

# 다양한 필터링 기법을 이용한 디지털 X-선 영상복원 시뮬레이션 및 정량적 화질평가

이소영, 최성일, 오지은, 조희문, 이성주, 박연옥, 조효성

연세대학교 방사선학과

## Image Restoration Simulation of Digital X-ray Images Based upon Filtering Techniques and the Quality Evaluation of the Restored Images

Soyoung Lee, Sungil Choi, Jieun Oh, Heemoon Cho, Sungju Lee, Yeonock Park, Hyosung Cho

*Dept. of Radiological Science, Yonsei University*

### 요 약

의료영상 시스템을 통해 볼 수 있는 모든 X-선 영상은 피사체 본래의 특성만이 표현된 영상이 아닌 그 영상 시스템 고유의 특성이 반영된 영상이라 할 수 있다. 영상화질에서 시스템에 의한 열화는 시스템응답함수인 변조전달 함수(modulation transfer function; MTF)로 설명되며 잡음력 스펙트럼(noise power spectrum; NPS)으로 설명할 수 있다. 이 때, 열화된 영상은 영상시스템의 MTF와 NPS를 정확하게 측정함으로써 그 시스템의 특성에 따라 설계된 필터에 의해 원영상에 가깝게 복원(restoration)될 수 있다. 본 논문에서는, 영상복원 시뮬레이션을 통해 기존의 직접 역필터링(direct-inverse filtering), 제한된 역필터링(limited-inverse filtering), 위너 필터링(Wiener filtering) 기법을 바탕으로 열화된 영상을 원 영상에 가깝도록 복원하고 복원영상의 화질을 정량적으로 평가하였다.

### Abstract

Images acquired by a digital X-ray imaging system are inherently degraded due to system degradation process and additive noise sources. The system degradation in image quality is typically described as the system response function characterized by the modulation transfer function (MTF) and the noise term described as the noise power spectrum (NPS). In this case, we can restore the blur image as close as possible to the original image by using modified filtering designed for digital imaging system, as we know more precisely about the MTF and the NPS. In this paper, by performing simulation, we tried to restore blurred images taken from a digital X-ray imaging system based upon conventional filtering techniques such as a direct-inverse filtering, limited-inverse filtering, or a Wiener filtering, and evaluated the characteristics of the image restoration.

keyword : 열화영상, Filtering, Restoration, MTF, NPS

Corresponding Author : 조효성

주소: 강원 원주시 흥업면 연세대학교원주캠퍼스 방사선학과, E-mail: hscho1@yonsei.ac.kr, Tel: +82-33-760-2428

투고 일자: 2008년 09월 02일, 심사일자: 2008년 9월 30일, 수정 일자: 2008년 11월 25일, 게재 확정일자: 2008년 12월 16일

### I. 서론

의료영상 시스템에 의해 획득된 모든 X-선 영상은 피사체 본래의 특성만이 표현된 영상이 아닌 영상시스템 고유의 특성이 반영된 영상이라 할 수 있다. 따라서 선형적이고 공간 불변성을 갖는 영상 시스템에서 그 시스템의 특성이 정확히 측정된다면 열화영상을 원영상에 가깝도록 복원할 수 있다. 본 연구에서는 디지털 영상시스템의 특성을 정확히 측정함으로써 기존의 직접 역필터링, 제한된 역필터링, 위너 필터링 기법을 바탕으로 열화된 영상을 피사체 특성만이 반영된 원 영상에 가깝도록 복원하고 복원된 영상의 특성을 정량적으로 평가해 보고자 한다.

### II. 이론 및 실험방법

#### 1. 디지털 영상시스템

디지털 영상시스템은 일반적으로 영상정보를 형성, 검출, 저장, 기록하는 일련의 과정을 포함하며, 연속적인 신호를 갖는  $f(x,y)$ 가 시스템 연산자  $S$ 에 의해 형성된 출력영상  $g(x,y)$ 는 식 (1)과 같이 기술할 수 있다.

