

SSBL 방식과 핑거동기 방식을 조합한 바이오텔레메터리 방식의 개발(1) - 시스템의 설계 및 제작 -

박주삼[†] · 古澤昌彦^{*}

여수대학교 수산과학연구소, *東京水産大學

Development of Biotelemetry Method by Combining the SSBL Method and the Pinger Synchronizing Method (1) - Design and production of system -

Ju Sam PARK[†] and Masahiko FURUSAWA^{*}

The Fisheries Science Institute, Yosu National University

*Tokyo University of Fisheries

Abstract

A new biotelemetry method that the installation and the treatment of equipment is convenient and the instantaneously detailed location of the fish attached the pinger is able to track comparatively easily was developed. The receiving system in this biotelemetry method was advanced for track the detailed behavior of the fish by the miniature tracking pinger, because it was a burden to fish to add the pinger with the water temperature and the pressure sensor. By combining of the super short base line (SSBL) method to detect the direction of pinger and the pinger synchronizing method to measure the range from receiving transducer to pinger, the three dimensional locations of fish to the receiving transducer is gotten instantaneously. The receiving system is devised to realize the high precision or wide detection range by application of the basic design method for receiving system of biotelemetry developed by the present authors and the hydrophone array configuration. The measurement distance error in the pinger synchronizing method is minimized through the correction of which the deviation of transmission pluse period of pinger is caused by changing water temperature. A prototype system which is able to track the instantaneously detailed location of the fish by the SSBL and pinger synchronizing biotelemetry (SPB) method was produced.

Key words : SPB method(SPB 방식), SSBL method(SSBL 방식), pinger synchronizing method(핑거 동기 방식), advance of reception system(수신계의 고도화), SPB system(SPB 시스템)

서 론

초음파 핑거를 어류에 부착하여 원격으로 어류의

이동경로를 추적하는 바이오텔레메터리 방식은 핑거가 발사하는 음을 표적으로 어류의 행동생태를 파악하는 중요한 수단이다. 이러한 바이오텔레메터리의

[†] Corresponding author : hanna@yosu.ac.kr

최대 장점은 대상생물의 순간적인 행동상태와 서식환경을 동시에 상세하게 조사할 수 있는 것으로, 많은 연구가 보고되고 있다(Ireland and Kanwisher, 1978; Amlaner and MacDonald, 1979; Hawkins and Urquhart, 1983; 添田編, 1990). 그러나, 바이오텔레메터리는 유효성이 있는 반면에 문제점도 지적되고 있다. 바이오텔레메터리의 문제점으로는 부착할 어류의 크기에 비해 핑거의 크기가 크다는 것, 핑거의 수명이 충분히 길지 않다는 것, 어군의 행동상태 파악이 어렵다는 것, 어류의 상세한 행동을 파악하기 어렵다는 것, 장비의 설치 및 취급이 간편하지 못해 선박에 의한 추적이 쉽지 않은 것, 어류를 연속적으로 장기간에 걸쳐 확실하게 추적하기 어렵다는 것 등을 들 수 있다.

이러한 문제 해결을 위해 송신기, 송신방식, 수신방식의 개발이 활발히 이루어지고 있다. 핑거는 최근 전자기술의 진보에 의해 길이 24mm, 직경 8mm의 초소형으로 개발되었으며, 송신방식도 다수의 어류의 행동을 추적하기 위해 임의의 주파수에 펄스 간격을 코드화한 신호를 발생시켜 수신측에서 혼신을 피하도록 한 방식이 개발되어(Voegeli *et al.*, 1998), 응용되고 있다(Lacroix and McCurdy, 1996). 또한, 핑거음을 수신하는 방식을 개발하여 어류의 순간적인 상세한 행동 추적을 도모하고 있다.

지금까지 핑거음을 수신하는 방법에 따른 바이오텔레메터리 방식은 첫째 지향성을 가진 단일수파기를 회전시켜 핑거음이 최대가 되는 수파기의 방향으로부터(Voegeli *et al.*, 1998; Stasko and Polar, 1973) 또는, 복수의 지향성을 가진 수파기를 배열하여 가장 큰 핑거음을 수신한 수파기의 방향으로부터(Bertrand *et al.*, 1999; Young *et al.*, 1972) 어류의 대략적인 방향을 판단하는 최대감도방식, 둘째 수파기 또는 하이드로폰을 임의의 위치에 설치하여 각각의 수파기 또는 하이드로폰에 도달한 핑거음의 시간차로부터 어류의 위치를 측정하는 음원측위방식이 주로 이용된다. 음원측위방식은 보통의 음원측위와 같이 기선의 길이를 기준으로 한 long base line (LBL) (Hawkins *et al.*, 1974), short base line (SBL) (韓, 1994) 방식이 이용된다. 최근에는 계량어군탐지기에 사용되고 있는 스프리트빔 방식으로 바이오텔레메터리를 시도한 바도 있다(Hedgepeth *et al.*, 1998).

이와 같이 바이오텔레메터리 방식은 진보를 거듭하고 있지만, 어류를 추적하기 위해서는 여전히 문제점이 남아 있다. 송신측의 핑거로부터 어류의 존재위치와 수심, 수온 등의 정보를 동시에 얻고자 하는 경우,

핑거의 크기가 커지며, 수명이 짧아지고, 가격이 높아지기 때문에 소형의 어류와 어군의 추적이 어려워진다. 한편, 수신측의 최대감도방식은 자세한 어류의 행동 파악이 어렵고, LBL, SBL의 음원측위방식은 무지향성의 하이드로폰을 임의의 거리에 복수로 설치하여 사용하기 때문에 항주하는 선박에 의한 광범위한 검지가 어려우며, 장비의 설치나 취급이 간편하지 못하다. 또한, 스프리트빔 방식은 고정도의 표적강도(target strength: TS)를 측정하기 위해 빔폭을 좁게 하기 때문에 어류를 추적하기에는 적합하지 못하다.

따라서 대상생물의 행동정보를 늘리고, 항주하는 선박에 의해 넓은 범위에서 연속적이며 자세하게 행동을 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 장비의 설치와 취급이 간편한 시스템의 개발이 필요하다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 소모품으로 사용되는 핑거를 개발하기에는 연속적이면서 자세한 행동파악, 장비의 설치 및 취급 등의 한계가 있으므로, 수신계를 고도화하는 것이 바람직하다. 그래서, 수신측에서 추적전용 핑거를 부착한 어류의 위치를 구할 수 있는 방식으로서, 거리-방위의 측위원리를 기본으로하여 핑거동기 방식에 의한 거리계측(超音波便覽編集委員會編, 1999; 韓, 1994)과 super short base line (SSBL) 방식(超音波便覽編集委員會編, 1999; Milne, 1983)에 의한 방위계측을 조합하여 새로운 방식을 개발한다. 이 방식을 SSBL·핑거동기·바이오텔레메터리(SSBL and pinger synchronizing biotelemetry: SPB) 방식이라고 하였다.

