도플러 속도계(DVL)를 위한 광대역 수중 음향 트랜스듀서

Broad-Band Underwater Acoustic Transducer for Doppler Velocity Log

윤 철 호, 이 영 필, 고 낙 용, 문 용 선*

(Cheol-Ho Yun¹, Yeoung-Pil Lee¹, Nak Yong Ko², and Yong-seon Moon³)

¹Robot Research Laboratory, Redone Technologies

²Department of Electronic Engineering, Chosun University

³Department of Electronic Engineering, Sunchon National University

Abstract: A broad-band underwater acoustic transducer that uses thickness vibration mode, derived from a disk type piezoelectric ceramic, has been proposed and designed for DVL (Doppler Velocity Log). Three different types of acoustic transducer were evaluated with respect to the transmitting voltage response, receiving voltage sensitivity and bandwidth of the transducer. The effect of the acoustic impedance matching layer and backing layer is discussed. The results demonstrated that three matching layer with lossy backing layer is the best configuration for underwater transducer. The trial underwater acoustic transducer with three matching layer has a frequency bandwidth of 55%, maximum transmitting voltage response of 200 dB and a maximum receiving voltage sensitivity of -187.3 dB.

Keywords: underwater, acoustic, transducer, DVL, broadband

I. 서론

음향 트랜스듀서는 전기신호를 음향신호로, 음향신호를 전기신호로 변환하는 작용을 하는 장치로, 수중 소나(sonar), 의료용 영상 장치 등에서 음파를 이용하여 거리나 속도를 측정하는 다양한 시스템에서 사용되고 있다. 음향 트랜스듀서를 이용한 수중 소나 시스템의 경우, 도플러 효과를 이용하여 속도를 측정하고 있다.

수중에서 도플러 효과를 이용한 대표적인 속도측정 시스템은 DVL로, AUV (Autonomous Underwater Vehicle), ROV (Remotely Operated Vehicle) 등 수중로봇뿐만 아니라 다양한 해양 운송수단에 장착되어 위치추정[1,2]에 사용되고 있다. DVL은 해저면으로부터 반사되어 되돌아오는 음향 신호의 도플러 주파수 변화로부터 수중로봇의 해저면에 대한 속도를 산출하여 수중로봇의 추측항법에 사용되고 있다. 대표적인 DVL을 그림 1에 나타낸다. 원판형의 네 개의 음향 트랜스듀서가 장착되어 있으며, 트랜스듀서의 음향 방사면이 해저면 방향으로 향하게 수중로봇에 장착된다. 음향빔은 수중로봇의 앞, 뒤, 좌, 우 방향으로 방사되는 Janus 방식이 주로 사용되고 있다. 최근에는 phased array DVL, CVL (Correlation Velocity Log) [3]등도 사용되어지고 있다. 이러한 수중 소나 시스템에서 요구되는 음향 트랜스듀서는 외부 노이즈에 강인한 측정 정밀도 향상을 위해 넓은 주파

그림 1. Teledyne RD 사의 DVL.

Fig. 1. DVL with four transducer, from Teledyne RD Instruments.

수 대역폭이 요구된다. 이를 해결하기 위해 $\lambda/4$ 음향 임피던스 정합[4], pulse shaping [5], 전기적 임피던스매칭[6], 복합체[7] 등의 기법이 연구되고 있다.

현재 국내의 수중로봇에 적용되고 있는 DVL 시스템은 전량 수입에 의존하고 있으며, 수중로봇 연구그룹에서 도입하여 사용하기에는 여전히 고가이다. 이에 레드원테크놀로지(주)에서는 DVL의 국산화 개발을 진행하고 있으며, 음향 트랜스듀서의 개발은 중요한 부분이다.

본 연구에서는 Janus 방식의 DVL을 위한 광대역의 주파수 특성을 갖는 원판형 수중 음향 트랜스듀서를 개발하였다. 개발된 DVL 음향 트랜스듀서의 음향빔 지향성, 주파수 대역폭, 송수신 감도 특성의 개선을 위한 음향 임피던스 매칭, 백킹층 특성 및 개발된 음향 트랜스듀서를 DVL에 적용하기 위한 적합성을 검토하였다.

