v_1 + \frac{J}{2} \right]$$

또한 임의의 문턱치 $t (> 0)$ 보다 $|H_C(u, v)|$ 가 큰 성분의 집합 Γ_2 를 다음과 같이 정의하자.

$$\Gamma_2(t) := \{(u, v) \in [-f_s/2, f_s/2]^2 \mid |H_C(u, v)| \geq t\}$$

그러면 그리드 왜곡의 제거를 위해 필터링을 수행해야할 주파수 영역에서 위치의 집합은 다음과 같다.

$$\Gamma_1((u_1, v_1), B) \cap \Gamma_2(t)$$

이러한 집합의 면적을 A 라 하고 다음과 같이 정의하자.

$$A((u_1, v_1), t) := \int_{\Gamma_1((u_1, v_1), B) \cap \Gamma_2(t)} dudv$$

이제 문턱치 $t (> 0)$ 보다 큰 신호의 SSB, 즉 t -SSB를 ssb 라 표시하고, 이를 면적 A 와 동일한 원의 지름이라고 정의하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$ssb((u_1, v_1), t) := 2\sqrt{\frac{A((u_1, v_1), t)}{2\pi}}$$

어떠한 문턱치 $t_1 (> 0)$ 의 t -SSB에 대하여 Butterworth BRF의 대역폭 B 를 어떠한 양의 상수 R 에 대하여 $B = R \cdot ssb((u_1, v_1), t)$ 로 설정하자. 만일 문턱치 t_1 에 대하여 적절한 최소의 대역폭 B 를 제공하는 비례상수 R^o 를 찾을 수 있다면 다음 식과 같이 t -SSB를 사용하여 BRF의 대역폭을 결정하는 적응 필터링을 수행할 수 있다.

$$B = R^o \cdot ssb((u_1, v_1), t_1) \quad (19)$$

이제 본 논문에서 제안하는 적응 필터링 기법을 정리하면 다음과 같다.

그리드 왜곡 제거를 위한 적응 필터링 알고리즘:

- 0) 문턱치 t_1 의 결정과 그에 대한 비례상수 R_1 의 결정. 제거할 변조항의 개수 N 의 결정.
- 1) 주파수 nf_1 ($n = 1, \dots, N$)의 왜곡주파수 $\mu(nf_1, \phi)$ 와 대칭왜곡주파수 $-\mu(nf_1, \phi)$ 를 계산.
- 2) 주파수 nf_1 ($n = 1, \dots, N$)에 대하여 식 (19)로부터 BRF의 대역폭을 구하고 왜곡주파수와 대칭왜곡주파수에 대하여 (18)의 BRF를 적용하여 그리드 왜곡 제거.

IV. 실험 결과

본 장에서는 노출량을 달리하면서 획득한 실제 x선 디지털 영상의 특성을 영상디텍터에서 발생하는 포화 특성과 함께 관찰하였다. 실제 x선 디지털 영상에 대한 실험은, DRTECH^[3]사의 $139\mu\text{m}/\text{pixel}$ 의 표본주파수에 14bits/pixel을 가지는 영상디텍터를 사용하고 x선의 mAs 값을 여러 가지로 변경하여 영상을 획득하는 방법으로 노출량을 달리하는 실험을 수행하였다.

1. 노출에 대한 영상의 특성 실험

본 절에서는 먼저 노출량에 따른 x선 디지털 영상의 특성을 실험을 통해서 관찰하고 이러한 관찰이 제 II장

에서 이론적으로 분석한 것과 일관되는 결과를 보임을 확인하였다. 이를 위하여 물체의 x선 디지털 영상에서 물체의 크기가 달라짐에 따라 각 변조항의 최대치와 t -SSB 곡선이 어떠한 영향을 받는 지를 알아보았다. 그림 3은 가슴 부분의 x선 영상*으로 그림 3(a)는 물체가 없이 그리드인 배경만 존재하는 영상('Background')이