이와 유사한 방식은 지금까지 20kHz의 저주파 음원측위시스템을 사용하여 노랑가오리의 행동을 측정한 예(德岡, unpublished) 이외에는 찾아볼 수 없었다. 이 방식에서는 핑거 송신시각을 수신기의 시각에 동기시켜 동기시간차를 계산하여 거리를 구한다. 또한, 일정한 거리에 설치한 2개의 수파기로부터 핑거음을 수신하여, 그 위상차로부터 평면좌표를 구하고, 압력센서를 내장하고 있는 핑거를 이용하여 펄스간격의 변화량에 의해 1m의 분해능으로 수심을 구한다. 따라서, 20kHz의 저주파 음원측위시스템과 정보센서 내장의 핑거를 이용하기 때문에 핑거의 크기가 커져, 소형어류의 추적에는 부적합하다. 또한, 최대검지거리가 짧아 어류의 행동을 연속적으로 추적하기가 어렵고, 원거리를 검지하기 위해서는 수파기가 커져, 장비의 설치 및 취급이 불편하게 된다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하고 바이오텔레메터리에 범용으로 사용할 수 있는 일반적인 방식으로서 개발하고자 한다. 또한, SSBL 방식의 기술과

핑거동기 방식의 기술을 조합하여 수파기에 대한 어류의 순간적인 위치를 구하는 것과 동시에, 각각 방식의 기술을 고도화하여 새롭게 개발한 SPB 방식의 고도화를 실현하고자 한다.

재료 및 방법

1. 측정원리

개발한 바이오텔레메트리 방식은 일종의 음원측위 방식이다. 따라서, 거리(ρ)-거리(ρ) 방식, 거리차($\Delta\rho$) 방식, 거리(ρ)-방위(θ) 방식 등 일반적인 음원측위방식의 하나를 사용하게 된다. 그러나, 넓은 수역에서 핑거음을 자동연속으로 상세한 추적이 가능하도록 하기 위하여 핑거를 선박에서 추적하는 방식을 고도화하기 때문에, 1점(선박)으로부터 1점(핑거)의 위치를 구해야 한다. 이 경우, 거리(ρ)-방위(θ) 방식밖에 사용할 수 없다. 즉, 선박으로부터의 어류(핑거)의 3차원 위치계측에는 방위정보와 거리 정보가 필요하다.

추적전용 핑거에 의한 방위계측에는 최대감도방식, LBL · SBL · SSBL의 음원측위방식, 스프리트빔 방식 등이 있다. 여기서는 항주하는 선박에 의해 넓은 범위에서 연속적이며 자세하게 행동을 파악할 수 있는 동시에 장비의 설치와 취급이 간편한 SSBL 방식을 채용한다.

추적전용 핑거에 의한 거리계측에는 수신 음압레벨을 이용하는 방식, 핑거음의 주기성을 이용한 핑거동기 방식(韓, 1994)을 들 수 있으나, 전자는 정밀도가 나쁘기 때문에 핑거동기 방식을 이용한다.

이상과 같이 SSBL 방식에 의한 방위정보와 핑거동기 방식에 의한 거리정보를 조합하여 선박으로부터 어류의 상대위치를 구하는 방식인 SPB 방식의 원리는 다음과 같다.

(1) 위치측정 원리

Fig. 1은 SPB 방식에 의해 핑거의 위치를 구하는 원리를 나타내고 있다. 위상빔을 구성하는 어레이(복수로 배열한 초음파진동자로서, 이하 위상빔 어레이라고 한다)의 명칭은 스프리트빔 방식 계량어군탐지기의 어레이의 명칭(古澤 *et al.*, 1994)과 같이 전빔(fore), 후빔(aft), 좌빔(port), 우빔(starboard)으로 칭하고 있지만, 수파기의 방향이 변하는 바이오텔레메트리 방식에서는 반드시 문자와 같은 방향을 나타내지는 않는다.

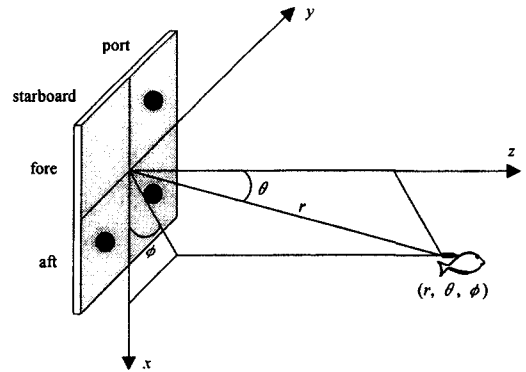


Fig. 1. Three dimensional coordinate for location of the pinger. The angular locations (θ , ϕ) of the pinger are measured using super short base line (SSBL) method. The distance from the receiving transducer to the pinger (r) are measured using pinger synchronizing method.

SSBL 방식의 수파기의 위치를 원점으로 하여, 지향성주축을 z좌표축으로 하면, 핑거의 공간좌표(r , θ , ϕ)가 SSBL 방식과 핑거동기 방식으로 측정되기 때문에 다음의 직교좌표값(x , y , z)을 구할 수 있다.

$$x = r \sin \theta \cos \phi \dots\dots\dots (1)$$

$$y = r \sin \theta \sin \phi \dots\dots\dots (2)$$

$$z = r \cos \theta \dots\dots\dots (3)$$

(1)~(3)식에 GPS 및 컴퍼스에서 구한 선박의 절대위치의 침로가 주어지면, 핑거의 절대위치를 구할 수 있다. 또한, (1)~(3)식을 미분하면 순간의 이동속도를 구할 수 있다.

(2) 방위측정 원리

핑거의 수파기에 대한 방위계측은 복수의 위상빔 어레이의 간격을 짧게한 SSBL 방식을 사용하여 전·후, 좌·우의 위상빔 어레이에 수신된 각 신호간 위상차로부터 구한다(Klepaker *et al.*, 1975).

Fig. 2는 SSBL 방식에 의한 위상계측의 원리를 표시한다. 여기에서, d 는 위상빔 어레이의 중심간의 거리, l_1 , l_2 , l_3 , l_4 는 핑거로부터 각 위상빔 어레이의 중심까지의 거리, $k(=2\pi/\lambda)$ 는 파수이다. 공간의 임의의 점(r , θ , ϕ)에 핑거가 있고, 핑거는 수파기로부터 충분히 떨어진 원거리에 있다고 가정하면, 전후 위상차 δ_x 와 좌우 위상차 δ_y 는

$$\delta_x = k(l_a - l_p) = kd \sin \theta \cos \phi \dots\dots\dots (4)$$

$$\delta_y = k(l_p - l_s) = kd \sin \theta \sin \phi \dots\dots\dots (5)$$

로 표시된다. 수파기에 대한 핑거의 위치각(θ, ϕ)는, (4), (5)식의 변형에 의해

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}}{kd} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\delta_y}{\delta_x} \right) \dots\dots\dots (7)$$

이 된다.

