

VORAM호의 초음파 수중영상 전송시스템 개발

임용곤, 박종원, 강준선
한국기계연구원, 선박해양공학연구센터
E-Mail : poetwon@mailgw.kimm.re.kr

A Development for the Acoustic Underwater Image Transmission System in VORAM Ship

Y.K.Lim, J.W.Park, J.S.Kang
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KIMM

Abstract

This paper deals with the underwater image transmission system which includes in AUV(Autonomous Underwater Vehicle) project(that is VORAM(Vehicle for Ocean Research And Monitoring)), developed by KIMM for survey and investigation of a sea-bed through transmitting the underwater image to the mother ship. The system presented in this paper consists of a transducer which has a 136KHz center frequency and it's 10KHz bandwidth, pre-amplifier, $\pi/4$ QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) modulation/demodulation method, image compressing method using JPEG technique and modified Stop & Wait protocol.

The experimental results of the system is verified to a high performance with 9600 bps for transmitting the underwater image through the basin test. The results of test are also verified which allows to desirable transmission performance compared with the existing developed system and the possibility to put the practical use of survey and investigation. And, the viterbi coding and adaptive equalizer for cancelling the multipath effect are developing for more effective image transmission system. Also, these technique will very effectively adapt to realtime image transmission system.

I. 서 언

심해저 개발에 대한 관심이 선진국을 중심으로 높아지면서 심해저 광물자원 개발, 해양오염원 제거, 인양작업, 해저 케이블 매설 등의 심해저 작업을 위한 수중로봇 시스템의 개발이 활발히 진행되고 있다[1][2]. 수중로봇 시스템은 크게 테더 케이블이 있어 중작업에 필요한 ROV(Remotely Operated Vehicle)와 테더 케이블이 없어 유연한 해저 탐사가 가능한 AUV(Autonomous Underwater Vehicle)로 나뉘어 진다. 특히 AUV는 테더 케이블이 없으므로 대신 초음파를 이용하여 모선과의 데이터를 주고 받아야 하며, 전원을 내장하고 있기 때문에 작업시간의 한계를 가지고 있다.

한국기계연구원은 1994년부터 1997년까지 제 4차년도에 걸쳐 AUV를 개발하였고, 수조에서의 성능시험까지 완료하였다[1].

본 논문은 한국기계연구원이 개발한 AUV VORAM(Vehicle for Ocean Research And Monitoring)호에 내장되어 수중영상을 모선에 전송해주는 수중영상 전송시

스템 개발에 관한 논문이다.

VORAM호에 내장되어 수중영상을 모선으로 전송하는 수중영상 전송시스템은 중심주파수가 146KHz이고 대역폭이 10KHz인 초음파 트랜스듀서, 전단 증폭장치, $\pi/4$ QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) & FM(Frequency Modulation) 변·복조 방식, JPEG 수중영상 압축기법을 이용하여 구현되었다.

구현된 시스템을 이용하여 수조에서 테스트한 결과 9600bps의 전송속도로 수중영상을 전송할 수 있었으며, 이는 이미 개발되어 상용화되고 있는 선진국의 수중 데이터 통신시스템이 갖는 2400bps에 비해 월등히 높은 전송성능을 가지고 있음을 알 수가 있다[6]. 또한 현재 개발중에 있는 Viterbi Coding/Decoding 방식과 Multipath에 의한 신호감쇄의 영향을 줄이기 위한 적응 등화기 기법을 적용시킨다면 보다 효율적인 실시간 수중영상 전송시스템이 될 것이다.

II. 수중영상 전송시스템의 개요

수중영상 전송시스템은 AUV에 장착된 수중 카메라로부터 수중영상을 획득하여 수상의 모선의 시스템에 초음파를 이용하여 전송함으로써, 수상에서 보다 가시화적인 AUV 제어 및 수중의 상황을 알 수 있게 해준다. 본 논문에서 구현된 VORAM호의 수중영상 전송시스템의 시스템 개념도는 Fig. 1과 같다.

수중의 VORAM에 탑재되는 수중영상 전송시스템은 단방향으로 수중영상을 전송하는 시스템이다. 즉, 수중에 탑재된 수중유닛에서 얻은 수중영상을 수상의 중앙 제어 유닛에 전송하여, 수상 유닛에서 모니터를 통해 수중의 탐사작업 현장을 볼 수 있도록 해준다.

