Jour. Fish. Mar. Sci. Edu., 19(3), pp.478~490, 2007 水産海洋敎育硏究, 19(3), 2007

초음파 바이오텔레메터리를 이용한 어류의 추적기술

박 주 삼†
(전남대학교)

Tracking Technology of Fish by an Ultrasonic Biotelemetry System

Ju-Sam PARK†
The Fisheries Science Institute, Chonnam National University
(Received September 20, 2007 / Accepted November 23, 2007)

Abstract

A technology of ultrasonic biotelemetry for tracking fish behavior is investigated. The ultrasonic biotelemetry system is constituted by a transmitter and a receiving system. Because a pinger was mainly used for the transmitter, the capability for pinger to possess was investigated and the efficient usage for pinger was examined. A source pressure level and a frequency were synthetically examined so that pinger could realize small size, a light weight, and a long life time. The receiving system is divided roughly into directional hydrophone systems and acoustic positioning systems by the receiving method. The directional hydrophone system is divided into single beam and multiple beam with the number of hydrophone, and the acoustic positioning systems is divided into LBL (Long Base Line), SBL (Short Base Line), and SSBL (Super Short Base Line) on the basis of base line. The present situation, the merits and demerits, and the principle of each receiving method were investigated in detail, and the efficient usage for each receiving method were examined.

Key words : Biotelemetry, Transmitter, Pinger, Transmitting method, Receiving method

Ⅰ. 서 론

어류의 행동이나 생태습성 등에 관한 연구는 어업을 위해서 뿐만이 아니라 자원관리를 위해서도 대단히 중요하다. 즉 어획대상이 되는 어종을 효율적·선택적으로 어획하고 그에 합당한 어구·어법을 개발하기 위해서는 어류의 행동이나 생태습성을 파악할 필요가 있으며, 수산자원을 지속적으로 유효하게 이용하기 위해서는 어류의 분포나 회유 등에 관한 연구가 선행되어야 할 것이다. 이러한 것을 통해 어업경영의 안정화도 도모할 수 있을 것이다.

어류의 행동생태를 연구하는 수단으로는 잠수에 의한 관찰, 유인 잠수정에 의한 관찰, 무인 잠수정에 의한 관찰, 어군탐지기나 소너의 에코그램에 의한 해석, 표지에 의한 계측 등을 들 수

† Corresponding author : 061-659-2743, hanna@chonnam.ac.kr

있다(Urquhart & Stewart, 1993). 잠수, 유인 잠수정 및 무인 잠수정에 의한 관찰(Gilchrist et al., 1983)은 수심과 탐지거리 등에 의해 제약을 받아 넓은 범위에서 사용하기에는 부적합하며(Demartini et al., 1989), 어군탐지기(Fréon et al., 1993)나 소너(Gerlotto et al., 1999)의 에코그램에 의한 해석(Misund, 1993)은 조사선박이나 어구 등에 대한 어군의 행동해석에 응용되고 있으나 특정의 대상을 장기간 추적하는 것이 어렵다.

한편 표지에 의한 계측은 대상어류가 서식하는 넓은 수역에서의 행동해석이 가능하다. 표지에는 표지방류에 사용되는 소극적 표지와 기록식 표지, 전파·초음파를 이용하는 음파표지와 같은 적극적 표지로 구별할 수 있다(O'Dor & Webber, 1998). 표지방류에 의한 계측은 어류의 이동, 분산, 개체수의 추정, 사육관리 등을 위해 오래 전부터 이용되어왔다. 이 방법은 표지방류된 어류가 재포되는 것을 전제로 하지만 어획량이 불안정하여 표지효과가 적다(Nielsen, 1992). 기록식 표지에 의한 계측은 수온, 수압 이외에 조도 센서를 갖는 표지를 어류에 부착하여 메모리에 데이터를 저장하는 방법으로 수압으로부터 유영수심을 구하고, 조도의 강도로부터 일출과 일몰의 시간을 추정하여 그 시간으로부터 위도와 경도를 구한다(Metcalfe & Arnold, 1997; Arnold, 2000). 이 방법은 성숙장이나 산란장으로 회유하는 어류에 대해 이용되지만 표지어류를 회수하기 어려운 것이 가장 큰 문제점이다.

어류에 음파표지를 부착하고 음파표지에서 발사하는 음을 표적으로 어류를 추적하는 바이오텔레메터리는 "전파와 초음파 등에 의해 원격으로 정보를 전달"한다는 의미로 원래는 "추적"이라는 의미는 포함되지 안했지만 1960년대 이후 야생동물의 연구에 폭 넓게 사용되면서 일반화되었다(Mech & Barber. 2002). 어류를 추적하여 행동을 파악하는 바이오텔레메터리에 의한 계측에는 전파와 초음파가 이용되고 있다(Stasko & Pincock, 1997). 전파는 수중에서 감쇠가 크기 때문에 하천이나 호소 등 비교적 얕은 담수역 또는 수면으로 부상하는 동물의 추적이나 정보를 전송하는 경우에 이용되고 있다(Ishida et al., 2001; Horký et al., 2007). 초음파는 해수나 담수에서 감쇠가 비교적 적기 때문에 수중생물의 위치, 수심, 주위의 수온 등 자연상태에서 유영장소의 정보 측정에 폭 넓게 이용되고 있다. 최근에는 전파와 초음파를 모두 이용하는 바이오텔레메터리 방식의 연구도 행해지고 있다(Niezgoda et al., 1998; Bridger et al., 2001; Parsley et al., 2007). 본 연구 대상의 바이오텔레메터리는 어류의 행동추적만을 목적으로 하며 전달모체는 초음파로 제한한다.

초음파 바이오텔레메터리(이하 바이오텔레메터리라 한다)의 최대 장점은 대상생물의 순간적인 행동생태와 서식환경을 동시에 상세하게 조사할 수 있는 것으로 지금까지 많은 연구가 보고되고 있다(Ireland & Kanwisher, 1978; Amlaner & Macdonald, 1980; Hawkins & Urquhart, 1983). 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 행동생태 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. 본 연구에서는 지금까지 어류의 추적을 위하여 초음파 바이오텔레메터리를 사용하여 온 송신기와 송신방식, 수신방식의 개발과정 및 효율적인 이용방법에 대하여 검토하고자 한다.

Ⅱ. 연구 방법

바이오텔레메터리 음향계는 Fig. 1에 표시한 것처럼 관측대상이 되는 어류에 장착하는 음파표지(송신기)와 측정측에 놓는 수파기로 구성된다. 이와 같이 바이오텔레메터리는 송파와 수파가 다른 장치에 의해 행해지기 때문에 송·수파를 통합하여 검토하기 어렵다. 따라서 송신와 수신을 나누어 검토하였다.