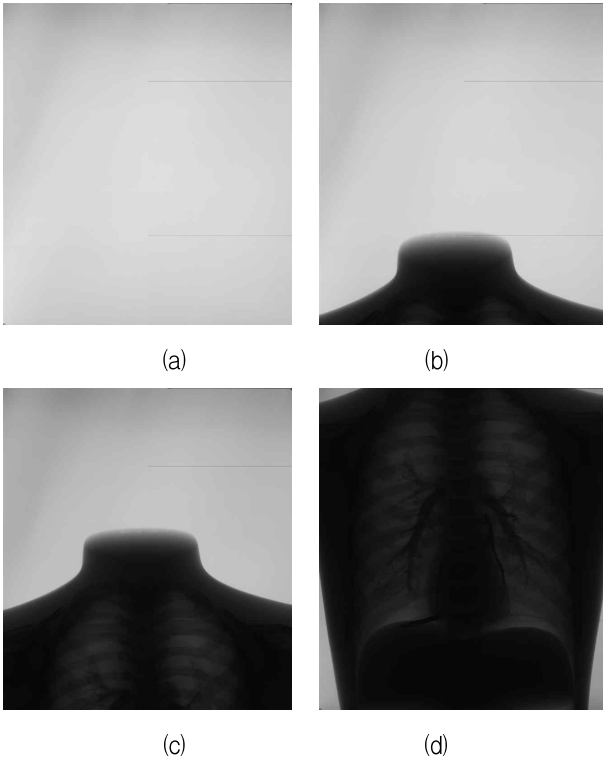


그림 3. 다른 면적을 가지는 물체에 대한 최대치와 중요대역폭(SSB) 실험을 위한 x선 디지털 영상(물체: 가슴 팬텀, $f_1 = 4.055 \text{ lines/mm}$, $\phi = 19^\circ$, $f_s = 7.194 \text{ lines/mm}$, 76kVp, SID=130cm, 200mA, 12.5mAs) (a) 'Background' (배경 영상) (b) 'Background+Object' (배경 부분 > 물체 부분) (c) 'Object+Background' (배경 부분 < 물체 부분) (d) 'Object' (물체 영상)

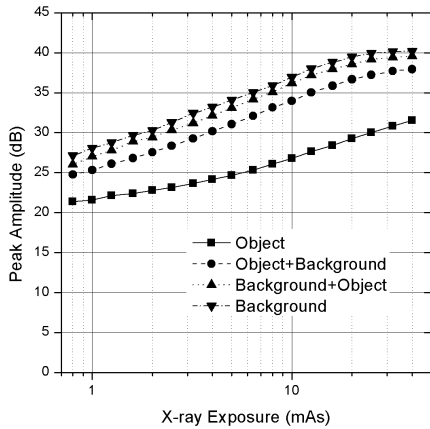
Fig. 3. X-ray digital images for the experiments regarding the peaks and SSBs of different object areas(Object: chest phantom, $f_1 = 4.055 \text{ lines/mm}$, $\phi = 19^\circ$, $f_s = 7.194 \text{ lines/mm}$, 76kVp, SID=130cm, 200mA, 12.5mAs) (a) 'Background' (background image) (b) 'Background+Object' (background area > object area) (c) 'Object+Background' (background area < object area) (d) 'Object' (Object image).

* 일반적인 x선 영상에서는 음화를 보는데, 본 논문에서는 영상디텍터에서 노출의 증가에 따른 특성 관찰을 위하여 양화 형태로 영상을 보았다. 즉 노출이 많아질수록 밝아지는 영상이 된다.