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi,\eta)S[\delta(x-\xi,y-\eta)]d\xi d\eta \quad (1)$$

영상시스템의 전반적인 특성은 점확산 함수(point spread function; PSF) 또는 시스템 임펄스 응답함수(impulse response function)에 의해 결정된다. 점확산 함수가 이미지 평면의 모든 위치에서 동일할 때, 그 영상시스템은 공간 불변성(shift-invariant)을 가진다고 정의하며, 영상복원 기법을 적용하기 위해서는 영상을 획득하는 시스템의 선형적이고 공간 불변적인 특성이 전제되어야 한다. 영상시스템이 선형성과 공간 불변성을 동시에 갖고 있을 때 콘볼루션(convolution) 연산자의 정의에 의해 획득영상  $g(x,y)$ 는 간단히 피사체  $f(x,y)$ 와 점확산 함수  $h$ 의 콘볼루션으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$g(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(\xi,\eta)h(x-\xi,y-\eta)d\xi d\eta = f(x,y) \otimes h(x,y) \quad (2)$$

#### 2. 디지털 영상복원

디지털 X-선 영상시스템에서 영상열화(degradation)는 원영상 정보가 시스템 고유의 특성에 의해 열화되고 부가적으로 잡음이 더해져서 나타난다. 반면, 영상복원(image restoration)이란 획득된 영상으로부터 영상시스템에 의한 열화 요인을 제거함으로써 원영상에 가까운 영상을 추정하는 영상처리기법으로 영상시스템의 특성을 정밀하게 측정하여 보정한다는 측면에서 영상 디컨볼루션(deconvolution)이라고도 한다(그림 1).

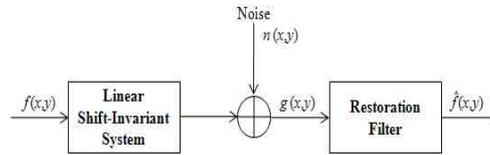


그림 1. 영상 열화·복원 모델

획득영상의 열화는 영상시스템의 불완전한 영상 형성과정에 의해 일반적으로 영상의 주파수 대역폭이 감소하는 것으로 선형적이고 위치불변적인 영상시스템에서 열화된 영상은 식 (3)과 같이 수식적으로 기술할 수 있다. 즉, 공간영역에서 열화영상  $g(x,y)$ 는 원영상  $f(x,y)$ 에 점확산 함수  $h(x,y)$ 와 콘볼루션되고 위치에 독립적인 노이즈  $n(x,y)$ 가 더해져서 획득된다. 공간상에서 콘볼루션은 푸리에 변환에 의해 공간주파수상에서 식 (4)와 같이 곱셈으로 간단히 바뀌어 푸리에 영역에서 쉽게 계산될 수 있다. 식 (4)에서  $F(u,v)$ 와  $G(u,v)$ 는 각각  $f(x,y)$ 와  $g(x,y)$ 의 푸리에 변환 값이며,  $H(u,v)$ 는 PSF인  $h(x,y)$ 의 푸리에 변환으로 공간주파수 영역에서 MTF에 해당한다<sup>[2]</sup>.

$$g(x,y) = h(x,y) * f(x,y) + n(x,y) \quad (3)$$

$$G(u,v) = H(u,v)F(u,v) + N(u,v) \quad (4)$$

### 2.1 직접 역필터링 (direct-inverse filtering)

직접 역필터링은 영상복원 기법 중에서 가장 직접적이고 간단한 방법으로 잡음에 대한 정보를 고려하지 않는 결정론적 방법에 의한 필터링 기법이다. 직접 역필터링에 의해 복원된 영상  $\hat{f}$ 는 공간 주파수상에서 식 (5)와 같으며, 영상시스템의 점확산 함수를 알고 있으면 간단히 영상복원이 가능하다. 그러나  $H(u,v)$ 가 0인 값을 가질 때 식 (5)에서 역필터링은 존재하지 않으며, 열화영상에 노이즈가 존재하고  $H(u,v)$ 가 0에 가까운 작은 값을 가질 때, 복원 영상에서  $(u,v)$ 에 존재하는 잡음이 크게 강조되어 나타난다. 그러나 점확산 함수에 의한 영상 열화가 작고 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio; SNR)가 1000:1 또는 그 이상을 값을 갖는 영상에서는 직접 역필터링에 의해서 화질이 개선될 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$\hat{F}(u,v) = \frac{G(u,v)}{H(u,v)} \quad (5)$$

