한국음향학회지 제23권 제2호 pp. 134~145 (2004)

단측파대 변조방식의 수중 무선 전화기 제작 및 성능

Manufacturing and its Performance of the Underwater Wireless Telephone Using Single Side Band Modulation

윤 종 락*, 박 규 칠*, 박 문 갑**, 김 석 재**, 노 용 주***
(Jong Rak Yoon*, Kyu Chil Park*, Moon Kab Park**, Seok Jae Kim**, Yong Ju Ro***)

*부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부, **한국해양수산연구원, ***(주)지피에스코리아
(접수일자: 2003년 7월 31일; 수정일자: 2003년 10월 16일; 채택일자: 2004년 2월 12일)

본 연구는 수중과 수상의 송수신자 간의 음성 통화를 위한 수중 무선 전화기 설계 제작과 그 성능에 관한 연구이다. 배경잡음, 다중경로 및 잠수자의 흡배기음과 같은 수중음향통신채널의 변수들과 수중 무선 전화기의 통화성능과의 관계를 해석하여 단측파대 방식으로 시스템을 제작하였다. 반송 주파수는 배경 잡음에 대한 S/N비를 높이기 위해 약 33 kHz로 하였으며 송신 음압 준위는 131 dB re 1 μPa이다. 해양에서의 성능평가 결과 거리 300 m 이하에서 문장 이해도는 80% 이상이었다.
핵심용어: 수중통화, 수중전화기, 단측파대, 수중통신
투고분야: 음향 통신기술 분야 (6.3)

This study aims to develop the underwater wireless telephone system. The system is designed based on the underwater acoustic communication channel parameters such as ambient noise, multipath effect and diver breathing noise. The system adopts SSB modem and its carrier frequency is about 33 kHz in which ambient noise level is low and therefore a high S/N ratio is easily obtained. The source level of the transmitter is designed as 131 dB re 1μPa. Its intelligibility index of sentence shows as 80% or more in the range of less than 300 m in the sea trial.
Keywords: *Underwater speech communication, Underwater telephone, SSB, Underwater communication*
ASK subject classification: *Acoustic communication (6.3)*

I. 서 론

수중통신에서는 일반적으로 음파를 정보전달매체로 이용한다. 음파를 이용한 수중과 수상요원 간의 단측파대 방식의 수중 무선 전화기 시스템에 관한 국내 연구는 전무하고 투구식 잠수기 어업이나 테트라포트설치 등의 수중작업에서 일반 유선 전화기를 개조하여 사용하고 있는 실정이다[1].

수중 무선 전화기의 구성은 잠수자용 수중국, 수상요원용 수상국으로 구성된다. 수상국은 음성 입력 마이크, 변복조장치, 송수신용음향변환기 및 음성 출력 스피커로 구성되며 전원의 제한점을 받지 않는다. 반면 수중국은 수중의 잠수자가 사용하는 장치로 음성 입력 마이크, 변복조장치, 송수신용 음향변환기 및 음성 출력 스피커 즉, 청음기로 구성되며 내장된 건전지에 의해 전원의 제한점을 받는다. 아울러 수중국 구성품 중에는 호흡기 (Regulator) 만 부착되는 일반 잠수용 마스크 대신 발화가 가능한 공간이 있는 안면 마스크 (full face mask)가 필수적이다.

무선 수중 전화기는 1945년 미국 해군에서 UQC-1이라는 이름으로 처음 개발되었고[2] 1990년대에 여러 나라에서 민간용으로 연구 개발되었다. 대표적인 수중통화시스템에는 미국 OTS (Ocean Technology Systems)사가 개발한 제품명 "Buddy Phone", 이와 유사한 일본 Fuji사 제품, 미국의 Nautronix Helle사 및 Neptune사의 제품 등이 있다[3-6]. 모든 제품의 변조 방식은 저 전력 소모를 위해 단측파대 방식이고 반송 주파수는 30 kHz 대역이다. 일반제품의 사용 수심은 스포츠다이버의 최대 잠수 수심인 40m로 되어 있으며 이러한 사용 수심의 제한은 시스템의 내압성 문제보다는 40 m 이상의 깊이에서 잠수병 예방을 위해 사용하는 헬륨가스 때문이다. 헬륨가스에 의한 비정상적인 음성은 통화 대상이 될 수 없기 때문이다. Nautronix Helle사는 40m 이상의 수심에서 헬륨

책임저자: 윤종락 (jryoon@pknu.ac.kr)
608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1
부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부
(전화: 051-620-6473; 팩스: 051-620-6470)

가스를 혼합한 산소를 호흡하여 발화하는 경우 발생하는 헬륨 음성의 명료도를 개선하는 Helium Speech Unscrambler를 개발하였다[7].

국내의 수중 무선 전화기 개발에 대한 연구는 전무한 실정이고 투구식 잠수기어업이나 테트라포트 설치 등의 수중구조물 설치 작업에는 일반 전화기를 개조한 유선식을 사용하고 있다. 유선식은 잠수자에게 공급되는 공기 주입 호스와 함께 신호선이 연결되어 있는 형태로 잠수자용 청음기 및 마이크는 동전형 변환기를 플라스틱 통 및 간이 접착제로 밀폐한 구조이며 수밀이 보장될 수 없고 감도 특성에 대한 규격이 없는 것이다[1]. 일본의 투구식 잠수기어업에서 사용중인 유선식의 잠수자용 청음기 및 마이크는 ABS 타입 플라스틱캡에 내장되어 초음파 용접으로 밀폐한 형태이며 수밀 및 음향 특성이 국내 제품보다 양호하다[1].

수중 무선 전화기는 유선 전화기와 같이 기저대역(baseband) 전송 방법을 사용할 수 있으나 저주파수 대역에서는 주변 배경잡음이 높기 때문에 높은 송신 출력을 요하므로 잠수자와의 통신에는 적합하지 않다. 따라서 배경잡음이 높은 기저대역 전송방식의 결점을 보완하고 또한 전력 소모를 줄이기 위하여 단측파대 방식을 채택하고 있다[2-6].

이러한 수중통화장치의 개발을 위해서는 수중음향통신환경 연구, 전기적인 정보신호를 음향신호로 바꾸거나 음향신호를 전기신호로 바꾸는 전기음향변환기에 대한 연구, 원하는 정보추출을 위한 전자회로 하드웨어 및 소프트웨어 설계 연구가 병행되어야 하며 더불어 시스템을 장착할 수 있는 발화용 마스크 제작연구가 병행되어야 한다. 즉, 통화 가능한 거리, 채널수, 음향변환기의 지향성에 의한 통신불능 범위, 마스크 내 흡배기에 의한 기류음의 영향 등이 시스템의 설계, 제작 단계에서부터 고려되어야 한다.

본 논문은 해양음향 배경잡음, 발화용 마스크의 흡배기음 특성 등을 측정 분석하고 송수신용 초음파 변환기의 감도 등을 고려하여 국내에서 개발된 바가 없는 단측파대 방식의 저전력 수중 무선 전화기를 설계, 제작하여 그 성능을 평가한 연구이다.

II. 수중전화기 시스템 설계 변수

2.1. 시스템 설계 지배방정식

2차 세계대전 중에 수식화된 소나 방정식은 음향통신 환경 파라미터와 음향장치의 설계 및 운용과의 관계를 해석하는데 필수적이다. 그림 1에서 보이는 수중 무선 전화기에 적용되는 수동 소나 방정식은 식 (1)로 주어진다[2].

$$SL - TL = NL - DI + DT \quad (1)$$

여기서,

SL : 음원준위 (Source Level)
TL : 전파손실 (Transmission Loss)
NL : 잡음준위 (Noise Level)
DI : 지향지수 (Directivity Index)
DT : 탐지문턱준위 (Detection Threshold)

식 (1)의 모든 양은 dB로 주어지며 SL, DT 및 DI는 무선수중통신시스템의 전기음향변환기 특성에 좌우되며, TL은 해양환경에 의해, NL은 장치의 잡음과 해양환경잡음에 의해 좌우되는 변수이다.