수중영상 전송시스템의 수중 유닛은 크게 카메라, 산업용 PC, JPEG 압축보드, DSP 보드, 초음파 트랜스듀서로 구성된다. 수중 카메라로부터 수중영상을 획득하기 위해 이미지 획득 보드를 사용하여 디지털화된 수중영상을 얻게 된다. 또한 카메라로부터 얻어진 수중영상 정보를 그대로 수상의 제어 콘솔로 전송한다면, 영상한 프레임에 대한 많은 시간이 걸리게 된다. 그래서, 수중영상정보를 보다 더 빠르게 전송하기 위해 일반적으로 정지영상 압축에 많이 사용하고 있는 JPEG 방식을 사용하고 있는 압축보드를 사용하였다. 본 논문에서 사용된 JPEG 압축보드는 Active Imaging사에서 만든 상용 JPEG 보드(ISA-JPEG-BIB & Snapper-16)로서 영상 획득 모듈, JPEG 압축/복원 모듈, 영상 데이터의 디지털화 하는 모듈로서 구성되어 있다.

또한, 수중에서의 초음파 통신과 같이 데이터의 오류

가 빈번히 발생하는 환경에서 보다 높은 전송효율을 갖는 Viterbi Coding을 사용하여 수상의 시스템에 전송하였다. 이 Viterbi Coding은 모토롤라사의 DSP56001 DSP보드를 사용하여 구현하여 수중영상 전송시간에 대한 부담을 줄이도록 하였다[3][4].

초음파를 이용하여 데이터를 전송하기 위해 $\pi/4$ QPSK 변조방식을 사용하여 주파수 대역폭의 제약을 받는 초음파 환경에 보다 적합한 시스템이 되도록 설계하였으며, 이 QPSK 변조된 신호는 FM 변조회로를 통해 센서의 중심주파수를 갖는 신호와 노이즈에 보다 강한 시스템을 구현하였다.

초음파 트랜스듀서는 중심주파수가 146KHz이고 주파수 대역폭이 10KHz인 세라믹 센서를 자체 제작하였고, 자체적인 성능 테스트를 하여 비교적 대역폭이 넓고 전송수신의 민감도가 좋은 센서를 선정하였다.

수상 유닛은 수중유닛으로부터 받은 초음파 수중영상신호를 복원하여 수상의 모니터에 디스플레이해주는 역할을 한다. 수상 유닛은 크게 초음파 트랜스듀서, DSP 보드, 산업용 PC, JPEG 복원보드로 구성된다. 수상유닛에서 사용되는 초음파 트랜스듀서 수중유닛에서 사용되었던 센서와 같은 성능을 가지고 있다. 초음파 센서를 통해 들어온 신호는 QPSK 복조회로와 FM 검파회로를 통해 디지털 신호로 바뀌게 되고, 디지털로 바뀐 데이터는 Viterbi Decoding과정을 거쳐 원래의 데이터로 복구되게 된다. 또한 초음파 신호는 표면, 해저면, 물체, 파도등에 의해 신호의 다중경로가 발생하게 되는데, 이때는 적응등화기를 사용하여 다중경로의 영향을 상쇄시켜준다. 적응등화기나 Viterbi Decoding은 DSP 프로세서에서 소프트웨어적으로 처리하게 되며,

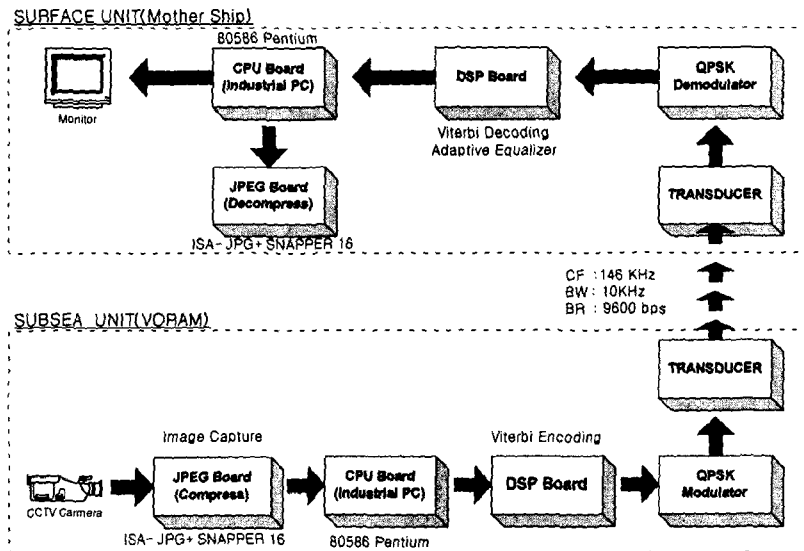


Fig. 1. System Block Diagram

이처럼 소프트웨어적으로 처리된 디지털 영상정보는 JPEG 복원보드를 거쳐 원래의 수중영상정보가 된다.

