

수중 도플러 로그용 야누스형 초음파 트랜스듀서 개발

Development of an Janus-type Ultrasonic Transducer for Underwater Doppler Log Applications

이 수 성*, 노 용 래*
(Susung Lee*, Yongrae Roh*)

*경북대학교 센서공학과

(접수일자: 2000년 1월 17일; 수정일자: 2000년 8월 10일; 채택일자: 2000년 8월 31일)

도플러 로그용 센서를 이용하여 선박의 속도를 측정하면, 선박의 수평방향 이외의 움직임, 즉 피칭이나 롤링 등에 의한 측정 속도의 부정확성이 문제가 된다. 본 연구에서는 이러한 피칭과 수중이라는 환경요인에 기인하여 다른 속도 측정용 센서들이 가지는 문제점을 극복할 수 있는 야누스형 초음파 트랜스듀서를 개발하였다. 트랜스듀서 개발을 위하여 그 작동 구조를 해석하고 그에 따라 시제품을 제작한 후, 실험적인 성능 평가를 이루었다.

핵심용어: 도플러 로그, 야누스형 초음파 트랜스듀서, 피칭

투고분야: 초음파 및 탄성파 분야

In measurement of ship speed with a Doppler log sensor, we encounter the nonhorizontal movement of a ship, i.e. pitching and rolling, and that causes inaccuracy of the measurement. In this study, we develop a Janus type ultrasonic transducer that can resolve the problems in accuracy due to the pitching and other environmental factors of common ultrasonic sensors attributed to the underwater usage. For the development, we analyze the operation mechanism of the transducer, fabricate a prototype of the sensor, and evaluate its performance through experiments.

Key words: Doppler log, Janus type ultrasonic transducer, Pitching

Subject classification: Ultrasonic and elastic waves

I. 서 론

항해 중인 선박의 운항 속도는 항해에 있어 가장 중요한 정보 중의 하나이며, 이를 측정하기 위해 여러 가지 센서들이 사용되고 있다. 센서를 이용하여 선속을 측정하는 방법으로는 전통적으로 많이 사용되는 페들-휠(Paddle-Wheel) 센서와 EM(ElectroMagnetic) 로그, 피토펜터(Pitometer) 로그와 초음파센서를 이용하는 것 등이 있다. 그 중 초음파 센서를 이용하여 선속을 측정하는 방법은 side by side 초음파 트랜스듀서[1]를 이용하는 방법과 선박 하부에 수면을 보도록 설치하는 도플러 로그용 센서를 이용하는 방법이 있다. 전자는 선박이 전진하고 있을 때 선수의 트랜스듀서에 의해 송신된 초음파가 선미의 트랜스듀서에 도달하는 시간은 선박의 속도에 비례해 짧아질 것이며, 반대로 선미의 트랜스듀서에 의해 송신되어진 초음파가 선수의 트랜스듀서에 도달하는 시간은 길어진다는 원리를 이용한 것이다. 이 방법은 두 개의 초음파 트랜스

듀서가 정확하게 마주보고(face-to-face) 있어야하므로 설치가 매우 까다롭고, 바닷물이 선체와의 사이에서 와류를 일으키게되면 초음파의 산란이 많아져 측정값에 많은 오차가 생기며, 초음파 트랜스듀서가 선박의 바닥에서 밀려 노출되어 있으므로 파손의 우려가 크다는 단점을 가진다.

반면에 도플러 로그 센서는 초음파의 도플러효과를 이용하여 선박 속도를 측정하는 방법으로서, 이에 는 다시 해저에서의 반사파를 이용하는 방법과 수중 부유물에서의 반사파를 이용하는 방법이 있다[2]. 해저에서의 반사파를 이용하는 방법은 절대 속도를 측정할 수 있다는 장점이 있으나 수심이 매우 깊은 대양에서는 초음파의 감쇠 때문에 해저로부터의 반사파를 구분하기 힘들다. 또한, 바닷물에서 멀리 전파하도록 하기 위해 저주파대의 초음파를 이용하여야 하므로 초음파 트랜스듀서의 크기가 크다는 단점이 있다. 그러나 초음파는 수중의 기포, 플랑크톤, 그리고 다른 여타의 부유물에 의해서도 반사가 되어지므로[3], 이런 수중 부유물에 의한 반사파를 이용하면 가벼운 부유물들이 해류와 같은 속도로 움직이므로 측정되어진 선박의 속도가 해류 속도에 대한 상대 속도이지만 대양에서의 측정이 가능하다는 장점이 있고, 해수면으로부터 불과 몇 미터 내외에서의 반사파를 이용하

책임저자: 이수성 (susung@asl.kyungpook.ac.kr)
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370 경북대학교 대학원 센서공학과
(전화: 053-940-8716; 팩스: 053-950-6827)

로 상대적으로 높은 주파수의 초음파를 사용할 수 있어 초음파 트랜스듀서를 작고 가볍게 만들 수 있다. 그러나 통상의 선박용 초음파 도플러 센서는 선박의 항해시에 부수적으로 발생하는 선박의 피칭(pitching)이나, 롤링(rolling) 등의 수평 움직임 이외의 동작에 의해 측정이 부정확해진다는 단점을 가지고 있다. 또한 이러한 초음파 센서를 이용하여 선박의 속도를 측정하려 할 때, 다른 선속측정용 센서들도 가지고 있는 수중이라는 환경과 설치상의 어려움, 그리고 파손의 우려 등이 문제가 된다. 따라서 수중에서의 부식문제와 해양생물의 성장에 의한 문제를 해결하고, 설치 및 유지가 쉬우며 더 정확한 선속 측정을 할 수 있는 센서의 필요성이 있어왔다.

