

웨이블릿변환의 대역별 통계적 특성을 이용한 정지 영상 부호화

正會員 金 鎮 守*, 正會員 金 在 均*

A Still Image Coding by Using Statistical Characteristics of Subbands in Wavelet Transform

Jin Soo Kim*, Jae Kyoon Kim*, Sang Keun Kwon* Regular Members

要 約

본 논문에서는 다해상도 신호 분해, 특히 웨이블릿변환에 효과적이고, 간단한 정지 영상 신호 압축 알고리즘을 제안한다. 기존의 대역 분할을 통한 정지 영상 신호 부호화방식이 각 대역의 계수값의 특성만을 고려하여 부호화하는 것과는 달리, 본 논문에서는 각 대역들이 가지는 국부화된 공간적 특성(spatially localized characteristics)과 더불어 같은 방향성의 다른 해상도대역들이 가지고 있는 해상도간의 상관관계를 이용하므로써, 부호화효율을 개선시켰다. 즉, 제안한 부호화방식은 저역 분할 신호를 부호화하기 위하여 같은 해상도의 이웃하는 각 방향성대역에서 3×3 블록을 취하여 공간영역에서의 국부적인 활성도를 측정한 후, 이 값들을 예측계수로 유도하여 적응 DPCM에 적용하여 부호화하였다. 그리고 고역 분할 신호는 각 대역별로 주어진 문턱치보다 큰 계수를 중요계수라고 하고, 4×4 블록의 구획내에 중요계수의 존재유무에 따라 중요블록과 비중요블록으로 분할한 후, 중요계수에 대해서는 균일 양자화를 통하여 허프만 엔트로피 부호화를 수행하여 부호화하였다. 또한, 중요블록내의 중요계수의 위치는 4×4 블록내의 공간적인 방향성을 이용하고, 중요블록은 해상도간의 상관성을 이용하여 각각 Q-부호기에 의한 산술부호화를 사용하여 부호화하였다. 모의실험을 통하여 제안한 부호화방식은 기존의 부호화방식과 JPEG baseline 시스템에 비해 거의 같은 비트율에서 2.5dB이상의 우수한 성능을 보였다. 또한 제안한 부호화방식을 통한 2대역 완전 복원 필터의 성능비교에 있어서 Daubechies의 regularity충분 조건을 만족하는 준직교필터가 그렇지 않은 필터들에 비해 상대적으로 우수한 성능을 발휘함을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

The wavelet transform has recently received considerable attention in the context of image processing due to its flexibility in representing nonstationary image signals and its ability in adapting to human visual characteristics. This paper proposes a simple and effective still image compression algorithm for multiresolution signal decomposition, particularly for wavelet transform. Our

* 韓國科學技術院 電氣 및 電子工學科
Dept. of Electrical and Electronics Eng., KAIST
論文番號 : 94280
接受日字 : 1994年10月10日

proposed algorithm have effectively exploited statistical characteristics of subbands. That is, to encode the lowest lowpass subband, we have taken the measure of activity for 3x3 block in neighboring orientation subbands and used to induce prediction coefficients for each direction. And, we have encoded upper subbands by using statistical property existing in those subbands and correlation between subbands which have different resolution but same orientation. Simulation results show that the proposed coding scheme provides better performance more than 2.5dB compared to other conventional coding schemes and JPEG baseline system. Also, it is found that biorthogonal filters satisfying Daubechies' regularity condition have good performance, through the proposed coding method, compared to others.

1. 서 론

영상 신호를 디지털로 전송 또는 저장할 경우에 상당히 넓은 전송 대역폭과 메모리를 필요로 한다. 따라서 주어진 영상 신호를 가능하면 충실하게 재생하면서, 동시에 영상의 중복성(redundancy)을 효과적으로 제거하는 데이터 감축 기법들에 대해 많이 연구되어 왔다. 이러한 데이터 감축을 위한 한 수단으로서 일반적인 영상 신호의 특성 분석에 적절하고 인간의 시각 분해 방식과 유사한 웨이블릿변환(wavelet transform)에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다^(1,2,3,4,5).

웨이블릿이론은 벡터공간 $L^2(\mathbb{R})$ ($L^2(\mathbb{R})$: 측정 가능하고, 자승 적분 가능한 일차원 함수들을 원소로 갖는 벡터공간)내에 존재하는 기본 함수인 웨이블릿의 이동(translation)과 팽창/축소(dilation/contraction)로 만들어지는 기저 함수 집합(basis function set)으로 $L^2(\mathbb{R})$ 내에 속하는 임의의 함수를 표현하는 것에 바탕을 둔다^(1,2). 이러한 웨이블릿이론은 Daubechies, Mallat 등의 연구와 발표를 통하여 신호 처리 및 영상 신호 감축 연구에 많은 관심을 불러 일으키게 되었다^(1,2). 한편, 기존에 영상의 다해상도 신호 분석(multiresolution signal analysis)수단으로 고려되어 온 라플라시안 피라미드(Laplacian pyramid)⁽⁶⁾와 QMF(Quadrature Mirror Filter)^(7,8), CQF(Conjugate Quadrature Mirror Filter)⁽⁹⁾, SSKF(Symmetric Short Kernel Filter)⁽¹⁰⁾를 포함한 필터 뱅크이론은 웨이블릿이론과 유사하거나, 외형적으로 동일한 이론으로 고려되고 있다.

그러나, 웨이블릿변환은 기존의 대역 분할 부호화(subband coding)에 이용된 이산 필터 뱅크(discrete filter bank)에 연속 기저 함수의 개념을 도입함으로써, 더욱 엄격한 필터 설계 방식을 제시한다.

즉, 이산 필터(discrete filter)가 연속적인 기저 함수로 수렴하기 위한 regularity 조건을 추가하면서 영상 신호의 다해상도 분해를 통하여 효과적인 응용이 가능해진다^(1,2,5). 이와 더불어 영상 신호의 특성과 인간의 시각 분해 특성에 부합하는 방향으로 웨이블릿변환은 수행되며, 이 과정에서 각 해상도(resolution)에 대응되는 기저 함수는 regularity조건에 의해 각 방향성 대역(orientation band)에 대한 정보의 중복성을 감소시키며, 따라서 부호화 효율을 증대시킬 수 있게 된다.

한편, 기존의 대역 분할 부호화(subband coding) 또는 웨이블릿변환을 이용한 부호화 방식은 분할된 대역의 계수들에 대한 분포특성에 따라 저역 분할 신호의 부호화와 고역 분할 신호의 부호화로 나누어 고려하였다. Woods⁽⁷⁾ 등은 모든 대역에 대해 DPCM을 이용하여 부호화하였고, Le Gall⁽⁸⁾ 등은 저역분할 신호를 부호화하기 위해 적응 DPCM과 산술부호화를 수행하고, 고역 분할 신호의 부호화를 위해서는 대칭적인 PCM양자화와 Q-부호기를 이용하여 산술부호화를 행하였다. Antonini⁽¹¹⁾ 등은 다해상도 코드북(multiresolution codebook)을 이용한 VQ를 수행하였다. Lewis⁽¹³⁾ 등은 해상도간의 상관관계를 계수단위로 처리하여 부호화하였다. 그러나, 이러한 부호화 방식들은 각 대역내의 계수들의 국부적인 특성과 해상도는 다르지만 같은 방향성 대역간에 존재하는 상관관계를 충분히 이용하지 못하였다.

본 논문에서는 regularity조건을 만족하는 웨이블릿필터에 의해 분해된 신호의 특성에 부합하는 효과적인 부호화방식을 제안한다. 제안한 방식은 [21,22]를 개선한 부호화 방식이다. 즉, 에너지 집중도가 높은 가장 낮은 저주파수 대역을 부호화하기 위해, 이웃하는 각 방향성 대역의 공간 활성도를 측정하여

DPCM에 적용하여 부호화한다. 그리고 고역 분할 신호는 극소수를 차지하는 중요 계수의 위치 부호화와 중요 계수값의 부호화로 나누어 부호화한다. 그러기 위해, 계수의 절대값이 각 대역별로 주어진 문턱치^(15, 16)보다 큰 계수에 대해 중요 계수라고 두고, 4×4블록내에 중요 계수를 갖는 블록에 대해 중요블록으로 둔다. 중요 블록은 해상도는 다르지만 같은 방향성 대역이 갖는 상관 관계를 이용하고, 중요 블록내의 중요 계수의 위치는 각 방향성 대역이 갖는 통계적 성질을 이용하여 각각 Q-부호기에 의한 산술 부호화^(17, 18, 19)를 수행하여 위치를 부호화한다. 그리고 중요 계수 값은 균일 양자화기를 통하여 양자화하고, 허프만 부호화^(11, 12)를 수행한다.

