

魚群探知機에 의한 魚群量推定에 관한 基礎的 研究-I*

— 魚群量推定理論의 檢證實驗 —

李 昊 在

(1990년 1월 25일 접수)

Studies on Estimation of Fish Abundance Using an Echo Sounder - I* — Experimental Verification of the Theory for Estimating Fish Density —

Dae-Jae LEE

National Fisheries University of Pusan

(Received January 25, 1991)

An experiment has been carefully designed and performed to verify the theory for the echo-integration technique of estimating the density of fish school by the use of steel spheres in a laboratory tank.

The spheres used to simulate a fish school were randomly distributed throughout the insonified volume to produce the acoustic echoes similar to those scattered from real fish schools. The backscattered echoes were measured as a function of target density at tow frequencies of 50 kHz and 200kHz.

Data acquisition, processing and analysis were performed by means of the microcomputer-based sonar-echo processor including a FFT analyzer.

Acoustic scattering characteristics of a 36cm mackerel was investigated by measuring fish echoes with frequencies ranging from 47.8kHz to 52.0kHz.

The fluctuation of bottom echoes caused by the effects of fish-school attenuation and multiple scattering which occurred in dense aggregations of fishes was also examined by analyzing the echograms of sardine schools obtained by a 50kHz telesounder in the set-net's bagnet, and the echograms obtained by a scientific echo sounder of 50kHz in the East China Sea, respectively.

The results obtained can be summarized as follows:

1. The measured and the calculated echo shapes on the steel sphere used to simulate a fish school were in close agreement.
2. The waveform and amplitude of echo signals by a mackerel without swimbladder fluctuated irregularly with the measuring frequency.
3. When a collection of 30 targets/ m^3 lied the shadow region behind another collection of 5 targets/ m^3 , the mean losses in echo energy for the 30 targets/ m^3 were about -0.4dB at 50kHz and about -0.2dB at 200kHz, respectively.
4. In the echograms obtained in the East China Sea, the bottom echoes fluctuated remarkably when the dense aggregations of fish appeared between transducer and seabed. Especially, in the case of the echograms of sardine school obtained in a set-net's bagnet, the disappearance of bottom echoes and the lengthening of the echo trace by fish aggregations were observed. Then the mean

* 이 연구는 1989년도 한국과학재단 연구비지원에 의한 결과임 (과제번호 : 893-1506-013-2).

density of the sardine school was estimated as $36 \text{ fish}/m^3$. It suggests that when the distribution density of fishes in oceans is greater than this density, the effects of fish-school attenuation and multiple scattering must be taken into account as a possible source of error in fish abundance estimates.

5. The relationship between mean backscattering strength ($\langle SV \rangle$, dB) and target density (ρ , No./ m^3) were expressed by the equations: $\langle SV \rangle = -46.2 + 13.7 \text{ Log}(\rho)$ at 50kHz and $\langle SV \rangle = -43.9 + 13.4 \text{ Log}(\rho)$ at 200kHz.

6. The difference between the experimentally derived number and the actual number of targets gradually decreased with an increase in the target density and was within 20% when the density was 30 targets/ m^3 .

From these results, we concluded that when the number of targets in the insonified volume is large, the validity of the echo-integration technique of estimating the density of fish schools could be expected.

緒 言

최근, 漁業技術은 電子産業技術의 비약적인 발전과 각종 信號處理技法 등의 광범할 만한 진보에 힘입어 급속한 성장을 거듭하여 왔고, 또, 이와같은 관련 산업기술을 도입하여 개발한 최신의 어로장비가 많은 어선에 널리 보급되고 있다. 특히, 魚群探知機의 高度利用과 관련한 魚探技術分野에서는, 종래의 경우, 記錄式魚探에 기록되는 기록상의 농도나 기록상태, 또는 칼리魚探에 표시되는 어군영상의 색깔이나 크기로 부터 魚群의 분포상태를 개략적으로 파악하여 왔으나, 현재에는 현장에서 직접 魚探信號를 定量的으로 처리하여 魚群의 分布狀況은 물론 魚群量에 관한 정보까지도 정확하게 파악해 내려는 魚群計測分野가 주목되고 있고, 또 이에 대한 연구조사가 세계의 많은 연구기관에서 활발히 진행되고 있다^{1)~13)}.

일반적으로, 魚群探知機를 이용한 魚群量의 추정방법은, 魚群 echo 信號를 대상으로 하는 積分方式과 單體 echo 信號를 대상으로 하는 計數方式으로 대별할 수 있다. 현재 실용화 단계에 있는 積分方式의 魚群量의 推定法에 대한 이론적인 기초는 音響系의 體積殘響理論이다. 즉, 해중에 분포하는 어군은 音響系의 임의 체적중에 random하게 분포하는 等方性的 點散亂體群에 근사시킬 수 있다는 가정하에서, 이 點散亂體群으로부터 超音波가 散亂되는 현상을 토대로, 魚群 echo 信號의 energy와 魚群의 分布密度에 대한 이론적인 관계를 도출하고, 이 관계로 부터 魚群量을 추정한다.

美國, 日本, 英國, 노르웨이를 비롯한 세계 여러나라에서는, 실제 計量魚群探知機가 漁業資源을 평가하기 위한 手法의 하나로서 도입되고 있으나, 그 推定値의 信賴度에 관해서는 많은 문제점이 제기되고 있다. 따라서, 計量魚群探知機에서 채용하고 있는 魚群量推定理論을 어떻게 실험적으로 檢證할 것인가, 또, 그 推定値에 대한 信賴度를 어떻게 개선시킬 것인가에 대한 문제는 앞으로 해결되어야 할 과제이다.

魚群을 대상으로 積分方式 魚群量推定法을 檢證하는데에는 무엇보다도 어군을 구성하는 個體魚의 超音波散亂特性이 魚體의 生物學的 및 音響學的 特性 등에 따라 매우 불규칙하게 변동하기 때문에 많은 어려움이 있는 것도 사실이다. 또한 어군의 규모가 크고, 분포밀도가 濃密한 경우에 있어서는 魚群層內를 超音波가 亙越할 때, 魚群減衰와 多重散亂이 발생하여 魚群量의 推定値에 대한 信賴度가 저하한다는 문제점도 있다^{5)~8)}.

따라서, 本 研究에서는 이와같은 관점에 주목하여 積分方式의 魚群量推定法에 관한 실험적인 檢證을 시도하고, 또 計量魚群探知機의 정도를 개선하기 위한 문제들에 대하여 검토를 행하였다.

材料 및 方法

1. 水槽實驗

1) 魚體의 模擬標의 選定

超音波散亂體로서의 魚體는, 그 音響散亂特性이 실

험조건에 따라 매우 불규칙하게 변동하므로 해당 어체를 대표할 수 있는 평균적인 散亂強度를 정량적으로 도출하는 데에는 아직도 해결되어야 할 많은 문제점이 있다.

따라서, 本 研究에서는 魚群量推定理論을 檢證하기 위한 실험조건을 단순화하기 위한 방법으로 魚體보다 音響散亂特性이 理論的 및 實驗的으로 잘 규명되어 있는 steel ball (直徑 35mm)을 魚體의 模擬標의으로 선정하여 1次散亂理論의 檢證을 시도하였다.

