

# 홀로그래픽 WORM 의 하드웨어 채널 디코더

## Hardware Channel Decoder for Holographic WORM Storage

황의석<sup>†</sup>, 윤필상\*, 김학선\*, 박주연\*  
Eui-Seok Hwang, Pil-Sang Yoon, Hak-Sun Kim, and Joo-Youn Park

### Abstract

In this paper, the channel decoder promising reliable data retrieving in noisy holographic channel has been developed for holographic WORM(write once read many) system. It covers various DSP(digital signal processing) blocks, such as align mark detector, adaptive channel equalizer, modulation decoder and ECC(error correction code) decoder. The specific schemes of DSP are designed to reduce the effect of noises in holographic WORM(H-WORM) system, particularly in prototype of DAEWOO electronics(DEPROTO). For real time data retrieving, the channel decoder is redesigned for FPGA(field programmable gate array) based hardware, where DSP blocks calculate in parallel sense with memory buffers between blocks and controllers for driving peripherals of FPGA. As an input source of the experiments, MPEG2 TS(transport stream) data was used and recorded to DEPROTO system. During retrieving, the CCD (charge coupled device), capturing device of DEPROTO, detects retrieved images and transmits signals of them to the FPGA of hardware channel decoder. Finally, the output data stream of the channel decoder was transferred to the MPEG decoding board for monitoring video signals. The experimental results showed the error corrected BER(bit error rate) of less than  $10^{-9}$ , from the raw BER of DEPROTO, about  $10^{-3}$ . With the developed hardware channel decoder, the real-time video demonstration was possible during the experiments. The operating clock of the FPGA was 60 MHz, of which speed was capable of decoding up to 120 mega channel bits per sec.

**Key Words :** holographic data storage, channel decoder, error correction code, channel equalizer

### 1. 서 론

홀로그래픽 WORM (write once read many) 드라이브는 2 차원의 디지털 정보 영상을 부피에 중첩 기록하고 페이지 단위로 재생하여 높은 저장 밀도와 빠른 정보 전달 능력을 가지는 차세대 정보저장 기기이다.[1] DVD (digital versatile disk) 와 같은 기존의 광 정보저장 기기와 유사하게 홀로그래픽 WORM (H-WORM) 시스템의 의 경우도 기록과 재생 시 간섭이나 기록 물질의 불균일성 등의 영향으로 검출 정보에 잡음이 포함되게 되어 정보 복원 시 오류가 발생할 수 있다. 그러나 기존의 광 정보 저장장치가 순차적으로 비트 정보를 기록하는 것과는 달리 H-WORM 은 이진 데이터 페이지

단위로 기록하기 때문에 잡음의 영향이 증가되며 복잡해진다. 그러므로 H-WORM 시스템의 신뢰성 있는 정보 복원을 위해서는 강화된 신호처리 기술들이 필요하게 되었다. 본 연구에서는 H-WORM 드라이브에 채널 특성을 분석하여 복잡한 잡음의 영향을 줄이는 여러 디지털 신호처리 기술들을 평가하고, 이를 기반으로 최종 복원 정보가 상용화가 가능한 수준의 비트 오류율 (BER, bit error rate) 을 가지는 채널 디코더를 설계 하였다. 또한 채널 디코더의 실시간 구동을 위해서 적용된 디지털 신호처리 기술들을 FPGA(field programmable gate array) 로 구현한 하드웨어 채널 디코더를 개발하였다. 부가적으로, 향후 다른 H-WORM 시스템이나 궁극적으로 기반 소자 기술들의 개발에 따라 초-고속화 되는 시스템에도 쉽게 적용이 가능하도록 확장성을 고려하였다. 대우 일렉트로닉스의 H-WORM 원형인 DEPROTO 시스템에서 평가 및 검증 실험이 수행되었고, 개발된 채널 디코더가 MPEG 2 동영상을 성공적으로 복원함을 확인할 수 있었다.

<sup>†</sup> Digital Signal Proc. R&D, DAEWOO Electronics Corp.

