

技術解説

수중음향통신

- Underwater Acoustic Telemetry -

송 화 천
(한국해양연구소)

I. 서 론

해양에서 잠수정(submersibles) 및 수중 센서(sensor)로부터의 음향 무선통신(acoustic telemetry)은 해양에서 음파를 이용한 신호전달이 가능함이 밝혀진 이래 꾸준히 연구가 진행되고 있는 첨단분야이다. 과거에는 잠수함의 운용과 관련하여 주로 해군에 의해 그 필요성이 제기되었으나 현재는 상업적인 활용을 위한 수요가 급증하고 있다. 해양구조물은 점점 더 수심이 깊은 곳에 설치됨으로서 잠수부를 투입하는 것은 대단히 위험하고 비용이 많이 들게 되었다. 따라서 무인 잠수정이 사용되거나 추진되고 있다. 심해에서는 잠수정이 유일한 작업 수단으로서 케이블에 의해 해상의 모선과 연결될 경우 심하게 구축을 받게되며 활동범위가 통신시스템의 능력에 결정된다. 해양자료의 획득에 있어서도 케이블에 의존할 경우 비용이 많이 들고 케이블의 피로현상 및 어선이나 선박에 의한 파손 및 분실 가능성 때문에 어려움을 겪게 된다. 또한 저장된 자료를 얻고자 하는 경우에는 해양장비의 주기적인 회수 및 재설치가 요구된다. 따라서 음파를 이용한 자료전송이 특히 실시간 자료를 얻을 수 있다는 점에서 널리 활용되고 있는데, 이때 요구되는 것은 신뢰도가 높으면서도 빠른 전송이다.

그러나 해양은 빠른 전송을 달성하기에는 대단히 어려운 매질이다. 자료의 빠른 전송을 위해서는 밴드폭(bandwidth)이 크거나 또는 통신채널이 투명(clean)

해야 하는데, 고주파에서 음파에너지는 흡수되어 사용 가능한 밴드폭이 제한되고 또한 해양은 시간 및 주파수 확산(spreading)을 동반하면서 심하게 울리는 잔향채널(reverberant channel)로 알려져 있다. 이와 같이 까다롭고 복잡한 해양환경이지만 최근의 VLSI, 고밀도 power supply 등 하드웨어의 발전과 더불어 무선음향통신에 대한 수요가 급증하면서 여러가지 형태의 음향통신 시스템이 개발되고 있다. 본 연구에서는 수중채널의 특성 및 통신시스템에 미치는 제약, 개발된 시스템의 현황을 살펴보고자 한다.

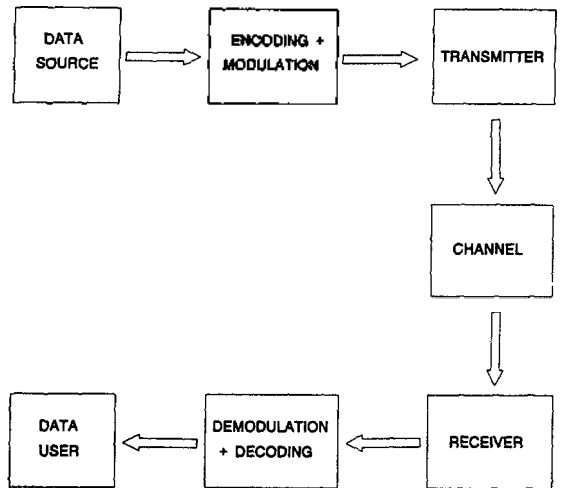


Fig 1. Canonical representation of a communication system

II. 수중통신 시스템

그림 1은 여러개의 요소로 구성된 표준 통신시스템 모델을 보여주고 있다. 이 시스템의 목적은 주어진 채널에서 data source가 data user에게 정보를 가능한 빨리 그리고 높은 신뢰도로서 보내고자 하는 것이다. 여기서 채널은 전파매질로서(본 보고서에서는 해양) 유한한 밴드폭을 갖고 있으며 감쇄, 소음 및 일그러짐(distortion) 등을 수반하게 된다. 따라서 전송 속도와 신뢰도 사이의 절충(trade-off)이 요구되며, 또한 제공되는 자료가 채널을 통하여 그대로 직접 전송될 수 있는 형태로 주어지는 경우도 매우 드물다. 채널을 효율적으로 사용하기 위해서는 일반적으로 코딩(encoding) 또는 filtering이 필요하고, 채널을 물리적으로 사용하기 위해서 중심주파수를 변환시키는 modulation 기법이 도입된다.

