

論文2003-40SD-1-6

JPEG2000 CODEC을 위한 DWT 및 양자화기 VLSI 설계

(A VLSI Design of Discrete Wavelet Transform and Scalar Quantization for JPEG2000 CODEC)

李 炘 珉 * , 金 榮 民 *

(Kyoung-Min Lee and Young-Min Kim)

요 약

본 논문은 차세대 정지영상 압축 표준으로서 Wavelet 변환과 Bit-plane 단위의 산술부호화(Arithmetic coding)에 기반한 JPEG2000 코덱의 Wavelet 변환과 양자화기의 하드웨어적 구조를 제안하고 설계하였다. DWT(Discrete Wavelet Transform)는 Lossy coding과 Lossless coding에 각각 적용할 수 있는 Daubechies 9/7 필터와 Daubechies 5/3 필터를 선택 가능하도록 설계하였으며, 양자화기는 Scalar Quantization 방식을 사용하였다. 설계된 DWT와 양자화기는 Xilinx FPGA technology를 이용하여 Synopsys에서 합성한 후 동작을 검증하였으며, 설계된 블록을 30MHz로 동작 시켰을 때 640x480 크기의 컬러 이미지의 경우 초당 10프레임의 성능을 보인다.

Abstract

JPEG2000, a new international standard for still image compression based on wavelet and bit-plane coding techniques, is developed. In this paper, we design the DWT(Discrete Wavelet Transform) and quantizer for JPEG2000 CODEC. DWT handles both lossy and lossless compression using the same transform-based framework : The Daubechies 9/7 and 5/3 transforms, and quantizer is implemented as SQ(Scalar Quantization). The architecture of the proposed DWT and SQ are synthesized and verified using Xilinx FPGA technology. It operates up to 30MHz, and executes algorithms of wavelet transform and quantization for VGA 10 frame per second.

Keywords : JPEG2000, DWT, Wavelet, Scalar quantizer

I. 서 론

멀티미디어 기술의 사용이 증가함에 따라 이미지 또한 고품질의 압축을 요구하게 되었으며, 이에 차세대 정지영상 압축 부호화 방식으로서 JPEG2000의 표

준화^[1]가 완료되었다. JPEG2000은 기존의 압축 방식에 비해 압축율이 뛰어나면서도(0.25bpp이하) 고화질의 이미지를 제공한다. Lossy coding과 Lossless coding, 큰 이미지 압축, 화소의 정밀도와 해상도의 차이에 의한 Progressive Transmission, ROI(Region of Interest)등은 JPEG2000의 주요한 특징^[2]이며, 응용분야로는 의료 영상, 인터넷, 원격탐사, 보안용 카메라, 과학영상, 문서 영상, 그래픽 영상등 대용량의 정지화상 정보를 저장해야하는 언론 및 출판계, 사진업계 등에서 광범위하게 사용될 것으로 예상된다.

본 논문에서는 하나의 영상 이미지를 64x64 크기의 블록 단위로 Tile화하여 각각의 Tile component에 대해 2-D Wavelet 변환을 수행하고, Tile component들의 경

* 正會員, 全南大學校 電子工學科

(Dept. of Electronics Engineering, Chonnam National University)

※ 본 논문은 시스템집적반도체기반기술개발사업(시스템 IC 2010) 지원에 의해 수행되었음.

接受日:2002年5月1日, 수정완료일:2002年12月24日

계면에서 발생하는 블록화 현상(Blocking Artifact)를 줄이기 위해 경계부분에서 점-대칭 확장(Point Symmetry Extension) 방법을 사용하였다. JPEG2000에서의 양자화 방식은 초기에 TCQ(Trellis Coded Quantization)가 대두되었으나 복수의 화소 또는 그 예측 오차나 변환계수를 종합해서 하나의 부호로 사상해야 하는 이유로 구조가 복잡해지기 때문에 TCQ에 비해 비교적 구조 구현이 간단한 SQ(Scalar Quantization)방식을 사용하였으며, 각 부 대역(subband)별 stepsize를 사용자가 정의할 수 있도록 SRAM방식으로 설계하였다.

본 논문에서 제안한 하드웨어적 구조는 Synopsys를 이용하여 설계 및 검증하였다. 본 논문의 구성은 2장과 3장에서 각각 DWT와 SQ의 구조에 대해 설명하고, 4장에서 제안된 구조의 동작 검증과 성능을 평가한 후, 5장에서 결론을 맺는다.

