

논문97-2-1-06

## 웨이브렛 기반 블록화 현상 제거에 대한 고속 알고리즘 및 적응 역치화 기법

장 익 훈\*, 김 남 철\*

### A Fast Algorithm with Adaptive Thresholding for Wavelet Transform Based Blocking Artifact Reduction

Ick Hoon Jang\* and Nam Chul Kim\*

#### 요 약

본 논문에서는 웨이브렛 기반 블록화 현상 제거에 대한 고속 알고리즘과 적응 역치화 기법을 제안하였다. 제안된 고속 알고리즘에서는 웨이브렛 변환 영역의 첫번째 스케일과 2번째 스케일에서의 처리와 동일한 효과를 갖는 모든 처리를 공간 영역에서 수행한다. 제안된 적응 역치화 기법은 블록 경계 영역을 분류할 때 사용하는 역치를 공간 영역에서 구할 수 있는 블록 경계와 블록 중앙의 웨이브렛 변환 신호의 통계적 특성을 이용하여 처리하고자 하는 영상에 적응적으로 선택할 수 있도록 하였다. 실험 결과, 제안된 고속 알고리즘은 웨이브렛 변환에 의한 방법에 비하여 약 10배의 속도 개선이 있고, 적응 역치화에 의한 후처리는 어떤 영상의 높은 압축률에서 가장 좋은 성능을 가지는 고정된 역치에 의한 후처리에 비하여 낮은 압축률에서도 PSNR 성능과 주관적 화질이 개선됨을 알 수 있었다.

#### Abstract

In this paper, we propose a fast algorithm with adaptive thresholding for the wavelet transform (WT) based blocking artifact reduction. In the fast algorithm, all processings that are equivalent to the processing in WT domain of the first and second scale are performed in spatial domain. In the adaptive thresholding, the threshold values used to classify the block boundary are selected adaptively according to each input image by using the statistical properties of the WT of the coded signal at block boundary and at block center, which can be obtained in spatial domain. Experimental results showed that the proposed fast algorithm is about 10 times faster than the WT-based algorithm. It also was found that the postprocessing with proposed adaptive thresholding yields some PSNR improvement and better subjective quality over that with nonadaptive thresholding which has best performance at high compression ratios of a certain image, even at low compression ratios.

\*경북대학교 전자·전기공학부  
Dept. of Electronic & Electrical Engineering, Kyungpook Nat'l  
University

#### I. 서 론

BTC[1], VQ[2], JPEG[3]과 같은 블록기반 정지영상 부호

화와, MPEG-1[4], MPEG-2[5], H.263[6]과 같은 블록기반 동영상 부호화에서는 영상을 4x4, 8x8 또는 16x16 크기의 블록으로 나눈 후 각각의 블록을 독립적으로 부호화하기 때문에 압축률이 높아질수록 인접 블록간의 밝기의 연속성이 깨어지는 블록화 현상(blocking artifact)이 발생한다. 블록화 현상은 화질을 떨어뜨리는 중요한 요소 중의 하나로서 이를 제거하기 위한 연구가 여러 가지 방법으로 이루어져왔다. 기존의 블록화 현상 제거 방법은 공간 영역에서 처리하는 방법[7-10], DCT 변환 영역에서 처리하는 방법[11-13], 공간 영역 또는 DCT 변환 영역에서 반복적으로 처리하는 방법[14-17], 그리고 웨이브렛 변환(wavelet transform) 영역에서 처리하는 방법[18-20] 등이 있다.

공간 영역에서 처리하는 방법은 블록화 현상을 수평, 수직 방향 블록 경계에서의 고주파 성분으로 간주하여 1차원 또는 2차원 공간 저역 필터를 사용하여 블록화 현상을 제거한다. 이 방법은 구현이 간단하지만 급격한 밝기 변화를 갖는 블록화 현상은 잘 제거되지 않으며 블록간에 걸쳐 있는 에지들이 뭉롱화(blurring)될 수 있는 단점이 있다[9].

DCT 변환 영역에서 처리하는 방법은 DCT를 이용하여 부호화한 영상에 대하여 변환 영역에서 양자화된 변환 계수들로부터 원 영상의 변환 계수를 추정함으로써 블록화 현상이 제거된 영상을 얻고자 한다. [11], [12]에서는 블록 경계의 불연속성에 관한 척도를 정의한 다음 이를 최소화시키는 DCT 변환 계수를 추정하였다. 그리고 [13]에서는 양자화된 DCT 변환 계수의 국부 통계와 사용된 양자화기(quantizer)에 대한 사전 지식(a priori knowledge)을 이용하여 DCT 변환 계수를 추정하였다. 이들 DCT 변환 영역에서 처리하는 방법은 공간 필터를 이용하는 방법보다 성능이 우수하나, DCT 변환 부호화 영상에 대해서만 처리할 수 있는 단점이 있다.

공간 영역 또는 DCT 변환 영역에서 반복적으로 처리하는 방법은 constrained minimization, POCS(projection onto convex sets), 또는 MAP(maximum a posteriori) 추정으로 블록화 현상이 제거된 영상을 얻고자 한다. [14]에서는 양자화기에 관한 사전 지식을 constraint로 하여 영상의 주파수 가중 에너지(frequency-weighted energy)를 최소화하는 constrained minimization으로 블록화 현상이 제거된 영상을 반복적으로 구하였다[21]. [15]에서는 양자화기에 관한 사전 지식과 전체적인 블록 경계에서의 밝기 값의 차이로부터 두 종류의 convex 집합들을 정의한 다음 POCS에 의한 반복적 투영으로 블록화 현상이 제거된 영상을 얻고자 하였다. 또한 양자화기에 관한 사전 지식을 constraint로 하여 원 영상의 평활 특성(smoothness properties)에 관한 함수를 최소화하는 constrained minimization으로 블록화 현상이 제거된 영상을 반복적으로 구하였다. 그리고 [16]과 [17]에서는 양자화기에 대한 사전 지식과 HMRF(Huber Markov Random Field) 모델을 이용한 MAP 추정을 반복적 접근으로 구함으로써 블록화 현상이 제거된 영상을 얻고자 하였는데, 이들 두 가지 방법은 결국 constrained minimization

에 의한 반복적 처리 방법이다. 이러한 반복적 처리 방법은 성능이 공간 필터를 사용하는 방법들 보다 우수한 반면, 좋은 결과를 얻기 위해서는 영상 전체에 대하여 대체로 10회 이상의 반복이 필요하며 이로 인하여 수행 시간이 길어지는 단점이 있다.