이렇게 복원된 수중영상정보는 수상의 모니터에 디스플레이되며, 이 디스플레이되는 영상정보를 보면서 VORAM 운용자는 보다 정확한 명령을 VORAM에 줄 수 있게 된다.

III. 수중영상 전송시스템의 구성

수중영상 전송 시스템은 수중유닛과 수상유닛을 포함하여 크게 초음파 트랜스듀서, JPEG 압축/복원 보드, DSP 보드, 변·복조 보드, CCTV 카메라, 주제어장치(PC)로 구성된다. CCTV 카메라는 방수용 수중 카메라가 아닌 일반 CCTV 카메라를 방수켄에 부착하였고, 주 제어장치는 산업용 PC를 사용하였는데, 수중유닛은 수중영상 전송시스템 전용 방수켄이 있어서 그 안에 부착하는 방식으로 구성되었고, 수상유닛은 독자적인 시스템으로서 구성되었다.

1. 초음파 트랜스듀서 설계

본 시스템에서 사용한 초음파 센서는 프로젝터 형식의 센서로서 Powder 압전소자 PZT4 Grade를 사용하여 설계하였고[5], 신창(주)에서 주문 제작하였다. 초음파 트랜스 듀서 설계에 필요한 기본 파라미터 값은 Table 1과 같고, 센서제작에 필요한 물리적인 특성은 Table 2와 같다.

Table 1과 2의 값에 따라서 초음파 트랜스듀서가 설계되어 제작되었고, 제작된 센서의 송·수신 감도특성 곡선은 Fig. 2와 같고 임피던스 특성은 Fig. 3과 같다.

Table 1. Parameter value of Acoustic projector transducer

파라미터	값
l_x (x축 길이, m)	0.0065
l_y (y축 길이, m)	0.0065
l_z (z축 길이, m)	0.004
d(압전상수, m/V)	295×10^{-12}
s_m (공진상수, m^2/N)	10.9×10^{-12}
ϵ (유전율)	1300
ρ_m (밀도, kg/m^3)	7.5×10^3
$\tan \delta$ (유전손실)	0.04
Q_m (Quality Factor)	400
경방향 주파수 상수, KHz · m	2.149
두께방향 주파수 상수, KHz · m	2.026

Table 2. Physical characteristics of a transducer materials

물리적 성질	값
압전세라믹 재질	PZT-4 Grade
입전세라믹 밀도	$7.5 \times 10^3 kg/m^3$
기계적 손실계수 Q	400(Typical)
유전상수 ϵ_{33}^T	1300
압전상수 d_{33}	$295 \times 10^{-12} m/volt$
경방향 주파수상수	2.149[KHz, m]
두께방향 주파수상수	2.026[KHz, m]

제작된 트랜스듀서를 이용하여 자체적인 테스트를 해본 결과 126KHz를 중심주파수로 12KHz의 주파수 대역을 가지기는 하지만, 주파수 대역내에 Notch가 발생하는 주파수가 있어서 부득이 146KHz를 중심주파수를 중심주파수로 설정하였다. 이 주파수에서의 대역폭은 약 10KHz의 성능을 가지고 있어서 이 주파수대역을 이용하여 수중영상 전송시스템을 구현하였다.

2. JPEG 보드

본 시스템에서는 일반적인 JPEG 알고리즘을 구현하기 위하여 상용화된 JPEG 보드를 구입하여 카메라로부터 얻어진 수중영상 데이터를 압축하고 복원하였다.

