

웨이블릿 스칼라 양자화를 이용한 지문 영상 압축 코덱 개발 및 성능 개선에 관한 연구

남 재 열[†] · 최 지 훈^{††} · 손 유 익[†]

요 약

영상은 그래픽, 교육, 의료 분야의 멀티미디어 정보에서 중요한 역할을 하고 있다. 특히 지문 영상은 정보화 시대에 매우 중요한 정보로서 보안이나 인증 시스템에 널리 쓰이고 있다. 그러나 기존의 시스템에서는 지문 영상의 데이터 양이 많아 지문의 특징 정보만 일부 추출하여 저장하는 방식을 취하고 있어 지문 인식이나 검색 등의 다양한 응용에 제약을 주고 있다. 정지 영상 압축 표준으로는 JPEG이 있지만, 20:1 이상의 고압축에서는 많은 부호화 결점들 때문에 그러한 시스템에서의 실제적인 사용은 매우 어렵다. 따라서 고압축을 수행하면서 선명한 화질을 제공하는 지문 영상 압축 코덱 개발이 매우 필요하게 되었다.

본 논문에서는 이러한 요구에 맞게, 최근 새로운 영상 압축 기법으로 등장한 WSQ를 근간으로 하는 FBI 지문 영상 압축 표준을 따르는 영상 압축 코덱을 개발하였으며, Windows95 환경하에서 동작하는 소프트웨어를 개발하여 실제로 지문 영상을 압축하는데 사용할 수 있도록 하였다. 또한 원래의 FBI 코덱과의 호환성을 유지하면서 코덱의 성능을 향상시키는 기법을 적용하여 원래의 FBI 코덱 보다 성능이 나아진 코덱을 개발하였다. 개발된 지문 영상 압축 코덱은 전자 주민 카드 및 각종 인증 시스템용 코덱으로 활용 가능하다.

Study on the Implementation of Fingerprint Image Compression Codec using Wavelet Scalar Quantization and the Performance Enhancement

Jae Yeal Nam[†] · Jee Hoon Choe^{††} · Yoo Ek Son[†]

ABSTRACT

Images are playing a very important role in multimedia information of various fields such as computer graphics, education, medical information. In this information age, especially, the fingerprint images are used as important information in the security and authentication systems. However, in the existing cases of the systems, the adopted method for storing the fingerprint information is to store just the peculiar partly information of each fingerprint, because of the vast amount of storage needed for fingerprint images, so the various applications for the efficient fingerprint identification or retrieval have been constrained. Although the JPEG is now available as a still picture compression standard, it is actually very difficult to use JPEG standard in the case that high compression ratio above 20:1 is needed in those systems, because many coding artifacts are caused. Therefore, it has been greatly desired to develop an codec accomplishing such a high compression and providing high image quality at the low bit rate.

※ 본 연구는 1995년도 계명대학교 비사연구기금으로 이루어졌음.

† 정 회 원 : 계명대학교 컴퓨터·전자공학부 교수

†† 준 회 원 : 계명대학교 컴퓨터·전자공학부

논문접수 : 1998년 3월 20일, 심사완료 : 1998년 6월 12일

In this paper, as an answer to those requirements, we developed an image compression codec according to the FBI fingerprint image compression standard which was based on the WSQ, the newly emerging image compression technique. The developed software codec can be operated in Windows95® environment for the practical compression and decompression of fingerprint images. Retaining the compatibility with FBI codec, the developed codec came to have better performance than FBI's by applying the performance enhancement technique. The developed codec is also applicable in electronic ID card and various authentication system industries.

1. 서 론

오늘날의 멀티미디어 응용 분야에서 영상 정보는 매우 중요한 정보 전달 매체로 부각되고 있다. 그래픽분야, 교육분야, 의료분야에 이어, 최근에는 정부 또한 초고속 통신망 시범 사업 계획의 일환으로 전자주민카드에 증명사진 영상과 지문 정보 그리고 인감도장영상 정보를 IC칩에 포함시키려는 사업들이 진행중에 있다. 특히 지문 영상은 정보화 시대에 매우 중요한 정보로서 보안이나 인증 시스템에 널리 쓰이고 있다. 그러나 기존의 시스템에서는 지문 영상의 저장량이 많아 지문의 특징 정보만 일부 추출하여 저장하는 방식을 취하고 있어 지문 인식이나 검색 등의 다양한 응용에 제약을 주고 있다. 정지 영상 압축 표준으로는 JPEG(Joint Photographic Expert Group)[1]이 있지만, 20:1 이상의 고압축에서는 많은 부호화 결점들 때문에 그러한 시스템에서의 실제적인 사용은 매우 어렵다. 따라서 고압축을 수행하면서 선명한 화질을 제공하는 지문 압축 코덱 개발이 매우 필요하게 되었다.

미국 FBI에서는 보안이나 인증시스템에서 매우 중요한 정보로 활용될 수 있는 지문 영상 정보를 보다 효과적으로 압축하고 정보 교환의 효율성을 증가시키기 위해 WSQ(Wavelet Scalar Quantization)를 근간으로 하는 지문영상 압축 표준[2]을 완성하였다. 개발된 표준 방식은 웨이블릿 변환 기법을 근간으로 이용하여 지문 영상을 20:1 ~ 30:1 정도의 고압축률에서도 선명한 화질을 제공할 수 있도록 되어 있다.

본 논문에서는 이러한 요구에 맞게, 최근 새로운 영상 압축 기법으로 등장한 WSQ를 근간으로 하는 FBI 지문 영상 압축 표준을 따르면서 Windows95 환경하에서 동작하는 지문 영상 압축 코덱을 개발하였다. 본 논문과 관련된 실험을 수행하고 전자주민카드 단말기에서 실제로 지문 영상을 압축하고 푸는데 사용할 수 있도록 하기 위해 Microsoft® Visual C++ 4.2를 사용하여 소프트웨어 패키지를 개발하였다. 또한 이 패키지

를 사용하여 지문 영상을 압축하고 복구시킨 결과를 JPEG을 사용하여 압축한 영상과 비교하였으며, 성능 향상 기법을 적용시킨 결과를 비교, 분석하였다. 개발된 지문 영상 압축 코덱은 전자 주민 카드 및 각종 인증 시스템용으로 활용 가능하다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 웨이블릿 스칼라 양자화 기법을 간단히 설명하고, 3장에서는 WSQ를 이용한 FBI 지문 압축 표준 및 코덱 설계에 관해서 설명하고, 4장에서는 성능 향상 기법에 대해 논하고, 5장에서는 실험 결과를 비교, 분석하였으며, 끝으로 6장에서 결론을 맺는다.