1. Data Source/Data Users

수중의 data source로부터 수중통신 시스템을 통하여 전달되는 자료는 일반적으로 다음의 세 종류가 있다.

1) 명령/제어 자료(Command/Control data) : 항해 및 장비의 상태와 같은 자료로서 해상의 사용자에게 필요하다. 요구되는 전송 속도는 약 100-1000 bit/s로 낮지만 잠수체의 완전무결한 상태와 관련되므로 낮은 오차확률 및 높은 신뢰도로 전송되어야 한다. 현재 몇가지 시스템이 존재한다.

2) 음향장비 : seismic profiler, 수직 및 sidescan 소나, 해저 지진계(ocean bottom seismometer), hydrophone 등과 같은 해양음향장비들은 모두 1-10 kbit/s가 요구된다. 또한 매우 낮은 속도로 영상정보를 전송 하는 경우에도 적용된다.

3) 고질의 영상자료 : 1024 × 1024의 픽셀과 8 bit gray scale의 고질 영상은 약 8 Mbits의 정보가 요구되지만 해양에서는 대개 명암이 낮으므로(low contrast) 약 1/4 Mbit 정도면 충분하다. 따라서 한 프레임 몇초동안에 보낼경우 10-100 kbit/s의 전송 속도가 요구된다.

음향 및 영상자료는 상당히 압축 시킬 수 있다. 언어(speech) 및 화상(picture image)의 압축을 위한 여러가지 알고리즘이 개발되었는데, 예를 들면 언어는 900 bit/s로 압축되며 그림은 픽셀당 2-3 bits로 압축되어도 선명도의 손실을 최소화 함으로써 여전히 인식이 가능하다.^[1,2](언어 압축에서 흔히 쓰이는 linear predictable encoding 기법이 탄성과 자료에 적용될 경우 약 1200 bit/s로 압축이 가능함)^[3] 그러나 압축 알고리즘은 자료를 공급하는 쪽의 상당한 계산 능력을 요구하게 된다. 예전에는 컴퓨터의 크기 및 필요한 파워 등으로 어려웠으나 최근의 강력한 마이크로프로세서의 등장으로 언어 및 화상 압축을 위해 개발된 많은 알고리즘이 활용될 수 있게 되었다.

2. 음향 채널(Acoustic Channel)

음향통신 시스템의 설계를 좌우하는 것은 음향채널의 특성이다. 기본적으로 중요한 네가지의 사항은 다음과 같다: 1) 기하학적인 확산 및 흡수에 의한 경로 손실, 2) 수중소음, 3) 다중 경로에 의한 잔향, 그리고 4) 상대적 운동에 의한 도플러 확산 등이다.

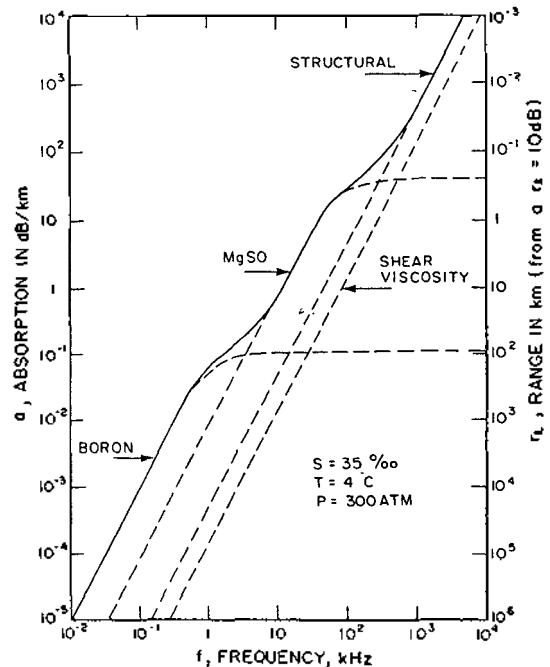


Fig 2. Volumetric absorption including all known relaxation processes(taken from Dyer, [5])

1) 경로 손실(Path Losses)

