

설치수심에 따른 어류탐지용 음향 텔레메트리 수신기의 탐지성능분석

황보규·신현옥^{1*}

부경대학교 해양산업개발연구소, ¹부경대학교 해양생산시스템관리학부

Analysis on the detection ability of acoustic telemetry receiver for fish detection by installation depth

Bo Kyu Hwang and Hyeon Ok Shin^{1*}

Research Center for Ocean Industry Development, Pukyong National University,
Busan 608-737, Korea

¹Division of Marine Production System Management, Pukyong National University,
Busan 608-737, Korea

Acoustic telemetry is a useful method to investigate fish behavior and is widely used to obtain biological information. In this study, the detection ability of a mooring-type acoustic telemetry system and the seasonal changes were studied for survey design and data analysis. The system detection range was examined with an underwater noise model, and seasonal changes were estimated with a ray-tracing program and underwater temperature profile data. The field experiment was conducted with two sets of pingers and six receivers to estimate the difference in detection rate by installation depth and to compare the model estimate. Results indicated that the long-range detection ability of the acoustic telemetry system was significantly affected by underwater temperature. The detection rate rapidly decreased near the sea surface or bottom despite that the near-range Signal to noise ratio was sufficient.

Key words: Acoustic telemetry system, Detection ability, Installation depth, Seasonal changes

서 론

음향 텔레메트리 기법은 초음파 발신기 (Pinger)를 어류의 체내에 부착하여, 이 발신기로부터 발신되는 초음파 신호를 하나 또는 복수의 수신기 (Hydrophone)로 수신하여, 어류의 체류나 행동을 측정하는 기술이다.

이 기법은 목표어종에 자연 상태에 가까운 생태학적 정보를 얻기에 매우 유용한 기술로 (Matthew, 1992; Cote et al., 2002; Jadot et al., 2006), 주위환경의 변화에 따른 유영특성과 같은 행동특성의 파악 (Shin, 1995, 2000) 뿐만 아니라, 서식처, 산란장, 회유경로 등과 같은 생태학적 특성을 추정 (Kang and Shin, 2006; Kang et al., 2008)할 수 있기 때문에, 연안수산자원의 관리와 평가를 위한 유용한 정보를 제공할 수 있다 (Zeller and Russ, 1998; Cooke et al., 2004).

최근 초음파 발신기는 수중음향기술의 발전으로 송신 펄스에 고유신호를 입력하여 개체를 구별할 수 있게 되었고, 종래의 센서들 보다 더욱 소형화되고 지속시간도 길어져 대상과 목적에 맞추어 다양한 조사가 가능하게 되었다. 음향 텔레메트리 기법을 이용한 어류추적방법은 복수의 수신기를 이용한 3차원 추적방법, 선박을 이용하여 추적에 나서는 능동적인 방법, 그리고 계류식 수신기로 어류의 체류나 통과를 탐지하는 수동적인 방법으로 크게 나눌 수 있다. 이 가운데, 계류식 수신기에 의한 탐지방법은 장기간 동안 어류의 체류나 회유경

로 등을 파악할 수 있기 때문에 연안 주요어종의 생태특성 파악에 많이 이용되고 있다.

한편, 수중에서는 음파신호의 전달을 방해하는 다양한 해중환경요인이 존재한다. 예를 들어 대상어류가 바위틈이나 좁은 구석에 체류하는 습성을 가진다면, 주변 지형에 의해 음파신호의 전달에 방해받게 된다. 그러나, 이러한 대상생물의 생태적인 특성을 제외하면, 해양에서의 음파의 전송특성은 해양의 물리적 특성에 의한 음파에너지의 손실, 음파의 굴절, 주위배경잡음, 다중경로에 의한 잔향 등에 결정된다. 따라서, 음향 텔레메트리 기법을 이용한 어류 탐지에서 해양의 물리적 환경의 영향에 따른 음파전달특성을 고려하여 설치하고, 그에 따른 탐지성능을 파악하여 돕으로서 적절한 조사가 이루어 질 수 있다. 이에 본 연구에서는 최근 어류탐지에 널리 사용되고 있는 계류식 음향 텔레메트리 시스템의 탐지거리와 설치수심에 따른 수신성능의 변화를 음선모델과 현장실험을 통하여 분석하여, 시스템의 탐지성능과 특성의 이해 및 자료해석에 필요한 기초적인 정보를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