본 논문은 우선, II장에서 기존의 대역 분할 부호화에서 사용된 2-대역 완전 복원 필터 뱅크 설계를 위한 관계식과 웨이블릿필터가 갖는 Daubechies의 regularity충분조건을 들고, 기존의 부호화 방식에 대해 간단하게 살펴본다. 그리고 III장에서는 본 논문에서 제안한 정지 영상 부호화 방식에 대해 설명하며, IV장에서는 모의실험 결과를 통해 기존에 제안된 정지 영상 부호화 방식과의 부호화 성능을 비교하고, 동시에 여러 종류의 2-대역 완전 복원 필터의 성능을 제안한 부호화 방식에 의한 모의 실험 결과에 근거하여 비교한다. 마지막으로 V장에서는 결론을 맺는다.

II. 웨이블릿필터의 특징과 기존의 부호화 방식

1. 2-대역 완전 복원 필터의 관계식과 웨이블릿 필터의 특징

그림-1은 기존의 2-대역 분할 부호화(subband coding)와 옥타브 대역 분할의 웨이블릿변환에서 고려되어 온 2-대역 분해/복원을 나타내는 블록도이다.

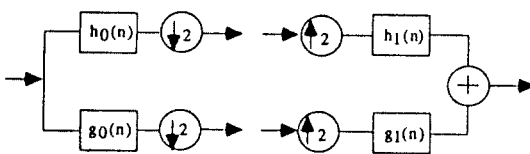


그림 1. 2-대역 분해/복원 블록도
Fig. 2. 2-Subband decomposition/reconstruction block diagram

완전 복원 특성을 만족하기 위해서는 다음의 관계식이 만족되어야 한다.

$$H_1(e^{j\omega}) = G_0(-e^{j\omega}) \quad (1)$$

$$G_1(e^{j\omega}) = -H_0(-e^{j\omega}) \quad (2)$$

$$G_0(e^{j\omega}) = -H_0(-e^{j\omega}) \quad (3)$$

여기서, $H_0(e^{j\omega})$, $H_1(e^{j\omega})$, $G_0(e^{j\omega})$, $G_1(e^{j\omega})$ 는 각각 $h_0(n)$, $h_1(n)$, $g_0(n)$, $g_1(n)$ 의 푸리에 변환을 나타낸다. 이와 같이 완전 복원 특성을 만족하도록 설계된 필터를 CQF(Conjugate Quadrature Mirror Filter)라고 하며⁽⁹⁾, Johnston이 설계한 QMF(Quadrature Mirror Filter)와는 달리 각 필터들은 선형 위상을 갖지 못한다^(6, 7).

한편, 직교 웨이블릿변환에 사용되는 필터뱅크는 위의 식 (1), (2), (3)을 각각 만족하며, 또한 그림-2에 나타낸 것처럼 팽창/축소에 의해 해상도를 결정하는 고유한 연속 함수인 스케일함수 $\phi(x) \in L^2(\mathbb{R})$ 가 존재하여야 한다^(1, 2).

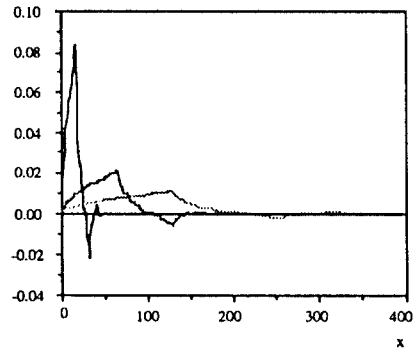


그림 2. 스케일함수의 팽창/축소의 예
Fig. 2. Example for dilation/contraction of scaling function

이산 필터가 고유한 연속 함수를 갖기 위한 충분 조건 즉, regularity조건을 Daubechies의 충분 조건은 다음과 같다⁽²⁾. 스케일함수의 성질에 따라 식(4)의 표현이 성립하며, $h(k)/\sqrt{2}$ 를 $m_0(k)$ 라 두고서 푸리에 변환을 행하면 식(5)로 나타낼 수 있다.

$$\phi(x) = \sum_k \sqrt{2}h(k)\phi(2x-k) = \sum_k m_0(k)2\phi(2x-k) \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Phi(\omega) &= M_0(\omega)\Phi\left(\frac{\omega}{2}\right) = M_0\left(\frac{\omega}{2}\right)M_0\left(\frac{\omega}{4}\right)\Phi\left(\frac{\omega}{4}\right) \quad (5) \\ &= \prod_{i=1}^{\infty} M_0\left(\frac{\omega}{2^i}\right) \end{aligned}$$

여기서 $M_0(\omega)$ 와 $\phi(\omega)$ 는 각각 $h(k)$ 와 $\phi(x)$ 의 푸리에변환을 나타내고, $\lim_{\omega \rightarrow 0} \phi(\frac{\omega}{2})=1$ 가 사용되었다. 2대 1 보간기와 이산 필터 $M_0(k)$ 을 기본블록으로 하여 구성된 그림-3(a)에서 임펄스를 입력으로 하고 n 을 무한히 크게하면, 식(5)의 결과를 낳으며 결국 $\phi(x)$ 가 얻어진다. 그러나 모든 $h(n)$ 이 고유한 연속 함수 $\phi(x)$ 에 수렴하는 것은 아니므로, 영상신호의 다해상도 분해에 있어서는 모든 해상도에 걸쳐 동일한 형태의 기저로 작용하기 위해서는 이와 같은 성질은 필수적인 요구조건이 된다. Daubechies는 필터길이가 L 인 이산 필터 $M_0(\omega)$ 에 대해 $\omega=\pi$ 에 zero의 수를 필터길이의 반($L/2$)만큼 위치시키므로써, regularity충분조건을 증명하였다⁽²⁾.

$$M_0(\omega) = [(1+e^{j\omega})/2]^{L/2} Q(\omega) \quad (6)$$

여기서, $Q(\pi) \neq 0$ 이며, 식(6)의 조건을 만족하도록 설계된 이산필터에 대응하는 고유한 연속 함수 $\phi(x)$ 가 존재하며, 이 함수는 정의된 유한영역에서 $L/2$ 번 연속 미분가능하다^(1,2). 그림-3에서 (b)와 (c)는 각각 연속 함수와 불연속 함수로 수렴하는 예를 나타낸다.

필터의 길이가 길수록 $\omega=\pi$ 에 zero의 수를 많이 위치시킬 수 있으므로, 더욱 부드러운 형태의 $\phi(x)$ 를 얻을 수 있으나, 구현시에 계산량이 많아지는 단점이 초래된다. 웨이블릿필터는 위에서 설명한 regularity 조건을 만족하도록 설계되기 때문에 다해상도의 신호 분해시에 모든 대역에 대해 안정된 동일 형태의 기저로 작용하여 우수한 성능을 발휘한다.

한편, 준직교 웨이블릿변환(biorthogonal wavelet transform)은 분해 및 복원측의 스케일함수는 식(6)을 각각 만족하며, 이와 더불어 분해시의 스케일 함수는 복원측의 웨이블릿에 대해서만 직교성이 성립하고, 분해시의 웨이블릿은 복원측의 스케일 함수와 직교성을 만족하도록 구성될 뿐, 앞에서 논한 직교 웨이블릿과 동일한 과정으로 변환/역변환이 수행된다⁽⁵⁾.