### 2.2 제한된 역필터링 (limited-inverse filtering)

제한된 역필터링 기법에서는  $H(u,v)$ 가 0에 가까운 값을 갖지 않도록 제한된 주파수에서 임의의 상수  $m$ 를 정하여 영상복원을 제한한다. 식 (6)에서  $\hat{F}(u,v)$ 는 제한된 역필터에 의한 추정영상을 수식적으로 나타낸 것으로, 식 (7)의  $H_{limited}$  정의에 따라 주파수  $(u,v)$  이하에서는 직접 역필터링에 의해 복원되고  $(u,v)$  이상에서는  $H(u,v)$ 에 임의의 상수  $m$ 를 선택하여 필터링 효과를 조절함으로써 영상  $\hat{F}$ 를 추정한다. 따라서 제한된 역필터링에서는 고주파수영역에서 매우 작은 값을 갖는  $H(u,v)$ 에 의해 노이즈가 증폭되어 복원영상이 왜곡되는 것을 막을 수 있다.

$$\begin{aligned} \widehat{F}_{limited}(u,v) &= H_{limited}(u,v)G(u,v) \\ &= H_{limited}(u,v)[H(u,v)G(u,v) + N(u,v)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$H_{limited}(u,v) = \begin{cases} H_{inv}(u,v), & (u,v) < f_{limited} \\ w, & (u,v) > f_{limited} \end{cases} \quad (8)$$

### 2.3 위너 필터링 (Wiener filtering)

위너필터 또는 최소평균제곱오차필터(minimum mean-square-error filtering)는 영상복원 과정에서 영상의 열화와 잡음의 확률적 특성을 고려하는 선형 필터 중의 하나이다. 식 (9)에서 위너필터에 의해 복원된 영상  $\hat{F}(u,v)$ 는 원영상과 추정영상에 대한 오차를 최소화함으로써 유도할 수 있다. 식 (9)에서  $H^*$ 는  $H$ 의 복소공액이고,  $S_n$ 과  $S_f$ 는 각 잡음과 열화되지 않은 영상의 전력 스펙트럼(power spectrum)이다. 잡음이 거의 존재하지 않은 영상에서 식 (9)는 직접 역필터에 가까워지며, 잡음이 원영상에 대하여 매우 큰 값을 가지면 위너필터는 0에 가까워져 주파수 차단 필터(frequency rejection filter)와 유사한 필터가 된다.

$$\hat{F}(u,v) = \left[ \frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + \frac{S_n(u,v)}{S_f(u,v)}} \right] G(u,v) \quad (9)$$

이론적으로 위너필터를 이용한 영상복원을 하기 위해서는 원영상에 대한 정보  $S_f$ 가 필요하다. 그러나 실제로 피사체에 대한 이상적인 영상은 존재하지 않으므로 일반적으로 열화영상을  $S_f$ 로 대체하여 사용하거나  $S_n/S_f$  값을 임의의 위너상수(wiener constant)  $K$ 로 대체하여 식 (10)과 같은 위너필터가 사용된다<sup>[4]</sup>.

$$\hat{F}(u,v) = \left[ \frac{H^*(u,v)}{|H(u,v)|^2 + K} \right] G(u,v) \quad (10)$$

## 3. 실험 방법

### 3.1 열화함수의 측정

본 논문에서는 다양한 필터링 기법에 의해 복원된 영상의 특성을 정량적으로 분석하기 위해, 사용

된 영상시스템의 열화모델을 측정하여 영상열화와 복원과정을 시뮬레이션하였다. 열화모델을 측정하기 위해 초점 크기가 0.6 mm인 X-선관(Toshiba, E7239X)과 초점 크기가 5  $\mu\text{m}$  인 micro-focus X-선관(Hamamatsu, L7910-01)을 사용하여, 픽셀크기가 48 $\times$ 48  $\mu\text{m}^2$  CMOS 영상 센서(RadEye<sup>TM</sup>2, Rad-Icon Imaging Corp.)와 100 $\times$ 100  $\mu\text{m}^2$  CMOS flat panel 센서(Hamamatsu, C7943CA)로부터 영상을 획득하였다.