그러므로 본 연구에서는 위와 같은 통상의 선속 측정용 센서들이 가지는 문제를 해결하기 위해 야누스형 초음파 도플러 로그용 트랜스듀서를 개발하고 작동 원리를 해석하였다. 야누스형 센서란 초음파를 발생시키는 2개 또는 4개의 진동자를 수평으로부터 일정한 각을 가지도록 원주상에 등간격으로 배열한 구조를 가져, 피칭에 의한 선속 측정의 오차를 개선할 수 있으며, 기계적, 화학적 충격에 강한 외장(case)을 도입하여 수중의 가혹한 환경 하에서 유지보수가 용이하며, 크기가 작고, 설치가 쉽다는 장점들을 가지는 센서 형태이다[4]. 본 연구에서는 이러한 특성을 가지는 야누스형 초음파 도플러 센서의 작동 미세구조를 해석하고, 그 시작품을 제작함으로써 향후 실제 환경에서의 활용을 위한 기반을 마련하고자 한다.

II. 도플러효과를 이용한 선박속도 측정 원리

2.1. 단일 트랜스듀서에 의한 선박 속도 측정

그림 1은 선박의 진행방향과 그 반대방향으로 같은 중심주파수를 가지는 초음파를 방사할 수 있는 야누스형 초음파 트랜스듀서에서 초음파의 경로를 나타낸 것이다. 먼저 그림 1에서 선박의 진행방향으로 초음파를 방사하는 트랜스듀서 한 개만을 이용한다면, 반사체의 속도가 수중에서의 음속보다 매우 작다고 가정할 때, 수신 주파수와 송신 주파수의 차이 즉, 도플러 편이는 식 (1)과 같고, 식 (2)에 의해 선박의 속도를 구한다[5].

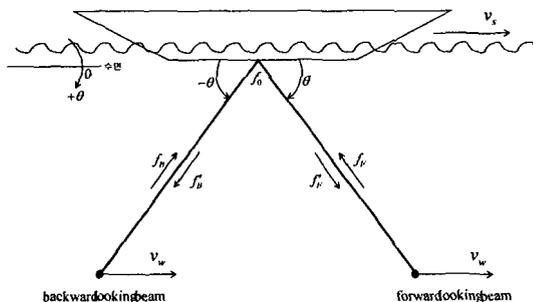


그림 1. 야누스형 트랜스듀서에 의한 초음파
Fig. 1. Ultrasound of a Janus-type ultrasonic transducer.

$$\Delta f = f_0 \frac{2v_s}{c} \cos \theta \quad (1)$$

$$v_s = \frac{\Delta f c}{2 f_0 \cos \theta} \quad (2)$$

여기서, f_0 는 송신주파수이며, v_s 는 선박의 속도, c 는 수중에서의 음속이고, θ 는 초음파 빔과 수면과의 각이다. 위의 식 (2)는 일반적으로 단일 소자 도플러 로그에서 선박의 속도를 측정할 때 사용되어지는 수식이지만, 실제 항해시에 항상 발생하는 선박의 피칭에 의한 영향을 전혀 고려할 수 없으므로 오차를 가지게 되며, 따라서 이를 보상하기 위해 장시간에 걸친 평균화를 취하여 그 오차를 줄이고 있으므로 실시간 측정이 어렵다[6].

2.2. 야누스형 트랜스듀서에 의한 선박 속도 측정 - 피칭각 무시

야누스형 초음파 트랜스듀서는 선박의 진행방향과 그 반대방향으로 같은 중심주파수를 가지는 초음파를 방사할 수 있으며, f_F 와 f_B 는 전, 후방을 향하는 각각의 트랜스듀서에 의해 방사된 후 수중 반사체에 의해 반사되어 수신된 초음파 신호의 중심주파수이다. 만약 피칭에 의한 영향을 고려하지 않고, 반사체의 속도가 매우 작다고 가정하면 f_F 와 f_B 는 도플러효과에 의해 식 (3), (4)와 같다. 다시 c 가 v_s 에 비해 월등히 크다고 가정하면, 편이된 두 주파수의 차이는 식 (5)로 표현되며, 식 (6)에 의해 선박의 속도를 측정할 수 있다.

$$f_F = f_0 \frac{c + v_s \cos \theta}{c - v_s \cos \theta} \quad (3)$$

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

$$f_F - f_B = f_0 \frac{4 v_s}{c} \cos \theta \quad (5)$$

$$v_s = \frac{(f_F - f_B) c}{4 f_0 \cos \theta} \quad (6)$$

식 (6)과 같이 야누스형 초음파 트랜스듀서를 이용하면 선박의 속도는 전·후향의 초음파 빔에 의한 도플러 주파수의 차이에 의해 측정되며, 두 주파수의 차이는 전·후향에서의 도플러 편이의 합과 같다. 즉, 야누스형 초음파 트랜스듀서를 이용하면 식 (6)과 같이 평균의 의미를 포함하여 선박의 속도를 측정하므로 피칭에 의한 영향을 줄일 수 있을 것이다. 그러나 식 (6)은 선박의 운항 중 발생할 수 있는 여러 요인들, 그 중에서도 가장 대표적인 피칭의 영향을 고려하지 못하고 있으므로 정확한 선속 값에 비해서 어느 정도의 오차는 불가피하게 가지고 있다고 할 수 있다. 하지만 선박의 피칭시에, 두 개의 센서를