한편, 웨이브렛 변환 영역에서 처리하는 방법은 신호의 국부적 주파수 성분들을 효율적으로 분석 처리할 수 있는 웨이브렛 변환을 이용하여 웨이브렛 변환 영역의 다층 스케일 공간상에서 블록 경계 근방의 국부적인 주파수 성분을 추출하여 블록화 현상에 의한 고주파 성분만을 제거함으로써 블록화 현상을 제거한다. 이 방법은 시스템의 구현이 비교적 용이하고, 블록 기반 부호화의 방법에 상관없이 처리할 수 있으며, PSNR 성능 및 주관적 화질도 우수한 장점을 갖고 있다. [18-20]에서는 블록화 현상이 수평, 수직 방향의 블록 경계를 따라 수평, 수직 방향으로만 나타나는 점에 착안하여, 영상 신호를 수평, 수직 방향의 분리적(separable)인 1차원 신호의 집합으로 간주하고, Mallat 등[22]에 의해서 제안된 가우시안 형태의 1차 도함수를 모 웨이브렛(mother wavelet)으로 하는 1차원 웨이브렛 변환을 각 수평, 수직 방향 신호에 대하여 2번째 스케일까지 수행한다. 이때 블록 경계의 첫 번째 스케일에서의 웨이브렛 변환 신호에서 임펄스 형태로 나타나는 블록화 현상에 의한 신호 성분(이후 "블록화 성분")을 제거한 후 역 웨이브렛 변환을 수행함으로써 블록화 현상이 제거된 영상을 얻고자 하였다. 이 과정에서 웨이브렛 변환과 역 웨이브렛 변환은 블록 경계의 위치를 웨이브렛 변환 영역의 각 스케일에서 동일하게 하기 위하여 downsampling과 upsampling을 하지 않고 수행하였다. 또한 에지를 뭉롱화 시키지 않으면서 블록화 성분만을 효과적으로 제거하기 위하여 블록 경계 근처의 웨이브렛 변환 신호로부터 그 블록 경계가 평탄 영역, 완만한 에지 영역, 스텝 에지 영역 중 어디에 속하는가를 구분한 다음 각 영역별로 블록화 성분을 제거하는 방식을 달리 하였다[19]. 이 방법은 구조가 비교적 간단하고 DCT 변환 부호화는 물론 BTC, VQ에도 적용할 수 있으며 높은 압축률로 부호화한 영상에 대하여도 약 0.5~1.2 dB의 PSNR 성능 향상을 가질 뿐 아니라, 주관적 화질 측면에서도 에지 뭉롱화를 수반하지 않고 블록화 현상을 거의 제거하는 것으로 나타났다[20]. 그러나 downsampling과 upsampling을 하지 않는 웨이브렛 변환과 역 웨이브렛 변환을 2번째 스케일까지 수행하여야 하므로 웨이브렛 변환에 의한 계산량이 많아져 수행 시간이 길어지는 단점이 있다. 또한 각 블록 경계 영역을 구분할 때 처리하고자 하는 영상의 전체적인 블록화 현상의 심한 정도에 맞추어서 처리할 수 있도록 하는 역치(threshold)를 사용하였는데, 대상 영상과 부호화한 압축률에 따라 달리 설정하여야 하는 이 역치를 실험적으로 구해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 웨이브렛 변환을 이용한 블록화 현상 제거[18-20]에 대한 고속 알고리즘과 적응 역치화(adaptive

thresholding) 기법을 제안한다. 제안된 고속 알고리즘에서는 [18-20]에서 사용된 웨이브렛 변환 필터의 특성을 이용하여 첫 번째 스케일과 2번째 스케일에서의 웨이브렛 변환 영역에서 처리하는 것과 동일한 효과를 갖는 모든 처리를 공간 영역에서 수행한다. 이는 블록화 성분이 있는 수평, 수직 방향의 1차원 신호와 각 블록 경계를 중심으로 하고 분류되는 각 블록 경계 영역과 제거되는 임펄스의 크기에 따라 가중치를 달리하는 window 함수와의 차이로 각 수평, 수직 방향의 복원 신호를 구함으로써 블록화 현상이 제거된 영상을 얻고자 하는 것이다. 그리고 제안된 적응 역치화는 공간 영역에서 구할 수 있는 블록 경계와 블록 중앙의 첫 번째 스케일에서의 웨이브렛 변환 신호의 통계적 특성을 이용하여 처리하고자 하는 영상과 블록화 현상이 심한 정도에 따라 적응적으로 역치를 선택할 수 있도록 한다. 실험 결과 제안된 고속 알고리즘은 웨이브렛 변환을 이용한 방법에 비해 JPEG으로 부호화한 영상에 대하여 블록의 1차원 크기 정도의 계산량 감축과 속도 개선이 있고, JPEG 복호화 보다도 처리 속도가 빠른 것으로 나타났다. 또한 다양한 압축률로 부호화한 여러 영상에 대하여 제안된 적응 역치화로 처리한 결과가 어떤 영상의 높은 압축률에서 가장 좋은 성능을 갖도록 고정된 역치로 처리한 결과보다 낮은 압축률에서도 PSNR 성능과 주관적 화질이 개선됨을 확인하였다.

## II. 웨이브렛 기반 블록화 현상 제거

블록기반 부호화에서의 블록화 현상은 영상의 블록 경계를 따라 수평 또는 수직 방향으로만 나타나는 특징을 가지므로 1차원 웨이브렛 변환을 분리적으로 사용하여 모든 처리를 1차원적으로 한다. 블록화 현상이 있는  $N \times N$  크기의 영상에서  $1 \times N$  크기의 각 수평 신호에 대하여 첫 번째 스케일과 2번째 스케일에서의 1차원 웨이브렛 변환을 수행한다. 이렇게 하면 2개의 상세 신호(detail signal)와 1개의 개략 신호(coarse signal)을 얻게 되는데, 2개의 상세 신호상의 블록 경계 위치에서 블록화 성분만을 제거한 다음 역 웨이브렛 변환을 수행하여 각 수평 방향 복원 신호를 구한다. 이어서 각  $N \times 1$  크기의 수직 방향 신호에 대해서도 같은 방법으로 수행하여 블록화 현상이 제거된 영상을 얻는다. 본 장에서는 [18-20]에서 사용한 웨이브렛 변환과 웨이브렛 변환 영역에서의 블록화 현상 제거에 대하여 살펴보기로 한다.