영상열화에 과정에서 시스템에 의한 열화는 영상시스템의 점확산 함수로 설명된다. 점확산 함수는 선형적이고 공간불변적인 영상시스템에서 그림 2에서 (a)와 같이 slit을 촬영하고 slit의 LSF로부터 획득하였다. LSF는 2차원 점확산 함수의 1차원적 표현으로 영상시스템이 선형이고 공간불변성을 가지면, slit을 이용하여 측정한 LSF로부터 식 (11)에 의해 점확산 함수로 변환될 수 있다. 그림 2에서 (b)는 X-선이 slit에 수직으로 입사하여 측정된 sampled LSF이며, (c)는 획득한 LSF로부터 2차원 점확산 함수로 재구성한 공간영역에서의 점확산 함수를 나타낸다. 신호에 독립적인 노이즈는 동일한 조건에서 획득한 가우시안 확률분포를 가진 white noise 영상으로부터 2차원 분포를 직접 획득하였다.

$$\begin{aligned} \mathcal{J}\{lsf(x)\} &= \int_{-\infty}^{+\infty} lsf(x)e^{-2\pi iux} dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} psf(x,y)dy \right] e^{-2\pi iux} dx \quad (11) \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} psf(x,y)e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \\ &= \mathcal{J}\{psf(x,y)\}_{v=0} \end{aligned}$$

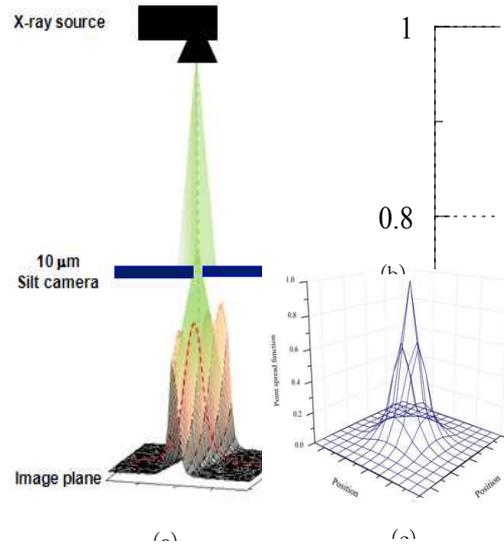


그림 2. 영상시스템의 (a) slit 영상획득, (b) slit의 LSF, (c) 점확산 함수.

### 3.2 영상 열화모델의 정량적 특성평가

#### 1) Blurred Signal-to-Noise Ration (BSNR)

영상복원 시뮬레이션에서, 영상시스템에 의한 열화는 BSNR을 이용하여 정량적으로 평가된다. BSNR은 열화된 영상의 신호대 잡음비로  $M \times N$  크기의 영상에서 노이즈의 분산이  $\sigma_n^2$  일 때, 식 (12)에 의해 계산된다. 여기서  $y(i,j)$ 는 잡음이 포함되지 않은 열화영상으로  $\bar{y}$ 는 영상  $y$ 의 기대치, 즉 평균값을 의미한다.

$$BSNR = 10 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{\frac{1}{MN} \sum_{i,j} [y(i,j) - \bar{y}(i,j)]^2}{\sigma_n^2}} \right\} \quad (12)$$

#### 2) Improvement in SNR (ISNR)

ISNR은 영상복원 알고리즘의 유효성을 평가하는 인자로 복원영상의 화질 개선정도를 정량적으로 분석하기 위해 사용된다. ISNR은 식 (13)에 의해 계산되며  $f(i,j)$ ,  $g(i,j)$ 와  $\hat{f}(i,j)$ 는 각각 원영상, 열화영상 그리고 복원영상을 나타낸다. ISNR은 필터

를 적용하여 복원된 영상이 열화영상에 비해 원영상에 가깝게 추정되면 양수값을 가지며, 원영상에 가깝게 복원될수록 큰 값으로 계산된다.

$$ISNR = 10 \cdot \log_{10} \left\{ \frac{\sum_{i,j} [f(i,j) - g(i,j)]^2}{\sum_{i,j} [f(i,j) - \hat{f}(i,j)]^2} \right\} \quad (13)$$

## II. 결과 및 논의

영상복원 실험에서 각 필터링 기법에 의해 복원된 영상의 화질을 정량적으로 분석하기 위해서는 원영상에 대한 정보가 필요하다. 영상시스템의 특성에 따른 점확산 함수와 노이즈로 인해 열화된 영상의 주파수 특성을 영상에서 직접 분석하기 위해서 Matlab(Version 7.6.0. 324 "R2008a")을 사용하여 표 1과 같은 주파수 특성을 가지는 test pattern을 모델링하였다.

표1 사용된 precision test pattern의 그룹별 주파수.