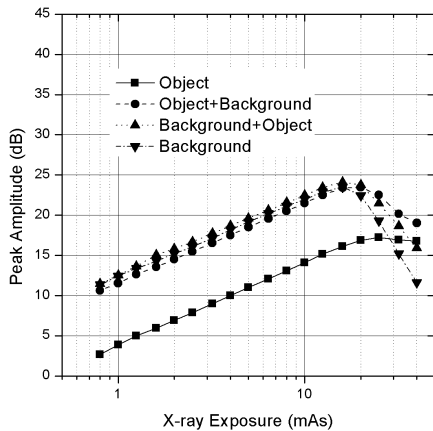
며 그림 3(b)와 (c)는 물체인 가슴의 면적이 점점 커지는 영상('Background+Object'와 'Object+Background')이고 그림 3(d)는 물체만 존재하는 영상('Object')이다. 그림 4(a)와 (b)에는, 그림 3의 형태를 가지는 물체에 대하여 노출량(mAs)을 달리하여 획득한 x선 디지털 영상에 대하여, 원영상항과 f_1 변조항의 최대치 곡선에 노출량에 대하여 각각 도시하였다.

아직 포화가 발생하지 않았다면 그림 4(a)의 곡선은 영상의 평균, 즉 식 (12)로부터 $\beta a_0 |H(0,0)|$ 의 곡선이 되므로, 노출량 β 가 증가하면서 이 곡선은 선형적으로 증가한다. 물체의 크기가 증가하면서, 물체로 인하여 영상의 평균이 내려감으로 곡선이 전체적으로 아래로 내려가는 특성을 관찰할 수 있다. 또한 식 (17)에서 배경에 대하여 분석한 바와 같이 배경만 있는 영상(그림 3(a), 'Background')에서 가장 먼저 포화가 발생하기 시작하는데, 그림 4(a)를 보면 노출량이 증가하여 20mAs 이상이 되면, 배경 영상의 곡선('Background')이 증가하다가 포화되면서, 식 (16)의 계수 a_0' 에 대한 분석에서 보는바와 같이 일정한 값으로 머물러 있음을 알 수 있다. 이 곡선의 상한치는 클리퍼 함수의 정의로부터 1이 되는데, 그림 4(a)의 실험에서는 이 상한치를 영상디텍터의 14bits/pixel의 특성을 고려하여 1이 아닌 $(2^{14} - 1)$ 로 나타났다. 따라서 그림 4(a)에서 원영상 최대치의 상한치는 42.14dB 정도가 된다. 반면에 그림 4(a)에서 물체 영상(그림 3(d))의 경우('Object')는 노출량이 20mAs이상인 경우에도 포화가 아직 일어나지 않고 계속해서 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 4(b)의 배경 영상의 경우('Background'), f_1 변조항의 최대치 곡선은, 아직 포화가 발생하지 않을 때는 $\beta a_1 |H(0,0)|$ 이므로 노출량에 비례하여 증가하다가 노출량이 20mAs이상에서 포화가 되면서 급격히 떨어지는 특성을 관찰할 수 있다. 이러한 특성은 제 II장의 식 (16)으로부터 분석한 $a_1' \downarrow 0$ 과 일관되는 결과이다. 반면에 물체 영역만 있는 경우('Object')는 아직 포화가 발생하지 않았으며 20mAs이상에서 배경 영상에 포화가 발생해서 곡선이 떨어지고 있어도 물체 영상의 최대치 곡선은 계속 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림 4의 실험에서 물체와 배경이 섞여 있는 경우('Background+Grid'와 'Grid+Background')는 최대치 곡선의 형태가 배경만 있는 경우의 곡선과 유사한 특성을 보임을 알 수 있다. 이러한 관찰은 제 II.1절의 식 (2) 이후의 분석과



(a)



(b)

그림 4. 다른 면적을 가지는 물체(그림 3)에 대한 최대치 곡선 (a) 원영상 h 의 곡선 (b) f_1 변조항의 곡선

Fig. 4. Peak curves for x-ray images(Fig. 3.), of which object areas are different (a) Curves of the original image h (b) Curves of the modulated terms.

일관되는 것이다.