또한 식 (1)에서 SL-(NL-DI+DT)는 FOM(Figure of Merit)으로 정의되고 무선수중통신시스템과 같은 시스템의 성능을 계수화하는 중요한 파라미터가 된다.

$$TL = SL - (NL - DI + DT) \quad (2)$$

즉, FOM은 식(2)와 같이 전달손실과 일치하므로 수중무선통신시스템의 최대 통화 가능 거리를 결정하는 기준이 된다.

2.2. 수중통신환경

2.2.1 배경잡음

무선수중통신시스템의 통화품질을 결정하는 잡음준위 NL은 전화기 시스템의 열잡음, 해양음향환경의 배경잡음, 해면 및 해저에 의한 복반사에 기인되는 잔향잡음 및 해면교란에 의한 도플러효과가 원인이 되는 주파수 대역 확산 잡음 등이 있다. 이들 중 가장 중요한 성분은 배경잡음으로 심해에서는 통행 선박과 해상 상태에 의해 잡음 크기가 결정되고 수중전화기가 주로 활용되는 천해에서는 이들 요인 외에 육상의 산업시설에 의한 수중 전파음과 천해의 다양한 해양생물에 의한 소음에 의해서 배경잡음 크기가 결정된다[2].

그림 2는 2000년 5월 6일, 5월 28일, 10월 7일, 10월 14일에 실시한 거제 장목지역 및 통영 잠수기 조업 구역의 수중 배경잡음의 평균적인 스펙트럼 특성이다. 측정 당시의 해상상태는 2이하였고 측정해역의 수심은 10~20 m이었으며, 수중청음기의 깊이는 5m이다. 그림에서

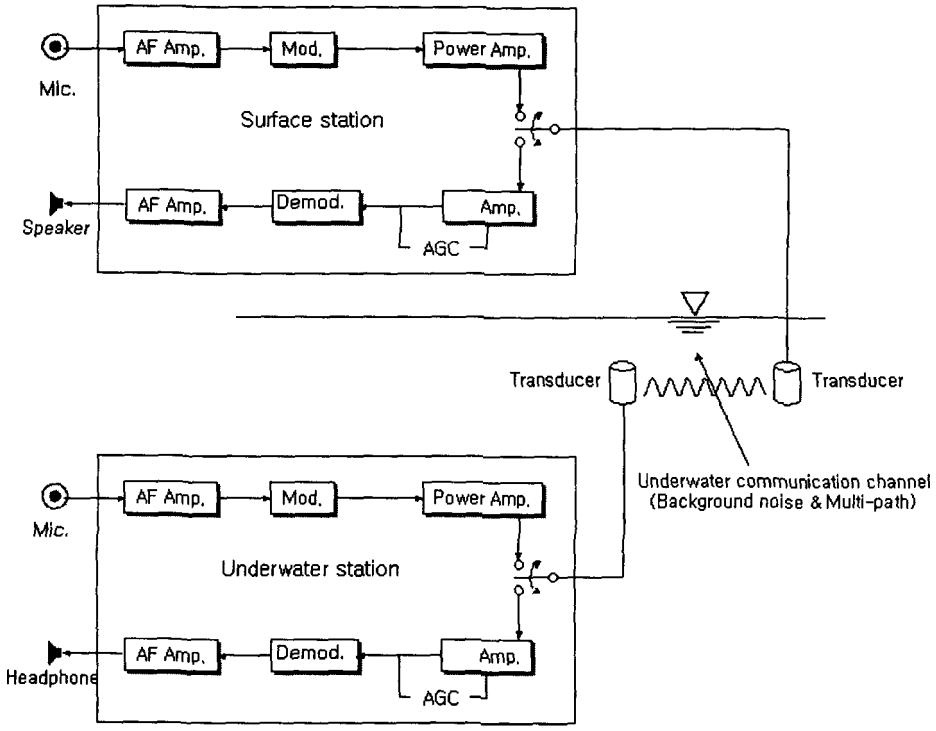


그림 1. 수중무선전화기 구성도
Fig. 1. Functional block diagram of the underwater wireless telephone system.

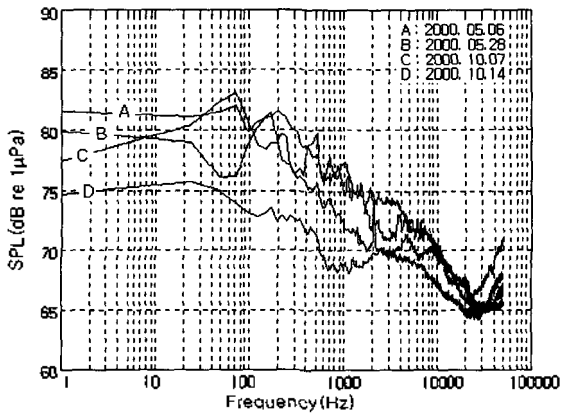


그림 2. 배경잡음 스펙트럼
Fig. 2. Spectrum of ambient noise.

보는 바와 같이 배경잡음이 상대적으로 낮은 주파수 대역은 20~40 kHz 부근으로 흡수손실이 무시될 수 있는 근거리 통화를 위한 반송주파수는 이 주파수 대역이 되어야 한다.

2.2.2 전파손실 및 다중경로

해양에서 음파의 전파손실은 거리에 따른 기하학적 확산손실과 흡수손실로 구성되고 기하학적 확산손실은 해면이나 해저의 경계가 없다고 가정하면 20 log r 이다. 그러나 해면과 해저로 경계지어져 있는 천해의 경우 흡수손실을 무시하면 음원으로부터 근거리에 위치하는 경우에는 전파손실이 20 log r로 근사되고 원거리인 경우 10 log r로 근사된다[2,8].

그림 3(a) 및 (b)는 30 kHz 버스트신호를 이용한 해면, 해저 반사파 특성 해석을 위한 실험 결과이다. 그림 3(a)는 해역수심 2m, 송신기 깊이 1.4m, 수신기 깊이 1m, 송수신기 수평거리 1m일 때로 시험해역의 저질이 펄인 경우의 특성이다. 그림에서 A는 직접파, B 및 D 이후는 해저 반사파, C는 해면 반사파, D는 측정시의 인근 선박에서 오는 반사파로 해저반사파는 직접파에 비해 20 dB이상 감쇠된다. 이 결과는 해저면 입사각도가 10°이고 저질이 펄인 경우, 24 kHz에서 반사 손실이 16 dB라는 기존 문헌의 결과와 일치한다[2]. 그림 3(b)는 동일한 해역의 수심 14m지역에서 송수신기 수평거리를 10m로 하여 측정한 결과이다. A는 직접파, B는 해면반사파, C는 수신기를 설치한 측정시의 측정 선박에서 오는 반사파로 해면 반사파의 경로는 직접파와 거의 같으므로 신호크기도 비슷하지만 C 이후에 측정되는 해저 반사파는 해저면 입사각도가 커져 (a)의 경우 보다 직접파에 비해 상대적으로 더 많이 감쇠된다.