E-mail : eshwang@dwe.co.kr

\* Digital Media R&D, DAEWOO Electronics Corp.  
논문접수일 (2005년 4월 7일)

## 2. H-WORM의 디지털 신호처리 기술

H-WORM에서 잡음의 영향을 줄이기 위해서 채널의 특성을 먼저 분석하고, H-WORM 채널에 적절한 신호처리 기술을 개발하여 적용해야 한다. H-WORM의 채널 특성에 관한 기존에 많은 연구들이 있었고, [2] 각 연구들이 참조하는 시스템에 따라서 부분적으로 다른 특성을 보일 수도 있으나, H-WORM 채널이 가지는 기본 특성은 유사한 것으로 알려져 있다. 본 연구에서 채널로 사용한 DEPROTO 시스템은 푸리에(Fourier) 홀로그래프를 기록하는 전형적인 4-f<sub>1</sub>(focal length) 구조를 가지고 있다. 모델링은 기록과 재생을 반복 실험하여 나타난 결과를 이용하여 분석되었다. [3] DEPROTO는 그림 1과 같은 구조를 가지며, 기록 정보 패턴을 공간 광 변조기(SLM, spatial light modulator)에 나타내어 구면(spherical) 참조 빔과의 간섭을 회전 원판 디스크에 이동 중첩(shift multiplexing) 방식을 이용하여 기록한다. 이때 저장밀도를 높이기 위해서 광 구경(OA, optical aperture) 등을 적용하여 기록되는 푸리에 홀로그래프의 영역을 제한한다. 복원된 정보 영상은 검출기인 CCD(charge coupled device) 카메라에서 갈무리되어 디지털 신호처리 기술을 통하여 사용자 정보로 디코딩 된다. DEPROTO의 일반적인 잡음으로는 광 구경의 크기에 따른 인접 픽셀 간섭(ISI, inter symbol interference), 신호 빔의 가우시안 형태의 광 분포에 따른 국소적인 광 불균일성과 카메라와 같은 전자장비에서 발생하는 임의의 백색 가우시안 잡음(AWGN, additive white Gaussian noise) 등을 들 수 있다. [2-3] 또한 회전 디스크의 미세한 어긋남이나 기록 후 저장 매체의 수축(shrinkage)의 영향 등으로 복원된 영상과 검출기인 카메라의 픽셀 위치에 차이가 생기게 되어 어긋남이 있는 영상이 검출된다. 이러한 임의의 어긋남은 저장 매체의 불균일한 회절 효율과 더불어 특정 페이지의 신호 대 잡음 비(SNR)를 떨어뜨릴 수 있으며, 결과적으로 재생 페이지

들간의 신호 대 잡음 비 값의 변화를 크게 하는 역할을 한다. 이러한 잡음들의 영향을 줄이기 위해서, H-WORM 채널 디코더는 크게 4개의 디지털 신호처리 블록들, 즉 마크 검출기, 채널 등화기, 변조 디코더와 오류정정 디코더로 구성되었으며, 각 블록들은 H-WORM의 특정 잡음들의 영향을 제거하도록 설계되었다.

### 2.1 마크 검출기

여기에 1.1 절의 내용입력 회전 디스크의 미세한 어긋남이나 저장물질의 수축현상의 영향으로 복원된 영상의 위치는 일정한 영역 안에서 변동된다. 그러므로 공간 광 변조기와 검출 카메라의 전체 픽셀 영역을 정보영역으로 사용하지 않고 일정부분 마진을 갖도록 하였다. 또한 H-WORM 시스템에서 재생된 이차원 정보 영상을 검출하는 경우, 정보 영역의 정확한 위치를 추정하기 위하여 특정 형태의 마크를 함께 기록하였다. H-WORM 시스템에서 재생 정보 영상과 카메라의 픽셀 어긋남은 수 픽셀 범위 내에서 임의로 발생하므로 일대일 픽셀 매칭 시스템에서 반 픽셀 어긋남 현상은 정보복원 시에 치명적인 잡음을 야기할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 공간 광 변조기의 한 픽셀에 카메라의 2 × 2 픽셀이 대응되는 오버샘플링(over-sampling) 방법을 적용하였다. DEPROTO에 사용되는 1024 × 1024 픽셀 카메라를 고려하여 기록되는 이진 정보 패턴은 480 × 480 픽셀 영역에 정보를 포함하도록 결정하였다. 정보 영역의 위치 추정을 위한 마크는 편이상 정보 영역의 둘레를 일정 간격을 두고 온(ON) 픽셀로 두르는 프레임 형태로 적용하였다. 검출 이미지에서 각 행과 열의 광세기 합을 기준으로 하여, 마크에 해당하는 행과 열의 광세기 합이 마크에 인접한 마진 영역과 정보 영역에서의 행과 열의 광세기 합에 비해 상대적으로 큰 값을 가지는 특성을 이용하여 마크 위치를 추정할 수 있다. 본 연구에서는 보다 신뢰도를 높이기 위해서 정보 영역에 온 픽셀이 많은 행이나 열이 존재하여 마크의 위치 추정을 크게 하는 경우에도 신뢰할 수 있는 위치 추정을 위하여 광세기 합의 변화를 고려하는 알고리즘을 개발 적용하였다. 최대 64 카메라 픽셀만큼의 마진 가능성을 고려하고 효율적인 계산을 위해서 마크를 찾는 영역은 각 모서리의 100 × 100 크기로 고정하였다. 이 경우 DEPROTO에서 검출된 특정 이미지에 대하여 그림 2(a)는 행과 열의 합을, (b)는 행과 열의 광세기 합의 변화량을 표현하였다. 그림에서 알 수 있듯이 (a)와 (b) 모두 20 번째 행과 22 번째 열에 프레