계류식 어류탐지 시스템

실험에 사용된 초음파 발신기와 계류식 수신장치 (VR2, AMIRIX System Inc., Canada)의 사양을 Table 1에 나타낸다. 초음파 코드화 발신기 (Coded transmitter, AMIRIX System

*Corresponding author: Shinho@pknu.ac.kr

Inc., Canada)는 주로 어류추적에 사용되는 체내 삽입식으로, 송신 주파수는 69 kHz이고, 8개의 펄스를 한 조로 하여 주기를 변조하는 방식으로 식별 ID신호를 송신하며, 복수의 초음파 발신기 신호에 의한 간섭이나 배터리 수명을 고려하여 신호전송간격을 조정할 수 있도록 설계되어 있다 (Fig. 1).

그리고, 계류식 수신장치는 무지향성 수신기로 어류가 체류하거나 통과될 것이 예상되는 위치나 길목에 계류하여 탐지하는 방식으로 초음파 발신기로부터 전송된 신호를 수신하면 수신일시, ID 등을 내부 메모리에 기록한다.

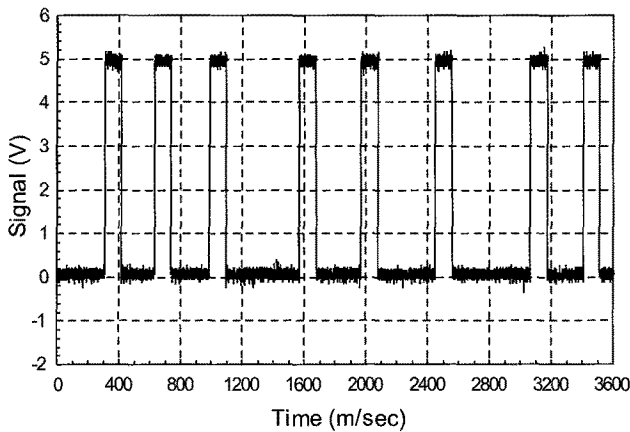


Fig. 1. Example of a coded type pinger signal modulated in receiver. The length of ID signals are composed eight pulses have about 3200 msec interval.

Table 1. Specification of ultrasonic pingers and mooring type receiver for acoustic telemetry

Parameters		Value
Pinger (Coded type)	Frequency	69 kHz
	Source Level	139 dB, 146 dB (Only field experiment)
	Transmitting interval	30, 60, 90, 120, 240, 300 sec
	Data	Day, time, ID, depth (Optional)
	Max. range	500 m (139 dB)
Receiver (VR2)	Frequency	69 kHz
	Type	Mooring
	Δf	± 3 kHz

탐지성능의 이론적 검토

음향 텔레메트리 시스템을 이용하여 어류의 체류상태를 파악할 경우, 수신기 장치 내에 기록되지 않았다면 어류는 시스템의 탐지거리 내에 체류하지 않았다고 판단하게 된다. 따라서, 탐지성능은 자료를 해석하기 위한 기준이 되므로, 설치된 수중환경을 고려하여 탐지거리를 검토하는 것은 측정 결과를 정확하게 해석하는데 필요하다. 수중음향시스템의 탐지성능은 신호대 잡음비로서 결정되는데, 신호탐지에 요구되는 신호대 잡음비를 S_N 과 탐지거리 r 사이의 관계는 다음의 식으로 계산될 수 있다 (Furusawa, 1999).