그림 4는 그림 3(b)의 해역에 대한 음파전달 특성을 보

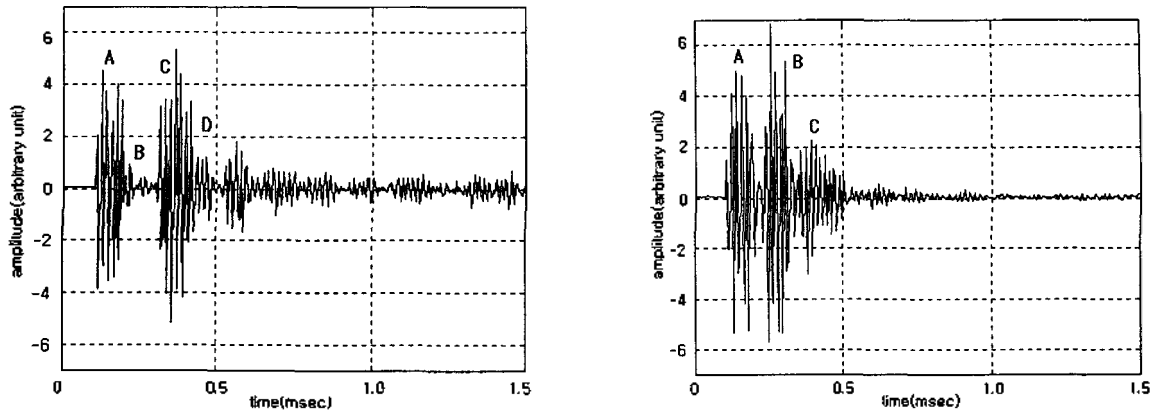


그림 3. 30 kHz 버스트 신호 수신파형
Fig. 3. Received waveforms of 30 kHz burst signal (sampling frequency: 100 kHz).

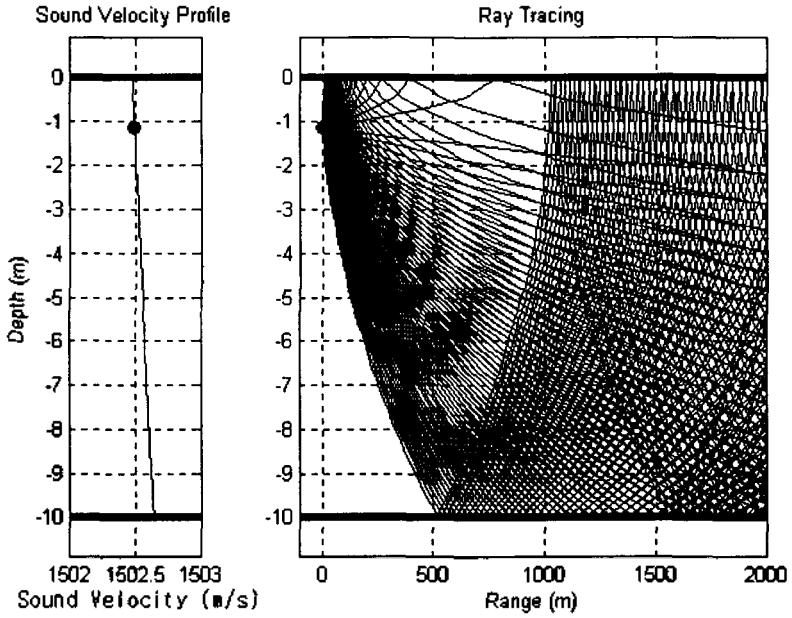


그림 4. 측정해역의 음선추적 결과
Fig. 4. Ray tracing result of the measurement site.

이는 음선 추적 결과이다. 수심 약 10m인 천해인 관계로 수심별 음파전달속도의 구배가 거의 없어 음파는 거의 직진성을 보인다. 그러나 그림에서와 같이 송신기의 빔 폭을 ±20°로 가정한 경우 수평거리 약 500m 이내에서는 음파가 전달되지 못하는 음영구역이 존재하며, 따라서 500m 이내의 해저면에서 작업하는 잠수자와 통화가 불가능하게 된다. 이러한 특성을 고려하면 수상작업선의 선저에 장착되는 송수신기용 음향변환기의 지향특성은 해저면과 수직한 방향을 기준으로 ±90°범위에서 무지향성으로 설계되어야 한다.

2.2.3 배기 및 흡기음 특성

헬멧이 있는 투구식과 달리 본 연구에서 대상으로 하는 헬멧이 없는 잠수자용 발화마스크는 잠수자의 안면을 완전히 감싸고 발화를 위한 공간이 있어야 한다. 헬멧이 없으므로 잠수자의 발성음이 귀로 궤환되지 않아 공기중의 발성조건과 다르다[9-12]. 또한, 제한된 공간으로 음향임피던스 조건이 공기중과 달라 마스크 공간의 공진주파수 이하에서 발성음이 공기중의 특성과 다르다. 이러한 영향을 줄이기 위해 마스크 공간을 증가시키면 마스크 내부 이산화탄소량을 증가시켜 호흡조건을 악화시킨다. 그러나, 가장 중요한 통화 품질 열화 요인은 수중작업자의 호흡시 발생하는 흡배기음이 잠수자의 마이크에 혼입

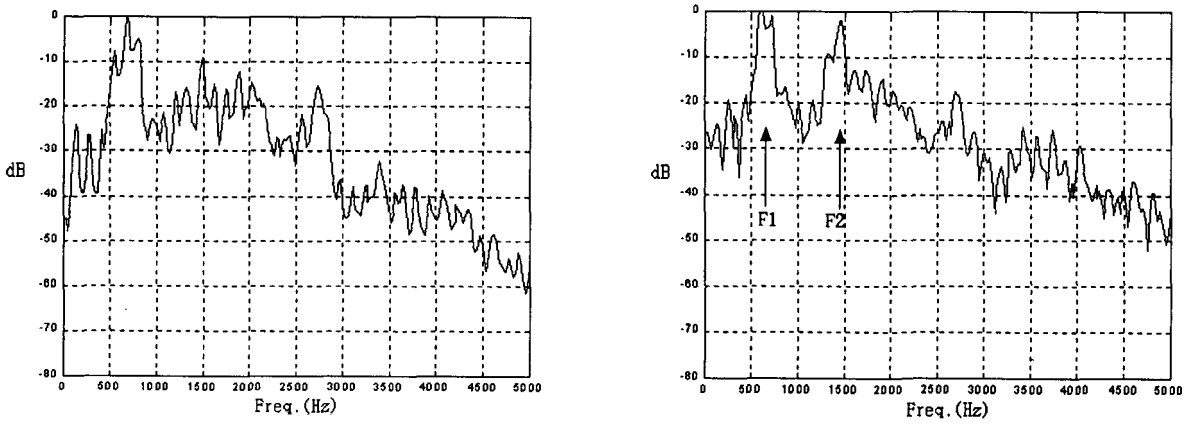
되는 것이다. 흡배기음과 같은 기류음은 일반적으로 광대역으로 알려져 있어 이러한 특성은 음성스펙트럼의 전체 주파수 대역에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 잠수자의 수중 발화 상태에서 흡배기음 특성을 실험·분석하였다. OTS 사의 Buddy Phone 과 이탈리아 제품 Interspiro Divator II 발화마스크를 사용하였고, 발화음은 수상국에서 수신된 음과 공기중 정상음을 비교 분석하였다. 그림 5는 흡배기음 특성으로 (a)는 호흡하면서 모음 "아"를 발성하는 경우이고 (b)는 호흡을 정지한 상태로 "아"를 발성하는 경우이다. 호흡하는 경우인 (a) 경우, 호흡정지시의 (b)에 비해 성도의 공진주파수인 F1의 대역이 넓게 되고 특히 F2의 준위가 약 10 dB 낮아진다. 따라서 마스크를 착용하고 발성하는 경우 가능한 호흡을 정지한 상태로 발성할 필요가 있다.