경로손실은 기하학적인 확산(geometrical spreading) 및 흡수(absorption) 메카니즘에 의해 발생한다. 대부분의 경우 주요한 전달경로는 direct 또는 Line of Sight(LOS)이므로 구면확산(spherical spreading) 모델인 $20 \log R \text{ dB re } 1 \text{ m}$ 이 적절하다. 흡수손실은 물에서 열로 빼앗긴 에너지 손실을 나타낸다.[4] 거리에 따른 손실은 주파수의 함수이며 그림 2에 보이는 바와 같다. 따라서 전체 경로손실 $TL(f)$ 는

$$TL(f) = 20 \log R + \alpha(f) \cdot R$$

이 식은 흡수손실이 시스템의 최대작동거리 또는 최고주파수를 좌우하며 따라서 특정한 거리에 대한 밴드폭을 결정하게 됨을 보여준다. 감쇄가 중요해지는 시점을 나타내는 유용한 기준 공식[5]으로는

$$\alpha(f) R < 10 \text{ dB.}$$

2) 수중소음(Ambient noise)

수중소음은 신호대 잡음비(SNR)에 영향을 주고 궁극적으로 자료의 전송속도와 신뢰도간의 절충점을 제한한다. 수중소음 레벨은 수중음향 시스템의 작동거리에서 대부분 주파수가 증가함에 따라 감소하며 그림 3은 전형적인 스펙트럼 분포를 보여주고 있다. [6] 천해에서의 소음레벨은 장소에 따라 크게 달라지며 연근해의 구조물과 관련된 인위적인(man-made) 소음은 그림에서 보는 바와같이 소음레벨의 엄청난 증가를 가져오게 된다. 일반적으로 인위적인 소음은 저주파수에 집중되어 있고 소음원의 위치가 파악되므로 앞서 언급한 경로손실을 고려하면서 가능한 높은 주파수를 선택하게 된다. 또한 고주파에서는 어레이의 빔폭(beamwidth)이 좁아지므로 소음원 방향에 의한 간섭을 용이하게 배제할 수 있다.

3) 잔향(Reverberation)

수중음향 채널에서 가장 극복해야 할 상황은 다중 경로에 의한 잔향이다. 표층과 해저면의 경계에서 에너지가 반사되고 수신기와 송신기 사이에는 여러개의 전파경로가 존재하게 된다(특히 음원이 point source일 경우). 게다가 불완전한 경계면은 문제를 더욱 복잡하게 만든다. 고주파에서 평탄치 않은 표층

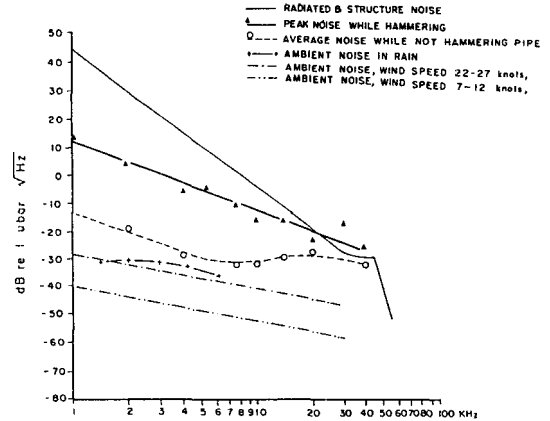


Fig 3. Ambient noise in man-made and natural environments.

과 해저면은 임의의 반향으로 반사를 야기시켜 신호의 coherence를 감소시키고, 해저를 투과한 에너지는 단단한 해저층에서 반사되어 돌아옴으로써 신호의 길이가 길어지게 된다. 일반적으로 이와 같은 현상을 모델링하기 위하여 EM 통신에서 유사한 다중 경로에 대해 개발된 scattering function analysis(산란함수 분석)를 도입하게 된다. [7,8] 예를 들면 채널의 산란함수와 송신된 신호의 ambiguity 함수와의 convolution은 탐지기법에서 기본적인 요소이다. [9] 주파수가 10 kHz 미만에서는 다중경로로 인한 충격신호의 시간확산(time spreading)이 천해에서 수백 millisecond (ms), 심해에서는 몇 초에 달한다. 그러나 대부분 다중경로가 여러개의 꾸러미들로 집중되어 있으며 그 각각은 단지 몇 ms 만 확산되므로 체계적인 신호의 설계가 이루어 질 수 있다. 고주파에서는 경계면에서의 흡수와 물 속에서의 감쇠로 인하여 전체적인 시간확산이 줄어든다. 수심이 낮은 천해(3-6 m)에서는 2-22 ms의 확산이 보고 되었으며 거리가 근접할수록 확산은 길어진다.