가지는 야누스형 초음파 트랜스듀서를 이용하는 경우 그 중 하나의 센서에서 수신되는 신호는 수면과 빔 사이의 각이 평형상태일 때 보다 피칭각 만큼 크고, 또 다른 하나는 각이 피칭각 만큼 작으므로 식 (6)과 같이 평균의 의미를 가지고 선박의 속도를 측정하므로 단일 소자 도플러 로그에 비하여 피칭에 의한 오차를 상당 부분 개선할 수 있을 것이다. 또한 실제 운항 환경에서 순간 순간 무작위로 발생하는 피칭각을 정확히 알기는 어려운 현실적인 상황을 고려한다면, 피칭각의 영향이 매우 크지 않다면 식 (6)은 매 순간마다 상당 수준 정확한 선속을 측정하는데 사용될 수 있는 유용한 식으로 이용될 수 있다.

2.3. 야누스형 트랜스듀서에 의한 선박 속도 측정 - 피칭각 고려

본 절에서는 식 (2)와 식 (6)에서 고려되지 못하는 피칭의 영향이 어느 정도인가를 분석하여, 식 (2)와 (6) 각각의 정확성 정도를 평가하고자 한다. 그림 2에 선박이 ϕ 만큼 피칭하였을 때를 나타내었다. 선박이 피칭을 하여 피칭각 ϕ 를 가지게 되면 전방을 향하는 초음파에서 수면과 초음파 빔 사이의 각은 평형상태에서의 각 θ 보다 ϕ 만큼 커지게 되고, 후방을 향하는 초음파에서 수면과 초음파 빔 사이의 각은 ϕ 만큼 작아지게 된다. 앞 절에서는 무시하였던 반사체의 속도 v_w 가 더 이상 작지 않다고 하고, 피칭과 반사체의 속도를 고려하였을 때 구해지는 선속을 v_{sm} 이라고 하면, 전·후방 각각에서 수신되는 초음파 신호의 중심주파수 f_F 와 f_B 는 아래와 같다.

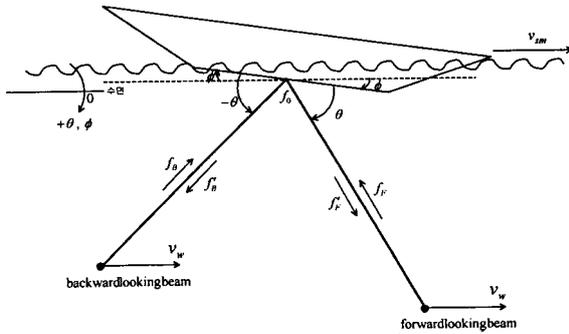


그림 2. 야누스형 초음파 트랜스듀서를 사용하는 배가 $+\phi$ 로 피칭한 경우

Fig. 2. Pitching of a ship in use of a Janus-type ultrasonic transducer.

$$f_F = f_0 \frac{c - v_w \cos(\theta + \phi)}{c - v_{sm} \cos(\theta + \phi)} \frac{c + v_{sm} \cos(\theta + \phi)}{c + v_w \cos(\theta + \phi)} \quad (7)$$

$$f_B = f_0 \frac{c + v_w \cos(\theta - \phi)}{c + v_{sm} \cos(\theta - \phi)} \frac{c - v_{sm} \cos(\theta - \phi)}{c - v_w \cos(\theta - \phi)} \quad (8)$$

따라서, 피칭각과 반사체의 속도에 의한 영향이 고려된 실제 선박의 속도 v_{sm} 은 다음과 같다.

$$v_{sm} = \frac{c(a - \beta - \gamma) - (a + \beta + \gamma)\xi}{2\xi(a + \beta - \gamma)} + \frac{c\sqrt{((a + \beta + \gamma)\xi + (\beta + \gamma - a)\gamma)^2 - 4\xi(a + \beta - \gamma)(\beta - a - \gamma)}}{2\xi(a + \beta - \gamma)} \quad (9)$$

여기서, $a = \frac{f_F - f_B}{f_0}$, $\beta = \frac{c - v_w \cos(\theta + \phi)}{c + v_w \cos(\theta + \phi)}$,

$\gamma = \frac{c + v_w \cos(\theta - \phi)}{c - v_w \cos(\theta - \phi)}$, $\xi = \cos(\theta + \phi)$, 그리고,

$\chi = \cos(\theta - \phi)$ 이다. 식 (9)에 의해 구해지는 v_{sm} 은 식 (6)에서는 고려되지 못하는 피칭각과 반사체의 속도 영향을 포함하고 있으므로, 실제 환경을 더 정확히 묘사하고 있고, 사전에 반사체의 속도와 피칭각을 알고 있으면 선속을 가장 정확하게 구할 수 있는 식이기도 하다. 따라서 식 (9)는 피칭각을 정확히 알기 어려운 상황에 대해서는 야누스형 트랜스듀서에 대해 통상적으로 사용되는 속도 식 (6)의 타당성을 검증하는 기준이 될 수 있을 것이다.

