2000년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제19권 제1(s)호

수중 초음파 도플러 센서 개발

이수성*, 노용래**
* 경북대학교 센서공학과
** 경북대학교 센서공학과/전자전기공학부

Development of an Underwater Ultrasonic Doppler Sensor

Susung Lee*, Yongrae Roh**
* Dept. of Sensor Eng., Kyungpook National University
** Dept. of Sensor Eng./School of Elec. and Elec. Eng., Kyungpook National University
*susung@aslab.kyungpook.ac.kr, **yryong@eeg.kyungpook.ac.kr

요 약

도플러 로그용 센서를 이용하여 선박의 속도를 측정하면, 선박의 수평방향 이외의 움직임, 즉 핏칭이나 롤링 등에 의한 측정 속도의 부정확성이 문제가 된다. 본 연구에서는 이러한 핏칭과, 수중이라는 환경요인에 기인하여 다른 속도 측정용 센서들이 가지는 문제점을 극복할 수 있도록 진동판을 수평축에서 일정한 각을 가지도록 두 개 또는 네 개를 등간격으로 배열한 야누스형 초음파 트랜스듀서를 개발하였다. 트랜스듀서 개발을 위하여 그 작동 구조를 해석하고 그에 따라 시제품을 제작한 후, 실험적인 성능 평가를 수행하였다. 시제작된 초음파 트랜스듀서는 지향성 및 감도가 우수하고, 대역폭이 넓은 성능을 가지고 있어, 실제 선박에 장착되어 도플러 로그용 초음파 트랜스듀서로 사용될 수 있는 가능성이 확인되었다.

Ⅰ. 서 론

항해시 선박의 속도는 가장 중요한 정보중의 하나이며, 이를 측정하기 위한 다양한 방법이 이용되고 있다. 그 중, 초음파를 이용하여 선박의 속도를 측정하는 방법에는 side by side 초음파 트랜스듀서[1]를 이용하는 방법과 선박 하부에 수면을 보도록 설치하는 도플러 로그가 있다. 전자는 선박이 전진하고 있을 때 선수의 트랜스듀서에 의해 송신된 초음파가 선미의 트랜스듀서에 도달하는 시간은 선박의 속도에 의해 짧아질 것이며, 반대로 선미의 트랜스듀서에 의해 송신되어진 초음파의 도달시간은 길어진다는 원리를 이용한 것이다. 이 방법은 두 개의 초음파 트랜스듀서가 정확하게 마주보고(face-to-face) 있어야하므로 설치가 까다롭고, 해수와 선체 사이의 마찰에 의해 와류가 발생되어 초음파의 산란이 많아져 측정값에 많은 오차가 생기며, 초음파 트랜스듀서가 선박의 바닥에서 밑으로 노출되어 있으므로 파손의 우려가 크다는 단점을 가진다.

반면에 도플러 로그는 초음파의 도플러효과를 이용하여 선박 속도를 측정하는 방법으로서, 이에는 다시 해저에서의 반사파를 이용하는 방법과 수중 부유물에서의 반사파를 이용하는 방법이 있다[2]. 절대 속도를 측정할 수 있다는 장점을 가지는 전자는 이에 반하여 수심이 깊은 대양에서 사용하기 곤란하다는 점과 초음파의 감쇠에 기인하여 저주파의 초음파를 사용해야 함으로 트랜스듀서의 크기가 크다는 단점을 가진다. 그러나 초음파는 기포, 플랑크톤, 그리고 다른 여타의 산란체에 의해서도 반사가 되어지므로[3], 이런 수중 산란체에 의한 반사파를 이용하면, 가벼운 부유물들이 해류와 같은 속도로 움직이므로 측정되어진 선박의 속도가 해류 속도에 대한 상대속도이지만 대양에서의 측정이 가능하다는 장점이 있고, 불과 몇 미터 내외에서의 반사파를 이용하므로 상대적으로 높은 주파수의 초음파를 사용할 수 있어 트랜스듀서를 작고 가볍게 만들 수 있다는 이점도 있다. 그러나 통상의 선박용 도플러 센서는 항해시에 부수적으로 발생하는 선박의 핏칭(pitching)이나, 롤링(rolling) 등의 수평움직임 이외의 동작에 의해 측정이 부정확해진다는 문제점이 있다.