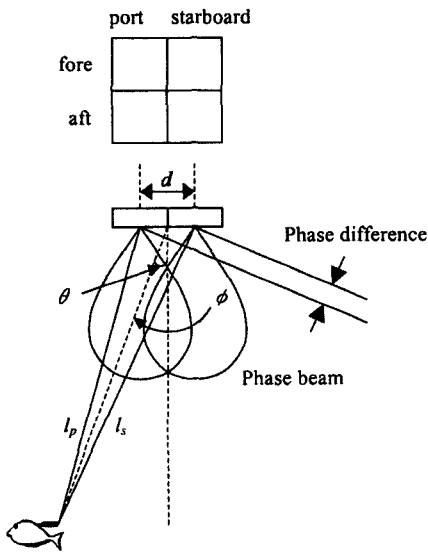


Fig. 2. Principle of measuring angular locations of the pinger using super short base line (SSBL) method. l_s and l_p are distances from the starboard and port receiving transducer to the pinger. d is distance between centers of phase beam array. The angular locations (θ, ϕ) are measured by phase difference of the acoustic signals received in each phase beam array.

(3) 거리측정 원리

핑거는 송신기능만을 갖고 있기 때문에, 수파기와 의 거리를 간단하게는 구할 수 없다. 그러나, 사용한 핑거는 송신주기가 일정하기 때문에 핑거동기 방식에

의해 핑거 펄스의 송신시각을 알면, 펄스의 수신시각 을 측정하여 송신시각과 수신시각과의 차를 구하여 거리를 계산할 수 있다.

Fig. 3은 핑거동기 방식에 의한 거리계측의 원리를 표시한다. i 번째 핑거 펄스의 송신시각을 t_i , 그때 핑 거까지의 거리를 r_i , 음속을 c 라 하면, i 번째 핑거 펄 스의 수신시각 T_i 는

$$T_i = t_i + \frac{r_i}{c} \dots\dots\dots (8)$$

로 표시된다. 최초의 핑거 펄스의 송신시각을 t_0 , 송 신주기를 τ 라고 하면 $t_i = t_0 + \tau i$ 가 된다. 이것 을 (8)식에 대입하면, i 번째 핑거 펄스를 수신하였을 때, 수파기와 핑거의 거리 r_i 를 구할 수 있다.

$$r_i = (T_i - t_0 - \tau i)c \dots\dots\dots (9)$$

여기에서, r_i 를 측정하기 위해서는 t_0 와 τ 를 사전 에 알아두어야 한다. 이것은 직접 알 수는 없다. 기지 의 거리 r_0 에 핑거를 놓고 t_0 와 τ 를 미리 측정 해 두면, 그 후 i 및 T_i 를 알기 때문에 r_i 를 계산할 수 있다.

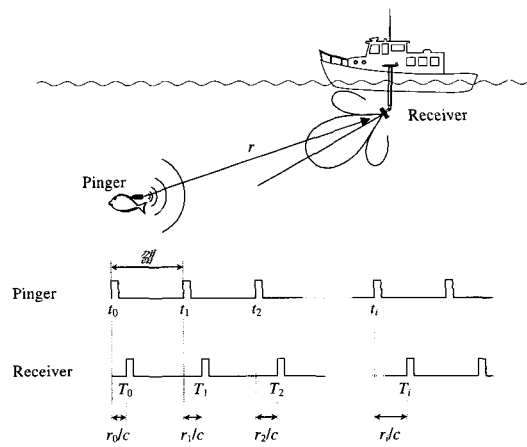


Fig. 3. Principle of measuring distance from the receiving transducer to the pinger using pinger synchronizing method. The distance (r_i) is measured by variation of the pulse reception time by the receiving transducer. The c and τ are the speed of underwater sound, transmitting period of pinger, respectively.

2. SPB 시스템의 설계

원리에 설명한 SPB 방식을 가능하게 하는 장비의 설계, 실험 시스템의 제작에 대하여 기술한다.

본 연구에서는 기존의 SSBL 방식의 기술이나 핑거 동기 방식의 기술을 조합함과 동시에 각각의 기술을 고도화하여 SPB 방식의 고도화와 간편성을 실현한다. SSBL 방식을 고도화하기 위해서 기본설계에서는 저자들에 의해 개발된 바이오텔레메트리 음향계의 설계방법(朴·古澤, 2002)을 적용하며, 또한 수파 어레이의 설계에서는 스포리트빔 방식 계량어군탐지기의 송수파기의 설계방법(古澤 *et al.*, 1994)을 응용하여 고정도 또는 광범위의 추적이 가능하도록 한다.

핑거 동기 방식에서는 핑거를 장시간 사용하면 핑거의 발진주파수에 편차가 생겨 송신주기가 약간 변하기 때문에 측정거리에 오차를 가져온다. 따라서 핑거 동기 방식을 고도화하기 위해서는 수온의 변화에 의한 핑거의 송신주기를 측정하여 송신주기의 변화에 따른 측정거리오차를 최소화 하는 방법에 대하여 검토한다.

(1) 전체적인 시스템의 구성

SPB 방식에 의해 효과적인 바이오텔레메터리가 가능한 전체적인 시스템을 구성한다. Fig. 4는 SPB 방식의 실험시스템을 나타낸다.

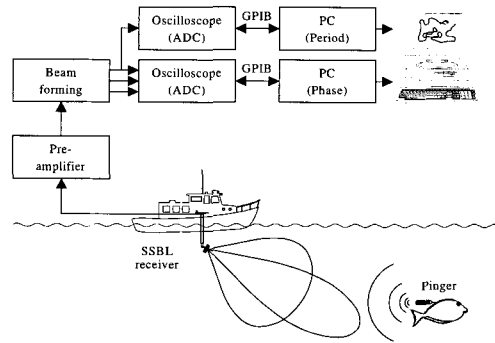


Fig. 4. Block diagram of the experiment system of SSBL and pinger synchronizing biotelemetry (SPB) method.

핑거는 대상생물 또는 용도에 따라 Table 1과 같이 시판되고 있는 핑거를 사용할 수 있다. Table 1에 표시한 핑거는 추적전용으로 외부에 부착하는 것이다.

SSBL 방식을 이용하는 경우, 수파기가 단일 빔의 경우에 비해 상당히 복잡하고 가격이 높아진다. 따라서, 수파기는 1개로 하여 어레이 구성의 변환에 의해 검지범위나 방위측정 정도를 선택할 수 있도록 2개의 빔 모드를 사용한다.

Table 1. Specifications of expendable pinger for tracking (Vemco Ltd.)

Model	V8	V16	V22	V32
Size (mm)	8D×33~38L	16D×48~90L	22D×100L	32D×100L
Available frequency range (kHz)	65.5~149.5	50~78	25~50	28~38
Source pressure level (dB)	136, 141	146~158	168	157
Life (Day)	3~21	12~69	10~11	295
Pulse repetition period (ms)	1000	1000	1000	1000
Pulse width (ms)	10	10	10	10

증폭기는 2개의 빔 모드용에 각 2개의 채널로 구성하여, 큰 신호를 수신한 경우 이득을 적게 하고, 작은 신호를 수신한 경우 이득을 크게 하여 파형이 포화되지 않도록 한다.