시간확산 채널에서 널리 이용되는 신호설계기법은 frequency shift keying(FSK)로써 다중경로가 우세한 경우에 음향통신을 위해 제작된 대부분의 시스템이 이 기법을 채택하고 있다. 일반적으로 이와 같은 시스템은 fading 영향을 제거하기 위하여 어떤 형태의 diversity를 도입하며 최근에는 더 일반적인 확산 스펙트럼기법(spread spectrum techniques)이 도입

되고 있다. 다중경로를 해결하는 또 다른 방법은 매우 좁은 빔을 사용하여 하나의 경로만을 선택하는 것이다. 이 경우 선형음향학(linear acoustics)을 적용하기 힘든 넓은 구경의 어레이 또는 비선형음향학(nonlinear acoustics)을 이용하여 고출력을 내는 parametric source가 요구된다. 좁은 빔과 관련된 어려움의 하나는 송/수신기가 서로 다른 방향을 바로보게 되는 "pointing error" 이다.

4) 도플러 확산(Doppler spreading)

송신기/수신기 간의 상대적 운동 또는 채널의 해수 유동에 의해 발생하는 도플러 변이(Doppler shift)는 $0.35 \text{ Hz}/(\text{kn}\cdot\text{kHz})$ (편도), $0.70 \text{ Hz}/(\text{kn}\cdot\text{kHz})$ (왕복)이다. 선박의 움직임과 같이 완만하게 변화하는 경우에는 도플러 변이를 쉽게 보정할 수 있으나 운동이 불규칙(random)할 경우에는 연속적인 확산(speading)이 발생하게 된다. 고속 통신시스템에서는 광역 빔폭이 요구되는데 이것은 중심주파수가 높을때만 가능해진다. 이 경우 큰 경로손실은 물론 높은 중심주파수에 비해 도플러 확산이 생긴다(예를 들면 $17.5 \text{ Hz}/\text{kn}$ at 50 kHz). 해양에서의 불규칙 운동은 특히 해수면 근처에서 높게 나타나며 쉽게 몇 노트가 되므로, 수중통신 시스템에서 흡수손실에 의해 크게 제약을 받고 있는 빔폭을 낭비하는 요인이 된다. 이는 guard band를 위한 여유가 필요한 FSK 시스템에서 더욱 중요하다. 1 kHz 미만에서의 실험결과에 따르면 해수 자체는 수십 millihertz order의 매우 낮은 도플러를 나타내므로 대부분의 도플러 확산은 송신기/수신기 간의 상대적 운동에 기인함을 알 수 있다. 고주파에서는 보고된 실험결과는 거의 없는데 이것은 파장보다 작은 스케일로 장비의 움직임을 제한하기가 대단히 어렵기 때문이다. 최근 천해에서의 실험은 66 kHz 에서 $10\text{-}60 \text{ Hz}$ 를 보이고 있는데 그 원인이 무엇이었던지는 확실치 않다.^[10] 도플러 확산 채널에서의 신호는 짧은 펄스(pulse) 이어야 한다. 이 경우 신호대 잡음비를 유지하기 위하여는 높은 진폭의 신호가 사용되며 결국 hydrophone을 구동시키는데 필요한 높은 전압은 종종 피크 파워 문제를 야기시킨다.

시간 및 도플러 확산은 수중통신 채널에서 중요한 요소로서 신호 설계시 고려해 주어야 한다. 다중경로의 영향을 배제하기 위해서는

$$1/W \gg L$$

여기서 L 은 다중경로 길이, W 는 신호의 밴드폭을 각각 나타낸다. 또한 도플러 확산을 배제하려면

$$1/T \gg B$$

여기서 T 는 신호의 길이, B 는 도플러 확산을 각각 나타낸다.^[9] 결국 통신채널에 대한 기본적인 물리량은 BL 의 곱으로써 이 값이 1 보다 큰 경우 "over-spread"라고 하며 채널을 성공적으로 이용하기 위해서는 적절한 신호의 설계가 요구된다.