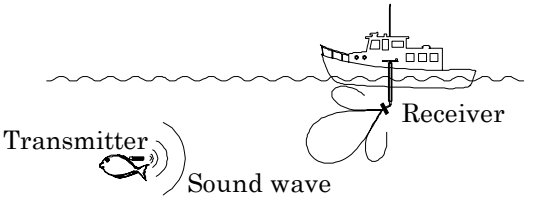

Fig.1. Tracking of a fish by an ultrasonic biotelemetry system.

1. 송신방식

바이오텔레메터리에 사용되는 음파표지는 트랜스폰더와 핑거가 사용된다(Hawkins & Urquhart, 1983). 트랜스폰더는 질문신호를 수신하여 적당한 응답신호를 자동적으로 송신하는 송수신기이며 핑거는 적당한 간격의 신호를 연속적으로 송신하는 송신기이다. 음파표지는 어류에 부착하기 위해 소형·경량인 것이 바람직하다. 그러나 트랜스폰더는 송·수신 기능이 필요하기 때문에 소형화가 어렵다. 지금까지 300kHz의 다중빔 스캐닝소너와 트랜스폰더를 이용한 예(Greer Walker et al., 1971; Mitson & Storeton-West, 1971; Greer Walker et al., 1978-1979; Arnold & Metcalfe, 1989) 등이 보고되고 있지만 최근에는 트랜스폰더를 소형 어류에 부착하여 바이오텔레메터리에 이용한 예는 거의 찾아볼 수 없다. 소형 어류에는 음파표지를 부착하는 것에 의한 부담을 되도록 적게 하고 비용을 최소화하여 많은 어류에 사용할 목적으로 핑거가 일반적으로 이용되고 있다. 본 연구에서도 송신기는 핑거에 대해서 주로 검토하였다.

2. 수신방식

최근 어류에 대해 바이오텔레메터리를 응용한 연구가 활발히 진행되고 있다. 예를 들어 바이오텔레메터리 시스템과 스프리트빔 방식의 계량어군탐지기를 조합하여 핑거를 장착한 특정 어류의 자연상태에서 TS(Target Strength)를 측정하고(Bertrand et al., 1999), 핑거를 심해어에 장착하여 무인수중잠수정에 의해 행동을 추적한 예(Priede & Bagley, 2000) 등이 있다. 그러나 어류에 대한 바이오텔레메터리의 사용분야의 대부분은 행동 추적이다. 따라서 바이오텔레메터리는 생물연구자나 어업인이 사용하기 쉽도록 시스템의 설치와 취급이 간편하고, 어류에 부담을 주지 않도록 소형·경량의 핑거를 사용하여 넓은 범위를 장시간에 걸쳐 상세하게 행동을 추적할 수 있도록 하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 이와 같은 바이오텔레메터리의 목적을 달성하기 위하여 지금까지 사용되어온 바이오텔레메터리의 방식과 원리에 대해서 조사하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 송신기와 송신방식

바이오텔레메터리에 이용되고 있는 핑거는 어느 방향에서든 신호가 송신되어도 검지할 수 있도록 무지향성이고, 소형 어류에 장착할 수 있도록 소형·경량이어야 한다. 또한 음파의 도달거리가 길고 수명도 길어야 할 필요가 있다. 지금까지 압전 세라믹소자 2매를 탄성판에 부착시킨 바이모프형(Bimorph type) 진동자의 채용(Shin et al., 1991), 핑거용 IC의 개발(Voegeli et al., 1998), 300kHz의 고주파수 이용(Steig, 1999) 등 소형 핑거의 개발(Jain & Reeta Gupta, 1997)이나

음향계에 대한 연구(Mitson & Young, 1975; Pincock & Luke, 1975; Mitson, 1988; 朴 & 古澤, 2002)에서도 이러한 것이 다루어졌다. 최근의 업적으로는 길이 17.5mm, 직경 7mm의 초소형 핑거가 개발되었으며, 송신방식도 많은 어류의 행동을 동시에 추적할 수 있도록 임의의 주파수에서 특정 신호를 가진 펄스열을 신호로 발생시켜 수신측에서 혼신을 피하도록 한 방식이 개발되었다(Voegeli et al., 1998). 이러한 핑거가 어류의 추적에 응용되었으며(Lacroix & McCurdy, 1996), 소형·경량이며 수명이 길다는 장점 때문에 최근 폭 넓게 사용되고 있다(Mitamura et al., 2002; Dresser & Kneib, 2007).

핑거는 송파용의 초음파진동자, 전지, 회로, 정보센서(정보핑거의 경우)와 이것을 수납할 용기로 구성되어 있다. 이중에서 진동자와 전지가 핑거의 크기와 중량을 크게 지배한다. 진동자는 전압정수가 큰 압전세라믹(PZT)의 원통형진동자가 많이 사용된다. 이것은 감도를 크게 할 수 있고 소형·경량으로 할 수 있으며 쉽게 무지향성을 구현할 수 있다. 또한 전지는 안정된 전압이 흐르는 산화은전지가 일반적으로 채용되고 있다. 그래서 본 연구에서는 압전세라믹(PZT)의 원통형진동자와 산화은전지에 대해 검토를 하였지만 일반적인 특성은 크게 다르지 않았다.

원통형진동자의 직경방향 공진주파수 f0는

$$f_0 = \frac{1}{2\pi a_T}\sqrt{\frac{E}{\rho_T}} \tag{1}$$

이다(Steig, 1999). 여기에서 a_T는 원통형진동자의 평균반경, E와 ρ_T는 재료의 영률과 밀도이다. (1)식에서 $2a_Tf_0$는 주파수정수라 하고 원통형 PZT의 직경방향 진동의 경우 약 850Hz・m이다. 진동자의 크기와 질량을 결정하기 위하여 공진특성이 아주 예리하지 않고 가능한 소형・경량의 진동자가 구현될 수 있도록 공진주파수보다 낮은 부분이 이용되는 경우도 있지만(Pincock & Luke, 1975) 기본적으로 진동자의 크기와 질량은 공진주파수로 결정한다. 원통형진동자는 원통축에 수직인 방향에서는 무지향성이지만 축 방향에서도 무지향성이 되도록 만들기 위해서는 진동자의 높이 h를 파장의 약 0.5배 이하로 설계하여야 한다(Mitson & Young, 1975). 따라서 진동자의 체적 V_T, 즉 질량은 대체로 주파수 f의 3승에 반비례하여

$$V_T \propto \frac{1}{f^3} \tag{2}$$

이 된다. (2)식의 특성 때문에 진동자의 크기와 질량을 가능한 작게 하기 위해서는 저주파수의 사용이 어렵다는 것을 알 수 있다.

