Journal of the KIMST, Vol. 22, No. 1, pp. 42-48, 2019
ISSN 1598-9127(print), 2636-0640(online)
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2019.22.1.042

Research Paper 정보 · 통신 부문

# 수중 통신 장비를 위한 검사기 설계와 구현에 관한 연구

**윤현태**[1] · **석종원**[*,2]

[1] 해군 잠수함사령부
[2] 창원대학교 정보통신공학과

# A Study on Design and Implementation of a Test System for Underwater Communication Equipment

Hyeontae Yun[1] · Jongwon Seok[*,2]

[1] *Submarine Force Command, Navy, Korea*
[2] *Department of Information and communication Engineering, Changwon National University, Korea*

(Received 13 September 2018 / Revised 5 November 2018 / Accepted 9 January 2019)

ABSTRACT

Since the underwater telephone was sold in a short time, there are few repair equipments. And equipment is difficult to locate fault. Equipment with transducers must be inspected underwater, and a relative naval vessels is required to perform an operational check. So we developed a tester device to test the transmission card through the spectrum and transmission power, and to develop a device that can conduct operational tests on land. Therefore, the development of the tester reduces the incidence of naval vessels and contributes to the development of domestic underwater communication test equipment.

Key Words : Underwater Telephone(수중 통신기), Ultrasonic Waves(초음파), Transmission(송신), Reception(수신)

## 1. 서 론

수중 통신기는 수중에서 트랜스듀서를 통해 초음파로 전달되어 수신자의 귀로 직접 음성이 전달되도록 하는 장비이다. 수상함과 잠수함, 잠수함과 잠수함 간에 수중에서 함 작전 시 중요한 장비로 사용되고 있고, 비군사적으로는 수중작업 및 레저 활동으로 스킨스쿠버들이 수중상태와 위험을 알리기 위해 수중 통신기를 사용한다[1].

수중 통신기의 증가와 장기간 사용에 따른 고장 발생으로 통신 불량이 일어나면 함정 임무 시간이 줄어듦으로 빠른 수리가 필요하다. 수리를 위해 수중 통신기를 양륙(揚陸)하여 작동 검사하기 위해서는 트랜스듀서를 수중에 넣어 정상 작동하는지 확인하는 절차가 반드시 필요하다. 하지만 육상에서 수중과 같은 환경을 만들기는 쉽지 않다. 그래서 수중 통신처럼 육지에서도 교신(交信)하며 통신기 검사와 수리의 필요성

* Corresponding author, E-mail: jwseok@changwon.ac.kr
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

이 대두되었다. 그리고 수중 통신기를 장기간 사용하게 되면 점차 성능이나 기능이 저하되어 출력이 약해지며 소리의 전달이 뚜렷하지 않고 변조가 되지 않아 통신이 되지 않는다. 이와 같은 통신 불량 상태가 발생하면 정밀 측정이 어렵다. 마지막으로 수중통신기 수리 후 함정에 취부하여 정상작동을 확인하기 위해 상대함정을 섭외하여 통신해야 하는 어려움이 상존한다. 본 논문에서는 이러한 일련의 문제점을 해결하기 위해 송·수신 검사기를 개발하였다. 변조 스펙트럼을 통해 회로카드 고장 여부를 판별하고, 먼 거리까지 통신을 위해 기준 출력 이상으로 나오는지 측정을 할 수 있다. 그러므로 수리 후 정상작동 상태를 확인하기 위해 상대함정 없이 통신 가능 여부를 확인할 수 있다.

## 2. 수중 통신기의 원리

수중 통신기는 수중에서 전기 신호를 음향 신호로 바꾸거나 음향 신호를 전기 신호로 바꾸는 전기/음향 변환기, 즉 트랜스듀서가 필요하며 음성 신호만 추출하기 위한 하드웨어 및 소프트웨어가 제어단에 필요하다. 통화 시 통화 가능한 최대 거리, 통신 채널 수, 통신 불능 범위 축소 등이 고려되는데 식 (1)은 수중 통신기에 적용되는 수동 소나 방정식을 보여주고 있다.