2.4. 피칭 영향에 의한 오차

피칭각의 영향을 고려하지 못했을 때 식 (2)와 식 (6)이 가지는 정확도를 평가하기 위하여, 반사체가 정지되어 (v_w) 있다고 가정한 후 임의의 크기의 피칭 각 ϕ 를 인위적으로 식 (9)에 발생시켰을 때 구해지는 선속 값과 그때 식 (2), (6)에 의해 구해지는 선속 값과의 차이를 구하여, 그에 따른 오차를 식 (10)에 의해 기준 값 v_{sm} 에 대해 구하여 그림 3에 나타내었다.

$$Error(\%) = \left| \frac{v_{sm} - v_s}{v_{sm}} \right| \times 100 \quad (10)$$

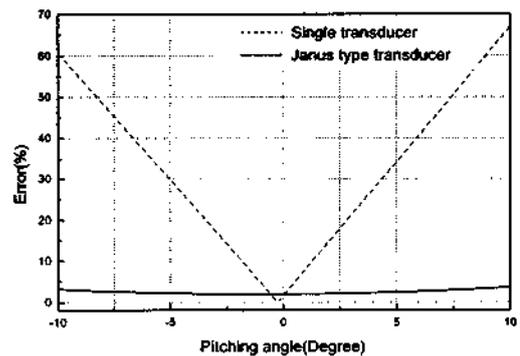


그림 3. 피칭각에 대한 선속 측정 오차 ($v_w = 0$)

Fig. 3. Error between real velocity and measured velocity when ship is pitching ($v_w = 0$).

그림 3에서는 피칭각의 영향이 무시되었을 때의 영향을 정량적으로 평가하기 위한 한 예로서 위의 식들에 나타난 진동자의 배치 각도를 임의로 15° 로 설정하였고, 따라서 그림 2에 나타난 $\theta - \phi$ 값이 0° 이상이 되기 위

한 피칭각의 범위는 $-15^\circ \leq \phi \leq 15^\circ$ 가 된다. 그림 3에는 오차를 보기위한 피칭각의 범위로 $-10^\circ \sim 10^\circ$ 까지 나타내었다. 그림 3에서 보는 바와 같이 피칭각이 $\pm 10^\circ$ 가 되더라도 식 (6)에 의해 계산되는 선속은 3%내의 미소한 오차를 가지는데 반해 식 (2)에 의해 계산되는 선속은 60~70%의 높은 오차를 발생시킨다는 것을 알 수 있다. 따라서 단일 트랜스듀서에 의해 선속을 측정할 경우 정확한 선속 v_{sm} 에 비해 매우 많은 오차를 가지므로 실제 적용이 어렵다고 결론을 내릴 수 있다. 반면에 야누스형 초음파 트랜스듀서와 식 (6)을 이용할 경우, 단일 트랜스듀서에 의한 선속 측정 오차를 월등히 개선할 수 있고, 피칭의 영향은 고려할 수 없지만 정확한 피칭각을 고려하는 것에 비해 상대적으로 매우 작은 오차 범위내에서 정확한 선속값을 산출해낼 수 있음을 알 수 있다. 그러므로 피칭 각을 별도의 기구에 의해 알 수 있다면 식 (9)를 이용하여 정확한 선속을 구할 수 있을 것이지만, 피칭 각을 알 수 없는 경우에도 식 (6)에 의해 진동자 기울기가 15° 일 때 피칭각 $\pm 10^\circ$ 의 범위 내에서 최대 3% 이내의 오차를 가지는 선속을 구할 수 있고, 따라서 식 (6)은 유용한 간략식으로 사용될 수 있음을 알 수 있다. 단 여기서 사용한 진동자의 기울기 15° 는 편의상 설정한 값이므로, 필요에 따라 그 값을 달리한다면 이러한 오차 범위 또한 달라질 것이다.

2.5. 피칭각 산출

수면을 향해중인 선박은 피칭을 할 수밖에 없으며, 어느 정도 피칭했다는 것을 알 수 있다면 항해에 유용한 정보가 될 수 있을 것이지만 이런 피칭을 측정하기 위해서는 또 다른 센서들이 필요하다. 그러나 야누스형 초음파 트랜스듀서는 전·후방 각각에서 수신되는 신호의 주파수를 이용하여 선박의 피칭각을 구할 수 있다. 즉, 식 (7)과 (8)에서 반사체의 속도가 음속보다 월등히 작다고 가정하고 두 수식을 연립하여 v_{sm} 을 소거 후 피칭각 ϕ 를 구하면, 각각에 수신된 도플러 주파수를 이용하여 식 (11)과 같이 피칭각을 구할 수 있다.

$$\phi = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{\tan \theta} \frac{(f_0^2 - f_F f_B)(f_F + f_B - 2f_0)}{f_0(f_F^2 - f_B^2 - 2f_0 f_F + 2f_0 f_B)} \right\} \quad (11)$$

그러나 이렇게 구한 피칭각이 바로 식 (9)와 연결되어 실시간으로 선속 측정으로 연결될 수 있을지는 전적으로 도플러 트랜스듀서 운용시스템의 신호처리 속도에 의해 결정될 것이다.

III. 초음파 트랜스듀서 설계

그림 4는 이상과 같은 원리에 의해 작동되도록 본 연구에서 제작한 야누스형 초음파 트랜스듀서의 개략적인 구조를 나타낸다.