증폭기로부터의 신호의 출력을 디지털오실로스코프(9304CM & 9314AM, LeCroy)에 의해 AD 변환하여 GPIB 경유로 퍼스널컴퓨터에 수록한다. 이후 처리는 Matlab 등에 의한 프로그램을 만들어 오프라인 처리를 행한다.

(2) 수파기의 기본설계

바이오텔레메터리는 어류를 잃어버리지 않고 장기간에 걸쳐 추적하는 것이 중요하다. 따라서, 수파기의 기본설계는 넓은 검지범위에 대하여 연속적으로 핑거음을 수신하여, 상세하게 어류의 행동을 파악하고, 장비의 설치 및 취급이 간편할 수 있도록 한다.

Fig. 5는 바이오텔레메터리 음향계를 설계하기 위한 범용도의 일부이다. 최대검지거리 200m, 400m에서 수파기의 직경 2a(실선), 검지빔폭 B_D (점선)을 변수로 한 신호대잡음비(signal to noise ratio; SN비)의 주파수특성이다. 설계범용도의 음영으로 채색되어 있는 영역은 총톤수 220ton의 강선이 선속 11kt로 항주할 때의 잡음스펙트럼계수 $NP_0 = 20\log N_{rv} = 145dB(0dB = 1 \mu Pa/Hz^{1/2})$ 를 이용하였지만(西村, 1969), 사용하는 선박이 정선 또는 미속 전진하는 것을 가정하여 잡음스펙트럼계수를 135dB로 한다. 따라서, 음영으로 채색되어 있는 영역의 SN비의 하한은 0dB로 선택되어 있지만, 상가 가정으로 SN비는 10dB이 된다. 이 설계범용도로부터 주파수, 수파기의 직경, 검지빔폭 및 음원음압레벨 등의 기본설계를 실행한다.

(3) 수파 어레이의 설계

수파 어레이의 설계는 검지범위를 가능한 크게 하고, 방위의 측정정도를 높게 하며, 장비의 소형화를 지침으로 한다. 따라서, 수파 어레이의 직경은 상기의 지침을 달성시키기 위해 수파기를 1개로 하여 광범위와 고정도가 가능하도록 2개의 빔 모드로 한다. 즉, 광범위 계측을 위한 광빔 모드와 고정도 계측을 위한 협빔 모드로 구성한다.

SSBL 방식은 복수의 수파기(위상빔 어레이)를 이용하며, 위상빔 어레이의 중심간의 거리를 짧게하여 1개의 용기에 수납한다. 지금까지 SSBL용의 수파기는 3개의 무지향성 수파기를 간단한 구조로 나열하여 배치하는 것이 많았다(Klepaker *et al.*, 1975;

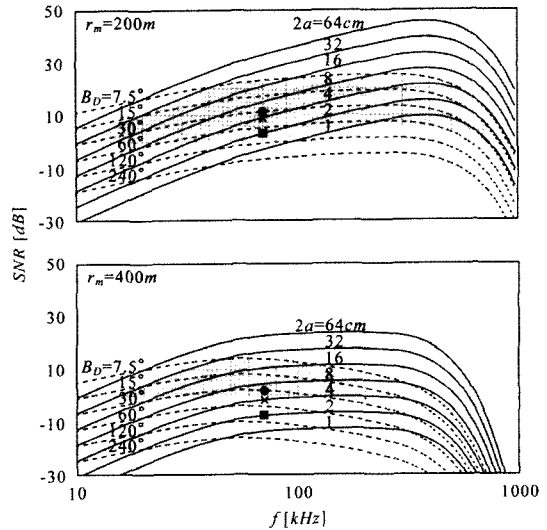


Fig. 5. Universal diagrams for basic design of receiving system of biotelemetry. Signalto noise ratio (SNR) is shown against frequency, changing parameters of range 200m (upper) and 400m (lower), of receiving transducer diameter (solid lines), and of detectable beam width (dashed lines). Shaded areas show the suitable area for a design point. The circles and squares indicate the design points for the SSBL and pinger synchronizing biotelemetry (SPB) system and crosses are for versatile ultrasonic biotelemetry system.

Robert, 1975). 그러나, 본 방식은 수파 어레이의 직경과 수파 어레이의 중심간의 거리를 별도로 설계하여 SSBL 방식의 고도화를 행한다.

SSBL 방식에 의해 측정하는 방위의 정도는 수파 어레이(위상빔 어레이)의 중심간의 거리로 결정된다.

(6)식에서 종합 위상차를 $\sqrt{(\delta_x^2 + \delta_y^2)} = \delta$ 라고 하면, 이것은 위치각에 대응하는 위상각으로 생각할 수 있기 때문에, 위상각 δ 는 위치각 θ 의 대략 kd배가 된다. kd가 크면 δ 에 해당하는 θ 가 좁아지게 되고, 측각정도가 높아지기 때문에, kd를 측각정도지수로 하고 하였다.

Fig. 6에 (6)식을 이용하여 d/λ 를 변수로 δ 와 θ 의 관계를 나타낸다. 측각정도지수를 높게하기 위해서는 kd 즉 d/λ 를 크게 해야한다. 이 경우 (4), (5) 식으로부터 알 수 있듯이 δ 의 변화범위가 2π 를 초

과하고, 위상차 측정의 불확정성에 의한 제한을 받게 된다. 최대측정각도를 θ_{max} 라 하면, (4)식의 $\delta_x = kd \sin \theta \cos \phi$ 의 $\cos \phi$ 가 $-1 \sim 1$ 사이의 범위에서 변화하기 때문에, 위상차 측정의 불확정성을 일으키지 않도록 하기 위해서는 θ_{max} 이내에서 δ_x 의 측정 범위는 $-\pi \sim \pi$ 일 필요가 있다(古澤 *et al.*, 1994). (5)식의 δ_y 도 같은 결과가 된다.

이를 위해서는 θ_{max} 가 결정되면, 다음식을 만족하도록 하면 된다.

$$d < \lambda / (2 \sin \theta_{max}) \dots\dots\dots (10)$$

θ_{max} 를 명확하게 정하는 것은 곤란하지만, 원형피스톤 진동자의 경우, 빔폭의 각도에 지향성 이득이 $-16dB$ 이 되어 그것을 벗어난 신호는 수신되지 않는다고 생각해 θ_{max} 를 빔폭으로 한다.