2) 實驗條件의 設定

해중의 임의 體積空間內에서 유영하고 있는 魚體의 單位體積當의 分布密度는 Poisson 分布에 따르고, 또, 각각의 어체에 대한 공간적인 위치는 平等分布 (uniform distribution)에 따른다는 가정을 설정하여, 送受波器의 指向角內의 單位體積空間에 분포시킬 魚體의 數(魚群의 分布密度)와 魚體의 空間位置座標를 각각 Poisson 亂數와 uniform 亂數로서 발생시켜 亂數에 의해 결정된 위치좌표에 따라 각각의 魚體를 실험수조내에 배치시켰다. 또한 어체의 空間分布密度와 位置分布의 順시적인 변화는 Micro-

computer로서 모델화하여 실험에 적용하였다.

本 實驗에서 推定한 單位體積當의 標的의 平均分布密度는 5, 10, 15, 20, 25, 30 個/ m^3 이고, 각각의 標的群은 Fig.1에서와 같이 位置調整臺를 이용하여 無響水槽 중앙부의 정해진 위치에 懸垂시켰다. 한편, 標的群으로부터의 超音波 echo 信號는 위치조정대를 일정한 각도의 간격으로 회전시키는 방법으로 標的群의 空間분포상황을 변화시키면서 계속하였다.

3) 計測시스템

魚探信號의 收集, 解析 및 處理시스템은 Fig.2와 같다. 超音波 echo 信號는 50kHz와 200kHz의 二周波魚探機(JFV-216)를 사용하여 계속하고, 각각의 周波數에 대한 送受波器는 振動面이 수조의 중앙을 향하도록 수조 양단에 설치 하였다. 周波數別 振動子의 -6dB 點에 대한 指向角은 50kHz가 約 11度, 200kHz가 約 7.5度였다. Fig.3은 50kHz 振動子の 送信周波數特性으로서 白色雜音(white noise)을 音源으로 하여 구한 것이다. 즉, 振動子の 音軸上 約 2.5m의 거리에 水中音壓計(ST1001)를 설치하고, 振動子の 周波數帶域을 통과하여 水中音壓計에 수신

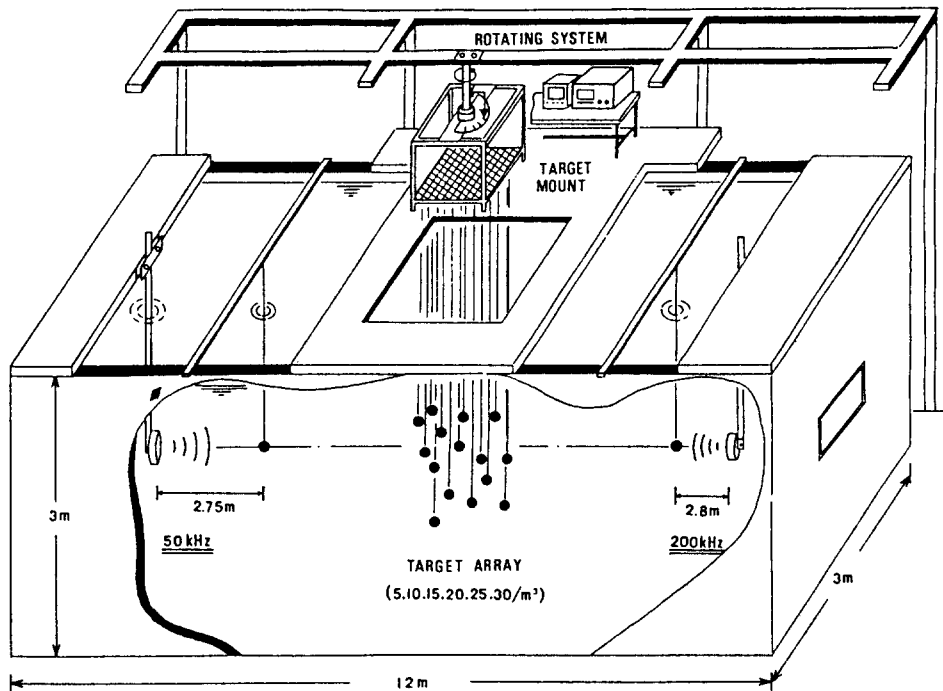


Fig. 1. Arrangement of experimental setup in water tank.

A fish aggregation was modeled as a collection of steel balls of 35mm in diameter.

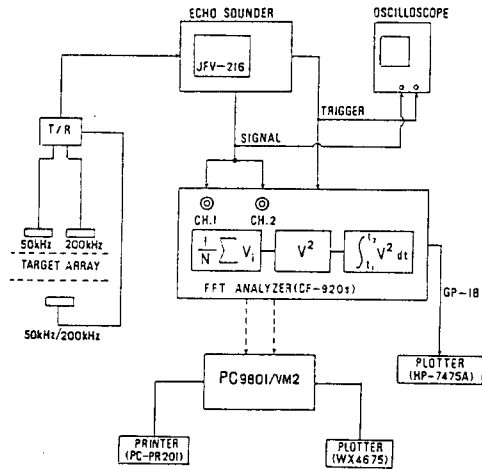


Fig. 2. Block diagram of data acquisition and processing system.

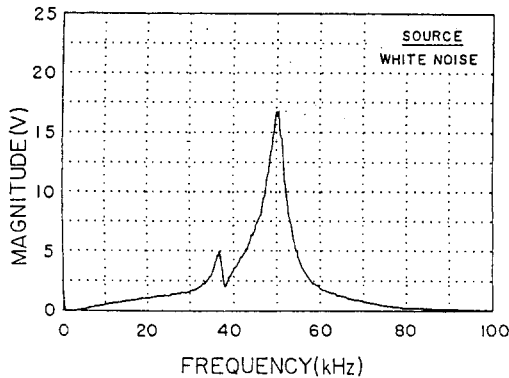


Fig. 3. Transmitting frequency response of a 50kHz transducer used in the experiment.

된 신호와 振動子에 입력된 白色雜音を 2 channel FFT analyzer (CF-920s)에 입력하여 구한 것으로, 共振周波數는 50.5 kHz였다. 또한, 50 kHz와 200 kHz用 振動子の 近距離 音場限界는 각각 2.5 m와 2.3 m였다.

魚深信號의 定量化는 2 channel FFT analyzer (CF-920s)를 사용하여 행하였다. 즉 魚深의 送信 trigger 信號와 同期하여 FFT analyzer에 입력된 魚群 echo의 包絡線信號를 A/D 變換部에서 12 bit의 分解能과 51.2 kHz의 샘플링 (sampling) 周波數로서 digital 化하고, 수조의 背景雜音を 軽減시키기 위하여 16회의 平均처리를 행하여, echo 信號의 peak를 檢出하고, 또, 標의 群이 분포하고 있는 體積구간에 대한 echo 信號를 대상으로 echo의 2乘積分

을 행함으로써 어군의 순시적인 분포상황에 대한 echo energy를 구하였다. 이와같이 수집된 echo data는 Micro-computer (PC-9801vm2)로서 分析하고, 그 結果는 plotter (WX4675)로서 圖表化하였다.

魚深시스템의 校正은 50 kHz와 200 kHz에 대하여 각각 直徑 41 mm와 30 mm의 steel ball을 사용하여 행하고, 이들의 標準球는 標의 群으로부터의 echo 信號와 동시에 檢측하였다.