II. DVL 음향 트랜스듀서 설계 고려사항

DVL을 이용한 수중로봇의 속도 측정은 수중 음향 트랜스듀서로부터 방사되어 해저면 으로부터 반사되는 음향신호의 도플러 주파수 변환을 이용한다. 음향 트랜스듀서의

* 책임저자(Corresponding Author)

Manuscript received May 15, 2013 / revised June 10, 2013 / accepted June 30, 2013

윤철호, 이영필: 레드원테크놀로지(주)

(chyun34@urc.kr/lyp@urc.kr)

고낙용: 조선대학교 제어계측로봇공학과(nyko@chosun.ac.kr)

문용선: 순천대학교 전자공학과(moon@sunchon.ac.kr)

송수신 신호의 주파수 차이는 $\Delta f = f_D - f_T$ 이고, 이때 수중로봇의 속도 v 는 도플러 방정식을 이용하여 식 (1)과 같이 표현된다.

$$v = \frac{2c\Delta f}{f_T} \quad (1)$$

여기에서 f_T 는 송신 주파수, f_D 는 수신 주파수, c 는 수중에서 음속 (1500 m/s)을 나타낸다. 즉, 알고 있는 송신주파수 f_T 와 해저면으로부터 반사파의 수신주파수 f_D 를 측정함으로써 수중로봇의 속도 백터를 결정할 수 있다. 또한, 수중로봇의 속도 v 는 식 (2)와 같이 도플러 주파수 변화 f_D 와 관련이 있다.

$$v = \frac{1}{2}\lambda f_D \quad (2)$$

λ 는 수중에서의 음파의 파장을 나타낸다. 식 (2)에서 알 수 있듯이 속도분해능은 송신 음향 신호의 파장과 비례한다. 즉, 파장이 짧을수록 (주파수가 높을수록) 시간적, 공간적 측정정밀도가 향상됨을 알 수 있다. 그러나 주파수의 증가에 따라서 음파의 전송손실 및 감쇠계수가 급격히 증가함으로 측정거리를 늘리기 위해서는 긴 파장 (저주파)을 이용할 필요가 있다. 일반적으로 음향 신호는 원하는 송신주파수의 전기적 신호를 압전디스크에 인가하여 압전디스크를 진동시킴으로서 수중에 전파된다. 이때 음향 트랜스듀서의 중심 주파수 f_0 는 압전디스크의 두께에 의해서 결정되고, 주어진 중심주파수에서 송수신 음향빔의 빔폭 b_w 은 압전디스크의 직경 D 에 의해서 결정된다(식 (3)).

$$b_w = \lambda/D \quad (3)$$

보통 DVL의 경우 측정 정밀도를 높이기 위해서 음향빔폭이 3° 이하의 빔폭을 갖는 음향 트랜스듀서를 사용한다. 또한 넓은 주파수 대역폭, 높은 감도, 뛰어난 임펄스 특성은 수중 음향 트랜스듀서 설계에 중요한 요소이다. 이러한 특성을 갖는 음향 트랜스듀서를 설계하기 위해서는 높은 음향 임피던스의 압전소자와 낮은 음향 임피던스의 음향부하 (물, water)와의 넓은 주파수 대역폭에서 임피던스 정합이 필요하다. 수중음향 트랜스듀서에는 일반적으로 PZT (PbZrTiO_3)계열의 압전세라믹이 사용되고 있으나, PZT는 음향 임피던스가 33 MRayl 정도로 물의 1.5 MRayl에 비해 22배 정도 높아 압전소자와 유체의 계면에서 음파의 반사율은 약 92%로 음파의 약 8% 만이 유체에 전달된다. 결과적으로 음향 임피던스의 미스매칭은 음향 트랜스듀서의 주파수 대역폭 및 송수신 감도를 감소시킨다. 광대역 음향 트랜스듀서 설계를 위해서는 PZT와 유체사이에 한층 이상의 $4/\lambda$ 두께의 임피던스 정합층과 PZT 후면에 백킹층의 형성이 필요하다.

III. 수중 음향 트랜스듀서 설계 및 제작

DVL용 수중 음향 트랜스듀서의 송수신 특성을 평가하기 위하여 세가지 형태의 음향 트랜스듀서를 설계, 제작하였다

그림 2. 음향 트랜스듀서의 구조.

Fig. 2. Acoustic transducer configuration.

그림 3. DVL 트랜스듀서.

Fig. 3. DVL transducer.