본 시스템에서 사용되고 있는 Active Imaging 사의 JPEG 보드는 크게 PC와의 인터페이스 및 압축을 하는 ISA-JPEG-BIB와 영상 데이터의 획득 및 영상데이터의 디지털화를 수행하는 Snapper-16보드로 구성된다. 사용되고 있는 JPEG 보드는 ISA-JPEG-BIB 보드와 Snapper16보드가 하나의 보드로서 역할을 수행하게 된다. JPEG 보드는 ISA방식이어서 PC와의 인터페이스가 용이하고, 획득가능한 최대 영상크기는 4096*4096이다. 그리고, 영상 한 프레임을 처리하는데 속도는 초당 33Mbyte를 처리할 수 있다[7].

JPEG 보드를 PC와 인터페이스시키기 위해 VC++ 2.0을 이용하여 프로그래밍 되었으며, 매 1초마다 카메라로부터 수중영상을 취득하여 JPEG 압축을 한후, PC의 메모리에 저장하도록 하였다.

JPEG 보드의 인터페이스 프로그램은 처음에 영상정보를 획득하는 Snapper보드를 초기화하고, 미국이나 일본에서 주로 사용하고 있는 NTSC 카메라 방식의 비디오 표준방식 및 영상정보의 크기, 외부트리거, 비디오 입력채널 등 영상정보 및 카메라 입력정보에 맞는 보드의 환경설정을 해준

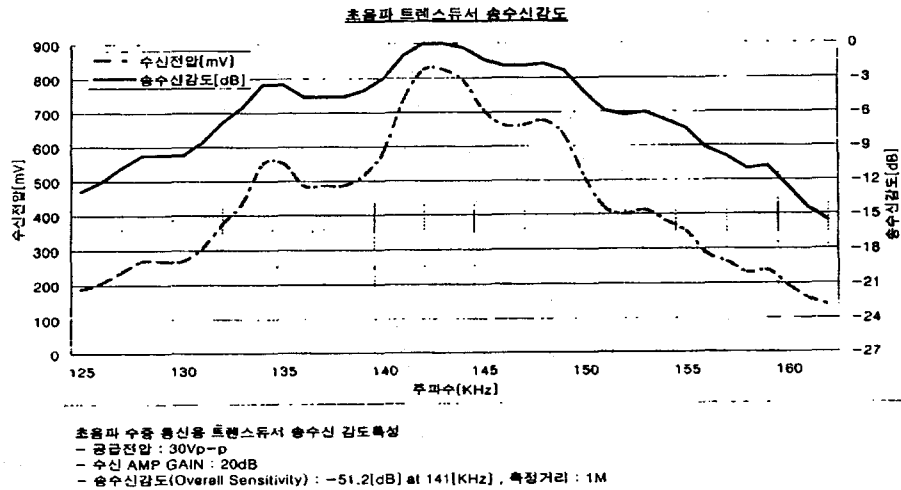


Fig. 2. Transmitting and Receiving Sensitivity of Transducer (vs Receiving Voltage)

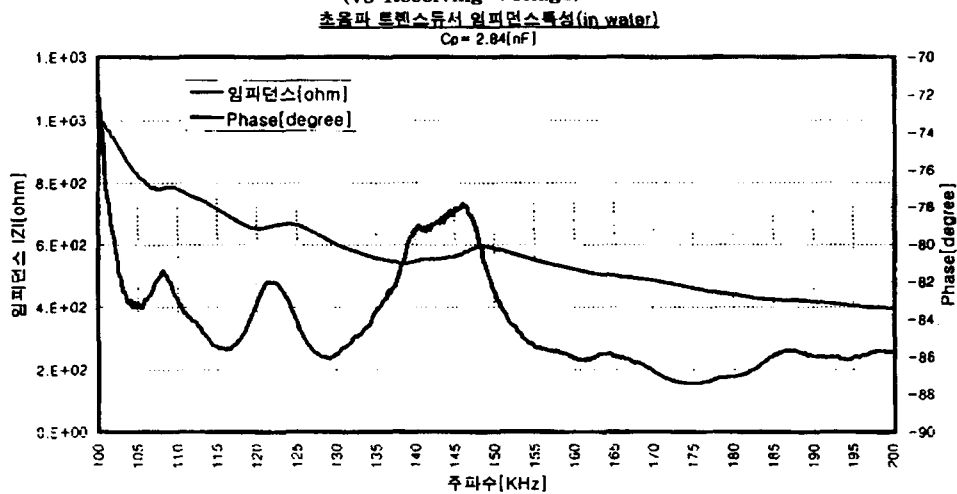


Fig. 3 Impedance Characteristics of Transducer in water

다. 보드 및 영상정보에 관련된 초기화가 끝나면 매번 1초마다 획득된 영상을 화면에 보여주고 JPEG 압축을 행하여 수중영상 전송시스템의 주 제어장치로 전송해준다. 한편, 2~3시간의 AUV의 작업시간동안의 화상정보를 백업하기 위한 방편으로서 매초마다 획득된 정보는 파일로서 계속 저장할 방식을 사용하여, AUV가 임무를 수행하고 난 뒤 영상정보를 얻을 수 있도록 하였다.