소형 어류에 장착하기 위해서는 전지의 크기와 중량도 작게 해야 되지만 전지의 크기와 중량이 작을수록 전지용량이 작아져 송파음압을 크고 수명을 길게 할 수가 없게 된다. 원통형진동자와 원주 또는 원반형전지의 조합은 그들 축을 맞추어 배열하면 전체를 원주상으로 정리할 수 있기 때문에 일반적으로 사용하는 방법이다. 주파수의 증가와 함께 진동자의 직경이 작아지기 때문에 전지의 직경도 그에 합당하게 작아질 필요가 있다. 또한 전지용량(소형 전지에서는 보통 mAh의 단위로 표현된다) C는 거의 전지의 체적에 비례한다(Toshiba battery co., Ltd.의 산화은 단추형 전지 등의 자료를 정리한 결과). 따라서 전지의 체적을 VB, 두께를 hB라 하면

$$C \propto V_B \propto \frac{h_B}{f^2} \tag{3}$$

이 된다. 전지용량을 늘리기 위해서는 낮은 주파수가 유리하지만 크기 면에서는 진동자정도는 아니지만 고주파가 유리하다. 용량은 전지의 두께를 늘리든지 복수의 셀을 사용하면 가능하다.

핑거의 송파음압은 음의 도달거리와 직접 관련이 있으며 전지용량과 수명의 제한을 받기 때문에 송파음압을 검토하기 위해서는 핑거음의 도달거리, 전지의 용량 및 수명 등을 동시에 고려할 필요가 있다. 바이오텔레메터리는 송파와 수파가 다른 장치에 의해 행해지기 때문에 어군탐지기(Furusawa, 1991) 등과 같이 송수파를 통합하여

검토하기는 어렵다. 따라서 송파음압과 핑거음의 도달거리, 송파음압과 수명의 관계를 나누어 검토하였다.

핑거음의 도달거리는 송파음압, 주파수와 같은 송신계의 특성을 비롯하여 수파기의 크기 등 수신계에 의해서도 영향을 받는다. 핑거의 송파음압 P0는

$$P_0^2 = \frac{W\eta\rho c}{4\pi r_0^2} \quad (4)$$

이다. 여기에서 W는 전력, η는 전기음향 변환효율, ρ는 해수의 밀도, c는 음속, r0는 기준거리(1m)이다. 핑거로부터 송파된 음은 확산감쇠와 흡수감쇠를 받으며 수파기에 도달한다. 수파기에 수신된 신호에는 핑거로부터 송파된 수파음압과 방해성분인 잡음이 포함되어 있다. 핑거음의 도달거리는 수파음압과 잡음에 의해 결정되는 신호대 잡음비(SN비)로부터 구할 수 있다. 신호대 잡음비 SNR은

$$S_{NR} = \frac{4\pi^2 P_0^2 a^2 \pi f^{3.8} b 10^{-0.1\alpha r}}{c^2 r^2 N_{P0}^2 \Delta f} \quad (5)$$

이다(朴 & 古澤, 2002). 여기에서 a는 수파기의 반경, α는 흡수계수이고 NP0는 1Hz에 대한 잡음스펙트럼 레벨에 상당하는 계수, Δf는 수신계의 대역폭을 나타낸다. b는 원형진동자의 지향성함수로서 계산을 쉽게 하기 위하여 Hamilton et al.(1977)의 주극에 대한 간단식

$$b \cong exp\left(-\left(\frac{\pi a f}{c}\right)^2 \theta^2\right) \quad (6)$$

로 근사하였다.

핑거의 최대도달거리는 (5)식에서 지향성함수의 항 b를 1로 놓고 SN비가 일정값이 되는 거리이다. 지항성함수의 항을 1로 하면 SN비는 송파음압 P0, 거리 r, 주파수 f, 수파기의 반경 a에 크게 의존하게 된다. 따라서 Fig. 2에 송파음압 레벨 SL=20logP0과 2a를 변수로하여 최대도달거리(Maximum detectable range, MDR) rm을 주파수 f에 대해 나타내었다. 이 때, SN비는 SNR=10log SNR=10dB, c=1500m/s, Δf=2.5kHz, NP0= 145dB인 가장 일반적인 값을 대입하였다(朴 & 古澤, 2002). 흡수감쇠계수 α는 François & Garrison (1982) 식에 의해 계산하였다. 계산에 필요한 변수는 흡수계수 값에 크게 영향을 미치지 않기 때문에 염분농도 S=34psu, 수온 T=15℃, pH=8, 수심 d=100m인 평균적인 값을 대입하였다. 변수로 사용한 SL은 현재 시판되고 있는 핑거(Vemco사 제품)의 값 136dB, 155dB, 168dB를 이용하였으며 2a는 1~64cm 범위에서 검토하였다.

최대도달거리는 저주파에서는 f 3.8항에 비례하여 증가하지만 고주파가 됨에 따라 α가 급격하게 증가하기 때문에 감소로 변하여 최대치를 나타내게 된다. SL과 2a가 증가함에 따라 최대도달거리도 증가하며 최대치를 나타내는 주파수는 낮아진다. 즉 고주파에서는 SL과 2a를 크게 하여도 저주파만큼 효과가 적다는 것을 알 수 있다. 최대도달거리를 나타내는 주파수는 40~80kHz이며 어군탐지기의 최대탐지거리를 나타내는 주파수 30~50kHz 보다 높았다(박, 2005). 현재 바이오텔레메터리에 이용되고 있는 수파기의 주파수는 25~307kHz(Vemco사, Lotek사, Hydroacoustic Technology사, Sonotronic사의 제품설명서 참조)이고 70kHz 부근에서 가장 많이 사용되고 있는 것은 상기에 설명한 이유 때문일 것이다.

핑거의 수명 H는

$$H = \frac{C}{I_P \frac{\tau}{T_P} + I_0} \quad (7)$$

로 계산할 수 있다. 여기에서 IP는 펄스 송신시 전류, I0는 펄스를 발생하지 않을 때의 암전류, τ는 펄스폭, TP는 펄스 반복주기, τ/TP는 이행주기(duty ratio)이다.