### 1. 웨이브렛 변환[22]

원 신호  $f(n) = S_0^d f(n)$ 에 대한 1차원 웨이브렛 변환은 표 1의 디지털 필터를 이용하여 수행할 수 있는데, 각  $j$  번째 스케일에서의 웨이브렛 변환은  $S_{j-1}^d f(n)$ 으로부터 다음과 같이 상세 신호  $W_j^d f(n)$ 과 개략 신호  $S_j^d f(n)$ 로 분해하는 것이

표 1. 웨이브렛 변환에 사용된 필터의 계수 [22]  
Table 1. Filter coefficients used for wavelet transform [22]

n	h(n)	g(n)	k(n)
-3			0.0078125
-2			0.054685
-1	0.125		0.171875
0	0.375	-2.0	-0.171875
1	0.375	2.0	-0.054685
2	0.125		-0.0078125

된다.

$$W_j^d f(n) = \begin{cases} f(n) * g(n), & j=1 \\ S_{j-1}^d f(n) * g(n/2^{j-1}), & j \geq 2 \end{cases} \quad (1)$$

$$S_j^d f(n) = \begin{cases} f(n) * h(n), & j=1 \\ |S_{j-1}^d f(n) * h(n/2^{j-1}), & j \geq 2 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 \*은 상승 적분(convolution)을 나타내며,  $b(n/2^j)$ 은 다음과 같다.

$$b(n/2^j) = \begin{cases} b(m), & n=2^j m \text{ for } m \in Z \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

(1), (2)의 각  $j$  번째 스케일에서의 웨이브렛 변환을  $j=J$  번째 스케일까지 수행하여 분해된 상세 신호와 개략 신호  $W_J^d f(n), \dots, W_{j+1}^d f(n), W_j^d f(n), S_j^d f(n)$ 으로부터 원 신호  $f(n)$ 은 다음과 같은 역 웨이브렛 변환에 의하여 복원된다.

$$f(n) = W_1^d f(n) * k(n) + S_1^d f(n) * \tilde{h}(n) \quad (4)$$

$$S_{j-1}^d f(n) = W_j^d f(n) * k(n/2^{j-1}) + S_{j-1}^d f(n) * \tilde{h}(n/2^{j-1}), \quad 2 \leq j \leq J \quad (5)$$

여기서  $\tilde{h}$ 는  $h$ 의 복소쌍을 나타낸다. 웨이브렛 변환에 사용된 표 1의 필터들의 특성을 살펴보면  $h(n)$ 은 신호를 부드럽게 평활화하는 효과를 가지며  $g(n)$ 은 신호를 미분하는 효과를 가진다는 것을 알 수 있다. 그림 1은  $J=2$ 인 경우에 대하여 디지털 필터를 이용한 웨이브렛 변환으로 신호를 분해, 합성하는 과정이다. 이때의 웨이브렛 변환과 역 웨이브렛 변환은 upsampling과 downsampling을 하지 않는데, 이는 원 신호와 변환 신호의 크기를 같게 하여 각 스케일에서의 블록 경계의 위치를 동일하게 하여 블록화 성분 제거를 용이하게 하기 위해서이다.

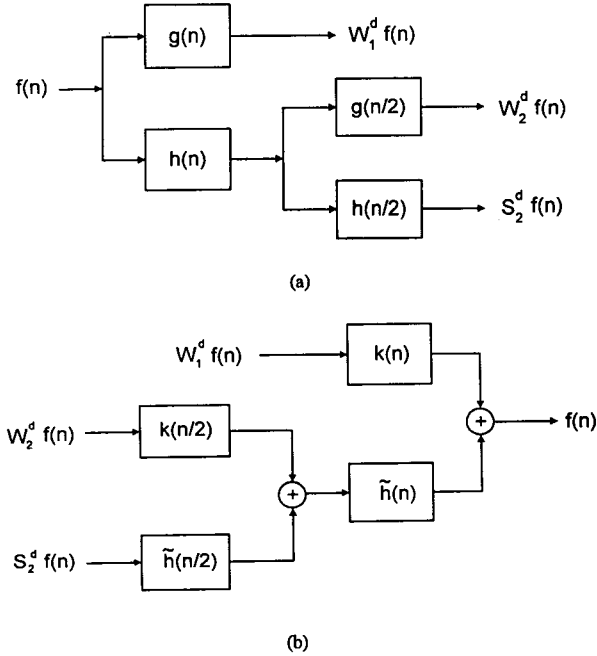


그림 1. (a) 웨이브렛 변환; (b) 역 웨이브렛 변환  
Fig. 1. (a) wavelet transform; (b) inverse wavelet transform

2. 웨이브렛 변환 영역에서의 블록화 현상 제거

블록화 현상이 있는 복호화된 신호  $f_b(n)$ 은 부호화하기 전의 원 신호  $f(n)$ 과 양자화 잡음  $e(n)$ 으로 표현할 수 있는데, 양자화 잡음  $e(n)$ 은 다시 블록 경계에서의 불연속성을 나타내는 블록화 성분  $e_b(n)$ 과 그 나머지 양자화 잡음  $e_r(n)$ 으로 나누어 생각할 수 있다.

$$f_b(n) = f(n) + e(n) = f(n) + e_r(n) + e_b(n) \tag{6}$$

이때 블록 경계에서의 불연속성을 나타내는 블록화 성분  $e_b(n)$ 을 제거하고자 하면 나머지 양자화 잡음  $e_r(n)$ 까지 제거하는 것은 불가능하므로 이는 결국 다음과 같은 신호  $f_r(n)$ 을 얻고자 하는 것이 된다.

$$f_r(n) = f(n) + e_r(n) \tag{7}$$

(7)식을 (6)식에 대입하면  $f_b(n)$ 은 다음과 같이 블록화 성분  $e_b(n)$ 과 이상적으로 블록화 성분이 제거된 신호  $f_r(n)$ 의 합으로 표현될 수 있다.

$$f_b(n) = f_r(n) + e_b(n) \tag{8}$$

그림 2는 계단형의 불연속성을 나타내는 블록화 현상의 한 예

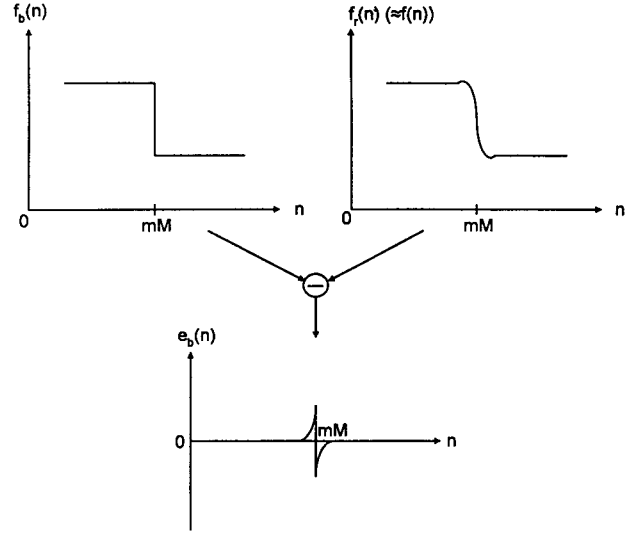


그림 2. 계단형 불연속성을 나타내는 블록화 현상의 한 예  
Fig. 2. An example of blocking artifact which yields staircase discontinuity

한 예 ( $e_b(n) \approx 0$ )에서, 블록 경계에서의 블록화 현상이 있는 신호와 이것이 이상적으로 제거된 거의 원 신호에 가까워진 신호 및 이들 사이의 오차 신호를 나타낸 것이다.