3. DSP(Digital Signal Processing) 보드

초음파를 사용한 데이터 통신은 수중의 열악한 환경으로 인해 데이터의 오류가 많이 발생하게 된다. 따라서, 보다 강한 시스템으로 만들기 위해 Viterbi 코딩 알고리즘을 사용하여야 한다. 또한 수면, 해저면, 배의 표면, 파도, 파도의 부서짐에 의한 거품등으로 인해 초음파 신호는 여러경로를 통해 들어오게 되는 다중경로 구조를 갖게 된다. 신호에 대한 다중경로 구조에 대한 수학적 해석은 본 학회에 기존에 발표되었으므로[8] 여기서는 생략하기로 하고, 앞서 발표된 논문의 수학적 해석을 기반으로 다중경로의 영향을 상쇄하기 위하

여 FIR 필터구조를 갖는 적응동화기를 사용하여야 한다.

이 Viterbi 코딩과 적응동화기 방식은 모두 소프트웨어적으로 처리가능하며, 수중영상 전송시스템은 보다 빠르고 효율적인 데이터 전송이 이루어져야 하기 때문에 주제어장치에 대한 속도 부담을 줄이기 위해 DSP 보드를 사용하여 구현한다. 현재는 Viterbi 코딩 알고리즘과 적응동화기 구조에 대한 연구가 진행되고 있으며, 연구결과가 나오면 바로 시스템에 적용시킬 예정이다.

4. QPSK 변·복조 회로

JPEG 보드로부터 얻어진 화상 정보 데이터는 아날로그 신호처리를 거쳐 초음파 트랜스듀서를 통해 전송된다. 이 때, 수중에서의 전송되는 데이터는 표면이나 해저의 반사로 인한 다중경로와 신호의 Fading 등의 영향으로 정보를 손실하게 된다. 또한, 수중에서의 데이터 전송을 위해서는 수중에서 신호의 전송손실이 적은 초음파를 이용하여야 한다. 그러나, 초음파를 이용한 데이터 전송에는 초음파 트랜스듀서의 대역폭이 제한되어 있고 데이터를 전송하는데 걸리는 시간이 일반적인 통신에서 사용되는 매체보다는 길기 때문에 제한된 주파수 대역폭에서 높은 전송성능을 갖는 $\pi/4$ QPSK 변·복조 방식을 사용하여 시스템을 구성한다.

본 시스템에서 사용되는 $\pi/4$ QPSK 변·복조 알고리즘에 관한 연구는 기존의 논문에 발표되었으므로 여기서는 자세한 언급은 생략하기로 하고, 본 논문에서는 앞서 개발된 알고리즘을 이용하여 구현된 변·복조 회로에 대한 세부적인 설명 및 블록다이어그램을 중심으로 전개한다[8]. $\pi/4$ QPSK 알고리즘을 이용한 변·복조 시스템의 전체 구성도는 Fig. 4와 같이 구성된다.

Photo Coupler는 다른 시스템이나 보드에서 유입되는 잡음을 방지하기 위해 사용된다. 시스템과 입력 데이터와의 동기를 위하여 클럭 동기회로

를 구성하여 변복조 시스템의 클럭으로서 사용하고 있다. 클럭 동기회로는 Fig. 5처럼 구성되는데, 입력 데이터의 에지(Edge)를 추출하기 위해 4차 High Pass Filter를 사용하였고, 추출된 데이터의 에지로부터 잡음 에지를 제거하기 위해 전압 비교기를 이용하여 잡음의 낮은 전압의 에지를 제거하였다. 또한, 10MHz의 발진소자를 바이너리 카운터의 클럭으로 사용하여 4800bps의 시스템 클럭을 생성한다. 4800bps의 클럭을 생성하기 위해 데이터의 에지와 4800bps의 카운터를 한 그 결과를 이용하여 카운터를 리셋하여 계속적인 데이터 동기를 이루는 회로를 구성하였다.