(7)식과 $W = VI_P$(V는 전지의 전압)의 관계를 (4)식에 대입하면

$$P_0^2 = \frac{\rho c \eta}{4\pi r_0^2} \frac{V}{\tau / T_P}\left(\frac{C}{H} - I_0\right) \quad (8)$$

이 된다. 1항은 거의 정수에 가깝다. 2항은 송파

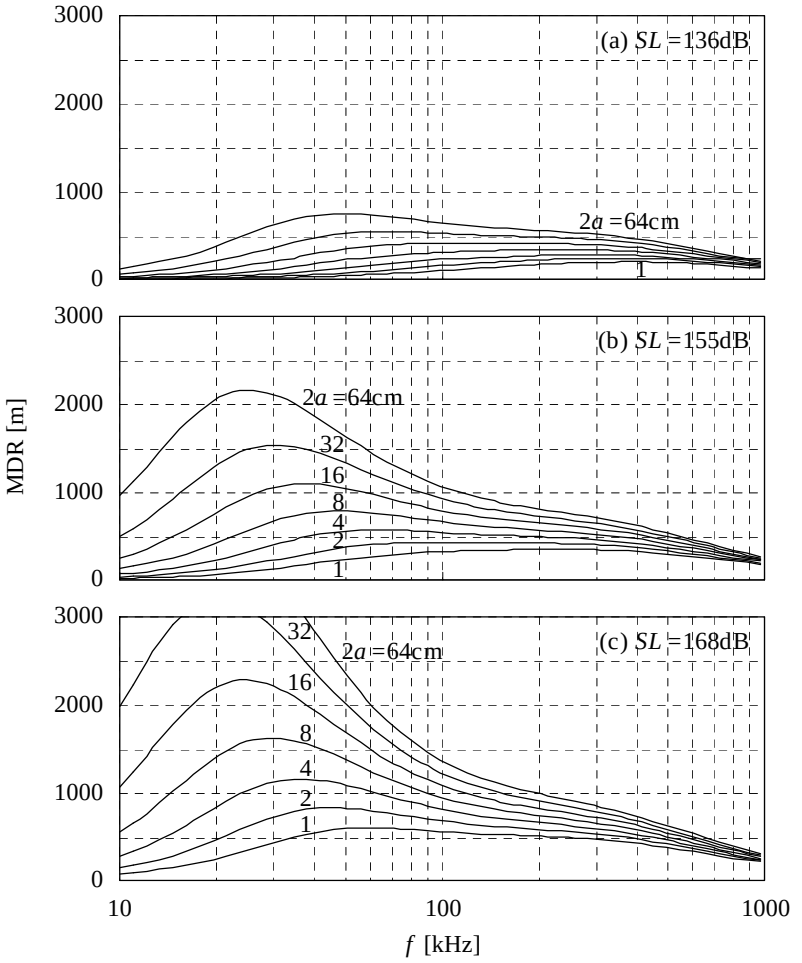

Fig. 2. Maximum Detectable Ranges (MDR) for source pressure levels (SL) of 136dB (a), 155dB (b), and 168dB (c). The receiving transducer diameters (2a) range from 1 to 64cm. SNR=10dB, c=1500m/s, Δf =2.5kHz, and NP0=145dB are fixed. The absorption attenuation coefficient α is calculated by François and Garrison's formula.

음압의 2승이 전압에 비례하고 duty ratio에 반비례한다. 괄호 안의 3항은 펄스 발생에 사용되는 전류를 나타낸다.

Fig. 3에 (8)식을 이용하여 전지용량 C의 변화에 따른 핑거의 수명 H과 송파음압레벨 SL=20logP0의 관계를 나타내었다. 고유음향임피던스 ρc는 1.5×106 kg/m2/s, η는 30%로 가정하였으며, V는 2개의 산화은 단추형전지의 전압인 3V, I0는 0.001mA을 대입하였다. 현재 주로 사용되는 핑거의 펄스 반복주기는 핑거를 잃어버려도 다음 신호로 핑거의 존재를 확인할 수 있도록 1s정도이고, 펄스폭은 10ms 정도이기 때문에 τ/TP는 0.01로 하였다.

수명은 낮은 송파음압에서는 $I_P(\tau/T_P) \le I_0$이 되기 때문에 거의 일정하지만 송파음압이 일정 값(Fig. 3에서는 SL=140dB 정도) 이상이 되면 (8)식에서 I0=0의 특성을 가지기 때문에 송파음압의 증가에 따라 감소한다. 예를 들면 C=100mAh이

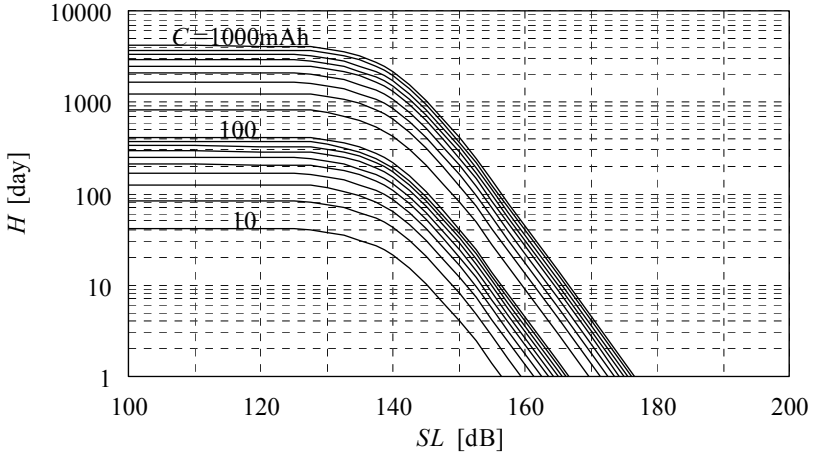

Fig. 3. Pinger life time (H) as functions of source pressure level (SL) for various battery capacities (C, mAh). The specific acoustic impedance ρc=1.5×106kg/m2/s, transducer efficiency η=30%, voltage of 2 battery cells V=3V, current when circuit is in quiescent state I0=0.01mA, and duty ratio τ/TP=0.01 are assumed.

고 SL=130dB이면 H는 381일, 140dB이면 216일, 150dB이면 40일, 160dB이면 4일이 된다.

핑거는 소형·경량이고 수명이 길며 송파음압이 큰 3가지 조건이 중요하다. 핑거의 수명을 길게 하기 위해서는 (7)식 또는 Fig. 3과 같이 송파음압을 작게 하여 duty ratio의 값을 낮추어야만 한다. 또한 핑거를 소형·경량으로 하기 위해서는 (2)식과 (3)식에서 알 수 있듯이 높은 주파수가 바람직하다. 그러나 주파수가 높아지면 (3)식에서 전지용량이 작아지고 (7)식에서 수명과 송파음압의 제한을 받게 되며, 주파수가 높아지면 흡수감쇠가 급격하게 증가하여 전파상의 제약을 받게 된다. 따라서 핑거의 주파수, 크기 등 주요 제원은 용도, 조건, 수신계 등을 종합하여 결정할 필요가 있다.

2. 수파기와 수신방식

음파표지가 핑거인 경우, 지금까지 어류의 행동을 추적하기 위해 사용된 바이오텔레메터리의 수파방식은 Table 1에 표시한 것처럼 2가지 방법으로 대별할 수 있다.