2. 기존의 부호화 방식

그림-4는 영상 전체에 걸쳐 10개의 대역으로 웨이블릿변환 또는 대역 분할한 예이며, 본 논문에서 사용되는 방향성 대역의 용어를 정의한다. 대역 LL3은 저역 분할 신호라고 하며, 기존의 대역 분할 부호화(subband coding)에서는 가장 낮은 저역 통과 필터(lowpass filter)를 통과시킨 후에 나온 신호이며, 웨이블릿변환 측면에서는 가장 낮은 해상도의 스케일함수(scaling function)로 근사화된 영상 신호이다. 그리고 나머지 대역들을 고역 분할 신호라고 하며, 기존의 대역 분할 필터에 의해 대역 통과 필터(bandpass filter) 및 고역 통과 필터(highpass filter)를 각각 통과시킨 후의 신호이며, 웨이블릿변환측면에서는 각 대역에 해당되는 웨이블릿 기저 함수의 계수들이 이곳에 위치한다. 한편, 고역 분할 신호는 각 해상도에 대응하는 일정한 방향으로의 가장자리 정보를 소유한다고 하여 방향성 대역이라고도 한다.

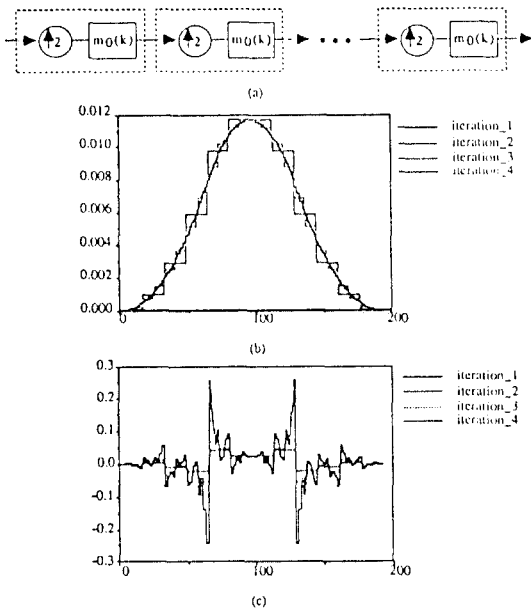
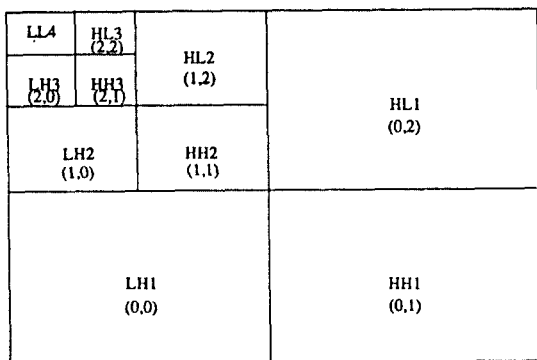


그림 3. 이산 저역 통과 필터의 연속함수 수렴 특성 조사
 (a) 2대 1 보간기와 이산필터로 구성된 기본블록의 n개 직렬 연결
 (b) 연속 함수로 수렴하는 예
 (c) 불연속 함수로 수렴하는 예
 Fig. 3. Convergence test of discrete lowpass filters to continuous function
 (a) n cascade connections of basic block composed of upsampler by 2 and discrete filter
 (b) Convergence
 (c) Non-convergence



LH: 수직 방향 대역
HL: 수평 방향 대역
HH: 대각선 방향 대역
(m,d): m은 해상도 인덱스
d는 방향의 인덱스

그림 4. 10개의 대역 분할
Fig. 4. 10-subband decomposition

저역 분할 신호와 고역 분할 신호의 통계적 특성이 크게 다르므로 기존의 부호화 방식은 저역 분할 신호의 부호화와 고역 분할 신호의 부호화로 구분하여 부호화한다. 저역 분할 신호는 원 영상 신호가 가지고 있는 에너지의 대부분을 소유하고 있으며, 복원 영상에 미치는 영향이 가장 크다. 또한, 저역 분할 신호는 원 영상 신호의 해상도를 낮추어 근사화된 신호이므로 부호화 효율을 증대시키는데 편리하게 고려될 수 있다. 그러나, 저역 분할 신호를 부호화하기 위해서 기존에는 주로 단순한 DPCM⁽⁷⁾, DCT, VQ⁽¹¹⁾ 등을 주로 이용하여 부호화하므로써, 부호화효율을 크게 개선시키지 못하였으며, 동시에 DCT나 VQ를 사용할 경우에는 저역 분할 영상의 특징에 따라 복원 영상에 인위 효과가 초래될 가능성이 있다.

한편, 고역 분할 신호는 에너지 집중도는 떨어지지 만, 인간의 시각에 민감한 영상의 가장자리 정보를 소유하고 있으며, 주로 선구조(line structure)형태로 배열한다. 고역 분할 신호를 부호화하기 위해 기존의 방식들은 주로 VQ⁽¹¹⁾를 많이 사용하고, 그 외에 DPCM/PCM^(7,10), 산술 부호화⁽¹⁰⁾ 등과 이들을 혼용하는 부호화방식을 사용한다. Antonni 등은 다해상도 부호책(multiresolution codebook)을 이용한 VQ에 의한 부호화를 제안하였다⁽¹¹⁾. 그러나, 고역 분할 신호에 VQ를 적용할 경우에 상관관계(correlation)를 이용하는데 어려움이 존재하며, 부호화시에 최적의 코드 워드를 찾는 데에 계산량이 많다. Le Gall은 고역 분할 신호의 모든 계수를 PCM양자화한 후에 산술 부호

화의 적용을 제안하였으나, 고역 분할 신호의 통계적 특성을 충분히 이용하지 못하므로써 부호화 효율을 개선시키지 못하였다⁽¹⁰⁾. 그리고 Lewis는 각 방향성 대역의 다른 해상도간에 상관관계가 존재한다는 성질을 이용하여 각 계수를 나무 구조(tree structure)형태로 부호화하는 방식을 제안하였으나 계수 단위로 처리하는데 제한적이며, 계산적 부담이 있다⁽¹³⁾.

Ⅲ. 제안된 부호화 방식

1. 저역 분할 신호의 부호화

본 논문에서는 저역 분할 신호를 부호화하기 위해 적용 DPCM을 이용하여 부호화한다. 각 계수값의 크기를 예측하기 위해 같은 해상도에 있는 세 방향성 대역의 성질을 이용한다. 각 방향성 대역에 있는 각 계수값의 크기는 그 위치 또는, 그 계수 주위에서의 국부적 활성도(local activity)를 나타낸다. 활성도가 큰 영역은 실제 저역 분할 신호에서 밝기 변화가 심한 곳이며, 그 방향으로의 계수값을 가지고 예측기에 이용할 경우에는 예측 효율이 떨어진다. 반대로 활성도가 작은 방향성 대역에 대해 그 방향으로의 계수값을 이용하여 예측할 경우에 예측 효율은 증가한다.

본 논문에서는 저역 분할 신호와 같은 해상도의 각 방향성 대역에 대해 부호화후 다시 복호화된 결과를 가지고 예측기의 예측계수를 구하는데 사용한다. 만약, 저역 분할 신호의 (m,n)위치에 있는 계수값을 예측하고자 할 경우, 부호화/복호화를 거친 이웃 방향성 대역에서 (m,n)위치를 포함한 3×3블록내에 있는 계수들의 절대값의 합을 구하여 활성도를 측정한다.

$$\begin{aligned}
 P_H &= \sum_{i=m-1}^{m+1} \sum_{j=n-1}^{n+1} |\bar{X}_H(i,j)| \\
 P_V &= \sum_{i=m-1}^{m+1} \sum_{j=n-1}^{n+1} |\bar{X}_V(i,j)| \\
 P_D &= \sum_{i=m-1}^{m+1} \sum_{j=n-1}^{n+1} |\bar{X}_D(i,j)|
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

여기서, $\bar{X}_H(i,j)$, $\bar{X}_V(i,j)$, $\bar{X}_D(i,j)$ 는 각각 저역 분할 신호와 같은 해상도의 수평방향, 수직 방향, 대각선 방향성 대역의 (i,j)위치에서 부호화/복호화를 거친 후의 계수값을 나타낸다. 그림-4와 같은 대역 분할의

예에서는 부호화/복호화된 HL3, LH3, HH3영역에서의 계수값을 나타낸다. 식(7)의 값들은 3×3블록단위로 측정된 국부화된 공간 영역의 활성화 측정의 한 방식으로 본 논문에서는 정의한다. 따라서, 이 값의 크기가 클수록 그 쪽방향에 대해서는 공간적인 변화 정도가 심함을 추측할 수 있으며, 작을수록 변화 정도는 미미하여, 예측효율의 증가를 기대할 수 있다. 그러므로 각각의 값에 대해 역을 취하여 정규화(normalization)를 행한다.