신호  $f_b(n)$ 에 대하여 1차원 웨이브렛 변환을 첫 번째 스케일과 2 번째 스케일에서 수행하면 다음과 같은 2개의 상세 신호와 1개의 개략 신호를 얻는다.

$$W_1^d f_b(n) = W_1^d f_r(n) + W_1^d e_b(n) \tag{9}$$

$$W_2^d f_b(n) = W_2^d f_r(n) + W_2^d e_b(n) \tag{10}$$

$$S_2^d f_b(n) = S_2^d f_r(n) + S_2^d e_b(n) \tag{11}$$

이때 사용하는 필터  $g(n)$ 이 신호를 미분하는 효과를 가지므로 블록 경계에서 그림 2와 같은 계단형의 불연속성은 상세 신호의 첫 번째 스케일의 블록 경계에서 임펄스 형태로 나타난다. 이러한 임펄스는 다음과 같이 블록화 성분  $e_b(n)$ 으로부터 발생한 것이라고 가정한다.

$$W_1^d e_b(n) = \alpha(m)\delta(n - mM) \tag{12}$$

여기서  $M$ 은 블록의 크기,  $\alpha(m)$ 은 각 블록 경계  $n=mM(m=1, \dots, N/M-1)$ 에서 발생하는 임펄스의 크기를 나타낸다. 따라서 (12)식의 임펄스를 발생시킨  $e_b(n)$ 을 효과적으로 제거하면 블록화 성분이 이상적으로 제거된 신호  $f_r(n)$ 을 얻을 수 있다. 한편 (12)식의 임펄스는  $W_1^d e_b(n) = g(n) * e_b(n)$ 의 관계로부터 블록 경계에서 임펄스가 되므로  $W_2^d e_b(n) = g(n/2) * h(n) * e_b(n)$ 의 관계로부터 2번

제 스케일에서는 블록 경계에서 다음과 같이 나타남을 쉽게 증명할 수 있다.

$$\begin{aligned} W_2^d e_b(n) &= \alpha(m) \cdot \gamma(n) \\ &= \alpha(m)[0.125\delta(n-mM+1) + 0.5\delta(n-mM) \\ &\quad + 0.75\delta(n-mM-1) + 0.5\delta(n-mM-2) \\ &\quad + 0.125\delta(n-mM-3)] \end{aligned} \quad (13)$$

여기서  $\gamma(n)$ 은 (12)식의 임펄스의 크기가 1이 되는 경우의 블록화 성분이 2번째 스케일에 퍼져 나타나는 신호이다. 이러한 블록화 성분에 의한 임펄스는 블록 경계가 속해있는 영역에 따라 그 크기와 형태를 달리하면서 신호에 의한 임펄스와 섞여서 나타날 수도 있다. 그러므로 블록화 성분에 의한 임펄스만을 효과적으로 제거하기 위하여 다음과 같이 블록 경계가 평탄 영역, 완만한 에지 영역, 또는 스텝 에지 영역들 중 어디에 속하느냐를 구분하여 각 영역별로 달리 처리한다.

```

IF |W1dfb(mM)| < Th
  |W1dfb(mM)|/|W1dfb(mM+1)| ≥ Th1,
  and |W1dfb(mM)|/|W1dfb(mM-1)| ≥ Th1
THEN SHADE REGION
IF |W1dfb(mM)| < Th
  and (|W1dfb(mM)|/|W1dfb(mM+1)| < Th1,
  or |W1dfb(mM)|/|W1dfb(mM-1)| ≤ Th1)
THEN 'SMOOTH EDGE REGION
IF |W1dfb(mM)| ≥ Th
THEN STEP EDGE REGION
    
```

여기서  $Th$ ,  $Th1$ 은 처리하고자 하는 영상의 전체적인 블록화 현상의 심한 정도에 맞추어서 처리할 수 있도록 하는 역치이다. 먼저, 평탄 영역에서는 첫 번째 스케일과 2번째 스케일의 웨이브렛 변환 신호로부터 블록화 성분을 제거한다. 첫 번째 스케일에서는 각 블록 경계  $n=mM$ 에서 다음과 같이 임펄스 제거 능력이 우수한  $1 \times 3$  메디안 필터로 제거한다.

$$\begin{aligned} W_1^d \hat{f}_r(mM) &= \text{median}[W_1^d f_b(mM-l)] \\ l &\in [-1, 1] \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $\hat{f}_r(mM)$ 은  $W_1^d f_b(mM)$ 의 블록화 성분이 제거된 첫 번째 스케일에서의 값이다. 2번째 스케일에서는 블록화 성분이 블록 경계 근처에서 약간 퍼진 형태로 나타나므로 그 영향을 제거하기 위해 다음과 같이 처리한다.

$$\begin{aligned} W_2^d \hat{f}_r(n) &= W_2^d f_b(n) - W_2^d \hat{e}_b(n) \\ &= W_2^d f_b(n) - \hat{\alpha}(m) \cdot r(n) \end{aligned} \quad (15)$$

이때 임펄스의 크기  $\alpha(m)$ 은 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{\alpha}(m) = W_1^d f_b(mM) - W_1^d \hat{f}_r(mM) \quad (16)$$

한편, 완만한 에지 영역에서는 첫 번째 스케일에서 (14)식과 같은 처리를 한다. 그러나 2번째 스케일에서는 (15)식과 같은 처리를 하지 않는다. 스텝 에지영역에서는 (14), (15)식과 같은 처리를 하지 않는다. 이와 같이 처리한 다음 역 웨이브렛 변환을 수행하여 블록화 성분이 제거된 각 수평 복원 신호  $\hat{f}(n)$ 을 얻는다.

이상에서 언급한 방법으로  $M \times M$  블록 크기로 부호화한  $N \times N$  크기의 영상을 처리할 경우에는 각 수평 또는 수직 신호에 대한 웨이브렛 변환을 수행하는데  $8N$ 번의 덧셈/뺄셈과  $6N$ 번의 곱셈이 필요하고, 역 웨이브렛 변환을 수행하는데  $16N$ 번의 덧셈/뺄셈과  $10N$ 번의 곱셈이 필요하다. 이때 영상 전체로는  $2N$ 개의 수평, 수직 신호가 있으므로  $48N^2$ 개의 덧셈/뺄셈과  $32N^2$ 개의 곱셈이 필요하다. 그리고 블록 경계 영역을 분류할 때 평탄 영역과 완만한 에지 영역으로 분류될 경우 2번의 나눗셈이 필요하다. 또한 웨이브렛 변환 영역에서 블록화 성분을 제거하는데 평탄 영역인 경우 6번의 덧셈/뺄셈과 5번의 곱셈이 추가로 필요하다. 따라서 영상 전체로는  $(N/M-1) \times 2N$ 개의 블록 경계가 있으므로 총 계산량은 다음과 같이 된다.

$$\text{덧셈/뺄셈} \quad 48N^2 + \left(\frac{N}{M}-1\right) \times 2N \times 6\rho_1 \quad (17)$$

$$\text{곱셈/나눗셈} \quad 32N^2 + \left(\frac{N}{M}-1\right) \times 2N \times (7\rho_1 + 2\rho_2) \quad (18)$$

여기서  $\rho_1$ 과  $\rho_2$ 는 각각 평탄 영역과 완만한 에지 영역의 상대 빈도수(relative frequency)들이다.