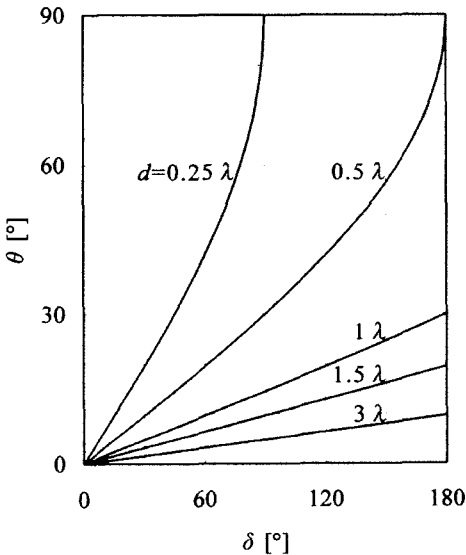


Fig. 6. Relationship between the angular location (θ) and the electrical phase angle (δ) changing the distance between centers of phase beam array (d).

(4) 핑거동기 방식

핑거동기 방식에 의해 거리를 구하기 위해서는 음속 c 와 핑거의 송신주기 τ 가 일정한 것을 전제로 한다. 그러나, c 는 수온, 염분 및 수심 등의 요소에 의해 변화하기 때문에 핑거가 존재하는 환경에 따라 다르다. 또한, τ 는 장시간 경과하면 약간 변하여 측정거리에 큰 오차를 가져오며, 행동범위가 큰 경우

속도에도 상당한 변동을 초래한다.

사용하고 있는 핑거의 오차 안정도는 $2 \times 10^{-6} / ^\circ C$ 정도이며, 이것을 확인하기 위해 5일간 수온 약 $1.5^\circ C$ 에서 측정거리오차를 계속한 결과 $1500m$ 이었다(韓, 1994). 따라서, 위치를 정확하게 구하기 위해서는 측정거리오차를 보정할 필요가 있다.

지금까지 핑거 펄스의 송신과 수신 동기편차에 의한 측정거리오차의 보정방법으로는 핑거 펄스의 수신음압레벨로부터 수파기에서 핑거까지의 거리를 계산하여 (9)식에서 t_0 를 수정하여 동기를 재조정하는 예가 있다(韓, 1994). 그러나, 수신음압레벨은 전달 상황에 따라 변동이 크기 때문에 정도가 좋지 않고, 장시간의 평균을 구해야만 한다.

본 방식에서는 c 와 τ 에 가장 큰 영향을 주는 것은 수온이라고 생각되기 때문에, c 와 τ 에 대한 수온특성을 조사하여, 측정거리오차의 보정방법에 대해 검토한다.

(9)식에서 c 및 τ 가 동시에 수온 K 의 함수일 때 r_i 도 K 의 함수이며, K 의 변화에 의한 r_i 는

$$\frac{dr_i}{dK} = \frac{\partial r_i}{\partial c} \frac{dc}{dK} + \frac{\partial r_i}{\partial \tau} \frac{d\tau}{dK}$$

$$\frac{\partial r_i}{\partial c} = T_i - t_0 - i\tau, \quad \frac{\partial r_i}{\partial \tau} = -ic$$

이기 때문에 K 의 변화에 의한 r_i, c, τ 의 변화량을 각각 $\frac{\Delta r_i}{\Delta K}, \frac{\Delta c}{\Delta K}, \frac{\Delta \tau}{\Delta K}$ 라고 하면,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta r_i}{\Delta K} &= \frac{\Delta c}{\Delta K} - i\tau \frac{c}{r_i} \frac{\Delta \tau}{\Delta K} \\ &\approx -i\tau \frac{c}{r_i} \frac{\Delta \tau}{\Delta K} \end{aligned} \dots\dots\dots (11)$$

이 된다.

(11)식에서 $\frac{\Delta c}{\Delta K} \approx 0.008 / ^\circ C$ (Urlick, 1983)를 나타내지만, c 는 환경조건에 따라 변화하며, 시간이 경과함에 따라 i 가 커져 수온의 변화에 따른 측정거리 오차는 핑거의 송신주기의 오차에 크게 지배되기 때문에, 수온 변화에 의한 음속의 변화량은 무시하고, 수온의 변화에 의한 핑거의 송신주기의 특성에 대해서만 조사한다.

실험은 수온을 변화시킬 필요가 있기 때문에 소형 수조(L60×B30×D35cm)에서 실시했다.

핑거(V42-9VR, Vemco Ltd.)는 주파수 69kHz, 음원음압레벨(source pressure level: SL) 164dB (re 1μPa at 1m), 송신주기 1s, 펄스폭 10ms이며, 핑거로부터 송신된 펄스를 하이드로폰(ST-1004, OKI)으로 수신한다. 수신한 펄스는 전치증폭기

(ST-80B, OKI)로 40dB 증폭하여, 디지털 오실로스코프(9304CM, LeCroy)에 의해 AD 변환하여 핑거 펄스의 수신시각을 GPIB 경유로 퍼스널 컴퓨터에 수록한다. 수신시각은 각 측정수온에서 100s간 수록하였으며, 그 평균치를 이용한다.

수온은 얼음과 바켓츠용 히터(81-8946, 八光電機製作所)에 의해 조절한다. 수온을 4.5~30℃까지 변화시키면서, 0.2℃ 또는 0.3℃간격으로 측정하였다. 수온은 반도체 측정소자를 사용한 측정정도 ±0.5℃, 측정분해능 0.1℃의 것(NS-3P, Merbabu trading Co., Ltd.)을 사용하여 측정하였다.

결 과

1. 수파기의 설계

넓은 검지범위에 대하여 연속적으로 핑거음을 수신하여, 상세하게 어류의 행동을 파악하고, 장비의 설치 및 취급이 간편하도록 설계범용도로부터 주파수, 수파기의 직경, 검지범폭 및 음원음압레벨 등의 기본설계를 행하였다. Fig. 5의 최대검지거리 200m의 설계범용도에서 적절한 설계영역의 주파수범위는 900kHz까지로 넓다. 그러나, 최대검지거리를 400m까지 연장시키면, 20~400kHz 정도의 주파수가 유효하며, 50~70kHz에서 SN비가 높게 나타난다. 따라서, 시판되고 있는 소형핑거의 주파수범위(25~149.5kHz, Table 1 참고)를 고려하여 주파수는 70kHz로 하였다. 검지범폭은 좁게하면 복수의 수파기가 필요하기 때문에, 기본설계의 단계에서는 40°로 하였다. 설계범용도에서 검지범폭 40°, 주파수 70kHz의 교점으로 설계점(Fig. 5의 ×)이 결정된다. 이 수파기의 직경은 4cm(약 2λ, λ는 파장)가 된다. 여기에서 정한 주파수에 대해서는 Table 1의 V8, V16(Vemco Ltd.)과 같은 시판의 핑거를 이용할 수 있다. 또한 핑거의 수명과 검지범위를 고려하여 음원음압레벨을 선택한다. 약간 큰 어류를 대상으로 하는 경우에는 음원음압레벨이 10~20dB 큰 φ16mm의 핑거를 선택한다. 이 경우, 설계범용도에서 종축의 스케일을 10~20dB를 더하면 알 수 있는 것처럼 최대검지거리를 연장시킬 수 있다.