첫 번째 방식은 핑거로부터의 신호를 크게 수신할 수 있도록 수파빔을 신호쪽으로 향하도록

Table 1. Classification of an ultrasonic biotelemetry system

Receiving method	Directional hydrophone systems		Acoustic positioning systems		
Principle	Single beam	Multiple beams	LBL	SBL	SSBL
Number of hydrophone	1	≧2	≧3	≧3	1
Tracking by ship	○	○	×	△	○
Data of acquistion	Approximate bearing	Approximate bearing	Bearing & Distance	Bearing	Bearing
Detectable	-		Short	Short	-

하여 그 수파 빔의 방향으로부터 또는 복수의 빔을 준비한 후 가장 큰 신호를 수신한 빔의 방향으로부터 핑거를 부착한 어류의 방향을 판단하는 최대감도방식이다. 두 번째 방식은 수파기 또는 하이드로폰을 기지의 간격에 설치하고 각 수파기 또는 하이드로폰에 도달한 핑거음의 시간차 또는 위상차로부터 핑거를 부착한 어류의 위치를 계측하는 음향측위방식이다. 음향측위방식은 보통의 음향측위와 같이 기준선의 길이를 기준으로 하여 LBL(Long Base Line), SBL(Short Base Line), SSBL(Super Short Base Line) 방식으로 분류된다 (Milne, 1983).

Fig. 4에 최대감도방식에 의한 바이오텔레메터리 방식을 표시하였다.

간단한 단일빔 방식에서는 1개의 지향성을 가진 수파기를 회전하여 핑거음이 최대가 되는 방향을 찾아내고 그 수파기의 방향으로부터 어류의 대략적인 방위를 판단한다(Stasko & Polar, 1973; Voegeli et al., 1998). 또한 복수의 지향성을 가진 수파기를 배열하여 수파기를 움직이지 않고도 핑거음을 가장 강하게 수신한 수파기의 방향으로부터 대략적인 방위를 판단할 수 있도록 한 복수빔 방식도 사용된다(Trefethen et al., 1957; Bertrand et al., 1999). 역사적으로는 수파기를 복수로 준비하여 지향성 수파기의 빔 교차점으로부터 방위를 판단하는 방식도 있었다(Young et al., 1972). 최초의 바이오텔레메터리 시스템에서는 수평과 수직방향에 각각 2개의 지향성을 가진 수파기를 설치하여 핑거음을 수신한 수파기의 방향으로부터 어류의 대략적인 방위를 판단하는 최대감도방식을 이용하였다(Trefethen et al., 1957). 이와 같은 최대감도방식은 넓은 해역에서 소형 어류의 행동추적에 폭넓게 이용되어 왔고 현재도 많이 사용되고 있다. 최대감도방식으로 거리를 파악하기 위해서는 소너의 에코를 이용한 예는 있지만 (Trefethen et al., 1957), 핑거를 이용한 경우 일반적으로 거리를 간단히 구할 수는 없어 어류의 상세한 행동파악이 어렵다.

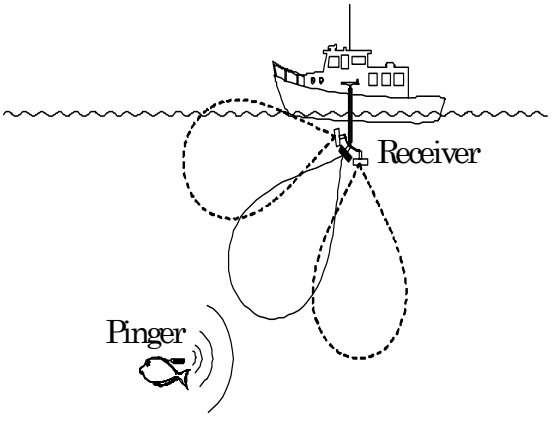

Fig. 4. Directional hydrophone systems. The pinger is located by the single beam steered or by multiple beams.

LBL 방식은 Fig. 5에 표시한 것처럼 핑거음을 3개 이상의 무지향성 하이드로폰으로 수신하여 쌍곡선 방식으로 위치를 구한다(Hawkins et al., 1974).

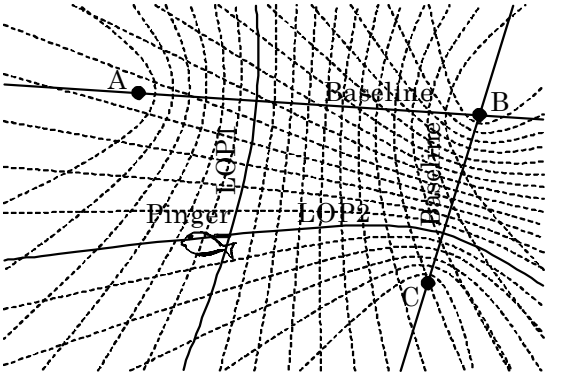

Fig. 5. Principle of Long Base Line (LBL) system. The location of pinger is decided by the intersection of two lines of position (LOP1 and LOP2).

LBL 방식은 고래의 명음에 의해 3차원 위치를 구하기 위해 사용되었지만(Watkins et al., 1972), 핑거를 장착한 어류에서도 이용되고 있다(Steig, 1999; Shin et al., 2003). 이 방식은 로란, 데카, 오메가의 전파항법시스템으로 선위를 구하는 쌍

곡선방식과 동일하여 2개를 1조로한 하이드로폰에 의해 핑거음을 수신하여 각 하이드로폰에 도달한 음의 시간차를 측정하여 각 하이드로폰으로부터 핑거까지의 거리차를 구한다. Fig. 5에서 A, B, C는 하이드로폰의 기지의 위치이고 핑거의 위치는 2개의 위치 선(Line Of Position, LOP)인 LOP1과 LOP2의 교점으로 정해진다. 3차원 위치를 알기위해서는 4개의 하이드로폰이 필요하다. LBL 방식은 호수나 제한된 해역에서 소형 어류의 상세한 행동추적을 위하여 폭넓게 이용되어 왔고 현재도 많이 사용되고 있으나 선박에 의한 추적이 곤란하여 광범위한 계측이 불가능하며 3개 이상의 수파기를 수중에 설치해야하므로 장비의 설치 및 취급이 간편하지는 못하다.