따라서 본 연구에서는 앞서 설명한 여러 가지 장점을 가지며 핏칭에 의한 부정확성을 해결할 수 있는, 수중에서의 반사파를 이용하는 야누스형 초음파 도플러 센서를 개발하고 작동 원리를 해석하였다. 야누스형 센서란 초음파를 발생시키는 2개 또는 4개의 진동자를 수평으로부터 일정한 각을 가지도록 원주 상에 등간격으로 배열한 구조를 가지고, 핏칭에 의한 선속 측정의 오차를 개선할 수 있으며, 기계적, 화학적 충격에 강하고 크기가 작으며, 설치 및 유지 보수가 쉽다는 장점들을 가지는 센서 형태이다. 본 연구에서는 실용성 및 설치상황을 고려하여 선박의 진행 방향과 그 반대 방향으로 두 개의 초음파 빔을 비스듬히 방사하도록 2개의 진동판이 수평면에서 15도의 각을 이루도록 배치한 구조의 트랜스듀서를 개발하고자 한다.

Ⅱ. 도플러 센서를 이용한 선속 측정 알고리즘

트랜스듀서로부터 방사된 초음파는 수중의 산란체에 의해 반사 또는 산란되며, 이렇게 반사, 산란되어 트랜스듀서에 수신되는 초음파의 주파수는 선박의 속도와 반사체의 속도에 의해 변하게 되는데, 이 때 수신주파수의 변화분을 "도플러 편이"라고 하며, 이 효과를 "도플러 효과" 라고 한다.

그림 1은 선박의 진행방향과 그 반대방향으로 같은 중심주파수를 가지는 초음파를 방사할 수 있는 야누스형 초음파 트랜스듀서에서 초음파의 경로를 나타낸 것이다. 전방을 향하는 초음파에서 선박이 피칭을 하여 핏칭각 ϕ를 가지게 되면, 수면과 초음파 빔 사이의 각은 평형

상태에서의 각 θ보다 ϕ만큼 커지게 되고, 후방을 향하는 초음파에서 수면과 초음파 빔 사이의 각은 ϕ만큼 작아지게 된다. 도플러효과에 의해 전·후방 각각에서 수신되는 주파수 f_F와 f_B를 반사체의 속도(v_w)도 고려하여 나타내면 아래와 같다.

$$f_F = f_0 \frac{c - v_w\cos(\theta+\phi)}{c - v_s\cos(\theta+\phi)} \frac{c + v_s\cos(\theta+\phi)}{c + v_w\cos(\theta+\phi)} \quad (1)$$

$$f_B = f_0 \frac{c + v_w\cos(\theta-\phi)}{c + v_s\cos(\theta-\phi)} \frac{c - v_s\cos(\theta-\phi)}{c - v_w\cos(\theta-\phi)} \quad (2)$$

여기서, f_0 = 발진주파수, c = 음속, v_w = 반사체의 수평속도, v_s = 선박의 속도, θ = 평형상태에서 수면과 빔 사이의 각, 그리고 ϕ = 핏칭각이다.

v_w는 음속과 선박속도에 비해 매우 작은 값이므로, 식 (1)과 (2)를 연립하면 핏칭각을 구할 수 있으며, 선박의 속도도 계산할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1}\left\{\frac{1}{\tan\theta} \frac{(f_0^2 - f_F f_B)(f_F + f_B - 2f_0)}{f_0(f_F^2 - f_B^2 - 2f_0 f_F + 2f_0 f_B)}\right\} \quad (3)$$

$$v_s = \frac{c(f_F - f_B)}{(f_F + f_0)\cos(\theta+\phi) + (f_B + f_0)\cos(\theta-\phi)} \quad (4)$$