3. Encoding and Modulation/Demodulation and Decoding

Encoding 작업은 data source의 비트 흐름을 modulation에 일치시켜서 통신 시스템의 신뢰성을 개선시킨다. modulation 작업은 encoder의 출력을 송신기 및 채널의 특성에 맞도록 일치시켜준다. encoding 방법은 정보이론분야에서 집중적으로 연구되고 있고 많은 알고리즘이 개발되어 있으나^[12,13] 현재 수중통신에 적용되고 있는 기법은 Hamming이나 대부분의 논리 코드(logic code)등 간단한 것들이다.^[14] 마찬가지로 modulation 기법은 디지털인 경우 amplitude shift keying(ASK) 및 FSK를 채택하고 있다.

음향통신에 적용될 수 있는 encoding 기법에는 block coding과 convolutional coding의 두 가지가 있으며 현재까지 개발된 거의 모든 시스템이 block coding을 사용하고 있지만 convolution coding도 많은 장점을 갖고 있다. coding 작업은 기본적으로 전송자료에 redundancy를 주어 시스템의 성능을 증진시킨다.^[15] 즉, 수신기에서 비트당 같은 SNR에 대해 최소의 오차 확률로 신호를 탐지할 수 있다.

수신기에서의 decoding 작업은 coding 선행작업을 역으로 해준다. 경우에 따라 많은 계산처리가 요구되지만, 수신기가 보통 해상에 있으므로 계산능력이 지원된다. convolutional coding에 대해서는 sequential decoding이나 maximum likelihood Viterbi decoding 같이 비교적 적절한 알고리즘이 성공적으로 도입되었다. 예를 들면 통신위성 시스템에서 자주 사용되는 Viterbi 알고리즘의 경우 적은 비용으로 3-5 dB의 성능개선을 얻을 수 있었다.^[16]

앞에 언급한 바와 같이 음향통신 시스템을 위한 modulation 기법은 최근에 phase 및 differential phase modulation 등의 기법이 도입되고 있지만 주로 amplitude modulation(AM)과 frequency modulation(FM)이 사용되어 왔다. AM 또는 ASK는 경로가 투명하고 잔향이 거의 없을 때(예를 들면 심해의 수직경로) 작동이 잘 된다. 대부분의 AM은 On/Off keying 방식이다. FM 또는 FSK는 연근해에서 발생하는 잔향채널과 acoustic release system과 같이 높은 신뢰도가 요구되는 경우에 사용되었다. FSK 신호의 demodulation은 시간 및 도플러 동조(synchronization)를 유지하는 문제가 어렵다. 시간 동조를 위해 자체동조코드가 제안되고 있지만 아직까지 실제로 활용된 적은 없고 도플러 동조의 경우는 송신신호에 또 다른 tone을 실려보냄으로서 쉽게 해결된다.

4. 송신기/수신기

송신기와 수신기는 보통 하나의 큰 transducer 혹은 hydrophone 또 작은 hydrophone 어레이(array) 등으로 구성된다. 여기서 우리가 관심을 가져야 할 두 개의 변수로는 power requirement와 directivity index(지향지수)가 있다. power requirement가 중요한 이유는 경우에 따라 확보할 수 있는 에너지가 작기 때문이다. 예를 들면, 리튬(lithium) D 건전지는 20-30 Wh의 에너지를 공급한다.^[17] 만약 data source가 추진되는 것이라면 통신 시스템에 소요되는 에너지는 추진에 필요한 에너지에 비하여 매우 작다. 그러나 data source가 장시간 동안 계류되는 해양자료 센서라면 통신 시스템이 파워의 상당량을 소모하게 될 것이다. 다행히 CMOS 기술은 전자제품에 소요되는 파워를 극소화 하였고 실제적으로 송신기의 모든 파워가 hydrophone의 파워 앰프에 사용된다.

송/수신기의 지향지수는 동방향의 송/수신에 대한 공간 해상도를 의미한다. 공간 해상도는 송신된 파워 및 수신기 이득을 송/수신기 간의 "line of sight" 방향으로 집중시킨다. 따라서 공간 신호처리 기법을 이용하면, 상당한 이득 또는 반대로 파워의 감소(예를 들면 10-30 dB)를 얻게 해준다. 지향성 송/수신기를 이용하는 가장 중요한 이유는 원치 않는 경로에 의한 잔향을 감소시킬 수 있다는 점이며, 결국 "깨끗한" 채널을 이룩하여 성능을 향상시킬 수 있다. 그러나 지향성이 좋은 시스템은 경우에 따라 위험할 수도

있다. 즉 운동체의 움직임 또는 표층 drifter의 표류 등에 의해 방향이 불확실할 경우 방향 지수가 너무 높으면 송/수신기가 다른 방향을 가리킴으로서 오차가 발생할 수 있다.