이제 그림 3의 영상에 대하여 t -SSB 곡선의 실험 결과를 그림 5에 도시하였다. 아직 포화가 발생하지 않은 경우, t -SSB 곡선은 노출량이 증가하면서 계속해서 증가함을 관찰할 수 있다. 그러나 그림 5에서 배경 영상의 경우(‘Background’)는 20mAs 이상에서 포화가 발생하면서 t -SSB 곡선도 감소하기 시작함을 알 수 있는데, 이는 식 (16)의 $a_1' \downarrow 0$ 로부터 오는 결과이다. 하지만 물체 영상의 경우(‘Object’)는 아직 포화가 발생하지 않아서 계속해서 증가하는 추세를 보이고 있다. 또한

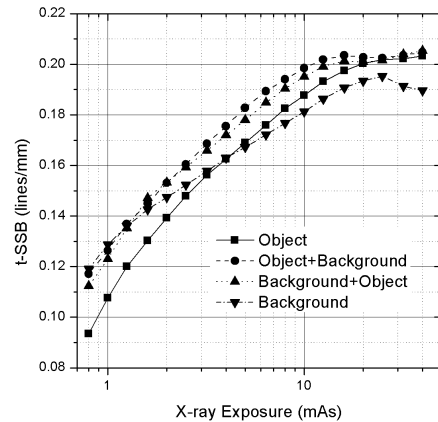


그림 5. 다른 면적을 가지는 물체(그림 3)에 대한 f_1 변조항의 중요신호대역폭(t -SSB) 곡선(문턱치 $t = 2$ dB)

Fig. 5. Significant signal bandwidth of f_1 for x-ray images(Fig. 3.), of which object areas are different (threshold: $t = 2$ dB).

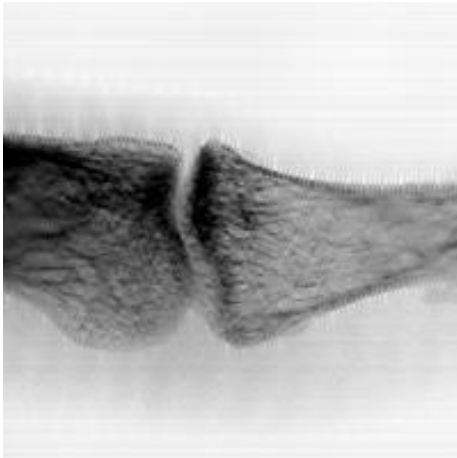
물체와 배경이 섞여 있는 경우(‘Object+ Background’와 ‘Background+Object’)에는 t -SSB 곡선의 특성이 물체 영상의 경우와 유사함을 알 수 있다. 또한 물체의 크기와 민감하지 않은 t -SSB 곡선을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 이는 물체의 면적과 상관없이 주어진 노출량에 대하여 일정한 대역폭을 가지는 BRF를 사용하여 그리드 왜곡을 제거해야 하는 원칙에 t -SSB의 사용이 적합함을 의미하고 있다.

또한 물체와 배경이 모두 존재하는 일반적인 x선 디지털 영상에 대하여, 그림 4와 5의 실험을 서로 다른 물체에 대하여 수행하여 물체가 다른 경우에도 일관된 결과가 나옴을 관찰하였다. 이때 사용한 물체는 사람의 팬텀으로 가슴 부분, 머리 부분, 손 부분이다.

3. 적응 필터링 실험 및 비교

본 절에서는 본 논문에서 제안한 적응 필터링 알고리즘을 x선 디지털 영상에 적용하여 그리드 왜곡의 제거를 시도하였으며 그 성능을 비교해 보았다.

적응 필터링을 위하여, 어떠한 임계치 t_1 에 대한 식 (19)의 t -SSB와 BRF의 대역폭 B 간의 관계를 규정하는 상수 R^o 를 실험을 통해서 구했다. 적절한 R^o 는, BRF의 대역폭 B 를 증가시키면서 그리드 왜곡이 제거되기 시작하는 B 를 주관적인 판단으로 구하고 식 (19)로부터 R^o 를 결정하였다. 본 실험에서는 f_1 의 경우 대략 $R^o \approx 4$ 가 적당함을 알 수 있었다.