### III. 제안한 고속 알고리즘

제안한 고속 알고리즘은 웨이브렛 변환 필터의 특성을 이용하여 웨이브렛 변환과 역 웨이브렛 변환을 수행하지 않고 모든 처리를 공간 영역에서 수행한다. (4), (5)식의 역 웨이브렛 변환에 근거하여 웨이브렛 변환 영역에서 블록화 성분을 제거한 신호들을 입력 신호로 하는 복원 신호  $\hat{f}(n)$ 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{f}(n) &= W_1^d \hat{f}_r(n) * k(n) + [W_2^d \hat{f}_r(n) * k(n/2) \\ &\quad + S_2^d \hat{f}_r(n) * \tilde{h}(n/2)] * \tilde{h}(n) \end{aligned} \quad (19)$$

(19)식의  $W_1^d \hat{f}_r(n)$ ,  $W_2^d \hat{f}_r(n)$  그리고  $S_2^d \hat{f}_r(n)$ 들은 (14)-(16)식을 근거로 하여  $m$ 번째 블록 경계에서 분류되는 각 영역

별로 처리를 달리하기 때문에 이들은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$W_1^d \hat{f}_r(n) = W_1^d f_b(n) - \sum_{m=1}^{N/M-1} \hat{\alpha}(m) \delta(n-mM) \zeta_1(m) \quad (20)$$

$$W_2^d \hat{f}_r(n) = W_2^d f_b(n) - \sum_{m=1}^{N/M-1} \hat{\alpha}(m) \gamma(n-mM) \zeta_2(m) \quad (21)$$

$$S_2^d \hat{f}_r(n) = S_2^d f_b(n) \quad (22)$$

여기서

$$\zeta_1(m) = \begin{cases} 1, & \text{if the } m\text{th block boundary belongs to} \\ & \text{shade region or smooth edge region} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

$$\zeta_2(m) = \begin{cases} 1, & \text{if the } m\text{th block boundary belongs to shade} \\ & \text{region} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

(20)-(22)식을 (19)식에 대입하면 복원 신호는 입력 신호  $f_b(n)$ 으로부터 다음과 같이 구할 수 있음을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{f}_r(n) &= f_b(n) - \sum_{m=1}^{N/M-1} \hat{\alpha}(m) \\ &\quad \cdot \left( \begin{aligned} &[\delta(n-mM) * k(n)] \zeta_1(m) \\ &+ [\gamma(n-mM) * k(n/2) * \tilde{h}(n)] \zeta_2(m) \end{aligned} \right) \\ &= f_b(n) - \sum_{m=1}^{N/M-1} \hat{\alpha}(m) \cdot [\mu(n-mM) \zeta_1(m) \\ &\quad + \nu(n-mM) \zeta_2(m)] \end{aligned} \quad (25)$$

여기서

$$\begin{aligned} Z[\mu(N)] &= Z[\delta(n) * k(n)] \\ &= 0.0078125z^3 + 0.054685z^2 + 0.171875z \\ &\quad - 0.171875 - 0.054685z^{-1} - 0.0078125z^{-2} \end{aligned} \quad (26)$$

그리고

$$\begin{aligned} Z[\nu(N)] &= Z[\gamma(N) * k(n/2) * \tilde{h}(n)] \\ &= 0.0001220703125z^9 + 0.0008544921875z^8 + 0.0034179296875z^7 \\ &\quad + 0.0102536328125z^6 + 0.0249015234375z^5 + 0.0512681640625z^4 \\ &\quad + 0.0844712890625z^3 + 0.0932608984375z^2 + 0.0427243750000z \\ &\quad - 0.0427243750000 - 0.0932608984375z^{-1} - 0.0844712890625z^{-2} \\ &\quad - 0.0512681640625z^{-3} - 0.0249015234375z^{-4} - 0.0102536328125z^{-5} \\ &\quad - 0.0034179296875z^{-6} - 0.0008544921875z^{-7} - 0.0001220703125z^{-8} \end{aligned} \quad (27)$$

이다.

(25)식에 의하면 복원 신호  $\hat{f}_r(n)$ 은 블록화 현상이 있는 신호  $f_b(n)$ 과 각 블록 경계를 중심으로 하고 분류되는 각 블록 경계의 영역에 따라 가중치를 달리하는 창함수(window function)들의 합으로 이루어진 신호와의 차로 얻어진다는 것을 알 수 있다. 그리고 창함수의 support 영역이 분류된 블록 경계가 평탄 영역과 완만한 에지 영역인 경우에 각각 18 샘플과 6 샘플로서 기존의 공간 저역 필터를 사용하는 경우에 비하여 매우 넓은 것을 알 수 있다. 그림 3(a)와 (b)는 각각 평탄 영역, 완만한 에지 영역으로 분류된  $m$ 번째 블록 경계에서 제거되는 임펄스의 크기가 1인 경우에 해당하는 창함수를 나타낸다. 그림 3에서 보면 창함수는 그림 2의  $e_b(n)$ 과 비슷한 모양을 가진다는 것을 알 수 있다.

(25)식과 같이 처리할 경우 평탄 영역에서는 19번의 덧셈/뺄셈과 18번의 곱셈/나눗셈이 필요하고, 완만한 에지 영역에서는 7번의 덧셈/뺄셈과 6번의 곱셈/나눗셈이 필요하다. 그리고 스텝 에지 영역에서는 아무런 계산도 필요 없다. 또한 공간 영역에서 수행할 수 있는 블록 경계 영역의 분류에는 평탄 영역과 완만한 에지 영역으로 분류될 경우에는 3번의 뺄셈과 5번의 나눗셈이 필요하고 스텝 에지로 분류될 경우에는 1번의 뺄셈과 1번의 곱셈이 필요하다. 따라서 총 계산량은 다음과 같다.

$$\text{덧셈/뺄셈} : \left(\frac{N}{M}-1\right) \times 2N \times (21\rho_1 + 9\rho_2 + 1) \quad (28)$$

$$\text{곱셈/나눗셈} : \left(\frac{N}{M}-1\right) \times 2N \times (22\rho_1 + 10\rho_2 + 1) \quad (29)$$

여기서  $\rho_1$ 과  $\rho_2$ 는 각각 평탄 영역과 완만한 에지 영역의 상대 빈도수들이다.