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

여기서, 모든 양은 dB로 주어지며 SL은 음원 준위(Source Level), DT는 탐지 문턱 준위(Detection Threshold)이며, SL, DT는 수중 통신기의 트랜스듀서 특성으로 좌우된다. TL은 전달손실(Transmission Loss)로 해양환경에 좌우된다. NL은 잡음 준위(Noise Loss)이며, 장치 및 해양환경 잡음에 좌우된다. 그리고 DI는 지향지수(Directivity Index)이다. 여기서 식 (2)에 정의된 SL-(NL-DI+DT)는 FOM(Figure of Merit)이며, 수중 통신 시스템에서 성능평가를 수치화하는데 중요한 매개변수가 된다[2].

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

즉, FOM은 전달손실과 같으므로 수중 통신기의 통화 가능한 최대 거리를 산출하는 기준이 된다.

수중 통신기는 유선 통신기가 사용하는 기저 대역(baseband) 전송 방법을 취할 수 있으나 저주파 대역에서 수중이라 주변 배경잡음이 높고[3] 물속으로 전달하기 위해 높은 송신출력이 필요하므로 수중에서 사용하는 통신으로는 적합하지 않다. 그리고, 음성을 사용하므로 음성은 저주파 대역에 신호 성분이 거의 없다. 따라서 수중에서 전송하기 위해 기저 대역 전송방식의 단점을 보완하고 낮은 출력으로 동작할 수 있게 하기 위하여 Fig. 1과 같이 단측파대(SSB : Single Side Band) 변조 방식을 사용하고 반송 주파수는 모든 대역을 고루 사용한다[4].

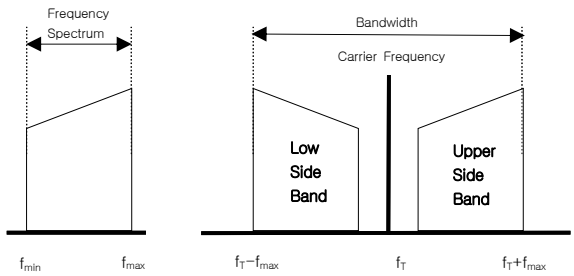



Fig. 1. Single side band and double side band

대역폭과 송신출력을 줄여서 반송파 신호를 억제하고 변조 프로세스를 이용하면 송신출력이 낮아도 되고 따라서 전력 소모도 낮아진다. 송신출력이 줄어들면 신호의 단일 주파수 부분 가운데 한 부분을 생략하게 되어 탐지 확률이 줄게 된다. 단측파대 통신을 위해서 사용하는 변조기로 보통 링 변조기와 평형 변조기를 이용한다.

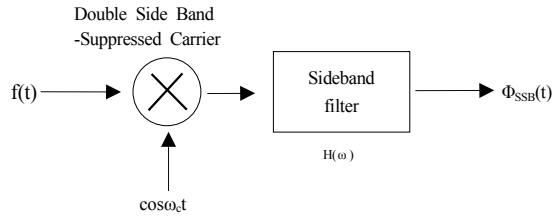



Fig. 2. Functional diagram of single side band modulation circuit

SSB 신호를 전송하려면 반송파 측대파가 각각 인접해 있으므로 필터만으로는 분리할 수 없다. 그래서 평형 변조기를 이용하면 먼저 반송파를 제거하게 되고,

대역 통과 필터를 이용하면 상·하측대파 중 1개를 선택하게 된다. Fig. 2의 그림은 음성 주파수, f(t)가 반송 주파수와 혼합되어 양측파대(DSB)로 나오는데 Sideband filter를 통해 단측파대(SSB)로 변조되어 전송되는 것을 보여준다.

SSB 방식은 DSB에 달리 수신 시 제거된 반송파 주파수에 동기를 맞추어야 하므로 국부 발진회로가 필요하다. 그래서 DSB에 비해 회로가 복잡해진다. 진폭으로 변조된 신호를 복조하기 위해서는 동기검파와 비동기 검파가 주로 사용된다. 만약 반송파를 제거하지 않고 전송한다면 수신할 때 간단한 비동기 검파인 포락선 검파를 통해 복조하여 원래의 신호를 추출할 수 있고, 반송파를 제거한 후에 전송한다면 수신할 때 국부 발진기로 반송파에 동기를 맞추는 동기검파가 필요하다[2].