III. 현 황

수년 동안 여러가지 형태의 수중음향 통신 시스템이 탄생하였고 많은 이론적인 연구가 이루어졌다. 수중 음향전화 시스템은 전형적으로 8-11 kHz 밴드에서 작동하는 single sideband modulated (SSB) system^[18]으로 상당한 양의 파워(약 몇백 Watt)가 요구되지만 잔향효과가 최소인 심해에서는 수 km 까지 음성정보를 보낼 수 있다.

심해의 센서로부터의 자료통신은 일찌기 연속의 AM 및 FM 시스템을 사용할 수 있음이 증명되었다.^[19, 20] FM 시스템의 경우 500 Hz의 정격 밴드폭을 갖는 자료를 중심주파수 20 kHz로 modulation하였으며 선박에서 늘어뜨린 hydrophone에 의해 탐지되었다. 상당한 파워가 요구되므로 전송시간은 배터리의 능력에 달려있다.

잔향환경에서 AM 방식의 어려움 때문에 지난 20여년간 제작된 음향통신 시스템의 대부분 (FSK) modulation 방식이 사용되었다. 경우에 따라서는 신뢰성의 향상을 위해 간단한 코딩 기술을 도입하였으며, 보통 100 bit/s 미만이다. 표층에서 수중에 계류된 센서에 대한 명령시스템은 FSK 시스템을 사용한다. 수중센서 혹은 운동체로부터의 통신은 크기 및 파워의 제한 때문에 그 응용이 제한된다. 얼마전까지 최고의 자료전송속도는 FSK 그리고/또는 phase shift keying(PSK) 그리고 매우 좁은 빔폭을 발생시키는 parametric sonar를 사용하여 얻어진다고 보고되었는데,^[25, 26] 높은 SNR에서 초당 몇 kilobit까지 도달하였다. 이것은 좁은 빔폭을 이용하여 다중경로에 의한 잔향을 조절할 필요가 있음을 의미한다. 그러나 parametric sonar에서 요구되는 파워는 운용범위를 제한한다.

최근에는 선형음향학을 이용한 multiple frequency shift keying(MFSK) 시스템이 잔향채널에서의 통신을 위해 개발되었다. 이 경우 40 bit/s 이하로 전송속도는 낮지만 $10 \cdot E^{-6}$ 보다 작은 오차확률에서 작동되므로^[27, 28] 주로 wellhead 및 오일 분출방지 작업에

사용된다. MFSK 시스템은 짧은 거리에서 1200 bit/s의 속도로 사용되었다.^[29, 30] 최고 20 kbit/s의 속도로 알려진 전송기법은 phase shift encoding 방법을 사용하였다.^[31, 32] 이와같은 속도는 심해의 해저에서 표층으로 자료를 전송할 때 가능하다. 최근 일본은 "신카이 6500"의 심해 잠수정에서 찍은 칼라영상을 7 km 위의 모선에 16 kbits/s의 속도로 8초당 한 프레임 전송하는데 성공하였는데,^[35] 이때 영상자료 압축을 위한 영상코딩은 DCT(discrete coding technique)^[36] modulation 기법으로는 DPSK(differential phase shift keying)를 채택하였다. amplitude shift keying(ASK) 시스템의 경우에도 호수에서 600 bit/s의 속도를 얻을 수 있음이 보고되었고,^[33, 34] 공개되고 있지는 않지만 많은 국방용 시스템이 개발되었다.

이 밖에도 많은 이론적인 연구가 발표되었는데^[37-46] 많은 경우 통신이론 개념을 수중 채널에 적용하였다. 그러나 이 경우 수중채널 특성에 대한 여러가지 가정이 필요하다. 특히 잔향 및 다중경로 같은 채널특성에 대한 연구도 이루어 지고 있다. 그럼에도 불구하고 전자기파채널과 비교하여 수중음향채널에 관해서는 아직도 상당히 불확실성이 존재한다.