$$S_N^2 = \frac{P_0^2}{P_N^2 r^2 \exp(\alpha r)} \quad (1)$$

여기서, S_N 은 신호대 잡음비, P_0 은 초음파 발신기의 음원 음압, P_N 은 잡음음압, α 는 흡수감쇠계수이다. 그리고, 수신기의 대역폭을 Δf 라 하면, 수신기가 수신한 잡음음압 P_N 은 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$P_N^2 = N_p^2 \Delta f \quad (2)$$

해중에서의 잡음은 파도와 바람의 마찰음, 연안파도가 암반에 부서지는 파쇄음, 우천에 의한 소음 등의 자연소음 뿐만 아니라, 주위를 항행하는 선박소음 등의 인위적인 요인에 의한 잡음이 끊임없이 발생되고 있다. 그러나, 선박소음의 경우는 수십kHz 대역의 주파수에 대해서는 그 영향이 매우 미약하며, 1kHz - 100 kHz까지의 고주파수에 대해서는 수면에 의해 발생하는 잡음이 지배적이므로, 본 연구에서는 고주파수 대역의 주변잡음의 추정에 사용할 수 있는 수중잡음모델을 이용하였다 (Lurton, 2002). 해면에서의 잡음 스펙트럼 레벨 N_p 은 다음의 식으로 추정할 수 있다.

$$N_p = N_{1k} - 15.9 \log\left(\frac{f}{1000}\right) \quad (3)$$

여기서, N_{1k} 는

$$N_{1k} = 41.2 + 22.4 \log v$$

for $\delta T \leq 1^\circ\text{C}$ and $v \geq 1 \text{ m/s}$

$$N_{1k} = 41.2 + 22.4 \log v - 0.26(\delta T - 1)^2$$

for $\delta T \geq 1^\circ\text{C}$ and $v \geq 1 \text{ m/s}$

이고, v (m/s)는 풍속, δT 해수와 대기 사이의 온도차이므로, 풍속이 강할수록 해중잡음은 증가하고 온도차가 클수록 해중잡음은 감소한다.

계절별 음파전달특성

한편, 수신기는 이러한 주변요인에 의한 잡음뿐만 아니라, 초음파 발신기 자체신호의 다중반사에 의해 영향을 받게 되는데, 초음파 발신기와 수신기가 설치된 해역의 수심이 얕을수록 해수면 또는 해저면에 의한 반사파의 영향이 클 것이다. 천해환경에서의 반사파의 영향을 검토하기 위해서 음선 추적 소프트웨어 (Rayson 2.17, Semantic-TS, France)를 이용하였는데, 음속분포자료는 국립해양조사원에서 2007년 실시한 한국 연안해류 조사자료 중 바다 목장화 사업이 이루어지고 있는 여수 소리도 부근의 정점에 대한 여름 (8월), 겨울 (2월)의 관측 자료를 이용하였고 (Fig. 2), 수심은 30 m의 평면으로 가정하였다. 반사파는 반사횟수가 많아질수록 음압레벨의 감쇠가 심하게 나타나기 때문에, 직접파에 영향을 줄 수 있는

해수면과 해저면에 대한 반사파의 최대 반사횟수를 2회로 제한하여 고려하였으며, 초음파 발신기 신호의 펄스폭을 기준으로 수신기에 도달하는 고유음선의 개수와 도달 시간차를 이용하여, 반사파가 직접파의 신호에 미칠 수 있는 영향에 대해 검토하였다.

현장실험

천해환경에서의 계류식 음향 텔레메트리 시스템의 탐지성능을 평가하기 위하여, 2008년 4월 18일에 마산만에 현장실험을 실시하였다. Fig. 3은 현장실험에서의 초음파 발신기와 수신기의 설치형태를 나타낸다. 먼저, 설치하는 부근에 구조물이나 지형에 의해 방해받을지 않는 개방된 해역을 선정 한 후, 닻과 부이를 이용하여 수심 3.6m과 9m에 각각 2종의 초음파 발신기 (SL=139 dB, 146 dB)를 설치하였다. 초음파 발신기를 설치한 후, 고정도 측위시스템을 이용하여, 초음파 발신기 위치로부터 200 m, 400 m, 600 m 떨어진 지점에 수심 5m와 해저면 위 약 1 m 수심에 각각 1대씩을 설치하였다.