이와 같이 핏칭각이 고려된 선속 유도식을 통하여 보다 더 정확한 선속 측정이 가능하다

Ⅲ. 야누스형 초음파 센서의 설계 및 제작

3. 1. 설계

전·후방의 초음파에 의해 되돌아오는 신호는 수평축상의 서로 다른 반사체에 의해 획득되는데, 만약 두 반사체가 다른 속도를 가지고 있다면 최종적으로 측정 속도에 오차를 유발하는 원인이 된다. 따라서 산란체의 수평속도가 외부요인에 의하여 변화가 심하지 않다고 가정할 수 있는 선박으로부터 3 미터 내외에서의 반사파를 이용하기로 하며, 3 미터 내외에서 가장 좋은 효율을 가지는 2 MHz의 초음파를 사용하기로 한다[4]. 2 MHz의 상대적으로 높은 주파수의 초음파를 사용하면 초음파 트랜스듀서의 크기를 작게 하며 무게를 가볍게 하고, 또한 가격을 낮출 수 있다.

진동소자는 얇은 원판형의 PZT를 사용하고, 큰 음압을 얻기 위해 두께 공진 모드를 이용한다. 우선 중심주파수 2 MHz를 구현하기 위한 두께를 결정하였다.

본 연구에서 개발하려는 초음파 트랜스듀서는 수중의 작은 부유물에 의한 산란파를 수신하여야 하므로, 산란파의 에너지를 높이기 위해서는 좁은 빔폭을 가질수록 유리하다. 원판형 음원(circular piston source)의 지향성(directivity)은 식 (5)와 같다[5].

$$D = \frac{(ka)^2}{1 - J_1(2ka)/ka} \quad (5)$$

여기서, k는 파수, a는 원판의 반지름이고, J_1은 1차 Bessel 함수이다. 식 (5)에서와 같이 지향성은 반지름의 자승에 비례하여 증가하므로 좋은 지향성을 가지기 위해 반지름을 크게 하면 좋으나, 너무 커지면 초음파 트랜스듀서 전체의 크기가 커지는 문제가 있다. 따라서 높은 지향성을 얻고, 나아가 순수한 두께 모우드 공진만을 구현하기 위해 원판의 반지름은 두께의 10배가 되도록 설정하였다.

후면층은 일반적으로 진동소자의 후면으로 전파하는 초음파를 흡수하여 대역폭을 넓히고, 진동 소자 후방면에서의 초음파 반사에 의한 효과를 줄이는 목적으로 사용되어진다[6]. 그러나 본 연구에서 후면층을 흡음제의 역할과 더불어 진동소자 두 개를 수평에 대하여 일정한 각을 유지시키는 지지대의 역할을 하도록 설계하였다. 이런 용도로 쓰이는 경우 후면층은 외부의 충격, 온도 등에 의해 변형이 적어야 되고, 가공성이 좋아야 하며, 감쇠도가 높은 것이 좋다. 그래서 후면층의 재질로 세포베크라이트를 사용하였다.

외장은 초음파 트랜스듀서가 수중용임을 감안하여 물로부터 진동소자와 전선 등을 보호하기 위해 방수처리가 되고, 진동소자로부터 수중으로의 용이한 전파를 위해 감쇠가 적으며 또한 기계적 충격에 변형되거나 깨어지지 않도록 탄성력이 커야한다. 또한 따로 정합층을 두기가 어려운 구조이므로 외장이 정합층의 역할도 수행하도록 하였다. 기계적인 특성상 고분자 재료를 이용하면 이러한 요구조건을 만족할 수 있다. 그리고 정합층의 역할에도 부합하는 재료를 선정하기 위하여 여러 가지 고분자 물질을 이용하여 모의실험을 수행하였으며, 그림 2에 가장 특성이 좋은 것으로 판명된 폴리우레탄을 사용한 경우에 대한 모의실험 결과를 나타내었다. 모의실험은 각 층에서 음파의 전파와 반사를 근거로 한 해석법을 사용하였다[7].