IV. 결 론

수중음향 통신시스템의 특성 및 그 개발 현황에 대하여 간략하게 살펴보았다. 해양은 시·공간적 변동성, 다중경로, 잔향, 음파의 흡수 및 산란 등 그 고유한 환경때문에 자료의 전송이 대단히 어려운 매질이지만 지속적인 연구의 결과로 많은 진전을 이룩하고 있다. 분명한 것은 더욱 빠른 전송속도에 도달하기 위해서는 아직 극복해야할 일이 많으며 최근의 VLSI 기술의 발전은 상황을 변화시키기에 충분하며 급속한 진전이 예상된다. 우리는 수중음향 통신분야에 대한 연구가 아직 미미한 실정이지만 장기적인 해양개발의 중요성에 비추어 볼때 기반기술로서의 수중음향 통신연구가 절실히 요구된다.

참 고 문 헌

¹ J. Makhoul, "Linear prediction theory: A tutorial review," *Proc. IEEE*, vol. 63, no. 4, pp. 561-581, Apr. 1975.

2. W. K. Pratt, *Digital Image Processing*. New York: Wiley, 1978.
3. T. Bordley, "Compression of ocean bottom seismometer data" S.M. thesis, Dep. Electrical Eng. Computer Sci., Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, MA, June 1980.
4. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound for Engineers*. New York: McGraw-Hill, 1965.
5. J. Dyer, subject notes for 1385: "Fundamentals of Underwater Sound Applications," Dept. Ocean Eng., Massachusetts Inst. of Technol., Cambridge MA.
6. C. S. Clay and H. Medwin, *Acoustical Oceanography: Principles and Applications*. New York: Wiley, 1977.
7. D. B. Heckman, "Offshore petroleum noise levels and acoustic communication reliability-Field data," in *Proc. Offshore Technol. Conf.*, OTC Pap. 1494, 1971.
8. R. S. Kennedy, *Fading Dispersive Communication Channel*. New York: Wiley, 1969.
9. H. L. Van Tress, *Detection, Estimation and Modulation Theory, Part III*. New York: Wiley, 1971.
10. Osborne-Hoffman, Inc., "Advanced underwater telemetry and voice sinks for inland and coastal waters research," Final Project Rep., NSF Award DAR 8009716, Feb. 1981.
11. R. P. Porter and R. C. Spindel, "Low frequency acoustic fluctuations and internal gravity waves in the ocean," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 61, no. 4, pp. 943-958, Apr. 1977.
12. R. G. Gallager, *Information Theory and Reliable Communication*. New York: Wiley, 1968.
13. J. Wozencraft and I. Jacobs, *Principles of Communication Engineering*. New York: Wiley, 1967.
14. E. E. Campbell, "Acoustic value operating system (AVOS)," in *Proc. Offshore Technol. Conf.*, OTC paper 1175, 1970.
15. J. F. Pieper, J. A. Proakis, R. R. Reed, and J. K. Wolf, "Design of efficient coding and modulation for a Rayleigh fading channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-24, no. 4, pp. 457-468, July 1978.
16. I. Jacobs, "Practical application of coding," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-20, no. 3, pp. 305-310, May 1974.
17. K. von der Heydt, Woods Hole Oceanographic Inst., personal communication.
18. A. Vine, "Present and prospective needs of submersibles for underwater telecommunication," in