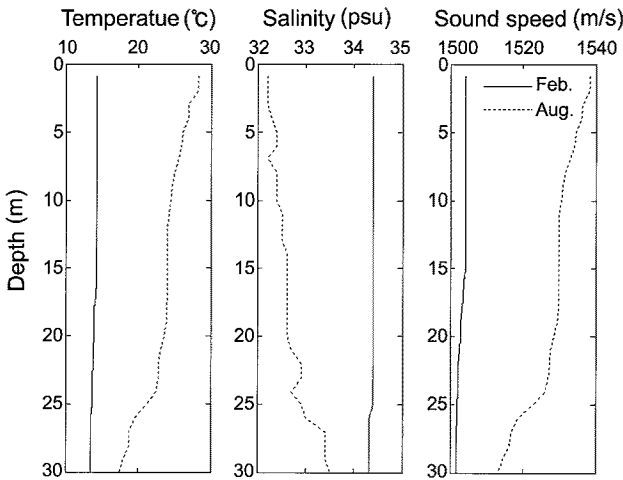


Fig. 2. Sound speed profile in the coastal water of Yeosu used ray tracking simulation.

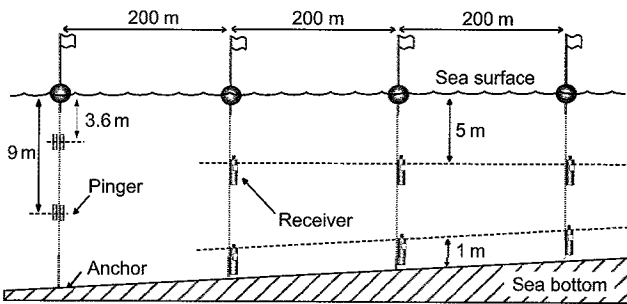


Fig. 3. Schematic diagram of relative positions between pingers and hydrophones in Masan bay.

결과 및 고찰

이론적으로 검토한 계류식 탐지시스템의 탐지거리에 따른

신호대 잡음비를 Fig. 4에 나타내었다. 식 (3)에 나타낸 바와 같이 잡음레벨은 수온과 기온 사이의 차와 관계하는데, 천해 환경에서의 해수와 대기 사이의 온도차는 약 2°C로 가정하였다. 신호대 잡음비는 풍속에 따라 큰 차이를 보였다. 한반도 근해의 풍속은 동계에 약 5 - 7 m/s, 하계에는 약 0.5 - 2.5 m/s 정도인데 (Lee et al., 2006), Pinger의 Code신호의 안정되게 수신할 수 있는 S/N비를 20 dB로 가정하면, 풍속이 7 m/s의 강한 풍속이 불 경우 탐지거리는 200 - 300 m 까지 감소하였으며, 풍속이 약한 여름철에는 500 m 이상의 장거리까지도 전송이 가능한 것으로 나타났다.

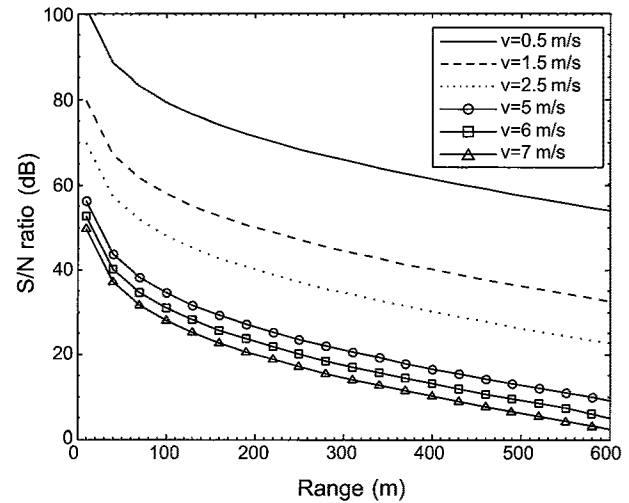


Fig. 4. S/N ratio of mooring type detection system by wind velocity.