II. DWT 구조

이산 시간에서 wavelet 변환은 임펄스 응답 $h[n]$ 을 갖는 half-band LPF와 임펄스 응답 $g[n]$ 을 갖는 half-band HPF에 입력 신호를 통과시킨 후, 필터링 된 샘플들을 Nyquist 규칙에 따라 2개의 샘플들 중에서 하나의 샘플을 제거하는 다운 샘플링을 한다. 이러한 과정은 한 레벨의 분해(Decomposition)을 의미하고, 식 (1)과 식 (2)로써 표현된다.^[3]

$$Y_{high}[k] = \sum_n X[n] \cdot g[2k - n] \quad (1)$$

$$Y_{low}[k] = \sum_n X[n] \cdot h[2k - n] \quad (2)$$

$Y_{high}[k]$ 는 highpass 필터링 후 다운 샘플링 한 출력이고, $Y_{low}[k]$ 는 lowpass 필터링 후 다운 샘플링 한 출력이다. 이러한 일련의 과정이 더 많은 레벨로의 분해를 위해서 계속 반복되며, 모든 레벨에서의 필터링과 다운 샘플링은 샘플의 수와 주파수 밴드를 절반으로 만든다.

2차원 DWT는 두개의 분리된 1차원 DWT에 의해서 가능해진다. 변환할 영상을 $f(x,y)$ 라고 가정하면, $f(x,y)$ 는 먼저 x축 방향으로 필터링과 다운 샘플링이 되어진다. 그러면 lowpass 필터를 통과한 $f_l(x,y)$ 과 highpass 필터를 통과한 $f_h(x,y)$ 로 나뉘어진다. 두개의 부 영상은

y축 방향으로 다시 한번 필터링과 다운 샘플링을 수행하며 그 결과, 하나의 평균 신호 f_{ll} 과 방향성을 갖는 f_{lh} , f_{hl} , f_{hh} 의 4개의 부 영상으로 나뉘어진다. f_{ll} 는 수평방향의 특징을 강조하고, f_{hl} 는 수직방향, f_{lh} 는 대각선 방향의 특징을 강조하는 부 영상이다.

<그림 1>은 DWT의 블록도로서 각 경계면에서 점대칭 확장하는 PSE 블록, 확장된 이미지 정보를 홀수와 짝수개의 시퀀스(Sequence)에 대해 각각 다른 필터링을 담당하는 DWT filter 블록과 DWT filter 블록을 enable 시키고 홀수와 짝수개의 시퀀스를 구별지어주는 신호인 'pixel_e_o'를 발생시키는 컨트롤러로 구성된다.

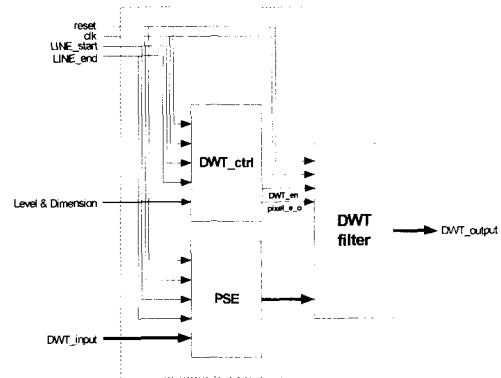


그림 1. DWT 블록도

Fig. 1. The Block diagram of DWT.

1. PSE 구조

DWT는 많은 계산량을 필요로 하는데, 만약 메모리의 제한이 없다면 일반적으로 전체 이미지에 대하여 수행된다. 그러나, 변환에 사용될 수 있는 메모리량에 제한이 있다면 입력 이미지를 블록으로 쪼갠 다음 각 블록에 대해서 독립적으로 변환을 수행하는 것이 더욱 효과적인 방법이다. 전체 이미지를 블록으로 쪼갤 때 오버래핑을 함으로써 블록의 경계부분에서의 왜곡 현상을 없앨 수 있는데, 이는 많은 하드웨어적인 낭비를 초래한다. 이러한 단점을 해결하기 위해서 점대칭 확장 방법을 사용하였다.