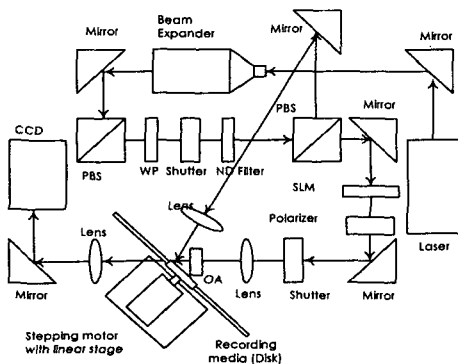


Fig. 1 Schematics of DEPROTO

입 마크가 있음을 나타내고 있으나, 인접 정보 영역의 값들과 비교해 볼 때 (b)의 광세기 합의 변화량 값이 마크의 위치를 보다 확연하게 표현하고 있음을 알 수 있다.

2.2 채널 등화기

H-WORM 채널을 통과하면서 광 구경의 사용과 픽셀 어긋남 등의 영향으로 생기는 인접 픽셀의 간섭은 데이터 이미지 검출 시에 잡음으로 포함된다. 이때 채널 등화기는 H-WORM에서 항상 발생하는 잡음을 제거하는 블록이다. 인접 픽셀의 간섭은 기록 정보와 상관성이 있기 때문에 상관성 계수 등을 토대로 후 처리 필터(post processing filter)를 추정하여 보정할 수 있다. 후 처리 필터는 다양한 패턴을 기록하고 재생하면서 후 처리 필터의 계수들을 추출하여 전체 재생 정보에 공통적으로 적용하는 학습 필터(training filter)로 구성될 수 있으나, DEPROTO와 같이 입의 어긋남을 가지는 경우에는 각 페이지 정보를 토대로 적응적으로 추정하여 적용하는 것이 효과적이다. 본 연구에서는 하드웨어 구성에 적합성을 고려하여, 각 재생 데이터 이미지의 프레임 마크 정보를 이용하여 상관성 계수들을 추정하고 2 × 2 오버샘플링 과정에서 상관성 계수에 따라서 각 픽셀에 가중치 값을 다르게 적용하는 후 처리 방법을 사용하였다.[4] 그림 3에 등화기를 적용하지 않고 얻은 영상과 적응 등화기를 적용하여 얻은 영상의 히스토그램을 나타내었다. 등화기 적용 후에 온과 오프의 히스토그램이 보다 확연히 구분되어 높은 신호 대 잡음 비를 가지게 됨을 알 수 있다. 특히 H-WORM 시스템에서 온과 오프의 히스토그램이 교차하는 영역은 사용자 정보를 복원하는 과정

에서 오류가 발생할 가능성이 높다. 그러나 등화기 적용 이후 히스토그램을 온과 오프가 교차하는 영역에서 보다 확연히 구분 시켜서 비트 오류율 또한 낮아짐을 알 수 있다.