2. 現場實驗

일반적으로, 海중의 單位體積空間에 분포하는 魚體의 數가 많을 수록 魚群層內에서 超音波가 減衰하는 정도는 높아지고, 또 어군의 表層部보다는 深層部로 갈 수록 送信 pulse 信號가 점차 미약해진다(魚群減衰現象). 또한, 이와같은 현상과는 대조적으로 어군을 구성하는 個體魚 상호간에는 多重散亂이 복잡하게 발생하여 魚群層을 통과한 pulse 信號가 送受波器로부터 發射된 pulse 信號보다 pulse 幅이 매우 길게 伸장되는 현상도 발생한다(多重散亂現象).

그러나, 이들 두가지의 현상은 동시에 발생되어 魚群 echo 信號의 生成에 영향을 미치기 때문에 현장에서 檢정한 魚群 echo 信號로부터 이들의 信號成分을 定量的으로 평가하는 것은 매우 어렵다.

따라서, 동일 장소에 어군이 出現할 때와 出現하지 않을 때의 각각에 대한 船底 直下의 海底로부터 산란되는 海底 echo 信號를 상호 비교, 檢토하면 魚群層의 존재에 기인한 海底 echo 信號의 變動成分을 파악할 수 있다는 점에 주목하여 다음의 실험을 행하였다.

1) 東支那海에서의 現場實驗

本 實驗은 1990年 7월에 東支那海에서 釜山水產大學校 實習船 새바다號 (trawler, G/T 2,275)를 이용하여 正박중에 행하였다. echo 信號의 計測 및 處理시스템은 TVG 增幅器를 구비한 送受波部와 Micro-computer (PC9801vm2), 또한 兩者를 연결하는 A/D 變換部 (EP-98ADCH)로 구성하였고, 현장에서는 floppy disk에 echo 信號를 收錄하고, 이 信號는 後日 실험실에서 分析하였다. 여기서는, 大型 魚群이 船底를 통과할 때와 통과한 후에 대한 각각의 全水層에 대한 平均 echo 波形을 구하고, 兩者의 差의 波形을 算出하여 船底 echo 信號속에 포함되어 있는 魚群減衰와 多重散亂에 의한 信號成分을 檢出하였다.

2) 定置網 人網魚群의 計測實驗

本 實驗에서는 단위체적공간에 어느 정도의 魚體數가 분포할 때, 어군층내에서 魚群減衰와 多重散亂이 발생하는가를 고찰하기 위해서, 定置網의 원통에 人網한 어군을 대상으로 실험을 행했다.

實驗은 50 kHz用 遠隔式 魚群探知機(TS-12 MARK-3)의 送受波器를 定置網의 원통에 설치하고, 超音波 echo 信號를 無線傳送하여 육상에 설치한 魚群探知機에 기록한 후, 記錄紙에 나타난 海底記錄과 그 때의 定置網으로부터 어획된 漁獲量을 상호 연관시켜 고찰을 행하였다.

結果 및 考察

1. 魚體의 反射周波數特性

魚群探知機의 送受波器에서 발사되는 超音波信號의 周波數帶域 範圍內에서 魚體의 模擬標的에 대한 反射周波數特性이 어떻게 변화하고 있는가를 검토하고, 또 표적에 대한 理論 echo 波形과 실측한 echo 波形을 상호 비교한 結果는 Fig.4와 같다.

Fig.4에서 (A-1)은 steel ball (密度 7.7 g/cm^3 , 縱波의 音速 5850 m/sec , 橫波의 音速 3230 m/sec)의 反射形狀函數의 絕對值 $|f_{\omega}(ka)|$ 와 送受波器에서 발사된 50 kHz의 pulse 信號의 振幅 spectrum $|X(ka)|$ 를 서로 중첩시켜 無次元周波數 ka 에 대하여 표시한 것으로, 여기서, k 는 波數($k=2\pi/\lambda$, λ : 波長)이고, a 는 steel ball의 半徑이다. (A-2)의 (A)는 標的의 理論 echo 波形으로서, 이것은 送受波器의 送信 및 受信 周波數特性을 고려하여 4096 點의 FFT演算으로서 구한 것이고, (B)는 실험수조에서 실측한 echo 波形으로서, 振幅의 peak 値가 1이 되도록 正規化하여 나타낸 包絡線波形이다.

Fig.4에서 표적에 입사하는 入力信號의 周波數帶域內에서 표적의 反射周波數特性은, 그 변화상태가 비교적 완만하여 echo 波形에 뚜렷한 波形歪가 발생하고 있지 않을 뿐만아니라, 이론적 및 실험적인 echo 波形이 잘 일치하고 있다. 따라서, 本 研究에서 體積散亂理論을 檢證하기 위해 선정한 표적은 음향학적인 관점에서 매우 양호한 超音波散亂體라고 판단된다.

일반적으로, 어체에 의한 散亂 echo 信號의 波形과 振幅은 어체의 音響特性(音響 impedance, 形狀, 크기, 부레의 유무)과 測定周波數 등에 따라 복잡하게 변동하기 때문에 동일한 어체에서도 종종 몇개의

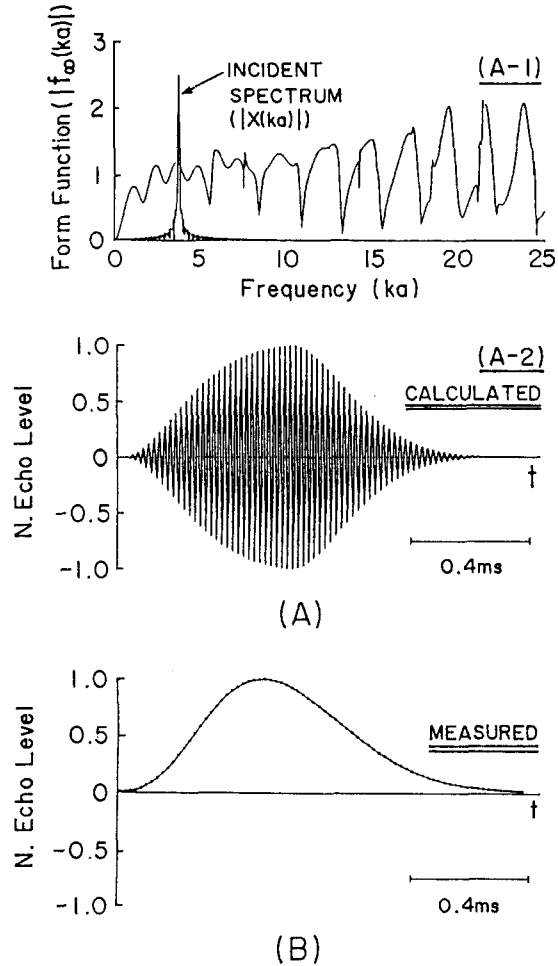


Fig. 4. Comparison of measured and calculated echoes for a steel ball of 35mm in diameter at 50kHz.

(A-1) Spectrum of incident pulse superimposed on the form function of steel ball.

(A-2) Calculated echo signal.

(B) Measured echo envelope.

echo 信號가 서로 분리되어 관측되는 경우가 있다.

여기서는, 이와같은 현상이 발생하는 echo 生成機構를 검토할 목적으로, 體長이 36 cm인 고등어를 麻醉시킨 상태에서 5 종류의 주파수에 대하여 각각의 echo 信號를 측정된 결과는 Fig.5와 같다.