(a)

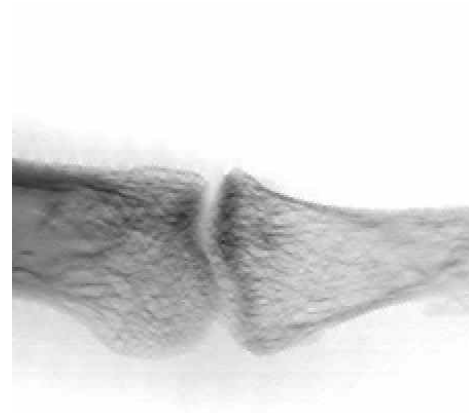


(b)

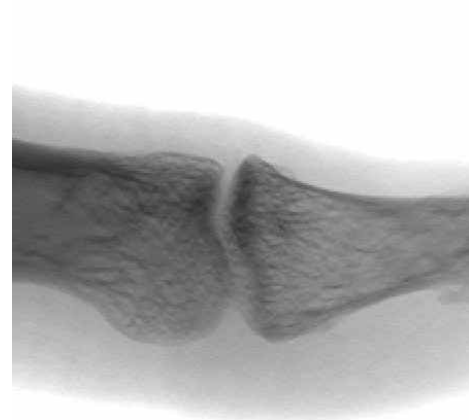
그림 6. 고정된 대역폭의 BRF를 사용한 그리드 왜곡 제거($\phi=0$, SID=100cm) (a) 4.0mAs 노출량의 BRF를 16mAs의 영상에 적용 (b) 16mAs 노출량의 BRF를 4.0mAs의 영상에 적용

Fig. 6. Grid artifact reduction based on fixed bandwidths (a) Application of BRF, which is designed for 4.0mAs, to the 16mAs image (b) Application of BRF, which is designed for 16 mAs, to the 4.0mAs image.

그림 6은 대역폭이 고정된 BRF를 사용하여 nf_1 ($n = 1, \dots, 3$)의 변조향으로 인한 그리드 왜곡을 제거한 결과로, BRF의 대역폭이 그리드 왜곡의 크기에 적응하여 가변적으로 적용되어야 한다는 사실을 보여주기 위한 것이다. 그림 6(a)는 4.0mAs의 노출량으로 획득한 x선 디지털 영상에 적합하도록 설계된 BRF를 그대로 16mAs의 노출로 획득한 영상에 적용한 결과인데, 배경 부근에서 심하게 포화가 발생하였고, 배경과 물체의 경계에서 심하게 나타나는 그리드 왜곡을 충실히 제거하지 못함을 알 수 있다. 이러한 강한 그리드 왜곡을 제



(a)



(b)

그림 7. 제안한 적응 BRF를 사용한 그리드 왜곡 제거 (a) 16mAs의 영상에 적용 (b) 4.0mAs의 영상에 적용

Fig. 7. Grid artifact reduction by using proposed adaptive BRF (a) Application to the 16mAs image (b) Application to the 4.0mAs image.

거하기 위하여 BRF의 대역폭을 더 늘려야 하며, 이렇게 늘어난 BRF로 4.0mAs의 영상의 그리드 왜곡을 제거하게 되면 그림 6(b)에서 보는 바와 같이 저주파 성분과 고주파 성분에서의 손실이 발생하게 된다. 반면에 그림 7은 제안한 적응 BRF로 그리드 왜곡 제거를 시도한 것으로, 각 노출량에 따라 적절히 그리드 왜곡을 제거하고 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 x선의 노출에 따른 x선 영상에서의 그리드 왜곡의 특성을 변조 영상 형성 모델을 통하여