Group	LP/mm	Group	LP/mm
1	0.25	9	2.60
2	0.50	10	3.47
3	0.61	11	5.21
4	0.87	12	10.42
5	1.04	13	5.21
6	1.49	14	3.47
7	1.74	15	2.60
8	2.08	16	2.08

그림 3은 70 kV<sub>p</sub>, 1.25 mAs 조건에서 초점 크기가 0.6 mm인 X-선관과 48×48 μm<sup>2</sup> 픽셀 크기의 CMOS 센서로 구성된 영상시스템으로부터 획득한 열화모델에 의해 열화된 영상이다.

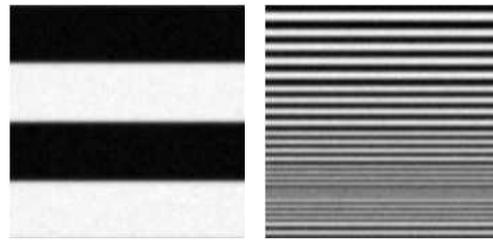


그림 3. 열화영상: (좌) 0.25LP/mm, (우) 2.08~10.24LP/mm.

그림 4는 그림 3의 profile로 영상시스템의 MTF가 10 %에서 7.0 LP/mm인 열화함수를 사용하였으므로 열화영상에서는 10.42 LP/mm을 제외한 모든 주파수 성분을 육안으로 구별할 수 있다. 열화영상의 BSNR은 31.3 dB이고 edge에서 gradient 값은 평균 약 0.35로 열화 되었다.

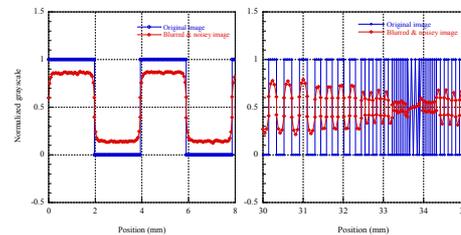


그림 4. 열화영상의 정규화 농도분포: (좌) 0.25 LP/mm, (우) 2.08~10.24 LP/mm

### 1. 직접 역필터링

그림 5는 직접 역필터에 의해 복원된 영상으로 고주파 영역에 해당하는 잡음과 pattern의 edge가 강조되었음을 육안으로 확인할 수 있다.

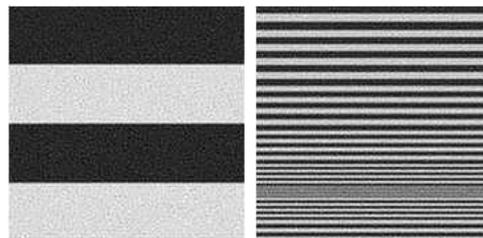


그림 5. 직접 역필터에 의한 복원영상: (좌) 0.25 LP/mm, (우) 2.08~10.24 LP/mm.

그림 6는 원영상, 열화영상, 직접 역필터링에 의한 복원영상에서 test pattern의 농도분포를 비교한 것이다. 복원영상의 농도는 원영상에 가까운 강도로 복원되고 고주파수 성분에 속하는 영상의 edge가 강조되나, 잡음 또한 증폭됨을 알 수 있다. 영상의 edge는 직접 역필터에 의해 gradient값이 평균 0.85로 열화영상에 비해 선예도가 향상되어 복원되었다.

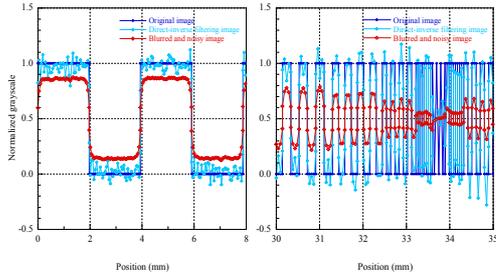


그림 6. 원영상, 열화영상, 직접 역필터에 의한 복원 영상의 농도분포: (좌) 0.25 LP/mm, (우) 2.08~10.24 LP/mm.

## 2. 제한된 역필터링

제한된 역필터에서 제한된 주파수  $f_{limit}$ 는 MTF 그래프와 noise spectrum이 교차하는 지점을 근사하여 선택하고, 상수  $\mu$ 는 복원영상의 ISNR 값을 계산하여 원영상에 가장 가까운 값으로 선택하였다. 그림 7은 6.63 LP/mm에서 0.56인 값을 갖는 MTF에 의한 제한된 역필터로 복원된 영상이다.