## 3. 수중 통신기 음성 송 · 수신 검사기

### 3.1 검사기 개발의 방안 및 원리

수중 통신기의 구성은 Fig. 3과 같이 마이크, 스피커, 전시 및 제어를 위한 CPU, 변·복조를 담당하는 프로세서, 송·수신을 하기 위한 음향변환기(트랜스듀스)로 구성된다.

수중 통신기를 통해 300 Hz에서 3400 Hz 사이의 음성 주파수로 마이크에 말하면 수중 통신기는 반송 주파수를 혼합하여 고주파수로 변조를 한다. 변조된 신호를 증폭하며 트랜스듀서를 통해 고출력 신호로 전송된다[5].

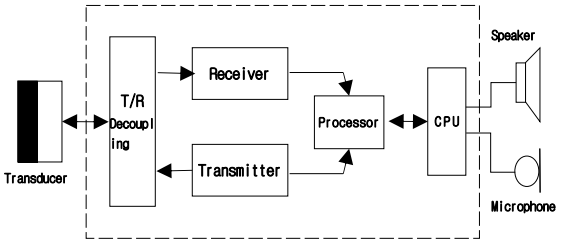



Fig. 3. Underwater telephone structure diagram

트랜스듀서의 압전소자를 통해 나온 음파가 압력의 차이를 가지고 진행한다. 즉 음압에 의해 전송된 음파가 수신 측 트랜스듀서에 전달되면 음압의 차이를 전기적 신호로 전환된 작은 신호를 증폭하면 송신 측에서 보낸 변조된 신호가 된다. 변조된 신호는 복조하면 반송파 주파수가 분리되어 음성 신호만 스피커로 전달된다[6].

개발 검사기는 송신 장비의 마이크를 통하여 음성을 전달하면 전달된 음성은 장비를 통하여 변조 신호가 트랜스듀서로 가는데, 트랜스듀서로 보내지 않고 개발 검사기로 전달한다. 개발 검사기는 변조 신호를 저장했다가 다시 수신 장비로 보내어 복조된 신호에서 음성 신호만 추출하여 들을 수 있도록 개발하려고 한다. Fig. 4는 수중 통신기와 검사기의 전체 계통도를 나타낸다.

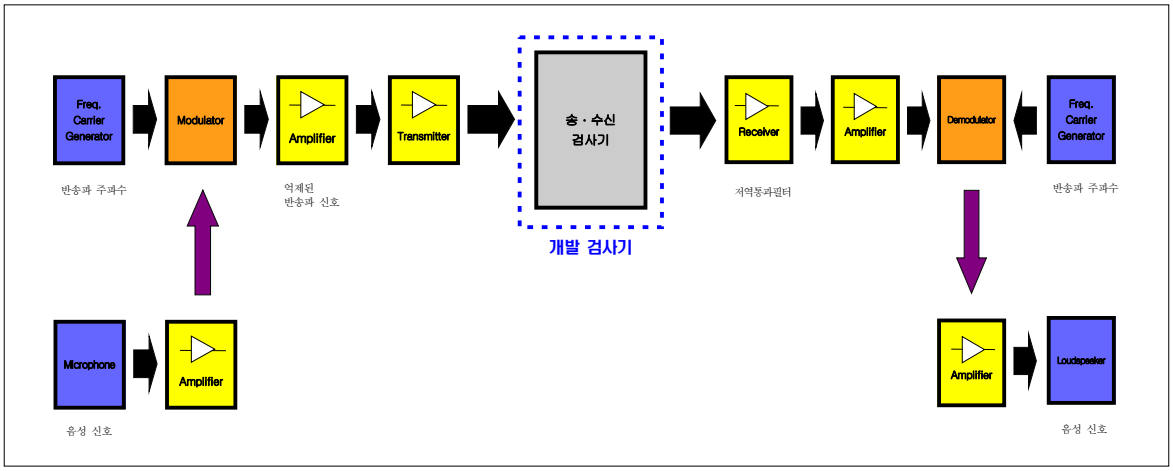



Fig. 4. Inspection system overall schematic

3.2 검사기 개발 과정

개발 검사기의 송·수신 검사기 구성도를 보면 아래의 Fig. 5와 같다. 메인 보드의 내장 사운드 카드는 음질이 떨어지고 상대적으로 CPU 자원을 많이 차지하므로 외장형 사운드 카드를 설치하였다.