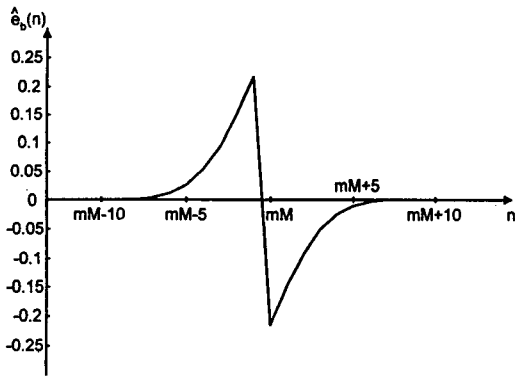
#### IV. 블록 경계 영역 분류를 위한 역치의 선택

각 블록 경계 영역의 분류를 위한 역치  $Th$ ,  $Th1$ 들은 처리하고자 하는 영상과 그 압축률에 따라 달라지는 블록화 현상의 심한 정도를 추정하여 적응적으로 선택되어야 한다. 블록화 현상의 심한 정도의 척도로서 각 블록 경계에서의 블록화 성분의 웨이브렛 변환 신호  $W^j e_b(mM)$ 의 분산(variance)이 사용될 수 있다. 본 논문에서는  $W^j e_b(mM)$ 의 분산을 구하여  $|W^j e_b(mM)|$ 에 관련된 역치  $Th$ 를  $W^j e_b(mM)$ 의 분산에 비례하게 선택한다.

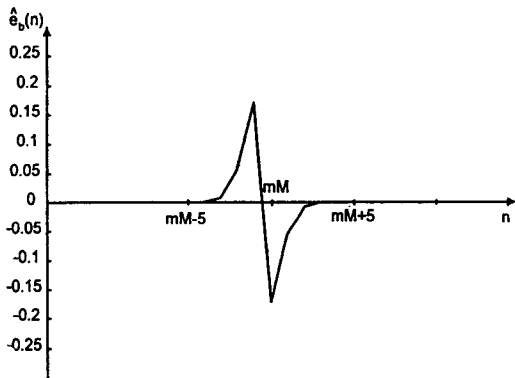
(7)식의  $f_r(n)$ 과  $e_b(n)$ 이 서로 uncorrelated하다고 가정하면 (8)식으로부터 다음이 성립한다.

$$\text{var}[W_1^d f_r(m)] = \text{var}[W_1^d f_r(n)] + \text{var}[W_1^d e_b(n)] \quad (30)$$

여기서  $\text{var}[\cdot]$ 은 분산을 나타낸다. (30)식은  $m$ 번째 블록 경계에서 다음과 같이 표현될 수 있다.



(a)



(b)

그림 3. 블록 경계에서 임펄스의 크기가 1인 경우의 영역별 창함수: (a) 평탄영역; (b) 완만한 에지 영역  
 Fig. 3. Window function of each region at block boundary in case of the strength of impulse is 1: (a) shade region; (b) smooth edge region

$$\text{var}[W_1^d f_b(mM)] = \text{var}[W_1^d f_r(mM)] + \text{var}[W_1^d e_b(mM)] \quad (31)$$

각 블록 중앙에서 블록화 성분을  $e_b(n) \approx 0$ 으로 무시하면 (7)식으로부터  $f_b(n) \approx f_r(n)$ 이 성립하므로  $W_1^d f_b(n) \approx W_1^d f_r(n)$ 이 성립한다. 즉, (30)식은 각 블록 중앙에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{var}[W_1^d f_b(mM - M/2)] \approx \text{var}[W_1^d f_r(mM - M/2)] + \text{var}[W_1^d f_b(mM)] \quad (32)$$

여기서는  $f(n)$ 이 정재적(stationary)이라고 가정하여 그 분

산이 블록 경계와 블록 중앙에서 같은 것으로 간주하였다. 따라서 (31)식과 (32)식으로부터 다음이 성립함을 쉽게 증명할 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma_{w_{1,b}}^2 &= \text{var}[W_1^d e_b(mM)] \\ &= \text{var}[W_1^d f_b(mM)] - \text{var}[W_1^d f_b(mM - m/2)] \end{aligned} \quad (33)$$

(33)식은 각 블록 경계에서의 블록화 성분의 웨이브렛 변환 신호의 분산은 블록화 현상이 있는 신호의 각 블록 경계에서의 웨이브렛 변환 신호의 분산과 각 블록 중앙에서의 웨이브렛 변환 신호의 분산의 차로 주어진다 것을 의미한다. 본 논문에서는 역치  $Th$ 를  $\sigma_{w_{1,b}}$ 에 비례하게 선택하였다. 그리고, 편의상  $Th1$ 은  $Th$ 의 절반으로 선택하였다. 즉,

$$Th = 2Th1 = c\sigma_{w_{1,b}} \quad (34)$$

여기서  $c$ 는 비례 상수이다.

### V. 실험 결과 및 고찰

제안한 고속 알고리즘과 적응 역치화의 성능을 살펴보기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 실험 영상으로는 8 비트로 양자화되고 512x512 크기를 갖는 그림 4의 Lena와 Boat 영상을 사용하였다. 그리고 부호화로는 정지 영상 부호화의 표준화로서 블록의 크기가  $M=8$ 인 JPEG을 사용하였다. 그림 5의 (a)는 Lena 영상을 40:1로 부호화한 영상, (b)는 (a)의 영상을 웨이브렛 기반 블록화 현상 제거로 후처리한 영상이다. 그림 5에서 보면 후처리한 영상은 블록화 현상과 에지 몽롱화가 거의 없는 것을 알 수 있다. 그림 6은 에지 보존과 블록화 현상 제거 성능을 보다 용이하게 살펴보기 위하여 그림 5의 각 영상에 대하여 Sobel 연산자[23]를 사용하여 얻은 gradient 영상이다. 그림 6에서 보면 후처리한 영상은 에지가 보존되면서 블록화 성분에 의한 폐윤곽선들(closed contours)이 거의 제거되었음을 알 수 있다. 또한, 이러한 웨이브렛 기반의 블록화 현상 제거 기법은 공간 영역에서 처리하는 방법 중의 하나인 Reeve 방법[7]에 비해서 현저하게 우수한 성능을 나타내는 것으로 밝혀진 바 있다[19, 20].

먼저, 제안한 고속 알고리즘의 성능을 살펴보기 위하여 150 MHz Pentium PC의 MS-DOS 환경하에서 GCC compiler로 수행한 시간을 비교하였다. 실험 영상을 40:1로 부호화한 영상에 대하여 복호화, 웨이브렛 기반 후처리, 그리고 제안된 고속 알고리즘에 의한 후처리의 수행 시간을 비교하면 표 2와 같다. 이때 Lena 영상의 블록 경계는 평탄 영역이 21.86%, 완만한 에지 영역이 77.81%, 그리고 스텝 에지 영역이 0.33%로 각각 분류되었다. 그리고 Boat 영



그림 4. 실험 영상들 (a) Lena;(b) Boat  
Fig. 4. Test images : (a) Lena;(b) Boat



그림 5. (a) 40:1 압축률로 JPEG 부호화된 Lena;(b) 후처리된 Lena  
Fig. 5. (a) JPEG coded Lena by 40:1 compression ratio;(b) postprocessed Lena.