2. 웨이블릿 스칼라 양자화 기법 개요

웨이블릿 스칼라 양자화 기법에 대하여 간단히 설명하면 아래와 같다. 웨이블릿은 데이터를 별개의 주파수 성분으로 나누고 나서 각각의 성분을 그것의 스케일에 따라 해상도를 조절한다[3][4]. 웨이블릿 분석 기법의 기본적인 개념은 스케일에 따라 신호의 성분을 분해하는 것이다. 웨이블릿은 몇 가지 수학적인 요구 조건을 만족시키면서 데이터나 다른 함수를 표현하는데 사용되는 기저 함수들이다. 웨이블릿 분석 절차로 우선 웨이블릿 원형함수를 채택한다. 시간축 신호 분석을 위해서는 응축된 고주파수 버전의 원형 웨이블릿으로 분석을 수행하면 되고, 주파수축 신호 분석을 위해서는 팽창된 저주파수 버전의 원형 웨이블릿으로 분석을 수행하면 된다. 원래의 신호나 함수는 웨이블릿 전개항 즉 웨이블릿 함수의 선형 조합에 있는 계수를 통해서 표현될 수 있기 때문에 데이터 조작은 단지 상응하는 웨이블릿 계수를 골라서 사용하는 것으로 수행된다. 그리고 만일 데이터에 채택될 가장 적합한 웨이블릿을 고른다면 어떤 임계치 아래로 계수를 절단한다면 대부분의 데이터 성분이 성기게(sparsely) 구현되게 되는데, 이를 이용한 스파스 코딩(sparse coding)은 웨이블릿이 데

이더 압축 분야에서 유용한 도구 역할을 하게 해준다. 우선 부모 함수나 분석 웨이블릿인 $\phi(x)$ 을 팽창시키고 이동시키는 웨이블릿 기저 함수인 직교 기저함수를 다음과 같이 정의 한다.

$$\phi_{(s,l)}(x) = 2^{-s/2} \phi(2^{-s}x - l) \quad (1)$$

변수 s 와 l 은 웨이블릿을 생성하기 위한 부모 함수 ϕ 를 확대하고 이동시키는데 사용되는 정수 패러미터들이다. 서로 다른 해상도로 데이터 영역을 커버하기 위해서, 분석 웨이블릿을 아래와 같은 스케일 방정식에 사용하면 된다.

$$W(x) = \sum_{k=1}^{N-2} (-1)^k c_{k+1} \phi(2x+k) \quad (2)$$

$W(x)$ 를 부모 함수 ϕ 에 대한 스케일 함수라 하고 c_k 를 웨이블릿 계수라고 한다.

계수 행렬은 계층적 알고리즘 즉 때때로 피라미드 알고리즘(pyramidal algorithm)이라고 부르는 방법으로 처리된다. 각각의 행렬에 웨이블릿 필터가 적용될 때마다 고해상도의 데이터가 추출되고, 동시에 남아 있는 데이터는 시간 영역에서 스무딩된다. 최종적으로 남게되는 DWT(Discrete Wavelet Transform) 계수는 스무딩 성분들과 세부 성분들이 모두 농축된 성분들로 구성되어 있다. 순방향 및 역방향 웨이블릿 변환을 필터의 동작으로 만드는 방법이 있는데 그것은 구적 반사 필터(Quadrature Mirror Filters, QMF)로 설계하는 것이다.

영상 신호는 2차원 신호의 한 형태이므로 웨이블릿 필터를 적용할 때 두 가지 단계를 거친다. 우선 영상의 행방향으로 웨이블릿 필터를 적용한다. 그 다음 단계는 열방향으로 웨이블릿 필터를 적용하는 것이다. 각각의 단계에서 고대역 필터와 저대역 필터를 적용하게 되는데, 2차원 영상 전체에 위의 두 단계를 거치면 4가지 가능한 서브밴드가 나오게 된다. 이 과정이 반복됨에 따라 신호의 성분은 점차 크기가 작은 서브밴드 안으로 에너지가 모이게 되는데 이 현상을 정보집중효과(information packing effect)라고 한다. 이렇게 만들어진 변환계수들은 양자화 과정을 거치고 가변장 부호화(Variable Length Coding, VLC)를 거쳐 압축된 데이터를 얻게 된다. 압축된 데이터를 다시 원래의 영상으로 만들어 내기 위해서는 가변장 복호화와 역양자화 과정 그리고 이산 웨이블릿 역변환을 거쳐야 한다.

3. WSQ를 이용한 FBI 지문 압축 표준 및 코덱 설계

본 장에서는 앞 장에서 살펴본 웨이블릿 기법을 이용한 FBI의 지문 압축 코덱용 표준 및 그에 따른 코덱 설계에 관하여 설명하였다. WSQ가 적용된 서브밴드 분해 방법, 양자화 방법, 가변장 부호화 그리고 엔트로피 코딩에 대하여 다루었다. 그리고 마지막으로 압축된 영상의 구문(syntax)에 대해서 설명하였다.

3.1 FBI 지문 영상 압축 관련 표준

본 연구에서 구현한 코덱은 FBI의 "IAFIS-IC-0110v2, WSQ Gray-scale Fingerprint Image Compression specification"(2)에 근간을 두고 있으며, 원래의 지문 정보 표준인 "ANSI/NBS-CLS 1-1993 American National Standard Data Format for the Interchange of Fingerprint Information"(5)과 연계해서 사용할 수 있다. 위 IAFIS-IC-0110v2 사양에는 원래의 영상을 압축된 데이터로 변환시켜주는 코더를 분류해 놓았으며, 압축된 영상을 원래의 영상으로 다시 바꾸어주는 디코더의 과정이 명시되어 있다. 또한 압축된 데이터를 구문 코드로 표현하는 방법을 설명하고 있다.