(그림 2). 첫 번째 트랜스듀서는 (그림 2(a)) 원판형 PZT 전체를 우레탄으로 몰딩한 구조로, 임피던스 정합층 및 백킹층은 고려하지 않았다. 두 번째 트랜스듀서(그림 2(b))는 한층의 $\lambda/4$ 임피던스 정합층과 PZT 후면에 백킹층을 형성한 구조이고, 세 번째 트랜스듀서(그림 2(c))는 세층의 $\lambda/4$ 임피던스 정합층을 PZT 전면에 형성하고 후면에 백킹층을 형성하였다.

본 연구에서는 중심주파수 1MHz의 DVL용 음향 트랜스듀서를 설계, 제작하였다. 음향 트랜스듀서의 액티브 소자는 PZT4를 사용하였다. 현재 상용화 되어있는 1.2 MHz의 중심주파수를 갖는 DVL 트랜스듀서와 유사한 음향빔폭 (약 1.5°)을 달성하기 위하여 PZT는 외경 60 mm의 원판형으로 설계하여 적용하였다. 음향 임피던스 매칭을 위한 음향 정합층의 음향 임피던스는 KLM 모델을 기초로 계산하였다[2]. 실제 적용된 음향정합층 재료는 이론적인 계산값과 유사한 음향 임피던스를 갖는 재료를 사용하였다. 음향정합층은 1층의 경우 음향 임피던스가 약 5 MRayl의 재료를 사용하였으며, 3층 구조의 경우 각각 2, 5, 14 MRayl과 유사한 음향 임피던스를 갖는 재료를 선택하여 사용하였다. 백킹층은 금속분말과 폴리머를 배합한 복합체를 사용하였으며, 음향 임피던스가 약 20 MRayl이 되도록 설계하였다. 그림 3은 설계, 제작된 DVL용 음향 트랜스듀서를 나타낸다. 압전세라믹에 음향정합층과 백킹층을 부착한 후 우레탄으로 음향창을 형성한 구조이다. 제작된 음향 트랜스듀서는 외경 75 mm, 두께 15 mm 이다.

그림 4. 수중에서의 음향 트랜스듀서 임피던스 특성.

Fig. 4. Impedance characteristics of transducers in water.

IV. 음향 트랜스듀서 특성 평가

1. 임피던스 특성 평가

제작된 수중 음향 트랜스듀서는 Impedance analyzer (Agilent 4294A)를 이용하여 임피던스를 측정하였다. 그림 4는 제작된 음향 트랜스듀서의 수중에서 측정한 임피던스 특성을 나타내고 있다. 본 연구에서는 1 MHz의 중심주파수를 갖는 음향 트랜스듀서 개발을 목표로 설계가 진행되었으나, PZT 전체를 우레탄으로 몰딩한 트랜스듀서의 실제 측정된 공진주파수는 950 kHz 부근에서 형성되었다. 그림 4(b), (c)는 음향정합층과 백킹층을 형성한 트랜스듀서를 수중에서 측정한 임피던스 특성을 나타낸다. 음향정합층의 구성에 의해 트랜스듀서의 공진특성이 변화하고 있으며, 3층의 음향정합층을 형성한 트랜스듀서(그림 4(c))의 경우 공진

그림 5. TVR 특성.

Fig. 5. TVR characteristics.

주파수가 분리됨을 알 수 있다. 이는 음향정합층에 의한 효과로 광대역 트랜스듀서 설계에 있어 중요한 사항이다. 1층의 음향정합층을 형성한 트랜스듀서(그림 4(b))는 음향정합층을 구성하지 않은 트랜스듀서에 비해 공진주파수가 50 kHz 증가한 1MHz 부근에서 최저 임피던스 특성을 나타냈다. 3층의 정합층을 구성한 트랜스듀서는 임피던스 최저점이 850 kHz, 1.18 MHz로 분리되어 나타났다. 특히, 모든 트랜스듀서에서 최저 임피던스는 10 ohm 이하로 매우 낮은 임피던스를 형성하고 있음을 알 수 있다.

2. 수중 특성 평가

제작된 시제품의 수중 음향 특성은 자체 제작한 수조에서 평가하였다. 테스트 수조는 길이 1.8 m, 폭 1 m, 깊이 1m의 크기로 제작되었다. 시제품의 특성 평가를 위해

그림 6. RVS 특성.

Fig. 6. RVS characteristics.