2.3 변조 디코더

H-WORM의 변조 디코더는 재생된 아날로그 이진 영상에서 각 픽셀의 광세기를 비교하여 온과 오프를 판별하여 디지털 정보를 복원해 내는 역할을 한다. 신호 빔의 가우시안 광세기 분포 혹은 국부적인 불균일성 등의 영향으로 어두운 온 혹은 밝은 오프 등에 의해 온/오프 여부를 판별하기 어려운 경우가 생길 수 있기 때문에 이를 신뢰성 있게 판별하기 위한 다양한 방법들이 제안되었다.[5-7] 본 연구의 대상인 DEPROTO 시스템 역시 광세기 불균일 분포의 영향을 받기 때문에 지역적인 블록 판별 방법을 적용하였으며, 오류의 영향을 줄이기 위해 비터비(Viterbi) 검출이 가능하도록 구성된 9-12 PBC[5] 변조 코드를 사용하였다. 9-12 PBC 변조 코드는 9 비트의 정보를 12 비트의 코드워드(code word)로 트렐리스(trellis)를 따라서 인코딩하며, 8개의 상태와 16개의 코드워드 그룹을 가진다. 각 그룹내의 코드워드들은 최소 해밍 거리(Hamming distance)가 4 이상이 되도록 구성하여, 이를 이용해서 코드워드 내에서 1 비트 오류를 정정할 수 있는 코드이다. 비트 오류율 특성은 우수하나 트렐리스를 따라서 순차적으로 인코딩/디코딩 되기 때문에 처리 시간이 길어지는 단점이 있다. 그러나 본 연구에서는 병렬 처리가 가능한 FPGA 하드웨어를 이용하여 9-12 PBC 변조 코드를 실시간으로 디코딩하도록 구성하였다.

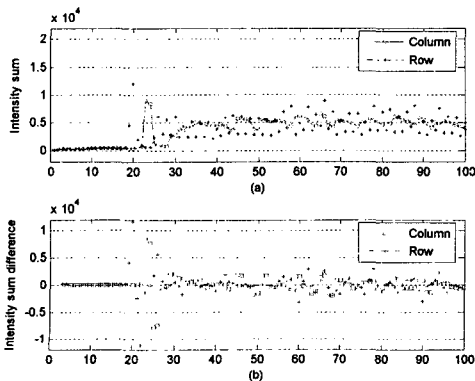


Fig. 2 Column and row intensity sum(a) and their derivatives for(b) detecting frame

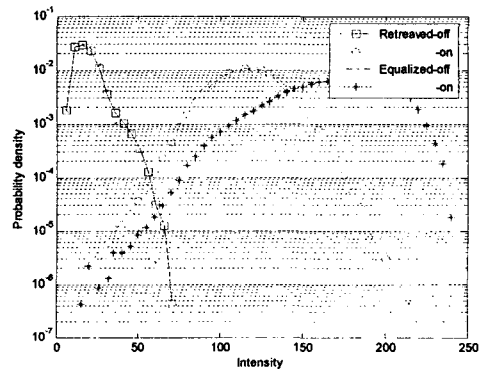


Fig. 3 Histograms of retrieved and equalized data frame mark

### 2.4 오류정정 디코더

채널 등화와 변조 디코딩을 적용 하여 복원된 디지털 정보에서 잡음의 영향은 상당히 감소하게 된다. 그러나 임의의 전기적 잡음이나 광학적 혹은 기록 매체상의 미세한 먼지나 결함 등의 영향으로 생기는 비 정규적인 잡음들은 여전히 포함되어 디지털 오류를 발생시킬 수 있다. 제안된 채널 디코더는 이러한 오류를 정정할 수 있도록 오류정정 코딩을 포함하였다. H-WORM에서의 오류는 순차적으로 비트 정보를 기록하는 기존의 광 정보 저장기와 달리 페이지 단위로 기록하는 특성으로 데이터 페이지 내에서 전기 잡음 등에 영향으로 발생하는 산발 오류와 더불어 저장물질의 결함, 검출기의 어긋남 혹은 부정확한 서보의 의한 영향 등으로 페이지 전체에 상대적으로 오류가 많게 되는 연접 오류가 발생 할 수 있다. 기존의 RSPC (Reed-Solomon product code) 와 같은 오류정정 방법으로는 이러한 오류를 정정하는데 한계가 있기에 본 연구에서는 3 차원 오류 정정을 통해 페이지 크기의 오류까지 수정이 가능한 RSVC(Reed-Solomon volumetric code)[8] 방법을 적용하였다. 그림 4 에 RSVC 의 구조를 나타내었다. 그림에서  $D_i$  는 정보 심볼 페이지를 나타내고,  $i_3$  페이지의 정보 심볼에 대하여 세 방향으로 오류 정정 인코딩을 적용하여, 행 방향( $P_1^{(c)}$ ), 열 방향( $P_1^{(r)}$ ), 레이어 방향 오류 정정 패리티( $P_1^{(l)}$ )들이 추가되어 하나의 RSVC 오류 정정 블록을 구성하게 된다. 또