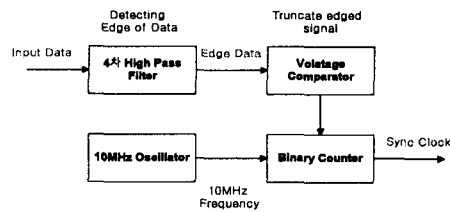


Fig. 5 Synchronization Circuit

QPSK 변조회로는 Fig. 6처럼 구성되는데 연속적인 두 비트의 데이터를 짝수 홀수로 나누어 고유의 위상정보를 주어 전송시켜 주는 것이다. 변조회로의 클럭은 위 그림에서 생성된 동기 클럭을 이용하고 PLL 회로와 카운터를 이용하여 sin/cos의 정보를 가지고 있는 ROM의 값들을 불러온다.

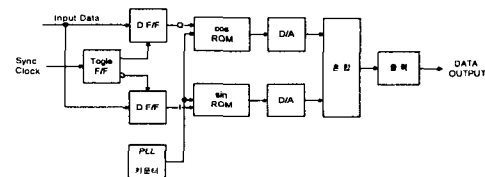


Fig. 6 Configuration of QPSK Modulation Circuit

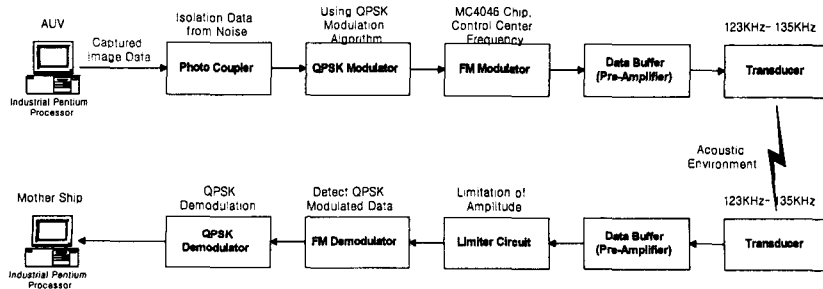


Fig. 4 Block Diagram of Modulator and Demodulator

Fig. 6을 통해 출력된 변조된 QPSK 신호는 FM(Frequency Modulation) 회로를 통해 센서의 중심주파수를 갖는 신호와 노이즈에 보다 강한 신호가 된다. FM 회로는 일반적인 FM회로에 사용되는 MC4046 Voltage Controller/FM Modulation 칩을 이용하였다. FM 회로는 Fig. 7과 같이 구성되며 회로내부의 가변저항을 조정하여 센서의 중심주파수 및 주파수 편이폭을 조정할 수 있게 설계되어있다.

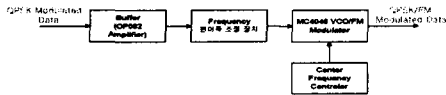


Fig. 7 FM Modulator Circuit

QPSK 알고리즘을 이용한 복조시스템은 Fig. 4의 그림과 같이 구성된다. 초음파 트랜스듀서를 통해 들어오는 신호는 반사로 인한 다중경로의 영향과 주변잡음 등으로 인해 출렁임이 발생한다. 이 출렁이는 신호 즉 AM성분을 제거하기 위해 리미터 회로를 이용하는데, 리미터 회로는 일반 증폭기를 이용하여 구성되는데 한 단에서 얻는 이득이 낮기 때문에 본 연구에서는 5단으로 구성된 리미터 회로를 사용하였다.

또한 AM성분이 제거된 신호로부터 QPSK 변조된 신호를 검출하기 위해서는 FM 변조된 신호를 제거해야 한다. 이는 FM Demodulator를 이용하여 FM 신호를 제거하는데 복조회로에서도 변조회로와 마찬가지로 MC4046칩을 사용하여 구현하였다. 복조회로에도 데이터와의 동기를 위해 동기회로를 사용하며 Fig. 5와 같이 구성한다. 동기화된 클럭은 QPSK Demodulator에서 사용된다. QPSK Demodulator의 회로는 Fig. 8과 같이 구성된다.