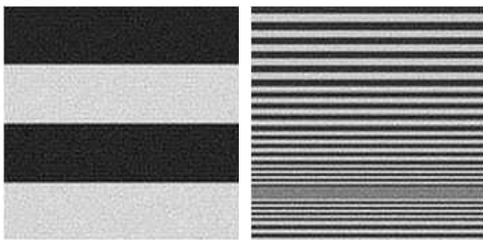


그림 7. 원영상, 열화영상, 제한된 역필터에 의한 복원 영상: (좌) 0.25LP/mm, (우) 2.08~10.24LP/mm.

그림 8은 그림 7의 농도 분포를 나타낸다. 제한된 역필터에 의한 복원영상은  $f_{limited}$  이상의 주파수 성분을 갖는 잡음에 대한 증폭이 없으므로 ISNR이

0.81 dB로 직접 역필터링에 의해 복원된 영상보다 더 화질이 향상되었고, edge의 gradient 값은 직접 역필터링과 비슷한 값인 평균 0.86으로 잡음은 줄어들었으나, 영상의 선예도는 크게 복원되었다.

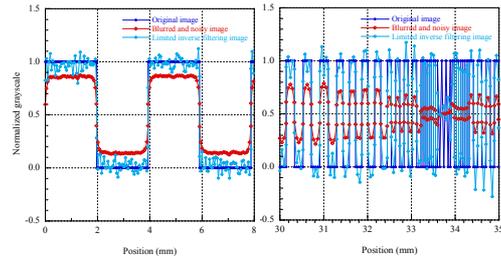


그림 8. 원영상, 열화영상, 제한된 역필터에 의한 복원 영상의 농도분포: (좌) 0.25LP/mm, (우) 2.08~10.24LP/mm.

## 3. 위너 필터링

그림 9는 위너 필터링 기법을 사용하여 복원된 영상으로 ISNR이 0.82 dB, edge의 gradient 값은 평균 0.89로 계산되었다. 시뮬레이션에서 위너필터에 의해 복원된 영상은 원영상과 잡음에 대한 정보를 바탕으로 계산되므로 다른 필터링 기법에서 보다 원영상에 가깝게 복원되었다.

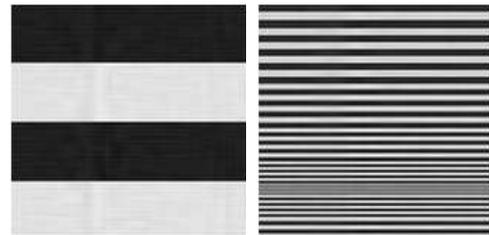


그림 9. 위너필터에 의한 복원영상: (좌) 0.25LP/mm, (우) 2.08~10.24LP/mm.

그러나 실험에서는 원영상과 확률적으로 분포하는 잡음을 정확히 예측할 수 없으므로 실제로 원영상을 복원하는데 어려움이 있다. 이러한 한계에 의해 일반적으로 노이즈에 대한 원영상의 비를 일정한 상수 값으로 근사한 위너필터가 사용된다. 그림 10은 위너 상수가 0.16인 위너필터에 의해 복원된 영상으로 영상의 ISNR은 0.69 dB로 노이즈

특성이 향상되고 edge의 gradient는 0.86으로 증가하였다.

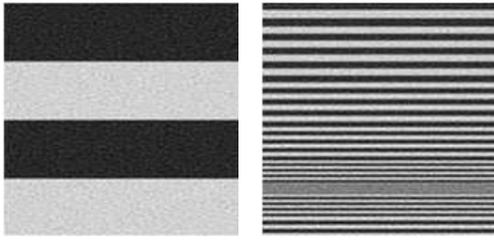


그림 10. 위너필터(K=0.16)에 의한 복원영상:  
(좌) 0.25LP/mm, (우) 2.08~10.24LP/mm.

그림 11은 원영상, 열화 영상, 위너 필터와 상수값을 가지는 위너 필터에 의한 복원영상의 농도 분포를 상호 비교한 것이다.

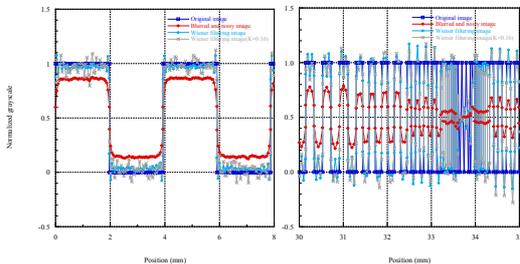


그림 11. 원영상, 열화 영상, 위너 필터와 상수값을 가지는 위너 필터에 의한 복원영상의 농도 분포:  
(좌) 0.25 LP/mm, (우) 2.08~10.24 LP/mm.