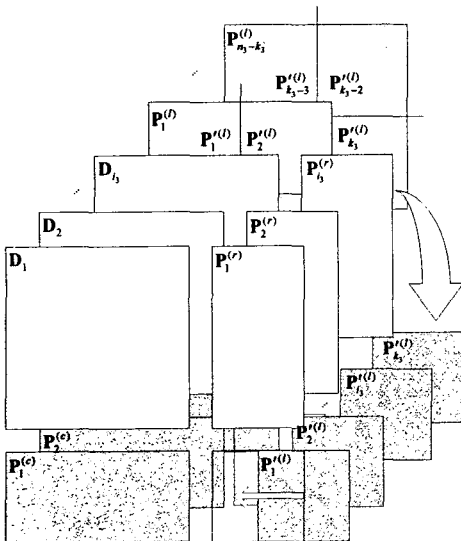


Fig. 4 Schematics of RSVC ECC

한 레이어 방향 패리티들을 재배열 하여 오류정정 코드의 코드율을 높일 수 있는 방법들도 제안되었다. 채널 특성에 따라서 오류정정 코드와 패리티 블록의 크기가 달라지고, 상용화가 가능한 수준인  $10^{-9}$  정정 후 비트 오류율을 갖도록 구성한다. DEPROTO 의 경우  $RS(64,50) \times RS(64,56) \times RS(54,52)$  를 적용하여 대략 32% 의 패리티(parity)가 추가되도록 정하였다. 디코딩 시에 행과 열 방향 오류 정정과 더불어 레이어 방향의 추가 정정을 통해 전체적으로 오류 정정 성능이 높아지며, 심지어 임의의 정보 심볼 페이지  $D_i$  전체에 오류가 있는 경우에도 기록 정보를 오류 없이 복원 할 수도 있다는 장점이 있다.

### 3. H-WORM 의 하드웨어 채널 디코더

H-WORM 의 하드웨어 채널 디코더는 앞장의 디지털 신호처리 알고리즘들을 VHDL (very high-speed hardware description language) 코드로 설계 하여 FPGA 에서 동작하도록 구성하였다. 그림 5 에 하드웨어 채널 디코더의 구조를 나타내었다. 크게 4 개의 블록들, 마크 검출기(Mark\_detector), 채널 등화기(channel eq), 변조 디코더(Modulation\_dec)와 오류정정 디코더(ECC\_dec)로 구성되어 있고, 각 블록간의 원활한 정보 전달과 독립적인 병렬 계산을 위해서 내부 메모리 버퍼를 사용하였다. FPGA 가 원활한 기능을 수행하도록 주변기기들을 구동하는 부분도 추가하였다. DEPROTO 의 검출기인 카메라(External CCD)는 영상 신호와 제어 신호를 LVDS(Low voltage differential signal) 형태로  $\pm$  한 쌍으로 출력하며, 이 신호들을 채널 디코더에 연결하기 위해서 리시버(LVDS\_rec)블록을 추가하였다.

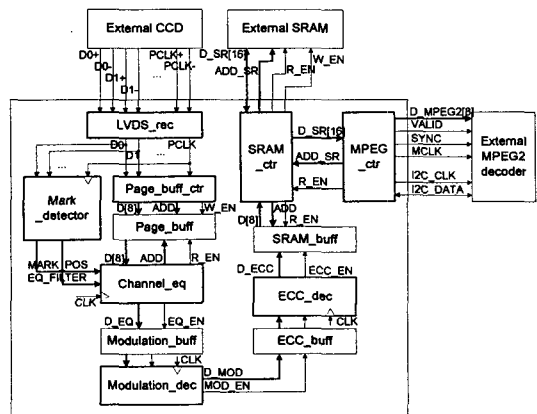


Fig. 5 Top architecture of H-WORM hardware channel decoder

또한 외부 메모리(External SRAM)와 외부 MPEG 디코더(external MPEG decoder) 보드를 제어하기 위한 메모리 제어기(SRAM\_ctr)와 MPEG 제어기(MPEG\_ctr)를 각각 추가하였다.