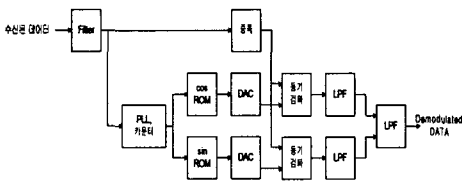


Fig. 8 Configuration of QPSK Demodulation Circuit

IV. 실험 및 결과

본 논문에서 구현한 초음파 수중영상 전송시스템은 세부 시스템별로 초음파 트랜스듀서의 대역폭 성능시험, 변·복조시스템 성능시험, 수중영상 압축시스템의 인터페이스 및 기능시험 및 영상을 전송하여 수신측 모니터에 디스플레이하는 기본 실험을 수행하였다.

초음파 트랜스듀서의 대역폭 성능시험은 우선 센서를 4회에 걸쳐 제작하여 성능시험을 수행하였다. 초음파 수중영상 전송을 하기 위해서는 일반적으로 대역폭이 넓고, 전송에 있어 송수신 민감도가 좋은 센서를 설계·제작해야 하므로, 시중에서 구입 가능한 센서를 선정하여 적용하는 방안이 용이하지 못했다. 따라서 (주)신창에서 센서를 제작하여 2회에 걸쳐 대역폭 성능시험을 수행하였다. 대역폭 실험 결과 대역폭이 123KHz에서 135KHz사이에 약 12KHz의 넓은 주파수 대역폭을 가지고 있었으나, 127KHz에서 Notch가 생김에 따라 사용 가능한 대역폭이 8KHz 정도였으며, 최근에는 수중에서의 민감도를 보완하기 위하여 정합층을 부착한 센서를 설계·제작하여 중심주파수가 146KHz이고 주파수 대역폭이 10KHz인 성능을 가진 센서를 본 시스템에 사용하게 되었다.

변·복조 시스템으로서는 $\pi/4$ QPSK 방식과 FM 방식을 채택하였고, 제작한 전단증폭장치 및 변복조 시스템을 수조에서(30m거리) 실험한 결과는 Fig. 9와 같고 이 시스템의 제작된 보드는 Fig. 10과 같다. Fig. 9 그림은 QPSK 송신신호(위)와 QPSK 신호를 PLL에 거치게 한 다음 포락선 검파기를 거쳐 FM에서 AM 성분으로 변환시킨 신호이다.

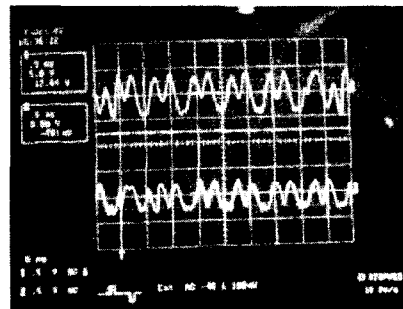


Fig. 9 QPSK Modulation and Demodulation Data

수중영상 압축시스템으로서는 상용화된 JPEG 보드를 사용하였으며, 보드에서 제공하는 각종 라이브러리 함수들을 이용하여 PC와 인터페이스

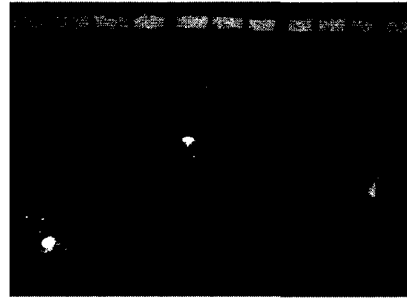
이스 하였다. 카메라를 통해 획득된 수중영상은 14.75MHz로 샘플링되고 30대 1로 수중영상을 압축하였다. 카메라로부터 획득된 영상은 320*240의 크기를 갖으며 8 비트 Gray level로 획득된다.