<그림 2>는 점대칭 확장의 예를 나타낸 것이다. 확장된 샘플 $X'[i]$ 는 대칭점을 통과하는 화살표에 의해 원래의 입력 영상 $X[i]$ 로부터 만들어진다. 확장된 샘플 $X'[i]$ 을 계산하기 위하여 입력신호 $X[i]$ 의 처음과 끝에서 식 (3)이 사용된다.

$$X'[i] = 2 \times P - X[i] \quad (3)$$

$i = [1, 2, \dots k]$ (신호의 시작에서)

$i = [m-1, m-2, \dots m-k]$ (신호의 끝점에서)

P : 시작과 끝의 대칭점의 값

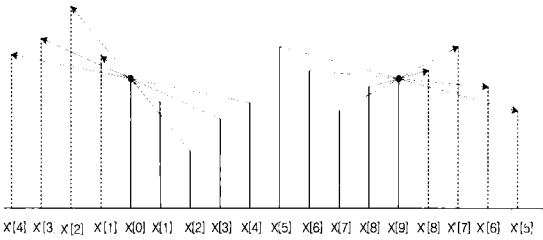


그림 2. 점대칭 확장의 예
Fig. 2. Point-Symmetry Extension of the sequence.

확장되는 샘플의 수는 wavelet 변환을 수행할 때 사용되는 필터계수에 의해 결정되어지며, 본 논문에서 사용되는 Daubechies 9/7 필터의 lowpass filter 계수가 9개이므로 시작점 X[0]을 포함하여 좌우 총 9개의 값이 필요하고 확장해야 할 샘플의 수는 4개가 된다.

<그림 3>은 시작과 끝의 대칭점의 값을 Pval Reg에 저장한 후, 1-bit left shift한 후 2의 보수로 변환하여 덧셈 연산을 수행하는 MAS (Multiply & Subband), LIFO(Last In First Out)로 구성되는 PSE 블록도이다.

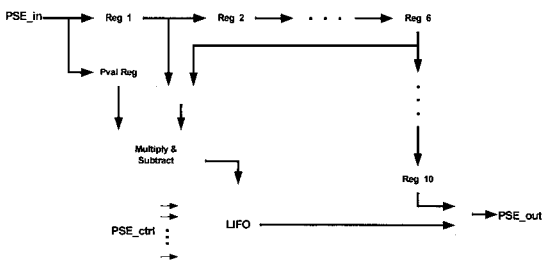


그림 3. PSE 블록 다이어그램
Fig. 3. The Block diagram of PSE.

2. DWT 필터 구조

DWT 필터 블록은 1차원 구조로서 영상의 수평방향이나 수직방향에 관계없이 필터링을 수행할 수 있게 설계하였으며, 또한 9/7 필터 계수와 5/3 필터 계수를 선택적으로 사용 가능하도록 설계하였다. 필터의 구조는 직접형(Direct form)을 변형한 전치형(Transposed

form)을 사용함으로써 고속 연산을 수행할 경우 덧셈기의 출력을 저장하기 위한 레지스터의 수를 줄여 수행 성능을 높였다.

<그림 4>는 C-Program을 사용하여 DWT 필터를 수행한 후의 영상 이미지와 역DWT(Inverse DWT)를 수행하여 나타난 영상 이미지를 16-bit I/O에 대해 필터 계수와 분해레벨에 따른 PSNR 값을 나타낸다. <그림 4>에서 보는 바와 같이 필터계수가 14-bit일 때 60~70dB 정도로 가장 높은 PSNR 값을 나타내며, 따라서 DWT의 I/O 데이터 비트 수는 부호 bit와 확장 bit를 추가하여 16-bit로 결정하였다.

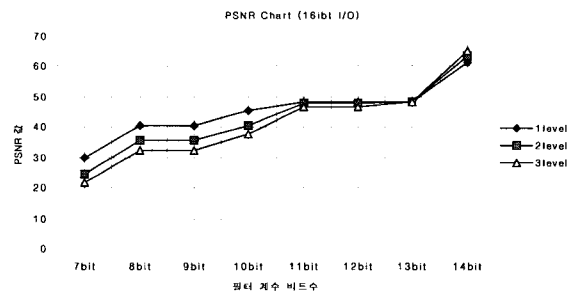


그림 4. I/O 비트와 PSNR
Fig. 4. PSNR chart.