#### 4. 실험 및 평가

제안된 채널 디코더를 검증하기 위해서 Xilinx ISE 도구를 사용하여 시뮬레이션 및 합성을 진행하였고, FPGA를 탑재한 평가 보드를 제작하여 직접 구동하는 실험을 진행하였다. 그림 6에 시뮬레이션 결과를 나타내었다. LVDS 리시버 블록의 재생된 카메라 검출 신호가 마크 검출기와 채널 등화기를 거치고, 변조 디코더와 오류정정 디코더에서 디지털 영상 신호가 복원되어 외부 메모리에 전달되고 MPEG 보드로 전송되는 순서로 신호를 배열하였다. 각 블록들이 내부 메모리 버퍼를 사용하여 독립적으로 잘 동작하고 있음을 알 수 있다. 구동 실험을 위한 FPGA로는 Xilinx사의 800만 게이트급 Vertex2 모델을 사용하였고, 대상 FPGA로 합성한 결과를 표 1에 나타내었다. 임계 시간이 10.4 ns로서 실제 구동 속도인 60 MHz로 무리 없이 동작할 수 있으며 FPGA 내의 로직들도 여유 있게 사용되고 있음을 알 수 있다. 전체 평가 시스템은 동영상 기록/재생 테스트를 위해서

MPEG 디코더 부분을 포함하여 그림 7과 같이 구성하였다. 기록 정보는 MPEG2 TS(transport stream)를 사용하였고, DEPROTO에서 정보 복원 시에 재생되는 데이터 영상을 카메라에서 연속적으로 검출하여 채널 디코더로 전송하도록 연결 하였다. 채널 디코더는 그림 5에 보여진 바와 같이 각 검출 영상에 후처리, 변조 디코더, 오류정정 디코더를 적용하여 정보를 복원해 내고 복원된 스트림 정보를 MPEG 보드에 전송하도록 설계하였다. 동시에 MPEG 보드에는 I2C 통신을 통해서 보드에 전송되는 스트림을 디코딩 후 모니터에 디스플레이 하도록 명령하였다. 현재는 DEPROTO 기록/재생계 및 이에 적용된 카메라의 한계로 초당 30장의 페이지 정보를 읽고 처리하여 대략 초당 8백만 채널 비트를 처리할 수 있으나, 하드웨어 채널 디코더를 독립적으로 고려할 경우 초당 500장의 페이지 정보를 읽고 처리할 수 있어 대략 120 Mbps의 채널 정보 복원능력을 가짐을 확인 할 수 있었다. 또한 채널 디코더의 출력 정보에서 비트 오류율을 측정해본 결과 대략  $10^{-9}$ 으로 DEPROTO의 시스템 비트 오류율(raw BER)인  $10^{-3}$ 에 비해서 상당히 개선되어 동영상이 끊김이나 깨짐 현상 없이 깨끗하게 재생 됨을 확인 하였다. 그림 8에 하드웨어 채널 디코더에서 출력되는 정보에 의해 동영상이 재생되고 있는 모습을 보이고 있다.