3. 2. 제작

설명한 재료들을 이용하여 그림 3와 같이 야누스형 초음파 트랜스듀서를 제작하였다. 제작시 후면층과 진동소자는 Araldite(ciba)를 이용하여 가압 접착하였고, 폴리우레탄 수지 몰딩시 발생할 수 있는 기포는 초음파 트랜스듀서의 성능에 악영향을 미치므로 진공챔버를 이용하여 제거하였다.

Ⅳ. 실험 및 결과

제작된 야누스형 초음파 트랜스듀서의 성능을 펄스-에코법으로 측정하였으며, 그림 4에 성능측정의 결과를 시간영역과 주파수영역으로 나타내었다. 제작되어진 트랜스듀서는 구현하고자 하였던 중심주파수 2 MHz를 가지고, 대역폭(Δf)은 341.5 kHz, 그리고 지속시간은 2.62 μs이다. 그림 4의 결과를 그림 2의 모의실험 결과와 비교해 보면 거의 일치하여, 제작된 트랜스듀서는 설계 결과가 적절히 반영된 것임을 알 수 있다. 그리고 반사체로 작은 쇠구슬을 이용하여 빔폭을 측정하였으며, 그 결과를 그림 5에 나타내었으며 빔폭이 4.6° 로 지향성이 우수함을 알 수 있다. 또한 감도를 높이기 위해 동조(Tuning)를 하여 성능 측정을 하였으나, 본래 트랜스듀서가 가지는 리액턴스가 작아(수 Ω) 그림 6에서 보는

바와 같이 동조에 의한 영향이 크지 않으므로 트랜스듀서에 동조는 하지 않는다.

초음파 트랜스듀서가 도플러 편이를 획득할 수 있는지를 확인하기 위해, 수조에 반사체가 일정한 속도를 가지고 움직일 수 있도록 장치하여, 반사체가 움직이는 동안 수신주파수를 측정하여 도플러효과를 검증하기 위한 실험을 하였다. 실제 사용환경에서는 반사체는 거의 고정되어 있고 트랜스듀서가 선박속도와 일치하게 이동하나, 실험실 환경에서 센서를 움직이게 하는 것에 어려움이 있어서, 대신에 반사체가 움직이도록 하여 동일한 효과를 얻고자 하였다. 그림 7은 도플러 편이 측정을 위한 실험 장치도이며, 반사체가 좌우로 이동시 같은 속도를 가지도록 하였다. 이 때 반사체의 속도는 1.7 m/s이다. 측정 결과 트랜스듀서로부터 반사체가 멀어지는 경우의 도플러 편이는 -1,678 Hz로 주파수가 감소하는 것을 알 수 있었고, 반사체가 가까워지는 경우의 도플러 편이는 1,850 Hz로 증가한 것을 알 수 있었다. 그림 8에 반사체가 멀어지는 경우의 수신신호의 주파수를 나타내었다. 이 측정 결과는 식 (1)에 의한 이론적인 값(주파수 편화분 약 1170 Hz)에 비하여 정량적으로는 상당한 오차를 가지고 있는데, 이는 그림 7의 장치에서 반사체의 이동속도가 실제 사용환경에 비해서 매우 낮은 값이고, 따라서 계측장비의 분해능이 충분하지 못하여 이론값 정도의 적은 주파수 변화를 분석하기가 어려웠기 때문이다. 통상의 해양 선박의 이동 속도는 1.7 m/s 보다는 훨씬 더 큰 값이기 때문에, 실제 환경에서는 일반적인 계측장비로도 충분한 정확성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 이 실험을 통하여 수신주파수가 증가 또는 감소하는 도플러효과는 충분히 검증하였다고 할 수 있다.