음선추적프로그램으로 구한 수신기 위치별 고유음선의 개수를 Fig. 5에 나타내었다. 30 m 수심에 대해 반사횟수를 2회로 제한 할 경우, 반사에 따른 도달시간의 지연은 약 10 msec 이하이고, 펄스폭은 100 msec이므로, 반사파에 영향은 미치지 않을 것으로 판단된다 (Fig. 1). 수신기 위치별 수신특성을 고유음선의 개수로 검토해 보면, 여름철과 겨울철 모두 해수면과 해저면으로부터 약 5 m 이내에서는 수신율이 상대적으로 낮았다. 그리고, 겨울철인 Fig. 5의 (2)를 보면, 중간 수층에 대해서는 원거리까지 안정적이었으나, 여름철인 Fig. 5의 (1)에서는 수직음속분포로 인하여 해수면과 해저면으로부터 약 10 m까지도 수신율이 낮아져 여름철 수온분포가 수신기의 탐지성능에 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서, 안정적인 탐지를 위해서는 수신기를 해수면과 해저면으로부터 약 5 m 이내는 피하고, 중간 수층에 설치해야 할 것으로 판단된다. 초음파 발신기의 설치수심에 따른 특성을 비교해보면, 수심이 5 m일 때인 (a)가 해저면에 근접한 (c)보다 해수면 부근에서의 수신율이 낮게 나타났다. 일반적인 어류의 습성을 고려한다면 해수면 부근에 설치한 수신기는 어류가 해저에서 부상하는 야간보다는 해저면 가까이에 분포하는 주간 수신율이 낮아질 수 있을 것으로 판단된다. Kang and Shin (2008)은 동계에 실시한 감성돔 추적연구에서 주간의 수신율이 현저하

계 떨어지는 결과를 얻었는데, 이것은 이러한 위치별 수신특성과 관계가 있을 것으로 사료된다.

현장실험이 실시된 마산만의 설치위치별 음속분포는 Fig. 6과 같다. 초음파 발신기와 수신기를 설치한 4곳의 위치에서 측정된 음속분포는 모두 유사한 분포를 나타내었으며, 위치에 따른 큰 변화는 없었다.