Ⅲ. 시스템 모의실험

2.2.1절에서 제시한 해양배경잡음특성으로부터 30 kHz대역은 배경잡음이 낮고 또한 주위 통행선박 등의 외부요인에 의해 잡음준위 변동이 심하지 않는 대역이다. 최저 준위를 보이는 주파수는 약 30 kHz부근으로 최적의 반송주파수 대역이 된다. 또한 수중작업자가 착용하는 수중장치는 필연적으로 배터리로 동작되어야 하므로 저전력 소모를 위해 단측파대 방식이 요구된다.

해저저질이 펄이나 모래해역에서 이루어지는 경우 II장에서 기술한 바와 같이 해저 반사파는 무시될 수 있으나 해면반사파는 반향음으로 통화품질에 영향을 미칠 수 있다. 이러한 해양음향 통신환경 인자들과 음향변환기 음원준위, 음성의 스펙트럼, 단측파대 변복조기 특성을 고려한 모의 시스템을 설계하여 MATLAB 의 Communication Tool Box를 이용한 수치모의 실험을 수행하였다. 음성의 대역은 일반적인 음성통화대역인 300 Hz ~ 3,000 Hz로 하였다.

표 1은 모의실험에 사용한 각 변수의 특성이다. 표 1에서 해면 및 해저의 음압 반사손실 (dB) 0, 6 및 ∞의 값은 각각 완전반사, 1/2반사 및 무반사에 대응된다. 송신기 깊이는 수상국의 송신기가 소형선박의 선저에 부착되는 경우를 가정하여 1.4 m로 하였고, 잠수자의 귀 옆에 부착되는 수신기 깊이는 해저에서 작업하는 잠수자의 작업자



(a) Spectrum of vowel "아" with breathing sound

(b) Spectrum of vowel "아" without breathing sound

그림 5. 발화마스크 착용시의 호흡음 특성
Fig. 5. Characteristics of breathing sound with a full face mask.

표 1. 모의실험을 위한 수중음향채널 변수
Table 1. Parameters of underwater acoustic channel for the simulation.

Parameters / Experiment	speech pass band (Hz)	water depth (m)	back-ground noise (dB)	bottom reflection loss (dB)	surface reflection loss (dB)	depth of trans-mitter (m)	depth of receiver	trans-mission loss (dB)	horizontal distance (m)
Experiment 1	300~3000	20	55	6	0	1.4	19	20 *log* r	50
Experiment 2	〃	〃	〃	∞	∞	〃	〃	〃	〃
Experiment 3	〃	〃	〃	6	0	〃	〃	〃	500
Experiment 4	〃	〃	〃	∞	∞	〃	〃	〃	〃

세를 고려하여 해저에서 1m 떨어진 19m로 하였다.

그림 6은 표 1의 실험 1과 3의 조건에 대한 수치모의 실험 결과이다. 각 그림의 왼쪽은 시간파형으로 발성음 "전화가 연결되었습니다"의 원음성, 단측파대 변조신호, 수신신호 및 수신신호의 복조신호를 보이고 오른쪽은 발성음 중 "가"부분에 대한 스펙트럼이다.

또한 각 그림의 (a)와 (b)는 해면과 해저의 반사특성이 동일한 조건에서 송수신기간의 거리가 각각 50m와 500m에 대한 것이다. 전체적인 특성은 500m 거리인 경우 50m 거리에 비해 구면전파손실이 20dB 높으므로 500m 위치의 신호가 약 20dB 낮게 측정되며 S/N비가 낮아진다.

수신되는 위치에서의 S/N비는 단어 이해도 및 문장이해도를 결정하며 이는 식 (1) 및 (2)에서 주어지는 탐지문턱준위 DT에 대한 기준이 된다. 기존의 연구결과에 의하면 S/N이 약 10dB일 때 단음절 이해도는 약 90%, 문장이해도는 약 98%이다[13]. 본 연구에서는 이를 기준으로 DT를 10dB로 설정하였다.

또한 그림 6(a)에서 보이는 바와 같이 직접파와 해저·해면 반사파 간의 시간지연 (직접파와 해면반사파의 시간지연: 약 1 msec)에 의해 복조된 음성 신호의 시간 파형 및 스펙트럼이 왜곡된다. 그러나 음성 신호의 직접파와 반사파 간의 시간지연이 35 msec 이하인 경우에는 청취 시 반사파들을 인지하지 않으므로[14] 시간지연이 35 msec 이하가 되는 천해에서는 다중경로의 영향보다는 배경잡음의 영향이 복조된 음성 신호의 통화품질을 결정하게 된다.

최대 500m까지 통화하는 경우를 가정하면, 식 (1) 및 (2)의 수동소나 방정식으로부터 송신기의 음원준위는 약 131 dB re 1μPa이 된다. 여기서 배경잡음은 실측 해역의 최대 준위인 67 dB re 1μPa, 탐지 문턱준위 DT는 10dB로 하였고, 지향지수는 0dB인 무지향성 송신기로 가정하였다.

IV. 제작 및 성능평가

4.1. 전기음향변환기

변조된 음파신호를 송수신하는 초음파 변환기의 송신 음원준위 및 지향성은 통신가능거리를 결정하는 변수이고 지향성은 특히 해면반사파 영향과 수중작업자와 수상 승조원간의 통신 가능한 각도 범위 즉 통신방향을 결정하는 변수이다.

그림 7은 수압, 수밀, 전기적 절연, 비중, 지향성 등을 고려한 초음파변환기의 설계도이다. 단위는 mm이고 원통형 형상의 단면으로 압전세라믹은 실린더 형태이며 중앙의 볼트는 축방향 수압에 대응하고 여분의 무게를 부가하도록 하여 수중에서 변환기가 안정한 자세를 취할 수 있도록 하기 위함이다.

코프렌은 절연기능외에 외부 수밀을 위한 에폭시 수지가 압전자의 진동을 방해하는 힘을 완화시키는 방진제로 작용한다. 압전변환기의 공기중 공진주파수는 볼트 등

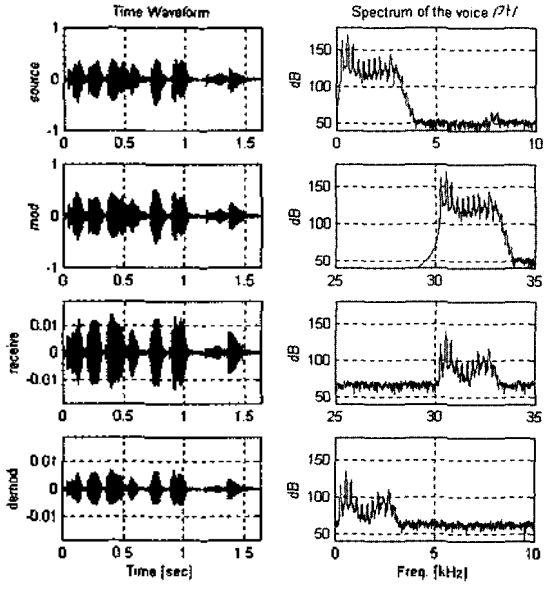


그림 6(a). 표 1의 실험1 결과, 음성신호: "전화가 연결되었습니다."
Fig. 6(a). Results of experiment 1 in the Table 1. Speech sound: "전화가 연결되었습니다."