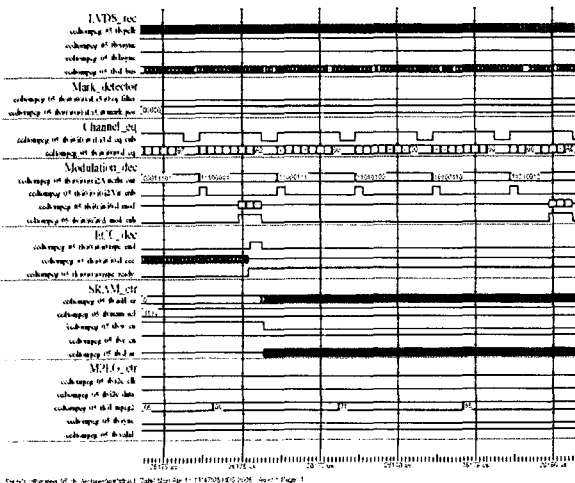


Fig. 6 Simulation results of H-WORM hardware channel decoder

Table 1 H-WORM Channel decoder synthesize results

Target	Device	X2V8000
	Package	ff1152
	Speed	-4
Timing	Critical path	10.4 ns (96 MHz)
Utilization	Slice F/F	4,232 (4%)
	4 input LUT	10,758 (11%)
	Bonded IOB	88 (10%)
	Block RAM	103 (61%)
	GCLK	6 (37%)

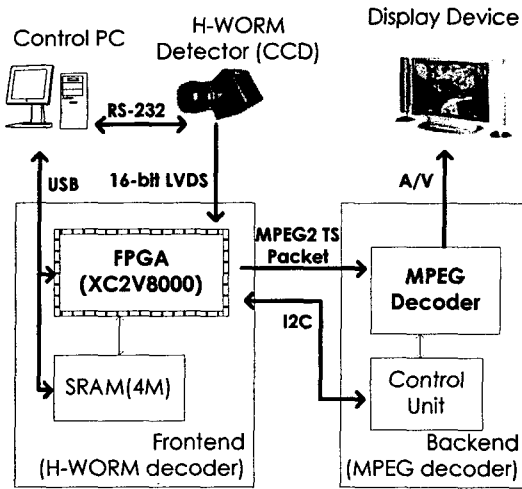


Fig. 7 Schematics of system for testing and evaluating H-WORM channel decoder

## 5. 결 론

H-WORM 에서 상용화가 가능한 수준의 BER 성능을 보이는 채널 디코더를 구성하였고 이를 FPGA 에 기반하여 하드웨어로 구현하였다. 개발된 하드웨어 채널 디코더를 대우 일렉트로닉스의 H-WORM 원형인 DEPROTO 시스템에 적용하였고, MPEG2 TS 소스를 깨끗하게 복원해 낼 수 확인하였다. 또한 개발된 채널 디코더는 초당 500 장의 페이지 정보를 처리할 수 있기 때문에 대략 120 Mbps 의 채널 정보 처리 능력을 갖고 있고 병렬 구성이 가능하기 때문에 H-WORM 에서 신뢰성 있는 정보 복원과 더불어 고속 정보 처리가 가능한 장점이 있다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부가 주관하는 차세대 신기술 개발사업 중 전자부품 연구원이 총괄 관리하는 “차세대 대용량 정보저장장치의 개발” 사업의 지원으로 대우일렉트로닉스에서 수행되었다.(00008145)

## 참고문헌

[1] D. Psaltis and A. Pu, 1995, “Holographic 3-D Disk,” *Optoelectronics*, Vol.10, No.3, pp.333-342  
 [2] M. Keskinov and B. V. K. Vijaya Kumar, 2000, “Efficient modeling of volume holographic storage channels(VHSC),” *Proceedings of SPIE* Vol.4090, pp.205-210

[3] E. Hwang, B. Kang, J. Cho, J. Park, and H. Jung, 2000, “Channel modeling and spectral domain evaluation of the modulation codes in holographic digital data storage system,” *Proceedings of Sat. ISOM 2000*, pp. 62-63  
 [4] P. Yoon, E. Hwang, B. Kang, J. Park and G. Park, 2004, “Image compensation for sub-pixel misalignment in holographic data storage,” *Technical digest of ISOM 2004*, pp.114-115  
 [5] E. Hwang, K. Kim, J. Kim, J. Park, and H. Jung, 2002, “A new efficient error correctible modulation code for holographic data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys. Vol.41*, pp.1763-1766  
 [6] E. Hwang, J. Roh, J. Kim, J. Cho, J. Park et al., 2003, “A new two-dimensional pseudo-random modulation code for holographic data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys. Vol.42*, pp.1010-1013  
 [7] H. J. Coufal, D. Psaltis, and G. T. Sincerbox, 2000, “Holographic data storage,” Springer  
 [8] E. Hwang, P. Yoon, J. Park, J. Park and H. Nam, 2005, “Three-dimensional error correction schemes for holographic data storage,” *Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 44*, pp.3529-3533