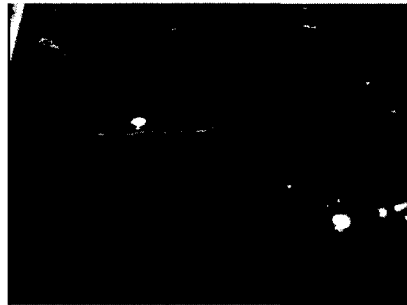
Fig. 10 Modulator and Demodulator of QPSK and FM

마지막으로 변복조시스템에 수중 카메라탑이 AUV의 수중모습을 촬영한 수중영상을 기본 영상 포맷인 BMP로 변환한 후, BMP파일에서 헤더정보를 제외한 RAW 데이터를 전송하여, 초음파를 이용한 영상통신에 대한 기초실험을 수행하였다. 실험은 해양공학수조에서 행해졌으며 센서간의 거리는 약 10m 깊이는 1m에 중심주파수가 146KHz 인 센서를 설치하였다. 수중영상은 320*240의 8비트 그레이 영상을 보냈으며, 보내는 방법은 한 열(320픽셀)씩 240번을 보내는 방법을 취하였다. 이 실험은 VORAM에 탑재되는 PC에서 RS232로 변복조 보드로 데이터를 보내면 수신용 PC에서는 수신된 신호를 RS-232로 받아서 화면에 디스플레이 하는 실험을 수행하였다. 이 실험으로부터 구현된 시스템 9600bps의 높은 전송능력을 갖는다는 것을 확인할 수 있었으며, 또한 수조에서 인위적으로 만든 파도(조파기 장치가 수조에 설치되어 있음.)하에서도 실험을 수행하였는데, 보다 안정된 화면을 받을 수 있었다. 이 실험에 관련된 그림은 Fig. 11과 같다. (a) 그림은 VORAM에 탑재되는 센서의 설치모습이고, (b) 그림은 수상에 설치되는 수신용 센서, (c) 그림은 송신용 변복조 보드, (d) 그림은 수신용 변복조 보드, (e) 그림은 수신된 수중영상을 모니터에 보여주는 모습이다.

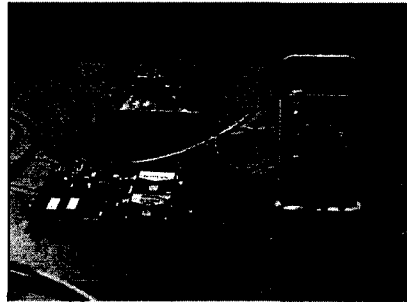
앞으로의 계획은 수중영상 압축보드를 PC와 인터페이스 하여 실제 압축되는 데이터를 전송함으로써 보다 실시간적인 수중영상 전송시스템이 되도록 할 예정이며, 또한 Viterbi 코딩, 적응 등화기에 대한 연구를 계속하여 보다 높은 성능을 갖는 시스템을 구현할 예정이다.



(a) VORAM Transducer



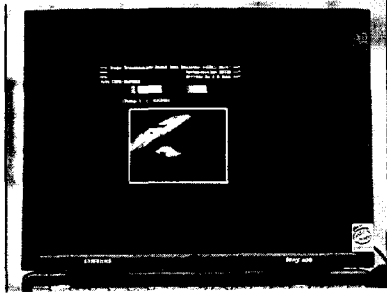
(b) A Transducer of surface unit



(c) VORAM Modulator Board & Pre-amplifier



(d) Demodulator of surface unit



(e) An received underwater image

Fig. 11 Experimental Picture of An Underwater Image Transmission System

후 기

본 연구결과는 과기처의 출연연 기관고유 사업의 일환으로 수행된 "200m급 탐사용 AUV" 과제의 연구결과의 일부임을 밝혀 둔다.

참 고 문 헌

- [1] "200m급 탐사용 AUV 개발 VI", 한국기계연구원 KRISO 연구보고서 UCN038-2064·D, 1997.12
- [2] KDD, "무삭식 수중 로봇용 수중화상 초음파 전송시스템의 개발", 1995
- [3] DSP56000/DSP56001 Digital Signal Processor User's Manual, (DSP56000UM/AD), Motorola Inc., 1989
- [4] Convolutional Encoding and Viterbi Decoding Using the DSP56001 with a V.32 Modem Trellis Example, DSP56001/DSP56002 Application Notes, APP6/D, Motorola Inc., 1989
- [5] William S. Burdic, "Underwater Acoustic System Analysis : Second Edition", Prentice Hall Inc., 1991, pp.57~84
- [6] ATM-800 Series Acoustic Telemetry Modules User's Manual, Datasonics, Oct. 1995
- [7] Snapper Developer's Manual, Active Imaging Limited, 1996
- [8] 임용곤의 3인, "Multipath를 고려한 수중 초음파 통신시스템의 구현", 한국해양정보통신학회논문지, 제1권, 제1호, Sep. 1997, pp.95~104