3.1. 중심주파수

본 논문에서는 바닷물 속의 부유물들에 의해 산란된 초음파 신호를 이용하는 야누스형 초음파 트랜스듀서에 대해 설명한다. 바닷물 속의 부유물(기포, 플랑크톤 등등)들은 수면으로부터 불과 몇 미터 내외에 집중적으로 분포하고 있으므로 초음파는 이 곳에서 가장 산란이 많이 된다. 야누스형 트랜스듀서의 전·후방으로부터 되돌아오는 초음파 신호는 전후방의 서로 다른 부유물에 의해 반사되는데, 만약 전후방의 부유물들이 서로 다른 속도를 가지고 있다면, 이는 측정 속도에 오차를 유발하는 요인이 된다. 따라서 부유물의 수평속도의 변화가 심하지 않다고 가정할 수 있는 선박으로부터 3m 내외의 깊이에서의 반사파를 이용하기로 하며, 3m 내외에서 가장 좋은 효율을 가지는 2MHz의 초음파를 사용하기로 한다[7]. 2MHz의 비교적 높은 주파수의 초음파를 사용하면 실제 트랜스듀서의 제작시 트랜스듀서의 크기를 작게 하며 무게를 가볍게 하고, 또한 제작 가격을 낮출 수 있는 장점이 있다.

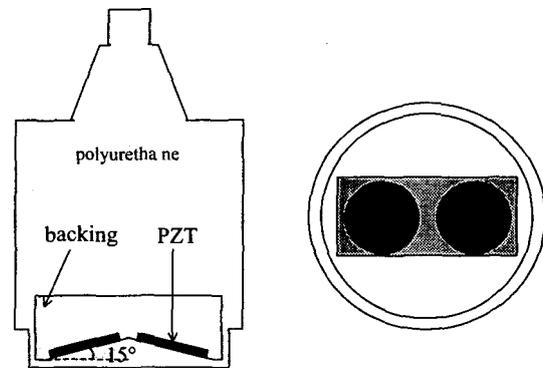


그림 4. 야누스형 초음파 트랜스듀서의 개략도
Fig. 4. Schematic diagram of the Janus-type ultrasonic transducer.

3.2. 진동자

진동소자는 얇은 원판형의 PZT를 사용하고, 큰 음압을 얻기 위해 두께 공진 모드를 이용한다. 본 연구에서 개발하려는 초음파 트랜스듀서는 수중의 작은 부유물에 의한 산란파를 수신하여야 하므로, 산란파의 에너지를 높이기 위해서는 좁은 빔폭을 가질수록 유리하다. 원판형 음원의 지향성은 식 (12)와 같다[8].

$$D = \frac{(ka)^2}{1 - J_1(2ka)/ka} \quad (12)$$

여기서, k 는 파수, a 는 원판의 반지름이고, J_1 은 1차 Bessel 함수이다. 식 (12)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.

3.3. 후면층

후면층은 일반적으로 진동소자의 후면으로 전파하는 초음파를 흡수하여 대역폭을 넓히는 목적으로 사용되어진다. 그러나 본 연구에서는 이와 더불어 진동자 두 개를 수평에 대하여 일정한 각을 가지도록 지지하는 역할도 수행하도록 후면층을 설계하였다. 이런 용도로 쓰이는 경우 음파의 감쇠성과 더불어 후면층은 외부의 충격, 온도 등에 의해 변형률이 적어야 하며, 가공성이 좋아야 한다. 후면층을 이용하면 트랜스듀서의 대역폭이 넓어지는 대신에 후면층의 감쇠성에 의해 에너지를 흡수하여 감도를 떨어뜨린다는 단점이 있으므로, 본 연구에서는 감도를 높이는데 중점을 두어 후면층을 설계하였다. 감도를 나타내는 지수로는, 트랜스듀서의 시간영역 특성에서 n 번째 cycle의 진폭을 A_n , n-1 번째 cycle의 진폭을 A_{n-1} 이라 할 때, A_n 과 A_{n-1} 의 비를 사용한다[9]. 일반적인 초음파 트랜스듀서는 이 지수가 0.1~0.75사이의 값 중 0.3을 많이 사용하나, 본 연구에서는 감도를 높이기 위해 0.75의 값을 가지도록 하였으며, 이 경우 후면층의 음향임피던스는 식 (13)에 의해 3.4 Mrayl이다. 이 값에 가장 근접하는 음향 임피던스를 가지며 요구되는 기계적 특성을 만족하는 상용재료로 세포 베크라이트를 선정하였으며, 이 재료의 밀도는 1327 kg/m³, 음속은 2592 m/s 이다.

$$z_B = z_c \left[1 - 0.75 \left(\frac{z_c - z_L}{z_c + z_L} \right) \right] \cdot \left[1 + 0.75 \left(\frac{z_c - z_L}{z_c + z_L} \right) \right]^{-1} \tag{13}$$

여기서, z_c = 진동소자(ceramic)의 음향 임피던스,
 z_L = 방사매질(물)의 음향 임피던스.