기본설계의 토대로 검지범위, 측각정도, 소형화의 요구를 충족시켜 SSBL 방식의 고도화를 실현시킬 수 있도록 2개의 빔 모드로 수파 어레이를 구성하였다. 협빔 모드에서는 기본설계에서 설계한 수파기의 직경보다 큰 3λ, 광빔 모드에서는 협빔 모드를 보충

하여 폭방향으로 넓은 검지가 가능하도록 1λ로 하였다. Fig. 5에서 협빔 모드의 설계점을 검은색 원으로, 광빔 모드의 설계점을 검은색 사각형으로 표시하였다. 협빔 모드는 광빔 모드보다 SN비가 10dB정도 높고, 음원음압레벨이 136dB의 경우 협빔 모드에서 검지 범폭은 29°, 광빔 모드에서 76° 이었다.

위상빔 어레이의 중심간의 거리는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 $d=0.5\lambda$ 이면 위치각 90°까지 위상차 측정의 불확정성으로 인한 제한을 받지 않기 때문에 측각범위를 넓게 할 수 있다. 한편, $d=1.5\lambda$ 이면 20° 이상에서 위상차 측정의 불확정성이 생겨 측각범위를 넓게 할 수 없지만, 측정정도를 높게 얻을 수 있다. 따라서, 위상빔 어레이의 중심간 거리는 협빔 모드에서 1.5λ, 광빔 모드에서 0.5λ로 하였다. 이상에 의해 수파기 어레이의 길이와 위상빔 어레이의 중심간 거리를 결정하였다. 2개의 빔 모드를 설정하는 것에 의해 광빔 모드에서 핑거를 부착한 어류를 추적하여 협빔 모드에서 측각하는 사용분류가 가능하다. 또한, 양빔 모드는 위상빔 어레이의 중심간 거리가 달라 측각정도가 다르기 때문에 수파기에 대한 어류의 거리에 의해 사용할 빔 모드를 선택할 수 있기 때문에 유용하다.

위상의 계측에 의해 방위를 구하기 위해서는 수파기가 해저를 향해 있다고 가정한 경우, 선박에 대하여 전(fore, F)·후(aft, A)와 좌(port, P)·우(starboard, S)의 2쌍의 위상빔 어레이가 필요하다. d 와 각각의 위상빔 어레이의 길이 $2a$ 가 같으면, Fig. 7(a)와 같이 단순한 배열이 가능하며, 수파기의 설계 제작이 유리하다. 그러나 장비의 설치나 취급이 간편하고 넓은 검지범위에서 방위의 측정정도를 높게하기 위해서는 검지범위와 위상차 측정의 불확정성의 요구를 양립시킬 필요가 있기 때문에, 이와 같은 단순한 배열은 사용할 수 없다. 예를 들면, $2a$ 가 커지면 최대검지거리가 길어지지만, 검지 범폭은 좁아지게 되며 소형화가 어렵게 된다. d 가 커지면 측각정도가

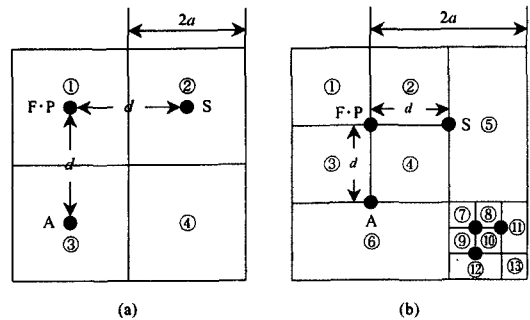


Fig. 7. Array geometry examined.

높아지지만, 위상차 측정의 불확정성으로 인한 제한을 받게 된다. 따라서 2개의 빔 모드에서 위상빔 어레이의 길이(3λ 및 1λ)와 위상빔 어레이의 중심간 거리(1.5λ 및 0.5λ)를 실현할 수 있으며, 구성이 비교적 단순한 수파기 배열의 구성을 Fig. 7(b)에 표시하였다. 위상빔 어레이의 길이와 위상빔 어레이의 중심간 거리가 같지 않은 경우에 원형배열로 하면 위상빔 어레이의 구성이 복잡하게 된다(古澤 *et al.*, 1994). 계량어군탐지기와 같이 정량성을 중요시하는 경우에는 복잡하여도 원형배열이 좋지만, 바이오텔레메터리의 경우 정량성은 계량어군탐지기 만큼 중요하지 않다. 또한, 1개의 수파기 배열로 협빔 모드와 광빔 모드를 동시에 실현하는 것은 원형배열에서는 불가능에 가깝다. 따라서, Fig. 7(b)와 같이 각형배열로 한다.

각형배열을 이용하면, F와 P를 공통으로 사용할 수 있어 편리하다. 또한, Fig. 7(b)의 블록 ①에서 ⑥까지 조합하여 협빔 모드용의 전·후·좌·우 각각의 위상빔 어레이를 구성하고, 블록 ⑦에서 ⑫까지를 광빔 모드용으로 사용하면(블록 ⑬은 사용하지 않음), 거의 모든 면적을 유효하게 이용할 수 있다. Table 2는 설계한 수파기의 제원을 표시한다.

Table 2. Specifications of receiving transducer of system

Items	Wide beam	Narrow beam
Detectable beam width(B_D) [*]	76°	29°
Beam width (B_W)	60°	20°
Phase beam transducer diameter ($2a$)	21.4mm (λ)	64.3mm (3λ)
Distance between the acoustic center of two phase beam transducers (d)	10.7mm (0.5λ)	32.1mm (1.5λ)
Index of accuracy for measuring angle (kd)	π	3π

* The source pressure level ($SL=136dB$) is fixed.

Fig. 8은 SN비의 식(朴古澤, 2002)을 기본으로 하여 협빔 모드(3λ) 및 광빔 모드(1λ)의 수파기와 음원음압레벨 $SL=136, 141, 158dB$ 의 평거의 조합에 의한 검지범위를 표시한다. $SL=136dB$ 의 경우, 협빔 모드와 광빔 모드에서 최대검지거리와 검지빔폭은 $147m$ 와 29° , $258m$ 와 76° 이었지만, $158dB$ 의 경우에는 각각 $1,087m$ 와 38° , $792m$ 와 101° 이었다.

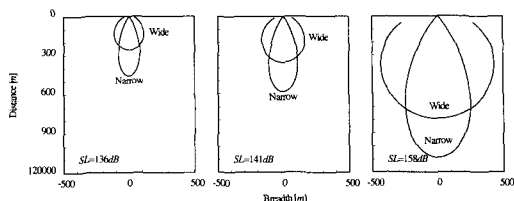


Fig. 8. Detectable range dependence on receiving transducer diameters of 1λ (wide beam) and 3λ (narrow beam) for source pressure levels of 136dB, 141dB, and 158dB, 70kHz of frequency, 10dB of signal to noise ratio, 135dB of noise spectrum level, 2.5kHz of bandwidth of the receiver, and 1500m/s of sound speed in water are fixed. The absorption attenuation coefficient α is calculated by Francois and Garrisons formula(1982).