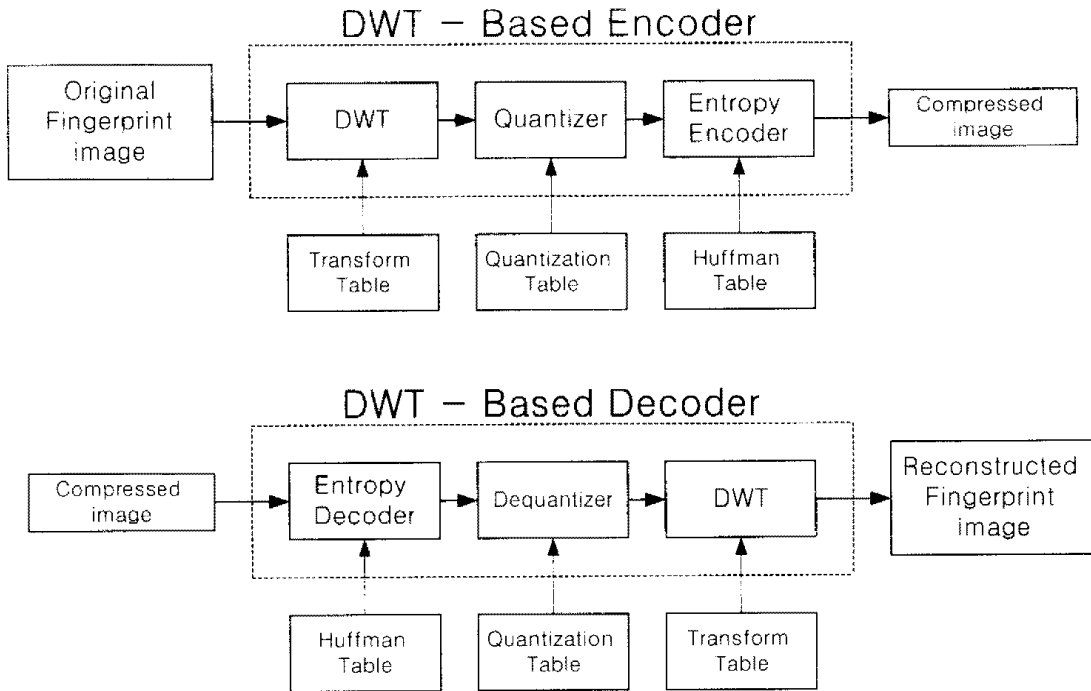
3.2 FBI WSQ 압축 개요

WSQ 계열의 인코더들은 지문 영상을 서브밴드로 분해하게 되는데 각각의 서브밴드들은 영상이 가지고 있는 특별한 주파수 밴드의 정보들을 표현하게 된다. 서브밴드 분해는 지문 영상에 이산 웨이블릿 변환을 수행하므로써 이루어진다. 그뒤 각각의 서브밴드들은 양자화되고 양자화된 계수들은 허프만 인코딩 절차로 넘어가게 되어 궁극적인 압축이 이루어진다(6)(7).

그림1에 DWT를 근간으로 하는 부호화기와 복호화기의 블럭도가 나와 있다. 다음 절부터 이 지문 압축 표준에 따라 구현한 내용들을 설명한다.

3.3 이중 채널 서브밴드 코더

이중 채널 서브밴드 코더는 디지털 필터뱅크로 만들어진다. 이 필터뱅크는 두 개의 일차원 필터뱅크 시스템으로 이루어 지는데, 하나는 분석 필터뱅크이고 하나는 합성 필터뱅크이다. 여기서 두 필터뱅크는 영



(그림1) WSQ 코덱 블록도
(Fig. 1) Block diagram of WSQ codec

-왜곡(Zero-distortion)이 되도록, 즉, 분석하고 합성하였을 때 나오는 결과가 원래의 값과 똑 같은 값을 가져야 한다. 다시 말하면, $\hat{x}(n) = x(n)$ 이 성립해야 한다. 이렇게 되는 필터뱅크를 완벽 재구성 다중율 필터뱅크(Perfect Reconstruction Multirate Filter Bank, PRMFB)[8]라고 한다. 이들 필터를 적용하는 방법과 업샘플링 및 다운샘플링 연산을 수행하는 방법이 아래 식에 나온다.

$$\begin{aligned} (x * h)(k) &= \sum_n x(n) h(k-n), \\ (\downarrow y)(k) &= y(2k), \\ (\uparrow a)(k) &= \begin{cases} a(k/2), & k \text{ is even} \\ 0, & k \text{ is odd} \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 *는 컨볼루션, \downarrow 는 다운샘플링 및 \uparrow 는 업샘플링을 각각 나타낸다. 분석 필터뱅크가 정의하는 변환인 $x \rightarrow \{a_0, a_1\}$ 을 일차원 DWT라고 언급한다. 그리고 합성 필터뱅크에 의해 주어지는 변환인 $\{a_0, a_1\} \rightarrow \hat{x}$ 을 이산 웨이블릿 역변환(Inverse Discrete Wavelet Transform, IDWT)이라고 언급한다[2][6][7].

3.4 선형 위상 웨이블릿 필터

코더와 디코더에는 두 종류의 선형 위상 유한 임펄스 응답 필터(Linear phase finite impulse response [FIR] filter)가 사용된다. 저대역통과 필터를 h_0 로 표시하고 고대역통과 필터를 h_1 으로 표시한다. 압축된 데이터 포맷은 임펄스 응답 계수를 포함하여 전송하게 되는데 단지 분석 필터의 오른쪽 반만 전송하게 된다. 합성 필터는 아래와 같은 관계식으로 완벽하게 설정할 수 있다.

$$\begin{aligned} f_0(n) &= (-1)^n h_1(n-1) \\ f_1(n) &= (-1)^{n-1} h_0(n-1) \end{aligned} \quad (4)$$

디코더에서는 분석된 서브밴드의 양자화된 계수들을 전송받아 대칭 확장 변환(Symmetric Extension Transform [SET])과 업-샘플링을 수행하고 합성 필터 f 를 적용하여 원래의 영상을 만들어 낸다. 그 연산을 아래와 같이 표현할 수 있다. 단, E 는 대칭 확장 변환이다.

$$\hat{b}_i = E_i \hat{a}_i; \quad \hat{y}_i = f_i * (\uparrow \hat{b}_i) \quad (5)$$

이런 식으로 DWT 필터뱅크를 유한 신호인 x 에 적용하여 서브밴드로 나누고 다시 합성하는 방법을 대

<i>Tap</i>	<i>Exact Value</i>	<i>Approx. Value</i>
$h_0(0)$	$-5\sqrt{2}x_1(48 x_2 ^2 - 16\mathcal{R}x_2 + 3)/32$	0.85269867900940
$h_0(\pm 1)$	$-5\sqrt{2}x_1(8 x_2 ^2 - \mathcal{R}x_2)/8$	0.37740285561265
$h_0(\pm 2)$	$-5\sqrt{2}x_1(4 x_2 ^2 + 4\mathcal{R}x_2 - 1)/16$	-0.11062440441842
$h_0(\pm 3)$	$-5\sqrt{2}x_1(\mathcal{R}x_2)/8$	-0.023849465019380
$h_0(\pm 4)$	$-5\sqrt{2}x_1/64$	0.037828455506995

(a) Lowpass filter bank

<i>Tap</i>	<i>Exact Value</i>	<i>Approx. Value</i>
$h_1(-1)$	$\sqrt{2}(6x_1 - 1)/16x_1$	0.78848561640566
$h_1(-2, 0)$	$-\sqrt{2}(16x_1 - 1)/64x_1$	-0.41809227322221
$h_1(-3, 1)$	$\sqrt{2}(2x_1 + 1)/32x_1$	-0.040689417609558
$h_1(-4, 2)$	$-\sqrt{2}/64x_1$	0.064538882628938