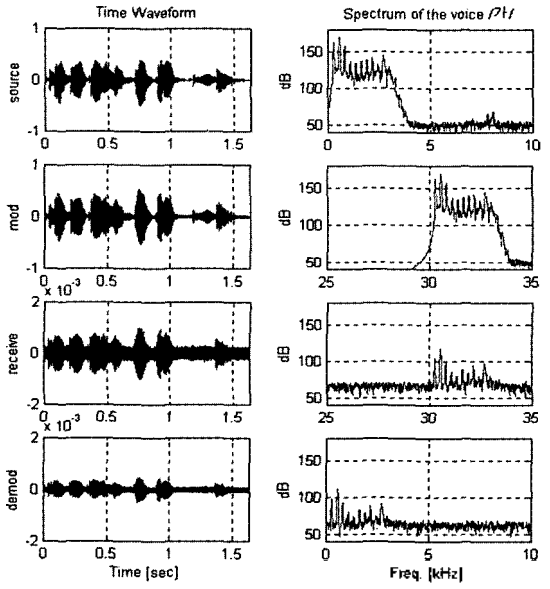


그림 6(b). 표 1의 실험3 결과, 음성신호: "전화가 연결되었습니다."
Fig. 6(b). Results of experiment 3 in the Table 1. Speech sound: "전화가 연결되었습니다."

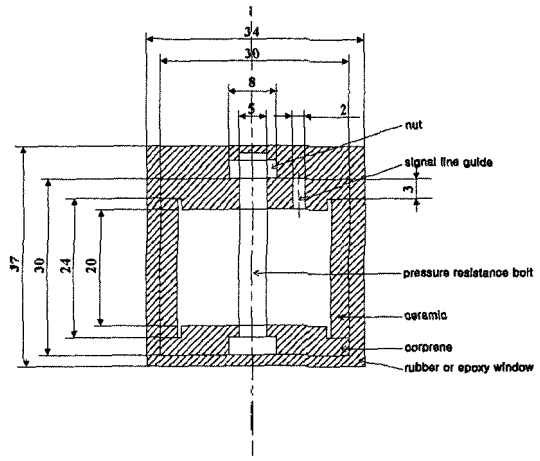


그림 7. 수중무선전화기용으로 설계된 변환기 구조 (단위: mm)
Fig. 7. Drawing of the designed transducer for underwater wireless telephone system (unit: mm).

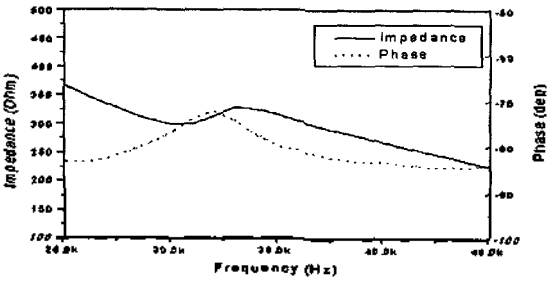


그림 8. 에폭시창으로 설계된 초음파 변환기의 임피던스 특성
Fig. 8. Impedance characteristics of designed ultrasonic transducer with epoxy window.

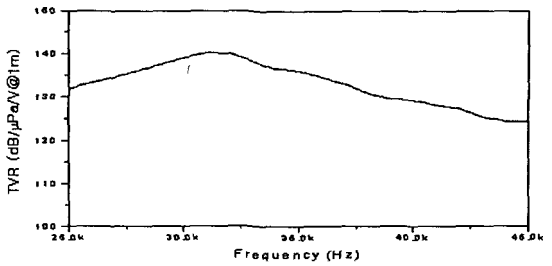


그림 9. 에폭시창으로 설계된 초음파 변환기의 송신전압감도
Fig. 9. Transmitting voltage response of designed ultrasonic transducer with epoxy window.

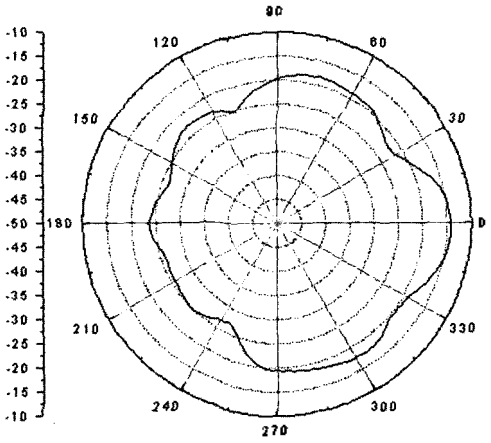


그림 10. 에폭시창으로 설계된 변환기의 지향특성
Fig. 10. Directivity characteristics of designed ultrasonic transducer with epoxy window.

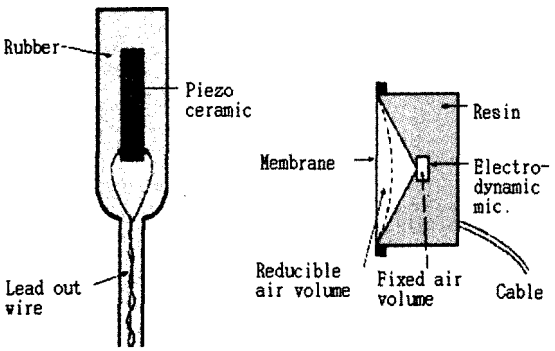
기계부재가 부가되지 않은 경우 압전세라믹의 물리적 크기에 좌우되며 회로망 분석기로 측정한 사용 압전자의 공진주파수는 약 36 kHz 이다. 그러나 기계부재가 부가되고 방사임피던스에 의한 부가질량 효과를 고려하면 공진주파수는 필연적으로 낮아지게 된다[13]. 본 연구에서 목표로 하는 30 kHz 대역의 높은 반송주파수에서는 방사임피던스에 의한 부가질량은 무시할 수 있어, 주파수 변화는 부가되는 기계부재인 볼트의 질량효과에 의해 좌우된다. 이 경우 수중의 공진주파수 ω_w는 식 (3)으로 주어진다.

$$\omega_w = \omega_0 / \sqrt{1 + m'/m} \qquad (3)$$

여기서, m: 압전세라믹 질량, m': 볼트 질량, ω_w: 수중 공진주파수, ω_0: 공기중 공진주파수이다. 제작된 변환기의 수중공진주파수는 음향창 (acoustic window)을 에폭시 수지로 한 경우 약 33 kHz로 공기 중에 비해 약 3 kHz 낮은 값이다. 공진 주파수에서의 수신전압감도 및 송신전압감도는 각각 -205 dB re 1μPa/1V, 138 dB re 1V/1μPa 이었다. 또한 공진 주파수에서 임피던스는 약 350 Ohm으로 변조신호의 출력임피던스와 정합시켜야 할 정합회로 설계 기준값이다. 그림 8, 9 및 10은 각각 임피던스, 송신전압감도 및 지향특성을 보인다. 음향축 방향인 0°를 기준으로 ±90° 범위에서 +3 dB 이내로써 무지향성 송신 특성으로 간주할 수 있다.

4.2. 잠수자용 청음기 및 마이크

잠수자용 마이크는 골전도형, 동전형, 후두접착형 3가지 유형이 있다[10]. 그림 11(a)에서 보이는 골전도형은 수압에 관계없이 일정한 감도를 갖지만 발성음이 압전세라믹을 진동시키므로 진동변위가 작아 감도가 동전형에 비해 떨어지는 단점이 있다. 반면 동전형은 그림 11(b)에서 보이는 구조로 마스크 내부에 장착되며 발성음이 직접 마이크의 얇은 진동막을 여기시키므로 감도면에서 가장 우수하나 마이크 내부를 해수로부터 보호하기 위해 수밀한 경우 수압에 따라 마이크의 진동막이 압력을 받으므로 압력에 따라 감도가 떨어지는 단점이 있다. 후두 접



(a) Bone conduction microphone (b) Moving coil microphone

그림 11. 2가지 서로 다른 형태의 잠수자용 마이크[10]
Fig. 11. Two different type of diver microphone[10].