상기의 설계를 기본으로 하여 수파기를 제작하였다. Fig. 9는 소자배열과 각 위상빔 어레이의 블록의 합성방법을 표시한다. 수파 어레이는 길이가 거의 $\lambda/2$ 인 81개의 소자를 사용하였다. 협빔 모드의 각 위상빔 어레이에는 36개의 소자를 이용하였으며, 광빔 모드에는 4개를 이용하였다. 소자블록 1, 2, 3, 4로 협빔 모드의 전빔과 좌빔을 공용하고, 소자블록 7, 8, 9, 10으로 광빔 모드의 전빔과 좌빔을 공용하도록 하였다. 소자블록 2, 4, 5와 8, 10, 11은 협빔 모드와 광빔 모드의 우빔이며, 소자블록 3, 4, 6과 9, 10, 12는 후빔이다. 각 블록을 구성하는 소자의 갯수는 전·좌빔에서는 1:1:1로 같고, 우빔과 후빔에서는 1:1:2가 된다. 따라서 각 빔 블록의 가중치는 전·좌빔에서는 1:1:1로 하고, 우빔과 후빔에서는 1:1:2로 하였다(Johnson and Jayakumar, 1982). 가산기(ADD)에 상기의 가중치를 붙여 빔을 합성하였으며, 협빔 모드와 광빔 모드는 스위치에 의해 변환하도록 하였다.

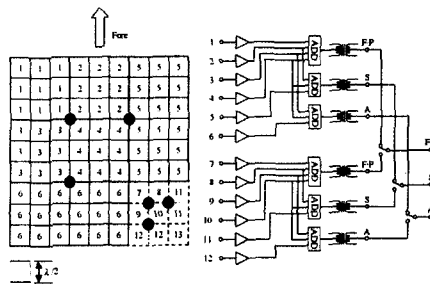


Fig. 9. Alignment of array elements and beam forming method. The lower and right side of beam array is used for wide beam.

Fig. 10은 실제의 수파기의 사진을 나타낸다. 계량 어군탐지기용의 송수파기를 개조하여 사용하였기 때문에 원형배열로 보이지만, 내부의 결선은 각형배열로 구성되어 있다. 진동면에서 본 수파기의 배열이기 때문에 진동면 위에서 본 수파기의 배열(Fig. 9 참고)과 좌·우의 방향이 다르다.



Fig. 10. Photograph showing the receiving transducer used for SPB system.

2. 핑거동기 방식

수온의 변화에 의한 핑거의 송신주기를 측정하여 송신주기의 변화에 따른 측정거리오차를 최소로 하는 방법으로 핑거동기 방식을 고도화하였다. Fig. 11은 수온의 변화에 의한 핑거의 송신주기를 나타낸다. 핑거의 송신주기는 수온이 높아짐에 따라 짧아지고, 25℃ 이상이 되면 반전하여 길어지는 것을 알 수 있다. 측정치를 다항식 근사에 적용시키면, 근사식은

$$\tau = 0.0291K^2 - 1.4997K + 37.763(10^{-5}s/10^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (12)$$

로 표시된다. 따라서, 수온의 변화에 의한 핑거의 송신주기는

$$\frac{\tau/\Delta\tau}{\Delta K} = 6 \times 10^{-8} K + 1.5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C} \dots\dots\dots (13)$$

이 된다. 이것은 동작수온 범위 $-20 \sim 70^\circ\text{C}$ 의 항온조를 사용하여 수정진동자와 발진회로의 온도를 일정하게 제어하여 안정도를 얻는 over controlled crystal oscillator (OCCO)의 주파수 안정도(トランジスタ技術編集部, 1999)와 거의 일치한다. 또한 수온 15°C 부근에서 $\frac{\tau/\Delta\tau}{\Delta K}$ 는 $0.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 정도로, 수

온변동 $\pm 1^\circ\text{C}$ 에서 약 $2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 의 주파수 안정도를 표시한 韓(1994)의 값과 거의 일치하였다.

(11)식에서 시간이 경과함에 따라 i 가 커져 c/r_i 는 미소한 값이 되며, 따라서 일정값으로 가정할 수 있으므로, (13)식을 (11)식에 대입하여 1일에 수온 15°C 의 수역에서 수온이 1°C 변화함에 따른 핑거의 송신주기의 오차에 의한 측정거리오차는 $78m$ 가 된다. 핑거의 송신주기의 오차에 의한 측정거리오차는 수온의 변화가 커질수록 수온이 낮아질수록 커진다. 핑거부근의 수온을 알 수 있다면 이 방법을 적용하여 핑거의 송신주기를 보정하여 측정거리오차를 74% 정도 줄일 수 있을 것이다.

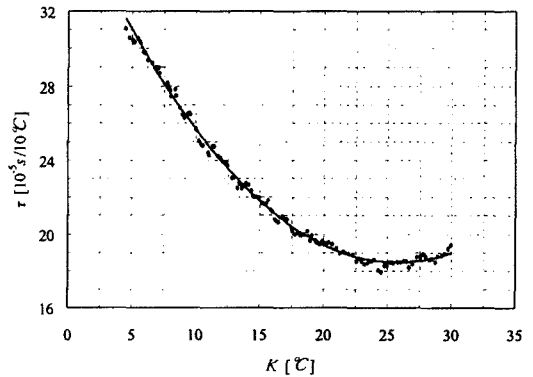


Fig. 11. Transmission pulse period of pinger by changing water temperatures.

고 찰

SPB 방식을 한층 실용적으로 사용할 수 있도록 하기 위해서는, 더욱 간단하고 정확한 측정거리오차의 보정 방법의 개발이 필요하다. (12)식의 수온의 변화에 의한 핑거의 송신주기 근사식에서 측정치의 표준편차는 $2 \times 10^{-7} s/^\circ\text{C}$ 이다. 측정거리오차에는 측정치의 표준편차도 포함되어 있기 때문에 핑거의 송신주기의 오차에 의해 측정거리오차를 보정하여도 1일에 40% ($31m$)의 측정거리오차는 남는다. 이와 같이 핑거동기 방식은 핑거의 송신주기의 수온특성을 보정하면 어느 정도까지는 보정이 없이도 측정거리오차를 줄일 수 있지만, 장기간에 걸쳐 추적하기 위해서는 다른 보정 방법이 필요하다.

가장 유효한 방법은 스포리트빔 방식 계량어군탐지기과 같이 송파의 기능을 사용하여 어류에 부착된 핑

거의 에코를 수신하여 거리를 구하는 방법이다. SPB 방식은 빔 내의 핑거를 부착한 어류의 방위를 알 수 있기 때문에 그 어류가 빔 주축부근에 왔을 때 펄스를 송신하여, 에코를 수신한다면 수파기로부터 대상어까지의 거리를 비교적 쉽게 구할 수 있을 것이다. 이 방식은 측정거리오차가 그다지 크지 않을 때 더욱 효과적이다. 또한, 바이오텔레메트리 시스템에 송신기능이 없을 경우에는, 핑거를 부착한 어류를 선박의 정중앙에 오도록 조선하여 다른 어군탐지기 등으로 대상어의 에코를 수신하여 측정거리오차를 보정할 수도 있을 것이다.