(b) Highpass filter bank

$$\text{단. } \begin{cases} x_1 = A + B - 1/6, & x_2 = -(A + B)/2 - 1/6 + i\sqrt{3}(A - B)/2 \\ A = \left(\frac{-14\sqrt{15} + 63}{1080\sqrt{15}} \right)^{1/3}, & B = \left(\frac{-14\sqrt{15} - 63}{1080\sqrt{15}} \right)^{1/3} \\ \mathcal{R} \triangleq \text{the real part of the following number} \end{cases}$$

(그림 2) FBI 지문 압축 표준에서 사용한 웨이블릿 필터 뱅크
(Fig. 2) Wavelet filter bank used in FBI fingerprint image compression standard

칭 웨이블릿 변환(Symmetric Wavelet Transform) 알고리즘이라고 한다. 2차원 신호인 영상을 웨이블릿 분해(wavelet decomposition)하기 위해서는 영상에서 행벡터(row vector)와 열벡터(column vector)를 취하여, 앞 절에서 언급한 대칭 웨이블릿 변환 알고리즘을 적용해야 한다. 그림2는 FBI 지문압축 표준에서 사용한 웨이블릿 필터 뱅크이다. 본 연구에서는 근사치를 사용하였다.

3.5 서브밴드 구조

첫번째 단계의 서브밴드 분해를 실행하고 나면 계속적으로 4개의 서브밴드로 나누어 갈 수 있는데 이를 캐스캐이딩(cascading)이라 한다. 이 과정은 원하는 서브밴드 구조를 얻을 때까지 계속된다. FBI에서는 불규칙적으로 64개의 서브밴드로 나누어 가는데 아래의 그

림3과 같은 서브밴드 구조를 얻을 때까지 필터 뱅크를 적용해 나간다. 그림3은 서브밴드가 분해된 최종 형태를 나타내주고 있다. 이 방법은 상기 지문 압축 표준에서 정한 특유의 서브밴드 분해 방법이다. 따라서 재귀적으로 알고리즘을 적용하는 것은 불가능하다[2].

3.6 웨이블릿 스칼라 양자화기

원래의 영상을 서브밴드로 분해하게 되면 각각의 서브밴드에는 필터가 적용된 웨이블릿 변환 계수들만 남게된다. 이제 이러한 변환 계수들을 균일 양자화 시키는데, 변환 계수들을 가지고 있는 모든 서브밴드마다 양자화 구간 크기(quantization bin width)를 계산하여 이것을 각 서브밴드에 적용하여 양자화된 계수들을 만들어낸다. 양자화 계수를 만들어 낼 때, 인코더 측에서는 아래와 같은 수식을 사용한다[6-9].

0	1										
2	3	1	7	4	19	20	23	24			
5	6	9	10	21	22	25	26		32		33
11	12	15	16	27	28	31	32				
13	14	17	18	29	30	33	34				
35	36	39	40								
37	38	41	42	51				54		55	
43	44	47	48								
45	46	49	50								
56				57				60		61	
58				59				62		63	

(그림 3) 서브밴드 분해
(Fig. 3) Subband decomposition

$$p_k(m, n) = \begin{cases} \lfloor \frac{a_k(m, n) - Z_k/2}{Q_k} \rfloor + 1, & a_k(m, n) > Z_k/2 \\ 0, & -Z_k/2 \leq a_k(m, n) \leq Z_k/2 \\ \lfloor \frac{a_k(m, n) + Z_k/2}{Q_k} \rfloor - 1, & a_k(m, n) < -Z_k/2 \end{cases} \quad (6)$$

함수 $\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 크거나 같은 최소의 정수를 나타내고, 함수 $\lceil x \rceil$ 는 x 보다 작거나 같은 최대의 정수를 나타낸다. 그리고 디코더 측에서 양자화된 계수를 원래의 변환 계수로 바꿀 때는 아래와 같은 수식을 사용한다.

$$\hat{a}_k(m, n) = \begin{cases} (p_k(m, n) - C)Q_k + Z_k/2, \\ 0, \\ (p_k(m, n) + C)Q_k - Z_k/2. \end{cases} \quad (7)$$

단, $\begin{cases} a_k(m, n) \text{은 서브밴드 } k \text{의 웨이블릿 계수} \\ Q_k \text{는 서브밴드 } k \text{의 nonzero quantization bin width} \\ Z_k \text{는 서브밴드 } k \text{의 zero quantization bin width} \\ C \text{는 quantization bin center (0.44로 설정되어 있음)} \end{cases}$:

3.7 국부분산을 이용한 분산 추정
서브밴드마다 상대 양자화 구간 너비를 계산하여야

하는데, 목표가 되는 비트수와 서브밴드의 분산을 변수로 하여 적절한 양자화 구간의 너비를 조절하여야 한다. 서브밴드의 분산을 계산할 때 서브밴드 전체에 걸쳐 분산을 계산하는 것이 아니라 서브밴드의 가운데 일부 영역(subregion)만을 국부적으로 계산하여 분산을 추정하는 방법을 취한다. 분산을 추정하기 위하여 아래의 식을 이용한다.

$$\sigma_k^2 = \frac{1}{X'_k Y'_k - 1} \sum_{n=x_{k,1}}^{x_{k,2}} \sum_{m=y_{k,1}}^{y_{k,2}} (a_k(m, n) - \mu_k)^2 \quad (8)$$

위 식에서 X'_k 와 Y'_k 는 서브밴드의 가운데 영역의 크기를 나타내는 변수로서 아래와 같이 정의된다.

$$X'_k = \lfloor \frac{3X_k}{4} \rfloor, \quad Y'_k = \lfloor \frac{7Y_k}{16} \rfloor \quad (9)$$

여기서 X_k 와 Y_k 는 원래의 k th 서브밴드의 너비와 높이를 나타내는데, 서브밴드의 특정 계수값을 $a_k(m, n)$ 이라고 할때, m 과 n 은 각각 $0 \leq m \leq Y_k$, $0 \leq n \leq X_k$ 의 범위를 가진다. 그리고 분산 추정식에서 $x_{0,k}, x_{1,k}, y_{0,k}, y_{1,k}$ 은 각각 아래와 같다[2][5].

$$\begin{aligned} x_{0,k} &= \lfloor \frac{X_k}{8} \rfloor, & x_{1,k} &= x_{0,k} + X'_k - 1 \\ y_{0,k} &= \lfloor \frac{9Y_k}{32} \rfloor, & y_{1,k} &= y_{0,k} + Y'_k - 1 \end{aligned} \quad (10)$$

3.8 적응적 양자화 구간 너비의 계산

목표가 되는 비트수를 일단 설정하고 절대 양자화 구간 너비를 비율 상수(proportionality constant) q 에 따라 적절히 조절해 나가는데, 이 과정을 위해서는 아래와 같이 값들을 조절하였다. 우선, 목표 비트율은 각 서브밴드의 비트율의 총 합이므로 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$r = \sum_k \frac{r_k}{m_k} \quad (11)$$