Fig.5에서 左側은 송수파기에서 발사되는 pulse 信號의 周波數를 변화시키면서, 그 때마다 어체를 위치시킬 지점에 水中音壓計를 설치하여 送波 pulse 信號의 周波數 spectrum을 구한 것이고, 右側은 spectrum의 peak 周波數가 각각 47.8 kHz (A),

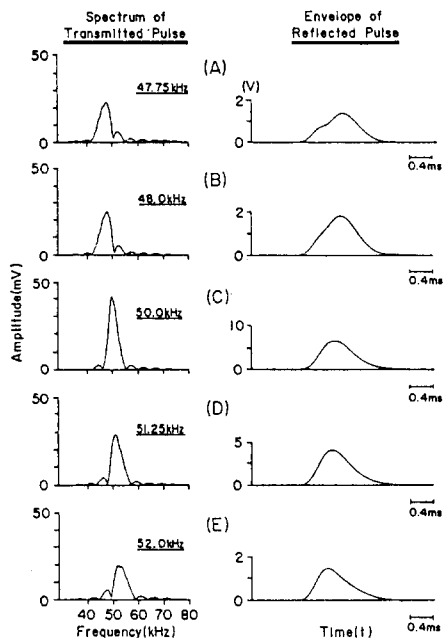


Fig. 5. Fluctuations in fish echoes caused by the change of the measuring frequency. The echoes is from a mackerel of 36cm in body length.

48.0 kHz (B), 50.0 kHz (C), 51.3 kHz (D), 52.0 kHz (E) 일 때에 대한 echo 信號의 包絡線波形을 나타낸 것이다.

Fig.5에서 알 수 있는 바와 같이 어체로부터의 echo 신호는 각각의 測定周波數에 따라, 그 振幅과 波形이 변화하고 있다. 이와같은 현상은 測定周波數의 帶域內에서 어체의 反射周波數特性이 변화하기 때문에 발생하는 것으로 판단되므로, 計量魚群探知機에 의해 어군량을 추정할 때, 魚體의 energy target strength를 측정하여 이용하면, 그 推定值의 精度를 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다. 또한, 이와 같은 echo·신호의 周波數 依存性에 관한 정보는 魚種을 식별하는 指標로서 이용될 수 있기 때문에, 최근 이에 대한 연구가 주목되고 있다.

2. 魚群減衰와 多重散亂 效果

1) 水槽實驗

送受波器의 音束(sound beam)내에서 5個/ m^3 의 標의 群이 音軸上의 어떤 점을 중심으로 單位體積空間에 random하게 분포하고(表層標의 群), 또, 이것의 後方 1.9 m (50 kHz)와 1.4 m (200 kHz)의 音軸上의

단위체적공간에 30個/ m^3 의 標의 群(深層標의 群)이 random하게 분포하는 경우, 表層의 標의 群에 의한 산란파가 深層의 標의 群으로부터의 超音波散亂에 미치는 영향을 50 kHz와 200 kHz에 대하여 검토한 결과는 Fig.6 및 Fig.7과 같다.

Fig.6는 深層標의 群의 上部에 表層標의 群이 존재함으로써 인해서 深層標의 群의 echo 信號가 변동하고 있음을 나타낸 것이다. 즉, (A1)과 (B1)은 表層標의 群이 존재하지 않을 때의 深層標의 群의 echo 信號이고, (A2)와 (B2)는 表層標의 群이 존재할 때의 深層標의 群에 의한 echo 信號이다.

Fig.7은 Fig.6에서 (A1), (B1)과 (A2), (B2)의

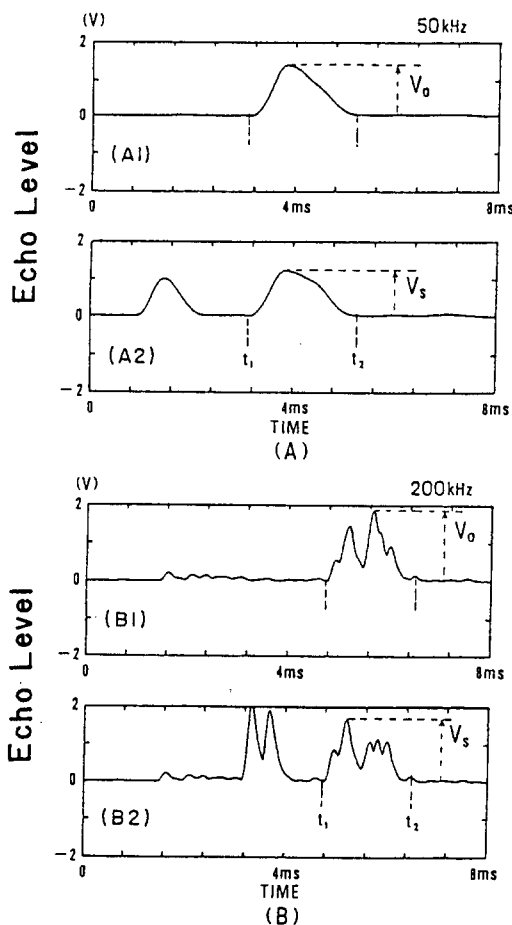


Fig. 6. Interference effects occurring when a collection of 30 targets/ m^3 lie in the shadow region behind another collection of 5 targets/ m^3 at 50 kHz (A) and 200 kHz (B). (A1), (B1) Without 5 targets/ m^3 (A2), (B2) With 5 targets/ m^3 .

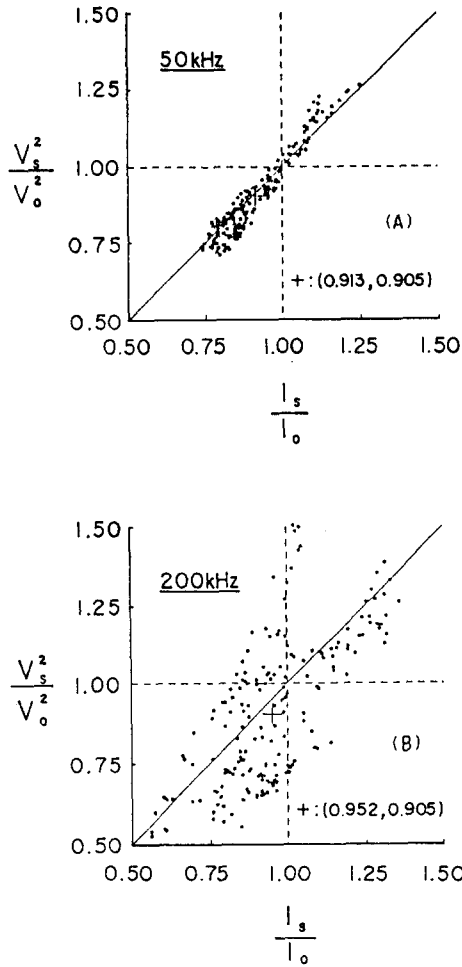


Fig. 7. Fluctuations in backscattering echoes by the 30 targets/ m^3 lying in the shadow region behind the 5 targets/ m^3 of Fig. 6 at 50kHz (A) and 200kHz (B).
The $(V_s/V_o)^2$ indicates the square of ratio of the echo peak values and (I_s/I_o) , the ratio of the echo energy values.
The mean values are indicated by the plus signs.

深層標의群에 대한 echo 信號의 peak 振幅을 각각 V_o, V_s , 또 時間 $[t_1, t_2]$ 區間에 대한 echo energy 를 각각 I_o, I_s 라고 할 때, $(V_s/V_o)^2$ 와 (I_s/I_o) 의 관계 를 나타낸 것이다.