분석하였다. 특히 과다 노출로 인한 포화된 영상의 특성을 알아보았다. 배경 영역에서 포화가 먼저 발생하면서 오히려 그리드의 각 고조파에 의한 왜곡 성분의 최대치는 줄어들며, 각 성분의 대역폭은 넓어지는 현상을 발견할 수 있었다. 이러한 대역폭에 대한 현상은 아직 포화가 발생하지 않은 물체 영역의 특성을 반영하는 것으로, 물체 영역에서의 그리드 왜곡을 효율적으로 줄이기 위해선 단순히 왜곡 성분의 크기를 측정해서 필터의 대역폭을 늘이는 방법보다는 왜곡 성분의 대역폭을 측정하여 필터의 대역폭을 조정하는 방법이 적절함을 알 수 있었다. 실제 x선 디지털 영상에 대해서도 포화 특성을 분석에 보았으며, 제안한 적응 필터링 기법으로 효율적으로 그리드 왜곡을 제거할 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] M. A. Thomas, A. H. Rowberg, S. G. Langer, Y. Kim, "Interactive image enhancement of CR and DR images," *Jour. Digital Imaging*, vol. 17, no. 3, pp. 189-195, Sep. 2004.

[2] J. Wang and H. K. Huang, "Film digitization aliasing artifacts caused by grid line patterns," *IEEE Trans. Medical Imaging*, vol. 13, no. 2, June 1994.

[3] www.drtech.co.kr

[4] L. L. Barski and X. Wang, "Characterization, detection and suppression of stationary grids in digital projection radiography imagery," in *Proc. SPIE Medical Imaging*, pp.502-519, 1999.

[5] C. -Y. Lin, W. -J. Lee, S. -J. Chen, C. -H. Tsai, J. -H. Lee, C. -H. Chang, and Y. -T. Ching, "A study of grid artifacts formation and elimination in computed radiographic images," *Jour. Digital Imaging*, vol. 19, no. 4, pp. 351-361, Dec. 2006.

[6] D. S. Kim, "Modulation model for the analysis of the stationary grid artifacts in digital radiography imaging," in *Proc. IEEE Int. Symposium, Biomedical Imaging, Rotterdam, Netherlands*, April 2010, pp. 768-771.

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

[8] 김동식, "고정그리드를 사용한 디지털 방사선 영상에서 1차원 필터에 기초한 왜곡의 제거," *대한전자공학회 논문집*, 제 47권 SP편, 제 5호, 117-126쪽, 2010년 9월.

[9] S. Mann, "Comparametric equations with practical applications in quantigraphic image processing," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 9, no. 8, pp. 1389-1406, Aug. 2000.

[10] D. S. Kim and S. Lee, "Grid artifact reduction in radiography with arctan(1/2)-degree rotated grid," *IEEE Int. Conf. Image Processing*, Sep. 2010, pp. 1957-1960.

[11] D. S. Kim and S. Lee, "Optimization of the grid frequencies and angles in digital radiography imaging," in *Proc. SPIE Medical Imaging, Physics of Medical Imaging 7961*, Feb. 2011.

— 저 자 소 개 —



김 동 식(평생회원)

1986년 서울대학교 제어계측 공학과 학사 졸업.

1988년 서울대학교 제어계측 공학과 석사 졸업.

1994년 서울대학교 제어계측 공학과 박사 졸업.

1998년~1999년 미국 인디애나주 Purdue 대학교 ECE 조교수
2000년~현재 한국외국어대학교 전자공학과 교수.

<주관심분야 : 신호처리, 영상처리, 계측 및 RF 회로>



이 상 균(정회원)

2004년 한국외국어대학교 전자공학과 학사 졸업.

2006년 한국외국어대학교 전자공학과 석사 졸업.

2006년~현재 (주) 디알텍 주임연구원

<주관심분야 : 신호처리, 바이오영상처리>