그리고 상대 양자화 구간 너비는 아래와 같이 주어진 공식을 사용한다.

$$Q'_k = aQ_k = \begin{cases} 1 & k=0-3 \\ 10/(A_k \log_e(\sigma_k^2)) & k=4-59 \text{ and } \sigma_k^2 \geq 1.01 \\ 0 & k=60-63 \text{ or } \sigma_k^2 < 1.01 \end{cases} \quad (12)$$

m_k 는 다운로드팩터(downloading factor)이고, r_k 는 비트율이다. 여기서 A_k 값은 서브밴드별 조정치이고 아래와 같이 주어진 값들을 사용한다.

$$A_k = \begin{cases} 1.32 & k = 52,56 \\ 1.08 & k = 53,58 \\ 1.42 & k = 54,57 \\ 1.08 & k = 55,59 \\ 1.00 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

절대 양자화 구간의 너비를 조절하게된 비율상수 q 는 아래와 같은 식을 사용하여 모든 k 즉 서브밴드들에 적용하게 된다[2][4].

$$q = \gamma^{-1} 2^{r/S-1} \left[\prod_{k \in K} \left(\frac{\sigma_k}{Q'_k} \right)^{1/m_k} \right]^{-1/S} \quad (14)$$

여기서 γ 는 로딩팩터(loading factor)이고 2.5의 실험값을 가지며, S 는 DWT의 프랙션(fraction)으로 아래의 식으로 계산된다.

$$S = \sum_{k \in K} \frac{1}{m_k} \quad (15)$$

첫번째에 결정한 q 값을 가지고 일단 상대 양자화 구간 너비를 구한다. 그러나 서브밴드의 특성에 따라서 $\log_e(\sigma_k^2) \approx 0$ 인 서브밴드가 있는데 이럴 경우 상대

양자화 구간 너비 Q' 값이 오버플로우(overflow)가 발생하게 된다. 따라서 $\sigma_k^2 < 1.01$ 인 모든 서브밴드 k 를 인코더쪽에서 생략해 주어야한다. 또 한가지 경우로 $Q_k > 2\gamma\sigma_k$ 인 경우가 생길수 있는데 이렇게 되면, 목표비트율이 0보다 작은, 즉, $r_k < 0$ 인 이론적으로 불가능한 값이 나타나게 된다. 이러한 경우도 인코더쪽에서 생략해 주어야한다. 이렇게 생략하게 되는 서브밴드가 생기면 S 값이 바뀌게 되므로 다시 q 값을 정해 주어야 하는데 이렇게 하기 위하여 반복법(iterative method)을 사용하여야 한다.

최종적으로 비율 상수 q 가 결정되게 되면 이것으로 상대 양자화 구간 너비를 계산한 후 Q 를 구하고, 양자화 영구간의 너비 $Z_k = 1.2Q_k$ 를 이용하여 계산하게 된다. 이 값들을 적응적 균일 양자화 공식에 대입하여 변환 계수들을 양자화 계수들로 만들어 내게 된다. 이제 이 양자화 계수들은 다음 절의 허프만 인코더를 이용한 엔트로피 부호화 단계로 넘어가 압축이 이루어지게 된다.

3.9 허프만 인코더

허프만 인코더(Huffman encoder)는 가변장부호를 블럭 내부의 양자화된 계수들에게 부여하기 위하여 사용된다. 특히 연속되는 0계수 값들을 효율적으로 처리하기 위하여 제로런(zero run)을 위한 특별한 코드가 할당되어 있다. 코드에 할당된 범위를 넘어가는 계수들에 대해서는 이스케이프 시퀀스(escape sequence)를 사용하여 처리할 수 있도록 했다. 이 가변장 부호화를 쓰는 이유는 허프만 코딩을 하기 전에 입력되는 값들을 2바이트 크기의 정수에서 1바이트 크기의 부호없는 정수 심볼 형태로 바꾸어 주기 위해서이다. 이렇게 1바이트 크기의 부호없는 정수로 바꾸어 주므로 허프만 인코더를 위한 전처리를 해주는 것이다. 이 가변장 부호화를 위해서 만들어진 입력가능한 심볼들의 집합 구성을 표1에서 나타내 주고 있다. position항목에서는 심볼의 위치값을 나타내주고, value항목은 표현가능한 p_k index값을 나타내주고 있다.

영상 서브밴드들의 실수형 계수인 $a_k(m, n)$ 을 스칼라 양자화기에 넣으면 2바이트 정수형 양자화 계수 $p_k(m, n)$ 가 나오게 되는데, 이 양자화 계수의 값에

〈표 1〉 허프만 테이블 입력 심볼들
 〈Table 1〉 Huffman table input symbols

position	value (= index d_k)
1	zero run length 1
2	zero run length 2
3	zero run length 3
.	.
.	.
100	zero run length 100
101	esc for positive 8 bit coefficient
102	esc for negative 8 bit coefficient
103	esc for positive 16 bit coefficient
104	esc for negative 16 bit coefficient
105	esc for zero run 8 bits
106	esc for zero run 16 bits
107	coefficient value -73
108	coefficient value -72
109	coefficient value -71
.	.
.	.
180	- use position 1 only -
.	.
.	.
253	coefficient value 73
254	coefficient value 74

따라 표1를 적용하여 심볼들로 만들어 낸다. 이 과정을 거치면 1바이트로 표현가능한 1에서 244사이의 부호없는 정수로 표현이 가능하게 된다[8][9].

표1에서 볼 수 있는 것처럼 심볼 107~254는 d_k 값이 -73에서 74인 경우를 위해서 할당되어 있고, 이 범위를 벗어나는 계수들에 대해서는 8비트 혹은 16비트 이스케이프 시퀀스를 사용하도록 되어 있다. 결국 표현할 수 있는 전체 d_k 값의 범위는 ± 65536 이 된다. 이 범위를 넘어서는 양자화 계수값이 발생한다면 표현이 불가능하게 된다. 그러나 지문영상을 가지고 허프만 테이블 입력 실험을 해본 결과 이 범위를 넘어서는 양자화 계수값은 볼 수 없었다.

또한 연속되는 0의 갯수가 +65536을 넘는 것도 찾을 수가 없는데, 이는 가장 큰 서브밴드 일찌라도 입력되는 영상의 전체 크기의 1/16이므로 양자화 계수의 수

가 +65536보다 작기 때문이며 또한 한 서브밴드 내에서 그만큼 많은 0의 개수가 나타나면 σ_k^2 의 값이 0에 가까워서 서브밴드 자체가 $Q_k=0$ 으로 설정되어 양자화 과정에서 생략되기 때문이다.