SBL 방식은 LBL 방식과 같이 핑거음을 무지향성의 3개 이상의 하이드로폰으로 수신하여 그 시간차로부터 방위를 구한다(Milne, 1983; Samo et al., 1995). 그러나 설치한 하이드로폰의 간격이 LBL 방식보다 짧다. Fig. 6에 SBL 방식에 의해 어류의 방위를 구하는 예를 표시하였다. 먼저 2차원에 대한 원리를 유도하였다. Fig. 6에서 핑거에 가까운 하이드로폰을 A, 비교적 먼 하이드로폰을 B라 하였다. A에서 B까지의 기준선의 길이를 d, A와 B 2개의 하이드로폰으로 핑거음을 수신하고 도달 시간차로부터 계산한 거리차를 Δr라 하고 핑거가 수파기로부터 충분히 떨어져 있다고 가정하면 핑거의 위치각 θ는

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\Delta r}{d}\right) \qquad (9)$$

이 된다. 핑거의 위치각(θ, ϕ)을 구하기 위해서는 선저의 기지의 위치에 A, B, C 3개의 하이드로폰을 설치하여 각 하이드로폰으로 핑거음을 수신하고 도달 시간차를 측정하여 핑거의 방위를 구한다. 계산원리는 다음에 설명하는 SSBL방식과 비슷하여 위상차 대신 시간차를 측정하기 때문에 파수 k(=$2\pi/\lambda$, λ는 파장)는 무시된다. SBL 방식은 잠수작업과 정밀을 요구하는 해양계측에 폭넓게 이용되고 있지만 LBL 방식과 같이 선박에 의한 추적의 곤란함, 3개 이상의 수파기를 설치해야하는 장비의 설치 및 취급의 불편함 때문에 어류의 행동추적에는 거의 이용되지 않고 있는 실정이다.

SSBL 방식은 기준선의 길이를 짧게 하여 복수의 수파기를 하나의 용기에 수납한 후 각 수파기로 수신한 핑거음의 위상차를 측정하여 방위를 구한다(Klepaker et al., 1986). 지금까지 SSBL 방식을 이용하여 어류의 행동을 추적한 예로는

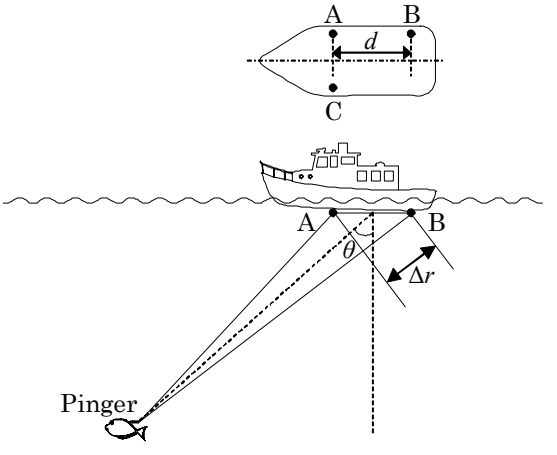

Fig. 6. Determination of angular locations (θ) of the pinger using Short Base Line (SBL) method. The angular locations are measured by difference in the time of arrival (Δr) of the acoustic signals received in each hydrophone A, B, and C.

20kHz의 저주파 음향측위시스템을 사용하여 노랑가오리에 적용한 것을 들 수 있다(德岡 et al., 1999). 이 방식은 저주파를 사용함으로서 핑거의 크기가 커져 소형 어류의 추적에 부적합하고 핑거음의 최대도달거리가 짧아져 어류의 연속적인 추적이 어렵다는 단점을 가지고 있기 때문에 최근 이러한 단점을 보완하여 범용으로 사용할 수 있는 새로운 SSBL 방식이 개발되었다(朴 & 古澤, 2006). 또한 계량어군탐지기에서 사용되고 있는 스프리트 빔이 바이오텔레메터리에도 응용되었다(Hedgepeth et al., 1998). 스프리트 빔의 송수파

기는 반사체의 세기와 거리 계측을 위한 레벨 빔과 방위 계측을 위한 위상 빔을 가진 배열로 되어있다. 레벨 빔으로 초음파 펄스를 송신하여 반사파를 각 빔으로 수신한다. 레벨 빔으로 수신한 신호에서는 거리와 세기를 계측하고 위상 빔으로 수신한 신호에서는 전후 위상차와 좌우 위상차를 계측하여 측정 개체의 송수파기에 대한 위치와 TS를 구한다. SSBL 방식에서도 스프리트 빔에서와 같이 하나의 용기에 수납한 복수의 수파기로 각각 수신한 핑거음의 위상차를 측정하여 방위를 구한다.

Fig. 7은 SSBL 방식에 의한 방위계측의 원리를 나타낸다. 위상차 계측에 의해 방위를 구하기 위해서는 수파기는 전(Fore, F)·후(Aft, A)와 좌(Port, P)·우(Starboard, S) 2쌍의 위상계측용 빔을 가진 배열이 필요하다(이후 이것을 위상 빔 배열이라 한다). 핑거 위치의 구좌표를 (r, θ, ϕ)라하고 핑거가 수파기로부터 충분히 떨어져 있다고 하자. 핑거로부터 각 위상 빔 배열 중심까지의 거리를 lf, la, lp, ls라 하고 파수를 k라 하면 전후 위상차 δx와 좌우위상차 δy는

$$\delta_x = k(l_a - l_f) = kd\sin\theta\cos\phi$$
$$\delta_y = k(l_p - l_s) = kd\sin\theta\sin\phi \quad (10)$$

로 나타낼 수 있다. 여기에서 d는 위상 빔 배열의 중심간 거리이다. 수파기에 대한 핑거의 위치각(θ, ϕ)은 (10)식에 의해

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2}}{kd}\right) \quad (11)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{\delta_y}{\delta_x}\right) \quad (12)$$

가 된다. SBL 방식과 SSBL 방식에서는 송신기(핑거)가 독립되어 있기 때문에 핑거와 수파기의 거리를 간단하게는 구할 수 없다. 그러나 핑거의 송신주기가 일정하다면 핑거의 송신시각을 추정할 수 있기 때문에 펄스의 수신시각을 측정하여 송신시각과 수신시각의 차를 구해 거리를 계산할 수 있다. 최근 이와 같은 방법을 사용하여 핑거를 부착한 어류의 위치를 3차원적으로 추적하는

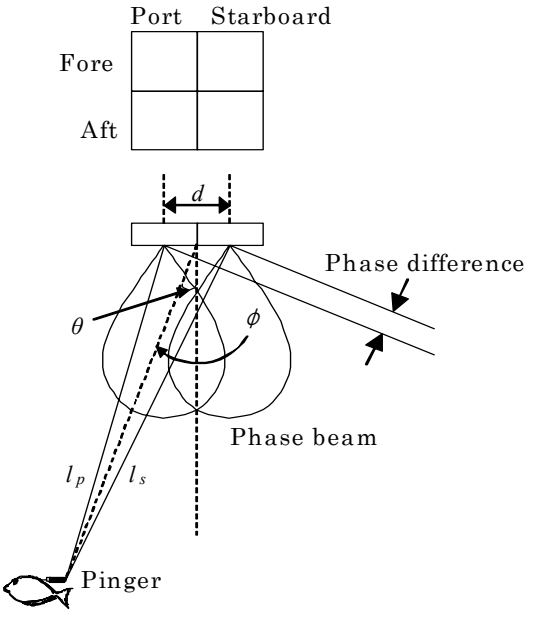

Fig. 7. Principle of measuring angular locations of the pinger using Super Short Base Line (SSBL) method. ls and lp are distances from the starboard and port receiving transducer to the pinger. d is distance between centers of phase beam array. The angular locations (θ, ϕ) are measured by phase difference of the acoustic signals received in each phase beam array.