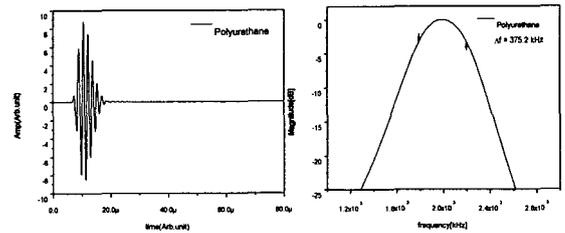
3.4. 외장

본 연구에서 개발하고자 하는 초음파 트랜스듀서는 수중용이다. 따라서 외장으로 하여금 다른 선속측정용 센서들이 가지는 수중에서의 부식 문제를 해결하고, 또한 선박의 진행시 물 또는 표류물질에 의한 기계적인 충격으로부터 트랜스듀서를 보호하는 기능을 수행하도록 하였다. 그리고 본 트랜스듀서에서는 진동자가 수면으로부터 일정한 각을 가져야 하므로 별도의 정합층을 두기가 어렵고, 따라서 외장이 정합층의 역할도 동시에 수행하도록 하였다. 이상의 기계적, 음향적 특성을 만족하는 대상재료로서 일반적으로 초음파 트랜스듀서용으로 널리 사용되는 고분자 재질들 중 표 1에 나타난 것들을 선정하였으며, 이들 중 어느 것이 가장 우수한 것인가는 이들을 이용한 트랜스듀서의 성능을 모의실험한 결과로써 결정하였다. 시뮬레이션 방법으로는 각 층에서 음향파의 반복적인 전파와 반사를 근거로 한 임피던스 반복 해석법을 이용하였다 [10-11]. 그 결과를 보인 표 1에서 음향임피던스가 1.6~1.7 Mrayl 정도의 값을 가지는 폴리우레탄 계열을 외장으로 사용하면 감도가 가장 높고 지속시간 또한 가장 짧은 것으로 나타났다. 그 중 가장 우수한 것으로 판명된

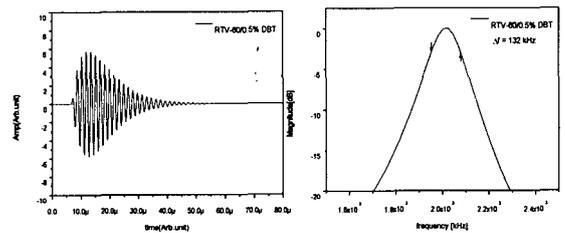
폴리우레탄을 사용한 경우와, 이와외의 비교를 위해 RTV-60/0.5% DBT를 사용한 경우에 대하여 시간영역 특성과 주파수영역 특성을 그림 5에 나타내었다. 그림 5의 주파수 도메인에서 Δf 는 -3dB 대역폭이다. 폴리우레탄이 DBT에 비해 감도는 약 50% 크고, 지속시간은 28% 정도 짧은 특성을 보이고 있다.

표 1. 모의실험 대상(외장)의 음향 특성과 모의실험 결과
 Table 1. Acoustic properties of rubber for simulation(case) and results.

Rubber	sound velocity (km/s)	density ($\times 10^3$ kg/m ³)	acoustic impedance (Mrayl)	Vp-p of the transducer (Arb.unit)	Ringdown time (Arb.unit)
Dow Silastic Rubber GP45	1.02	1.14	1.16	4.23	250
Dow Silastic Rubber GP70	1.04	1.25	1.30	5.11	234
Ecothane CPC-41	1.52	1.01	1.54	6.53	210
Polyurethane	1.50	1.10	1.65	8.74	162
Sylgard 170	0.97	1.38	1.34	5.35	226
RTV-60/0.5% DBT	0.94	1.49	1.41	5.76	226



(a) 외장 : Polyurethane



(b) 외장 : RTV-60/0.5% DBT

그림 5. 모의실험 결과
 Fig. 5. Results of simulation.

IV. 초음파 트랜스듀서의 제작

3장에서 설계되어진 재료들과 치수를 토대로 그림 4의 형태로 야누스형 초음파 트랜스듀서를 제작하였다. 그림 4의 형태는 외력에 의하여 초음파 트랜스듀서가 변형, 또는 파괴되지 않을 정도의 범위에서 최대한 크기가 작고 선박에 설치가 용이하고, 방수 처리가 되도록 결정하였다. 그리고 진동자의 기울어진 각이 크면 도플러 편이는

크겠지만, 수심 3m에서 다른 두 반사체가 위치가 많이 멀어지게 되므로 두 반사체의 속도가 같다고 가정하기 어렵다. 또한 각이 크면 트랜스듀서 내의 초음파가 중첩되는 부분에서 간섭현상이 커질 수 있고, 외장의 edge를 초음파가 통과하는 경우가 생기고, 제작상에 진동자의 설치각을 정확히 맞추기가 힘들어지는 어려움이 있으므로 이러한 상황을 고려하여 그 각을 15°로 선정하였다.

야누스형 초음파 트랜스듀서를 이용하는 도플러 로그는 식 (6)을 이용하여 선박의 속도를 측정한다. 그러나 식 (6)에서 수중에서의 음속 c 는 온도, 염도, 그리고 압력의 함수이므로 그 값이 항상 일정하다고 할 수 없다. 따라서 정확한 속도 측정을 위해 음속의 변화에 의한 영향을 보상하여야만 하고, 그 방법으로 외장에 서미스터를 내장하여 온도를 측정하고 각 온도에 따른 폴리우레탄의 음속을 이용하여 수중에서의 음속 변화를 보상한다. 그림 6에서 c_p 는 폴리우레탄의 음속이며, c_w 는 수중에서의 음속이고, 이들은 물과 폴리우레탄의 경계에서 Snell의 법칙을 만족한다. 식 (6)에서 음속 c 는 c_w 와 같고, $\sin \alpha = \cos \theta$ 이므로 식 (6)을 다시 쓰면 다음과 같다.