Fig.6에서 表層標의群에 의한 超音波散亂波가 深層標의群의 echo 生成에 미치는 영향는 50 kHz보다 200 kHz에서 더욱 현저하여, 200 kHz에 대한 深層標의群의 echo 信號가 50 kHz보다 매우 불규칙하게 변동하고 있다.

Fig.7에서 兩周波數에 대한 $(V_s/V_o)^2$ 와 (I_s/I_o) 값은 50 kHz보다 200 kHz에서 그 변동이 매우 크다. 한편, 그 平均值는, 50 kHz의 경우가 약 0.91로서 서로 같고, 200 kHz에서는 각각 0.91과 0.95로서, 兩周波數에서 이들의 값은 모두 1 보다 작다. 즉, 이것은 表層標의群의 存在에 의해 深層標의群에 입사하는 超音波 energy가 차단되는 현상, 소위 그늘효과 (shadowing effect)가 발생하고 있다는 것을 암시하는 증거이고, 특히, 분포밀도가 濃密한 어군에서 발생하는 魚群減衰現象은 이것과 직접적인 관계가 있는 것으로 판단된다.

2) 現場實驗

東支那海에서 全水深層에 대한 超音波 echo 信號를 연속적으로 收錄하고, 船底 直下의 해중에 어군이 존재할 때와 존재하지 않을 때의 각각에 대하여 海底 echo 信號를 분석하여, 魚群層의 존재에 기인하는 海底 echo 信號의 변동을 검토한 結果는 Fig.8 및 Fig.9와 같다.

Fig.8은 어군이 船底를 통과할 때, 全水深層에 대한 echogram을 10 秒간격으로 125 ping 연속적으로 측정된 것으로, 縱軸은 echo level (V)이고, 橫軸은 水深(m)이다. Fig.8에서 水深은 약 53 m이고, 5 m에서 45 m까지에는 魚群에 의한 echo 信號가 매우 강하게 출현하고 있다.

Fig.9의 (A)는 魚群이 존재하지 않을 때의 全水深層에 대한 平均 echo 信號($E_N(t)$)이고, (B)는 魚群이 존재할 때(Fig.8)의 全水深層에 대한 平均 echo 信號($E_F(t)$)이며, (C)는 (A)와 (B)의 差의 信號($E_F(t) - E_N(t)$)이다. Fig.9의 (A)와 (B)에서 水深 65 m~85 m 區間에 대한 平均 echo level과, 이 平均 level에 대한 等價 pulse 幅은 각각 0.49 V, 15.5 ms(A)와 0.74 V, 38.8 ms(B)로서, (B)의 경우가 (A)보다 平均 level은 약 1.5 배, 等價 pulse 幅은 약 2.5 배 더 컸다.

한편, Fig.9의 (C)에서 $E_F(t) - E_N(t)$ 의 信號는 水深 55 m~65 m 區間((C-1))에서 負의 信號가 우세한 반면, 水深 65 m~85 m 區間((C-2))에서는 正의 信號가 지배적이다. 즉, 船底 直下에 어군이 존재함으로 인해서 (C-1)區間에서의 海底 echo level은 약해졌고, (C-2)區間에서는 그 반대로 강해졌다는 것을 알 수 있다.

Fig.9의 (C-1)구간에서 발생한 海底 echo level의 減衰現象은 送波器에서 발사된 超音波信號가 魚群層, 海底, 魚群層의 徑路를 통하여 散亂되는 동안,

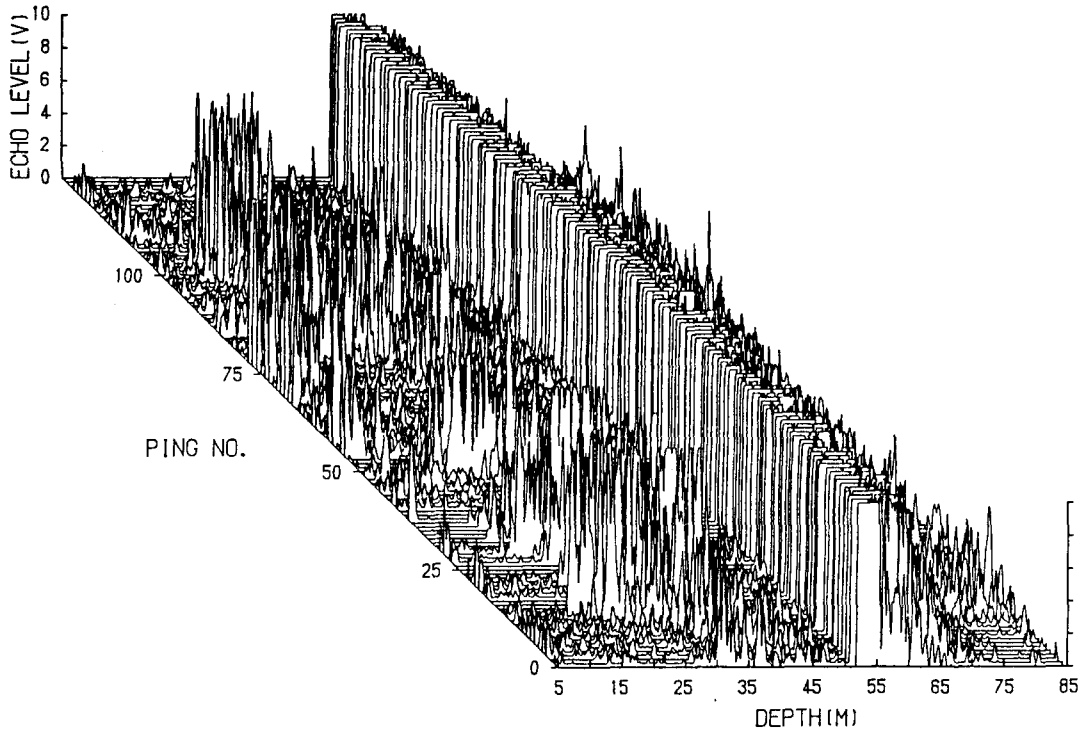


Fig. 8. Three-dimensional plot of fish-school echoes measured with $20 \text{ Log}(R)$ amplification in the East China Sea.

魚群層에서 pulse energy의 일부가 吸收, 減衰됨으로서 pulse 信號의 強度가 점차 약화된 것에 기인하고(魚群減衰效果), 또한, (C-2)구간에서 echo level과 pulse 幅이 增加한 것은, 어체 상호간에 多重散亂이 발생하여 送波信號의 pulse 幅이 魚群層의 두께에 비례하여 伸長된 結果에 기인한다고 판단된다.

이와같이 魚群層內에서 魚群減衰 및 多重散亂이 발생하여 海底 echo 信號의 振幅과 pulse 幅이 變動하는 경우에 있어서는, 이것에 비례하여 魚群에 의한 超音波 echo 信號의 振幅과 pulse 幅에도 變化가 초래된다고 생각되나, 對象魚群의 分布量과 echo 信號의 變動量의 關係를 定量的으로 해석하는 것이 매우 어렵기 때문에, 積分方式의 魚群量推定法에서는 이에 대한 영향을 전혀 고려하고 있지 않다.

따라서, 이 문제를 검토하기 위하여 魚群의 分布量을 알 수 있는 定置網에서 원통에 人網한 魚群을 대상으로 실험적인 高찰을 행하였다.