<표 1>과 <표 2>는 DWT 필터링에 적용되는 Daubechies 9/7 및 5/3 필터 계수 값이다.^{[4], [6]}

표 1. Daubechies 9/7 filter 계수

Table 1. Coefficients of Daubechies 9/7 filter.

i		Lowpass Filter(h0)		Haghpass Filter(h1)
0	h0	0.60294901823635	g0	1.1150870524569
+1	h1	0.26686411844287	g1	-0.59127176311424
+2	h2	-0.078223266528987	g2	-0.05754352622849
+3	h3	-0.016864118442874	g3	0.091271763114249
+4	h4	-0.026748757410809		

표 2. Daubechies 5/3 filter 계수

Table 2. Coefficients of Daubechies 5/3 filter.

i		Lowpass Filter(h0)		Haghpass Filter(h1)
0	h0	6/8	g0	1
+1	h1	2/8	g1	-1/2
+2	h2	-1/8	g2	

입력 값과 필터계수의 값을 곱하는 연산 부분에서 Daubechies 9/7 필터를 사용하여 저역 필터링을 수행할 때, <표 1>에서 알 수 있듯이 필터 계수의 값이 대칭형이어서 5번의 곱셈만 하여도 필터링을 수행할 수 있다는 장점이 있다.



그림 5. DWT 필터 블록 다이어그램
Fig. 5. The Block diagram of DWT filter.

<그림 5>는 1차원 입력 데이터를 필터링하는 DWT의 구조이다. 점대칭 확장된 값이 입력으로 들어오고, 다중화기에 의해 선택된 필터계수와 곱셈 연산을 수행한 후 덧셈 연산을 수행한 결과를 출력한다. DWT 필터 블록의 데이터 형식(format)은 2의 보수 형식이며 곱셈 연산을 수행하는데 있어서 음수일 경우는 부호비트를 제외한 15-bit의 크기비트를 2의 보수로 변환하여 크기 비트에 대해서만 곱셈 연산을 수행하고, 30-bit의 곱셈 결과를 덧셈 연산 부분으로 보내 1-bit의 부호 비트와 30-bit의 곱셈 결과, 그리고 MSB에 '0'을 채워 넣어 32-bit로 만든 후 덧셈 연산을 수행한다. DWT 필터내의 곱셈기는 AND 게이트와 전가산기만으로 구조 구현이 간단한 BAM(Braun Array Multiplier)를 사용하였으며, MSB를 제외한 15-bit의 두 양의 정수를 곱할 경우 요구되는 하드웨어는 n2개의 AND 게이트, n(n-1)개의 전가산기로 구성된다. DWT 필터내의 덧셈 연산은 32-bit CLA(Carry Lookahead Adder)로써 구현하였다.

<그림 6>은 64x64 크기의 Tile 메모리 블록과 각각의 Tile 메모리에 읽기·쓰기 주소를 addressing 하기 위한 주소발생기, 그리고 DWT로 구성되는 DWT 시스템 블록도이다. 외부의 프레임 메모리(SDRAM)로부터 64x64 크기의 Tile 이미지가 Mem1에 저장된 후, DWT가 enable되면 1-D DWT된 결과를 Mem2에 저장한다. 1-D DWT가 끝나면 Mem2로부터 data를 읽어 들여 수직방향의 2-D DWT가 수행되며, 그 결과를

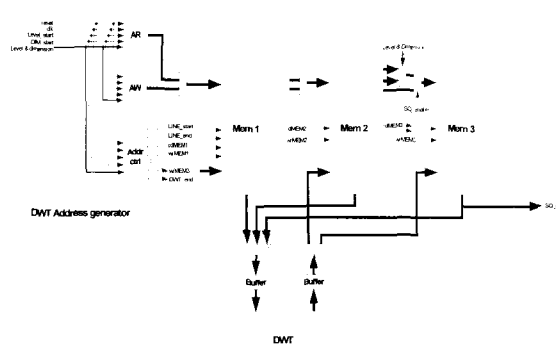


그림 6. DWT 시스템 블록 다이어그램
Fig. 6. The System block diagram of DWT.

Mem3에 저장한다. 이는 1레벨의 분해를 의미하며, 다음 레벨로의 분해를 위해서 Mem3로부터 data를 읽어 들여 DWT 필터링을 수행한다. 이러한 과정이 더 많은 레벨로의 분해를 위해서 반복되어지며, 3레벨까지 DWT가 완료되면 'DWT_end' 신호가 활성화되고 양자화를 위해서 Mem3로부터 SQ블록으로 3레벨 DWT된 coefficient들이 전달된다.