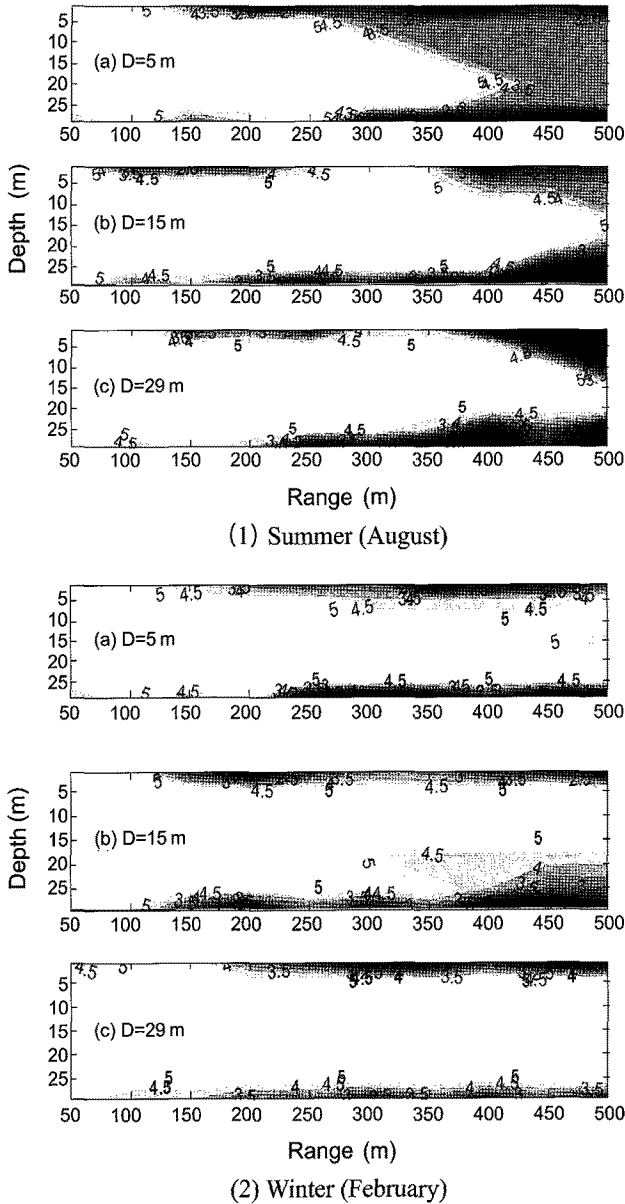


Fig. 5. The number of eigenrays by receiver locations. D indicates the depth of pinger.

현장실험이 실시된 마산만의 설치위치별 음속분포는 Fig. 6과 같다. 초음파 발신기와 수신기를 설치한 4곳의 위치에서 측정된 음속분포는 모두 유사한 분포를 나타내었으며, 위치에

따른 큰 변화는 없었다.

수신기 위치별로 추적된 고유음선을 Fig. 7에, 고유음선과 수신율의 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 먼저, 수신율은 초음파 발신기와 수신기 사이의 거리가 멀어질수록 큰 폭으로 감소하였다. 초음파 발신기의 수심에 따른 수신율인 (a)와 (b)를 비교해보면, 수심 9 m에 설치한 초음파 발신기가 수심 3.6 m에 설치한 초음파 발신기보다 수신율이 더 높게 나타났고, 수신기 위치별로 보면, 수심 5 m에 설치한 수신기가 해저면으로부터 1 m에 설치한 수신기보다 수신율이 높았다. 따라서, 수신기 또는 발신기가 수면 또는 해저면에 가까울 경우 수신율이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 수신기와 발신기 위치별 고유음선수에서도 유사한 특성이 나타났다. 해저면으로부터 1 m에 설치한 수신기가 수심 5 m에 설치한 수신기보다 고유음선수가 작은 점뿐만 아니라, 400 m와 600 m에서의 수신율이 급감하는 특성 등으로 보아 고유음선수가 위치별 수신특성을 잘 나타냄을 확인하였다.

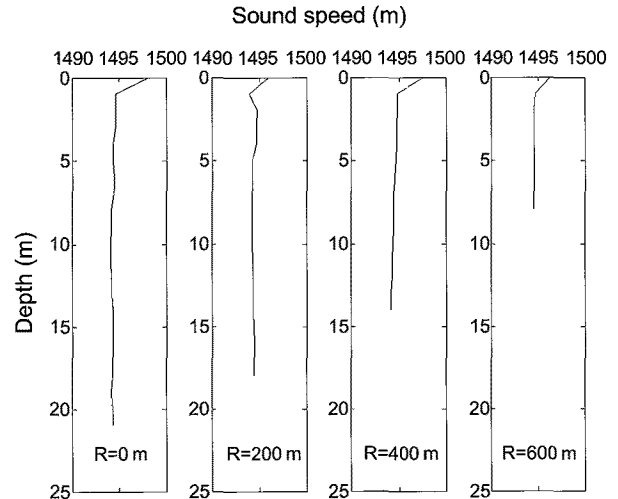


Fig. 6. Sound speed profiles measured by CTD in Masan bay. R is the range from pinger position.