$$P_h = \frac{1/P_H}{1/P_H + 1/P_D + 1/P_V} = \frac{P_V P_D}{P_V P_D + P_D P_H + P_H P_V}$$

$$P_d = \frac{1/P_D}{1/P_H + 1/P_D + 1/P_V} = \frac{P_H P_V}{P_V P_D + P_D P_H + P_H P_V} \quad (8)$$

$$P_v = \frac{1/P_V}{1/P_H + 1/P_D + 1/P_V} = \frac{P_D P_H}{P_V P_D + P_D P_H + P_H P_V}$$

이 결과를 이용하여 예측 계수로 이용한다. 즉,

$$\bar{X}(m,n) = P_h \bar{X}(m,n-1) + P_v \bar{X}(m-1,n) + P_d \bar{X}(m-1,n-1) \quad (9)$$

$$e(m,n) = X(m,n) - \bar{X}(m,n)$$

여기서, $\bar{X}(x,y)$ 는 저역 분할 신호에서 (x,y)위치의 부호화/복호화된 계수값을 나타낸다. 식(9)로 나온 예측 오차는 라플라시안 분포를 가정하고 비균일 양자화를 통한 동일 비트율로 부호화한다. 즉, 라플라시안 분포는

$$p_x(x) = \frac{\alpha}{2} \exp(-\alpha|x-m|) \quad (10)$$

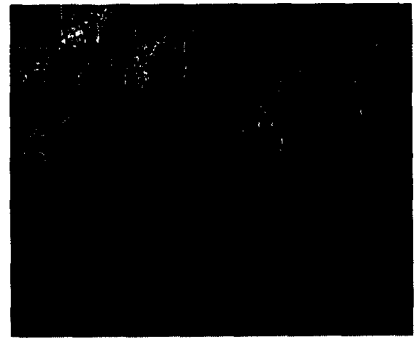
로 주어지며, 여기서 분산은 $\alpha/2$ 의 관계를 갖고, 평균(m)은 0으로 한다. 라플라시안 분포에 대한 최적 평균 자승 비균일 양자화기(optimum mean square nonuniform quantizer)는 [12, chap.4]의 결과를 이용한다.

2. 고역 분할 신호의 부호화

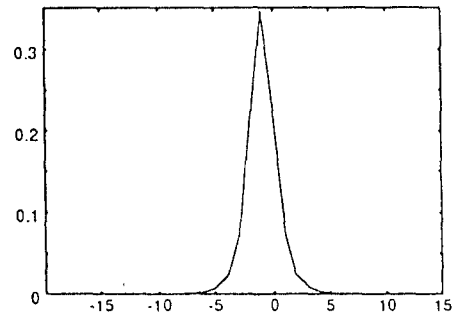
본 논문에서 가장 낮은 방향성 대역의 신호를 제외한 고역 분할 신호를 압축하기 위해 우선, 각 대역별로 적절한 문턱치를 두고, 각 계수의 절대값 크기가 이 문턱치보다 크거나 같으면, 중요계수로 두고, 그렇지 않으면 비중요 계수로 나눈다. 그런 후에 중요 계수에 대해 중요계수의 위치 부호화와 중요 계수 값의 부호화로 나누어 고역 분할 신호를 부호화한다.

2.1 고역 분할 신호의 특징

고역 분할 신호는 저역 분할 신호에 비해 에너지 집중도는 떨어지지만, 물체의 가장자리(edge)와 같이 인간의 시각 분해 특성에 민감한 정보를 포함하고 있다. 즉, 그림5-(a)에서 흰색 영역은 중요계수들의 위치를 나타낸다. 이러한 영역의 신호는 선구조(line structure)형태를 가지며 원 영상 신호의 가장자리 신호에 관련된 정보들이 나타난다. 이런 정보들을 제외하면, 고역 분할 신호는 거의 대부분이 영 또는 영 근처의 값을 가지게 되며, regularity조건을 만족하는 필터를 사용하면, 이러한 현상은 더욱 두드러지게 나타난다.



(a)



(b)

그림 5. 고역 분할 신호에서 중요계수와 HH1대역에 대한 히스토그램의 예

(a) LENA영상에 대한 고역 분할 신호의 중요계수

(b) HH1대역에 대한 히스토그램의 예

Fig. 5. Significant coefficients in the upper subbands and histogram for subband HH1

(a) Significant coefficients in the upper subbands for LENA image

(b) Histogram of subband HH1

그림-5(b)는 그림-4의 HH1대역에 대한 히스토그램의 예를 나타내며, HH1대역내에 존재하는 계수의 약 98%가 절대값이 5이하이다. 실제, 원 영상 신호를 3개이상의 다해상도로 분해할 경우에 전송해야 될 계수의 98%정도가 고역 분할 신호 영역에 위치하게 되며, 그중에서도 중요계수가 극소수를 차지하게 되므로, 중요계수를 얼마나 효과적으로 부호화하느냐에 따라 전체 압축률에 크게 영향을 주게 된다. 이를 위해 본 논문에서는 각 방향성 대역별로 존재하는 방향성의 성질과 해상도가 다른 각 방향성대역간에 존재하는 상관관계(correlation)를 이용하여 부호화한다. 수평방향, 수직방향, 그리고 대각선 방향의 각 방향성 대역내에는 어느 정도의 규칙적인 방향성을 가지고 있으며, 상호 다른 해상도를 갖는 같은 방향성 대역간에는 영역의 크기는 다르지만 비슷한 모양의 가장자리 정보를 공유하고 있다.

2.2 가장 낮은 방향성 대역의 부호화

대역을 많이 나눌수록 에너지 집중효율이 떨어지게 되며, 더불어 계산량이 많이 요구되므로 본 논문에서는 3개 또는 4개의 해상도를 갖도록 대역 분할을 제한하며, 가장 낮은 방향성 대역은 저역 분할 신호의 부호화를 위해 독립적으로 부호화한다. 본 논문에서는 사용된 가장 낮은 방향성대역의 부호화방식은 식 (10)과 같이 라플라시안 분포로 근사화하여 균일 양자화기(그림-8)를 이용한 허프만 엔트로피 부호화를 행한다. 그림 8과 같이 분해하였을 경우에 LENA(512×512)영상에 대해 수직, 대각선, 수평방향으로의 분산은 약 3.0, 2.7, 6.6을 갖는다.

2.3 Q-부호기를 이용한 산술부호화

엔트로피 부호화에는 크게 허프만 엔트로피 부호화와 산술부호화의 두가지 방식이 있다. 허프만 엔트로피 부호화 방식은 사전에 얻은 통계적인 확률 모델에 따른 비트할당 방식이며, 지역적인 확률 특성을 고려할 수가 없다. 그러나, 산술 부호화는 고정된 모델을 사용하지 않고 국부적인 특성에 확률 모델을 수정해 갈 수가 있다. 각 방향성 대역내의 국부적인 특성과 해상도가 다른 각 방향성 대역간의 특성을 고려하여 볼 때, 산술부호화가 적당하다. 그러나, 고역 분할 신호는 각 계수들 단위로 처리하는 데는 복잡할 뿐만

아니라, 중요 계수들간의 상관관계보다는 중요 계수를 포함하는 영역간의 상관관계가 더 크므로, 계수값, 계수의 위치와 영역의 위치를 다르게 구분하여 부호화하는 것이 필요하며, 위치의 부호화를 위해 [18,19]에서 사용한 Q-부호기를 이용한 산술부호화를 사용한다.