- Present and Future Civil Uses of Underwater Sound*, NAS Book 309-01771-8, 1970.
19. W. Dow, "A telemetering hydrophone," *Deep-Sea Res.*, vol. 7, pp. 142-147, 1960.
 20. J. Ewing and D. Koelsch, Woods Hile Oceanographic Inst., personal communication.
 21. V. Aderson, "Notes on the theory of operation of the inter-ocean acoustic command receiver," Inter-Oceans Systems, Inc., San Diego, CA, 1794.
 22. D. Campbell, "Helicopter borne acoustic command control system for subsea installations," in *Proc. Offshore Technol. Conf.*, OTC Pap 1495, 1971.
 23. R. T. Troutnu, "Acoustic telemetry," *Oceanology Int.*, pp. 16-18, Jan. 1970.
 24. P. Hearn, "Underwater acoustic telemetry," *Oceanology Int.*, pp. 16-18, Jan. 1970.
 25. C. S. Miller and C. E. Bohman, "An experiment in high rate underwater telemetry," in *Proc. Oceans '72*, 1972.
 26. A. Quazi, D. Viccione, M. Lackoff, E. Gannon, and R. Kurth, "Results of high data rate underwater acoustic communication experiments," presented at the 9th Int. Congress of Acoustics, Madrid, Spain, July 4-9, 1977.
 27. D. Garrod, "Applications of MFSK acoustic communication systems," in *Proc. Oceans '81*, pp. 67-71, 1981.
 28. F. C. Jarvis, "Description of a secure, reliable acoustic system for use in offshore oil BOP or wellhead operations," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. OE-9, No. 4, pp. 253-258, October 1984.
 29. A. B. Baggeror, D. Koelsch, K. von der Heydt, and J. Catipovic, "DATS-A digital acoustic telemetry system," in *Proc. Oceans '81*, pp. 55-66.
 30. J. Catipovic, A. B. Baggeror, D. Koelsch, and K. von der Heydt, "the design and testing of a digital acoustic telemetry system," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. OE-9, No. 4, pp. 242-252, October 1984.
 31. G. R. Mackelburg, S. J. Waston, and A. Goldon, "Benthic 4800 bits/sec acoustic telemetry," in *Proc. Oceans '81*, pp. 72-78, 1981.
 32. P. O. Kearney, and C. A. Laufer, "SONARLINK-A deep ocean, high data rate, adaptive-telemetry system," in *Proc. Oceans '84*, pp. 49-54, 1984.
 33. R. S. Andrews and L. F. Turner, "On the performances of underwater data transmission using amplitude shift keying techniques," *IEEE J. Sonics Ultrason.*, vol. SU-23, no. 1, pp. 64-71, June 1976.
 34. "Investigations of amplitude fluctuations of high frequency, short duration sound pulses propagated under short range, shallow water conditions," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 58, no. 2, pp. 331-335, Aug. 1975.
 35. Hiroshi Ochi, Toshio Tsuchiya, Yasutaka Amitan :, "Study on color video pictures transmission by digital acoustic signal," PORSEC '92, OCEANS.
 36. N. Ahmed, T. Natarajan, K. R. Rao. "Discrete Cosine Transform," *IEEE Trans. Comput.*, vol. c-23, pp. 89-93, Jan.(1974)
 37. Y. F. Tarasyuk, "Transmission of information underwater," in *Pecodocha Informatsii Pod Vodoy* Moscow, 1974(translation Publications Research Service, Arlington, VA).
 38. S. Reiter, "Underwater acoustic telemetry," in *Proc. Offshore Technol. Conf.*, OTC Pap. 1174, 1970.
 39. J. E. Pieper, J. A. Proakis, R. R. Reed, and J. K. Wolf, "Design of efficient coding and modulation for a Rayleigh fading channel," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-24, no. 4, pp. 457-468, July 1978.
 40. V. Anderson, "Acoustic communication is better than none," *IEEE Spectrum*, vol. 7, pp. 63-68, Oct. 1970.
 41. A. Venetsanpoulos. "Signal design for active signaling under various SNR's at receiver input," *IEEE Trans. Commun. Technol.*, vol. CT19, pp. 646-659, Oct. 1971.
 42. A. Zielinski and L. Barbow, "Swept carrier acoustic underwater communications," in *Proc. Oceans '78* pp. 60-65, 1978.
 43. W. I. Gluth and C. E. Schund, "Analysis of an underwater DPSK telemetry equipment," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 64, supp. no. 1, p. S119, 1978.
 44. G. M. Walsho, A. P. Alair, and A. S. Westneat, "Establishing message reliability and security in an underwater command link," in *Proc. Offshore Technol. Conf.*, OTC Pap. 1095, 1969.
 45. S. D. Morgera, "Small submersible acoustic communications system design," in *Proc. Oceans '78*, pp. 66-71, 1978.
 46. T. Birdsall, "Acoustic telemetry for ocean acoustic tomography," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol. OE-9, No. 4, pp. 237-241, October 1984.

▲승 회 천

1978년 2월 : 서울공대 조선공학(학사)

1980년 2월 : 서울공대 조선공학 대학원(석사)

1990년 9월 : 미국 MIT 해양공학(박사)

1991년 1월~현재 : 한국 해양연구소 물리부 선임 연구원