V. 결론

시제작된 야누스형 초음파 트랜스듀서는 사용환경을 고려하여 구현하고자 하였던 2 MHz의 중심주파수를 가지며, 우수한 감도, 넓은 대역폭, 그리고 높은 지향성을 나타내었다. 또한, 폴리우레탄 수지를 이용하여 부식이 잘 되지 않고 선박에 설치가 용이하도록 설계되어졌으며, 우수한 탄성특성을 가지고 있어 수중에서의 어떤 외력에도 그 형태를 유지할 수 있는 특징을 가진다. 따라서 개발된 야누스형 초음파 트랜스듀서와 유도된 선속 측정 알고리즘을 이용하면 선박의 피칭에 의한 측정속도의 오차를 개선하여 보다 정확한 선속을 측정 할 수 있는 도플러 로그 시스템을 개발할 수 있을 것이다. 개발된 트랜스듀서의 정량적인 도플러 편이량 측정은 향후 실제 환경에서 더 수행이 되어야 할 부분이다.

참 고 문 헌

1. L. A. Stallworth and R. R. Hartley, "Ship speed indicator," U. S. Patent. No. 3,898,878, Aug. 12, 1975.
2. K. Masreliez, "Combined speed and depth sensor transducer," U. S. Patent. No. 5,235,557, Aug. 10, 1993.
3. U. Lemmin and T. Rolland, "Acoustic velocity profiler for laboratory and field studies," Journal of Hydraulic Eng., vol. 123, no. 12, 1089-1098, Dec. 1997.
4. J. A. Kritz, "Doppler speed log," U. S. Patent. No. 3,795,893, Mar. 5, 1974.
5. Kinsler, Frey, Coppens, and Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, John Wiley & Sons, 1982.
6. M.G.Silk, *Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing*, Adam Hilger Ltd, 1984.
7. K.Yanaguchi, H.Yagami, and T.Fujii, "New Method of Time Domain Analysis of the Performance of Multilayered Ultrasonic Transducers," IEEE Trans. Ultra. ferro. freq. cont,. Vol. 33, No. 6, 669-678, 1986.

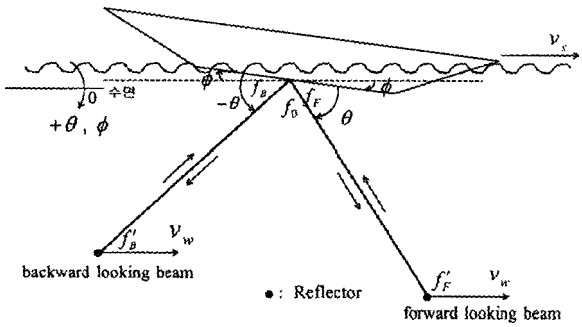
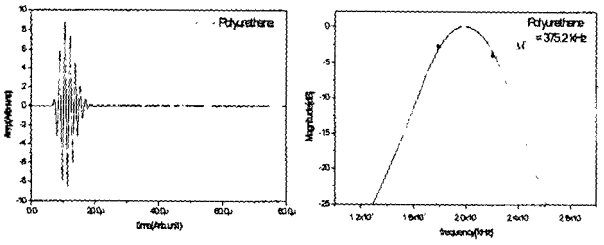


그림 1. 도플러 편이의 변수.



(a) (b)

그림 2. 모의실험 결과. (a)시간영역 특성 (b) 주파수영역 특성.

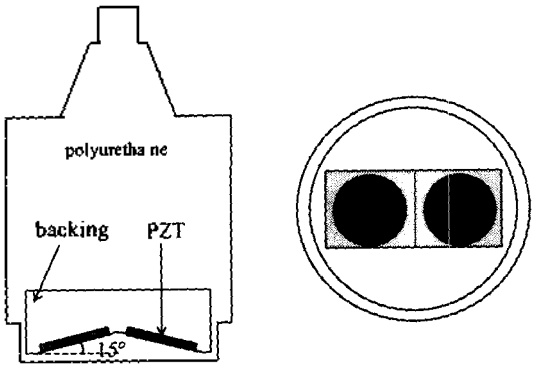


그림 3. 야누스형 초음파 트랜스듀서의 개략도.