2.4 중요 계수의 위치 부호화 방식

같은 방향성이고 다른 해상도의 고역 분할 신호는 전체적으로 규칙적인 특성을 가지고 있으나, 각 중요 계수 단위의 분포는 반드시 정렬된 형태를 갖는 것은 아니다. 이와 같은 특성을 반영하기 위해 가장 낮은 해상도의 세 방향성 대역을 제외한 모든 방향성 대역을 4×4블록 단위로 나누고, 4×4블록 내에 중요계수의 유무에 따라 중요 블록과 비중요 블록으로 구분한다. 중요 블록과 비중요 블록은 해상도는 다르지만 같은 방향성 대역간의 상관관계를 이용하여 부호화한다. 즉, 중요 블록과 비중요 블록을 각각 1과 0에 대응시킨 후, 낮은 해상도의 방향성 대역에서 높은 해상도의 방향성 대역으로 그림-6(b)에서와 같은 순서로 주사하여 읽어 들인다. 이때 수평, 수직, 대각선 방향의 각 방향성 대역은 수직, 수평, 수직방향 순으로 4×4, 8×8(4개의 4×4블록), 16×16(16개의 4×4블록)블록크기의 Quadtree형식으로 주사한다. 이때, 읽어들이는 값들은 Q-부호기를 이용한 산술부호화를 통하여 중요 블록 위치를 부호화한다^[18,19].

그리고 중요 블록내의 중요계수의 위치 부호화는 각 방향성 대역이 갖고 있는 국부적인 특성을 이용하여 부호화한다. 즉, 중요계수는 1, 비중요 계수는 0에 대응시킨 후에, 그림-7에서처럼 수평, 수직, 대각선 방향성 대역에 대해 수직, 수평, 수직 방향으로 주사하여 Q-부호기에 의한 산술 부호화를 통하여 중요 계수의 위치를 부호화한다. 이때, 중요계수의 위치를 주사할 때, 블록에 대한 정보는 중요 블록의 위치 부호화에 의해 제공가능하므로, 한개의 4×4블록의 상하 또는 좌우의 인접하는 블록중에서 접해있는 블록은 중요계수의 위치 주사를 위해 병합하여 주사된다. 이렇게 하므로써 더 많은 영역으로 방향성의 성질을 이용할 수 있게 된다.

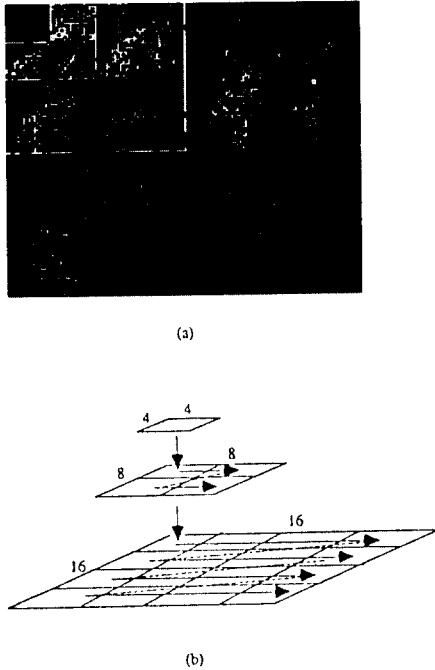


그림 6. 중요/비중요 블록의 구분과 블록 주사 방식
 (a) 중요/비중요 블록의 구분
 (b) 블록의 주사 방식(수직방향대역)
 Fig. 6. Significant/non-significant block and block scanning method
 (a) Significant/non-significant block segmentation
 (b) Block scanning method(vertical orientation band)

2.5 중요 계수 값의 부호화 방식

각 대역별로 중요 계수의 판정을 위한 문턱치는 그림-8에 주어지며, 이 결과는 Berger⁽¹⁵⁾가 인간의 눈은 고주파 신호에서 잡음의 효과에 상대적으로 둔감하고, 또한 대각선 방향성 대역은 수평, 수직 방향성 대역에 비해 잡음에 대해 덜 민감하다라는 사실에 바탕을 두고 실험적으로 얻은 양자화 행렬이다⁽¹⁶⁾. 본 논문에서는 각 계수들의 절대값의 크기를 이 값에 비교하여 중요 계수와 비중요 계수로 구분한다. 고역 분할 신호의 각 계수들에 대한 분포도는 [11]에서 사용된 일반 가우시안 확률 밀도 함수(generalized gaussian probability density function)로 근사화한다. 즉,

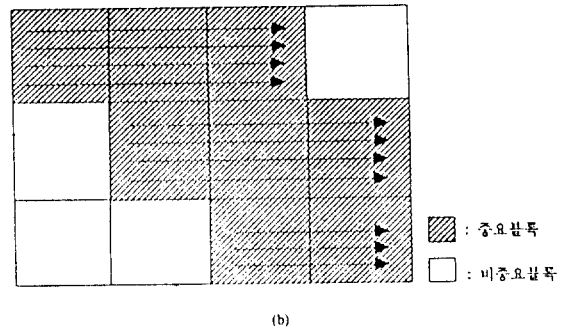
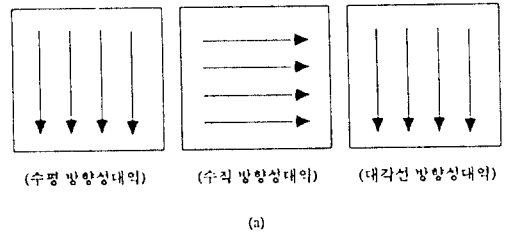


그림 7. 중요 블록내의 중요 계수 위치 부호화방식
 (a) 계수 주사 방식
 (b) 수직 방향성 대역에서 계수 주사 방식의 예
 Fig. 7. Significant coefficient location coding in the significant block
 (a) Coefficient scanning method
 (b) Example for coefficient scanning method in the vertical orientation subband

$$P_{m,d}(x) = a_{m,d} \exp(-|b_{m,d} x| r_{m,d})$$

$$a_{m,d} = b_{m,d} r_{m,d} / 2\Gamma(1/r_{m,d}) \tag{11}$$

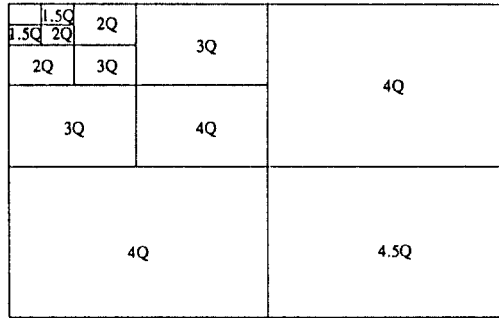
$$b_{m,d} = [\Gamma(3/r_{m,d}) / \Gamma(1/r_{m,d})]^{1/2} / \sigma_{m,d}$$

이며, 여기서 $\sigma_{m,d}$ 는 그림-4에서 표시한 (m,d)대역의 표준편차를 나타내고, $\Gamma(\cdot)$ 는 감마 함수이다. 따라서, 다양한 특성의 영상에 대하여 $\sigma_{m,d}$ 와 $r_{m,d}$ 를 구하므로써 확률 밀도 함수를 구한다. 확률밀도 함수의 뾰족한 정도를 결정내는 $r_{m,d}$ 의 값은 [11]에서처럼 0.7을 사용하였으며, 표-1에서는 다양한 영상에 대해 얻은 $\sigma_{m,d}$ 의 값을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 중요 계수로 판정된 계수에 대해서는 식(11)에서 문

터치 부분을 제외한 영역에 대하여 허프만 엔트로피 부호화를 수행한다.

표 1. 본 논문에서 사용한 $\sigma_{m,d}$ 값
Table 1. $\sigma_{m,d}$ values used in proposed coding scheme

(m, d)	(0,0)	(0,1)	(0,2)	(1,0)	(1,1)	(1,2)	(2,0)	(2,1)	(2,2)
$\sigma_{m,d}$	1.5	1.0	2.0	2.0	1.5	3.0	3.0	2.0	4.0



Q: 보정계수(corrective factor)

그림 8. 각 대역별 양자화간격
Fig. 8. Quantization step size for each subband

이상에서 설명한 제안한 부호화 방식을 요약한 것이 그림-9에 주어진다.

IV. 모의 실험 결과

1. 기존의 다른 부호화 방식과 성능 비교

모의 실험을 통하여 제안한 부호화 방식의 성능과 기존의 부호화 방식의 성능을 동일한 조건하에서 비교하였다. 즉, 사용된 비교 영상은 한 화소값이 256

레벨(8비트)인 512×512크기의 LENA 흑백 영상이고, 또한 동일한 조건을 위해 제안한 부호화 방식의 사용 필터는 비교 대상의 각 논문과 같은 필터를 이용하였다. 여기서, 객관적 화질 성능 평가 척도로 PSNR(Peak-to-peak SNR)을 사용하였다.