상은 16.24%, 83.59%, 0.17%로 각각 분류되었다. 표 2에서 보면 제안된 방법은 Lena 영상에 대하여 JPEG 복호화 보다는 약 1.69배, 웨이브렛 기반 후처리 보다는 약 10.49배의 속도 개선이 있음을 알 수 있다. 이는 (17), (18)식과 (28), (29)식으로 비교했을 때 곱셈/나눗셈이 약 9.80배, 덧셈/뺄셈이 약 15.59배 감소하는 것과 거의 일치함을 알 수 있다. 그리고 Boat 영상도 같은 결과를 보인다는 것을 알 수 있다.

다음으로 제안된 적응 역치화의 성능을 알아보기 위하여 15:1에서부터 40:1까지의 압축률로 부호화한 각 영상에 대하여 블록 경계 영역을 고정된 값을 갖는 역치로 분류하여 후처리한 영상과 적응 역치화에 의한 역치로 분류하여 후처리한 영상에 대하여 다음과 같은 PSNR 성능을 비교하면 그림 7과 같다.

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{255^2}{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N [X(m,n) - \hat{X}(m,n)]^2} \text{ [dB]} \quad (35)$$

여기서  $X(m, n)$ 은  $N \times N$  크기의 원 영상이고  $\hat{X}(m, n)$ 은 후처리한 영상이다. 그리고 고정된 역치에 의한 후처리는 Lena 영상에 대하여 40:1의 압축률에서 가장 좋은 성능을 가지는 역치인  $Th=2Th1=200$ 을 사용한 결과이고, 적응 역치화에 의한 후처리는 영상과 압축률에 따라 (34)식의  $c=4 \sim 7$ 의 범위에서 가장 좋은 성능을 보이면서  $c$ 의 값에 민감하지 않은 실험 결과에 근거하여  $c=5.5$ 로 선택하였을 때의 결과이다. 그림 7에서 보면 제안된 적응 역치화에 의한 후처리가 고정된 역치에 의한 후처리 보다 낮은 압축률에서도 성능 개선 효과가 있음을 알 수 있다. 그러나 그림





그림 6. Sobel 연산자로 얻은 gradient 영상:  
 (a)40:1 압축률로 JPEG 부호화된 Lena, (b)후처리된 Lena

Fig. 6. Gradient images using Sobel operator:  
 (a)JPEG coded Lena by 40:1 compression ratio, (b)postprocessed Lena.

표 2. 40:1의 압축률로 부호화된 영상에 대한 JPEG decoding, 웨이브렛 기반 후처리, 제안된 고속 알고리즘에 의한 후처리의 수행 시간.

Table 2. The run times of the JPEG decoding, the postprocessing with wavelet transform, and the fast algorithm for the test images JPEG coded by 40:1 compression ratio.

test image	run time(sec)		
	JPEG decoding	postprocessing with wavelet transform	fast algorithm in spatial domain
Lena	0.93	5.77	0.55
Boat	0.93	5.77	0.55

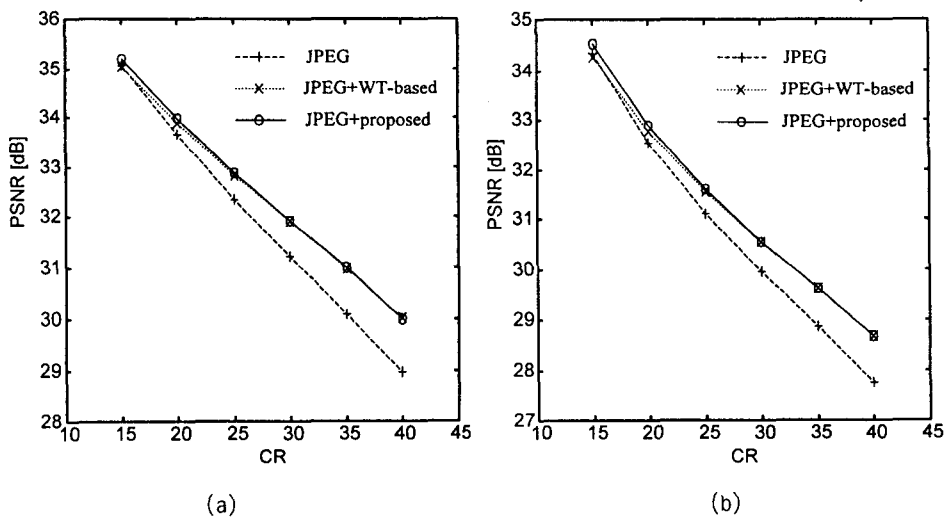


그림 7. 압축률 대 PSNR 성능 : (a) Lena:(b) Boat

Fig. 7. PSNR performance versus compression ratio (CR):(a) Lena:(b) Boat

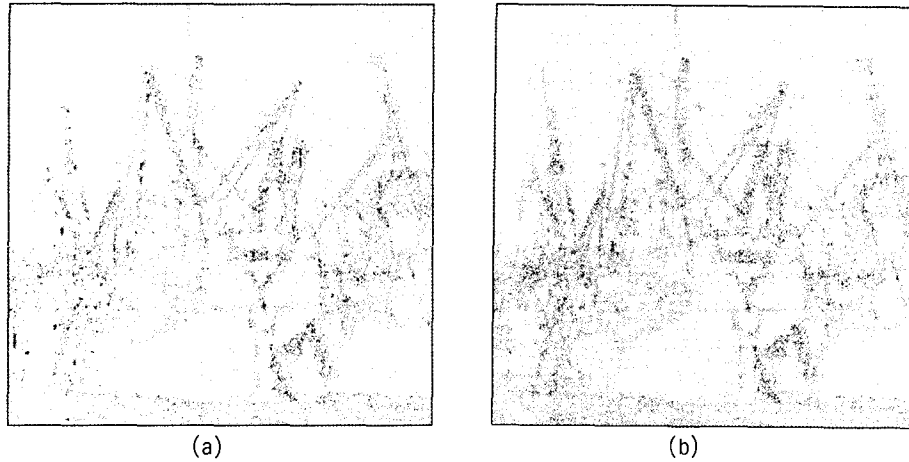


그림 8. Boat 원 영상과 후처리한 영상과의 차영상(증폭도=5):  
(a) 고정 역치;(b) 적응 역치.

Fig. 8. Difference images between original and postprocessed Boat image(amplification=5):  
(a) fixed threshold;(b) adaptive threshold.