요 약

이상의 연구 성과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 장비의 설치 및 취급이 간편하고, 해양생물의 순간적인 상세한 행동을 비교적 쉽게 추적할 수 있는 새로운 바이오텔레메트리 방식을 개발하였다. 바이오텔레메트리 방식에서 핑거에 수온, 압력센서 등의 추가는 핑거를 부착하는 어류에 많은 부담이 되기 때문에 수신계를 고도화함으로써 행동추적을 행하는 방법으로 하였다. 이 방식은 거리-방위의 측정원리를 이용한다. 즉, 거리를 계측하기 위해서 핑거동기 방식을 이용하고, 방위를 계측하기 위해서 SSBL 방식을 채용하여, 거리와 방위를 조합(SPB 방식)함으로써 대상어의 수파기에 대한 상대위치를 구한다. 최대감도방식은 어류의 상세한 위치를 특정하기가 어렵고, 음원측위방식은 항주하는 선박에 의해 넓은 범위의 추적이 곤란하며, 또한 장비의 설치나 취급이 간편하지 못하였으나, SPB 방식에 의해 이들 결점을 대폭 해결할 수 있었다.
- 2) 새로운 방식으로서 개발한 SPB 방식의 시스템을 설계하였으며, 시작시스템을 제작하였다. 설계에서는 SSBL 방식과 핑거동기 방식의 기술을 조합함과 동시에 각각의 기술을 고도화하여 SPB 방식에 의해 고정도 또는 광범위 검지가 가능하도록 하였다. 따라서, 수파기는 1개로 하여 어레이의 구성의 변환에 의해 검지범위 또는 방위측정정도를 선택할 수 있도록 2개의 빔 모드로 구성 하였다. 주파수는 70kHz로 하였으며, 음원음압 136dB에서 최대검지거리 258m 와 457m, 검지빔폭 76° 와 29° 를 실현할 수 있었다. 전체적인 시작시스템은 핑거, 2개의 빔

모드로 구성된 수파기, 2개의 빔 모드용에 각 2개의 채널로 구성된 수신기, 디지털오실로스코프, 퍼스널컴퓨터로 구축하였다. 핑거동기 방식의 이용에 따른 측정거리오차는 수온변화에 의한 송신주기의 변화를 측정하여 최소화하도록 하였다. 핑거 부근의 수온을 알 수 있다면 핑거 송신주기의 수온특성을 보정하여 74%정도 측정거리오차를 줄일 수 있지만, 장기간에 걸쳐 추적을 하기 위해서는 다른 보정방법의 개발이 필요함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- Amlaner, Jr, C.J. and MacDonald, D.W. (1979): A handbook on biotelemetry and radio tracking, Pergamon Press, Oxford.
- Bertrand, A., Josse, E. and Massé, J. (1999): In situ acoustic target-strength measurement of bigeye (*Thunnus obesus*) and yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) by coupling split-beam echosounder observations and sonic tracking, ICES J. Mar. Sci., 56, 51-60.
- Francois, R.E. and Garrison, G.R. (1982): Sound absorption based on ocean measurements. Part II: Boric acid contribution and equation for total absorption, J. Acoust. Soc. Am., 72, 1879-1890.
- Hawkins, A.D., MacLennan, D.N., Urquhart, G.G. and Robb, C. (1974): Tracking cod *Gadus morhua* L. in a Scottish sea loch, J. Fish Biol., 6, 225-236.
- Hawkins, A.D. and Urquhart, G.G. (1983): Tracking fish at sea. In: MacDonald A.G. and Priede I.G. (eds) Experimental biology at sea, Academic Press, London, 103-166.
- Hedgepeth, J., Fuhrman, D., Geist, D. and Johnson, R. (1998): Fish movement measured by tracking radar-type acoustic transducers, In: Alippi, A. and Cannelli, G.B. (eds) Proceedings of the fourth European conference on underwater acoustics, Rome, 199-204.
- Ireland, L.C. and Kanwisher, J.W. (1978): Underwater acoustic biotelemetry: Procedures

- for obtaining information on the behavior and physiology of free-swimming aquatic animals in their natural environments, In: Mostofsky, D.I. (ed) The behavior of fish and other aquatic animals, Academic Press, New York, 341-379.
- Johnson, D.E. and Jayakumar, V. (1982): Operational amplifier circuits: design and application, Prentice-hall Inc., New Jersey, 66-70.
- Klepaker, R.A., Vestgård, K., Hallset, J.O. and Kundsén, F.T. (1975): A free swimming ROV, In: Wernli, R.L. and Chapman, R. (eds) Remotely operated vehicle: Technology requirement—present and future, 2173, 265-276.
- Lacroix, G.L. and McCurdy, P. (1996): Migratory behaviour of post-smolt Atlantic salmon during initial stages of seaward migration, J. Fish Biol., 49, 1086-1101.
- Milne, P.H. (1983): Underwater acoustic positioning systems, E.&F.N.Spon, London, 19-92.
- Roberts, J.I. (1975): An advanced acoustic position reference system, OTC2173, 265-276.
- Stasko, A.B. and Polar, S.M. (1973): Hydrophone and bow-mount for tracking fish by ultrasonic telemetry, J. Fish. Res. Board Can., 30, 119-121.
- Urlick, R.J. (1983): Principles of underwater sound / 3rd edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Voegeli, F.A., Lacroix, G.L. and Anderson, J.M. (1998): Development of miniature pingers for tracking Atlantic salmon smolts at sea, Hydrobiologia, 371-372, 35-46.
- Young, A.H., Tytler, P., Holliday, F.G.T. and MacFarlane, A. (1972): A small sonic tag for measurement of locomotor behaviour in fish, J. Fish Biol., 4, 57-65.
- 韓軍 (1994): 同期法超音波핑거시스템의開發とその應用に關する研究, 博士論文, 東京水産大學大學院, 東京.
- 添田秀男編 (1990): 水産學シリーズ80 テレメトリーによる水生動物の行動解析, 恒星社厚生閣, 東京.
- 超音波便覽編集委員會編 (1999): 超音波便覽, 丸善株式會社, 東京, 549-557.
- トランジスタ技術編集部 (1999): 發振回路の完全攻略, CQ出版社, 東京, 191-280.
- 西村實 (1969): 魚群探知機の最適周波數に關する研究, 博士論文, 東海大學, 清水.
- 古澤昌彦, 澤田浩一, 有路實, 山谷恭三, 倉都健治 (1994): 計量魚探機用複合ビーム送受波器の開發, 海洋音響學會講演論文集, 63-66.
- 朴柱三, 古澤昌彦 (2002): 超音波バイオテレメトリーの音響系の評価および設計方法, 日本水産學會誌, 68, 334-344.

2003년 5월 15일 접수

2003년 7월 22일 수리