표 2. 제안한 방식과 기존의 부호화 방식의 성능비교
(사용영상 : 512×512 LENA 흑백 영상)
Table 2. Performance comparison between proposed coding method and conventional methods

비교논문	기존의 부호화방식		제안방식		사용필터
	PSNR (dB)	비트율 (bpp)	PSNR (dB)	비트율 (bpp)	
Lewis ^[13]	33.18	0.43	35.55	0.434	4탭 직교웨이블릿필터(D4)
Le Gall ^[10]	34.56	0.70	37.89	0.701	5-3탭 준직교 웨이블릿필터(D53)
Antonni ^[11]	30.85	0.37	35.27	0.367	9-7탭 준직교 웨이블릿필터(D97)

모의 실험 결과로 부터 알 수 있듯이, 제안한 부호화 방식은 다른 부호화 방식에 비해 거의 같은 비트율에서 약 2.5dB이상의 우수한 성능을 나타내며, 준직교 웨이블릿 9-7탭의 필터가 4탭 직교 웨이블릿 필터보다 우수한 성능을 보인다는 것을 알 수 있으며, 이결과는 본 논문에서 필터의 성능 비교에서 더욱 분명하게 나타났다.

그리고, 준직교 웨이블릿필터 9-7탭을 사용하여 대역 분할한 후 그림-8에서 Q=1.2을 적용한 경우에, 고역 분할 신호에서 중요 계수의 부호 비트량은

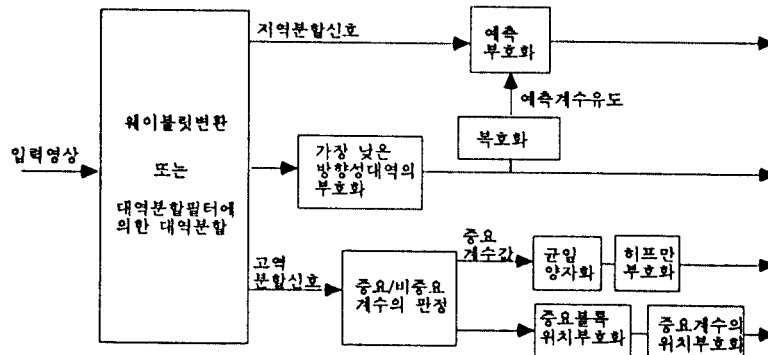


그림 9. 제안된 부호화방식
Fig. 9. Proposed coding scheme

74666비트, 그리고 위치 부호 비트량은 12078비트가 소요되었다. 이와 같은 결과를 통해 제안한 부호화 방식은 고역 분할 신호내에 존재하는 통계적 성질을 효과적으로 이용하여 중요 계수의 위치를 부호화함으로써 부호화 효율을 높일 수가 있음을 확인할 수 있었다.

2. JPEG baseline 시스템과의 성능 비교

제안한 부호화 방식의 성능을 기존에 정지 영상 부호화로 가장 널리 알려진 JPEG baseline 시스템과 비교하기 위하여 두가지 종류의 영상에 대해 모의 실험을 행하고, 그 결과를 표-3에 나타내었다. 제안 방식에서 사용 필터는 모두 준직교(biorthogonal) 웨이블릿 필터 9-7탭을 사용하였다. 여기서, 제안한 부호화 방식의 성능이 JPEG 방식보다 주관적 화질 및 객관적 화질 측면에서 우수한 결과를 낳았다. JPEG 방식은 낮은 비트율 부호화에서의 ZELDA영상에서

는 심한 블록현상(blocking effect)이 발생하여 주관적 화질에 나쁜 결과를 초래하였다. 그러나, 제안한 방식은 문턱치의 사용에 의해 어두운 영역에서 다소 뭉그리짐 현상이 나타나지만, 영상 전체에 양자화 오차가 고루 분포시키므로 심한 화질 저하를 주지 않는다.

표 3. 제안한 방식과 JPEG baseline시스템과의 성능 비교 (제안한 방식은 9-7탭 준직교 웨이블릿필터 이용)

Table 3. Performance comparison between proposed coding method and JPEG baseline system

사용영상	JPEG		제안방식	
	PSNR (dB)	비트율 (bpp)	PSNR (dB)	비트율 (bpp)
Barbara (704×240)	29.70	0.963	32.967	0.960
Zelda (704×240)	29.967	0.178	33.34	0.175

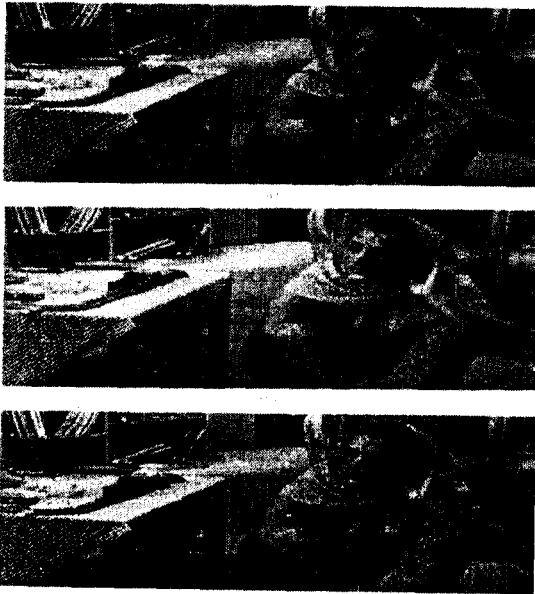


그림 10. BARBARA영상(704×240)
 (a) 원 영상
 (b) 제안 방식(32.927dB, 0.960bpp)
 (c) JPEG baseline시스템(29.7dB, 0.963bpp)
 Fig 10. Coding result for BARBARA image(704×240)
 (a) Original image
 (b) Proposed result(32.927dB, 0.960bpp)
 (c) JPEG baseline system's result(29.7dB, 0.963bpp)

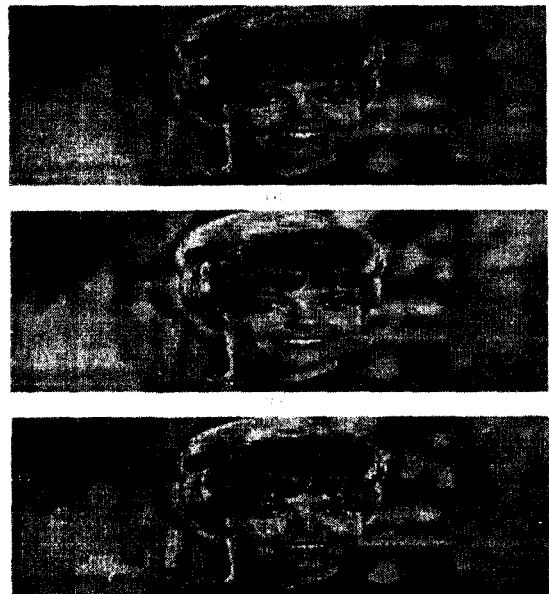


그림 11. ZELDA영상(704×240)
 (a) 원 영상
 (b) 제안 방식(33.34dB, 0.175bpp)
 (c) JPEG baseline시스템(29.967dB, 0.178bpp)
 Fig 11. Coding result for ZELDA image(704×240)
 (a) Original image
 (b) Proposed result(33.34dB, 0.175bpp)
 (c) JPEG baseline system's result(29.967dB, 0.178bpp)

특히, 웨이블릿필터는 ZELDA영상처럼 영상 신호 자체가 부드러운 영상일수록 상대적으로 그렇지 못한 BARBARA영상에 비해 JPEG방식보다 우수한 결과를 나타낸다. 이와 같은 결과는 다해상도 분해용의 이산 필터가 부드러운 굴곡의 연속함수로 수렴하기 위한 필터의 regularity조건에 기인한다.

3. 완전 복원 2-대역 분할 필터의 성능 비교

완전 복원 성질을 만족하는 2-대역 분할 필터의 성능을 비교하기 위해 여러 종류의 필터를 선택하였다. 본 논문에서 사용된 필터는 다음과 같다.