定置網에서 50 kHz用 遠隔式 魚群探知機를 사용하여 收錄한 全水深層에 대한 魚深記錄의 一例를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig.10은 1986年 11月 19日에 日本 北海道沿岸의 水深 約 50 m의 海域에 設置된 定置網에서 收錄한 것으로, 정어리가 約 57 ton 漁獲된 경우의 魚探記錄이다.

Fig.11은 이 때에 어획된 정어리의 體長과 體重의 關係를 나타낸 것으로, 平均體長과 平均體重은 각각 14.0 cm, 32.6 g이었다. 定置網의 圓筒 體積(約 48, 649 m³)과 漁獲量, 또, 정어리의 平均體重으로부터 單位體積當에 분포하는 정어리의 魚群密度를 추정한 結果, 約 36 마리/m³이었다.

Fig.10에서 주목되는 것은, (A)와 (B)에서 魚群直下の 海底記錄의 일부가 消失되어 記錄紙上에 나타나지 않고, 또, (B)에서는 魚群 echo 信號의 기록이 해저까지 伸長되어 나타나고 있는 점이다. (A)와 (B)에서 海底記錄이 消失된 主要原因은, Fig.9에서 알 수 있었던 바와 같이, 送波器에서 發射된 pulse 波가 魚群層을 透반하는 동안 信號強度가 점차 減衰됨으로서, 해저에 의한 echo level이 魚群探知機의 threshold level보다 약해진 데 기인하고, (B)에서 魚群記錄이 伸長된 것은 다음의 散亂 mechanism에 기인한다고 생각된다. 즉 魚群層에 입사한 pulse 信

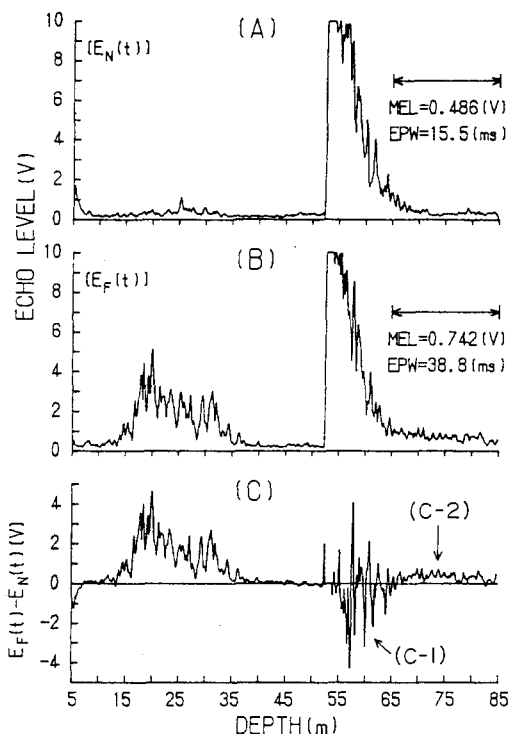


Fig. 9. The fluctuation of bottom echoes caused by the fish school existing between transducer and sea bottom.
 (A) Without fish school.
 (B) With fish school.
 (C) The fluctuation of bottom echoes due to the existence of fish school. (C-1) and (C-2) indicate the effects of fish-school attenuation and multiple scattering, respectively.

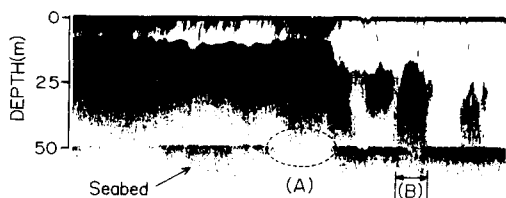


Fig. 10. A echogram of sardine school obtained by a 50kHz teleounder in a set-net's bagnet. The schooling density of sardine was 36 fish/m³.

호가 각각의 個體魚에서 산란될 때, 그 散亂波는 該當魚體의 遊泳姿勢에 따라 散亂指向性을 갖게된다. 이 때 각각의 個體魚에 의한 1次散亂波는 受波器에서 合成되어 魚群 echo 信號를 生成하나, 기타의 散亂成分은 주위의 魚體에 의해 다시 산란되는, 소위 多

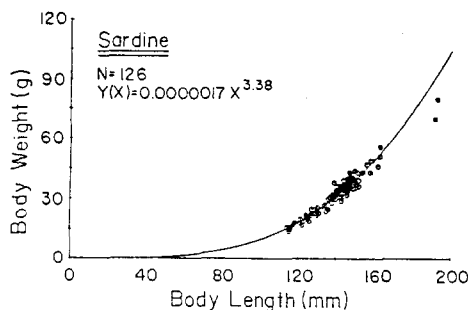


Fig. 11. The relationship between body length and body weight of sardines, *Sardinops melanostictus*, caught by the set-net.

重散亂을 거듭하여 부가적인 echo 信號를 생성시킨다. 그러나, 이 多重散亂信號는, 散亂波가 多數의 어체간을 왕복한 만큼, 送受波器에의 受信時間이 1次散亂信號보다 늦어지기 때문에, Fig.10의 (B)에서와 같이, 魚群記錄의 後方に 긴 꼬리모양으로 多重散亂信號가 나타남으로서, 어군의 규모를 실제보다 확대시키는 요인이 되고 있다. 따라서, 이와같은 기록상에 대한 정보를 토대로 실제의 魚群에 대한 echo 信號만을 推出하면, 魚群量의 推定精度를 더욱 향상시킬 수 있다고 생각한다.

또한, 앞서 定置網의 어획자료를 이용하여 산출한 魚群密度와 Fig.10의 魚探記錄에 나타나는 기록상을 고려할 때, 적어도 單位體積當에 분포하는 魚群密度가 36 마리/m³(魚群重量 1,172g/m³) 이상되면 魚群層內에서는 魚群減衰와 多重散亂이 발생한다고 판단된다.

3. 分布密度의 推定

實驗水槽에서 模擬魚群의 空間的인 分布狀況이 시시각각으로 변화함에 따라 群體 echo 信號가 불규칙적으로 변동하는 현상을, 50 kHz와 200 kHz의 周波數에서, 送信 ping 數에 대하여 연속적으로 기록한 -例는 Fig.12와 같다.

Fig.12에서 (A)와 (B)는 각각 50 kHz와 200 kHz에 대한 Echo信號로서, 縱軸은 echo level (V), 橫軸은 水深에 상당하는 時間(ms)이다.

本 實驗에서는 魚探시스템을 매 측정시마다 較正하기 위하여 標의群의 前方과 後方に 각각 較正球를 설치하고, 이들 較正球에 의한 echo 信號와 標의群에 의한 echo 信號를 동시에 측정하여 시스템 常數, echo 強度, 等價 pulse 幅 등을 구하였다. 標의의 分布密度는 이들의 값과 送受波器의 等價指向角 등에

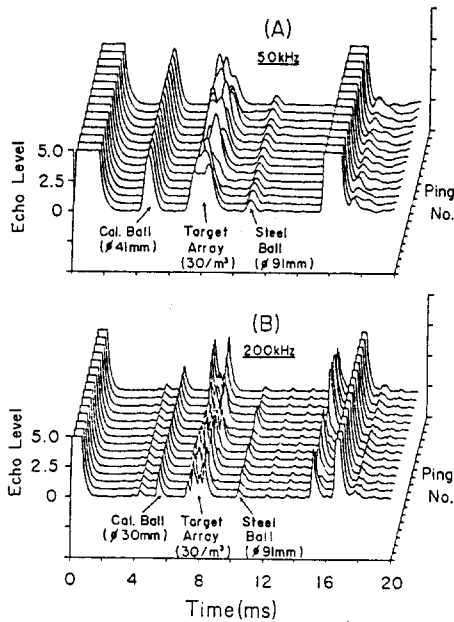


Fig. 12. Three-dimensional plots of the echoes by 30 targets/ m^3 measured at 50kHz (A) and 200 kHz (B) in the water tank.