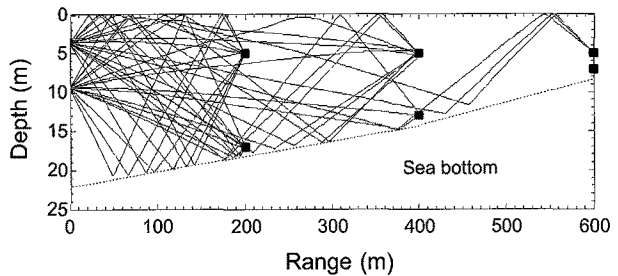


Fig. 7. Ray tracking from the pingers in 3.6 m and 9 m to receivers in 5 m and upper 1 m from the sea bottom. The squares show the locations of receivers.

본 실험에서 얻어진 거리에 따른 계류식 수신기의 수신횟수 감소 경향은 수중환경, 즉 수온분포, 해저지형, 해저잡음환경

및 사용하는 시스템에 따라 크게 달라질 것이다. 그러나, 신호 대 잡음비가 매우 높은 값을 유지함에도 불구하고, 탐지거리 에 따라 수신율에 큰 차이를 보였다. 이러한 현상에 대한 원인을 정확하게 판단하기는 어렵지만, 다른 잡음요인이나 음선 전달 경로에 영향을 줄 수 있는 다른 수중생물 등에 의한 반사 등의 영향도 있을 것으로 판단된다. 따라서, 수신횟수가 매우 높게 나타나는 어류는 수신기로부터 반경 약 200 m 이내의 범위에 체류하였을 가능성이 높다. 또한, 탐지횟수가 적은 어류는 체류시간이 짧았다고 판단해야 할 것이지만, 수신기로부터 비교적 원거리에 장시간 체류했을 가능성도 있을 것으로 판단되므로, 수신횟수를 가지고 분석을 할 경우에는 여러 가지 사항을 고려하여 판단할 필요가 있을 것으로 생각된다.

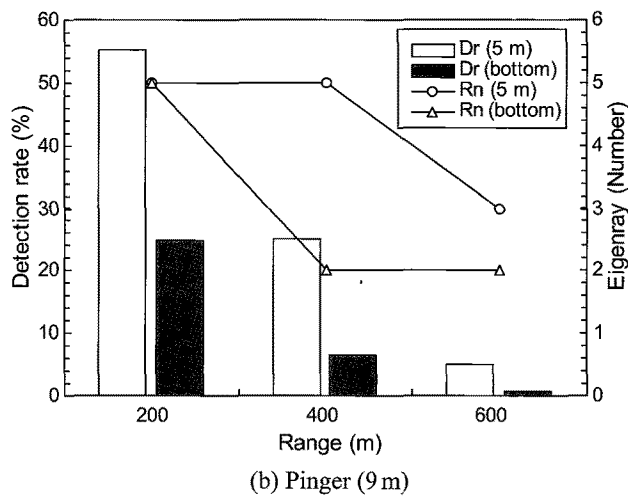
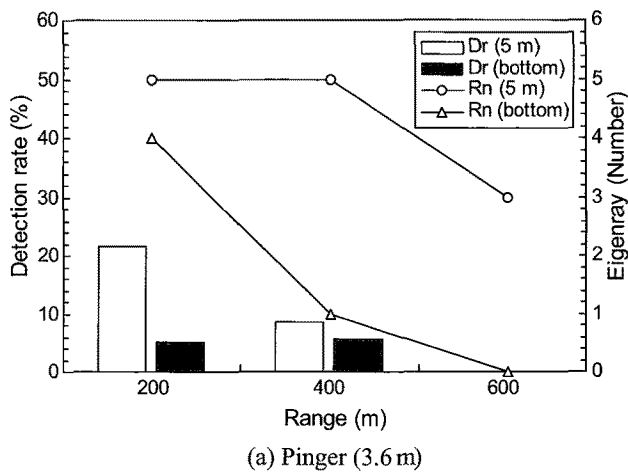


Fig. 8. Detection rate and Ray number from the pingers in 3.6 m and 9 m by receiver position. Dr and Rn indicates detection ratio and the number of eigenray, respectively.