착형은 압전세라믹을 후두부에 접착하는 것으로 감도는 골전도형에 비해 좋으나 발성음이 아니므로 일반적으로 사용하지 않는다.

동작원리에서 알 수 있는 바와 같이 동전형은 잠수자가 호흡할 때 발생하는 흡기음에 취약하고 골전도형은 배기음, 특히 배기할 때 발생하는 마스크 자체 진동과 수중 기포음에 의한 마스크 진동에 취약하다. 잠수자용 청음기는 해수에 노출되므로 골전도형이어야 한다. 또한, 잠수자의 청감은 외이에 잔존하는 공기의 진동이 고막으로 전달되는 성분보다는 귀 주위의 뼈로 전달되는 진동음 성분에 좌우되는 것으로 알려져 있다. 이러한 이유로 잠수 헬멧을 착용하는 경우 1 kHz에서 최소 가청음압은 헬멧을 착용하지 않는 경우에 비해 약 20 dB 높다[10,12]. 본 연구에서는 골전도형을 잠수자용 청음기 및 마이크로 채택하였으며 원판형 압전세라믹으로 제작하였다.

그림 12(a), (b) 및 (c)는 압전 세라믹을 이용한 잠수자용 마이크, 청음기 및 송수신용 초음파 변환기이다. 마이크, 청음기 및 초음파 변화기의 진동면은 RTV 고무로 하였고, 그 외의 부분은 MC-GP100 수지로 하였다.

4.3. 단측파대 변복조 회로

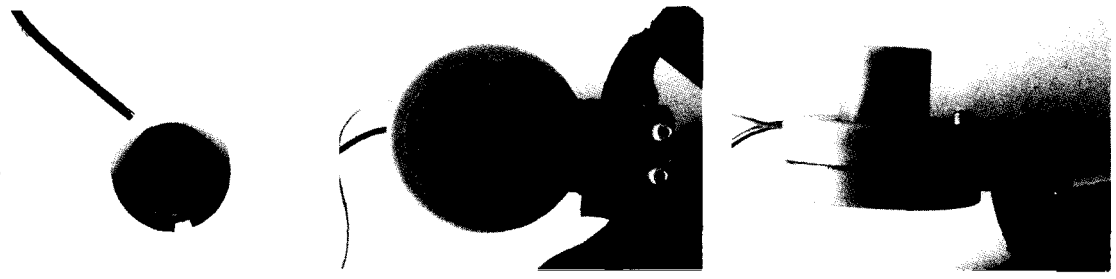
수중전화기의 수중국은 건전지를 이용하여 장시간 사용할 수 있도록 설계되어야 한다. 따라서, 변복조회로는 소비전력이 작은 단측파대 변조방식을 채택한다. 송신 출력이 약 131 dB re 1μPa이 되도록 하였다. 그림 13은 본 연구진이 제작한 단측파대 방식의 변복조 회로이다[1].

4.4. 발화용 마스크 제작

수중작업에 종사하는 잠수자에게는 마스크는 필수적인 장비의 하나이다. 수중 무선 전화기용 마스크는 기존의 외국제품을 사용할 수 있으나 가격이 비싸고 한국인의 얼굴형에 맞지 않는 단점이 있다. 이러한 점을 고려하여 설계 제작된 실리콘 재질의 마스크는 그림 14(a)에서 보는 바와 같고 세부사양은 다음과 같다.

(1) 접촉면의 부드러움과 내구성 및 미관 고려하여 재질은 실리콘으로 함
(2) 플라스틱에 비해 가격이 저렴하고 표면의 긁힘이 없는 열처리 강화 유리를 사용함
(3) 위쪽은 플라스틱, 아래쪽은 스텐레스 테로 하여 수밀성을 확보함
(4) 코와 입 부분과 눈 부분의 완전한 분리를 위한 스커트를 부착함
(5) 한국인의 얼굴형에 적합한 형태로 하기 위하여 기존 제품보다 코의 높이와 너비를 적게 하고 눈과 물안경과의 거리 단축으로 시야를 넓게 함
(6) 마스크 전면의 중앙에 호흡구를 위치시켜 명료도를 증대시키고 마이크는 오른쪽 옆에 부착토록 함.

그림에서 보이는 바와 같이 외견상 일반 마스크와 다른 점은 발화를 위하여 얼굴 전체가 마스크 속에 들어가는 동시에 호흡기와 마이크 연결구가 있다는 것이다.



(a) Microphone (b) Headphone (c) Ultrasonic transceiver

그림 12. 잠수자용 마이크, 청음기 및 송수신용 초음파 변환기 잠수자용 마이크
Fig. 12. Microphone, headphone and ultrasonic transceiver for diver.

4.5. 해상시험용 시작품

그림 14(a)는 수중국의 전체 시스템으로 변복조 회로를 수밀 상자에 에폭시 수지로 몰딩하였다.

잠수자가 송수신을 선택할 수 있는 송수신 절환 마그네틱 스위치가 외부에 돌출되어 있다. 마그네틱 스위치는 내부회로와 차단되어 있고 압력평형을 유지하도록 하여 수압에 관계없이 작동할 수 있도록 하였다. 또한, 그림 14(b)는 수상국의 전체 시스템 구성품을 보인다. 그림 15는 해상시험을 위해 잠수자가 시스템을 착용한 상태를 보인다.

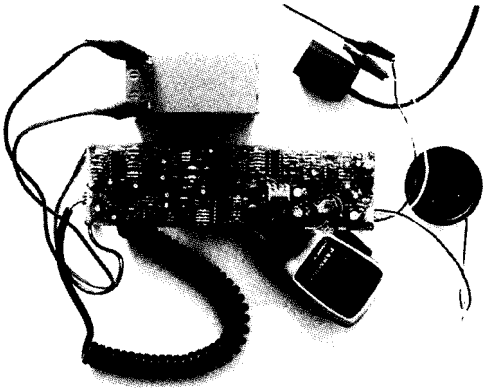
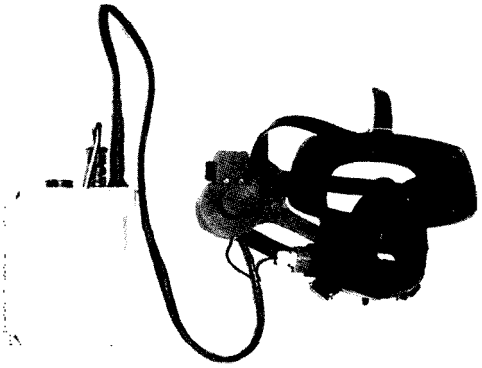
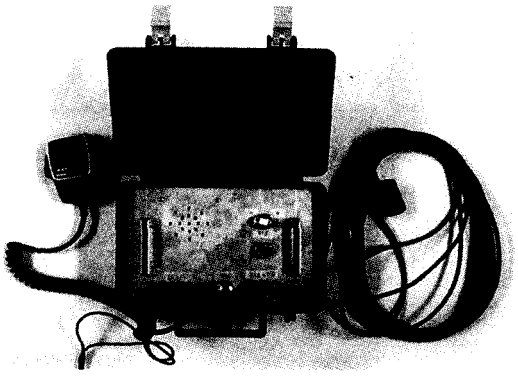


그림 13. 단측파대 모뎀 회로
Fig. 13. SSB modem circuit.