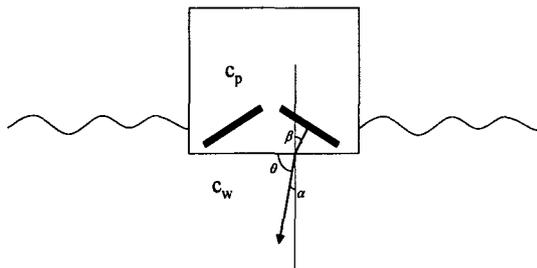


그림 6. 폴리우레탄과 물 사이의 경계면에서 초음파
Fig. 6. Ultrasound at a boundary between water and polyurethane.

$$v_s = \frac{(f_F - f_B) c_p}{4 f_0 \sin \beta} \quad (14)$$

즉, 폴리우레탄의 음속은 온도의 함수이므로, 폴리우레탄 음속을 온도에 따라 정량화한 자료가 있으면 식 (14)에 의하여 수중에서의 음속의 복잡한 변화에 영향을 받지 않고 선속을 측정할 수 있다. 이를 위해 트랜스듀서에 서미스터를 내장한다.

V. 초음파 트랜스듀서의 성능 측정

본 연구에서 제작하고자 하는 수중 도플러 로그용 야누스형 초음파 트랜스듀서는 중심주파수 2MHz를 가지고, 최대 감도와 대역폭이 클수록 좋다. 또한 초음파 빔을 집중시키기 위해 빔폭이 작은 것이 좋다. 제작된 야누스형 초음파 트랜스듀서의 성능은 펄스-에코법으로 측정하였으며, 그림 7에 성능측정의 결과를 시간영역과 주파수영역으로 나타내었다. 제작되어진 트랜스듀서는 구현하고자 하였던 중심주파수 2MHz를 가지고, 대역폭은 341.5kHz, 그리고

지속시간은 2.62μs이다. 그림 7의 결과를 그림 5의 모의 실험 결과와 비교해 보면 거의 일치하여, 제작된 트랜스듀서 시편은 실제 결과가 적절히 반영된 것임을 알 수 있다. 그리고 반사체로 작은 쇠구슬을 이용하여 빔폭을 측정하였으며, 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 또한 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 9에서 보는 바와 같이 동조에 의한 영향이 크지 않으므로 트랜스듀서에 동조는 하지 않는다.

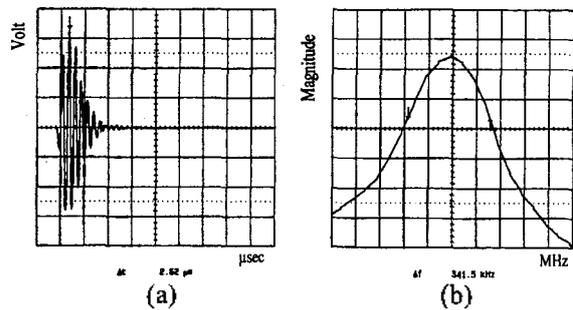


그림 7. 시제작품의 (a)시간영역 특성 (b)주파수 영역특성
Fig. 7. (a) Time domain response, (b) frequency domain response of the prototype.

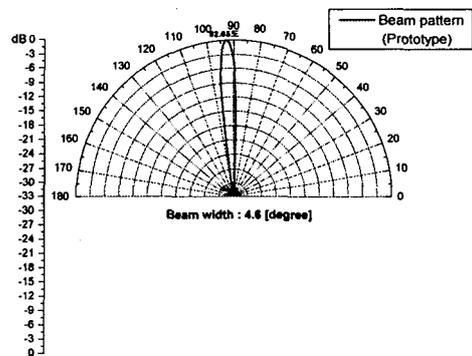


그림 8. 시제작품의 빔 특성
Fig. 8. Beam pattern of the prototype.

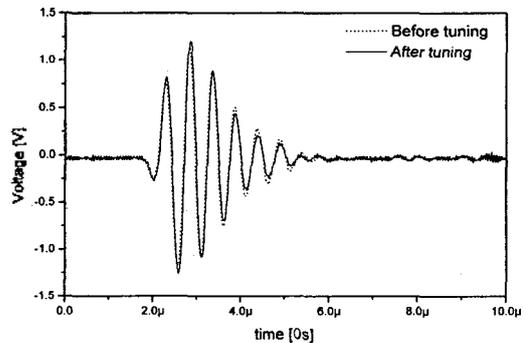


그림 9. 시제작품의 동조 전과 동조 후의 시간 영역 특성
Fig. 9. Time domain responses of the prototype(before & after tuning).

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 이동하며 피칭에 의해 수면과 빔 사이의 각이 수시로 변하지만, 실험실 환경에서 센서를 움직이게 하는 것에 어려움이 있어서, 대신에 반사체만을 이동하게 하여 도플러 편이를 측정할 수 있도록 하였다. 그림 10은 도플러 편이 측정을 위한 실험 장치도이며, 그림 10에서 수조의 우측 상단 도르레에 양방향 모터를 연결하여 반사체가 좌우로 움직일 때 같은 속도를 가지도록 하였다. 이 때 반사체의 속도는 1.7m/s이다. 측정 결과 트랜스듀서로부터 반사체가 멀어지는 경우의 도플러 편이는 -1,678Hz로 주파수가 감소하는 것을 알 수 있었고, 반사체가 가까워지는 경우의 도플러 편이는 1,850Hz로 증가한 것을 알 수 있었다. 그림 11에 반사체가 멀어지는 경우의 수신신호의 주파수를 나타내었다. 이 측정 결과는 식 (1)에 의한 이론적 값($\Delta f = 1170\text{Hz}$)에 비하여 정량적으로는 상당한 오차를 가지고 있는데, 이는 그림 10의 장치에서 반사체의 이동 속도가 실제 사용환경에 비해서 매우 낮은 값이고, 따라서 계측장비의 분해능이 충분하지 못하여 이론값 정도의 작은 주파수 변화를 분석하기가 어려웠기 때문이다. 통상의 해양 선박의 이동 속도는 1.7m/s 보다는 훨씬 더 큰 값이기 때문에, 실제 환경에서는 일반적인 계측장비로도 충분한 정확성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 이 실험은 단지 야누스형 초음파 트랜스듀서를 이용하여 도플러효과를 검증할 수 있는지의 여부만을 확인하였고, 향후 실험실 환경이 아닌 실제 상황에 적용하여, 피칭에 의한 영향을 고려할 수 있도록 하여 속도 측정식 (6)과 피칭각 산출식 (11)의 실험적 오차를 확인할 필요가 있다.