III. SQ 구조

양자화는 DWT 변환부에서 분류한 영상정보를 중요도에 따라 정리하는 부분으로, 반복되거나 중요도가 상대적으로 낮은 정보들을 제거하여 높은 압축율을 얻는다. 양자화 과정을 거치면 영상정보가 손실되기 때문에 효율적이고, 인간 지각 특성에 적절한 양자화기 선택이 중요하며, JPEG 2000에서의 SQ는 최적화 된 각 서브밴드별 양자화 계수를 구하고 이를 사용하여 양자화하는 방식을 취한다.

각 부 대역 b에 대한 양자화 stepsize Δb는 식 (4)와 같이 표현된다.^[1]

$$\Delta_b = 2^{R_b - \epsilon_b} \cdot \left(1 + \frac{\mu_b}{2^{11}}\right) \tag{4}$$

- μ_b : Mantisa
- ε_b : Exponent
- R_b : Nominal dynamic range

<그림 7>은 SQ 블록도로서 각 부 대역별 양자화 계수 Δ_b의 역수(1/Δ_b) 값을 저장하기 위한 SRAM방식의 메모리 블록과 최종 DWT 변환된 이미지 정보를 레벨별, 부 대역별로 메모리에 저장된 stepsize값과 곱셈 연

산을 수행하는 BAM 블록 및 메모리의 제어신호를 발생시키는 컨트롤러로 구성된다.

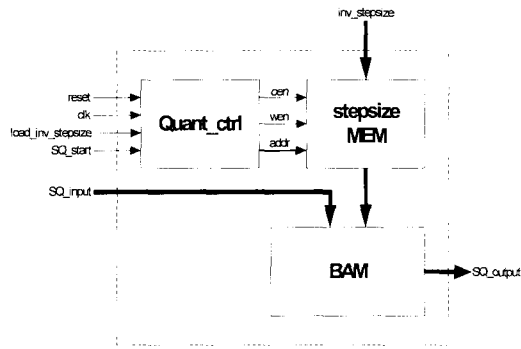


그림 7. SQ 블록도
Fig. 7. The Block diagram of SQ.

<그림 8>은 양자화 결과를 저장하기 위한 Tile 이미지의 크기의 64x64 내부 메모리와, 메모리에 읽기·쓰기 주소를 발생시키는 주소 발생기, 그리고 SQ 블록으로 구성되는 SQ 시스템 블록도이다. 컨트롤러로부터 발생되는 'SQ_enable' 신호가 활성화되면 Mem3에 저장되어 있는 3레벨까지 분해된 DWT결과를 SQ블록으로 전달하여 양자화를 수행하고 그 결과를 Mem4에 저장한다.

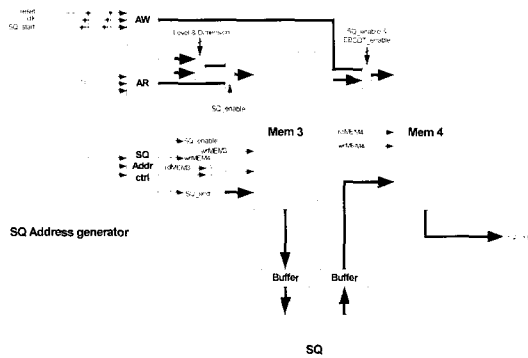
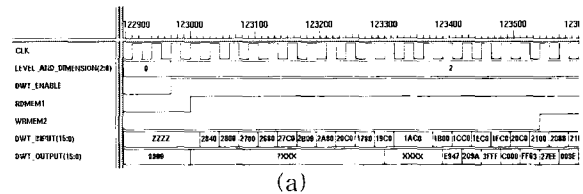


그림 8. SQ 시스템 블록 다이어그램
Fig. 8. The System block diagram of SQ.