대한 자료를 이용하여 積分方式의 魚群量推定法에 따라 推定하였다.

50kHz와 200kHz의 周波數에 대한 標의群의 平均體積散亂强度和 標의 平均分布密度와의 관계는 Fig.13과 같다. Fig.13에서 (A)와 (B)는 각각 50 kHz와 200 kHz에 대한 結果로서, 縱軸은 後方體積散亂强度의 平均值($\langle SV \rangle$, dB)이고, 橫軸은 單位體積當에 분포하는 標의密度의 對數值($\text{Log}(\rho)$, ρ : 個/ m^3)이다. 그림에서 點線은 積分方式의 魚群量推定法에 의한 理論的인 豫測值이고, ●은 實測한 平均體積散亂强度이며, 實線은 平均體積散亂强度의 實測值에 의한 回歸直線이다. 여기서, 平均體積散亂强度는, Fig.12에서와 같이 送波器에서 pulse 신호(ping)가 發시될 때마다 수신되는 群體 echo 信號를 二乘積分하여 集合平均한 後, 標의群이 분포하고 있는 空間體積을 고려하여 추정하였다.

Fig.13에서 兩周波數에 대한 平均 SV의 實測值는 標의 分布密度가 증가함에 따라 직선적으로 증가하는 傾向을 나타내었고, 또, 그 回歸直線式은 各周波數에서

$$50 \text{ kHz} : \langle SV \rangle = -46.2 + 13.7 \text{ Log}(\rho),$$

$$r = 0.98 \dots \dots \dots (1)$$

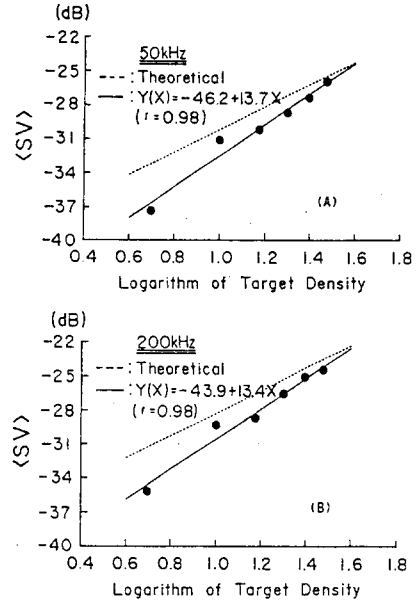


Fig. 13. Comparison of measured and calculated values of mean volume backscattering strength($\langle SV \rangle$) as a function of the logarithm of target density at 50kHz(A) and 200kHz(B).

$$200 \text{ kHz} : \langle SV \rangle = -43.9 + 13.4 \text{ Log}(\rho),$$

$$r = 0.98 \dots \dots \dots (2)$$

이었다.

한편, 積分方式의 魚群量推定法에서 이용하고 있는 $\langle SV \rangle$ 와 ρ 에 대한 理論的인 관계는 (3)式과 같다.

$$\langle SV \rangle = \langle TS \rangle + 10 \text{ Log}(\rho) \dots \dots \dots (3)$$

여기서, $\langle TS \rangle$ 는 魚群을 구성하는 個體魚의 平均反射强度로서, 本 研究에서 魚體의 模擬標의으로서 도입한 steel ball의 實測值는 50 kHz와 200 kHz에서 각각 -40.2 dB , -39.8 dB 이었고, 理論值는 -41.2 dB 이었다.

해중에 분포하는 어군의 平均體積散亂强度 $\langle SV \rangle$ 와 해당어군을 구성하는 어체의 平均反射强度 $\langle TS \rangle$ 를 측정하여 (3)式에 대입하면 단위체적당에 분포하는 어군의 分布密度 ρ 를 현장에서 직접 구할 수 있고, 또, 이것을 全海域에 대하여 확장하면 대상해역의 漁業資源을 평가할 수 있다. 이것이 計量魚群探知機에 의한 魚群量推定法의 基本개념이다.

(3)式의 理論式과 (1)式 및 (2)式의 實驗式을 비교

할 때, 50 kHz와 200 kHz의 周波數에서 實驗式에 대한 回歸直線式의 기울기는, 각각 13.7과 13.4로서, 理論豫測值 10보다 平均 3.55가 더 컸다.

또한, (1)式과 (2)式에서 標의群을 구성하는 單體標의에 대한 平均反射強度의 推定値는 50 kHz와 200 kHz에서 각각 -46.2 dB, -43.9 dB로서, 이 값은 標의의 理論的인 反射強度 -41.2 dB보다 각각 5.0 dB과 2.7 dB이 더 낮았다.

한편, Fig.13에서 平均 SV의 實測値는 兩周波數에서 標의의 分布密度가 증가함에 따라 점차 理論的인 豫測値에 접근하여 감을 알 수 있다. 따라서, 이와같은 現象으로부터 計量魚群探知機를 이용하여 魚群量을 評價할 때, 魚群의 分布密度가 매우 낮은 경우에 있어서는, 그 推定誤差가 커진다는 것을 예측할 수 있다.

本 研究에서 계측한 標의의 실제적인 分布密度와 積分方式의 魚群量推定法에 의해 추정한 分布密度를, 50 kHz와 200 kHz에 대하여 상호 비교, 검토한 結果는 Fig.14와 같다.

Fig.14의 (A)와 (B)는 각각 50 kHz와 200 kHz에 대한 結果로서, 縱軸은 分布密度의 推定値(個/ m^3)이고, 橫軸은 실제의 分布密度(個/ m^3)를 나타낸 것이다. 그림에서 實線은 理論的인 豫測値이고, ●은 각각의 分布密度에 대한 平均 SV의 實測値(Fig.13)와 個體標의에 대한 平均反射強度의 實測値를 (3)式에 대입하여 單位體積當에 분포하는 標의의 分布密度 ρ 를 추정된 結果이다.

Fig.14에서 실제의 分布密度가 5, 10, 15, 20, 25, 30個/ m^3 였을 때, 그 推定値는 50 kHz의 경우에서 2.0, 8.1, 9.9, 14.1, 19.2, 26.7個/ m^3 이었고, 200 kHz의 경우에 있어서는 2.0, 8.0, 9.1, 15.0, 20.1, 24.1個/ m^3 이었다. 즉, 單位體積當에 分布하는 標의의 分布密度가 낮을 수록, 그 推定値에 대한 信賴度가 낮아지는 경향을 나타내었고, 또, 兩周波數에 대한 平均적인 값은 실제보다 約 30% 정도 過小推定되었음을 알 수 있다.

이와같이 標의의 分布密度가 실제보다 낮게 推定된 가장 근본적인 原因으로서, <SV>와 ρ 間에 성립하는 이론적인 관계가 실험적으로 유도한 結果와 서로 일치하고 있지 않는 점을 들 수 있으나, 이 문제에 대한 검토는 장래의 연구과제로 하고자 한다.