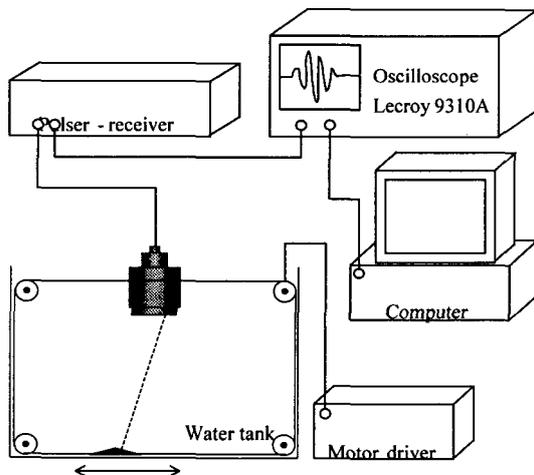


그림 10. 도플러효과를 검증하기 위한 실험 장치의 개략도
Fig. 10. Schematic diagram of a measurement system for the Doppler effect.

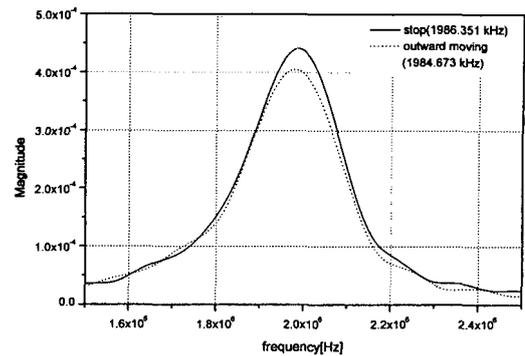


그림 11. 도플러 효과에 의한 주파수 변화
Fig. 11. Frequency shift due to the Doppler effect.

VI. 결 론

선박의 속도를 측정하기 위해 사용되는 기존의 여러 센서들은 어떠한 원리를 이용하느냐에 따라 측정오차가 크고, 사용환경이 수중이기 때문에 부식 등의 문제가 있으며, 기계적인 충격에 약하여 오래 사용하지 못한다는 단점이 있고, 또한 설치상의 어려움 등이 있어 왔다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결할 수 있는 도플러 로그용 야누스형 초음파 트랜스듀서의 작동 메커니즘을 해석하고, 그에 따라 시작품을 설계하고 제작하였으며, 그 성능을 평가하였다. 개발된 센서를 이용해 선속을 측정하면 피칭에 의한 영향을 최소화 할 수 있으며, 또한 수중에서 음속의 온도, 염도, 압력의 변화에 의한 복잡한 영향을 보상할 수 있을 것으로 사료된다.

시제작된 야누스형 초음파 트랜스듀서는 사용환경을 고려하여 구현하고자 하였던 2MHz의 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 측정과 피칭의 영향을 고려한 실험은 향후 실제 환경에서 더 수행이 되어야 할 부분이다.

참 고 문 헌

1. L. A. Stallworth, 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, T. Rolland, "Acoustic velocity profiler for laboratory and field studies," Journal of Hydraulic Eng.,

- vol. 123, No. 12, pp. 1089-1098, Dec. 1997.
4. F. Peynaud, G. Pesseme, "Navigation systems utilising the doppler effect," U. S. Patent. No. 3,818,425, June 18, 1974.
 5. P. Tortoli, G. Guidi, V. Mariotti, and V. L. Newhouse, "Experimental proof of Doppler bandwidth invariance," IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, Frequency Control, vol. 39, No. 2, pp. 196-203, Mar. 1992.
 6. S. D. Lerner, "Doppler sonar utilizing period measurement with thresholded receivers," U. S. Patent. No. 3,863,198, Jan. 28, 1975.
 7. J. A. Kritz, "Doppler speed log," U. S. Patent. No. 3,795,893, Mar. 5, 1974.
 8. L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens, and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*, (Jhon Wiley & Sons, New York, 1982), Chap. 8, pp. 183-185.
 9. M. G. Silk, *Ultrasonic Transducers for Nondestructive Testing*, (Adam Hilger Ltd., Bristol, 1984), Chap.2, pp. 16-18.
 10. 김연보, 노용래, "고출력 광대역 초음파 탐촉자를 위한 정합층 설계," 한국음향학회지 15권5호, pp. 82-89, 1996.
 11. K. Yamaguchi, H. Yagami, and T. Fujii, "New method of time domain analysis of the performance of multilayered ultrasonic transducers," IEEE Trans. on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, vol. 33, No. 6, pp. 669-678, Nov. 1986.

▲ 이 수 성(Susung Lee)



1999년 2월 : 인제대학교 의용공학과
(공학사)

1999년 3월~현재 : 경북대학교 대학원
센서공학과 석사과정

※ 주관심분야: 초음파 트랜스듀서

▲ 노 용 래(Yongrae Roh)

한국음향학회지 제18권 8호 참조