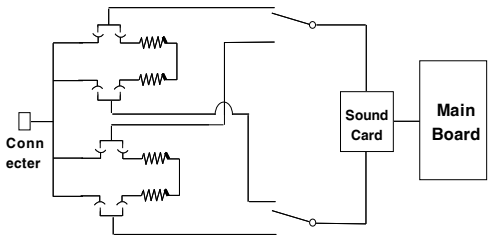



Fig. 5. Transceiver configuration diagram

따라서 내부에서 발생하는 전자파의 영향을 덜 받아 잡음이 적어 음질이 좋고, 주파수 대역 확장이 된다.

Table 1. Raspberry Pi 3 specifications

| 구 분 | 내 용 |
|---|---|
| SoC | Broadcom BCM2837 |
| CPU | 1.2 GHz 64-bit Quad-core ARM cortex A53 |
| GPU | 400 MHz VideoCore IV |
| Memory | 1 GB RAM |
| Power | 800 mA (4.0 W) / 2.5 A |

변조 신호를 저장하기 위한 메인보드로 라즈베리파이3를 이용하여 제작하였으며 운영 체제로 라즈비안을 설치하여 작동한다. 주요구성 및 제원은 Table 1에 보이며 소형 SBC(Single Board Computer)이다.

Fig. 6. Resistance to transducers

수중에서 통신기를 송신할 때는 신호가 트랜스듀서를 통해 출력하지만, 수상에서 송신하면 트랜스듀스가 압전현상으로 고장이 난다. 따라서 트랜스듀스를 제거하고 Fig. 6에 보이는 저항으로 연결한다. 이 저항은 무부하를 방지하여 수중통신기로 되돌아오는 역전압을 막아 출력단을 보호한다.

출력단마다 저항을 독립적으로 연결하여 상호 간섭 및 영향을 주지 않고 장비 작동을 가능하게 한다. 그리고 저항은 송신할 때 높은 출력을 낮추기 때문에 순간적으로 열을 방출하는데 이 열을 제거하기 위해 방열판 위에 미세한 공간을 메우고 열을 신속하게 전도하기 위해 서멀 그리스(Thermal grease)를 고르게 도포한다.

방열판은 내부 열을 신속하게 제거하기 위해 두꺼운 판으로 설치해야 하는데 개발 검사기의 무게가 늘어나므로 얇은 판으로 하였다. 그래서 송신 시 순간적인 출력으로 발생하는 열과 여름철 고온과 습기가 합쳐져 개발 검사기 내부 온도가 증가하면, SMD 소자로 이루어진 메인보드에 영향을 미쳐 내구성에 손상이 감으로 얇은 방열판 하나로는 미흡하다. 따라서 Fig. 7, Fig. 8과 같이 온·습도에 맞춰 자동으로 작동하는 팬을 장착하였다.

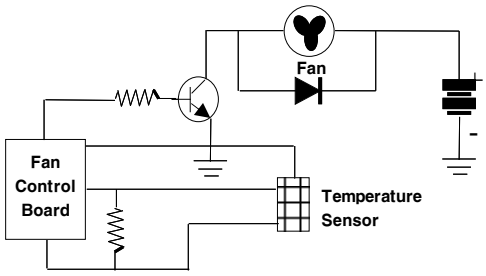



Fig. 7. Automatic fan configuration diagram

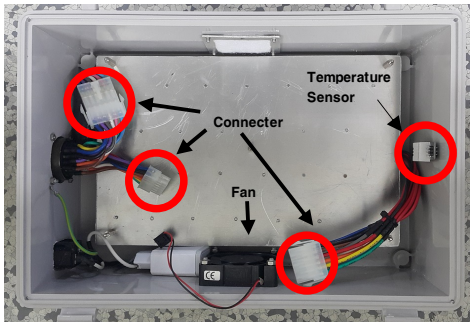



Fig. 8. Inside the lower component

그리고 프로그램 코딩으로 검사기 내부 온도 30 ℃, 습도 60 % 이상이 되면 자동 팬 작동으로 적절한 온·습도를 유지한다.

메인 보드는 내부 저항과 분리되기 쉽게 커넥터로 연결하여 교체가 편리하게 제작하였다. 그리고 사용자의 편의성을 위해 터치패널을 설치하였다.