기술이 활발하게 이루어지고 있다(朴 & 古澤, 2006).

SSBL 방식은 복수의 수파기를 하나의 용기에 수납할 수 있기 때문에 장비의 설치와 취급이 간편하고 선박에 의한 추적이 가능하여 넓은 범위에서 어류의 상세한 행동추적을 할 수 있다는 장점을 가지고 있으나 선박의 동요에 대한 대책이 미흡하여 앞으로의 연구가 기대된다.

Ⅳ. 결 론

핑거는 소형·경량으로 수명이 길고 송파음압이 큰 3가지 조건이 중요하다. 핑거의 수명을 길게

하기 위해서는 송파음압을 작게 하여 duty ratio 의 값을 낮추어야만 한다. 또한 핑거를 소형·경량으로 하기 위해서는 높은 주파수가 바람직하다. 그러나 주파수가 높아지면 전지용량이 작아지고 수명과 송파음압의 제한을 받게 되며, 주파수가 높아지면 흡수감쇠가 급격하게 증가하여 전파상의 제약을 받게 된다. 따라서 핑거의 주파수, 크기 등 주요 제원은 용도, 조건, 수신계 등을 종합하여 결정할 필요가 있다.

바이오텔레메터리의 수파방식을 종합적으로 살펴보았다. 음파표지가 핑거인 경우 지금까지의 바이오텔레메터리에 의한 어류의 행동추적방법을 최대감도방식과 음향측위방식으로 대별되었다. 최대감도방식은 넓은 해역에서 소형 어류의 행동추적에 폭넓게 이용되어 왔고 현재도 많이 사용되고 있지만 핑거를 이용한 경우 일반적으로 거리를 간단히 구할 수는 없어 어류의 상세한 행동파악이 어렵다. 음향측위방식은 기준선의 길이를 기준으로 하여 LBL, SBL, SSBL 방식으로 분류하였다. LBL 방식은 호수나 제한된 해역에서 SBL 방식은 잠수작업과 정밀을 요구하는 해양계측에서 폭넓게 이용되고 있지만 선박에 의한 광범위한 추적이 곤란하고 3개 이상의 수파기를 수중이나 선저에 설치해야하므로 장비의 설치 및 취급이 간편하지는 못하다. SSBL 방식은 장비의 설치와 취급이 간편하고 선박에 의한 광범위한 추적이 가능하지만 선박의 동요에 대한 대책이 미흡한 실정이다. 따라서 생물의 생태 및 측위조건 등을 고려하여 적절한 수파방식을 선택하는 것이 중요하다.

참고 문헌

Amlaner, C.J. & Macdonald, D.W.(1980). A handbook on biotelemetry and radio tracking. Pergamon Press, Oxford, 1~804.

Arnold, G.P.(2000). Movements of plaice and cod. CEFAS Lowestoft. (Handout)

Arnold, G.P. & Metcalfe, J.D.(1989). Acoustic telemetry: Progress and potential in understanding fish behaviour. Proc. I.O.A., 11, 96~103.

Bertrand, A., Josse, E. & Massé, J.(1999). In situ acoustic target-strength measurement of bigeye (Thunnus obesus) and yellofin tuna (Thunnus albacares) by coupling split-beam echosounder observations and sonic tracking. ICES J. Mar. Sci., 56, 51~60.

Bridger, C., Booth, R., McKinley, R.S., Scruton, D. & Lindstrom, R.(2001). Monitoring fish behaviour with a remote, combined acoustic / radio biotelemetry system. J. Appl. Ichthyol., 17, 126~129.

Demartini, E.E., Roberts, D.A. & Anderson, T.W.(1989). Contrasting patterns of fish density and abundance at an artificial rock reef and a cobble-bottom kelp forest. Bull. Mar. Sci., 44, 881~892.

Dresser, B.K. & kneib, R.T.(2007). Site fidelity and movement patterns of wild subadult red drum, Sciaenops ocellatus (Linnaeus), within a salt marsh-dominated estuarine landscape. Fisheries Management and Ecology, 14, 183~190.

François, R.E. & 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.

Fréon, P., Gerlotto, F. & Soria, M.(1993). Variability of Harengula spp. school reactions to boats or predators in shallow water. ICES. mar. Sci. Symp., 196, 30~35.

Furusawa, M.(1991). Designing quantitative echo sounders. J. Acoust. Soc. Am., 90, 26~36.

Gerlotto, F., Soria, M. & Fréon, P.(1999). From two dimensions to three: the use of multibeam sonar for a new approach in fisheries acoustics. Can. J. Fish. Aquat. Sci., 56, 6~12.

Gilchrist, I., MacDonald, A.G. & Priede, I.(1983). Experimental biology at sea. Academic Press, London, 367~386.

Greer Walker, M., Harden Jones, F.R. &

Arnold, G.P.(1978~1979). The movements of plaice (Pleuronectes platessa L.) tracked in the open sea. J. Cons. int. Explor. Mer, 38, 58~86.

Greer Walker, M., Mitson, R.B. & Storeton-West, T.(1971). Trials with a transponding acoustic fish tag tracked with an electronic sector scanning sonar. Nature, 229, 196~198.

Hamilton D., Lozow, J., Suomala Jr, J. & Werner, R.(1977). A Hydroacoustic measurement program to examine target quantification methods. Rapp. P. -v. Réun. Cons. int. Explor. Mer, 170, 105~121.

Hawkins, A.D. & Urquhart, G.G.(1983). Experimental Biology at sea. Academic Press, London, 103~166, 1983.

Hawkins, A.D., MacLennan, D.N., Urquhart, G.G. & Robb, C.(1974). Tracking cod Gadus morhua L. in a Scottish sea loch. J. Fish Biol., 6, 225~236.

Hedgepeth, J., Fuhriman, D., Geist, D. & Johnson, R.(1998). Fish movement measured by tracking radar-type acoustic transducers. Proceedings of the Fourth European Conference on Underwater Acoustics, Rome, 199~204.