#### 4. 열화영상의 특성에 따른 영상복원

열화영상에 존재하는 잡음의 분포가 각 필터링 기법에서 복원영상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위해, 그림 12와 같이 주로 저주파수로 구성된 Lena 영상과 고주파수 성분으로 구성된 crowd 영상을 사용하여 노이즈 분포에 따른 영상 복원 결과를 비교하였다. 열화모델은 초점 크기가 5  $\mu\text{m}$  인 micro-focus X-선관과 SSD(source-to-subject distance)가 100 cm 지점에서 100 $\times$ 100  $\mu\text{m}^2$  CMOS 영상 센서로부터 90 kV<sub>p</sub>, 55 mAs와 40 kV<sub>p</sub>, 55 mAs/30 mAs 조건에서 각각 획득하였다.



그림 12. 원영상.(좌) Lena(300 $\times$ 300, 8bit), (우) crowd(500 $\times$ 500, 8bit).

표 2는 각 조건에서 열화모델에 의해 열화된 영상의 BSNR과 직접 역필터링, 제한된 역필터링, 위너필터링 기법에 의해 복원된 영상의 ISNR을 나타낸 것이다. 열화영상의 SNR (BSNR)은 선량이 작아질수록 잡음에 의해 영상의 SNR이 감소함을 알 수 있다.

표 2. 각 조건에서 열화된 Lena와 crowd 영상의 BSNR과 직접 역필터링, 제한된 역필터링, 위너필터링 기법에 의해 복원된 영상의 ISNR.

		Lena / Crowd 영상		
		90kV <sub>p</sub> , 55mAs	40kV <sub>p</sub> , 55mAs	40kV <sub>p</sub> , 30mAs
BSNR (dB)		38.2/39.2	28.8/27.2	22.5/22.6
ISNR	직접역필터링	25.0/29.6	10.5/14.7	2.7/8.1
	제한된역필터링	32.0/30.8	22.7/25.0	23.2/24.4
	위너필터링	32.0/32.7	24.7/22.8	24.7/22.5
	위너필터링 (K=0.16)	31.6/32.5	21.8/23.1	22.2/23.0

그림 13은 다양한 조건에서 열화된 Lena 영상에 대해 각 필터링 기법을 사용하여 복원된 영상의 ISNR을 계산하여 나타낸 그래프이다. 직접 역필터링을 제외한 필터링 기법에 의해 복원된 영상에서는 잡음에 대해 우수한 화질개선정도를 보였고, 직접 역필터링 기법에서는 저주파수 영상에서 잡음이 증가할수록 화질개선 정도가 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 잡음에 의해 열화가 비교적 적은 영상에 대해서는 직접 역필터링 기법에 의해서도 화질이 개선됨을 알 수 있다.

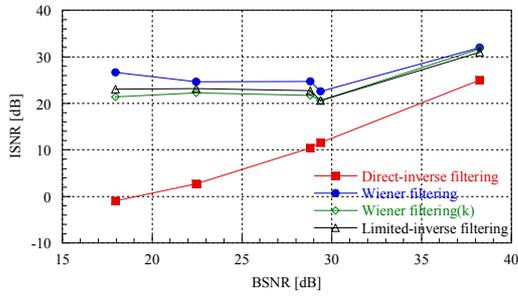


그림 13. 열화영상(Lena)의 BSNR에 따라 각 필터링 기법에 의해 복원된 영상의 ISNR.

### 참 고 문 헌

- [1] H. C. Andrews and B. R. Hunt, "Digital Image Restoration", Prentice-hall, Inc, New Jersey, pp. 8-15, 1977.
- [2] Willian K. Pratt, "Digital image processing", Wiley-interscience, pp. 319-369, 2001
- [3] Mark R. Banhan and Aggelos K. Katsaggelos, "Digital Image Restoration", IEEE signal processing magazine, 1053-5888, pp24-41, March 1997.
- [4] Rafael C. Gonzalez and Richard E. Woods, "Dogital image processing", Pearson Prentics-Hall Inc., Third eddition, p. 355, 2008.