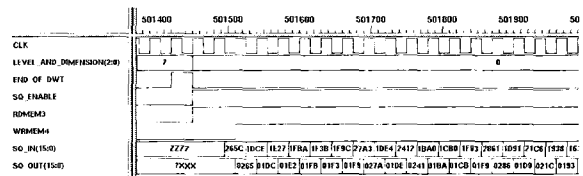
IV. 성능 평가 및 분석

설계된 DWT와 SQ 구조는 Xilinx FPGA Device(XCV2000E-6BG560C) 라이브러리를 이용하여 Synopsys에서 합성한 후 동작을 검증하였다. DWT의

게이트 수는 27,851(2-input NAND 기준) 게이트, SQ의 게이트 수는 4,458 게이트 그리고 8Kbyte 크기의 내부메모리가 4개 사용된다. 또한, 설계된 회로의 critical path는 BAM이며 데이터 arrival time이 20.57ns로서 약 50MHz까지 동작이 가능하나 30MHz로 동작을 검증하였다. 시뮬레이션을 위한 이미지는 Lena 영상(64x64, 8,192 byte)을 사용하였다.



(a)



(b)

그림 9. 시뮬레이션 결과
(a) DWT 시뮬레이션 결과
(b) SQ 시뮬레이션 결과

Fig. 9. The Simulation result.
(a) The Simulation result of DWT
(b) The Simulation result of SQ

<그림 9>의 (a)는 DWT 시뮬레이션 결과로서 'DWT_enable' 신호가 활성화되면 DWT 필터링을 시작하고, 19 클럭후에 첫 번째 DWT 결과인 (27EE)₁₆을 메모리에 저장한다. (b)는 SQ 시뮬레이션 결과로서 3레벨까지 DWT 변환이 끝나면 DWT 블록으로부터 flag('end_of_DWT') 신호를 전달받아 'SQ_enable' 신호가 활성화되어 양자화를 수행한다.

<그림 10>은 설계된 구조의 동작을 검증하기 위해 영상 데이터를 이용한 시뮬레이션 결과이다. <그림 10>의 (a)는 64x64 크기의 원 영상이며, (b)는 3-decomposition level까지 DWT한 후 출력되는 bit stream을 C program을 이용하여 나타난 영상으로서 모두 10개의 부 영상으로 나뉘어짐을 나타내고 있다. (c)는 (b)에서 사용된 동일한 bit stream을 각 부 대역 별로 stepsize Δ_b 로 양자화시킨 영상이며, (d)는 양자화된 영상을 C program을 이용하여 복원한 영상 결과를 보여준다.

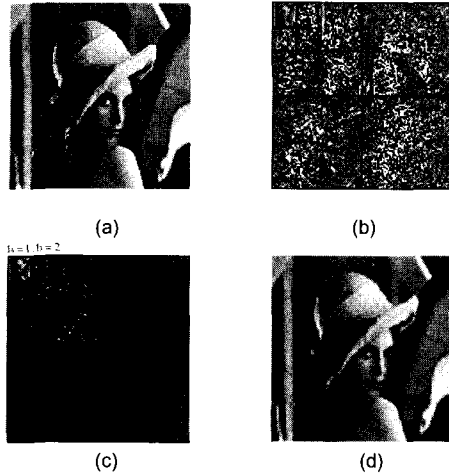


그림 10. 영상데이터 시뮬레이션 결과
 (a) 원 영상 (b) 3레벨 DWT 영상
 (c) stepsize Δb 로 양자화한 영상
 (d) 양자화 복원영상

Fig. 10. The Simulation result of Image data.
 (a) Original Image
 (b) 3Level Wavelet transformed Image
 (c) Quantized Image using stepsize Δb
 (d) Inverse Quantized Image

<그림 11>은 본 논문에서 제안하고 설계한 구조의 타이밍도로서 64x64 Tile 이미지를 수평방향(1-Level & 1-D)으로 DWT하는데 걸리는 시간을 1 unit cycle 이라 한다면, 3레벨 2-D DWT 및 양자화까지는 4 unit cycle이 소요되며, 설계된 블록을 30MHz로 동작시켰을 때, 640x480 크기의 컬러 이미지의 경우 초당 10프레임의 성능을 보인다.