(a) Underwater diver station



(b) Surface station

그림 14. 수중국 및 수상국 시작품
Fig. 14. Prototypes underwater diver station and surface station.

4.6. 성능평가

4.6.1 시작품의 평가방법

본 연구에서 개발된 수중무선전화기 시스템의 통신 성능평가 방법은 일반화되어 있지 않으므로 일반 음성통신 시스템의 평가방법에 준하여 개발된 시작품의 성능평가를 하도록 한다.

시작품의 물리적 특성평가는 배경잡음 67 dB re 1μPa, 송신기 출력 131 dB re 1μPa로 하여 식 (1)과 (2)로 주어지는 FOM을 평가하였다. 아울러 수신음성의 파형 및 스펙트럼특성 변화를 해석하였다. 주관적 평가의 품질 평가 척도는 어떤 품질 조건을 측정하려 하느냐에 따라 달라진다. 단음절 명료도 측정에는 유선 전화기 명료도 측정을 위해 개발되어 있는 목록 (무의미 단음절 50개)중 하나를 선택하여 25개 음절의 목록을 만들어 사용하였고[15,16] 단어 이해도의 측정에는 국어 사전에서 무작위로 추출한 2~4음절 25개 단어를 사용하였다. 표 2와 3은 평가에 사용한 음절 및 단어 목록이다.

4.6.2 해상실험평가 결과

시작품을 사용하여 거제 해역의 잠수기 조업 현장 및 부산 용호만 해역에서 물리적 특성 평가 및 주관적 평가를 수행하였다. 측정 당시의 수중 배경 소음은 주파수 30

그림 15. 수중무선전화기의 수중국 해상시험 준비
Fig. 15. Underwater station sea trial set up of underwater wireless telephone system.

표 2. 명료도 평가를 위한 단음절 목록
Table 2. List of single syllables used for articulation evaluation.

렬	앗	딱	몽	궤
의	쉰	밧	출	헛
꼬	친	량	렷	더
뒛	핑	쌌	십	멸
떠	컷	꾸	뭐	홍

표 3. 단어이해도 평가를 위한 단어 목록
Table 3. List of words used for intelligibility evaluation.

가못기뭇	늦다	현대식	참밀	외용
낙방	로맨스	석권	철수	프로
밧줄	내접원	샐벌레	치마	콧날
자동	노목	병역	카르텔	러시아
타파	추국	여름	면접	횡령

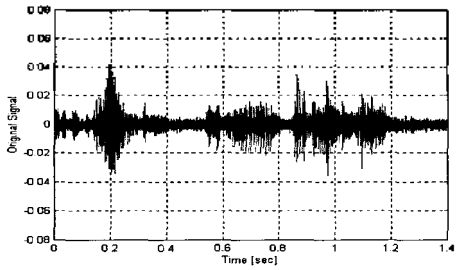
kHz 대역에서 57 dB re 1 μPa로 설계기준치보다 10dB 낮다. 주변 200m 이내에는 통행선박이 없었다. 수심은 8m 이었고 저질은 펄이었다.

물리적 특성인 최대 통화가능 거리 평가를 위해 소형어선에 수상국을 탑재하고 수중국을 착용한 잠수자와의 거리를 변화시키며 잠수자가 발성한 신호를 수상국의 초음파 수신기에서 측정한 변조신호, 수상국 청음기에서 측정한 복조된 음성신호를 분석하였다. 복조되기 전의 수신신호는 400m 거리에서 약 15dB의 S/N비를 보여 설계치 S/N비 보다 5dB 낮게 측정되었다.

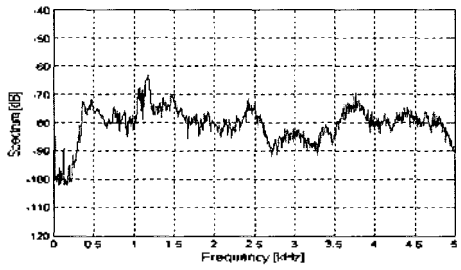
주관적 평가는 잠수자가 플라스틱 판에 적힌 평가용 단음절 및 단어를 읽도록 하였다. 이 때 발화시의 발성 음량은 통상의 대화 음량인 60dB±5[dBA] 이었고, 발화 속도는 약 3초 간격으로 자연스럽게 호흡하면서 발성하도록 하였다.

그림 16(a) 와 (b)는 공기중의 "망태내려"에 대한 시간 파형과 복조된 음성의 스펙트럼이고, 그림 16 (c) 와 (d)는 기관 정지 및 기관 가동시의 20 m, 50 m, 400 m에서 측정한 스펙트럼 특성이다. 20 m 및 50 m 자료는 공기중의 원음성 스펙트럼과 300 Hz~1.5 kHz 범위에서는 거의 일치하고 1.5 kHz 이상에서는 주파수가 높아질수록 큰 편차를 보이며 기관 가동시 더 큰 편차를 보인다. 400 m 자료는 전체적으로 스펙트럼의 왜곡이 심하다.

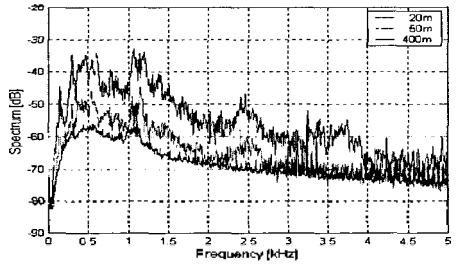
통화품질은 송수신기의 거리를 20m-400m까지 가변시키며 수상국과 수중국에서의 단음절 명료도와 단어 이해도의 주관적 평가를 하였다. 수상국의 평가는 수신한 잠수자 발성음을 일반 강의실에서 재생하여 정상적인 청력을 가진 평균 연령 30세의 남자 5명을 시험원으로 단음절과 단어의 청취율을 구하였다. 그 결과는 거리 300m의 경우 단음절 명료도는 22%, 단어 이해도는 63%로 나타났다. 따라서 기존의 연구 결과와 비교하면 본 시스템의 300m에서의 문장이해도는 80%가 된다[13]. 따라서 설계치 문장이해도인 98%보다는 18% 낮게 나타났다. 이러한 이유는, 물리적 평가에서 보는 바와 같이 복조되기 이전



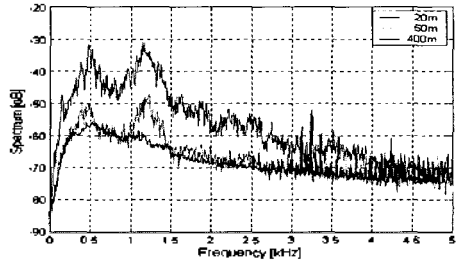
(a) Wave form of airborne speech



(b) Spectrum of airborne speech



(c) Spectra of system speech with engine stop condition



(d) Spectra of system speech with engine idle condition

그림 16. 전화기 음성과 공기중 음성의 비교, "망태내려"
Fig. 16. Comparison of telephone speech to airborne speech, "망태내려".

의 수신 신호는 400m 거리에서도 15dB의 높은 S/N비를 보이지만 흡배기음, 수상국을 탑재한 측정선의 기관소음 및 제작한 잠수자용 마이크의 주파수 특성의 비평탄성이 음성스펙트럼을 왜곡시키기 때문이다.