RESON 사의 TC3027 트랜스듀서를 표준 트랜스듀서로 사용하였다. TC3027의 중심주파수는 1 MHz 이고, RESON사에서 제공하는 송신전압감도 (TVR), 수신전압감도 (RVS)를 바탕으로 시제품의 특성평가를 진행하였다. 그러나 TC3027의 data sheet에 제공된 송수신 감도는 900 kHz ~ 1200 kHz로 본 연구에서 제작된 트랜스듀서의 대역폭 보다 작아, 제공된 범위를 벗어난 주파수에 대해서는 외삽에 의하여 추정된 data를 사용하였다.

테스트 수조에는 수돗물을 사용하였으며, 수조의 한쪽에 TC3027을 설치하고, 1.7 m 반대쪽에 시제작 된 트랜스듀서를 설치하였다. 시제작 된 트랜스듀서의 TVR, RVS는 식 (4)를 이용하였다.

그림 7. 트랜스듀서 잔류진동 특성.

Fig. 7. Ringing response characteristics of transducers.

$$TVR = 20 \log r + 20 \log V_{ref} - RVS_H - 20 \log V_{TO}$$

$$RVS = 20 \log V_{TI} - TVR_H - 20 \log V_H + 20 \log r \quad (4)$$

여기에서 r 은 트랜스듀서 사이의 거리, V_{ref} 는 TC3027에서 측정된 수신전압, RVS_H 는 TC3027의 수신전압감도, V_{TO} 는 시제작 된 트랜스듀서의 송신전압, V_{TI} 는 시제작 된 트랜스듀서의 수신전압, TVR_H 는 TC3027의 송신전압감도, V_H 는 TC3027의 송신전압을 나타낸다. 모든 전압은 V_{rms} 값으로 계산하였다. 측정시에 트랜스듀서 사이의 정상파의 발생과 측정수조로 부터의 반사파(멀티패스)의 영향을 줄이기 위해 송신 트랜스듀서는 버스트 펄스 구동을 하였다.

그림 5는 측정된 송신전압감도 특성을 나타낸다. 그림 5(a)는 원판형 PZT 전체를 우레탄으로 몰딩한 트랜스듀서의 TVR 특성으로 950 kHz 부근에서 195.8 dB의 피크값을 가지고 있으며, 10% 정도의 3 dB 주파수 대역폭을 가짐을 알 수 있다. 그림 5(b), (c)는 백경층이 적용되었고, 각각 1층, 3층의 음향정합층이 적용된 트랜스듀서의 TVR 특성을 나타낸다. 두 트랜스듀서 모두 주파수 대역폭이 우레탄만을 몰딩한 트랜스듀서에 비해 증가됨을 알 수 있으며, 3층의 음향정합층을 적용한 트랜스듀서의 대역폭이 넓게 나타남을 확인하였다. 1층의 정합층을 적용한 경우 주파수 대역폭이 40%, 3층의 정합층의 경우 주파수 대역폭이 55% 정도로 나타났다. 두 트랜스듀서 모두 최대 200 dB의 송신감도 특성을 확인하였다. 그러나 두 트랜스듀서 모두 1075 kHz 부근에서 최대값에 비해 6 dB 감소된 특성을 보이고 있

며, 이는 음향정합층의 두께 또는 음향임피던스가 최적화되지 못한 결과에서 기인된 것으로 판단된다[8]. 본 연구에서 적용된 음향정합층의 경우 트랜스듀서의 중심주파수를 1 MHz로 계산한 결과를 적용하였고, 각 음향정합층의 음향임피던스는 문헌상의 값을 적용함에 따라 이론상의 계산과 오차가 발생한 것으로 판단된다.

그림 6은 각 음향트랜스듀서의 수신전압감도 특성을 나타낸다. 그림 6(a)는 원판형 PZT 전체를 우레탄으로 몰딩한 트랜스듀서의 RVS 특성으로 1100 kHz 부근에서 -190.5 dB의 피크값을 가지고 있으며, 그림 6(b), (c)의 각각 1층, 3층의 음향정합층이 적용된 트랜스듀서는 최대수신감도 -189.2 dB, -187.3 dB의 특성을 나타냈다. TVR 특성과 유사하게 음향정합층을 적용함으로써 광대역의 주파수 특성의 트랜스듀서 제작이 가능함을 확인하였다.