Horký, P., Slavík, O., Bartoš, L., Kolářová, J. & Randák, T.(2007). Behavioural pattern in cyprinid fish below a weir as detected by radio telemetry. J. Appl. Ichthyol., OnlineEarly Articles, 1~5.

Ireland, L.C. & Kanwisher, J.W.(1978). The behavior of fish and other aquatic animals. Academic Press, New York, 341~379.

Ishida, Y., Yano, A., Ban, M. & Ogura, M.(2001). Vertical movement of a chum salmon Oncorhynchus keta in the western North Pacific Ocean as determined by a depth-recording archival tag. Fish. Sci., 67, 1030~1035.

Jain, S.K. & Reeta Gupta.(1997). Development of a miniature acoustic pinger tag device for tagging on to fish for fish behavioral studies. Indian J. Mar. Sci., 26, 234~237.

Klepaker, R.A., Vestgård, K., Hallset, J.O. & Knudsen, F.T.(1986). Remotely operated vehicles: Technology requirement present and future. Graham & Trotmam, London, 273~282.

Lacroix, G.L. & McCurdy, P.(1996). Migratory behaviour of post-smolt Atlantic salmon during initial stages of seaward migration. J. Fish Biol., 49, 1086~1101.

Mech, L.D. & Barber, S.M.(2002). A critique of wildlife radio-tracking and its use in National Parks, A report to the U.S. National Park Service. <http://www.npwrc.usgs.gov/resource/wildlife/radiotrk/radiotrk.pdf (2007. Sep.)>, 1~38.

Metcalfe, J.D. & Arnold, G.P.(1997). Tracking fish with electronic tags. Nature, 387, 665~666.

Milne, P.H.(1983). Underwater acoustic positioning systems. E.&F.N.Spon, London, 19~92.

Misund, O.A.(1993). Dynamics of moving masses: variability in packing density, shape, and size among herring, sprat, and saithe schools. ICES J. mar. Sci., 50, 145~160.

Mitamura, H., Arai, N., Sakamoto, W., Mitsunaga, Y., Maruo, T., Mukai, Y., Nakamura, K., Sasaki, M. & Yoneda, Y.(2002). Evidence of homing of black rockfish Sebastes inermis using biotelemetry. Fish. Sci., 68, 1189~1196.

Mitson, R.B.(1988). Systems & Control Encyclopedia. Singh, M.G. ed. Pergamon Press, Oxford, 4842~4848.

Mitson, R.B. & Young, A.H.(1975). A survey of the engineering problems of developing small acoustic fish tags. Proc. IERE Conf. Inst. Oceanography. Univ. of N. Whales, England, 163~174.

Mitson, R.B. & Storeton-West, T.J.(1971). A trasponding acoustic fish tag. The Radio and Electronic Engineer, 41, 483~489.

Nielsen, L.A.(1992). Methods of marking fish and shellfish. American Fisheries Society Special Publication, 23, 1~208.

Niezgoda, G.H., McKinley, R.S., White, D., Anderson, G. & Cote, D.(1998). A dynamic

combined acoustic and radio transmitting tag for diadromous fish. Hydrobiologia, 371/372, 47~52.

O'Dor, R.K. & Webber, D.M.(1998). Marine Animal Telemetry Tags. New England Aquarium, Boston, 17~27.

Parsley, M.J., Wright, C.D., van der Leeuw, B.K., Kofoot, E.E., Peery, C.A. & Moser, M.L.(2007). White sturgeon (Acipenser transmontanus) passage at the Dalles Dam, Columbia River, USA. J. Appl. Ichthyol., OnlineEarly Articles, 1~9.

Pincock, D.G. & Luke, D.McG.(1975). Systems for telemetry from free-swimming fish. Proc. IERE Conf. Inst. Oceanography. Univ. of N. Whales, England, 175~186.

Priede, I.G. & Bagley, P.M.(2000). In situ studies on deep-sea demersal fishes using autonomous unmanned lander platforms. Oceanography and Marine Biology: An annual review, 38, 357~392.

Samo, K.B., Hamada, E., Han, J. & Miyamoto, Y.(1995). Acoustic system for telemetring and displaying diver's own underwater position information. J. Tokyo Univ. Fish., 82, 23~32.

Shin, H.O., Lee, D.J. & Shin, H.I.(2003). Behavior of Israeli carp Cyprinus carpio traced by long baseline telemetry techniques during dynamite explosion work. Fish. Sci., 69, 27~36.

Shin, H.O., Hamada, E. & Suzuki, H.(1991). Miniaturization of the pinger for biotelemetry using a biomorph vibrator. Waseda University, Tokyo, 28~31.

Stasko, A.B. & Pincock, D.G.(1977). Review of underwater biotelemetry, with emphasis on ultrasonic techniques. J. Fish. Res. Board Can., 34, 1261~1285.

Stasko, A.B. & Polar, S.M.(1973). Hydrophone and bow-mount for tracking fish by ultrasonic telemetry. J. Fish. Res. Board Can., 30, 119~121.

Steig, T.W.(1999). The use of acoustics tags to monitor the movement of juvenile salmonids approaching a dam on the Columbia River. Proc. 15th Int. Symp. Biotelemetry. Juneau AK.

Trefethen, P.S., Dudley, J.W. & Smith, M.R.(1957). Ultrasonic tracer follows tagged fish. Electronics, 30, 156~160.

Urquhart, G.G. & Stewart, P.A.M.(1993). A review of techniques for the observation of fish behaviour in the sea. ICES mar. Sci. Symp., 196 135~139.

Voegeli, F.A., Lacroix, G.L. & Anderson, J.M.(1998). Development of miniature pingers for tracking Atlantic salmon smolts at sea. Hydrobiologia, 371-372, 35~46.

Watkins, W.A. & Schevill, W.E.(1972). Sound source location by arrival-times on a non-rigid three-dimensional hydrophone array. Deep-Sea Res., 19, 691~706.

Young, A.H., Tytler, P., Holliday, F.G.T. & MacFarlane, A.(1972). A small sonic tag for measurement of locomotor behaviour in fish. J. Fish Biol., 4, 57~65.

朴柱三・古澤昌彦(2002). 超音波バイオテレメトリの音響系の評価および設計方法, 日本水産學會誌, 68, 334~344.

朴柱三・古澤昌彦(2006). SSBL方式ピンガー同期方式を組み合わせたバイオテレメトリー方式の開發, 日本水産學會誌, 72, 1082~1092.

德岡隆夫 · 西村淸和 · 村上榮幸(1999). 中海におけるアカエイを用いたバイオテレメトリの基礎實驗, LAGUNA(汽水域硏究), 6, 293~298.

박주삼(2005). 수산음향계측장치의 탐지범위에 대한 연구, 한국어업기술학회지, 41, 54~63.