7의 (b)에서 보면 Lena 영상의 40:1 압축률에서 가장 좋은 성능을 가지는 역치 값을 고정된 역치로 하여 Boat 영상에 대하여 후처리하면 높은 압축률에서는 성능 개선 효과가 있으나 낮은 압축률에서는 성능 저하를 가져온다는 것을 알 수 있다. 이 결과로부터 역치를 잘못 선택하였을 경우에는 오히려 성능 저하를 가져올 수가 있으므로 영상과 압축률에 따라 역치를 다르게 선택하여야 한다는 것을 알 수 있다. 그림 8의 (a)와 (b)는 각각 Boat 원 영상과 15:1 압축률로 부호화한 영상에 대하여 고정된 역치에 의한 후처리 영상과의 차영상 그리고 적응 역치화에 의한 후처리 영상과의 차영상을 5배로 증폭한 영상이다. 그림 8에서 보면 제안된 적응 역치화에 의한 후처리 영상이 원 영상에 더 가깝게 복원되며, 주관적 화질 측면에서도 성능이 개선됨을 알 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 블록기반 부호화에서 발생하는 블록화 현상을 효과적으로 제거하는 웨이브렛 기반 블록화 현상 제거에 대한 고속 알고리즘과 적응 역치화 기법을 제안하였다. 제안한 고속 알고리즘은 웨이브렛 변환 필터의 특성을 이용하여 웨이브렛 변환 영역에서 처리하는 것과 동일한 효과를 갖는 모든 처리를 공간 영역에서 수행하였다. 그리고 제안된 적응 역치화 기법은 공간 영역에서 구할 수 있는 블록 경계와 블록 중앙의 첫 번째 스케일에서의 웨이브렛 변환 신호의 통계적 특성을 이용하여 처리하고자 하는 영상에 적응적으로 역치를 선택할 수 있도록 하였다.

실험 결과 제안된 고속 알고리즘은 웨이브렛 변환을 이용한 방법에 비해 약 10배의 속도 개선과 이와 유사한 계산량 감축이 있었다. 또한 다양한 압축률로 부호화한 여러 영상에 대하여 제안된 적응 역치화로 처리한 결과는 어떤 영상의 높은 압축률에서 가장 좋은 성능을 갖도록 고정된 역치로 처리한 결과보다 낮은 압축률에서도 PSNR 성능과 주관적 화질이 개선됨을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] E.J. Delp and O.R. Mitchell, "Image compression using block truncation coding," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-27, pp. 1335-1142, Sep. 1979.
- [2] A. Gersho and R.M. Gray, *Vector Quantization and Signal Compression*. Boston, MA: Kluwer Academic Publishers, 1992.
- [3] G.K. Wallace, "The JPEG still picture compression standard," *IEEE Trans. Consumer. Electron.*, vol. 38, no. 1, pp. 18-34, Feb. 1992.
- [4] ISO/IEC 11172-2 (MPEG-1 Video), "Information technology - Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media at up to about 1.5 Mbit/s: Video," 1993.
- [5] ISO/IEC 13818-2 | ITU-T H.262 (MPEG-2 Video), "Information technology - Generic coding of moving pictures and associated audio information: Video," 1995.
- [6] Draft ITU-T Recommendation H. 263, "Video Coding for Low Bitrate Communication," Jul. 1995.
- [7] H. C. Reeve III and J.S. Lim, "Reduction of the blocking effects in image coding," *Optical Eng.*, vol. 23, no. 1, pp. 34-37, Jan. /Feb. 1984.
- [8] B. Ramamurthi and A. Gersho, "Nonlinear space-variant post-

processing of block coded images," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Process.*, vol. ASSP-34, no. 5, pp. 1258-1268, Oct. 1986.

[9] G.H. Kim and R.H. Park, "Reduction of the blocking effect in block-coded images using a model of early human vision," *Spatial Vision*, vol. 3, no. 2, pp. 143-150, 1988.

[10] C.J. Kuo and R.J. Hsieh, "Adaptive postprocessor for block encoded images," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 5, no. 4, pp. 298-304, Aug. 1995.

[11] S. Minami and A. Zakhor, "An optimization approach for removing blocking effects in transform coding," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 5, no. 2, pp. 74-82, Apr. 1995.

[12] B.W. Jeon, J.C. Jeong, and J.M. Jo, "Blocking artifacts reduction in image coding based on minimum block boundary discontinuity," *Proc. SPIE Visual Commun. Image Proc.*, vol. 2501, pp. 198-209, Taipei, May. 1995.

[13] S.S.O. Choy, Y.H. Chan, and W.C. Siu, "Reduction of block-transform image coding artifacts by using local statistics of transform coefficients," *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 4, no. 1, Jan. 1997.

[14] A. Zakhor, "Iterative procedures for reduction of blocking effects in transform image coding," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 91-95, Mar. 1992.

[15] Y. Yang, N.P. Galatsanos, and A.K. Katsaggelos, "Regularized reconstruction to reduce blocking artifacts of block discrete cosine transform compressed images," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 3, no. 6, pp. 421-432, Dec. 1993.

[16] T.P. O'Rourke and R.L. Stevenson, "Improved image decompression for reduced transform coding artifacts," *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 490-499, Dec. 1995.

[17] J. Luo, C.W. Chen, K.J. Parker, and T.S. Huang, "Artifact reduction in Low bit rate DCT-based image compression," *IEEE Trans. Image Proc.*, vol. 5, no. 9, pp. 1363-1368, Sep. 1996.

[18] N.C. Kim, D.H. Kim, and W.H. Hong, "Reduction of blocking effect in block coded images using wavelet transform," *Proc. PCS'94*, pp. 456-458, Sacramento, Sep. 1994.

[19] 장익훈, 김대호, 이동준, 김남철, "웨이브렛 변환을 이용한 블록 부호화 영상에 서의 블록화 현상 제거", *대한 전자공학회 논문지*, 제33권 B편, 제5호, pp. 83-93, 1996년 5월.

[20] N.C. Kim, I.H. Jang, D.H. Kim, and W.H. Hong, "Reduction of blocking artifact in block coded images using wavelet transform", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, Mar. 1996, in review.

[21] S.J. Reeves and S.L. Eddins, "Comments on "iterative procedures for reduction of blocking effects in transform image coding",", *IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol.*, vol. 3, no. 6, pp. 439-440, Dec. 1993.

[22] S. Mallat and S. Zhong, "Characterization of signals from multiscale edges," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 14, no. 7, pp. 710-732, July 1992.

[23] W.K. Pratt, *Digital Image Processing*, 2nd ed. New York: Wiley, 1991.

저 자 소 개



**장 익 훈 (張益薰)**

1963년 10월 2일생.  
 1986년 2월 경북대학교 공과대학 전자공학과 졸업(공학사).  
 1988년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학석사).  
 1994년 3월 ~ 현재 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정.  
 1988년 2월 ~ 1994년 2월 국방과학연구소 연구원.  
 주관심분야 : 영상처리, 영상압축, 컴퓨터비전.



**김 남 철 (金南哲)**

1955년 7월 29일생  
 1978년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사)  
 1980년 2월 한국과학원 전기 및 전자공학과 졸업(공학석사)  
 1984년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(공학박사)  
 1991년 8월 ~ 1992년 8월 미국 Syracuse 전기 및 전산학과 객원교수  
 1990년 1월 ~ 1994년 12월 생산기술연구원 HDTV 신호처리 분과위원  
 1994년 1월 ~ 현재 대한전자공학회 및 한국통신학회 편집위원  
 1996년 ~ 현재 한국방송공학회 편집위원  
 1984년 3월 ~ 현재 경북대학교 전자 전기공학부 교수  
 주관심분야 : 영상처리, 영상압축, 컴퓨터비전