허프만 코드 테이블은 한 블록마다 한개의 허프만 코드 테이블을 사용하여야 하며 최대한 8개의 허프만 코드 테이블이 설치될 수 있다. 본 연구에서는 프로그래시브를 지원하기 위하여 최소한 3개의 블록을 나누어야 한다는 조건에 따라 블록을 3개로 나누어 서브밴드들을 포함시켰으므로 세번 허프만 인코더를 사용하였다.

4. 성능 향상 기법에 관한 연구

본 장에서는 FBI 지문 압축 방식과 호환성은 그대로 유지하면서 위에서 개발된 WSQ 지문 압축 패키지의 성능을 향상시킨 기법에 대하여 설명하였다. 위의 FBI

방식에서는 한번 설정한 비율 상수에 따라 모든 서브밴드에 동일한 값으로 Q'_k 를 나누므로 서브밴드의 특성에 관계없이 Q_k 가 정해지게 된다. 이렇게 동일한 값으로 나누는 이유는, 앞서 언급하였듯이 모든 r_k 에 대한 정확한 최적 비트 할당을 계산하는 방법을 취하지 않고 전체 왜곡율의 평균값을 최소화 시킨다는 조건만 만족시키기 위해서이다. 이렇게 되면 전체 왜곡율 조건을 만족시키도록 하나의 비율 상수를 정하게 되고 이 값으로 모든 서브밴드를 나누게 되며, 제약조건 R 에 대한 평균 왜곡율을 최소화하게 된다. 그러나 명백한 것은 단지 같은 값으로 상대 양자화 구간을 나누게 되면 서브밴드 마다 일일이 r_k 값을 정하는 최적 비트 설정의 첫번째 방법보다 양자화 품질은 떨어지게 된다. 그러므로 모든 서브밴드 마다 일일이 r_k 값을 계산하지 않으면서도 품질을 좀더 개선 시킬 수 있는 방법은, 서브밴드를 몇 개의 그룹으로 나누어 각 그룹마다 서로 다른 복수개의 비율 상수를 두어 즉 다중 비율 상수를 넣어 적응적으로 Q_k 를 계산하는 방법이다.

먼저, 서브밴드를 그룹으로 나누는 방법은 서브밴드의 공간적 크기에 따라 아래와 같이 네 개의 그룹으로 나누었다.

$$\begin{aligned} G_0 &= \{Subband_k \mid 0 \leq k \leq 3\} \\ G_1 &= \{Subband_k \mid 4 \leq k \leq 18\} \\ G_2 &= \{Subband_k \mid 19 \leq k \leq 50\} \\ G_3 &= \{Subband_k \mid 51 \leq k \leq 59\} \end{aligned} \quad (16)$$

그리고 제약조건인 쿼타(quota) R 도 네개로 나누었는데, 각 그룹에 대한 쿼타는 아래의 분산의 산술적 기여도에 따라 나누었다. 그리고 S 역시 각각의 그룹마다 따로 계산하였다.

$$R_{G_0} = R \times \frac{\sum_{k \in G_0} \sigma_k^2 / m_k}{\sum_{i=0}^{59} \sigma_i^2 / m_i}, \quad S_{G_0} = \sum_{k \in G_0} \frac{1}{m_k} \quad (17(a))$$

$$R_{G_1} = R \times \frac{\sum_{k \in G_1} \sigma_k^2 / m_k}{\sum_{i=0}^{59} \sigma_i^2 / m_i}, \quad S_{G_1} = \sum_{k \in G_1} \frac{1}{m_k} \quad (17(b))$$

$$R_{G_2} = R \times \frac{\sum_{k \in G_2} \sigma_k^2 / m_k}{\sum_{i=0}^{59} \sigma_i^2 / m_i}, \quad S_{G_2} = \sum_{k \in G_2} \frac{1}{m_k} \quad (17(c))$$

$$R_{G_3} = R \times \frac{\sum_{k \in G_3} \sigma_k^2 / m_k}{\sum_{i=0}^{59} \sigma_i^2 / m_i}, \quad S_{G_3} = \sum_{k \in G_3} \frac{1}{m_k} \quad (17(d))$$

쿼타의 총 합은 원래 쿼타의 값과 같아진다.

$$R = R_{G_0} + R_{G_1} + R_{G_2} + R_{G_3} \quad (18)$$

위의 네개의 쿼타로 비율상수와 양자화 구간 너비를 구하는 식은 각각 아래와 같이 변형하였다.

$$q_{G_0} = \frac{1}{\gamma^{2^{1-R_{G_0}/S_0}} \left[\prod_{i \in G_0} \left(\frac{\sigma_i}{Q'_i} \right)^{1/m_i/S_0} \right]}, \quad Q_{k \in G_0} = \frac{1}{q_{G_0}} Q'_{k \in G_0} \quad (19(a))$$

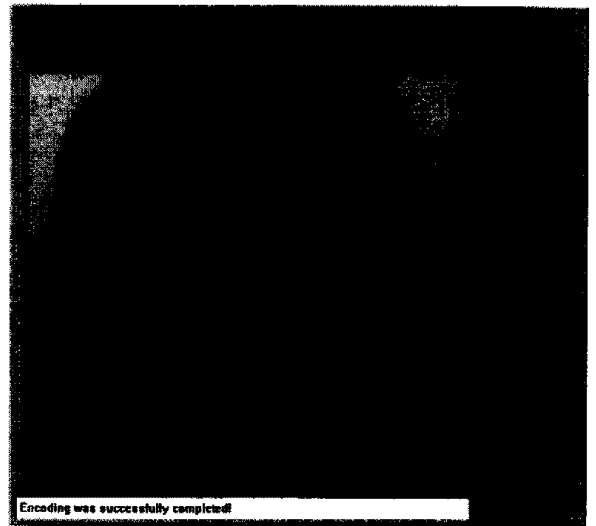
$$q_{G_1} = \frac{1}{\gamma^{2^{1-R_{G_1}/S_0}} \left[\prod_{i \in G_1} \left(\frac{\sigma_i}{Q'_i} \right)^{1/m_i/S_0} \right]}, \quad Q_{k \in G_1} = \frac{1}{q_{G_1}} Q'_{k \in G_1} \quad (19(b))$$

$$q_{G_2} = \frac{1}{\gamma^{2^{1-R_{G_2}/S_0}} \left[\prod_{i \in G_2} \left(\frac{\sigma_i}{Q'_i} \right)^{1/m_i/S_0} \right]}, \quad Q_{k \in G_2} = \frac{1}{q_{G_2}} Q'_{k \in G_2} \quad (19(c))$$

$$q_{G_3} = \frac{1}{\gamma^{2^{1-R_{G_3}/S_0}} \left[\prod_{i \in G_3} \left(\frac{\sigma_i}{Q'_i} \right)^{1/m_i/S_0} \right]}, \quad Q_{k \in G_3} = \frac{1}{q_{G_3}} Q'_{k \in G_3} \quad (19(d))$$

5. 지문 영상 압축 실험 및 결과

본 논문에서는 개발된 지문 영상 압축 코덱이 Windows95® 환경 하에서 실행될 수 있도록 Microsoft® Visual C++ 4.2로 개발하였다. 코덱이 실행되는 모습을 그림4에서 보여주고 있다.