터치패널의 크기는 5인치(해상도 800×480)로 터치 센서 방식은 감압식으로 작동한다. 터치패널은 버튼 모양의 아이콘을 터치하여 작동하고, 트랙볼과 푸시 버튼을 추가하여 터치 신호 오류를 보완해준다. 전시 화면 디자인으로 GUI(Graphic User Interface)를 꾸미기 위해 QT 프로그램을 이용하였다.

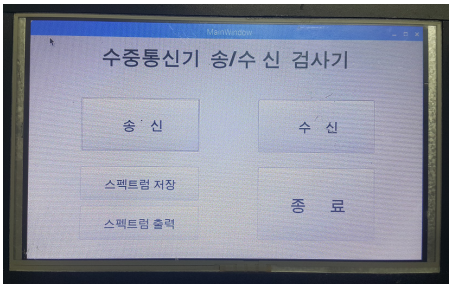



Fig. 9. Exhibition screen

Fig. 9의 전시기에 있는 송신과 수신 버튼은 누르면 7초 동안 마이크로 통해 변조된 신호를 받아 다시 장비로 전달하여 수중 통신기의 통신 상태를 확인 할 수 있으므로 수리 후 정상작동 상태를 확인하기 위해 상대함정 없이 통신 가능 여부를 확인할 수 있다. 스펙트럼 저장 및 출력 버튼은 변조된 신호의 스펙트럼을 통해 송신 보드의 정밀검사를 할 수 있다. 그리고 종료 버튼으로 프로그램을 종료한다.

수중 통신기는 물을 매질로 하여 음파가 전송되기 때문에 일정 출력 이상으로 나와야 한다. 그래서 장비와 트랜스듀스에 맞는 기준 출력값이 존재한다. 실제 장비에서 나오는 출력이 어느 정도인지 기준 출력값을 만족하는지 측정을 할 수 있게 출력 측정도 한다.

트랜스듀서를 바로 연결하기 어려울 때는 연결기(Junction Box)를 사용하여 장비 뒤에 있는 출력 커넥터에 연결하여 출력 측정이 가능하며 연장 케이블을 이용하지 않아도 개발 검사기에 변조 신호를 입력할 수 있다.

마지막으로 AUX 단자를 외부로 노출하여 여러 종류의 수중 통신기 검사가 가능하며, 특히 군사용뿐 아니라 민간용 수중 통신기도 개발 송·수신 검사기로 사용할 수 있도록 제작했다.

본 검사기의 외관은 Fig. 10과 같다. 무부하를 막기 위한 더미(Dummy)부와 변조 신호 저장 및 재생하는 PCB 보드부를 상·하로 나누어 배치하였으며 상부와 하부는 연결할 수 있는 케이블로 제작하여 상·하부가 착탈이 가능하도록 제작하였다. 공급 전원은 AC 100~240 V, 50~60 Hz 범위이므로 일반적인 표준 전원으로 사용할 수 있다.

전시기 하부에는 수중 통신기의 출력 측정 단자인데 저주파와 고주파의 측정을 선택하여 측정할 수 있다. 상부 전시기가 있는 부분은 볼트를 잡아주고 덮개를 설치하였다. 그리고 고무 패킹은 외부 판에 부착되어 덮개 여닫을 때 충격을 완화해주는 역할을 한다.

Fig. 10. Tester for underwater telephone

## 4. 검사기 성능 시험 및 결과 고찰

### 4.1 검사기 성능

개발 검사기의 성능 테스트를 위해 Fig. 11과 같이 실내에서 수중 통신기의 트랜스듀스 케이블을 제거하고 장비 측 커넥터를 검사기에 연결하여 마이크를 통한 음성 송·수신 테스트를 수행하였다. 그리고 정확한 성능검사와 비교분석을 하기 위해 단음절로 하나, 둘, 셋을 마이크에 대고 말을 했다.

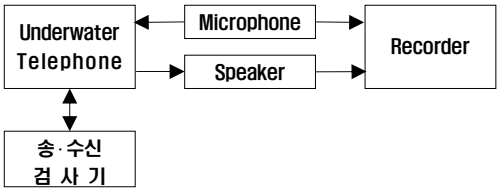



Fig. 11. Block diagram of measurement system

발화시의 발성 음량은 통상의 대화 음량인 60±5 dB 이며, 발화속도는 3초 간격으로 자연스럽게 호흡하면서 발성하였다. 검사기 성능검사 측정은 실제 음성과 스피커를 통해 나오는 음성을 비교·분석하기 위해 WAV파일로 녹음을 하였다. 측정 시 주변 소음은 25~30 dB 정도로 보통 수준의 소음이었다[1].