수중국의 잠수자가 청취하는 음성의 주관적 평가는 다수의 잠수자를 시험할 수 없는 현실적인 제약으로 인하여 측정용 표준 청음기 (B&K 8106)를 잠수자용 청음기 (headphone) 약 1 cm 위치에 두고 음성을 녹음하여 전술한 것과 동일한 방법으로 평가하였다. 거리 300m의 경우 단음절 명료도는 18%, 단어 이해도는 57%로 기존의 연구결과와 비교하면 문장 이해도는 약 70%로 수상국에서 잠수자의 발성음을 녹음하여 측정한 평가보다 낮다. 이것은 잠수자 청음기의 감도가 수상국의 청음기 감도보다 떨어지는 이유로 해석된다. 수상국의 송신기 출력은 건전지를 사용하는 수중국과 달리 송신기 출력에 제한을 받지 않으므로 수상국 송신출력을 높여 명료도 및 이해도를 향상시킬 수 있었다.

V. 결 론

개발된 무선수중 전화기 시스템은 단측파대 시스템이다. 수중용의 각 하드웨어 구성품은 내압성, 내수성을 고려하여 설계되었다. 수중초음파 변환기는 실린더형으로 축 방향으로 내부에 볼트를 삽입하여 외부압력이 분산되도록 한 구조로 제작되었고 절연 및 보호를 위해 에폭시 수지 혹은 MC-GP100수지로 몰딩하였다. 발화용 마스크는 기존의 외제품을 한국인의 안면형에 맞게 변형 설계하여 눈과 안면유리와의 사이를 줄여 시야를 넓혔고, 코의 높이와 너비를 작게 하고 잠수자용 마이크가 옆면에 오도록 하였다.

반송 주파수는 약 33 kHz로 이 대역에서 배경 잡음이 낮아 높은 신호 대 잡음비를 얻을 수 있다. 설계치 배경잡음 준위인 67 dB re 1μPa에서, 거리 500 m에서 수신한 음성의 단음절 이해도가 90%, 문장어해도가 98%가 되도록 잠수자의 송신 음원준위를 131 dB re 1μPa로 설계하였다. 통화 품질 평가 실험에서 300m 거리의 문장 이해도는 약 80%이었다. 복조되기 이전의 수신신호의 S/N비는 설계치 문장이해도를 달성할 수 있는 값이지만 문장이해도가 낮은 이유는 흡배기음, 측정선의 기관소음 및 제작한 잠수자용 마이크의 주파수 특성의 비평탄성에 의한 음성스펙트럼의 왜곡에 기인된다. 제작한 변환기는 ±90° 범위 내에서 ±3 dB 이내의 무지향 특성을 보여 변환기 자체에 의한 통신 방향의 제한성은 없는 것으로 측정되었다. 또한 수심 40m이내에서 사용하는 경우 직접파와 반사파의 경로차이는 35msec 이하이므로 다중경로에 의한 통화품질의 열화는 없다.

개발된 시스템이 수중 작업자와 수상 작업자 사이에 통화가 요구되는 분야에 실질적으로 적용되기 위해서는 제품 생산 단계에서 흡배기음 저감, 소요되는 음향센서들의 감도 및 주파수 특성개선 등의 세부 요소기술에 대한 연구가 있어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2000년도 해양수산부 수산특정연구개발 사업의 결과입니다. 관계자 및 현장실험과 하드웨어 제작에 협조해 주신 제 1, 2구 잠수기 수협 김정길 전무, 제 1, 2구 잠수기 수협 (거제 잠수기) 김행용 총무이사, (주) 스카이 무선 고영화 사장께 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 부경대학교 음향진동공학연구소/한국해양수산연수원, 어업용 무선수중통신시스템 개발 최종보고서, 해양수산부, 2001.
2. R. J. Urick, Principles of Underwater Sound, McGraw-Hill, 3rd Ed., Chap. 1, 2, 5&7, 1983.
3. Ocean Technology System, Diver's Through-water Communication System 제품설명서, 1997.
4. Fuji, *Fuji Model 101,102* 수중전용 음성 송수신 및 모스 신호 송수신기 제품설명서, 1998.
5. Nautronix Helle Ltd, Emergency Through Water Communications 제품설명서, 1995.
6. Nautronix Helle Ltd, Heliophone 수중 무선 전화기 제품설명서, 1995.
7. Nautronix Helle Ltd, Helium Speech Unscramblers 제품설명서, 1995.
8. H. W. March and M. Schulkin, "Shallow-Water Transmission," *J. Acoust. Soc. Am.* 34 (6), 863-864, 1962.
9. D. A. Norman et al, "Some Observation on Underwater Hearing," *J. Acoust. Soc. Am.* 50 (2), 544-548, 1971.
10. R. W. B. Stephens, Underwater acoustics, John Wiely & Sons Ltd., 247-248, 1970.
11. 桑原信也, "수중청각에 대한 잠수용 후드 및 마스크의 영향," 일본해양음향학회지 25 (2), 1998.
12. H. Hollien and Feistein, "Contribution of the External Auditory Meatus to Underwater Auditory sensitivity," *J. Acoust. Soc. Am.* 57 (6), 1488-1492, 1975.
13. L. E. Kinsler et al., Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, 4th Ed., Chap. 7&13, 2000.
14. T.D. Rossing, The Science of Sound, Addison-Wesley, 2nd Ed., Chap. 23, 1990.

15. 김정환, "명료도 평가용 단음절 목록의 개발," 한국음향학회지, 13 (4), 1994.
16. 강성훈, 이용주, 김경태, 통신망의 통화품질에 관한 조사연구, 한국전자통신연구소, 20-27, 1988

저자 약력

● 윤 종 락 (Jong Rak Yoon)

한국음향학회지 제21권 제3호 참조
1990년 4월~현재: 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 재직중
※ 주관심분야: 선박 방사소음 측정/분석, 음향신호처리, 수중 음향 통신시스템

● 박 규 칠 (Kyu Chil Park)

1993년 2월: 부산수산대학교 전자공학과 졸업 (공학사)
1995년 2월: 부산수산대학교 전자공학과 졸업 (공학석사)
2000년 3월: 일본 오카야마대학 자연과학연구과 졸업 (공학박사)
1994년 3월~1996년 2월: 부산수산대학교 전기공학과 조교
2000년 3월~2002년 2월: 일본 아키타현립대학 시스템과학기술학부 연구원
2002년 3월~현재: 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 전임강사로 재직중
※ 주관심분야: 음향정보처리, 수치해석, 최적화 및 역문제

● 박 문 갑 (Moon Kab Park)

1977년 2월: 부산수산대학 어업학과 (수산학사)
1997년 8월: 부경대학교 어업생산학과 (수산학 석사)
2002년 8월: 부경대학교 수산물리학과 (수산학 박사)
1988년~현재: 한국해양수산연수원 교수
※ 주관심분야: 수중음향 (수중 소음 및 수중 통신)

● 김 석 재 (Seok Jae Kim)

1985년 2월: 부산수산대학교 전자통신공학과 졸업 (학사)
1989년 2월: 부산수산대학교 전자통신공학과 졸업 (석사)
1994년 8월: 부산수산대학교 전자공학과 졸업 (박사)
1987년 5월~1989년 4월: 창원대학 전자공학과 조교
1989년 5월~현재: 한국해양수산연수원 교수로 재직중 (전자통신)
※ 주관심분야: 음향 및 수중음향신호처리, 적응신호처리

● 노 용 주 (Yong Ju Ro)

한국음향학회지 제21권 제3호 참조
2003년 3월~현재: (주) 지피에스코리아 GPS/INS팀 선임연구원
※ 주관심분야: 수중 음향 신호처리, 음향 표적 위치 탐지