(그림 4) 개발된 코덱의 실행 모습
(Fig. 4) Appearance of running of the developed codec

위의 개발된 코덱을 가지고 FBI에서 배포하는 여러가지의 실험용 지문을 실제로 구하여 실험해 보았다. 각

〈표 2〉 PSNR값을 이용한 실험 결과 비교 (단위 : dB)
 〈Table 2〉 Comparison between simulation results using PSNR value (unit : dB)

Fingerprint image	$PSNR_{FBI}$	$PSNR_{Improved}$	Increment (dB)
fp01.raw	25.473391	26.005740	+0.5323
fp02.raw	25.838719	26.187583	+0.3489
fp03.raw	27.377495	27.733227	+0.3557
fp04.raw	25.004789	25.367594	+0.3628
fp05.raw	25.779753	26.176661	+0.3969

(단, $PSNR_{FBI}$ 은 원래의 코덱의 값이며, $PSNR_{Improved}$ 는 개선된 코덱의 값이다.)

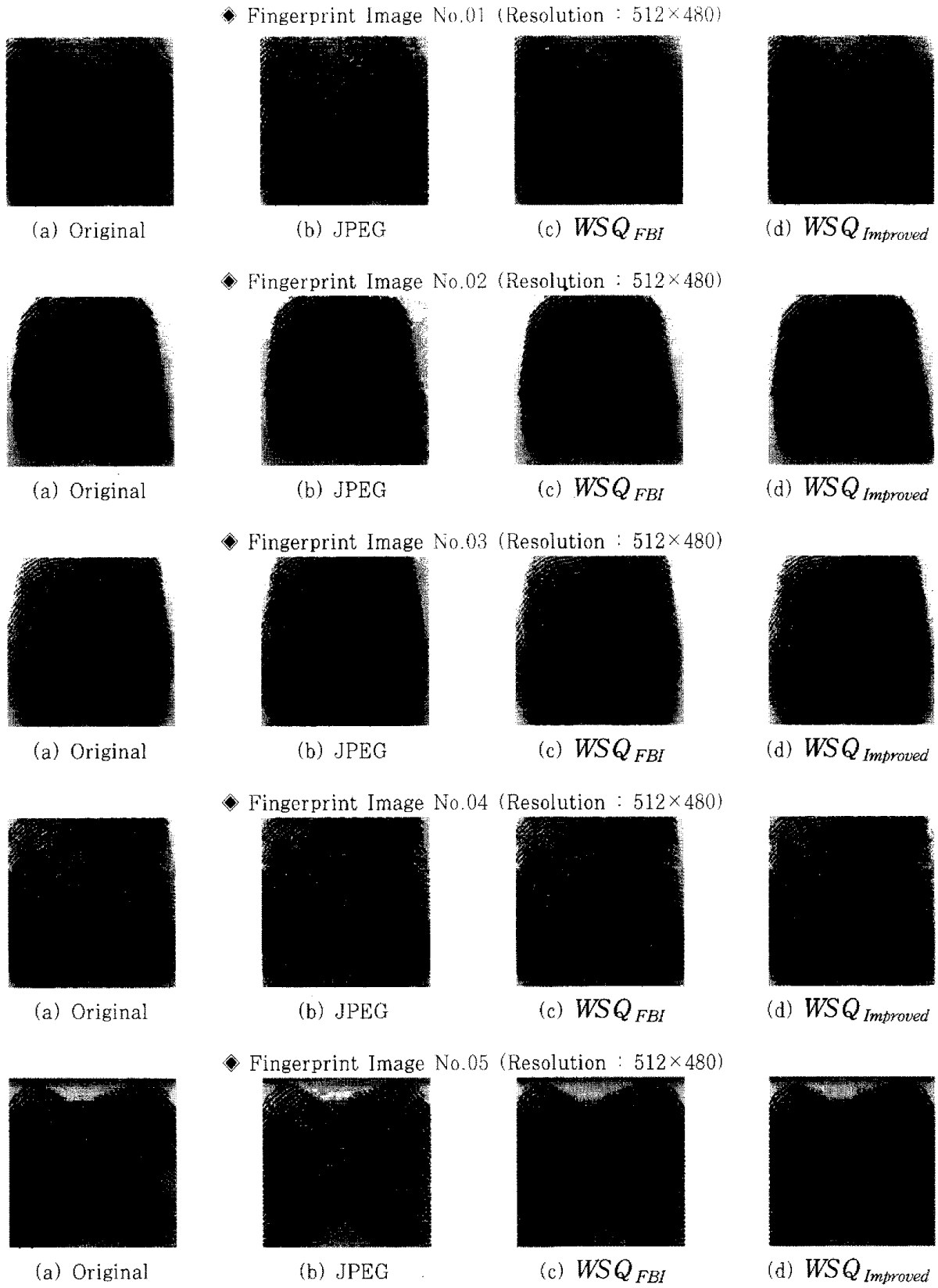
각의 실험 결과를 그림5에 나타내었다. 그림5의 한 실험 영상당 4개의 그림에서 (a)는 원래 영상, (b)는 JPEG으로 압축한 영상, (c)는 FBI의 WSQ 코덱으로 압축한 영상, (d)는 FBI 방식을 개선한 방식으로 압축한 영상을 나타내고 있다. 이 실험에서는 압축율을 약 30:1로 설정하였다.

영상을 JPEG으로 압축하였을 때는 지문 영상이 전체적으로 블러킹 현상을 보이고 있으며, 일부분에서는 심각한 열화현상이 일어나서 원래의 영상과 상당한 차이를 보이고 있으며, 심지어 지문의 곡선을 알아보기 힘든 것도 있다. 이렇게 되면 차후에 지문 인식을 통한 지문 감식에 상당한 지장을 초래하게 된다. 그러나 WSQ의 경우는 그러한 블러킹 현상이 전혀 없으며, 지문이 가지고 있는 외형적 특성을 그대로 보존하고 있음을 볼 수 있다. 또한 본 논문에서 제안한 성능 향상 기법을 실제로 구현된 코덱에 적용하여 본 결과 원래의 FBI 코덱 보다 PSNR 값을 0.3~0.5 dB정도 높게 성능을 향상시킬 수 있었다. 이 결과는 FBI 방식에서 하나의 양자화 비율 상수를 전체 서브밴드들에 적용하는 것 보다 성질이 비슷한 서브밴드들을 몇개의 그룹으로 나누어 각 그룹별로 양자화 비율 상수를 구해 적용적으로 양자화함으로써 얻은 결과로 생각된다. 또한 제안한 방식은 기존의 FBI 방식과 호환성을 그대로 유지하면서 성능을 개선하였다. 아래 표2에 5개의 지문 영상에 대한 실험결과를 PSNR값으로 비교한 결과를 보여주고 있다.