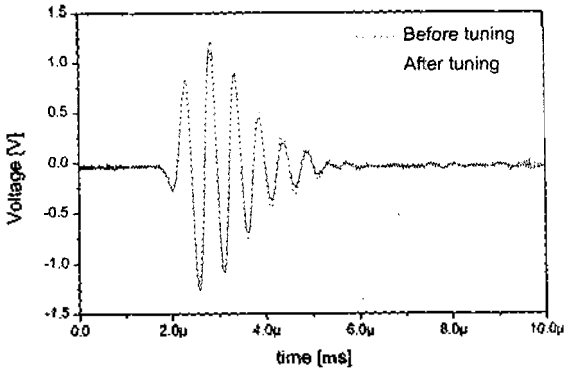


그림 6. 동조 전과 후의 파형.

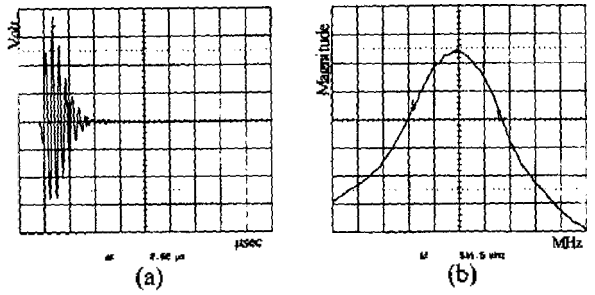


그림 4. 시제작품의 시간영역 특성(a)과 주파수 영역 특성(b).

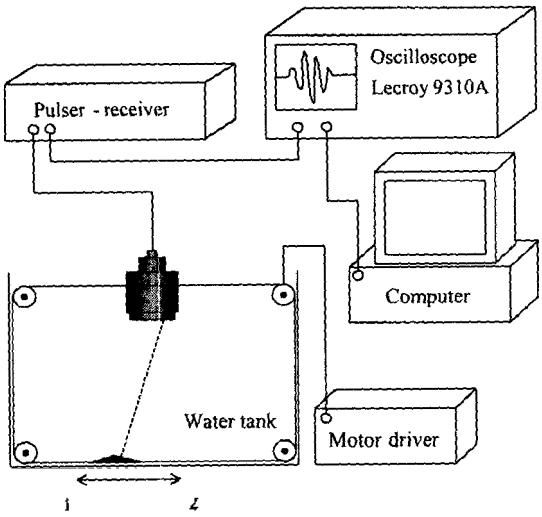


그림 7. 도플러효과를 검증하기 위한 실험 장치의 개략도.

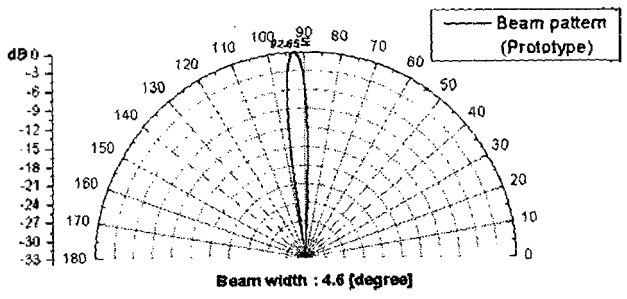


그림 5. 시제작품의 빔 특성.

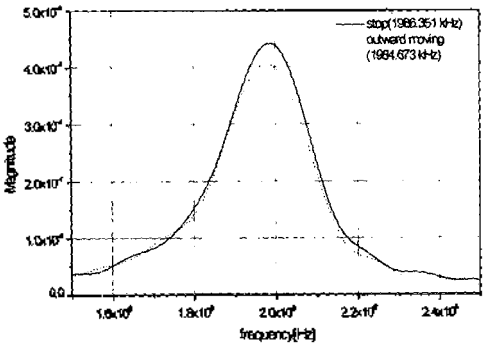


그림 8. 도플러 효과에 의한 주파수 변화.