그림 7은 트랜스듀서의 임펄스 구동시 잔류진동 특성을 나타낸다. 그림 7(a)는 PZT 전체를 우레탄으로 몰딩한 백킹층이 적용되지 않은 트랜스듀서, 그림 7(b)는 백킹층이 적용된 트랜스듀서의 잔류진동 특성이다. 백킹층의 영향으로 트랜스듀서에서 발생하는 잔류진동이 줄어든 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 연구에서는 Janus 방식의 DVL의 국산화를 위한 광대역의 주파수 특성을 갖는 원판형 수중 음향 트랜스듀서를 개발하였다. 음향 트랜스듀서의 주파수 대역폭, 송수신 감도 특성의 개선을 위해 $\lambda/4$ 음향정합층, 및 백킹층을 설계, 적용하였다. 측정결과 음향정합층과 백킹층의 도입에 의해 주파수 대역폭 및 잔류진동 특성이 개선된 수중 음향 트랜스듀서를 구현하였다. 3층의 음향정합층과 백킹층이 적용된 음향 트랜스듀서의 주파수 대역폭은 중심주파수 대비 55%, 송수신전압감도는 최대 200dB re 1uPa/V@1m, 수신전압감도는 -187.3 dB re 1V/uPa의 특성을 확인하였다. 본 연구에서 개발하고자 하는 중심주파수 1MHz의 DVL의 경우 음향 트랜스듀서의 송수신 감도를 고려할 경우, 3~5 Vrms의 구동전압으로 해저면으로부터 최대 50m 거리에서 측정이 가능할 것으로 예상된다. 향후 트랜스듀서의 송수신 반응시간, 지연시간, 빔폭 측정 및 해상환경 실험을 진행할 예정이다.

REFERENCES

- [1] G.-H. Lee and J. Kim, "Docking system for unmanned underwater vehicle using reduced signal strength indicator," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 9, pp. 830-836, 2012.
- [2] D. Park, K. Kwak, W. K. Chung, and J. Kim, "Infrastructure-based localization system using underwater wireless sensor network," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 8, pp. 699-705, 2012.
- [3] P. Boltryk, M. Hill, A. Keary, B. Phillips, H. Robinson, and P. White, "An ultrasonic transducer array for velocity measurement in underwater vehicles," *Ultrasonics*, vol.

42, pp. 473-478, 2004.

- [4] C. S. Desilets and J. D. Fraser, "The design of efficient broadband piezoelectric transducers," *IEEE Trans. Sonics and Ultrasonics*, Su-25, no. 3, pp. 115-125, 1978.
- [5] M. Morgado, P. Oliveira, and C. Silvestre, "A closed-loop design methodology for underwater transducers pulse-shaping," *International Conf. Mechatronics and Automation*, pp. 2014-2019, Aug. 2011.
- [6] P. Atkins, A. Islas, and K. G. Foote, "Sonar target-phase measurement and effects of transducer-matching," *Proc. of Acoustic 08 Paris*, pp. 6385-6390, 2008.
- [7] K.-W. Lee, H.-J. So, S.-M. Lim, and W.-H. Cho, "A study of a wideband acoustic transducer for underwater communication using 1-3 type piezoelectric transducer," *Journal of Ocean Engineering and Technology, (in Korean)*, vol. 22, no. 2, pp. 65-71, 2008.
- [8] J. Kocbach, "Finite element modeling of ultrasonic piezoelectric transducers," *Thesis*, University of Bergen, 2000.

윤 철 호

1996년 전남대학교 무기재료공학과 졸업. 1998년 동 대학원 석사. 2002년 일본 동공대 박사. 2004년~2008년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2009년~2011년 Monash University Research fellow. 2012년~현재 레드원테크놀로지(주) 연구소장. 관심분야는 압전 액츄에이터, 센서 응용.

이 영 필

2006년 순천대학교 전자공학과 졸업. 2008년 동 대학원 석사. 2008년~현재 레드원테크놀로지(주) 선임연구원. 관심분야는 아날로그 신호처리, FPGA, 로봇 제어.

고 낙 용

1985년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1987년 동 대학원 석사. 1993년 동 대학원 박사. 1992년~현재 조선대학교 제어계측공학과 교수. 관심분야는 이동로봇, 수중 로봇, 로봇 자율 주행.

문 용 선

1983년 조선대학교 전자공학과 졸업. 1985년 동 대학원 석사. 1989년 동 대학 박사. 1992년~현재 순천대학교 정보통신공학부 교수. 2005년~현재 레드원테크놀로지(주) 기술이사. 관심분야는 산업통신망, 로봇, 실시간 모션 제어.