6. 결 론

본 연구를 통하여 현재 FBI에서 채택하고 있는 지문 압축 표준인 WSQ를 이용하여, 지문을 압축하는 부호 화기와 압축한 데이터로 부터 지문 영상을 복구해내는 복호화기를 개발하였다. 이 WSQ 패키지로 영상 압축을 수행한 결과, 화질 손실을 최소화 하면서 고압축을 수행하며, JPEG 보다 압축률을 상당히 높게 할 수 있었다. 30:1 이상의 고압축률에서 어느 정도의 성능을 발휘하는지 알아내기 위하여 기존의 정지영상압축 국제 표준인 JPEG을 사용한 고압축을 실험을 통해 WSQ로 압축된 영상과 압축품질을 비교하였다. 30:1의 압축률로 실험을 한 결과 JPEG보다 WSQ를 사용한 패키지가 월등하다는 것을 보여주고 있다. 그리고, 본 패키지를 실제로 전자주민카드 단말기에서 사용이 가능하도록, Windows® 환경하에서 실행가능하게 개발하였으며, 차후 IC카드에 저장할 수 있도록 데이터를 생성해내고, 다시 IC카드에 저장된 데이터를 읽어 들여 원래의 데이터를 복구해 낼 수 있도록 호환성 있는 포맷을 사용하였다. 또한 FBI 표준 양자화 기법의 양자화 비율 상수를 적용적으로 적용함으로써 결과 영상의 품질을 0.3~0.5 dB 높일 수 있는 기법도 개발하였다. 본 패키지를 이용하여 전자주민카드 및 각종 IC 카드에 들어갈수 있는 영상 정보들을 압축하여 저장하는데 효과적으로 사용할 수 있다. 특히, IC카드와 관련된 시스템 개발과 관련 산업 활성화를 촉진할 수 있으며, 영상 압축 기술력 향상과 상용화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

향후 본 코덱에 관하여 더 연구할 과제로 여러 가지가 있음을 밝힌다. 첫째로, WSQ의 속도 향상을 위해서



(그림 5) 다중 비율 상수 적용 실험 결과
(Fig. 5) The result when the multiple proportional constants were applied

고속 계산을 위한 연구가 수행되어야 하고, 둘째로, 서브밴드를 나누어가는 방법에 대한 더 깊은 연구를 하여 불규칙적이 아닌 병렬처리가 순조롭고 재귀 알고리즘을 사용할 수 있도록 해주는 규칙적인 서브밴드 분석 절차를 연구할 수 있을 것이다. 셋째로, 비트할당을 자동화할 수 있는 기법을 연구할 수 있을 것이다. 넷째로, MPEG-4 등에서 동영상 압축기술에서 변환커널(transform kernel)로의 활용에 대해서도 연구할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] Gregory K. Wallace, "The JPEG Still Picture Compression Standard." IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 38, No. 1, pp.18-34, Feb. 1992.

[2] IAFIS-IC-0110v2, "WSQ Gray-scale Fingerprint Image Compression Specification." Criminal Justice Information Services, Federal Bureau of Investigation, Feb. 1993.

[3] Olivier Rioul and Martin Vetterli, "Wavelets and Signal Processing." IEEE Signal Processing Magazine, pp. 14-38, Oct. 1991.

[4] Amara Graps, "An Introduction to Wavelets." IEEE Computational Science and Engineering, Vol. 2, No. 2, Summer 1995.

[5] NIST-CSL 1-960916, "Proposed Addendum to ANSI/NIST-CSL 1-1993, "American National Standard for Information System - Data Format for the Interchange of Fingerprint Information," NIST, Sep. 16, 1996.

[6] Jonathan N. Bradley and Christopher M. Brislawn, "The Wavelet/Scalar Quantization Compression Standard for Digital Fingerprint Images." Los Alamos National Laboratory, LA-UR-94-0827, Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, London, England, May 31-June 2, 1994.

[7] Jonathan N. Bradley and Christopher M. Brislawn, Tom Hopper, "The FBI Wavelet/Scalar Quantization Fingerprint Image Co-

mpression Standard." Los Alamos National Laboratory and Federal Bureau of Investigation, Tech. Rep. LA-UR-94-1409, Proceedings National Media Lab Conference, Solid-State Memory, Pasadena, CA, 5/23-25/94.

[8] Christopher M. Brislawn, "Classification of Nonexpansive Symmetric Extension Transforms for Multirate Filter Banks," Group CIC-3, Computer Research and Applications, Los Alamos National Laboratory, Received May 16, 1994; revised March 11, 1996.

[9] Jonathan N. Bradley and Christopher M. Brislawn, Tom Hopper, "The FBI Wavelet/Scalar Quantization Standard for gray-scale fingerprint image compression," Los Alamos National Laboratory and Federal Bureau of Investigation, SPIE Vol. 1961 Visual Information Proceeding II, Orlando, Florida, 14-16 April 1993.



남 재 열

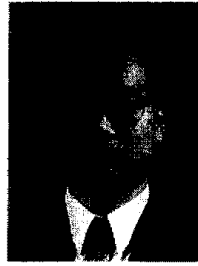
1960년 8월 12일생
 1983년 2월 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1985년 2월 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
 1991년 8월 University of Texas at Arlington(UT A) 전기공학과(공학박사)
 1985년 5월~1987년 7월 한국전자통신연구소 연구원
 1991년 9월~1995년 2월 한국전자통신연구소 선임연구원
 1995년 3월~현재 계명대학교 공과대학 컴퓨터·전자공학부 조교수
 주관심분야 : 영상신호처리, 영상통신, 멀티미디어 통신



최 지 훈

1974년 1월 1일생
1996년 2월 계명대학교 전자계산
학과(공학사)
1998년 2월 계명대학교 대학원 전
자계산학과(공학석사)
1998년 3월~현재 경북대학교 대
학원 컴퓨터공학과 박사
과정

관심분야 : 영상신호처리, 영상압축 S/W 및 H/W 코
덱, VLSI Design & Test



손 유 익

1952년 6월 12일생
1976년 경북대학교 전자공학과(학
사)
1979년 경북대학교 대학원 전자
공학과(공학석사)
1990년 경북대학교 대학원 전자
공학과(공학박사)

1990년~1991년 미국 오레곤주립대 연구교수
1979년~1984년 한국전자기술연구소 정보시스템연구
실 선임연구원
1984년~현재 계명대학교 컴퓨터·전자공학부 교수
관심분야 : 병렬컴퓨터구조 및 알고리즘, Interconnect
-ion Network