D4필터 : Daubechies가 설계한 4탭 직교(orthogonal) 웨이블릿필터⁽²⁾

D8필터 : Daubechies가 설계한 8탭 직교(orthogonal) 웨이블릿필터⁽²⁾

CQF8필터 : Smith 등이 설계한 8탭 CQF(Conjugate Quadrature mirror Filter)필터⁽⁹⁾

D53필터 : Daubechies 등이 설계한 5-3탭 준직교(biorthogonal) 웨이블릿필터⁽⁵⁾

SSKF44필터 : Le Gall 등이 설계한 4-4탭 SSKF(Symmetric Short Kernel Filter)필터⁽¹⁰⁾

D97필터 : Antonini등이 설계한 9-7탭 준직교(biorthogonal) 웨이블릿필터⁽¹¹⁾

이 필터들의 저역 통과 필터에 대응되는 스케일함수(scaling function)를 그림-12에 나타내었다. 사용된 필터 중에서 SSKF44필터를 제외하고 사용된 모든 필터는 II장에서 설명한 regularity조건을 만족한다. 그리고 준직교(biorthogonal) 웨이블릿필터는 II장에서 설명한 해상도를 결정하는 스케일함수를 각각 분해측과 복원측으로 나누어 나타내었다. 사용 영상은 한 화소값이 256레벨(8비트)인 512×512크기의 LENA 흑백 영상을 이용하여 제한한 부호화 방식에 의한 모의 실험 결과가 표-4에 나타내었다.

위의 결과로 부터 결과로 부터 몇 가지 측면의 분석이 가능하다. 첫째, SSKF44필터처럼 regularity 조건을 만족하지 않는 필터는 다해상도로 영상 신호를 분해한 후, 양자화와 같은 비선형 변환을 거치면 원 신호로의 완전 복원이 거의 불가능함을 알 수 있다. 즉, 그림-3(c)처럼 불연속 기저함수로 수렴하기 때문에, 다해상도의 분해는 계수값들의 발산효과를

표 4. 완전 복원 특성을 만족하는 2-대역 분할 필터의 성능 비교 (사용영상 : 512×512 LENA 흑백영상)

Table 4. Performance comparison for 2-subband decomposition filters

사용필터	비트율(bpp)	PSNR(dB)
SSkF44	1.021	14.527
D4	0.327	33.554
D53	0.328	34.701
CQF8	0.327	33.607
D8	0.328	34.528
D97	0.328	34.885

초래하는 현상이 나타난다.

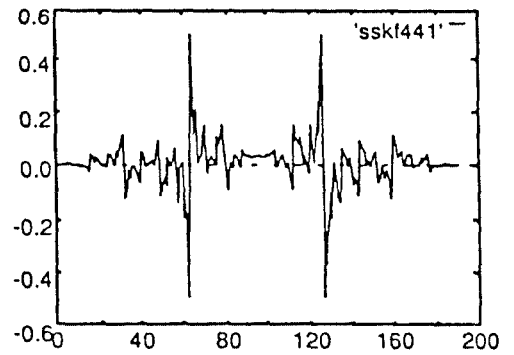
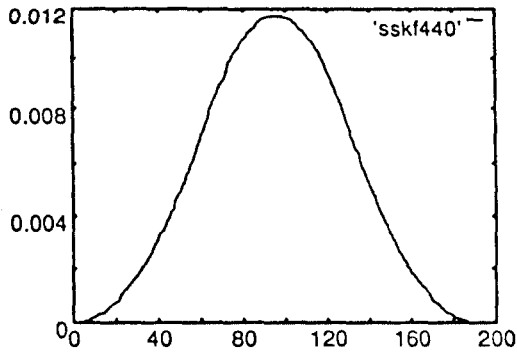
둘째, regularity조건을 만족하는 필터 중에서 같은 종류의 필터인 준직교필터(D97필터와 D53필터), 직교필터(D4필터, D8필터, CQF8필터)의 비교에서 알 수 있듯이, 필터의 길이가 길수록 우수한 성능을 나타냄을 볼 수 있다. 달리 말하면, 기저함수의 굴곡이 부드러울수록 우수한 성능을 발휘한다.

셋째, 준직교필터가 직교필터보다 성능이 우수함을 알 수 있다. 이와 같은 이유는 근본적으로 준직교필터는 분해측의 저역 통과 필터(lowpass filter)와 고역 통과 필터(highpass filter)사이에 직교성을 완화하여, 대칭적인 선형 필터의 구성이 가능하다는 것이다. 그림-12는 그림-3(a)에서 2대1 보간기와 이산 저역 통과 필터로 구성된 기본 블록을 4번 또는 5번 통과시켜 얻은 함수이며, 여기에서 알 수 있듯이, 준직교 필터는 대칭적인 기저함수를 스케일 함수로 가지며, 따라서 일반적인 영상 신호의 특징을 잘 표현할 수 있다.

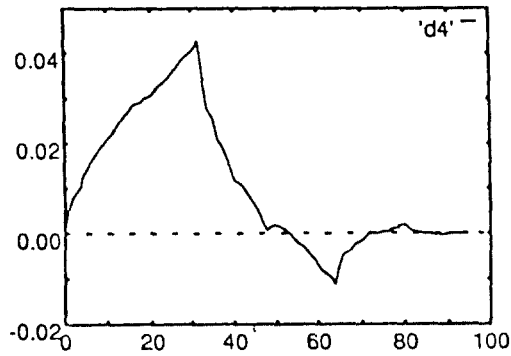
결론적으로, regularity 조건을 만족하면서 필터의 길이가 긴 준직교웨이블릿필터가 상대적으로 우수한 성능을 발휘함을 위의 모의 실험 결과로 부터 알 수 있다.

V. 결 론

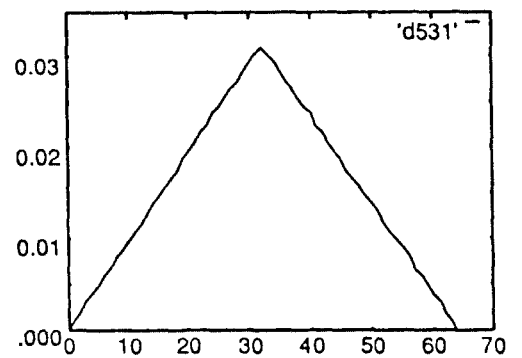
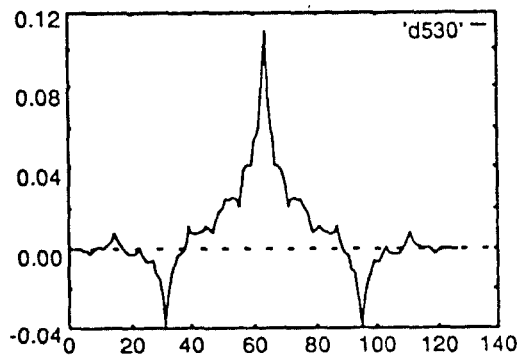
본 논문에서는 기존의 완전 복원 특성을 만족하는 2-대역 분할 필터와 이에 근거하여 웨이블릿필터의 특징을 살펴보고, 이러한 필터에 의한 다해상도 영상



(a)

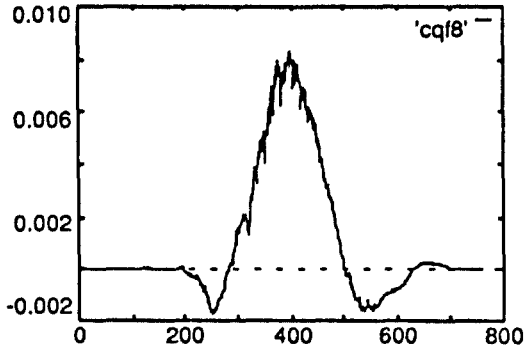


(b)

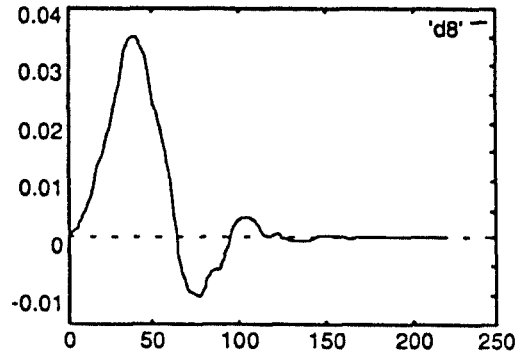


(c)