또한, 現場에서 魚群의 平均體積散亂強度와 해당어군을 구성하는 個體魚의 平均反射強度를 계측하면 魚群量의 推定이 가능하지만, 실제의 경우에 있어서는

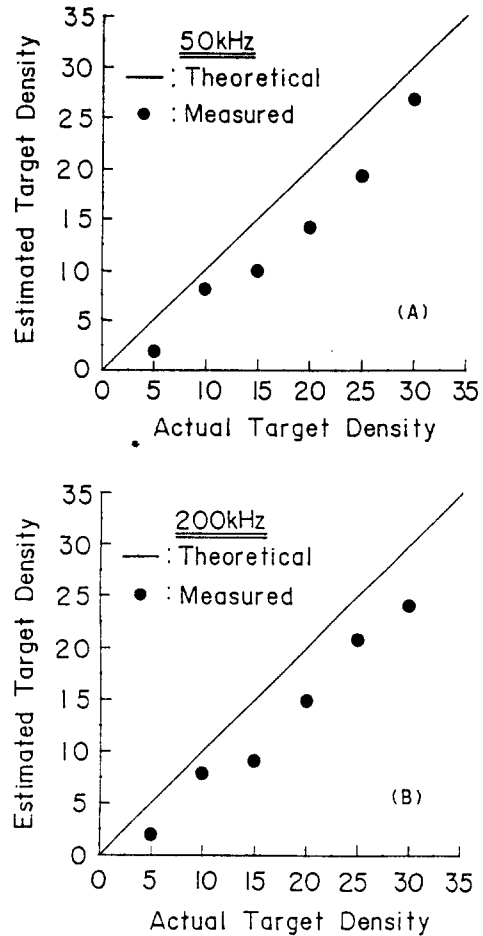


Fig. 14. Comparison of estimated and actual target densities at 50 kHz (A) and 200 kHz (B).

어군의 분포가 理論的인 假定을 만족시키지 않는 경우가 많고, 특히 多數의 어종이 混在하여 분포하는 것이 보통이므로, 이 문제에 대한 검토도 필요하다.

따라서, 장래에는 現場에서 全水深層에 대한 散亂信號의 계측을 trawl에 의한 漁獲試驗과 병행하여 행하고, trawl 曳網層에 대한 平均體積散亂強度와 당시 어획된 漁獲量의 관계로부터 어체 1 마리당 的平均反射強度, 또는 魚體 1 kg당의 平均反射強度를 추정하는 문제를 검토하고, 이것을 計量魚群探知機에 도입하여 漁業資源의 평가를 시도하고자 한다.

要 約

積分方式에 의한 魚群量推定法을 실험적으로 檢證하기 위하여, 실험수조에서 50 kHz와 200 kHz의 周

波數를 대상으로 模擬魚群의 分布密度와 超音波散亂強度의 關係를 검토하고, 또 計量魚群探知機의 精度를 개선하기 위한 문제들에 대하여 高찰을 행한 結果를 要約하면 다음과 같다.

1. 魚體의 模擬標的으로 이용한 steel ball (直徑 35 mm)의 實測 echo 波形은 理論 echo 波形과 잘 일치하였다.

2. 5 종류의 周波數에 대하여 高등어(體長 36 cm)의 反射周波數特性을 조사한 結果, 測定周波數가 變化함에 따라 어체에 의한 echo 信號의 振幅과 波形이 크게 변동하고 있음을 알 수 있었다.

3. 透受波器의 音束內에서 5個/ m^3 와 30個/ m^3 의 標的群이 서로 상하로 존재할 때, 上部 標的群의 존재에 의해 下部 標的群의 echo level이 -0.43 dB 減衰하는, 소위 그늘효과 (shadowing effect)가 발생하였다.

4. 東支那海에서 碇泊中에 탐지한 高密度 魚群의 echo信號와 그 魚群直下의 海底에서 산란된 echo信號를 상호 연관시켜 분석한 결과, 魚群層內에서 발생한 魚群減衰와 多重散亂效果가 海底 echo信號의 변동에 큰 영향을 미치고 있음 알 수 있었다.

5. 定置網의 원통에 人網한 정어리의 單位體積當에 대한 分布密度가 36 마리/ m^3 였을 때, 海底記錄이 消失되는 魚群減衰現象과, 魚群 echo信號가 海底까지 伸장되는 多重散亂現象이 동시에 발생하였다.

6. 50 kHz와 200 kHz의 周波數에서 標的群의 平均體積散亂強度($\langle TS \rangle$: dB)와 標的의 分布密度(ρ : 個/ m^3)의 間에 다음의 回歸直線式을 얻었다.

$$50 \text{ kHz} : \langle SV \rangle = -46.2 + 13.7 \text{ Log}(\rho)$$

$$200 \text{ kHz} : \langle SV \rangle = -43.9 + 13.4 \text{ Log}(\rho)$$

7. 標的의 分布密度가 5, 10, 15, 20, 25, 30 個/ m^3 였을 때, 積分方式에 의한 推定値는 50 kHz에서 2.0, 8.1, 9.9, 14.1, 19.2, 26.7 個/ m^3 이었고, 200 kHz에서는 2.0, 8.0, 9.1, 15.0, 20.1, 24.1 個/ m^3 이었으며, 單位體積當에 分布하는 標的의 數가 많을수록, 그 推定値의 精度가 높아지는 경향을 나타내었다. 또한, 兩周波數에서 分布密度의 推定値는 실제보다 約 30%정도 過小推定되었다.

參考文獻

1) 李昊在(1988) : 魚群의 超音波散亂特性에 關する 基礎的研究. 北海道大學 大學院, 博士學位論文,

130.
2) Foote, K.G.(1983) : Linearity of fisheries acoustics, with addition theorems. J.Acoust. Soc.Am. 73, 1932-1940.
3) Lowzow, J.B. and J.B. Suomala(1971) : The application of hydroacoustical methods for aquatic biomass measurements. Charles Stark Draper laboratory Rep. R-712, 92.
4) MacLennan, D.M.(1981) : The theory of solid spheres as sonar targets. Scottish Fisheries Research Report 22, 17.
5) Maxwell, D.R.(1980) : Hydroacoustic estimation of dense or extensive fish populations. PH. D. thesis, Univ. of Washington, 161.
6) Stanton, T.K.(1983) : Multiple scattering with application to fish-echo processing. J. Acoust. Soc. Am. 73, 1164-1169.
7) Stevenson, E.A.(1974) : A theory for multiple target scattering. PH. D. thesis, Mississippi Univ., 167.
8) Nanda, J.N.(1978) : Determination of volume scattering and possibly biological content from sea-bottom echo fluctuations. J. Acoust. Soc. Am. 63, 618-620.
9) Shotton, R.(1983) : Linearity of echo response from herring schools. Fish Capture Committee, 20.
10) MacLennan, D.N.(1990) : Acoustical measurement of fish abundance. J. Acoust. Soc. Am. 87, 1-15.
11) Weston, D.E. and H.W. Andrews(1990) : Seasonal sonar observations of the diurnal shoaling times of fish. J. Acous. Soc. Am. 87, 673-680.
12) Rose, G.A. and W.C. Legget(1988) : Hydroacoustic signal classification of fish schools by species. Can. J. Aquat. Sci. 45, 597-604.
13) Thorne, R.E. and G.L. Thomas(1990) : Acoustic observations of gas bubble release by pacific herring(*Chupea harengus pallasi*). Can. J. Fish. Aquat. Sci. 47, 1920-1928.