실제로 친해환경의 직접파 및 반사파의 전달은 해수면과 해저면의 저질, 해저지형 등 다양한 요인에 의해 감쇠가 발생

할 것이지만, 본 연구에서는 해저잡음과 전달손실에 대하여만 검토하였다. 실제로 계류식 텔레메트리 시스템을 이용하여 장기간의 조사를 수행할 때, 주변해저지형과 계절별 수온의 연직분포, 대상생물의 습성 등을 고려하여 수신기의 수심을 결정하는 것이 최적의 수신성능을 발휘하게 함으로서, 보다 나은 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 음선모델을 통한 이론적인 검토와 그와 동일한 현장실험 결과를 비교분석함으로서 수온분포, 수신기의 설치수심이 계류식 텔레메트리 시스템의 탐지성능에 영향을 줄 수 있다는 것을 확인하였다. 앞으로 실측을 통한 고주파수에 대한 수중소음환경 분석과 텔레메트리 시스템의 신호처리 방식에 대해 검토하고, 계류식 텔레메트리 시스템의 탐지성능 추정기법을 일반화함으로서, 보다 효과적인 어류추적 및 탐지가 이루어질 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

Cooke SJ, Hinch SG, Wikelski M, Andrews RD, Kuchel LJ, Wolcott TG and Butler PJ. 2004. Biotelemetry: a mechanistic approach to ecology. *Trends in Ecology and Evolution* 19, 334-343.

Cote D, Ollerhead LMN, Gregory RS, Scruton DA and Mckinley RS. 2002. Activity patterns of juvenile Atlantic cod (*Gadus morhua*) in Buckley Cove, Newfoundland. *Hydrobiologia* 483, 121-127.

Furusawa M, Asami T and Hamada E. 1999. Detection range of echo sounders. The 3th JSPS inter semi Sustainable Fishing Technology in Asia towards the 21th Century, TUF International JSPS Project, Tokyo, 207-213.

Jadot C, Donnay A, Acolas ML, Cornet Y and Bégout Anras ML. 2006. Activity patterns, home-range size, and habitat utilization of *Sarpa salpa* (Teleostei: Sparidae) in the Mediterranean Sea. *ICES J Mar Sci* 63, 128-139.

Kang KM and Shin HO. 2006. Movement ranges and routes of black rockfish *Sebastes schlegeli* in summer and autumn from acoustic telemetry. *J Fish Sci Technol* 9, 9-96.

Kang KM and Shin HO. 2008. Behavioral Characteristics of Black Seabream *Acanthopagrus schlegeli* in Yeosu waters during winters. *J Kor Fish Soc* 41, 48-53.

Kang KM, Shin HO, Kang DH and Kim MS. 2008. Comparison of behavior characteristics between wild and cultured black seabream *Acanthopagrus schlegeli* using acoustic telemetry. *J Kor Soc Fish Tech* 44, 141-147.

Lee WB, Kim YS, Joo JM, Lee CW and NA JY.

2006. Effect of wind-generated bobbles on sound propagation. J Acoust Soc Kor 25, 395-402.
- Matthews KR. 1992. A telemetric study of the home ranges and homing routes of lingcod *Ophiodon elongatus* on shallow rocky reefs off Vancouver Island, British Columbia. Fish Bull 90, 784-790.
- Shin HO. 1995. Effect of the piling work noise on the behavior of snakehead (*Channa argus*) in the aquafarm. J Kor Fish Soc 28, 492-502.
- Shin HO. 2000. Effects of dynamite explosion work noise on behavior of Israeli carp, *Cyprinus carpio* in the cage of aquaculture. J Kor Fish Soc 33, 348-355.
- Lurton X. 2002. An Introduction to Underwater Acoustics : principles and application. Praxis, Chichester, U.K., 103-110.
- Zeller DC and Russ GR. 1998. Marine reserves: patterns of adult movement of the coral trout(*Plectropomus leopardus*(Serranidae)). Can J Fish Aquat Sci 55, 917-924.

2009년 9월 10일 접수

2010년 1월 19일 수정

2010년 2월 18일 수리