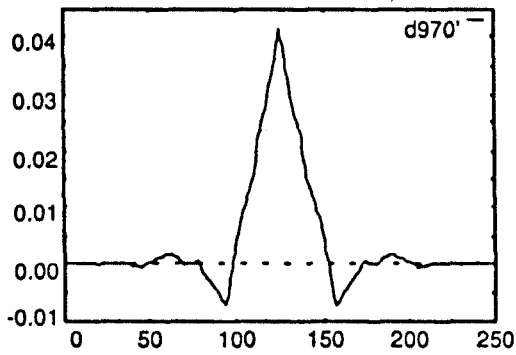
그림 12. 이산 저역 통과 필터에 대응되는 스케일함수
 Fig. 12. Scaling function corresponding to discrete lowpass filter
 (a) SSKF44
 (b) D4
 (c) D53



(d)



(e)



(f)

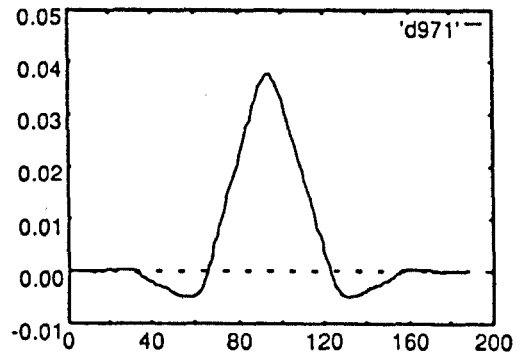


그림 12. 이산 저역 통과 필터에 대응되는 스케일함수
 Fig. 12. Scaling function corresponding to discrete lowpass filter
 (d) CQF8
 (e) D8
 (f) D97

분해 신호에 적절한 부호화 방식을 제안하였다. 제안한 부호화 방식에서 지역 분할 신호는 같은 해상도의 이웃하는 각 방향성 대역의 국부적인 활성도를 측정하여 예측계수를 유도하고, 적응 DPCM을 이용하여 부호화하였다. 그리고 고역 분할 신호의 부호화는 중요 계수의 위치 부호화와 중요 계수 값의 부호화로 나누어 부호화하였다. 중요계수를 갖는 4×4 블록의 중요블록의 위치 부호화는 다른 해상도의 같은 방향성 대역이 갖는 상관 관계를 이용하고, 중요 블록내의 중요 계수의 위치는 각 방향성 대역의 국부적인 성질을 이용하여 각각 Q-부호기에 의한 산술 부호화를 이용하여 부호화하였다. 그리고 중요 계수 값은 균일 양자화를 통하여 양자화하고, 허프만 부호화를 수행하여 부호화하였다.

모의 실험을 통해 제안한 부호화 방식은 기존의 유사한 부호화 방식에 비해 거의 같은 비트율에서 약 2.5dB이상의 우수한 객관적 화질을 볼 수 있었다. 그리고 JPEG baseline 시스템보다 주관적 화질과 객관적 화질에서 우수한 성능을 보였고, 전체적으로 부드러운 영상 신호일수록 제안한 방식은 문턱치 사용에 의해 어두운 영역에서 다소의 뭉그러짐현상이 나타날 뿐, 상대적으로 우수한 성능을 발휘함을 알 수 있었다. 또한, 제안한 부호화 방식으로 여러 종류의 필터를 비교하였을 때, regularity조건을 만족하는 준직교필터가 그렇지 않은 필터에 비해 상대적으로 우수한 성능을 발휘한다는 것을 알 수 있었다.

끝으로, 제안한 부호화 방식은 낮은 비트율로 고품질의 정지 영상 신호 압축이 요구되는 저장 매체나, 전송에 효과적으로 적용될 수 있을 것이다. 앞으로 본 논문에서 제안한 부호화 방식을 웨이블릿패킷에 의한 영상 신호 분해 또는 영상간 차 신호에 대한 효과적인 적용에 관한 연구 등이 필요하다.

참고문헌

1. S. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition : the wavelet representation," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intell., Vol. 11, No. 7, pp. 674-693, 1989.
2. I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets," Comm. in Pure Appl. Math., Vol. 41, No. 7, pp. 909-996, 1988.
3. M. Vetterli and C. Herley, "Wavelets and filter banks : theory and design," IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, No. 9, pp. 2207-2232, Sep. 1992.
4. O. Rioul and M. Vetterli, "Wavelets and signal processing," IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 8, No. 4, pp. 14-37, 1991.
5. A. Cohen, I. Daubechies, and J. C. Feauveau, "Biorthogonal bases of compactly supported wavelets," AT&T Bell Lab., Tech. Rep., TM 11217-900529-07, 1990.
6. E. H. Adelson, and E. Simoncelli, "Orthogonal pyramid transforms for image coding," in Visual Comm. and Image Proc. '87, Vol. 845, pp. 50-58, 1987.
7. J. W. Woods and S. D. O'Neil, "Subband coding of images," IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 34, pp. 1278-1288, Oct. 1986.
8. J. D. Johnston, "A filter family designed for use in quadrature mirror filter banks," in Proc. IEEE Int. Conf. on ASSP, pp. 291-294, Apr. 1980.
9. M. J. T. Smith and T. P. Barnwell, "Exact reconstruction techniques for tree structured subband coders," IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Vol. 34, pp. 434-441, June 1986.
10. D. Le Gall and A. Tabatabai, "Subband coding of digital images using symmetric short kernel filters and arithmetic coding techniques," in Proc. IEEE Int. Conf. on ASSP, pp. 761-764, Apr. 1988.
11. M. Antonini, M. Barlaud, P. Mathieu, and I. Daubechies, "Image coding using wavelet transform," IEEE Trans. on Image Processing, Vol. 1, pp. 205-220, No. 2, Apr. 1992.
12. A. K. Jain, "Fundamentals of digital image

- processing," Chap.4, Prentice-Hall, 1989.
13. A. S. Lewis and G. Knowles, "Image compression using the 2-D wavelet transform," IEEE Trans. on Image Processing, Vol. 1, No. 2, pp. 244-250, Apr. 1992.
 14. M. R. Banham, and B. J. Sullivan, "A wavelet transform image coding technique with a quadtree structure," in Proc. IEEE Int. Conf. on ASSP, pp. 653-656, Mar. 1992.
 15. T. Berger, "Optimum quantizers and permutation codes," IEEE Trans. on Information Theory, vol.18, Nov. 1972.
 16. T. Ebrahimi, "Perceptually derived localized linear operators : application to image sequence compression," Ecole Polytechnique Federale De Lausanne , Ph. D Thesis, 1992
 17. I. H. witten , Radford M. Neal, and J. G. Cleary, "Arithmetic coding for data compression," Comm. ACM, Vol. 30, pp.30-44, June 1987.
 18. J. L. Mitchell and W.B. Pennebaker, "Software implementations of the Q-coder," IBM J. Res. Develop., Vol. 32, No. 6, pp. 753-774, No. 1998
 19. 정 남성, "이치산술부호의 영상압축성능," 한국과학기술원 석사학위논문, 1990
 20. G. K. Wallace, "The JPEG still picture compression standard," IEEE Trans. on Consumer Electronics, Vol. 38, No. 1, pp. 18-34, Feb. 1992.
 21. Jin-soo Kim, "A study on the band-adaptive coding using wavelet transform," Master Thesis, KAIST, 1993
 22. 김 진수의, "Regularity 성질을 만족하는 대역분할필터에 의한 정지 영상 신호 감축," 한국통신학회 하계종합학술발표회 논문집, pp. 306-309, 1993



金 鎮 守 (Jin soo Kim) 正會員

1991년 2월 : 경북대학교 전자공학과 졸업
 1993년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
 1993년 3월 ~ 현재 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사과정



金 在 均 (Jac kyoon Kim) 정회원
 1961년 12월 : 항공대학 졸업

1967년 2월 : 서울대학교 전자공학과 석사
 1971년 8월 : 남 캘리포니아대학 전자공학과 박사
 1973년 4월 ~ 현재 : 한국과학기술원 교수