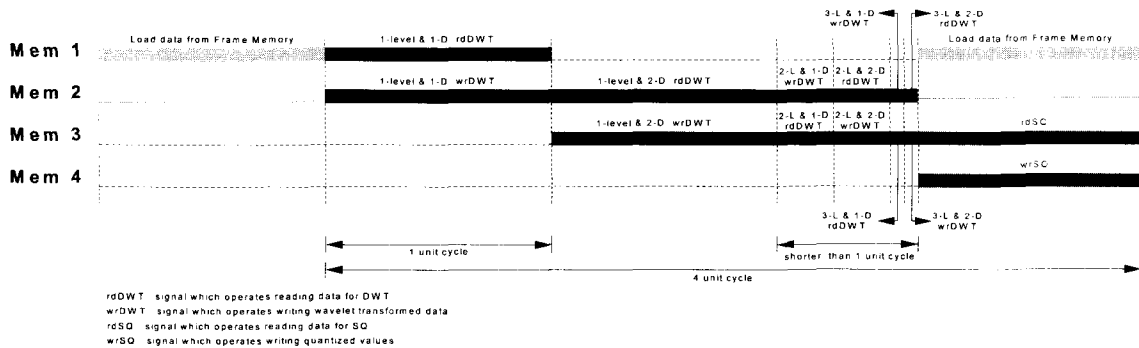


그림 11. 타이밍도
 Fig 11. Timing diagram.

V. 결 론

자연영상, 텍스트, 컴퓨터그래픽, 인공위성 사진 등 다양한 종류의 정지영상의 효율적인 전송 및 저장을 위해서는 고 화질, 그리고 압축률이 뛰어난 영상압축 기술이 선행되어야 하며, 뿐만아니라 고속의 영상 처리를 위해서는 영상압축 프로세서의 하드웨어 구현은 필수적이다. 본 논문에서는 JPEG 2000 CODEC의 DWT 및 양자화기의 구조를 제안하고 설계하였다. 설계된 구조는 Xilinx FPGA technology를 이용하여 검증하였고, 30MHz의 주파수로 동작된다. 고속의 병렬처리를 위해 64x64 크기의 Tile 메모리를 사용하여 shuffling함으로써 구현하였고, JPEG2000의 주요한 특징인 하나의 알고리즘(same transform-based framework)을 이용하여 lossy compression과 lossless compression이 가능하도록 DWT 필터는 Daubechies 9/7 필터와 5/3 필터를 각각 선택적으로 적용할 수 있도록 구현하였으며, 양자화는 stepsize값을 사용자가 정의하여 rate control이 용이하도록 설계하였다. 본 논문에서 제안하고 설계한 구조는 JPEG 2000 CODEC 알고리즘의 하드웨어 구현 및 다양한 멀티미디어 프로세서의 서브 모듈로써 응용하여 적용할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

[1] ISO/IEC 15444-1, "Information technology- JPEG2000 image coding system-Part 1: Core coding system", 2000.

- [2] Charilaos Christopoulos, "The JPEG2000 Still Image Coding System: An Overview", IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 46, No. 4, pp. 1103~1127, November 2000.
- [3] Gilbert Strang/Truong, "Wavelet and Filter Bank", Wellesley-Cambridge Press, 1996.
- [4] D. Le Gall and A. Tabatabai, "Subband Coding of Digital Images Using Symmetric Short Kernel Filters and Arithmetic Coding Techniques", Proc IEEE Int. Conf. ASSP, NY, pp. 761~765, 1988.
- [5] M. D. Adams and F. Kossentini, "Reversible Integer-To-Integer Wavelet Transforms For Image Compression: Performance And Analysis", IEEE Trans. Image Processing, Vol. 9, No. 6, pp. 1010~1024, June 2000.
- [6] A.R. Calderbank, I. Daubechies, W. Sweldens and B. L. Yeo, "Lossless Image Compression Using Integer to Integer Wavelet Transforms", Proc. IEEE Int. Conf. Image Processing, Santa Barbara, USA, Oct. 1997.

 저 자 소 개



李 昶 珉(正會員)

1967년 9월 29일생. 1993년 2월 전남대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1998년 2월 전남대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1998년 8월~현재 전남대학교 전자공학과 대학원 박사과정. <주관심분야 : 영상

처리, VLSI 설계, 신경회로망등임>



金 榮 民(正會員)

1954년 4월 18일생. 1976년 2월 서울대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1978년 2월 한국과학원 전기및전자공학과 졸업(공학석사). 1978년 3월~1979년 7월 한국선박해양 연구소(주임연구원). 1979년 8월~1982

년 7월 국방과학연구소(연구원). 1986년 오하이오 주립대학교 전기공학과(공학박사). 1988년 6월~1991년 8월 한국전자통신연구원(실장). 1991년 9월~현재 전남대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 교수. <주관심분야 : 영상처리, VLSI설계, 신경회로망등임>