먼저 송·수신 검사기 전시부에서 변조 신호가 정상적으로 송출되는지 판단하기 위해 변조 신호를 스펙트럼으로 나타나게 했다. 변조가 되지 않고 전송된 경우에는 Fig. 12처럼 전체적으로 주파수 스펙트럼이 낮게 형성되고 음성 신호를 의미하는 노란색 띠가 3초 간격으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 변조가 되지 않고 음성 신호가 장비에서 바로 송출되고 있다는 것을 나타내며, 변조 관련 회로보드인 송신부가 불량이라는 것을 간단하게 판단을 할 수 있다.

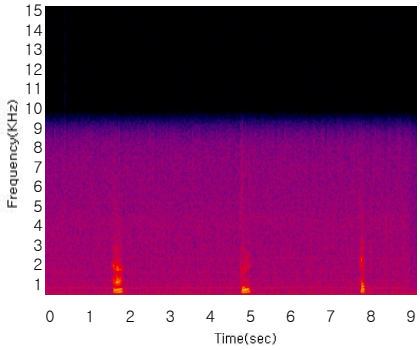



Fig. 12. Unmodulated spectrum

그리고, Fig. 13을 보면 전체적으로 주파수 스펙트럼이 20 KHz 이상 높게 형성되어 반송파와 혼합된 신호를 의미하며 반송파 대역에서 3초 간격으로 신호가 나타나는 것을 알 수 있다. 이 경우에는 변조가 되어 변조된 신호가 장비에서 송출되고 있다는 것을 나타낸다. 반송파보다 음성 신호의 세기가 작기 때문에 반송파 신호로 변조되어 나오는 것을 알 수 있다. 그런데 수신음이 나오지 않으면 복조 관련 회로보드인 수신부가 불량인 것을 알 수 있다.

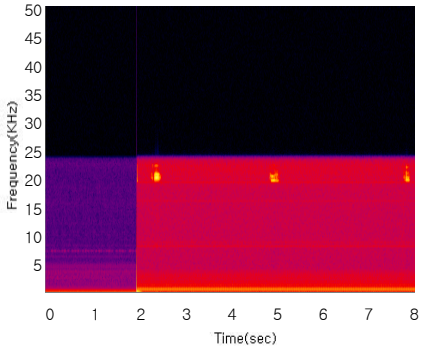
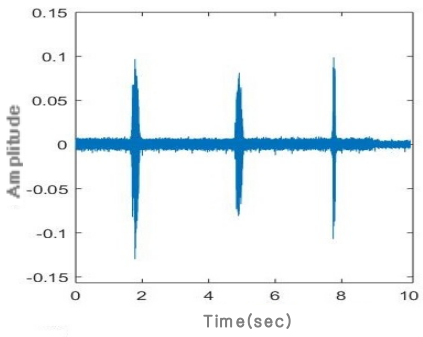
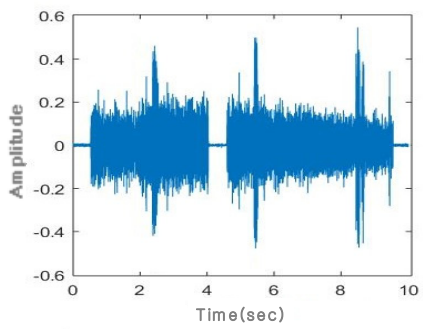



Fig. 13. Modulated spectrum

즉, 변조 전·후 스펙트럼인 Fig. 12과 Fig. 13을 비교해서 보면 노란색 부분의 주파수 위치를 통해 변조 상태를 알 수 있다.




(a) Transmission voice




(b) Reception voice

Fig. 14. Transmission voice and reception voice

마지막으로 송·수신 검사기의 성능을 확인하기 위해서 발화시 음성과 장비를 통해 변조된 신호가 검사기를 거쳐 다시 장비의 스피커에 나오는 음성을 매트랩(Matlab)으로 파형을 나타내어 비교 분석했다.

Fig. 14의 (a)를 보면 3초 간격으로 음성 신호가 나오는 것을 알 수 있는데, 실제 발화자의 음성을 녹음하여 나온 파형이다. 그리고 (b)는 검사기를 거쳐 장비의 스피커로 나온 음성 신호인데 실제로 송신 시 발화자의 음성과 똑같은 음성이 스피커를 통해 나왔다. 매트랩을 사용하여 파형을 출력한 결과 (a)와 마찬가지로 3초 간격으로 음성 신호가 나오는 것을 알 수 있다.

비교분석을 위해 송신음성과 수신음성을 녹음할 때 주변 소음이 25~30 dB의 환경에서 녹음되었기 때문에 기본적인 잡음은 내포하고 있다.

성능 결과와 마찬가지로 개발 검사기를 이용해 실제 통신을 한 결과 해양에서 수중 통신기는 수중의 기하학적인 구조, 다중경로 전달 등 환경에 영향을 받아 일반적으로 음성 인식률이 낮지만, 검사기는 수중 환경의 영향을 받지 않아 운용자가 100 % 이해할 정도로 음성 인식률이 높았다.

## 5. 결 론

수중작업과 레저산업이 발달함에 따라 수중 통신기의 사용이 증가하며 4차 산업의 발달로 수중통신산업도 증가하고 있다. 이에 수중 관련 기기와 제품들의 수요가 증대되지만, 검사기 관련 제품들은 여전히 산업 불모지나 다름없다. 이러한 상황에서 증가하는 수중 관련기기에 발 빠르게 대처해서 검사장비뿐 아니라 정비기술이 개발되어야 한다[7].

본 논문에서는 수중 통신기를 검사할 수 있는 장비를 개발하여 수중으로 전송되는 변조 신호를 검사기로 분석하며 센서를 설치하지 않고 송신 신호를 검사기에 전달하여 정밀검사가 가능하며 수중 통신기 본체에서 송출되는 출력을 측정할 수 있게 하였다. 이에 따라 수리 후 정상작동 검사를 위해 상대함정을 찾을 필요가 없다.

개발 검사기는 좁은 주파수 대역을 이용하여 음성 대역의 신호를 반송 주파수로 변조 및 복조 후 수중 통신기를 통하여 송·수신이 가능한가를 성능 적합 여부로 판단하였는데 송신 신호와 수신 신호 파형을 비교 분석한 결과뿐 아니라 실제 장비 스피커를 통해 나오는 수신음성 인식률까지 만족스러운 결과가 나왔으며, 송신 파형을 스펙트럼으로 분석하여 통신 가능 상태도 알 수 있음을 확인하였다.

이러한 수중 통신기의 검사기 개발로 수중 함정 사고의 발생을 낮추고 국내 수중 통신 장비의 발전에 따라 수중 통신기의 수입대체 효과를 이룰 수 있을 것으로 기대된다.

## References

[1] S. C. Byeon, “Ultrasonic Underwater Communication based on Noise Removal Technology,” Small and Medium-Sized Bussinesses' Technology Innovation Projects, 2004.

[2] J. R. Yoon, G. C. Park, “Manufacturing and its Performance of the Underwater Wireless Telephone Using Single Side Band,” The Journal of the Acoustical Society of Korea, Volume 23, Issue 2, pp. 134-145, 2004.

[3] M. K. Park, G. D. Yoon, “The Design of Wireless Underwater Telephone,” The Journal of the Korean Society of Fisheries Technology, Vol. 37, No. 4, pp. 302-307, 2001.

[4] D. H. Choi, “Coherence Bandwidth and Coherence Time for the Communication France in the Underwater and Correlation between Channels of Vertical Array Receiver,” Doctor's Thesis of Inha University of Technology, 2011.

[5] Y. H. Hwang, Y. Je, W. H. Kim, H. S. Seo, W. K. Moon, “Fabrication of Wide Band Transducer for Underwater Communication,” KIMST Annual Conference Proceedings, pp. 787-788, 2013.

[6] D. H. Kim, S. J. Oh, “A Study on the Underwater Communication System of Ultrasonic Transducer,“ The Korea Science & Technology Center, pp. 168-171, 2000.

[7] T. S. Lee, “Research on Trend and Directions in Underwater Communication Network,” Doctor's Thesis of Hoseo University of Technology, 2014.